THE

LAST CODEX

Wäre alles verloren, finge hier alles wieder an.

Die Erfindungen der Menschheit: was sie sind, wie sie funktionieren und wie man sie wieder baut.

Druckausgabe vom 14. Oktober 2026
https://lastcodex.org

Inhalt

I Überleben

Steinwerkzeuge vor 3,3 Millionen Jahren · 5
Beherrschung des Feuers vor 1 Million Jahren · 9
Seil & Schnur vor 50.000 Jahren · 13

II Sesshaftigkeit

Pfeil & Bogen vor 62.000 Jahren · 18
Töpferei vor 18.000 Jahren · 23
Brot vor 12.400 Jahren · 27
Kalk und Kalkmörtel vor 10.000 Jahren · 31
Trinkwasser um 8.400 v. Chr. · 35
Ziegel um 7.500 v. Chr. · 40
Weben um 6.700 v. Chr. · 44
Pökeln & Einsalzen um 6.050 v. Chr. · 48
Bewässerung um 6.000 v. Chr. · 52
Käse um 5.500 v. Chr. · 57
Pflug um 5.000 v. Chr. · 61
Holzkohle um 4.500 v. Chr. · 65
Färben um 4.200 v. Chr. · 70
Bogen und Gewölbe um 3.500 v. Chr. · 74
Bier um 3.500 v. Chr. · 79
Rad & Achse um 3.500 v. Chr. · 83
Schrift um 3.300 v. Chr. · 87
Segel um 3.200 v. Chr. · 91
Seife um 2.800 v. Chr. · 95
Stellenwertsystem um 2.050 v. Chr. · 99
Ledergerbung um 1.500 v. Chr. · 103
Sonnenuhr um 1.500 v. Chr. · 107
Fruchtfolge um 700 v. Chr. · 111
Schloss & Schlüssel um 700 v. Chr. · 116

III Handwerk & Städte

Töpferscheibe um 4.000 v. Chr. · 121
Bronze um 3.300 v. Chr. · 125
Maße und Gewichte um 3.000 v. Chr. · 129
Glas um 2.500 v. Chr. · 134
Eisenverhüttung um 1.200 v. Chr. · 138
Stahl um 1.000 v. Chr. · 143
Aquädukt um 690 v. Chr. · 148
Kran & Flaschenzug um 515 v. Chr. · 152
Zahnräder um 300 v. Chr. · 156
Wasserrad um 300 v. Chr. · 160
Kolbenpumpe um 270 v. Chr. · 164
Römischer Beton um 200 v. Chr. · 168
Papier um 150 v. Chr. · 172
Destillation um 300 · 176
Kummet um 480 · 180
Schwarzpulver um 850 · 184
Windmühle um 900 · 188
Spinnrad um 1000 · 192
Magnetkompass um 1088 · 196
Brille um 1286 · 200
Räderuhr um 1300 · 204
Druckerpresse um 1440 · 208

IV Wissenschaft & Industrie

Astronavigation um 1460 · 213
Mikroskop um 1590 · 217
Fernrohr 1608 · 221
Thermometer und Barometer um 1654 · 225
Dampfmaschine 1712 · 230
Heißluftballon 1783 · 234
Impfung 1796 · 238
Batterie 1800 · 243
Dampflokomotive 1804 · 247
Konserven & Pasteurisierung 1810 · 251
Fahrrad 1817 · 256
Portlandzement 1824 · 260
Fotografie um 1827 · 264
Wasserturbine 1827 · 268
Nähmaschine 1830 · 273
Elektrischer Generator 1831 · 277
Elektromotor 1834 · 281
Kältetechnik 1834 · 285
Elektrischer Telegraf 1837 · 289
Vulkanisierter Kautschuk 1839 · 293
Anästhesie 1846 · 297
Hygiene und Antisepsis 1847 · 302
Bleiakkumulator 1859 · 307

V Elektrisches Zeitalter

Stahlbeton um 1848 · 313
Verbrennungsmotor 1876 · 318
Telefon 1876 · 322
Glühlampe 1879 · 326
Dampfturbine 1884 · 330
Transformator 1885 · 335
Aluminium 1886 · 340
Windkraftanlage 1887 · 344
Radio um 1895 · 349
Röntgenaufnahme 1895 · 353
Flugzeug 1903 · 357
Penicillin 1928 · 361
Transistor 1947 · 366
Computer 1948 · 370
Solarzelle 1954 · 375
Orale Rehydratation 1968 · 380

I

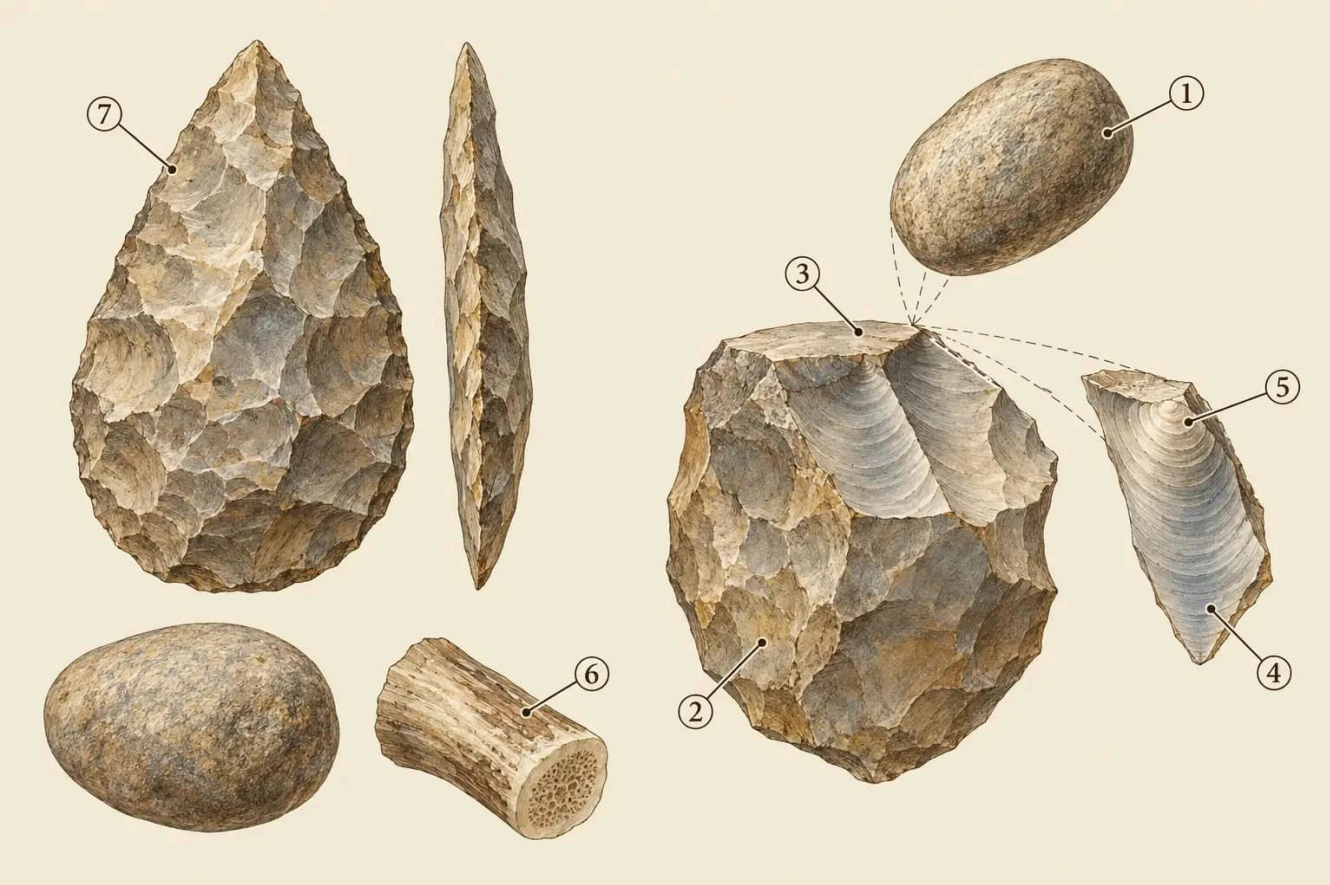
Überleben

Steinwerkzeuge

Die erste Schneide

vor 3,3 Millionen Jahren · Vorgeschichte · Überleben

Führt zu: Bogen und Gewölbe (S. 74), Pfeil & Bogen (S. 18), Holzkohle (S. 65), Bewässerung (S. 52), Ledergerbung (S. 103), Kalk und Kalkmörtel (S. 31), Schloss & Schlüssel (S. 116), Maße und Gewichte (S. 129), Pflug (S. 61), Rad & Achse (S. 83), Schrift (S. 87)



1 Schlagstein 2 Kernstein 3 Schlagfläche 4 Abschlag 5 Schlagbuckel (Bulbus) 6 Geweihschlägel 7 Faustkeil

Die meisten Steinwerkzeuge sind Gesteinsstücke, die gezielt zerschlagen werden, bis eine scharfe Kante zum Schneiden, Schaben oder Hacken entsteht. Sie sind die älteste bekannte Technik: Die frühesten sind rund 3,3 Millionen Jahre alt, und manche wurden noch im 20. Jahrhundert hergestellt.

Was es ist

Jeder Stein, der als Werkzeug dient, zählt dazu, vom einfachen Schlagstein bis zur Mahlplatte; die meisten aber wurden durch Abschlagen geformt, um eine Schneide oder Spitze zu erhalten. Das einfachste ist ein scharfer Abschlag, von einem Geröll abgeschlagen und sofort benutzt, um Fleisch zu schneiden oder einen Ast zu entrinden. Die raffiniertesten, etwa eine dünne Speerspitze oder ein geschliffenes Beil, kosteten Stunden geübter Arbeit.

Die längste Zeit der Menschheitsgeschichte war Stein das wichtigste harte Material. Holz, Knochen, Leder und Fasern wurden mit Steinschneiden bearbeitet. Und weil Stein fast unbegrenzt erhalten bleibt, sind diese Werkzeuge auch das wichtigste Zeugnis, das Archäologen vom Leben der frühen Menschen haben.

Wie es funktioniert

Gute Werkzeugsteine sind hart, spröde und sehr feinkörnig, ohne innere Faser: Feuerstein, Hornstein, Obsidian (vulkanisches Glas) und manche Quarzite. Trifft ein Schlag einen solchen Stein nahe der Kante, läuft ein kegelförmiger Riss hindurch, dieselbe Form, die ein Luftgewehrkügelchen in einer Fensterscheibe hinterlässt. Der Riss biegt zur Oberfläche ab und löst einen Abschlag. Wegen der gewölbten, muschelartigen Bruchflächen nennt man das muscheligen Bruch; er ergibt sehr dünne, scharfe Kanten.

Der Steinschläger trifft den Kernstein auf einer ebenen Fläche, der Schlagfläche, nahe an deren Rand. Wo die Schlagfläche auf die Seitenfläche des Kerns trifft, muss der Winkel unter 90 Grad liegen, sonst zerdrückt der Schlag nur die Kante. Der Abschlag trägt die Spuren des Schlags: eine gerundete Wölbung direkt unter dem Auftreffpunkt, den Schlagbuckel, und feine Wellen, die sich davon ausbreiten. Am Kern bleibt das passende Negativ, das als Schlagfläche für den nächsten Schlag dienen kann.

Druckretusche: Eine Geweihsprosse drückt kleine Abschläge von der Kante, das Leder schützt die Handfläche.

Drei Techniken steuern das Ergebnis. Ein harter Schlagstein, meist ein Quarzitgeröll, löst große, dicke Abschläge. Ein weicher Schlägel aus Geweih, Knochen oder Hartholz löst längere, dünnere Abschläge und dient zum Verdünnen und Formen. Bei der Druckretusche wird eine Geweihspitze gegen die Kante gedrückt, bis ein kleiner Abschlag abspringt; so entstehen die endgültige Form und eine gerade, scharfe Schneide.

Wie man es herstellt

Steinschlagen lernt man durch Übung, und in den ersten Stunden entsteht vor allem zerbrochener Stein. Man braucht Knollen aus Feuerstein oder Hornstein, oder Brocken aus Obsidian oder dickem Flaschenglas; zwei oder drei Schlagsteine unterschiedlichen Gewichts; einen Geweihschlägel und eine Geweihsprosse; ein dickes Lederpolster; eine Schutzbrille; Lederhandschuhe; und eine Plane für die Abfälle.

Den Stein auswählen. Eine Knolle ohne Risse, Löcher oder grobkörnige Stellen suchen. Mit einem kleinen Kiesel abklopfen: Ein heller Klang zeigt gesunden Stein, ein dumpfer verborgene Fehler.

Eine Schlagfläche finden. Eine Kante suchen, an der zwei Flächen in weniger als 90 Grad zusammentreffen. Ein Stück von dieser Kante entfernt zuschlagen (wenige Millimeter für einen dünnen Abschlag, mehr für einen dicken), mit einem kurzen, festen Schlag, der nach außen, vom Kern weg, durchgezogen wird. Den Kern auf dem Polster am Oberschenkel abstützen, nie in der bloßen Handfläche.

Ein Abschlaggerät machen. Ein einziger guter Abschlag ist schon ein Messer. Man benutzt ihn so, wie er ist, oder stumpft seinen Rücken mit kleinen Schlägen ab, damit er besser in der Hand liegt.

Einen Faustkeil formen. Rund um eine flache Knolle arbeiten und abwechselnd von der einen und der anderen Fläche Abschläge lösen, sodass die Kante zu einer Wellenlinie in der Mitte des Stücks wird. Zum Verdünnen der Flächen zum Geweihschlägel wechseln. Vor jedem Schlag die Kante mit einem rauen Stein leicht anschleifen, damit sie nicht zerbröselt.

Mit Druck fertigstellen. Das Stück auf dem Polster halten, die Geweihsprosse nach unten und innen gegen die Kante drücken und kleine Abschläge nacheinander lösen, um die Schneide zu begradigen und zu schärfen.

Sicherheit. Frische Abschläge sind schärfer als eine Rasierklinge und fliegen schnell. Immer eine Schutzbrille tragen und Hände und Oberschenkel mit Leder schützen. Im Freien oder in einem gut belüfteten Raum arbeiten und den feinen Staub nicht einatmen: Feuerstein und Hornstein bestehen überwiegend aus Quarz (Siliciumdioxid), und jahrelang eingeatmeter feiner Quarzstaub verursacht Silikose, an der viele Flintensteinschläger gestorben sind. Abfälle auf der Plane sammeln, Staub anfeuchten statt trocken zu kehren und scharfe Abschläge in eine geschlossene Dose oder einen Eimer geben. Kinder und Tiere fernhalten.

Geschichte und Entwicklung

Oldowan-Werkzeuge: ein Geröll mit gezackter Kante, die davon geschlagenen Abschläge und der Schlagstein.

Die ältesten bekannten Steinwerkzeuge stammen aus Lomekwi 3, westlich des Turkana-Sees in Kenia. Sie sind rund 3,3 Millionen Jahre alt und damit älter als die frühesten bekannten Fossilien der Gattung *Homo*. Das Team fand 149 Kerne, Abschläge, Schlagsteine und mögliche Ambosse, hergestellt mit einfachen Techniken, die dem Zerstoßen nahe kommen. Wer sie anfertigte, ist unbekannt; *Kenyanthropus* und *Australopithecus* lebten damals in der Gegend.

Oldowan-Geräte tauchen seit etwa 2,6 Millionen Jahren an mehreren Fundstellen Ostafrikas auf, in Nyayanga in Kenia vielleicht schon vor 2,9 Millionen Jahren: Gerölle mit wenigen Abschlägen, die scharfen Abschläge selbst und Schlagsteine. Vor etwa 1,7 Millionen Jahren tauchen in Ostafrika die ersten allgemein anerkannten Faustkeile auf, große, beidseitig zu einer Tropfenform bearbeitete Werkzeuge mit langer Schneide. Sie wurden über eine Million Jahre lang hergestellt, in Afrika, Europa und Asien.

Spätere Steinschläger lernten, einen Kern so vorzubereiten, dass ein einziger Schlag einen Abschlag von geplanter Form löste. Vor etwa 200.000 Jahren wurden Spitzen als Speere auf Holzschäfte gesetzt, und steinerne Bohrer und Schaber dienten zur Arbeit an Häuten und Holz. In Europa und Westasien wurde vor etwa 50.000 bis 10.000 Jahren die lange, dünne Klinge zur Standardform. Mikrolithen, kleine Klingenstücke, die reihenweise in Griffe und Pfeile eingesetzt wurden, tauchen im südlichen Afrika schon vor etwa 71.000 Jahren auf und verbreiteten sich gegen Ende der letzten Eiszeit in vielen Regionen.

In der Jungsteinzeit wurden Beilklingen auf Sandstein geschliffen und poliert, um sie widerstandsfähiger zu machen.

Die Bauern der Jungsteinzeit schliffen ab etwa 10.000 v. Chr. Steinbeile, um Wald zu roden. Metall verdrängte den Stein langsam und nie vollständig. In Brandon in England wurden noch im 20. Jahrhundert Flintensteine geschlagen, und Obsidianklingen werden bis heute bei manchen feinen Operationen verwendet, weil ihre Schneide feiner ist als die von Stahlskalpellen.

Kennzahlen

Älteste bekannte Steinwerkzeuge
Rund 3,3 Millionen Jahre, Lomekwi 3 (Kenia)

Erste Faustkeile
Vor etwa 1,7 Millionen Jahren, Ostafrika

Lebensdauer des Faustkeils
Über eine Million Jahre lang hergestellt

Ein spätes Steinschlägerhandwerk
Flintensteine, in Brandon (England) bis ins 20. Jahrhundert in Mengen hergestellt

Quellen

1. Stone Tools · Smithsonian National Museum of Natural History, Human Origins Program https://humanorigins.si.edu/evidence/behavior/stone-tools
2. Scientists Discover World's Oldest Stone Tools · Columbia Climate School, State of the Planet https://news.climate.columbia.edu/2015/05/20/scientists-discover-worlds-oldest-stone-tools/
3. Small, lethal tools have big implications for early modern human complexity · Arizona State University https://news.asu.edu/content/small-lethal-tools-have-big-implications-early-modern-human-complexity
4. Stone tool · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Stone_tool
5. Knapping · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Knapping
6. Introducing a new experimental design for controlled studies of flake formation: results for exterior platform angle, platform depth, angle of blow, velocity, and force · Journal of Archaeological Science https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.05.004
7. A Synthesis of the Dibble et al. Controlled Experiments into the Mechanics of Lithic Production · Journal of Archaeological Method and Theory https://doi.org/10.1007/s10816-022-09586-2
8. The results of lithic experiments performed on glass cores are applicable to other raw materials · Archaeological and Anthropological Sciences https://doi.org/10.1007/s12520-019-00963-9

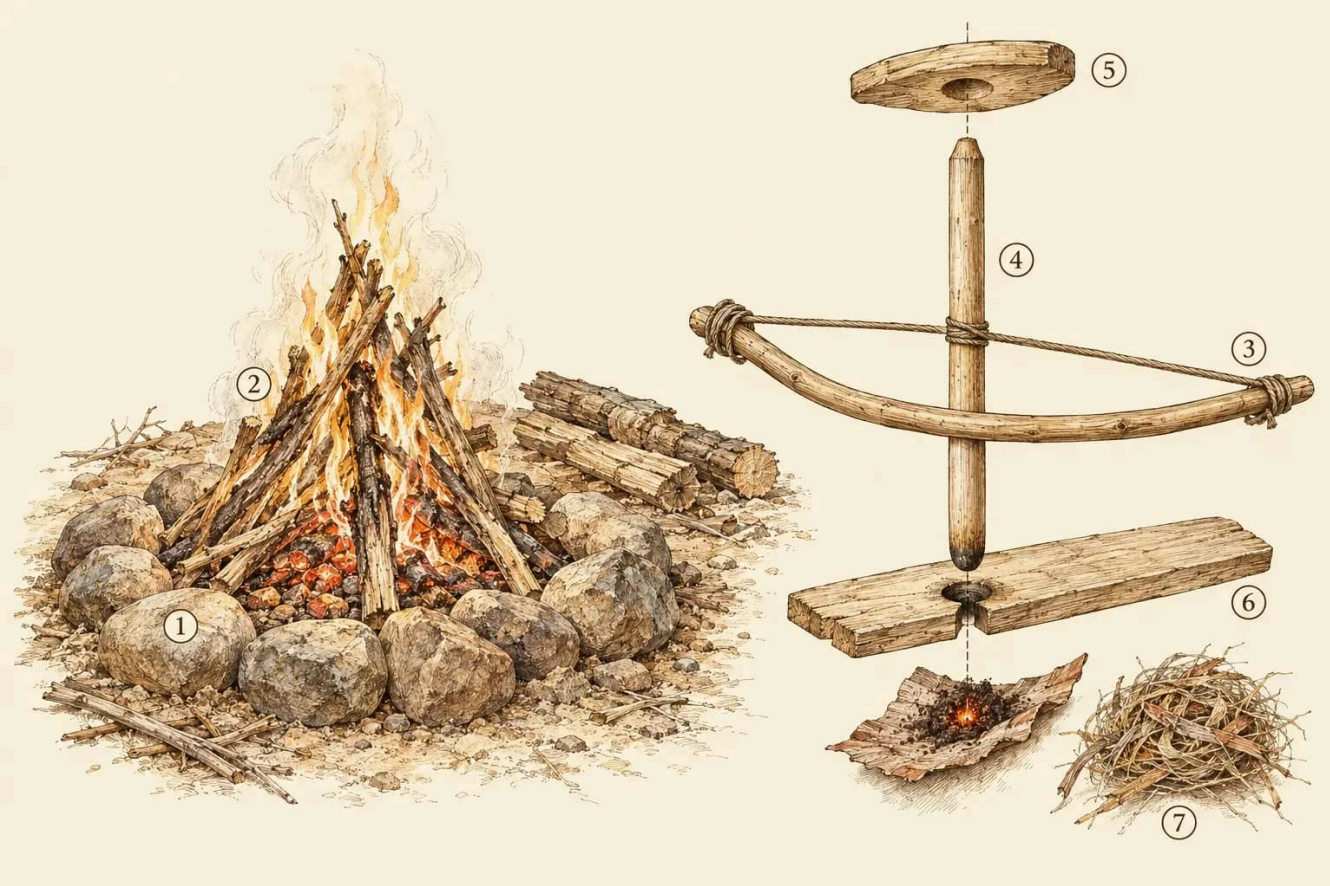
Fakten geprüft am 2026-10-11

Beherrschung des Feuers

Licht, Wärme und Kochen

vor 1 Million Jahren · Vorgeschichte · Überleben

Führt zu: Brot (S. 27), Bronze (S. 125), Konserven & Pasteurisierung (S. 251), Holzkohle (S. 65), Destillation (S. 176), Trinkwasser (S. 35), Färben (S. 70), Schwarzpulver (S. 184), Heißluftballon (S. 234), Ledergerbung (S. 103), Kalk und Kalkmörtel (S. 31), Töpferei (S. 23), Römischer Beton (S. 168), Seife (S. 95), Vulkanisierter Kautschuk (S. 293)



1 Herdsteine 2 Brennholz 3 Bogen 4 Spindel 5 Druckholz 6 Feuerbrett mit Kerbe 7 Zundernest

Das Feuer beherrschen heißt, eine Flamme am Leben zu halten, sie mitzunehmen und sie schließlich nach Belieben zu entzünden. Vorfahren des Menschen nutzten Feuer schon vor mindestens einer Million Jahren; es gab ihnen Wärme, Licht, Schutz und gekochte Nahrung.

Was es ist

Feuer ist eine chemische Reaktion: Ein Brennstoff verbindet sich mit dem Sauerstoff der Luft und gibt Wärme und Licht ab. Es zu beherrschen, lernten Menschen schrittweise. Zuerst hüteten sie ein Feuer, das die Natur entzündet hatte, nach einem Blitzschlag oder einem Buschbrand. Dann trugen sie es mit und nährten es tagelang. Zuletzt konnten sie es entfachen, wann immer sie es brauchten.

Feuer wärmt in der Nacht und macht kältere Gegenden bewohnbar. Es erhellt Höhlen, hält Tiere fern, härtet hölzerne Speerspitzen und gart Nahrung. Gekochtes Fleisch und gegarte Knollen sind weicher und liefern bei der Verdauung mehr Energie als rohe.

Wie es funktioniert

Ein Feuer braucht drei Dinge zugleich: Brennstoff, Sauerstoff und genug Wärme, um die Reaktion in Gang zu halten. Fehlt eines davon, erlischt es.

Holz brennt nicht unmittelbar. Die Hitze zerlegt es zuerst in brennbare Gase und lässt Holzkohle zurück. Die Gase verbrennen in der Flamme über dem Holz, darunter glüht die Kohle. Deshalb baut man ein Feuer vom Kleinen zum Großen auf: Dünne, trockene Zweige erhitzen sich schnell, geben Gas ab und bringen dickere Äste auf Temperatur.

Es gibt zwei gängige überlieferte Wege, Feuer zu machen. Bei den Reibverfahren reibt man Holz an Holz, bis sich feines, heißes Holzmehl sammelt und zu glimmen beginnt. Der Handbohrer dreht einen Stab zwischen den Handflächen; der Feuerbohrer mit Bogen, den die Tafel zeigt, leistet dasselbe mit einer Schnur, die um die Spindel geschlungen ist, schneller und mit weniger Kraft. Das glimmende Mehl ist eine Glut. In ein Nest aus trockenem Gras und zerfaserter Rinde gelegt und sanft angeblasen, wird daraus eine Flamme.

Feuerstein gegen Pyrit geschlagen gibt Funken, die heiß genug sind, um trockenen Zunderschwamm zum Glimmen zu bringen.

Schlagverfahren erzeugen Funken. Trifft eine harte Feuersteinkante auf Pyrit, reißt sie winzige Körnchen des Minerals ab, die in der Luft verglühen. Feuerstein gegen Feuerstein gibt fast nichts. Die Funken sind klein und kurzlebig, deshalb brauchen sie einen Zunder, der leicht Feuer fängt, etwa die innere Schicht des Zunderschwamms, getrocknet und weich und flauschig geklopft.

Wie man es macht

Beim Handbohrer drehen die Handflächen einen Stab hin und her, bis das Holzmehl in der Kerbe zu glimmen beginnt.

Der Feuerbohrer mit Bogen ist das zuverlässigste Reibverfahren zum Lernen. Man braucht ein Messer oder einen scharfen Steinabschlag, eine Schnur und trockenes, abgestorbenes, mittelweiches Holz wie Weide, Linde, Pappel oder Zeder.

Die Feuerstelle vorbereiten. Ebenen, kahlen Boden wählen, fern von tief hängenden Ästen und trockenem Gras. Einen Kreis von etwa drei Metern Durchmesser von Gras, Laub und Zweigen freiräumen und die Grube mit Steinen einfassen. Alles vorher sammeln: zwei Handvoll Zunder, ein Bündel bleistiftdünner Zweige, dann Äste so dick wie ein Daumen und so dick wie ein Handgelenk.

Das Werkzeug schnitzen. Die Spindel ist ein gerader Stab von etwa 20 cm Länge und Daumendicke, oben gerundet und unten stumpf. Das Feuerbrett ist ein flaches Stück von etwa 2 cm Stärke. Das Druckholz ist ein handtellergroßes Stück härteres Holz oder ein Stein mit einer kleinen Mulde an der Unterseite; etwas Fett oder ein grünes Blatt in der Mulde verhindert, dass sich das obere Spindelende erhitzt. Der Bogen ist ein steifer, leicht gebogener Stock von Armlänge, die Schnur gerade so locker, dass sie sich einmal um die Spindel legen lässt; eingelegt muss sie die Spindel fest greifen.

Einbrennen und kerben. Nahe am Rand des Bretts eine flache Mulde bohren, bis sie schwarz ist, dann eine V-förmige Kerbe von der Mulde bis zum Rand schneiden, etwa ein Achtel des Kreises. Ein Stück Rinde unter die Kerbe legen, um das Mehl aufzufangen.

Bohren. Knien, einen Fuß auf das Brett stellen, das Handgelenk mit dem Druckholz gegen das Schienbein stützen gleichmäßig von oben drücken und den Bogen in langen, ruhigen Zügen führen. Schneller werden, sobald die Mulde raucht. Ist die Kerbe voll dunklen Mehls, das von selbst weiterraucht, ist die Glut da.

Die Glut zur Flamme anfachen. Die Glut ins Zundernest kippen, es schließen und langsam blasen, bis es auflodert. In die Grube legen, Zweige kegelförmig darüberstellen und dickeres Holz erst nachlegen, wenn die Zweige gut brennen.

> **Sicherheit.** In trockenem Gras oder bei Wind läuft Feuer schneller, als ein Mensch rennen kann. Nie bei Trockenheit, Feuerverbot oder starkem Wind Feuer machen, und Wasser oder lockere Erde bereithalten. Keine nassen Flusssteine um die Grube legen: Eingeschlossenes Wasser kann sie zersprengen. Ein Feuer nie unbeaufsichtigt lassen. Zum Löschen die Glut ertränken, die Asche umrühren und erneut wässern, bis alles, auch vergrabene Glut, kalt ist. Nur im Freien üben: Ein offenes Feuer in einer Hütte oder Höhle füllt die Luft mit Rauch und Kohlenmonoxid, die töten können.

Geschichte und Entwicklung

Die ältesten gesicherten Feuerspuren in einem menschlichen Zusammenhang stammen aus der Wonderwerk-Höhle in Südafrika. 2012 fand ein Team dort mikroskopische Asche und verbrannte Knochen in rund eine Million Jahre alten Schichten, zusammen mit Steinwerkzeugen des Acheuléen, die wahrscheinlich *Homo erectus* herstellte. Eine 2026 veröffentlichte Studie fand tiefer in derselben Abfolge verbrannte Knochen in Schichten, die auf 1,07 bis 1,79 Millionen Jahre datiert werden, etwa 30 Meter im Höhleninneren, wohin kein Flächenbrand reicht. Ältere Hinweise aus Kenia, um 1,5 Millionen Jahre, beruhen auf gerötetem Boden, den auch ein natürliches Feuer erklären könnte.

In Gesher Benot Ya'aqov in Israel deuten verbrannte Samen, verbranntes Holz und Häufungen verbrannter Feuersteinsplitter auf Feuer an festen Stellen vor etwa 790.000 Jahren hin. Eindeutige Feuerstellen werden erst vor etwa 400.000 bis 300.000 Jahren häufig, in Afrika, im Nahen Osten und in Europa. Bis dahin holten sich Menschen das Feuer vermutlich von natürlichen Bränden und hielten es am Leben.

Alte Feuer erkennen Archäologen im Profil: Asche und Holzkohle über Erde, die die Hitze rot gebrannt hat.

Der älteste Nachweis des Feuermachens stammt aus Barnham in Suffolk, England, veröffentlicht 2025. Vor etwa 400.000 Jahren erhitzten Menschen dort immer wieder dieselbe Lehmfläche auf über 700 °C. Sie hinterließen hitzegesprungene Faustkeile und zwei Pyritstücke, ein Mineral, das in dieser Landschaft so selten ist, dass es wohl absichtlich mitgebracht wurde. Der bisherige Rekord, von Neandertaler-Fundstellen in Nordfrankreich, war etwa 50.000 Jahre alt.

Kennzahlen

Älteste Spuren von Feuernutzung
Vor etwa 1 Million Jahren, Wonderwerk-Höhle (Südafrika), vielleicht bis zu 1,8 Millionen

Ältester Nachweis des Feuermachens
Vor etwa 400.000 Jahren, Barnham (England)

Regelmäßige Nutzung
Verbreitet seit etwa 400.000–300.000 Jahren

Temperatur der Feuerstelle von Barnham
Über 700 °C

Quellen

1. Control of fire by early humans · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Control_of_fire_by_early_humans
2. Evidence that human ancestors used fire one million years ago · ScienceDaily (University of Toronto) https://sciencedaily.com/releases/2012/04/120402162548.htm
3. Early humans were bringing fire into caves 1.8 million years ago · ScienceDaily (Hebrew University of Jerusalem) https://sciencedaily.com/releases/2026/06/260623083123.htm
4. Evidence of Hominin Control of Fire at Gesher Benot Ya'aqov, Israel (Science, 2004) · Hebrew University of Jerusalem https://cris.huji.ac.il/en/publications/evidence-of-hominin-control-of-fire-at-gesher-benot-yaaqov-israel/
5. Earliest fire making, dating back 400,000 years, unearthed in Suffolk · Natural History Museum, London https://www.nhm.ac.uk/discover/news/2025/december/earliest-fire-making-dating-back-400-000-years-unearthed-in-suffolk-england.html
6. Research shows humans making fire 350,000 years earlier than thought · University of Liverpool https://news.liverpool.ac.uk/?p=131468
7. Wood Handbook, chapter 4: Moisture Relations and Physical Properties of Wood (FPL-GTR-190) · USDA Forest Service, Forest Products Laboratory https://research.fs.usda.gov/download/treesearch/37428.pdf
8. The Physics of Fire by Friction · University of Dayton (Bradley D. Duncan) https://ecommons.udayton.edu/ece_fac_pub/418
9. Lighting a fire using friction requires an understanding of some physics principles · University of Dayton Magazine https://udayton.edu/magazine/2023/12/lighting-fire.php
10. Ignition of Wood (Vytenis Babrauskas) · Fire Science and Technology Inc., via CFITrainer.net https://www.cfitrainer.net/programs/35a84de0-e505-4899-be34-f31de9d9d570/document/2005_CCAI_Wood_ignition.pdf

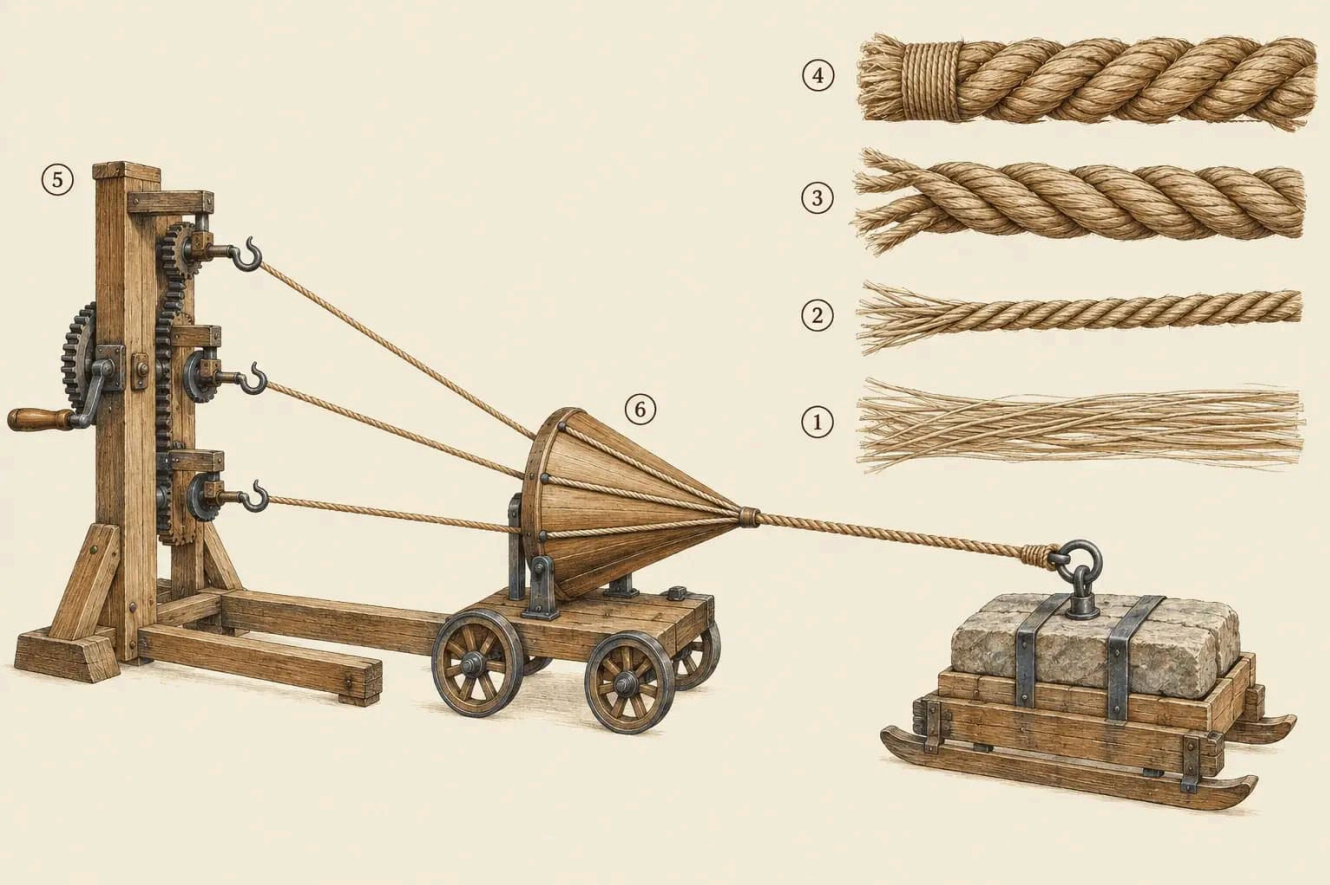
Fakten geprüft am 2026-10-11

Seil & Schnur

Gedrehte Fasern, die alles halten

vor 50.000 Jahren · Vorgeschichte · Überleben

Führt zu: Pfeil & Bogen (S. 18), Kran & Flaschenzug (S. 152), Trinkwasser (S. 35), Färben (S. 70), Kummet (S. 180), Bewässerung (S. 52), Maße und Gewichte (S. 129), Pflug (S. 61), Segel (S. 91), Spinnrad (S. 192), Weben (S. 44), Windmühle (S. 188)



1 Fasern 2 Garn 3 Litze 4 Dreischäftiges Seil 5 Kurbel mit Haken 6 Lehre (Leitholz)

Ein traditionelles Seil besteht aus kurzen Fasern, die zu Garnen, die Garne zu Litzen und die Litzen zum Seil gedreht werden; so entsteht eine Leine, die viel länger und stärker ist als jede einzelne Faser. Neandertaler drehten schon vor mehr als 40.000 Jahren Schnüre, und seitdem dient das Seil zum Binden, Ziehen, Heben und Takeln.

Was es ist

Ein Seil ist eine lange, biegsame Leine, die Zug aushält. Ein traditionelles Seil besteht aus Fasern, die einzeln nur wenige Zentimeter bis etwa einen Meter lang sind: Pflanzenstängel und Blätter, Bast, Tiersehnen oder Haare. Zusammengehalten werden sie durch Drehung. Moderne Kunstfaserseile können aus Endlosfasern bestehen, und viele sind geflochten statt gedreht.

Dünnes Seil heißt Schnur, Bindfaden oder Garn. Seile verzurren Lasten, ziehen Boote und Steine, spannen Netze und Fallen und takeln Segelschiffe.

Wie es funktioniert

Eine einzelne Faser ist schwach und kurz. Verdreht man viele Fasern miteinander, presst die Drehung sie aneinander, und die Reibung hindert sie am Auseinandergleiten. Zieht man am Garn, zieht es sich enger zusammen und presst stärker: Je mehr Last, desto besser hält es.

Ein verdrehtes Garn allein neigt dazu, sich wieder aufzudrehen. Die Lösung ist, es noch einmal in die Gegenrichtung zu drehen. Fasern werden in eine Richtung zu Garn gesponnen; mehrere Garne werden andersherum zu einer Litze gedreht; drei Litzen werden wieder in die erste Richtung zum Seil geschlagen. Die Restdrehung jeder Stufe zieht gegen die der Stufe in ihr; die Kräfte heben sich auf, und das Seil hält seine Form. Ein so gebautes Seil aus drei Litzen heißt dreischäftig.

Gegendrehen: Jedes Bündel wird in eine Richtung gedreht und dann gegenläufig über das andere gelegt.

Dieselbe Regel gilt im Kleinsten. Beim Gegendrehen, einer einfachen Handmethode, werden zwei Faserbündel jeweils in eine Richtung gedreht und dann in der Gegenrichtung umeinandergelegt; heraus kommt eine zweischäftige Schnur, die nicht aufgeht. Ein langes Seil entsteht genauso, nur größer: Eine Kurbel dreht die Litzen, und ein gefurchter Holzkegel, die Lehre, hält sie auseinander, bis sie sich hinter ihm zusammenlegen.

Wie man es herstellt

Gute Seilfasern sind lang und fest: Brennnessel, Flachs, Hanf, Bast von Linde oder Weide, Rohrkolbenblätter, oder zum Üben gekauftes Baumwoll- oder Hanfgarn.

Die Faser vorbereiten. Brennnesselstängel im Spätsommer mit Handschuhen schneiden. Flach drücken, spalten, das holzige Mark entfernen und die Außenhaut mit den Fasern abziehen. Trocknen lassen und vor dem Gebrauch leicht anfeuchten. Lindenrinde muss mehrere Wochen im Wasser liegen, bevor sich die Faserschichten lösen.

Schnur von Hand drehen. Ein Bündel etwas neben seiner Mitte knicken, sodass die beiden Enden ungleich lang sind. Den Knick festhalten. Das obere Bündel von sich weg drehen und dann zu sich hin über das untere legen. Wiederholen und den Griff weiterschieben. Wird ein Bündel kurz, ein neues Faserbüschel danebenlegen und mit eindrehen; die versetzten Enden sorgen dafür, dass zwei Ansätze nie an derselben Stelle liegen.

Eine Seilerbahn einrichten. Für dickeres Seil ein Gestell mit drei Haken befestigen, die eine Kurbel gemeinsam dreht. Drei gleich lange Schnüre oder Garne von diesen Haken zu einem einzelnen Wirbelhaken auf einem beschwerten Schlitten am anderen Ende spannen. Den Wirbel vorerst mit einem Stift blockieren und die Lehre direkt am Schlitten zwischen die Litzen setzen, in jede Furche eine Litze.

Drehen und schlagen. Die Kurbel in die Richtung drehen, die den vorhandenen Drall des Garns verstärkt, bis jede Litze hart ist und sich beim Nachlassen kringelt. Dann den Stift ziehen, damit sich der Wirbelhaken drehen kann. Weiterkurbeln, während ein Helfer die Lehre langsam zum Gestell hin führt: Hinter ihr legen sich die Litzen von selbst in Gegenrichtung zum Seil, und der Schlitten rückt nach, weil das Seil kürzer wird.

Die Enden sichern. Jedes Ende vor dem Abschneiden fest mit dünnem Garn umwickeln, einem Takling, sonst gehen die Litzen auf.

Sicherheit. Ein belastetes Seil speichert Energie; reißt es, schnellen die Enden heftig zurück, darum nie in der Linie eines gespannten Seils stehen. Selbst gemachtes Seil nicht zum Klettern, zum Heben von Menschen oder für Lasten über Köpfen verwenden. Auch die Kurbel speichert Drehung: Beim Anhalten festhalten, sonst schlägt sie zurück. Handschuhe tragen, für die Brennnesseln und wenn Seil durch die Hände läuft.

Geschichte und Entwicklung

Das Elfenbeinwerkzeug vom Hohle Fels, rekonstruiert: Durch die vier Löcher geführte Fasern werden zu Seil gedreht.

Der älteste direkte Nachweis einer Schnur stammt aus dem Abri du Maras, einem Felsdach in der Ardèche in Frankreich. 2020 beschrieben Forschende ein etwa 6 mm langes Bruchstück, das an einem Steinwerkzeug haftete: drei Bündel Bastfasern, wahrscheinlich von einem Nadelbaum, erst verdreht und dann miteinander verzwirnt. Es ist 41.000 bis 52.000 Jahre alt und stammt von Neandertalern, die also in zwei entgegengesetzten Richtungen drehen konnten.

In der Höhle Hohle Fels in Südwestdeutschland fanden Ausgräber einen etwa 20 cm langen Streifen aus Mammutelfenbein mit vier Löchern, die von spiralförmigen Rillen umgeben sind, 35.000 bis 40.000 Jahre alt. 2024 deuteten Nicholas Conard und Veerle Rots es als wahrscheinliches Seilerwerkzeug: In seinen Rillen steckten Pflanzenfasern, und ein ähnlicher Stab aus der nahen Geißenklösterle-Höhle hat Rillen, die wie von durchgezogenen Fasern abgenutzt sind. Mit Nachbauten stellten Gruppen von vier oder fünf Personen in 10 Minuten etwa 5 Meter festes Seil her; Rohrkolbenblätter eigneten sich besonders gut.

Bäuerliche Gesellschaften stellten Seile in viel größerem Maßstab her. Die Ägypter drehten Seile aus Schilf, Papyrus, Palmfasern und Flachs, und Mannschaften an Zugseilen bewegten die Steine der Monumente. In Wadi Gawasis, einem pharaonischen Hafen am Roten Meer, fanden Archäologen Rollen von Schiffstauen, sorgfältig verknotet und in künstlichen Höhlen gelagert, die Expeditionen ins Land Punt nutzten.

In Europa fertigten die Segelflotten vom Mittelalter bis ins 19. Jahrhundert ihr Tauwerk in Reeperbahnen, Gebäuden, die lang genug waren, um ein Seil in voller Länge in einem Stück zu schlagen. Die Reeperbahn der Werft von Chatham in England ist fast 350 Meter lang, und dort wird seit mehr als 400 Jahren Seil hergestellt. Nylonseile kamen im Zweiten Weltkrieg auf, und seit den 1950er-Jahren übernahmen Kunstfasern die meisten Aufgaben von Hanf und Manila.

Der Palstek bildet eine feste Schlaufe, der Webeleinstek belegt an einem Pfosten, der Kreuzknoten schnürt ein Bündel; zum Verbinden belasteter Seile taugt er nicht.

Kennzahlen

Älteste bekannte Schnur
41.000–52.000 Jahre alt, Abri du Maras (Frankreich)

Übliche Bauweise
3 Litzen, Drehrichtung auf jeder Stufe umgekehrt

Frühes mutmaßliches Seilerwerkzeug
35.000–40.000 Jahre alt, Hohle Fels (Deutschland)

Eiszeitliches Tempo (nachgebautes Werkzeug)
Etwa 5 m Seil in 10 Minuten, mit 4–5 Personen

Quellen

1. Neanderthal cord weaver · CNRS https://www.cnrs.fr/en/press/neanderthal-cord-weaver
2. Rope making in the Aurignacian of Central Europe more than 35,000 years ago · Science Advances (PubMed Central) https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10830101/
3. Archaeologist Kathryn Bard's amazing Egyptian digs · Boston University https://www.bu.edu/articles/2009/archaeologist-kathryn-bard%e2%80%99s-amazing-egyptian-digs/
4. The Ropery · The Historic Dockyard Chatham https://thedockyard.co.uk/attractions/the-ropery
5. Rope · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Rope
6. Ropewalk · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Ropewalk
7. The ancient art of laying rope · Europhysics Letters (arXiv) https://arxiv.org/abs/1004.0814
8. Plymouth Cordage Company Ropewalk · Mystic Seaport Museum https://mysticseaport.org/?p=355570
9. Hawser-laid · Practical Boat Owner https://www.pbo.co.uk/nautical-almanac/glossary-of-nautical-terms/hawser-laid-9204
10. Three strand hawser laid rope · Lifting Equipment Engineers Association https://copsule.leeaint.com/copsule/en-GB/latest/id-b54f2a33-5063-40e7-f243-517683d1bf63.html

Fakten geprüft am 2026-10-11

II

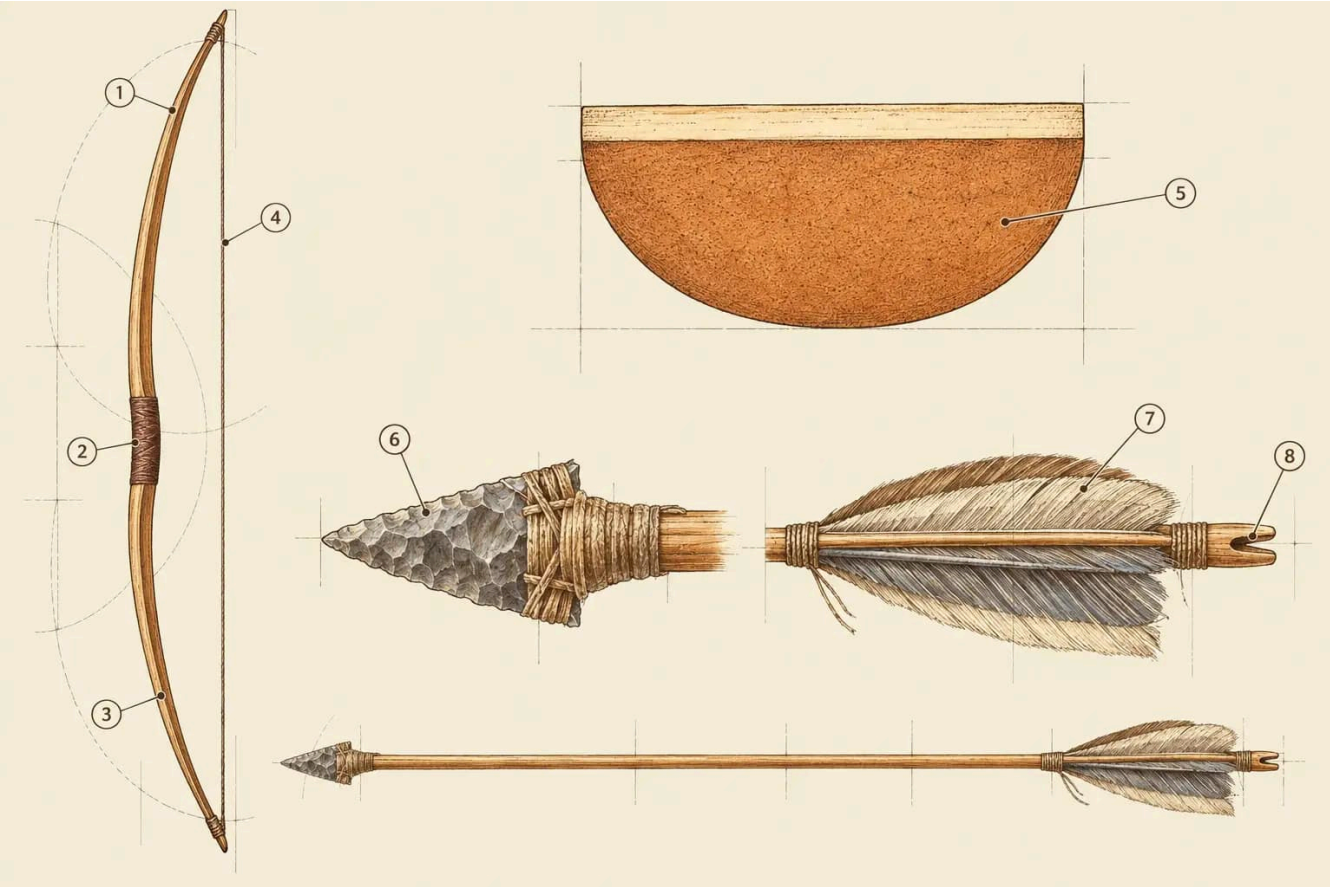
Sesshaftigkeit

Pfeil & Bogen

Gespeicherte Energie auf Distanz

vor 62.000 Jahren · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Steinwerkzeuge (S. 5), Seil & Schnur (S. 13)



1 Oberer Wurfarm 2 Griff 3 Unterer Wurfarm 4 Sehne 5 Querschnitt eines Wurfarms: Splintholz am Rücken, Kernholz am Bauch 6 Pfeilspitze aus Feuerstein, mit Tiersehne umwickelt 7 Befiederung 8 Nocke

Ein Bogen speichert die Arbeit, die der Schütze mit seinen Armen leistet, als Energie in den gebogenen Wurfarmen und gibt sie in einem Sekundenbruchteil wieder frei. So fliegt ein Pfeil viel schneller und weiter, als eine Hand ihn werfen könnte. Kleine Steinspitzen aus Südafrika deuten darauf hin, dass Menschen schon vor etwa 64.000 Jahren mit Pfeilen schossen, und der Bogen blieb eine Waffe für Jagd und Krieg, bis Feuerwaffen ihn verdrängten.

Was es ist

Ein Bogen ist ein biegsamer Stab, meist aus Holz, zwischen dessen Enden eine Sehne gespannt ist. Er arbeitet wie eine Feder, die man in der Hand hält. Zieht man die Sehne zurück, biegt sich der Stab; lässt man los, streckt er sich wieder, und die Sehne schleudert den Pfeil nach vorn. Der Pfeil ist ein leichter, gerader Schaft mit einer scharfen Spitze vorn und Federn hinten, die ihn mit der Spitze voran fliegen lassen.

Der Bogen auf der Tafel ist ein Selfbow, also aus einem einzigen Stück Holz gefertigt, nach Art des englischen Langbogens: ein Eibenstab, etwa so lang, wie der Schütze groß ist, am Rücken flach und am Bauch gerundet,

sodass sein Querschnitt einem D gleicht. Viele Bögen bestehen dagegen aus mehreren Werkstoffen. Bei den Kompositbögen Asiens sind Horn, Holz und Tiersehnen miteinander verleimt, und mehrere Völker Nordamerikas klebten eine Schicht Tiersehnen auf den Rücken eines Holzbogens.

Wie es funktioniert

Die beiden Seiten eines gespannten Bogens leisten entgegengesetzte Arbeit. Der Rücken, die vom Schützen abgewandte Seite, wird gedehnt; der Bauch, der dem Schützen zugewandt ist, wird gestaucht. Holz hält beidem stand, und so wird die Arbeit, die man beim Ausziehen leistet, als elastische Energie in den Wurfarmen gespeichert, wie in einer aufgezogenen Feder. Ein Jagdbogen verlangt bei vollem Auszug meist eine Zugkraft von etwa 180 bis 270 Newton (40 bis 60 lb), schwere Kriegsbögen verlangten weit mehr.

Eibe eignet sich für einen Selfbow, weil ein Eibenstamm zwei Arten von Holz enthält. Das helle Splintholz unter der Rinde verträgt Zug gut, das dunklere Kernholz verträgt Druck. Bogenbauer lassen eine Schicht Splintholz am Rücken und Kernholz am Bauch stehen, wie der Querschnitt auf der Tafel zeigt. Bei den meisten anderen Hölzern wird der Bogen ganz aus Splintholz oder ganz aus Kernholz geschnitten, und sein Rücken folgt über die ganze Länge einem einzigen Jahresring.

Lässt der Schütze los, schnellen die Wurfarme nach vorn, und die Sehne schiebt den Pfeil an. Nicht die ganze gespeicherte Energie kommt bei ihm an, denn auch Wurfarme und Sehne sind in Bewegung und behalten einen Teil davon. Leichte, gleichmäßig biegende Wurfarme verschwenden weniger als schwere. Pfeile aus Holzbögen fliegen meist mit 40 bis 60 Metern pro Sekunde ab.

Der Stoß kommt so plötzlich, dass sich der Pfeil beim Abschuss biegt und schwingt und sich dabei um den Griff des Bogens windet. Bogenschützen nennen das das Paradoxon des Bogenschützen. Damit ein Pfeil gerade fliegt, muss seine Steifigkeit, der sogenannte Spine, zum Zuggewicht des Bogens passen. Dabei zählen auch die Länge des Pfeils und das Gewicht seiner Spitze, denn beide verändern, wie stark er sich biegt. Die Federn am hinteren Ende erzeugen hinter dem Schwerpunkt des Pfeils Luftwiderstand, sodass jedes Schlingern die Spitze wieder in die Flugrichtung dreht, wie bei den Flights eines Dartpfeils. Eine schwerere Spitze verlagert den Schwerpunkt nach vorn und beruhigt den Flug, sorgt aber auch dafür, dass sich der Schaft stärker biegt.

Wie man ihn baut

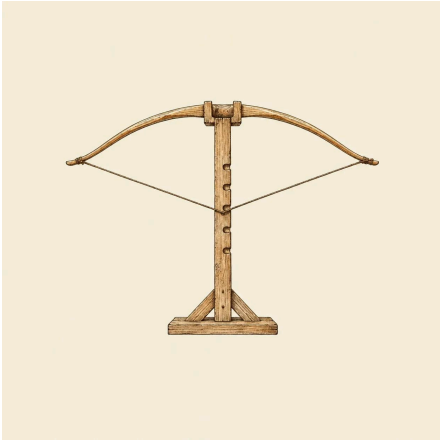
Für einen Selfbow braucht man ein Beil oder ein Zugmesser, eine Raspel, eine Ziehklinge, ein Messer, eine lange Schnur, eine Federwaage und einen Tillerstock: einen aufrechten Pfosten mit einer Auflage für den Griff oben und Kerben über seine ganze Länge.

Den Stab auswählen. Nehmen Sie ein gerade gewachsenes Stück eines zähen, federnden Holzes wie Eibe, Osagedorn, Ulme, Esche, Hickory oder Ahorn, ohne Äste und ohne Drehwuchs. Spalten Sie es aus dem Stamm, statt es zu sägen, damit die Fasern über die ganze Länge durchlaufen. Versiegeln Sie die Enden und lassen Sie das Holz unter Dach langsam trocknen, mehrere Monate, am besten ein Jahr.

Den Rücken vorbereiten. Der Rücken ist die Seite, die unter der Rinde lag. Bei den meisten Hölzern entfernen Sie die Rinde und folgen einem Jahresring über die ganze Länge, ohne ihn zu durchtrennen: Wo ein Jahresring angeschnitten ist, bricht der Bogen. Bei Eibe lassen Sie eine dünne Schicht Splintholz stehen.

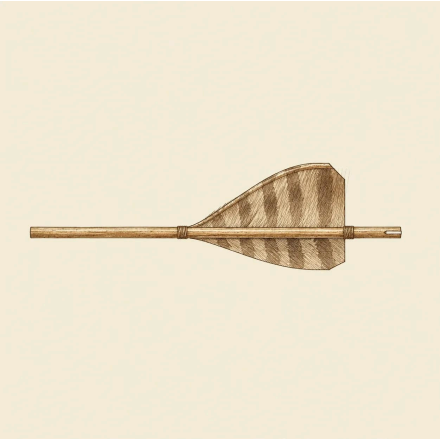
Die Form grob ausarbeiten. Zeichnen Sie eine Mittellinie und den Umriss an: in der Mitte einen schmalen, dicken Griff, nach außen hin schmaler werdende Wurfarme. Ein Langbogen ist etwa so lang, wie der Schütze groß ist. Nehmen Sie nur am Bauch Holz ab, bis sich jeder Wurfarm ein wenig biegt, wenn die Spitze auf dem Boden steht und man auf den Griff drückt.

Den Bogen tillern. Schneiden Sie nahe den Enden Kerben für die Sehne, legen Sie eine lange Sehne auf und setzen Sie den Bogen mit dem Griff auf den Tillerstock. Ziehen Sie die Sehne Kerbe für Kerbe nach unten, lesen Sie die Zugkraft an der Federwaage ab und betrachten Sie die Biegung. Ziehen Sie nie stärker als mit dem angestrebten Zuggewicht, sonst wird der unfertige Stab überlastet. Beide Wurfarme sollen sich in glatten, gleichmäßigen Bögen biegen, ohne steife Abschnitte oder Knickstellen. Lassen Sie die Sehne langsam zurück und nehmen Sie den Bogen vom Tillerstock, bevor Sie ihn mit einem Werkzeug bearbeiten: Schaben Sie nie an einem belasteten Wurfarm. Wo ein Wurfarm zu steif ist, schaben Sie dann am Bauch Holz ab, wenige Späne auf einmal, und biegen Sie den Bogen zwischen den Schritten ein Dutzend Mal durch. Hören Sie etwas vor Ihrer vollen Auszugslänge und dem gewünschten Zuggewicht auf. Dieser Schritt dauert am längsten. Ein kurzer Abschnitt, der sich stärker biegt als der Rest, ein sogenanntes Scharnier, wird überlastet; dort reißt ein Bogen am ehesten.



Auf dem Tillerstock wird der Bogen Schritt für Schritt etwas weiter ausgezogen, damit der Bogenbauer die Biegung der beiden Wurfarme vergleichen kann.

Die Sehne herstellen. Drehen Sie die Sehne aus Leinen, Hanf, Tiersehnen oder modernem Polyestergarn, mit einer festen Schlaufe an einem Ende und einem Zimmermannsstek am anderen. Am gespannten Bogen sollte die Sehne etwa eine Handbreit vom Griff entfernt stehen. Setzen Sie den gespannten Bogen mit seiner endgültigen Sehne wieder auf den Tillerstock und ziehen Sie ihn stufenweise bis zum vollen Auszug: Beide Wurfarme sollen sich weiterhin gleichmäßig biegen, und die Federwaage soll das geplante Zuggewicht anzeigen. Die letzten Späne nehmen Sie nur dort ab, wo diese Probe eine steife Stelle zeigt, jedes Mal mit entlasteter Sehne und abgenommenem Bogen.



Drei Federn vom selben Flügel, aufgeklebt und an beiden Enden umwickelt, halten den Pfeil auf geradem Kurs.

Die Pfeile herstellen. Schneiden Sie gerade Triebe von Hartriegel, Schneeball oder Hasel, oder spalten Sie Schäfte aus einem gerade gewachsenen Stamm. Richten Sie sie über milder Hitze gerade und schaben Sie sie rund. Sortieren Sie sie nach Steifigkeit, schneiden Sie sie auf gleiche Länge und versehen Sie sie mit gleich schweren Spitzen, damit alle Pfeile, die aus einem Bogen geschossen werden, gleich fliegen. Jeder Pfeil muss so lang sein, dass seine Spitze bei vollem Auszug noch vor dem Bogen liegt. Schneiden Sie hinten eine Nocke für die Sehne ein. Vorn binden Sie mit Tiersehne und einem Klebstoff wie Birkenpech eine Spitze aus Stein, Knochen oder Metall an; zum Üben genügt eine stumpfe Holzspitze. Kleben Sie nahe der Nocke drei Federn vom selben Flügel in gleichen Abständen längs auf den Schaft und umwickeln Sie ihre Enden.

Sicherheit. Ein Bogen ist bei jedem Zuggewicht eine Waffe. Zielen Sie nie auf Menschen, und schießen Sie nur auf einem Platz mit Pfeilfang, hinter dem sich niemand aufhält. Lassen Sie eine ausgezogene Sehne nie ohne aufgelegten Pfeil los: Die Energie geht dann in den Bogen, der brechen und Splitter schleudern kann. Tragen Sie beim Tillern und Probeschießen eine Schutzbrille, prüfen Sie vor jedem Training Bogen, Sehne und jeden Pfeilschaft samt Nocke auf Risse, und verwenden Sie Pfeile, die lang und steif genug für den Bogen sind. Eibenstaub ist giftig, und auch anderer Holzstaub kann Lunge und Haut schädigen; saugen Sie den Staub deshalb direkt an der Entstehungsstelle ab und tragen Sie beim Raspeln und Schleifen eine gut sitzende Staubmaske mit geeignetem Filter, auch im Freien. Gehen Sie beim Geraderichten der Schäfte vorsichtig mit der Wärmequelle um. Die Jagd mit dem Bogen ist in vielen Ländern reglementiert oder verboten.

Geschichte und Entwicklung

Pfeil und Bogen bestehen aus Holz, Tiersehnen und Federn, die sich selten erhalten; das früheste Bogenschießen muss man deshalb an Steinspitzen ablesen. In der Sibudu-Höhle in KwaZulu-Natal, Südafrika, tragen kleine, etwa 64.000 Jahre alte Steinspitzen Aufprallschäden, Spuren von Blut und Knochen und Reste des Harzklebers, mit dem sie an einem Schaft saßen. Das spricht dafür, dass sie Pfeile bewehrten. Forscher halten auch etwa 74.000 Jahre alte Spitzen aus Shinfa-Metema 1 in Äthiopien für Pfeilspitzen, doch diese Deutung müssen weitere Untersuchungen erst bestätigen. In Europa stammen die frühesten wahrscheinlichen Belege aus der Grotte Mandrin in Südfrankreich: etwa 54.000 Jahre alte Feuersteinspitzen, die moderne Menschen hinterließen und die zu klein sind, um von Hand geworfen worden zu sein.

Die ältesten bekannten Pfeilschäfte, aus Kiefernholz, stammen aus Stellmoor bei Hamburg und sind etwa 12.000 Jahre alt. Der älteste vollständige Bogen, aus Ulmenholz, wurde im Moor von Holmegaard in Dänemark gefunden und stammt aus der Zeit um 7000 v. Chr. Ötzi, der Mann, der vor etwa 5.300 Jahren in den Alpen starb, trug einen unfertigen Eibenstab und einen Köcher aus Hirschfell mit 14 Pfeilen bei sich. Nur zwei davon waren fertig, mit Feuersteinspitzen und Federn, die mit Birkenpech und Pflanzenfasern befestigt waren.

In den Steppen Asiens und im Nahen Osten entwickelten Bogenbauer den Kompositbogen, verleimt aus einem dünnen Holzkern mit Horn am Bauch und Tiersehnen am Rücken. Er ist kürzer als ein gleich starker Selfbow, was Schützen auf Streitwagen und zu Pferd entgegenkam, und er war die Waffe der Skythen, der Hunnen, der Mongolen und der osmanischen Türken.

Abgespannt biegt sich ein Kompositbogen nach vorn, vom Schützen weg; beim Aufspannen wird er zurückgebogen und speichert schon vor dem Auszug Energie.

In Westeuropa kämpften englische Heere 1346 bei Crécy und 1415 bei Azincourt mit dem Langbogen aus Eibe. Aus der *Mary Rose*, dem 1545 gesunkenen Kriegsschiff Heinrichs VIII., wurden 172 Langbögen geborgen, jeder aus einem einzigen Stück Eibe geschnitten und bis zu 2,11 m lang. Ein Gewehr war langsamer geladen, doch ein Soldat lernte viel schneller damit umzugehen, als sich ein Bogenschütze ausbilden ließ. Im 16. und 17. Jahrhundert verdrängten Feuerwaffen den Bogen von den europäischen Schlachtfeldern. In vielen Teilen der Welt blieb er eine Jagdwaffe, und das Bogenschießen wurde zum Sport, den man heute mit Bögen aus Glasfaser und Carbon betreibt und mit Compoundbögen, die mit Umlenkrollen arbeiten.

Kennzahlen

Frühe Pfeilspitzen
Vor etwa 64.000 Jahren, Sibudu-Höhle, Südafrika

Ötzis Bogenausrüstung
Unfertiger Eibenstab von 1,82 m, 14 Pfeile, davon 2 fertig

Ältester vollständiger Bogen
Holmegaard, Dänemark, Ulme, um 7000 v. Chr.

Langbögen der Mary Rose (gesunken 1545)
172 geborgen, geschätztes Zuggewicht 290 bis 780 N (65 bis 175 lb)

Quellen

1. Indications of bow and stone-tipped arrow use 64 000 years ago in KwaZulu-Natal, South Africa · Antiquity (Lombard and Phillipson, 2010) https://resolve.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/abs/indications-of-bow-and-stonetipped-arrow-use-64-000-years-ago-in-kwazulunatal-south-africa/89AF638BE5E64CEAC63363EFDD4D5E8F
2. Surviving a volcanic supereruption may have facilitated human dispersal out of Africa · University of Texas at Austin https://news.utexas.edu/2024/03/20/surviving-a-volcanic-supereruption-may-have-facilitated-human-dispersal-out-of-africa/
3. Earliest likely evidence for bow and arrow use in Europe, 54,000 years ago, found in southern France · Popular Archaeology https://popular-archaeology.com/article/earliest-likely-evidence-for-bow-and-arrow-use-in-europe-54000-years-ago-found-in-southern-france/
4. How old is the bow and arrow? · World Archery https://www.worldarchery.sport/news/166330/
5. Ötzi's equipment · South Tyrol Museum of Archaeology https://www.iceman.it/en/equipment/
6. The longbows of the Mary Rose · Mary Rose Trust https://maryrose.org/ship/bows1.htm
7. Standardised Equipment or Specialist Groups? The Role of Archery Aboard Mary Rose · University of Southampton (Parkes, PhD thesis, 2024) https://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/500151/
8. On the Mechanics of the Bow and Arrow · Rijksuniversiteit Groningen (Kooi, PhD thesis, 1983) https://www.bio.vu.nl/thb/users/kooi/thesis.pdf

Fakten geprüft am 2026-10-12

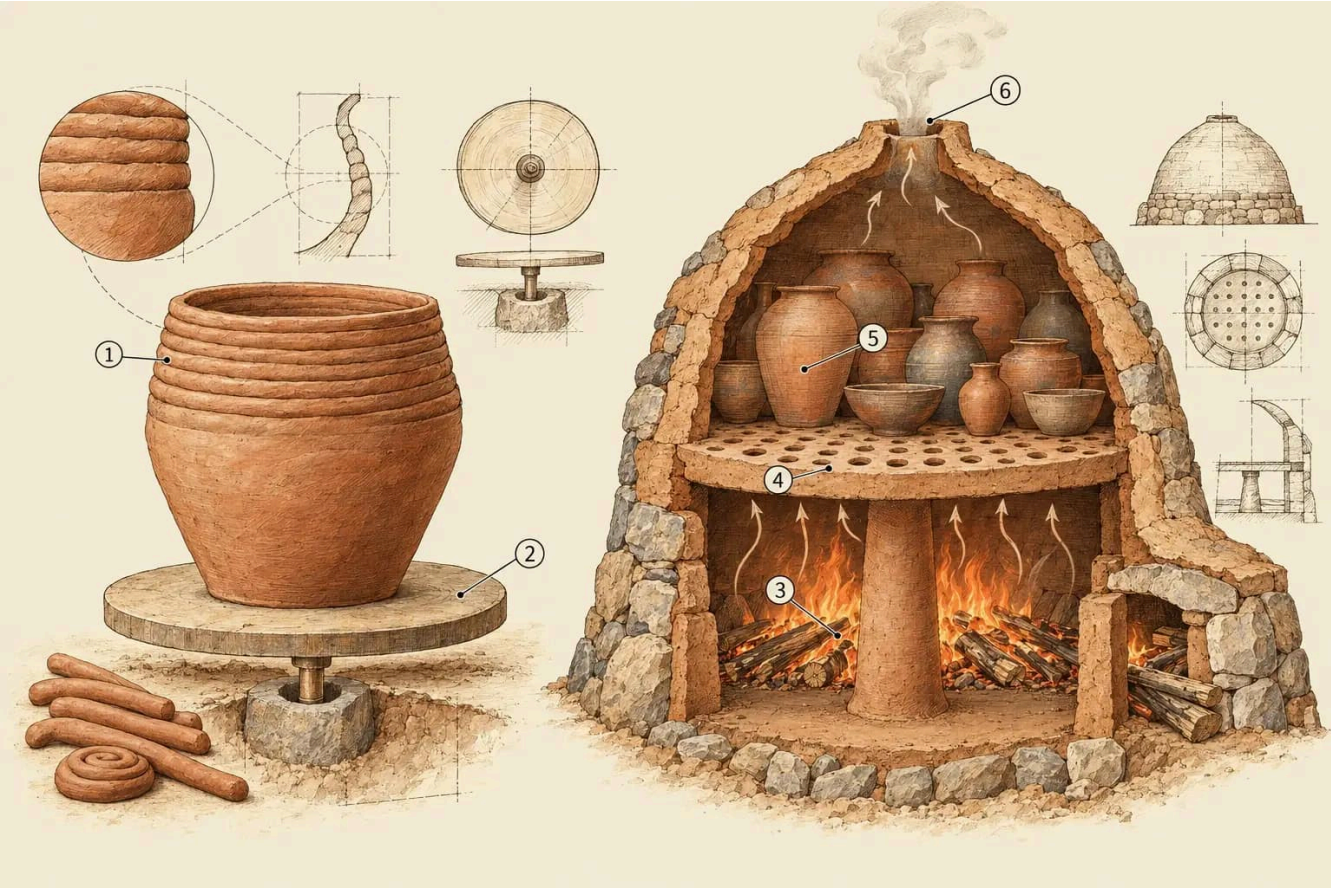
Töpferei

Ton, im Feuer zu Stein gebrannt

vor 18.000 Jahren · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Beherrschung des Feuers (S. 9)

Führt zu: Bier (S. 79), Bronze (S. 125), Käse (S. 57), Destillation (S. 176), Trinkwasser (S. 35), Färben (S. 70), Glas (S. 134), Maße und Gewichte (S. 129), Papier (S. 172), Töpferscheibe (S. 121), Pökeln & Einsalzen (S. 48), Seife (S. 95), Schrift (S. 87)



1 Tonwülste 2 Drehscheibe 3 Feuerraum 4 Lochtenne 5 Gefäße in der Brennkammer 6 Abzug

Keramik ist Ton, der im feuchten Zustand geformt und dann gebrannt wird, bis er sich dauerhaft in einen harten, steinähnlichen Stoff verwandelt. Wildbeuter im Süden Chinas stellten schon vor etwa 20.000 Jahren Tongefäße her, wahrscheinlich zum Kochen, lange vor dem Ackerbau.

Was es ist

Zur Keramik gehören alle im Feuer gehärteten Gegenstände aus Ton, von Kochtöpfen und Krügen bis zu Lampen und Dachziegeln. Töpfer teilen ihre Ware nach Tonmasse und Brenntemperatur in drei Gruppen ein: poröse Irdenware, dichtes Steinzeug und weißes, glasiges Porzellan.

Einen Topf aus grobem, gut gemagertem Ton kann man langsam über dem Feuer erhitzen, sodass sich Speisen braten, aber auch kochen und schmoren lassen. In Krügen mit Deckel, an einem trockenen Ort aufbewahrt, ist Getreide vor Mäusen sicher.

Die Tafel zeigt, wie ein Gefäß entsteht: von Hand aus Tonwülsten aufgebaut, dann in einem einfachen Ofen mit aufsteigender Flamme gebrannt.

Wie es funktioniert

Ton besteht aus mikroskopisch kleinen, flachen Kristallen, überwiegend Aluminiumsilikaten. Nass gleiten die Plättchen auf Wasserfilmen aneinander vorbei, sodass sich der Ton formen lässt und die Form behält. Beim Trocknen rücken die Plättchen enger zusammen, und das Gefäß schwindet um einige Prozent. Getrockneter Ton ist fest, würde im Regen aber wieder zu Schlamm.

Zwischen etwa 450 und 650 °C, je nach Ton, treibt das Feuer das in den Kristallen gebundene Wasser aus, und ihr Gefüge bricht zusammen. Danach lässt sich der Ton nie wieder in Wasser aufweichen. Bei noch höherer Hitze beginnen die Körner an ihren Berührungsstellen zu verschmelzen. Irdenware bleibt porös. Bei Steinzeugtemperaturen schmilzt ein Teil der Masse zu Glas, das die Poren füllt, sodass das Gefäß auch ohne Glasur dicht ist. Porzellan aus einer weißen, kaolinreichen Masse wird bei hoher Temperatur gebrannt und dabei hart und leicht durchscheinend.

Ein frühes japanisches Jōmon-Gefäß, gemustert mit gedrehter Schnur, die über den nassen Ton gerollt wurde.

Ein offener Brand: Die Gefäße werden in Brennstoff eingebettet und ohne Ofen auf dem Boden gebrannt.

Töpfer mischen dem Ton eine Magerung bei, etwa Sand, zerstoßene Muschelschalen oder zermahlene alte Scherben. Sie lockert die Masse auf, sodass Dampf entweichen kann, und verringert die Rissbildung beim Trocknen und Erhitzen.

Die ersten Gefäße wurden in offenen Feuern oder flachen Gruben bei 600 bis 900 °C gebrannt. Ein Brennofen hält die Hitze zusammen. Im Ofen der Tafel brennt das Feuer unten im Feuerraum. Die heißen Gase steigen durch eine Lochtenne aus Ton, umströmen die gestapelten Gefäße und ziehen oben durch einen Abzug ab. Weil die Gefäße nicht mehr mitten im brennenden Holz stehen, ist die Hitze gleichmäßiger und leichter zu steuern, und weniger Gefäße springen.

Wie man es herstellt

Gute Irdenware lässt sich mit Ton aus dem Boden, ein paar einfachen Werkzeugen und einem offenen Feuer herstellen. Die Schritte unten sind ein Überblick.

Ton finden und aufbereiten. Rollen Sie eine dünne Wurst und biegen Sie sie zu einem Ring. Bekommt sie keine Risse, ist der Ton plastisch genug. Weichen Sie ihn zu einem Schlicker ein, lassen Sie die Steine absinken, gießen Sie den oberen Teil ab und trocknen Sie ihn, bis er knetbar ist. Kneten Sie Sand oder zerstoßene gebrannte Scherben unter, zunächst etwa ein Viertel des Tonvolumens, und brennen Sie einige kleine Probestücke, um die Mischung anzupassen.

Mit Wülsten aufbauen. Drücken Sie eine Scheibe als Boden flach. Rollen Sie fingerdicke Wülste, legen Sie sie einzeln auf und verstreichen Sie jeden innen und außen mit dem vorigen. Arbeiten Sie auf einem Brett oder einer

Drehscheibe, um das Gefäß drehen zu können. Klopfen Sie die Wände mit einem Schlagholz gegen einen innen gehaltenen Stein dünn und gleichmäßig.

Langsam trocknen. Halten Sie das Gefäß eine Woche oder länger von Sonne und Wind fern. Ist es lederhart, können Sie die Oberfläche mit einem glatten Kiesel polieren. Brennen Sie es erst, wenn es knochentrocken ist und sich nicht mehr kühl anfühlt.

Brennen. Wärmen Sie die Gefäße ein bis zwei Stunden neben dem Feuer vor und drehen Sie sie dabei. Stapeln Sie sie dann auf die Glut, bedecken Sie sie mit Holz und Dung und schüren Sie das Feuer über mehrere Stunden hoch. Lassen Sie alles langsam in der Asche abkühlen, bevor Sie die Gefäße herausnehmen.

> **Sicherheit.** Brennen Sie nur im Freien und fern von Gebäuden: Räumen Sie den Boden frei, halten Sie Wasser bereit, achten Sie auf den Wind und meiden Sie den Rauch. Feuchter Ton kann zerplatzen und scharfe Splitter schleudern, und heiße Asche bleibt stundenlang gefährlich. Trockener Tonstaub enthält feinen Quarz, der die Lunge schädigt: Wischen Sie feucht, statt zu kehren. Betrachten Sie so hergestellte Gefäße als Versuchsstücke und halten Sie sie von Lebensmitteln fern, solange Ton und fertige Ware nicht geprüft sind. Verwenden Sie nie Glasuren unbekannter Zusammensetzung, denn Blei kann in Speisen übergehen.

Geschichte und Entwicklung

Gebrannter Ton ist älter als Gefäße. Menschen in Dolní Věstonice im heutigen Tschechien formten zwischen etwa 29.000 und 25.000 v. Chr. Figuren aus gebranntem Ton, stellten aber keine Gefäße her.

Die ältesten bekannten Gefäße stammen aus der Xianrendong-Höhle in der chinesischen Provinz Jiangxi. 2012 datierte ein Team um Wu Xiaohong und Ofer Bar-Yosef die frühesten Scherben, von denen manche Ruß- und Brandspuren tragen, die auf Kochen hindeuten, auf etwa 20.000 bis 19.000 Jahre vor heute, in den Höhepunkt der letzten Eiszeit. Manche Forscher halten die Schichten der Höhle für zu gestört für eine sichere Datierung, doch frühe Keramik aus anderen Teilen Ostasiens bestätigt, dass eiszeitliche Wildbeuter Gefäße herstellten. In Ōdai Yamamoto im Norden Japans wurden Scherben mit verkohlten Speiseresten je nach Studie auf etwa 16.500 bis 15.000 Jahre vor heute datiert. Im Nahen Osten verlief es umgekehrt: Die ersten Bauerndörfer kamen mehr als zweitausend Jahre ohne Tongefäße aus.

Der älteste bekannte Töpferofen des Nahen Ostens, in Yarim Tepe im Norden des Irak, stammt aus der Zeit um 6000 v. Chr. oder etwas früher. Langsame Drehscheiben halfen Töpfern im Nahen Osten um 3500 v. Chr., aus Wülsten aufgebaute Gefäße zu formen. Die schnelle Töpferscheibe, schwer genug, um weiterzulaufen, während der Töpfer ein Gefäß aus einem Tonklumpen hochzog, folgte im 3. Jahrtausend v. Chr.

Chinesische Öfen erreichten schon vor 2000 v. Chr. etwa 1.000 °C, und ansteigende Drachenöfen an Hängen kamen auf 1.300 °C. Damit wurde Steinzeug möglich und bis zur Tang-Dynastie (618–907) auch weißes Porzellan.

Eine frühe Töpferscheibe: ein schwerer Holzkopf, der sich auf einem in Stein gesetzten Zapfen dreht.

Kennzahlen

Älteste bekannte Gefäße

Xianrendong-Höhle, China, vor ca. 20.000–19.000 Jahren

Ältester bekannter Töpferofen im Nahen Osten

Yarim Tepe, Irak, ca. 6000 v. Chr. oder etwas früher

Punkt ohne Rückkehr

Etwa 450–650 °C, je nach Ton: Er weicht in Wasser nicht mehr auf

Brenntemperaturen

Irdenware 600–1.200 °C, Steinzeug 1.100–1.300 °C, Porzellan bis 1.400 °C

Quellen

1. Pottery · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Pottery
2. Kiln · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Kiln
3. Potter's wheel · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Potter%27s_wheel
4. Oldest pottery comes from Chinese cave · Science News https://sciencenews.org/?p=8772
5. The First Pots (Top 10 Discoveries of 2012) · Archaeology Magazine https://archaeology.org/issues/january-february-2013/collection/top-10-2012-neolithic-china-pottery/top-10-discoveries-of-2012/
6. Firing Clay: The Lowdown on the Ceramic Firing Process · Ceramic Arts Network https://ceramicartsnetwork.org/daily/article/Firing-Clay-The-Lowdown-on-the-Ceramic-Firing-Process
7. Quartz Inversion · Digitalfire Reference Library https://digitalfire.com/glossary/quartz+inversion
8. Water Smoking · Digitalfire Reference Library https://digitalfire.com/glossary/water+smoking
9. Red heat · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Red_heat

Fakten geprüft am 2026-10-11

Brot

Gemahlenes Korn, Wasser und Hitze

vor 12.400 Jahren · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Beherrschung des Feuers (S. 9)

Führt zu: Bier (S. 79)

1 Reibstein (Schiebemühle) 2 Gegangener Teig 3 Ofenkuppel 4 Backfläche 5 Glut 6 Brotschieber

Brot ist ein Teig aus gemahlenem Getreide und Wasser, oft gelockert, der gebacken wird, bis er fest ist. Jäger und Sammler in Jordanien backten schon vor etwa 14.400 Jahren Fladenbrot, bevor irgendjemand Getreide anbaute.

Was es ist

Brot ist Mehl, das mit Wasser vermischt, geformt und in trockener Hitze gegart wird. Fast immer kommt Salz hinzu. Die meisten Brote werden außerdem gelockert: Hefe oder Sauerteig füllen den Teig mit Gasbläschen, sodass er aufgeht und eine luftige Krume bekommt. Ungesäuerte Fladenbrote lassen diesen Schritt aus und backen in wenigen Minuten auf einem heißen Stein oder an der Ofenwand.

Gekochtes Getreide hält sich schlecht, rohes ist schwer verdaulich. Als Brot wird Getreide zu einer Nahrung, die sich leicht mitnehmen lässt und tagelang hält, und in vielen Ernährungsweisen liefert es die meisten Kalorien. Die Tafel zeigt den alten Ablauf: Korn auf dem Reibstein mahlen, Teig im hölzernen Backtrog gehen lassen, Laibe auf dem Herd eines Kuppelofens backen.

Einkorn, Emmer und Gerste, die Getreidearten der ersten Brote im Nahen Osten.

Wie es funktioniert

Weizenmehl enthält zwei Gruppen von Eiweißen, Glutenine und Gliadine. Mit Wasser verknetet, verbinden sie sich zum Kleber oder Gluten, einem elastischen Netz, das sich dehnen lässt und Gas festhält. Die Eiweiße von Roggen und Gerste bilden kein vergleichbares elastisches Netz. Roggenbrot hält vor allem durch seine Stärke und seine Schleimstoffe zusammen, deshalb sind solche Brote dicht.

Hefen, einzellige Pilze auf dem Getreide und in der Luft, ernähren sich vom Zucker, der aus der Stärke frei wird, und geben Kohlendioxid und etwas Alkohol ab. Das Gas bleibt in winzigen, vom Kleber umschlossenen Bläschen hängen, und der Teig schwillt an. Im Sauerteig leben wilde Hefen zusammen mit Milchsäurebakterien, die das Brot säuerlich und länger haltbar machen.

Im Ofen dehnen sich Gas und Wasser aus, und der Laib geht in den ersten Minuten rasch auf. Zwischen etwa 60 und 80 °C nimmt die Stärke Wasser auf und quillt, und die Eiweiße gerinnen. Aus dem weichen Schaum wird eine feste Krume. An der Oberfläche, wo der Teig austrocknet und viel heißer wird, reagieren Zucker und Eiweiße und bräunen zu einer Kruste. Ein Brot ist fertig, wenn die Mitte fast 100 °C erreicht.

Ein Holzbackofen arbeitet mit gespeicherter Wärme. Das Feuer brennt in der Kuppel, bis das Mauerwerk durchgehend heiß ist. Dann wird die Glut beiseitegeschoben oder herausgezogen, und die Laibe kommen mit dem Brotschieber hinein. Die dicken Wände geben eine Stunde oder länger Wärme ab.

Wie man es herstellt

Man braucht Weizen, etwas zum Mahlen, einen Sauerteigansatz und einen Ofen. Die Schritte unten ergeben zwei Weizensauerteigbrote. Roggen und Gerste brauchen andere Rezepte.

Mehl mahlen. Mahlen Sie sauberen, trockenen Weizen oder Dinkel zwischen zwei Steinen. Für ein helleres Brot sieben Sie die grobe Kleie aus.

Sauerteig ansetzen. Verrühren Sie gleiche Gewichtsteile Vollkornmehl und Wasser in einem Glas, decken Sie es locker ab und stellen Sie es warm. Behalten Sie täglich etwa 100 g davon, werfen Sie den Rest weg und füttern Sie den Ansatz bei 20 bis 27 °C mit 100 g Mehl und 100 g Wasser. Nach fünf bis zehn Tagen sollte der Ansatz Blasen werfen und sich wenige Stunden nach dem Füttern verdoppeln.

Mischen und kneten. Für zwei Laibe nehmen Sie 1 kg Mehl, 650–700 g Wasser, 20 g Salz und etwa 200 g aktiven Sauerteig. Kneten Sie zehn Minuten, bis der Teig glatt ist und zurückfedert.

Gehen lassen. Lassen Sie den Teig je nach Wärme vier bis acht Stunden zugedeckt gehen und teilen Sie ihn. Formen Sie jede Hälfte zu einer straffen Kugel und lassen Sie sie in einem bemehlten Gärkorb oder Tuch noch einmal ein bis drei Stunden gehen, bis sie um etwa die Hälfte gewachsen ist und eine Fingerdelle langsam zurückfedert.

Ofen anheizen. Befeuern Sie eine Kuppel aus Lehm oder Ziegeln ein bis zwei Stunden lang mit trockenem Hartholz, bis der Ruß an der Innenseite der Kuppel weggebrannt ist und das Mauerwerk hell aussieht. Ziehen Sie die Glut heraus, wischen Sie die Backfläche feucht aus und schieben Sie die Laibe mit dem Brotschieber ein. Backen Sie etwa 40 Minuten. Beim Klopfen sollte der Boden hohl klingen.

> **Sicherheit.** Backfläche und Ofenwände verursachen schwere Verbrennungen. Benutzen Sie einen langen Brotschieber und dicke Handschuhe und beugen Sie sich nie in die Ofenöffnung. Arbeiten Sie im Freien, denn ein schwelendes Feuer in geschlossenen Räumen setzt Kohlenmonoxid frei. Werfen Sie verschimmeltes Getreide weg, ebenso solches mit schwarzen, hornförmigen Mutterkörnern, die giftig sind. Halten Sie das Sauerteigglas sauber. Zeigt sich Schimmel, werfen Sie den ganzen Ansatz weg und brühen Sie das Glas mit kochendem Wasser aus.

Geschichte und Entwicklung

Ein verkohltes Brot, 79 n. Chr. vom Vesuv verschüttet und vor dem Backen in acht Portionen eingeschnitten.

2018 beschrieb ein Team um Amaia Arranz-Otaegui verkohlte Krümel aus zwei Feuerstellen in Shubayqa 1, einem Fundplatz im Nordosten Jordaniens. Natufische Jäger und Sammler nutzten den Ort vor etwa 14.400 Jahren. Unter dem Elektronenmikroskop erwiesen sich die Krümel als fladenbrotähnliche Speise aus Wildgetreide wie Einkorn, vermischt mit gemahlenen Knollen der Strandsimse. Sie entstand rund 4.000 Jahre, bevor in der Region der Ackerbau begann.

Im alten Ägypten backte man Brot aus Emmer. Die Körner wurden erst gestampft, um sie aus den Spelzen zu lösen, und dann auf Reibsteinen gemahlen. Die Archäobotanikerin Delwen Samuel untersuchte ausgetrocknete Laibe mikroskopisch und fand in Brot von etwa 1400 v. Chr. erhaltene Hefezellen, den frühesten direkten Nachweis von Hefe beim Backen.

In Rom wurde das Backen zum Gewerbe. In Pompeji haben Archäologen 39 Bäckereien mit Kuppelöfen und von Eseln getriebenen Steinmühlen nachgewiesen. Brote, die beim Ausbruch von 79 n. Chr. verkohlten, sind erhalten. Plinius der Ältere berichtete, Gallier und Iberer hätten Bierschaum verwendet, um ein leichteres Brot aufgehen zu lassen.

Jahrhundertelang aßen die meisten Menschen grobes Brot aus Roggen, Gerste oder Mischgetreide, feines Weißbrot aus Weizen war ein Luxus. Im 19. Jahrhundert machten Walzenmühlen weißes Mehl billig, und Backhefe aus der Fabrik ersetzte Teigreste und Brauerhefe. 1961 ersetzte das Chorleywood-Verfahren in Großbritannien die lange erste Gärung durch wenige Minuten intensiven maschinellen Mischens, und das meiste britische Fabrikbrot entsteht bis heute so.

Eine Mühle aus Pompeji: Der sanduhrförmige obere Stein dreht sich über einem feststehenden Kegel und zermahlt das Korn dazwischen.

Kennzahlen

Ältestes bekanntes Brot

Shubayqa 1, Jordanien, vor ca. 14.400 Jahren

Frühester direkter Nachweis von Hefe im Brot

Ägyptische Brotlaibe, ca. 1400 v. Chr.

Typischer Teig

100 Teile Mehl, 60–75 Teile Wasser, etwa 2 Teile Salz

Backzeit

Etwa 40 Minuten bei 220–250 °C für einen Laib von etwa 900 g

Quellen

1. Bread · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Bread
2. Flatbread Baked 14,400 Years Ago Found in Jordan · Sci.News https://www.sci.news/archaeology/natufian-flatbread-jordan-06210.html
3. 3500 year old bread and beer from the New Kingdom Egypt · UCL Researchers in Museums https://blogs.ucl.ac.uk/researchers-in-museums/2017/02/09/3500-year-old-bread-and-beer-from-the-new-kingdom-egypt
4. Digging Deeper into Pompeii's Past · Archaeology Magazine https://archaeology.org/issues/july-august-2019/collection/pompeii-industry-bakeries/digging-deeper-into-pompeiis-past/
5. Adjusting Bake Times in New Ovens · BAKERpedia https://bakerpedia.com/?p=39416
6. Yeast Kill · BAKERpedia https://bakerpedia.com/processes/yeast-kill/
7. Relating Bread Baking Process Operating Conditions to the Product Quality: a Modelling Approach · Chemical Engineering Transactions https://doi.org/10.3303/CET1439289

Fakten geprüft am 2026-10-11

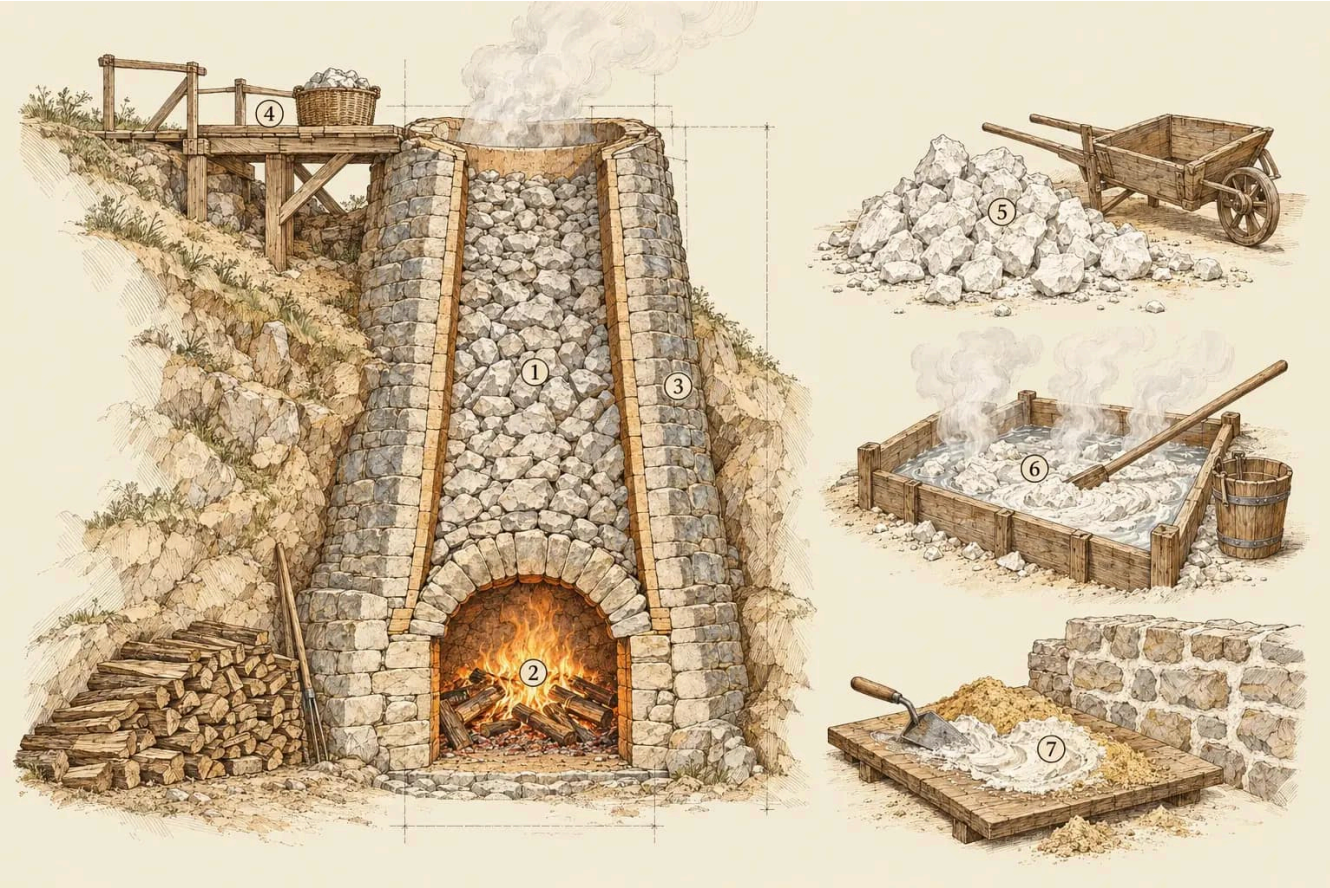
Kalk und Kalkmörtel

Gebrannter Stein, der wieder Stein wird

vor 10.000 Jahren · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Beherrschung des Feuers (S. 9), Steinwerkzeuge (S. 5)

Führt zu: Aquädukt (S. 148), Portlandzement (S. 260), Römischer Beton (S. 168)



1 Füllung aus Kalkstein 2 Holzfeuer unter dem Steingewölbe 3 Dicke Ofenwand mit innerer Auskleidung
4 Beschickungsbühne oben am Ofen 5 Ausgezogener Branntkalk 6 Löschgrube: Wasser, Dampf und Kalkteig
7 Mörtel aus Kalkteig und Sand, im Mauerwerk

Kalk ist Kalkstein, im Ofen gebrannt, bis er sein Kohlendioxid abgibt, und dann mit Wasser zu einem weißen Teig oder Pulver gelöscht. Mit Sand gemischt dient er seit Jahrtausenden als Mörtel und Putz, und er erhärtet, indem er das Kohlendioxid wieder aus der Luft aufnimmt und erneut zu Stein wird.

Was es ist

Kalk ist ein weißes Bindemittel aus Kalkstein, Kreide oder Muschelschalen, die alle aus Calciumcarbonat bestehen. Gebrannt wird der Stein zu Branntkalk; mit Wasser wird Branntkalk zu Löschkalk, als weicher Teig oder als trockenes Pulver. Mit Sand gemischt ergibt Löschkalk Mörtel, in den man Steine und Ziegel setzt, und Putz für Wände und Böden.

Im Mauerwerk nimmt der Mörtel langsam Kohlendioxid aus der Luft auf und wird wieder zu Calciumcarbonat, dem Stoff, aus dem er stammt. Maurer nennen diesen Rundweg den Kalkkreislauf; die Tafel folgt ihm vom Ofen links bis

zur Mauer rechts.

Wie es funktioniert

Brennen. Oberhalb von etwa 700 °C, zügig bei rund 900 °C, zerfällt Calciumcarbonat in Calciumoxid und Kohlendioxid, das mit dem Rauch entweicht. Reiner Kalkstein verliert dabei 44 % seines Gewichts, doch die Brocken behalten ihre Form und kommen leicht, porös und kreidig heraus. Vitruv bemerkte den Verlust und schätzte ihn auf ein Drittel.

In einem traditionellen Ofen setzt der Kalkbrenner aus großen Steinen ein Gewölbe über den Feuerkanal und füllt den Schacht darüber mit immer kleineren Stücken. Durch die Öffnung am Fuß wird zwei bis drei Tage lang Holz nachgelegt. Cato nennt um 160 v. Chr. die Zeichen eines fertigen Brandes: Die obersten Steine sind durchgebrannt, die Füllung sackt unten nach, und die Flamme schlägt mit weniger Rauch heraus. Danach kühlt der Ofen mehrere Tage ab, bevor man ihn leert.

Löschen. Branntkalk reagiert mit Wasser zu Calciumhydroxid und gibt dabei viel Wärme ab. Das Wasser kann kochen, die Brocken quellen auf und zerfallen zu einer feinen weißen Masse. Mit reichlich Wasser entsteht Kalkteig, mit gerade genug ein trockenes Pulver, das Kalkhydrat aus dem Sack. Kalkteig wird mit der Zeit besser: Bis Mitte des 19. Jahrhunderts ließ man ihn in einer Grube oder Holzkiste einige Wochen bis zu einem Jahr reifen, abgedeckt, damit die Luft ihn nicht erhärtet.

Das Löschen: Die Brocken quellen auf, reißen und zerfallen, während das Wasser heiß wird.

Abbinden. In der Mauer bildet der Sand das Gerüst des Mörtels, und der Kalk füllt die Lücken zwischen den Körnern. Während das Wasser verdunstet, nimmt das Calciumhydroxid Kohlendioxid aus der Luft auf und wird wieder zu Calciumcarbonat. Diese Karbonatisierung beginnt an der Oberfläche und dringt langsam nach innen vor. Mörtel, der zu schnell austrocknet, bleibt schwach.

Reiner Kalkmörtel ist meist weicher und durchlässiger als die Steine oder Ziegel, die er verbindet: Die Mauer kann sich etwas setzen und trocknet weiter über ihre Fugen aus. Tonhaltiger Kalkstein liefert hydraulischen Kalk, der auch unter Wasser abbindet.

Wie man es baut

Stückigen Branntkalk bei einem Händler für Denkmalpflege kaufen, löschen, dann Mörtel mischen und eine kleine Gartenmauer aus Bruchsteinen setzen. Wer fertigen Kalkteig nimmt, überspringt das Löschen und beginnt beim Mischen.

Kalk löschen. Eine Stahlwanne zur Hälfte mit Wasser füllen. Mit Schutzbrille, Handschuhen und langen Ärmeln den Branntkalk nach und nach ins Wasser geben, nie das Wasser auf den Kalk, und beim Erhitzen Abstand halten. Mit einem langen Holzpaddel umrühren. Nach dem Abkühlen durch ein Sieb in eine Tonne mit Deckel geben, den Teig unter einigen Zentimetern Wasser absetzen lassen und mindestens ein paar Wochen warten.

Mörtel mischen. Sauberen, scharfkantigen Sand mit Körnern aller Größen nehmen, einen Raumteil Kalkteig auf drei Teile Sand. Die Mischung lange mit der Mörtelhacke oder Schaufel schlagen und hacken und so wenig Wasser wie möglich zugeben. Langes Durcharbeiten macht Kalkmörtel geschmeidig und bindig; zusätzliches Wasser lässt ihn schwinden und reißen.

Mischen von Hand: Die Mörtelhacke mit ihren Löchern arbeitet den Kalkteig in den Sand ein.

Mauern und nachbehandeln. Nur bei mindestens 5 °C und steigender Temperatur mauern, wenn für Wochen kein Frost zu erwarten ist. Die Steine anfeuchten, damit sie den Fugen nicht das Wasser entziehen. Jeden Stein in ein Mörtelbett setzen und die Fugen gut füllen. Die Arbeit mindestens eine Woche unter Jutetuch feucht und schattig halten, besprühen, sobald sie hell wird, und bei Frostgefahr mit Dämmmatten abdecken. Kalkarbeiten nie mit einem Heizgerät trocknen.

> **Sicherheit.** Branntkalk und Löschkalk sind ätzend: Sie verätzen die Haut und können blind machen. Dicht schließende Schutzbrille, Handschuhe, lange Ärmel, Stiefel und bei Pulver eine Staubmaske tragen. Gelangt Kalk ins Auge, sofort mit viel sauberem Wasser bei offenen Lidern mindestens 15 Minuten spülen und ärztliche Hilfe holen. Beim Löschen kann das Wasser kochen und spritzen, und Branntkalk hat bei Kontakt mit Feuchtigkeit schon Holz und Stroh entzündet: trocken, verschlossen und fern von Brennbarem lagern und nie in einem geschlossenen Gefäß mit Wasser versetzen. Keinen Ofen ohne behördliche Erlaubnis und erfahrene Hilfe bauen, während des Brandes vom oberen Rand fernbleiben und nie auf oder in einen noch warmen Ofen steigen. Kinder fernhalten.

Geschichte und Entwicklung

Der älteste gebrannte Kalk stammt von Jägern und Sammlern in der Levante: Auf dem Sinai half er vor etwa 16.000 Jahren offenbar, kleine Feuersteinklingen an ihren Schäften zu befestigen. In Nahal Ein Gev II am See Genezareth wurden vor etwa 12.000 Jahren acht Menschen unter einer rund 40 cm dicken Schicht Kalkputz bestattet: Kalk wurde also schon in größeren Mengen hergestellt.

In den ersten Bauerndörfern bedeckte Kalkputz ab etwa 10.000 Jahren vor heute an vielen Orten Böden und Wände, und ein in den Boden eingetiefter Ofen in Nesher-Ramla in Israel ist etwa 10.400 Jahre alt. In ʻAin Ghazal bei Amman formte man 32 Statuen und Büsten aus Kalkputz über Schilfgerüsten; kalibrierte Radiokarbondaten setzen sie um 7700 bis 7500 v. Chr. an, ältere Veröffentlichungen nennen in unkalibrierten Jahren etwa 6700 bis 6500 v. Chr.

Eine Statue aus ʻAin Ghazal: Kalk, über mit Schnur gebundene Schilfbündel modelliert.

Römische Autoren hinterließen praktische Anleitungen. Catos Ofen war 10 Fuß breit, 20 Fuß hoch und oben 3 Fuß weit. Vitruv empfahl drei Teile Grubensand auf einen Teil Kalk oder zwei Teile Fluss- oder Meersand.

Nach Rom bestanden viele Mörtel aus Kalkteig und Sand aus der Gegend, etwa eins zu drei; andere waren heiß angemacht, mit Branntkalk, der im feuchten Sand gelöscht wurde, und die Rezepte wechselten von Region zu Region. Bis Mitte des 19. Jahrhunderts wurde der Branntkalk auf der Baustelle gelöscht. Der 1824 in Großbritannien patentierte Portlandzement verdrängte ihn nach und nach, und in den 1930er-Jahren mischten die meisten amerikanischen Maurer Zement in ihren Mörtel. In der Denkmalpflege kehrt man für alte Bauten zum Kalk zurück, denn harter, dichter Zementmörtel kann die Feuchtigkeit im Mauerwerk halten und den Verfall des Steins beschleunigen.

Kennzahlen

Brenntemperatur
Etwa 900 °C; die Umwandlung setzt ab rund 700 °C ein

Gewichtsverlust im Ofen
44 % bei reinem Kalkstein; Vitruv schätzte ein Drittel

Traditioneller Mörtel
1 Raumteil Kalkteig auf 3 Teile Sand

Hitze beim Löschen
Branntkalk, der mit Feuchtigkeit reagiert, hat schon 800 °C erreicht und Holz und Stroh entzündet

Ältester Kalkputz in großer Menge
Nahal Ein Gev II, Israel, vor etwa 12.000 Jahren

Quellen

1. Lime plaster cover of the dead 12,000 years ago: new evidence for the origins of lime plaster technology (Friesem, Abadi, Shaham and Grosman, Evolutionary Human Sciences, 2019) · Cambridge University Press, via PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10427327/
2. A 10,400-year-old sunken lime kiln from the Early Pre-Pottery Neolithic B at the Nesher-Ramla quarry (el-Khirbe), Israel (Toffolo et al., 2017) · Journal of Archaeological Science: Reports, record at CENIEH https://investigacion.cenieh.es/documentos/65872833e6e23719147fb5c7?lang=fr
3. 'Ain Ghazal "Monumental" Figures: A Stylistic Analysis (Denise Schmandt-Besserat) · University of Texas at Austin https://sites.utexas.edu/dsb/ain-ghazal/ain-ghazal-monumental-figures-a-stylistic-analysis/
4. Lime Plaster Statue from Ain Ghazal · World History Encyclopedia https://www.worldhistory.org/image/8522/lime-plaster-statue-from-ain-ghazal/
5. Cato, On Agriculture, chapters 1–52 (chapters 16 and 38: the lime kiln), translated by W. D. Hooper and H. B. Ash · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Cato/De_Agricultura/A*.html
6. Vitruvius, The Ten Books on Architecture, Book II, chapters 4–5 (sand and lime), translated by Joseph Gwilt · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/2*.html
7. Introduction to lime: lime and its production · Tŷ-Mawr Lime https://lime.org.uk/knowledge-base/introduction-to-lime-lime-and-its-production
8. Some dos and don'ts in the use of lime mortars · Building Limes Forum https://www.buildinglimesforum.org.uk/some-dos-and-donts-in-the-use-of-lime-mortars/
9. Technical Advice Guide: Introduction to Lime in Traditional Buildings · Scottish Lime Centre Trust https://scotlime.org/documents/15/Technical_Advice_Guide_Introduction_to_Lime_in_Traditional_Buildings_1.pdf
10. Preservation Brief 2: Repointing Mortar Joints in Historic Masonry Buildings (Mack and Speweik, 1998) · U.S. National Park Service https://www.nps.gov/orgs/1739/upload/preservation-brief-02-repointing.pdf
11. A case study in lime production no. 1: traditional batch techniques at Chenkumbi, Malawi · Practical Action https://kolibri.teacherinabox.org.au/modules/en-practical_action/Construction/Cement%20and%20binders/KnO-100090_Lime_production_traditional_Chenkumbi_Malawi.pdf
12. Lime production: traditional batch techniques in Patarra, Costa Rica · Practical Action https://samplecontents.library.ph/en-practical_action/Construction/Cement%20and%20binders/KnO-100089_Lime%20production%20-%20Traditional%20batch%20techniques%20in%20Patarra%20%20Costa%20Rica,%20case%20study/page2.html
13. Calcium oxide: chemical datasheet (with NIOSH Pocket Guide first aid) · CAMEO Chemicals, U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/311

Fakten geprüft am 2026-10-13

Trinkwasser

Schöpfen, absetzen, filtern, abkochen

um 8.400 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Beherrschung des Feuers (S. 9), Töpferei (S. 23), Seil & Schnur (S. 13)

Führt zu: Hygiene und Antisepsis (S. 302), Orale Rehydratation (S. 380)

1 Mit Stein ausgemauerter Brunnenschacht 2 Brunnenkranz, Deckel und Haspel 3 Geneigte Brunnenplatte und Rinne 4 Absetzkrug 5 Feinsandbett mit biologischer Schicht 6 Kies und Auslaufrohr 7 Topf in sprudelndem Kochen

Sicheres Trinkwasser beginnt mit einer geschützten Quelle, etwa einem ausgemauerten, abgedeckten Brunnen, der oberhalb und weit entfernt von Latrinen und Viehpferchen liegt. Ist das Wasser zweifelhaft, entfernen oder töten Absetzen, langsame Sandfiltration und Abkochen die meisten Erreger von Durchfall, Cholera und Typhus, doch keines dieser Verfahren beseitigt gelöste Chemikalien.

Was es ist

Wasser, das krank macht, sieht meist sauber aus. Die Gefahr steckt in Bakterien, Viren, Protozoen und Wurmeiern, die fast alle aus menschlichem oder tierischem Kot stammen. Cholera, Typhus, Ruhr und die Durchfälle, an denen noch heute kleine Kinder sterben, werden so übertragen.

Sicheres Wasser ist das Ergebnis einer Kette von Gewohnheiten: eine sauber gehaltene Quelle, zweifelhaftes Wasser, das durch Absetzen oder langsame Sandfiltration geklärt und danach abgekocht wird, und sorgfältige Aufbewahrung, denn ein schmutziger Becher oder eine Hand verdirbt sauberes Wasser wieder.

Wie es funktioniert

Regen spült Fäkalien von Feldern und Höfen in Bäche und Teiche. Flüssigkeit aus einer Latrinengrube sickert durch den Boden zum oberflächennahen Grundwasser, durch Kies oder klüftigen Kalkstein schneller als durch Ton.

Grundwasser ist meist sauberer als Oberflächenwasser, weil der Boden Teilchen und Mikroben zurückhält. Ein Brunnen bewahrt diesen Vorteil, wenn die vermörtelte obere Auskleidung, der Brunnenkranz, der Deckel und die geneigte, dichte Brunnenplatte Abfluss und verschüttetes Wasser vom Schacht fernhalten.

Viele Keime haften an Schluff- und Tonteilchen. Steht trübes Wasser einige Stunden still, sinken die Teilchen zu Boden und nehmen einen Teil davon mit. Absetzen allein macht Wasser nicht trinkbar.

Ein langsamer Sandfilter ist vor allem ein lebendes System. Das Wasser sickert mit wenigen Zehntelmetern pro Stunde durch feinen Sand. In den ersten Wochen siedelt sich in den obersten Zentimetern eine Schicht aus Bakterien, Algen und winzigen Organismen an. Teilchen bleiben dort hängen, die Mikroben der Schicht ernähren sich von vielen der festgehaltenen Erreger, und andere sterben ab, bevor sie durchkommen. Manche Bakterien und viele Viren gelangen dennoch hindurch: Der Filter verbessert das Wasser, macht es aber allein nicht sicher.

Abkochen tötet durch Hitze. Laut WHO genügt es, Wasser sprudelnd aufzukochen, um krankmachende Bakterien, Viren und Protozoen unschädlich zu machen. Gegen Chemikalien richtet Hitze nichts aus.

Wie man vorgeht

Die Quelle wählen und schützen. Am besten ist geschütztes Grundwasser oder eine gefasste Quelle, danach Regen von einem sauberen Dach, erst zuletzt Flüsse und Teiche. Legen Sie den Brunnen oberhalb jeder Latrine an, mindestens 30 m entfernt, in Kies oder klüftigem Fels weiter, und halten Sie Tiere mit einem Zaun in etwa 15 m Abstand, wie die WHO vorschlägt. Wäsche wird unterhalb gewaschen, Vieh unterhalb getränkt.

Den Brunnen graben und ausmauern. Graben Sie einen Schacht von mindestens einem Meter Durchmesser und mauern Sie ihn beim Abteufen mit Stein oder Ziegeln aus. Die WHO empfiehlt, mindestens die obersten 3 m mit vermörtelten Fugen wasserdicht zu machen, während die Auskleidung unter dem Wasserspiegel offen bleibt, damit Grundwasser zufließen kann. Setzen Sie einen Brunnenkranz und einen Deckel auf und legen Sie ringsum eine wasserdichte, mindestens 1 m breite Brunnenplatte an, die dicht an den Brunnenkranz anschließt und zu einer Rinne hin abfällt, die verschüttetes Wasser bergab leitet. Seil und Eimer gehören nur zum Brunnen und werden nie auf den Boden gestellt. Ein neuer oder überfluteter Brunnen muss desinfiziert und sein Wasser nach Möglichkeit untersucht werden; bis dahin wird es abgekocht. Einen tiefen Brunnen graben oder reinigen erfahrene Brunnenbauer, nie eine Person allein.

Absetzen und durchseihen. Lassen Sie trübes Wasser einige Stunden in einem abgedeckten Krug stehen und gießen Sie dann den klaren oberen Teil ab, ohne den Bodensatz aufzuwirbeln. Seihen Sie es durch ein sauberes, mehrlagig gefaltetes Baumwolltuch. In Dörfern in Bangladesch senkte ein achtfach gefalteter Sari die Cholerafälle fast um die Hälfte.

Einen Sandfilter bauen. Diese Maße zeigen das Prinzip; ein erprobter Bauplan wie der Biosandfilter von CAWST legt Körnung und Durchfluss genau fest. Nehmen Sie ein dichtes Gefäß von etwa 0,9 m Höhe. Unten kommt Kies um das Ende eines Auslaufrohrs, darüber gröberer Sand, dann mindestens ein halber Meter feiner, gewaschener Sand. Führen Sie das Rohr außen hoch, sodass sein Ende etwa 5 cm über der Sandoberfläche liegt; prüfen Sie, wenn der Durchfluss stoppt, dass noch etwa 5 cm Wasser über dem Sand stehen. Eine gelochte Platte oder ein flacher Stein obenauf verhindert, dass das Eingießen den Sand aufwühlt. Füllen Sie das Wasser eimerweise ein und lassen Sie den Filter zwischen zwei Füllungen mindestens eine Stunde und höchstens zwei Tage ruhen. Wird

der Durchfluss zu langsam, kreisen Sie mit der flachen Hand leicht über die oberste Sandschicht, ohne tiefer zu mischen, und schöpfen Sie das schmutzige Wasser ab.

Deckel, erhöhter Sockel und Kelle halten Hände und Schmutz vom gelagerten Wasser fern.

Ein mehrfach gefaltetes Tuch hält Schlamm und das Plankton zurück, an dem Choleraerreger haften.

Abkochen und aufbewahren. Kochen Sie jedes Wasser aus zweifelhafter Quelle vor dem Trinken ab, auch wenn es abgesetzt und gefiltert ist. Bringen Sie es zum sprudelnden Kochen; die CDC raten, es 1 Minute so zu halten, oberhalb von etwa 2000 m 3 Minuten. Abgedeckt abkühlen lassen, dann in einen sauberen Krug mit engem Hals und Deckel füllen. Mit sauberer Kelle schöpfen oder ausgießen, nie mit Becher oder Hand hineinlangen.

> **Sicherheit.** Abkochen und Filtern wirken gegen Keime, nicht gegen Chemikalien. Nitrat aus Mist und Latrinen, Arsen, Fluorid, Blei, Salz, Treibstoff und Pestizide bleiben im Wasser, und beim Kochen reichert sich Nitrat an, weil Wasser verdampft. Kann eine Quelle chemisch belastet sein, suchen Sie eine andere. Absetzen und Sandfilter halten nicht alle Keime zurück: Das Wasser zusätzlich abkochen. Jede Latrine liegt mindestens 30 m vom Brunnen entfernt und unterhalb davon, die Grubensohle mindestens 1,5 m über dem höchsten Grundwasserstand in der Regenzeit. Kochendes Wasser verbrüht: Topf standsicher aufstellen, Kinder fernhalten. Steigen Sie nicht in einen Brunnen: Am Grund kann Sauerstoff fehlen, die Wände können einstürzen, und ein Seil schützt vor keinem von beidem. Decken Sie jeden Brunnen ab, damit kein Kind und kein Tier hineinfällt.

Geschichte und Entwicklung

Die ältesten sicher datierten Brunnen liegen auf Zypern: In Kissonerga-Mylouthkia erreichte ein um 8400 v. Chr. in den Kalkstein getriebener Schacht in 8 m Tiefe das Wasser.

Gefiltertes Wasser für die Öffentlichkeit ging auf einen Versuchsfilter zurück, den eine schottische Bleicherei 1804 einrichtete. 1829 nahm James Simpson, Ingenieur der Chelsea Waterworks Company in London, ein rund 0,4 Hektar großes Filterbecken aus Ziegelbruch, Kies und Sand für Themsewasser in Betrieb.

John Snow vertrat 1849 die Ansicht, die Cholera werde durch abwasserverseuchtes Wasser übertragen, während die meisten Ärzte schlechte Luft verantwortlich machten. Als die Seuche am 31. August 1854 Soho traf, führte er die Todesfälle auf die Pumpe in der Broad Street zurück: Von 73 Todesfällen, die er in den umliegenden Straßen untersuchte, betrafen 61 Menschen, die ihr Wasser getrunken hatten. Die Gemeinde ließ den Schwengel am 8. September entfernen, als der Ausbruch bereits abflaute. Der Geistliche Henry Whitehead fand später den wahrscheinlichen Ursprung: eine Senkgrube vor Haus Nr. 40, in die das Wasser von den Windeln eines kranken Säuglings geschüttet worden war. Snow verglich außerdem zwei Wassergesellschaften, die dieselben Straßen belieferten: Häuser mit Wasser von unterhalb der Londoner

Broad Street, September 1854: Ohne Schwengel ließ sich die Pumpe nicht mehr benutzen.

Abwassereinleitungen zählten etwa 315 Choleratote je 10.000 Häuser, gegenüber 37 bei der Gesellschaft, die flussaufwärts schöpfte.

1908 chlorte Jersey City als erste amerikanische Stadt sein Wasser routinemäßig; das im Wasser verbleibende Chlor schützt es weiter in den Leitungen.

Kennzahlen

Abkochen

Sprudelndes Kochen macht Bakterien, Viren und Protozoen unschädlich (WHO); die CDC raten zu 1 Minute, oberhalb von etwa 2000 m zu 3 Minuten

Haushalts-Sandfilter

Im Labor mit ausgereifter biologischer Schicht: 99,98 % der Protozoen und 90–99 % der Bakterien entfernt, Viren weniger zuverlässig (CDC)

Ältester datierter Brunnen

Um 8400 v. Chr., Kissonerga-Mylouthkia (Zypern), 8 m tief in Kalkstein

Latrine und Brunnen

Mindestens 30 m Abstand, Grubensohle mindestens 1,5 m über dem Grundwasser (MSF)

Gefaltetes Tuch

Ein achtlagig gefalteter Sari hält Teilchen über etwa 20 µm zurück; 48 % weniger Cholera in Dörfern in Bangladesch (2003)

Quellen

1. Boil water (technical brief WHO/FWC/WSH/15.02) · World Health Organization https://www.who.int/publications/i/item/WHO-FWC-WSH-15.02
2. How to Make Water Safe in an Emergency · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/water-emergency/about/index.html
3. How to Create and Store an Emergency Water Supply · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/water-emergency/about/how-to-create-and-store-an-emergency-water-supply.html
4. Household Water Treatment: Slow Sand Filtration · Centers for Disease Control and Prevention https://stacks.cdc.gov/view/cdc/41390/cdc_41390_DS1.pdf
5. Biosand Filter Manual: Design, Construction, Installation, Operation and Maintenance (2009) · CAWST (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology) https://www.ctahr.hawaii.edu/hawaiirain/Library/Guides%26Manuals/CAWST%20files/Biosand%20Filter%20Manual_Version%2010_Sep%2009%5B1%5D.pdf
6. Technical Fact Sheet: Dug well with a hand pump (draft, 2020) · World Health Organization https://www.who.int/docs/default-source/wash-documents/sanitary-inspection-packages/2-tfs-dug-well-with-hand-pump-d-200506.pdf
7. Appendix 14. Excreta pit (stools and vomit) · Médecins Sans Frontières, Medical Guidelines https://medicalguidelines.msf.org/en/viewport/CHOL/english/appendix-14-excreta-pit-stools-and-vomit-32409860.html
8. Introduction to Excreta Disposal, Drainage and Hand Washing Facilities · Red Cross Red Crescent, Southeast Asia https://www.rcrc-resilience-southeastasia.org/wp-content/uploads/2018/03/5-Introduction-to-Excreta-Disposal-Drainage-and-Hand.pdf
9. Private Water Supplies Technical Manual, 6.5 Filtration · Drinking Water Quality Regulator for Scotland https://dwqr.scot/media/jl0ddz3x/pws-technical-manual-section-6-water-treatment-processes-65-filtration-larger-scale.pdf
10. Reduction of cholera in Bangladeshi villages by simple filtration (Colwell et al., 2003) · Proceedings of the National Academy of Sciences https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC298724
11. All About DWEE: Keeping Your Well Water Safe and Sound · Nebraska Department of Water, Energy, and Environment https://dwee.nebraska.gov/node/5495
12. Well · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Well
13. London's water supply and the introduction of sand filtration (Chelsea) · Institute of Water https://instituteofwater.org.uk/all/londons-water-supply-and-the-introduction-of-sand-filtration-chelsea/
14. John Snow: Cholera & the Broad Street pump · London Museum https://www.londonmuseum.org.uk/collections/london-stories/john-snow-cholera-broad-street-pump/
15. Dr John Snow and Reverend Whitehead · Cholera and the Thames (Westminster City Archives) https://www.choleraandthethames.co.uk/cholera-in-london/cholera-in-soho/
16. Snow & the pump handle · Cholera in St. James, Michigan State University https://johnsnow.matrix.msu.edu/broadstpump/snow-the-pump-handle/
17. Snow's "Grand Experiment" · Adhikari, DeNero and Wagner, Computational and Inferential Thinking https://inferentialthinking.com/chapters/02/2/snow-s-grand-experiment/index.html
18. History of Drinking Water Treatment · Centers for Disease Control and Prevention https://archive.cdc.gov/www_cdc_gov/healthywater/drinking/history.html
19. Reductions of E. coli, echovirus type 12 and bacteriophages in an intermittently operated household-scale slow sand filter (Elliott et al., 2008) · Water Research https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.01.016
20. Investigation of E. coli and virus reductions using replicate, bench-scale biosand filter columns and two filter media (Elliott et al., 2015) · International Journal of Environmental Research and Public Health https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4586611
21. Slow Sand Filtration (Huisman and Wood, 1974) · World Health Organization https://www.susana.org/knowledge-hub/resources?id=4263
22. Giardiasis (DPDx, laboratory identification of parasites) · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/dpdx/giardiasis/index.html

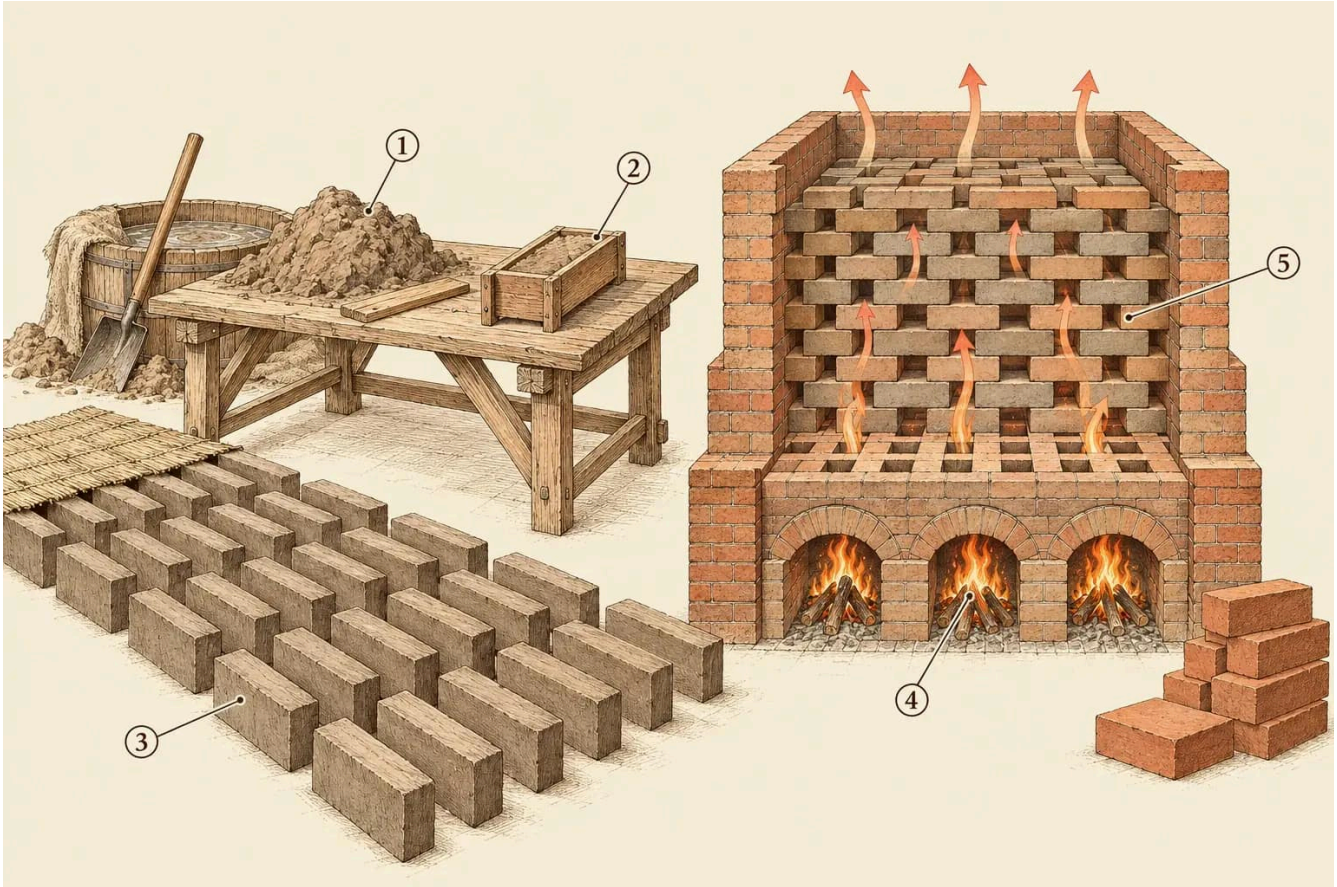
Fakten geprüft am 2026-10-13

Ziegel

Genormte Blöcke aus Erde

um 7.500 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Führt zu: Aquädukt (S. 148), Bogen und Gewölbe (S. 74), Römischer Beton (S. 168)



1 Aufbereiteter Lehm 2 Holzform 3 Trocknende Grünlinge 4 Feuerkanal 5 Eingesetzte Ziegel im Ofen

Ein Ziegel ist ein Block aus Lehm oder Ton in festgelegter Größe, an der Sonne getrocknet oder im Ofen gebrannt, sodass sich Mauern aus gleichen, handlichen Einheiten bauen lassen. Geformte Lehmziegel gibt es im Nahen Osten schon vor 7500 v. Chr.; gebrannte Ziegel kamen Jahrtausende später und trugen dann Städte, Aquädukte und Fabrikschornsteine.

Was es ist

Ein Ziegel ist ein kleiner Erdblock von regelmäßiger Form und Größe. Lehmziegel werden nur an der Sonne getrocknet, gebrannte Ziegel kommen in den Ofen, bis der Ton zu harter Keramik wird. Beide werden lagenweise mit Mörtel vermauert, und weil alle Steine gleich groß sind, kann der Baumeister die Mengen im Voraus berechnen und die Schichten waagerecht halten.

Die Tafel zeigt die Arbeit einer Handziegelei vor dem Maschinenzeitalter: aufbereiteten Lehm neben dem Streichtisch, Grünlinge, die in Reihen trocknen, und einen kleinen Ofen mit aufsteigendem Zug im Schnitt.

Wie es funktioniert

Ton besteht aus winzigen, flachen Mineralkörnern. Nass gleiten sie aneinander vorbei, und die Masse lässt sich formen; beim Trocknen entweicht das Wasser zwischen ihnen, die Körner rücken zusammen, und der Block wird hart und schwindet. Reiner Ton schwindet so stark, dass er reißt, deshalb mischen Ziegler Sand, zerstoßene Keramik oder gehäckseltes Stroh bei. Im alten Mesopotamien magerte man meist mit Stroh oder Dung, und eine Schätzung kommt auf etwa 60 kg Stroh je hundert Ziegel.

Ein Lehmziegel bleibt so weich, dass er im Wasser wieder zu Schlamm wird; Lehmwände brauchen daher einen Steinsockel, einen weiten Dachüberstand und regelmäßige Pflege. Der Brand verändert den Ton selbst. Die Tonminerale verlieren zunächst das in ihnen gebundene Wasser, und gegen 900 bis 1000 °C beginnen ihre Körner zu versintern. Der gebrannte Ziegel weicht im Wasser nicht mehr auf, und seine meist rote Farbe stammt vom Eisen im Ton.

Eine bodenlose, innen gesandete Holzform gibt jedem Ziegel dieselbe Größe.

In einem Ofen mit aufsteigendem Zug wie dem gezeichneten brennt das Feuer in Kanälen am Boden. Die heißen Gase steigen durch einen durchbrochenen Rost und durch die Lücken zwischen den Grünlingen, die gitterartig eingesetzt sind, und entweichen oben. Der Brand muss langsam beginnen: Restwasser im Ton wird zu Dampf, und ein zu schnell erhitzter Ziegel kann reißen oder platzen.

Wie man sie herstellt

Für Lehmziegel braucht man nur geeignete Erde, Wasser, Stroh, eine Form und ein paar trockene Wochen.

Die Erde prüfen. Graben Sie unter dem Mutterboden, der Wurzeln und Humus enthält. Machen Sie einige Probeziegel: Reißen sie beim Trocknen, ist die Erde zu fett und braucht Sand; bröckeln die Kanten, braucht sie mehr Ton.

Mischen und magern. Zerkleinern Sie die Erde, wässern Sie sie und treten Sie Häckselstroh ein, bis ein steifer, klumpenfreier Teig entsteht. Ein Eimer locker eingefülltes Stroh auf fünf Eimer Erde ist ein vernünftiger erster Versuch; passen Sie die Menge nach den Probeziegeln an, denn manche gute Erde braucht wenig oder gar kein Stroh. Lassen Sie den Teig einen Tag abgedeckt ruhen, damit sich das Wasser gleichmäßig verteilt.

Die Form bauen. Verbinden Sie vier Bretter zu einem bodenlosen Rahmen, zum Beispiel mit 30 × 15 × 10 cm Innenmaß, mit Griffen an den Enden. Machen Sie ihn nass und bestreuen Sie ihn mit Sand, damit sich der Lehm löst.

Ziegel streichen. Stellen Sie die Form auf ebenen, gesandeten Boden, werfen Sie einen Lehmbatzen kräftig hinein, damit er die Ecken füllt, streichen Sie die Oberseite mit einem nassen Holz ab und heben Sie die Form senkrecht hoch. Setzen Sie den nächsten Ziegel einen Finger breit daneben.

Trocknen. Schützen Sie die Ziegel in den ersten Tagen vor praller Sonne und Regen und stellen Sie sie dann hochkant, damit Luft an alle Seiten kommt. Je nach Wetter brauchen sie eine bis vier Wochen, bis sie gestapelt werden können; brechen Sie einen Probeziegel auf und prüfen Sie, dass kein dunklerer, feuchter Kern bleibt. Wer gebrannte Ziegel möchte, gibt einige kleine, völlig trockene Proben in eine Töpferwerkstatt und lässt sie dort brennen.

> **Sicherheit.** Ein frischer Lehmziegel wiegt mehrere Kilogramm: Heben Sie mit gebeugten Knien und halten Sie Stapel niedrig und standfest. Trockener Tonstaub enthält feinen Quarz: Befeuchten Sie die Erde vor dem Zerkleinern, reinigen Sie nass statt mit dem Besen und tragen Sie eine gut sitzende FFP2- oder FFP3-Maske, wenn sich Staub nicht vermeiden lässt. Sichern oder verfüllen Sie jede Grube, denn darin sammelt sich Wasser. Das Brennen bringt große Hitze und Rauchgase mit sich; überlassen Sie es geschulten Leuten und brennen Sie nie Ziegel, die noch feucht sind.

Geschichte und Entwicklung

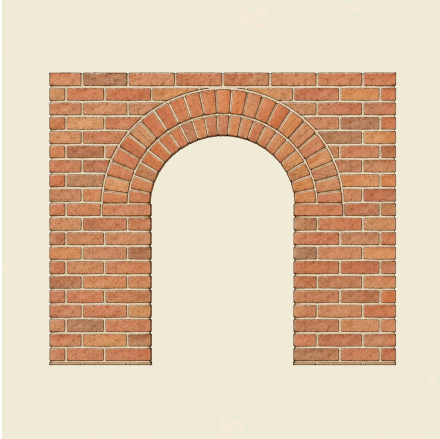
Im Nahen Osten baute man schon im 9. Jahrtausend v. Chr. Wände aus luftgetrocknetem Lehm, und zu den ältesten geformten Lehmziegeln gehören die aus Tell Aswad in Syrien, älter als 7500 v. Chr. In Nemrik im Nordirak bestehen Mauern aus dem 8. Jahrtausend aus langen, zigarrenförmigen Ziegeln von etwa 51 cm. Die Ziegel von Jericho aus dem 8. und 7. Jahrtausend v. Chr. waren von Hand geformt und mit Reihen von Daumenabdrücken versehen, die dem Mörtel Halt gaben.

Handgeformter Ziegel aus Jericho: Die Daumenabdrücke gaben dem Mörtel Halt.

In rechteckigen Holzformen gestrichene Ziegel verbreiten sich im 6. Jahrtausend v. Chr. in Mesopotamien. Gebrannte Ziegel kommen später und bleiben zunächst besonderen Zwecken vorbehalten, weil Brennstoff knapp ist: In Mesopotamien erscheinen sie in der Uruk-Zeit im 4. Jahrtausend v. Chr., manche Autoren datieren die ersten früher, und in China werden sie in Chengtoushan um 4400 v. Chr. hergestellt. Ein sumerischer Text von etwa 2100 v. Chr. beschreibt, wie Gudea, der Herrscher von Lagasch, den Lehm in die Form gibt und den ersten Ziegel eines neuen Tempels heraushebt. Die Städte im Industal bauen ab dem 3. Jahrtausend v. Chr. mit gebrannten Ziegeln von regelmäßiger Größe; viele kommen dem Verhältnis 1:2:4 von Dicke, Breite und Länge nahe, doch die Ausgräber haben mehrere Formate festgestellt.

Rom stellt im 1. Jahrhundert n. Chr. genormte Ziegel in großer Zahl her, und nach langer Pause greift Nordeuropa im Mittelalter wieder zum Ziegel, dort, wo guter Baustein fehlt.

Die industrielle Ziegelherstellung beginnt im 19. Jahrhundert mit Maschinen, die Ton in Formen pressen. 1858 lässt sich Friedrich Hoffmann einen Ringofen patentieren, der nie auskühlen muss: Das Feuer wandert von Kammer zu Kammer, während die heißen Gase die Ziegel davor trocknen und vorwärmen. Im Ofen von Palmerston North in Neuseeland brauchte das Feuer etwa sechs Wochen für die Runde durch seine vierzehn Kammern. Der metrische britische Normziegel misst 215 × 102,5 × 65 mm.



Im Bogen steht jeder Ziegel hochkant, jede Fuge zeigt zur Mitte, und die Last geht von Stein zu Stein.

Kennzahlen

Unter den ältesten geformten Lehmziegeln
Tell Aswad, Syrien, vor 7500 v. Chr.

Britischer metrischer Normziegel
215 × 102,5 × 65 mm

Brenntemperatur
Etwa 900 bis 1000 °C für gewöhnliche Ziegel

Ringofen
1858 von Friedrich Hoffmann patentiert

Quellen

1. The Appearance of Bricks in Ancient Mesopotamia (Hnaihen, Athens Journal of History 6/1, 2020) · Athens Institute for Education and Research https://www.athensjournals.gr/history/2020-6-1-4-Hnaihen.pdf
2. Thumb-pressed brick, Tell al-Sultan (Jericho) · Queen's University Library, Museum of Near Eastern Archaeology https://virtual-exhibits.library.queensu.ca/museum-of-near-eastern-archaeology/thumb-pressed-brick/
3. Hoffman Oblong Continuous Kiln, Palmerston North · Heritage New Zealand Pouhere Taonga https://www.heritage.org.nz/list-details/194/Listing
4. Brick · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Brick
5. Technical Note 9: Manufacturing of Brick · Brick Industry Association https://www.gobrick.com/media/file/9-manufacturing-of-brick.pdf
6. ABCs of Making Adobe Bricks (Guide G-521) · New Mexico State University, Cooperative Extension Service https://pubs.nmsu.edu/_g/G521/
7. Shrinkage rates · Valentine Clays https://valentineclays.co.uk/pages/shrinkage-rates
8. Drying shrinkage · Digitalfire Reference Library https://digitalfire.com/glossary/drying+shrinkage
9. Hands-on archaeology: how to make adobe bricks · Archaeology Southwest https://www.archaeologysouthwest.org/2018/11/04/hands-on-archaeology-how-to-make-adobe-bricks/
10. Stamford bricks: the hand-made process (Talking about technology) · Bournemouth University https://histru.bournemouth.ac.uk/Oral_History/Talking_About_Technology/building%20conservation%20technology/stamford_bricks_hand_made_process.htm
11. Material behaviour of unstabilised earth block masonry and its components under compression at varying relative humidity (Wiehle and Brinkmann, Case Studies in Construction Materials 17, 2022) · Elsevier https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01663

Fakten geprüft am 2026-10-12

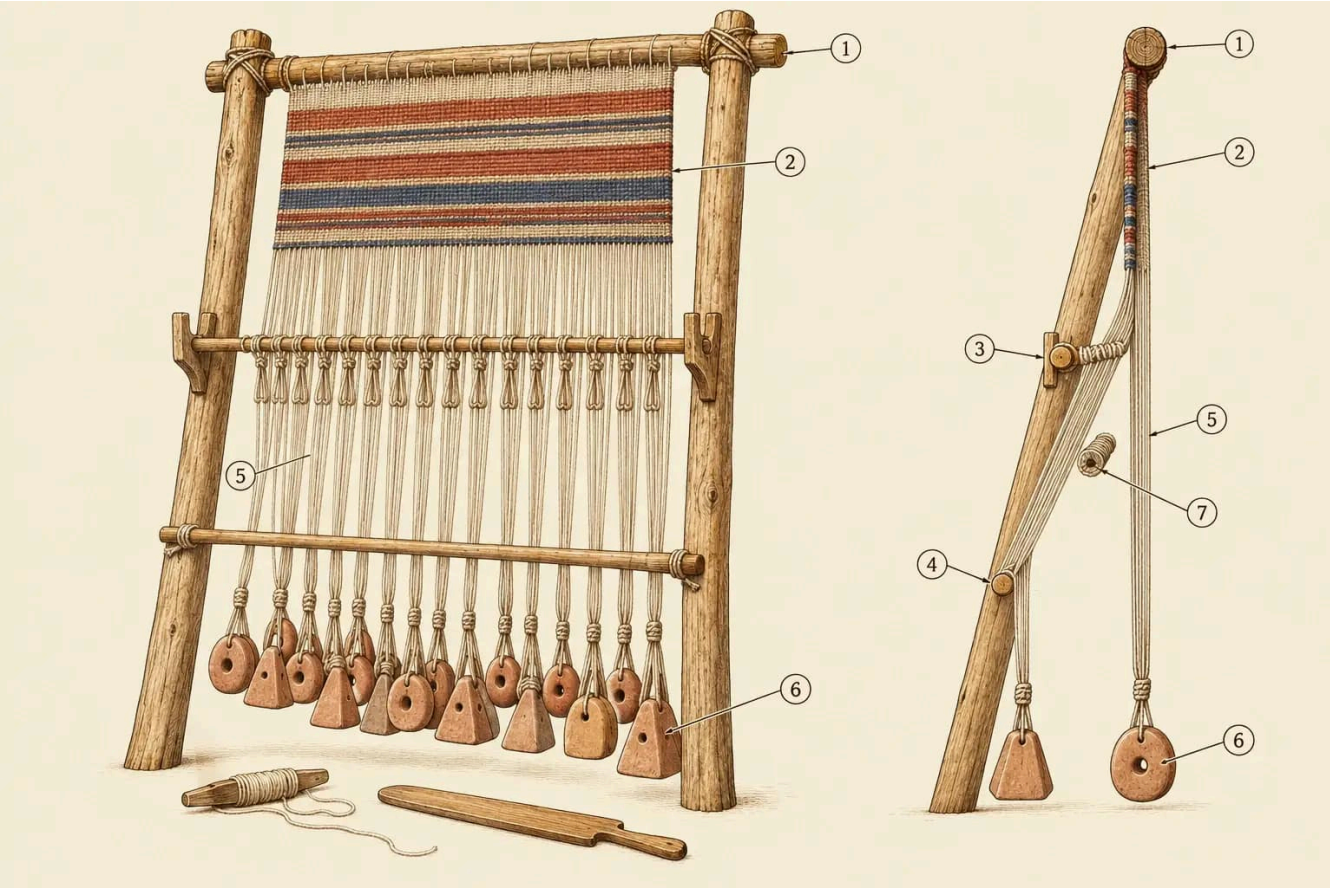
Weben

Gekreuzte Fäden werden zu Stoff

um 6.700 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Seil & Schnur (S. 13)

Führt zu: Heißluftballon (S. 234), Segel (S. 91), Nähmaschine (S. 273)



1 Oberer Warenbaum 2 Gewebter Stoff 3 Litzenstab 4 Trennstab 5 Kettfäden 6 Webgewichte 7 Schuss im offenen Fach

Beim Weben entsteht Stoff, indem ein Faden, der Schuss, Reihe um Reihe über und unter einer Schar gespannter Fäden, der Kette, hindurchgeführt wird. Der Webstuhl hält die Kette straff und öffnet sie, damit der Schuss sie in einem Zug durchquert; der hier gezeichnete Gewichtswebstuhl reicht ins Neolithikum zurück und hielt sich in Nordeuropa bis ins Mittelalter; an wenigen Orten gibt es ihn noch heute.

Was es ist

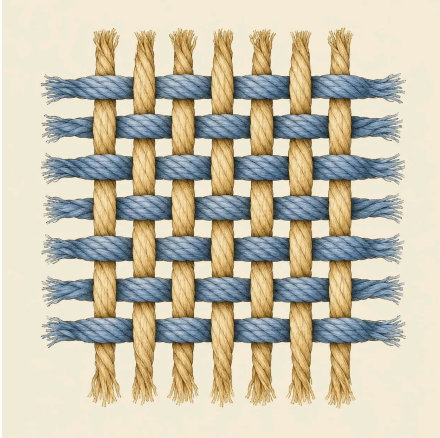
Weben erzeugt Stoff aus zwei Fadensystemen, die sich im rechten Winkel kreuzen. Die Kette ist der Länge nach auf einem Gestell gespannt, dem Webstuhl. Der Schuss läuft quer hindurch. In der einfachsten Bindung, der Leinwandbindung, geht er über einen Kettfaden und unter den nächsten, und jede neue Reihe macht es umgekehrt. Die Reibung hält die Kreuzungen zusammen, deshalb braucht der Stoff weder Leim noch Knoten und bleibt doch geschmeidig.

Schnüre drehen und Matten flechten konnten die Menschen lange vor dem Weben. Der Webstuhl hält Hunderte Fäden unter gleicher Spannung und hebt eine ganze Fadengruppe auf einmal an. So durchquert der Schuss die ganze Breite in einer Bewegung, statt von Hand über und unter jeden Kettfaden geführt zu werden.

Die Tafel zeigt einen Gewichtswebstuhl, wie er im Vorderen Orient und in Europa seit dem Neolithikum und in Nordeuropa bis ins Mittelalter benutzt wurde: Zwei Ständer lehnen an einer Wand, die Kette hängt von einem Baum an ihrer Spitze, und Tongewichte halten sie straff.

Wie es funktioniert

Der Schuss läuft durch eine Öffnung in der Kette, das Fach, das an diesem Webstuhl zwei Stäbe bilden. Der Trennstab (4) ist unten quer zwischen den Ständern befestigt. Jeder zweite Kettfaden liegt vor ihm, die übrigen hängen dahinter. Weil die Ständer schräg stehen, legen sich die vorderen Fäden über den Stab nach vorn, während die hinteren senkrecht fallen, und zwischen beiden Lagen öffnet sich von selbst ein Spalt: das natürliche Fach.



Leinwandbindung: Von Reihe zu Reihe wechselt der Schuss die Kettfäden, die er bedeckt.

Der Litzenstab (3) sitzt weiter oben vor der Kette. Von ihm führt eine Schnurschlaufe, die Litze, zu jedem hinteren Faden. Zieht die Weberin den Stab nach vorn und legt ihn in gegabelte Halter an den Ständern, kommen die hinteren Fäden an den vorderen vorbei nach vorn, und eine zweite Öffnung entsteht, das Gegenfach. Wird der Schuss (7) abwechselnd durch Fach und Gegenfach geführt, ergibt sich die Leinwandbindung. Weitere Litzenstäbe, an andere Fadengruppen gebunden, erlauben Köper und Muster.

Gewebt wird von oben nach unten. Die Weberin legt jeden Schuss in einem lockeren Bogen ein, damit er die Kanten nicht zusammenzieht, und schlägt ihn mit den Fingern, einem Kamm oder einem flachen Holzschwert nach oben gegen den fertigen Stoff an. Der Stoff (2) lässt sich auf den oberen Baum (1) aufwickeln, so wird ein Stück länger als der Webstuhl hoch ist.

Jedes Webgewicht (6) trägt ein Bündel Kettfäden (5). In Versuchen des Centre for Textile Research in Kopenhagen brauchte Wollgarn, das mit einem Wirtel von 4 g gesponnen war, etwa 13 g Spannung je Faden, dickeres Garn von einem 8-g-Wirtel etwa 19 g. Die Gewichte müssen nebeneinander auf einer Höhe hängen, sonst verheddern sie sich und scheuern die Fäden.

So baut man es

Die meiste Arbeit steckt im Garn: Bei sechs Kettfäden und zehn Schüssen je Zentimeter braucht ein Quadratmeter Stoff mindestens 1,6 km davon, dazu Abfall und die Länge, die die Fäden beim Auf und Ab über- und untereinander brauchen.

Garn spinnen. Eine Handspindel ist ein etwa 25 cm langer Stab mit einer beschwerten Scheibe, dem Wirtel, nahe einem Ende. Man versetzt sie in Drehung, lässt den Drall in die Fasern laufen, die man aus einem Bausch Wolle oder Flachs auszieht, und wickelt das Garn auf, wenn die Spindel fast den Boden erreicht. Das Kettgarn muss reißfest sein, denn es trägt die Gewichte.

Gestell bauen. Nötig sind zwei gerade Ständer von etwa 2 m, ein runder Baum, der in Kerben an ihrer Spitze liegt, ein Trennstab, ein Litzenstab und zwei gegabelte Halter. Ein Ende des Baums rundum mit einigen Löchern versehen: Ein Pflock in einem davon, an einen Ständer gebunden, hält ihn fest und wird zum Aufwickeln des Stoffs herausgezogen. Die Ständer leicht schräg gegen eine feste Wand lehnen, unten verkeilen und oben an der Wand

oder einem Dachbalken festbinden, damit der Webstuhl beim Ziehen des Litzenstabs nicht nach vorn kippt. Trennstab und Halter fest an die Ständer binden.

Gewichte machen. Durchbohrte Ringe oder Pyramiden aus Ton formen, durch und durch trocknen lassen, bis sie sich nicht mehr kühl anfühlen, und von jemandem mit Erfahrung im Ofen oder Feldbrand brennen lassen; Steine mit natürlichem Loch ersparen das Brennen. Die Gewichte möglichst gleich schwer halten; einige hundert Gramm pro Stück sind üblich. Das Garn bestimmt, wie viele Fäden ein Gewicht trägt: Bei etwa 15 g je Faden hält ein 300-g-Gewicht rund zwanzig. Jede Gewichtsreihe sollte etwa so breit sein wie die Kette.

Kette anlegen. Auf einem kleinen Bandwebgerät oder mit Brettchen eine schmale Anfangskante weben, so lang wie der Stoff breit werden soll, und den Schuss auf einer Seite in Schlaufen herausführen, so lang wie die gewünschte Kette: Diese Schlaufen werden zur Kette. Die Kante an den oberen Baum nähen und die Fäden herabhängen lassen. Jeden zweiten Faden hinter den Trennstab führen. Vordere und hintere Fäden in gleich großen Bündeln an getrennte Gewichte binden und die Gewichte jeder Reihe nebeneinander auf gleicher Höhe hängen lassen. Dann vom Litzenstab zu jedem hinteren Faden eine Litze knüpfen. Für ein Stück, das länger ist als der Webstuhl, Reservekette über jedem Gewicht zu einem kleinen Bündel wickeln und beim Aufwickeln des Stoffs jeweils etwas nachlassen.

Weben. Den Schuss dicht unter der Stoffkante durch das natürliche Fach führen und anschlagen. Den Litzenstab nach vorn in die Halter legen, den Schuss zurückführen, wieder anschlagen und den Stab zurücksetzen. Zum Schluss eine Abschlusskante weben oder die Kettenden zu Fransen knoten.

> **Sicherheit.** Ein beladener Webstuhl ist kopflastig: an einer stabilen Wand festbinden, die Füße sichern und Kinder fernhalten. Ein herabfallendes Gewicht kann einen Zeh brechen, daher feste Schuhe tragen. Feuchter Ton kann im Feuer platzen: nur ganz trockene Gewichte brennen, im Freien oder in einem belüfteten Ofen, und guten Abstand halten.

Geschichte und Entwicklung

Textilien bleiben selten erhalten, ihr Werkzeug öfter: Webgewichte und Spinnwirtel findet man häufig in alten Siedlungen.

Weben ist vielleicht älter als Ackerbau. In Pavlov und Dolní Věstonice in Mähren tragen gebrannte Tonbrocken, die mehr als 26.000 Jahre alt sind, rund achtzig Abdrücke, die Olga Soffer und James Adovasio als Schnüre, Zwirnbindungen und Leinwandbindungen aus Pflanzenfasern deuten. Es sind Abdrücke, keine Stoffe, und ob dafür ein Webstuhl verwendet wurde, ist unbekannt.

Der älteste erhaltene Webstoff im Vorderen Orient und in Europa stammt aus Çatalhöyük in Anatolien, aus der Zeit um 6700–6500 v. Chr. Es ist ein Gewebe in Leinwandbindung, das erhalten blieb, weil es verkohlte. Lange galt es als Leinen; 2021 zeigte das Mikroskop bei mehreren Proben Eichenbast, die innere Rinde des Baums, andere waren zu stark verkohlt für eine Bestimmung. Nach diesem Stoff richtet sich das Datum des Webens in diesem Katalog: Die Abdrücke aus Mähren sind älter, aber unsicher.

Tongewichte, die das Holz des Webstuhls überdauern, zeigen, wie sich der Gewichtswebstuhl im neolithischen Europa ausbreitete. In Amerika webte man am Rückengurtwebstuhl, der zwischen einem Baum oder Pfosten und einem Gurt um die Hüften der Weberin gespannt ist. Der aufrechte Webstuhl mit zwei Bäumen, den ägyptische Grabbilder zeigen, kam wohl aus Ägypten nach Europa.

Etwa ab dem 11. oder 12. Jahrhundert verdrängte der waagerechte Trittwebstuhl, der das Fach mit den Füßen öffnet, den Gewichtswebstuhl in Europa nach und nach, im Norden später. Der Gewichtswebstuhl ist bis heute in Fitjar in Westnorwegen in Gebrauch, ebenso in Manndalen im Norden, wo samische Weberinnen ihn nach 1945 für schwere Wolldecken wiederbelebten.

Am Rückengurtwebstuhl lehnt sich die Weberin zurück, um die Kette zu spannen, und vor, um sie zu lockern.

Kennzahlen

Älteste Textilabdrücke
Pavlov und Dolní Věstonice (Mähren), vor mehr als 26.000 Jahren

Ältester erhaltener Webstoff
Çatalhöyük (Anatolien), etwa 6700–6500 v. Chr., in Leinwandbindung

Kettspannung
Etwa 13–19 g je Wollfaden in Versuchen des Centre for Textile Research, Kopenhagen

Webgewichte
245 bis 870 g bei einem Satz von sieben Stück aus Voss, Norwegen

Noch in Gebrauch
Gewichtswebstühle in Fitjar und Manndalen, Norwegen

Quellen

1. Experimental Archaeology, Part 3: Loom weights (technical report, 2007) · Centre for Textile Research, University of Copenhagen https://ctr.hum.ku.dk/research-programmes-and-projects/previous-programmes-and-projects/tools/technical_report_3__experimental_archaeology.pdf
2. Oppstadvev · Store norske leksikon https://snl.no/oppstadvev
3. Çatalhöyük – The oldest textiles at the TRC · Textile Research Centre, Leiden https://www.trc-leiden.nl/trc/index.php/en/blog/1794-catalhoeyuek-the-oldest-textile-at-the-trc
4. Upper Palaeolithic fibre technology: interlaced woven finds from Pavlov I, Czech Republic, c. 26,000 years ago · Antiquity (Adovasio, Soffer and Klíma, 1996) https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/upper-palaeolithic-fibre-technology-interlaced-woven-finds-from-pavlov-i-czech-republic-c-26000-years-ago/CD78BC4A39E2DD6958ACA29BA1BA30DA
5. Ice Age clothing said to be more advanced than previously thought · ScienceDaily / University of Illinois https://www.sciencedaily.com/releases/2000/02/000203074853.htm
6. Backstrap looms · Sam Noble Museum, University of Oklahoma https://samnoblemuseum.ou.edu/collections-and-research/ethnology/mayan-textiles/weaving-technology/backstrap-looms
7. Understanding the Archaeological Record: Reconstructing a Warp-Weighted Loom · EXARC Journal https://exarc.net/ark:/88735/10351

Fakten geprüft am 2026-10-13

Pökeln & Einsalzen

Wasser entziehen gegen Verderb

um 6.050 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Töpferei (S. 23)

1 Grobes Meersalz 2 Schweinekeulen im Trockensalz 3 Heringe in Salz und Lake geschichtet 4 Hängende Schinken beim Trocknen 5 Klippfisch (Salzkabeljau) auf dem Trockengestell

Einsalzen und Pökeln konservieren Fleisch, Fisch und Gemüse, indem sie ihnen und den Mikroben, die sie verderben würden, Wasser entziehen. Schon im 6. Jahrtausend v. Chr. kochte man in Osteuropa Sole zu Salz, und gesalzenes Schweinefleisch, Hering und Kabeljau ernährten Heere, Seeleute und Städte bis zur Erfindung der Kühlung.

Was es ist

Einsalzen oder Pökeln gehört zu den ältesten Arten, Lebensmittel haltbar zu machen. Fleisch oder Fisch wird mit trockenem Salz eingerieben oder in Lake eingelegt, bis so wenig freies Wasser übrig ist, dass Verderbsbakterien nicht mehr wachsen. Oft wird das Lebensmittel danach getrocknet, geräuchert oder zum Reifen gelagert. Gemüse kann man dagegen schwach salzen, damit nützliche Milchsäurebakterien es vergären und säuern, wie beim Sauerkraut.

Die Tafel versammelt die Verfahren einer europäischen Vorratskammer vor der Kühlung: grobes Salz, Schweinekeulen in einem Salztrog, Heringe in einem Fass, hängende Schinken und gespaltenen Kabeljau auf

einem Trockengestell.

Wie es funktioniert

Jede Mikrobe braucht verfügbares Wasser. Lebensmittelfachleute messen es als Wasseraktivität: Sie beträgt bei reinem Wasser 1,0 und sinkt, wenn Salz oder Zucker Wasser binden. Die Grenze ist von Mikrobe zu Mikrobe verschieden, und manche Erreger von Lebensmittelvergiftungen wachsen noch bei recht niedrigen Werten, doch die große Mehrheit der Mikroben vermehrt sich unter etwa 0,90 nicht mehr. Gesättigte Salzlake liegt bei etwa 0,75.

Kommt Salz mit Fleisch oder Fisch in Berührung, wandert Wasser aus dem Gewebe zur konzentrierteren Salzlösung, während Salz langsam eindringt. Bakterien an der Oberfläche verlieren auf dieselbe Weise Wasser: Ihr Zellinneres schrumpft von der Wand weg, und sie hören auf zu wachsen oder sterben. Je tiefer das Salz eindringt und je mehr Wasser austritt, desto länger hält das Lebensmittel. Stark gesalzener Kabeljau oder Schinken hält Monate oder Jahre, muss aber vor dem Kochen im Kühlschrank gewässert werden.

Steinsalz wächst in Würfeln; ein Kristall, der an den Kanten schneller wächst als auf den Flächen, wird zum getreppten „Trichterkristall“.

Salz macht nicht keimfrei. Manche gefährliche Bakterien vertragen es gut, darunter Staphylococcus aureus, und Clostridium botulinum, das ohne Luft wächst, überdauert als Spore in schlecht gepökeltem Fleisch und Fisch. Die meisten modernen Pökelsalze für Fleisch enthalten daher Nitrit, das Botulinum bremst und das Fleisch rosa hält. Ältere Rezepte nahmen Salpeter, den Bakterien in der Lake zu Nitrit umwandeln.

Schwaches Salzen wirkt anders. Bei etwa 2 bis 2,5 % Salz behält Kohl genug Wasser für Milchsäurebakterien, die Salz besser vertragen als die meisten Verderber. Sie verwandeln seinen Zucker in Milchsäure, und die Säure macht das Gemüse haltbar.

Wie man es macht

Fleisch zu Hause sicher zu pökeln verlangt ein erprobtes Rezept, abgewogenes Nitritpökelsalz und einen kühlen, kontrollierten Raum. Am sichersten beginnt man mit Salz und Kohl: mit Sauerkraut.

Den Kohl vorbereiten. Nehmen Sie feste, frische Köpfe, entfernen Sie die äußeren Blätter und den Strunk und hobeln Sie den Kohl in etwa 5 mm breite Streifen. Wiegen Sie ihn.

Salzen. Mischen Sie je 2,25 kg Kohl 3 Esslöffel Einmachsalz (ohne Jod und Rieselhilfe) unter, etwa 2 bis 2,5 % des Gewichts. Stampfen Sie ihn handvollweise fest in einen sauberen Gärtopf oder ein großes Glas, bis das Salz den Saft herauszieht.

Abdecken und beschweren. Der Kohl muss ständig unter seiner eigenen Lake bleiben. Bedeckt ihn der Saft nicht, füllen Sie sofort Lake auf, angesetzt mit 1½ Esslöffeln Salz je 950 ml abgekochtem, kaltem Wasser. Legen Sie einen Teller mit einem Gewicht darauf, etwa einen verschlossenen Beutel mit Lake, und decken Sie mit einem Tuch ab.

Gären lassen. Bei 21 bis 24 °C braucht der Kohl etwa drei bis vier Wochen, bei 15 bis 18 °C fünf bis sechs. Unter 15 °C gärt er womöglich nicht, über 24 °C kann er weich werden. Auf der Oberfläche kann sich eine dünne weiße Kahmhaut bilden: Schöpfen Sie sie ab. Das Kraut ist fertig, wenn die erwartete Zeit vorbei ist, keine Bläschen mehr aufsteigen und der Kohl durch und durch deutlich sauer schmeckt. Danach hält es sich monatelang im Kühlschrank.

> **Sicherheit.** Halten Sie das Gemüse stets unter der Lake und arbeiten Sie mit sauberem Gerät. Werfen Sie den ganzen Ansatz weg, wenn irgendwo flaumiger oder farbiger Schimmel auftaucht oder das Kraut schleimig, rosa oder dunkel wird oder faulig riecht. Improvisieren Sie kein Pökelfleisch und keinen Salzfisch: Botulismus ist selten, aber tödlich, und Nitritpökelsalz ist in zu großer Menge giftig. Verwenden Sie nur das Produkt, die Dosis und die Wiegegenauigkeit, die ein erprobtes Rezept vorgibt, beschriften Sie es und halten Sie es von Kindern fern. Gepökeltes enthält viel Salz; wer Salz einschränken soll, wässert es gut oder meidet es.

Geschichte und Entwicklung

Briquetage: Man kochte Sole in groben Tonwannen über dem Feuer ein und zerschlug sie, um die Salzkuchen herauszulösen.

Salz wurde lange vor der Schrift gewonnen. In Poiana Slatinei bei Lunca im Nordosten Rumäniens umgibt eine Solequelle, etwa sechsmal so salzig wie Meerwasser, ein rund drei Meter hoher Hügel aus Asche und verbrannter Erde. Er stammt von Menschen, die dort ab etwa 6050 v. Chr. Sole über dem Feuer eindampften. Die Ausgräber wissen nicht, ob dieses Salz zum Konservieren, für das Vieh oder für den Tausch bestimmt war; das Datum bezeichnet also die älteste bekannte Salzgewinnung, nicht das erste gesalzene Lebensmittel.

Später im vorgeschichtlichen Europa kochte man Sole in groben Tongefäßen auf Tonstützen über dem Feuer ein, ein Verfahren, das Briquetage heißt. Die Gefäße wurden zerschlagen, um die Salzkuchen zu lösen, und Haufen ihrer Scherben kennzeichnen die Fundstellen bis heute. In Hallstatt in Österreich baute man seit der Bronzezeit Steinsalz unter Tage ab, und im 13. und 12. Jahrhundert v. Chr. pökelte man dort Schweinefleisch in großem Maßstab in eingegrabenen Holzbecken, von denen heute acht bekannt sind.

Die Griechen salzten Fisch als Tarichos, die Römer nannten gesalzenes Fleisch und gesalzenen Fisch Salsamentum; im 2. Jahrhundert v. Chr. lieferte Gallien gepökeltes Schweinefleisch in großen Mengen nach Rom. Im katholischen Europa wurde Salzfisch, vor allem getrockneter Salzkabeljau, zur Alltagskost der Freitage und der Fastenzeit, wenn Fleisch verboten war.

Klippfisch, kopflos, gespalten und getrocknet, hält jahrelang und muss vor dem Kochen einen Tag oder länger im Kühlschrank gewässert werden.

Kabeljau aus Neufundland wurde schon im 16. Jahrhundert für europäische Märkte gesalzen, und im 17. machte billiges Salz aus Südeuropa das Salzen für die Fischernationen des Nordens lohnend; Salzkabeljau wurde zu einer Seite des atlantischen Dreieckshandels. Konservendosen ab dem frühen 19. Jahrhundert und Kühlung im 20. haben vieles davon übernommen, doch Schinken, Speck und Salzfisch werden noch immer mit Salz haltbar gemacht, und Sauerkraut gärt noch immer in seiner eigenen Lake.

Kennzahlen

Älteste bekannte Salzgewinnung

Poiana Slatinei, Lunca, Rumänien, etwa 6050 bis 5500 v. Chr.

Wasseraktivität gesättigter Salzlake

Etwa 0,75 (reines Wasser: 1,0)

Schwelle, unter der sich die meisten Mikroben nicht mehr vermehren

Wasseraktivität unter etwa 0,90

Bronzezeitliches Pökeln in Hallstatt

Holzbecken des 13. bis 12. Jahrhunderts v. Chr., vor allem für Schweinefleisch

Quellen

1. The earliest salt production in the world: an early Neolithic exploitation in Poiana Slatinei-Lunca, Romania (Weller and Dumitroaia, 2005) · Antiquity https://www.antiquity.ac.uk/projgall/weller306/
2. Bronze Age meat curing vats · Naturhistorisches Museum Wien https://www.nhm.at/hallstatt/en/trading_hub/meat_processing_industry/meat_curing_vats
3. Is there a common water-activity limit for the three domains of life? (Stevenson et al., ISME Journal, 2015) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4438321/
4. Sauerkraut · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/ferment/recipes/sauerkraut/
5. Curing (food preservation) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Curing_(food_preservation)
6. Dried and salted cod · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Dried_and_salted_cod
7. One-directional modelling to assess the mechanistic actions of power ultrasound on NaCl diffusion in pork (McDonnell et al., Ultrasonics Sonochemistry 40, 2018) · Elsevier https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.06.025
8. The physics behind ham production (Parnovsky and Varlamov, 2026) · arXiv https://arxiv.org/abs/2607.18173
9. Interactive comment on Rose et al.: water activity of aqueous NaCl after Archer's evaluation (Clegg, 2007) · Atmospheric Chemistry and Physics Discussions https://acp.copernicus.org/preprints/7/S4180/2007/acpd-7-S4180-2007.pdf
10. Water Activity of Foods (MF3674) · K-State Research and Extension https://bookstore.ksre.ksu.edu/download/water-activity-of-foods_MF3674
11. Hazard Analysis and Risk-Based Preventive Controls for Human Food, Appendix 3: Bacterial Pathogen Growth and Inactivation (Table 3-A) · US Food and Drug Administration https://www.fda.gov/media/99598/download

Fakten geprüft am 2026-10-12

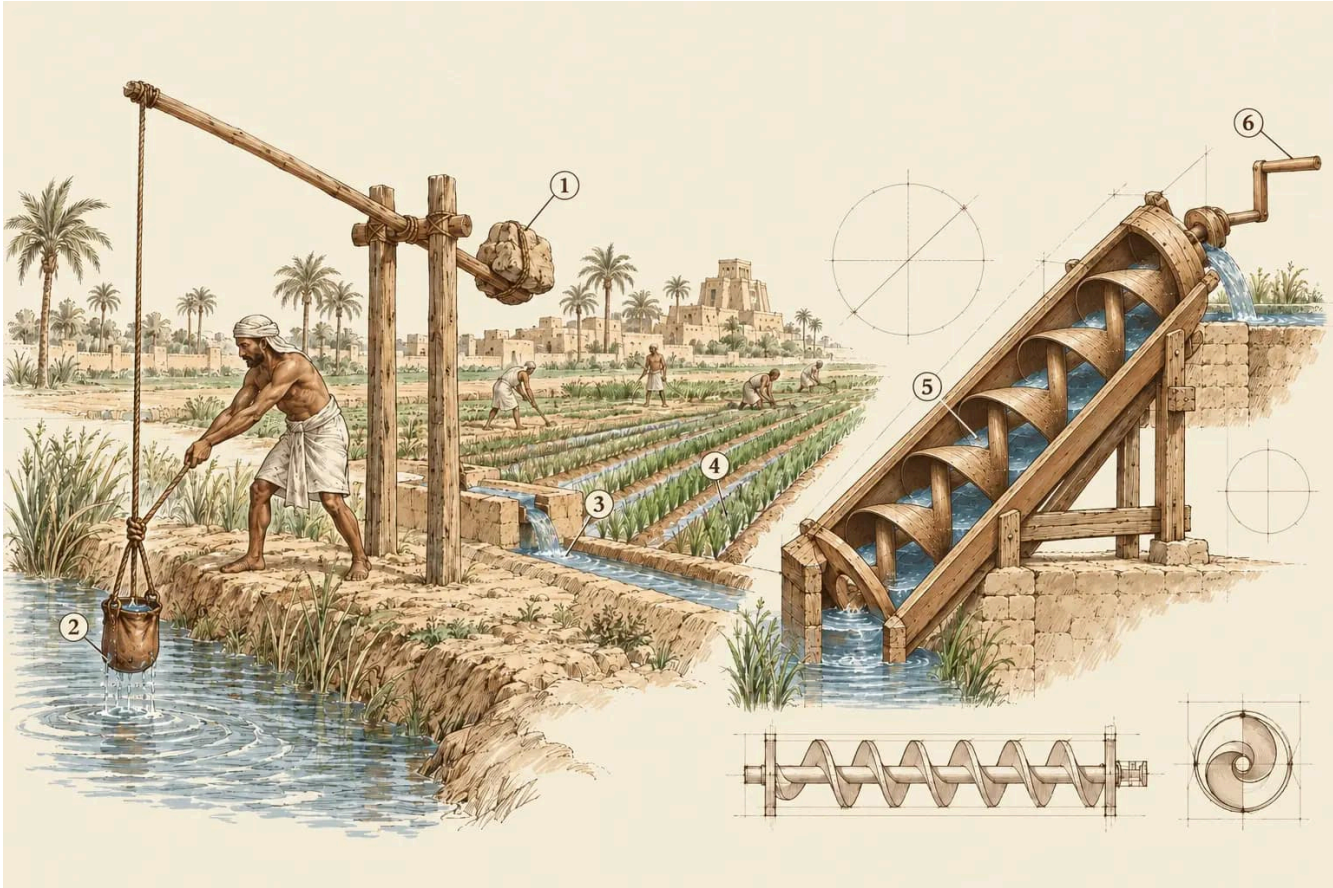
Bewässerung

Wasser zu den Feldern leiten

um 6.000 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Steinwerkzeuge (S. 5), Seil & Schnur (S. 13)

Führt zu: Aquädukt (S. 148)



1 Gegengewicht des Schadufs 2 Ledereimer 3 Zuleitungskanal 4 Furchen zwischen den Pflanzreihen 5 Schraubengang 6 Kurbel

Bewässerung bringt den Pflanzen das Wasser, das der Regen allein nicht liefert: entweder lässt man es durch Kanäle mit leichtem Gefälle fließen, oder man hebt es aus einem Fluss oder Brunnen. Die ältesten bekannten Kanäle entstanden vor rund achttausend Jahren in den trockenen Ebenen Mesopotamiens, wo sich auch früh zeigte, dass ein bewässertes Feld ohne Entwässerung langsam versalzen kann.

Was es ist

Wer bewässert, gibt den Pflanzen Wasser, wenn sie es brauchen, statt auf Regen zu warten. Im Süden des Irak oder im ägyptischen Niltal ist ohne Bewässerung kein Ackerbau möglich; anderswo steigert sie die Erträge und erlaubt in der Trockenzeit eine zweite Ernte.

Liegt die Quelle höher als das Feld, erledigt das Gefälle die Arbeit: Ein Kanal zweigt flussaufwärts ab und führt mit leichtem Gefälle hinunter zu den Feldern. Liegt das Wasser tiefer, zwischen hohen Ufern oder am Grund eines

Brunnens, muss es jemand heben. Die Tafel zeigt einen Schaduf, der einen Kanal mit seinen Furchen speist, und eine archimedische Schraube.

Wie es funktioniert

In einem zu flachen Bett fließt das Wasser langsam, lagert Schlamm ab und lässt Schilf wachsen; in einem zu steilen gräbt es die Sohle aus und reißt die Dämme ein. Ein kleiner Erdkanal fällt oft kaum mehr als einen Meter pro Kilometer, und die FAO empfiehlt für Furchen ein Gefälle zwischen 0,05 und 0,5 %. Darum folgen Kanäle den Höhenlinien und verlieren nur langsam an Höhe.

Auf dem Feld überflutet das Wasser entweder ein ebenes, von niedrigen Erdwällen umschlossenes Becken und versickert dort, oder es läuft in Furchen zwischen den Reihen und dringt seitlich in die Dämme ein.

Der Schaduf: Sobald der Bauer loslässt, hebt das Gegengewicht den vollen Eimer.

Einen Kubikmeter Wasser um einen Meter zu heben, erfordert mindestens 9,8 Kilojoule, dazu kommt die Reibung; ein Gerät macht diese Arbeit nur leichter aufzubringen. Der Schaduf ist ein Hebel mit einem Eimer am langen Ende und einem Stein oder Lehmklumpen am kurzen. Der Bauer zieht den leeren Eimer ins Wasser hinab und hebt damit das Gewicht, das dann den vollen Eimer nach oben bringt. Bei Feldmessungen im Tschad hob eine Person 39 bis 130 Liter pro Minute über Höhen von 1,8 bis 6,2 m. Bei gleicher Anstrengung bringt eine größere Förderhöhe weniger Wasser.

Die archimedische Schraube ist eine Wendel, die sich in einem um etwa 30° geneigten Rohr dreht. Das Wasser bleibt am tiefsten Punkt jedes Gangs liegen, und dieser Punkt wandert beim Drehen nach oben und nimmt eine Wassertasche mit. Sie fördert große Mengen, aber nur wenige Meter hoch; je steiler sie steht, desto kleiner ist jede Tasche.

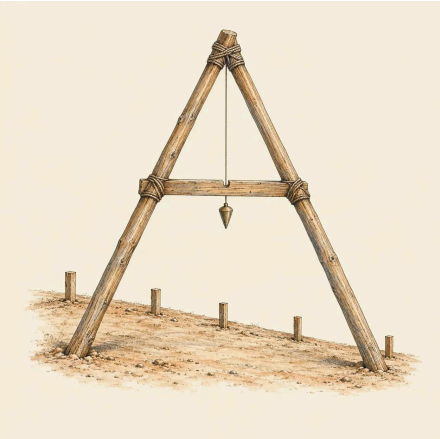
Jedes Bewässerungswasser enthält etwas gelöstes Salz. Pflanzen und Sonne nehmen das Wasser und lassen das Salz zurück. Was aus Kanälen und Feldern versickert, hebt außerdem den Grundwasserspiegel, und salziges Grundwasser steigt dann bis zu den Wurzeln auf. Ein Feld bleibt nur gesund, wenn von Zeit zu Zeit zusätzliches Wasser das Salz in die Tiefe spült und eine natürliche oder angelegte Entwässerung es abführt. Sonst reichert sich Salz an, manchmal als weiße Kruste, und die Ernten sinken.

Wie man es baut

Eine A-Waage bauen. Zwei etwa 2,80 m lange Stangen oben zusammenbinden, die Füße 4 m auseinander, und einen Querbalken etwa 1 m über dem Boden befestigen. Ein Lot an die Spitze hängen. Das Gestell auf zwei Pflöcke stellen, die Stelle markieren, an der die Schnur den Balken kreuzt, das Gestell umdrehen und erneut markieren: Die Mitte zwischen beiden Marken zeigt waagrecht an.

Den Kanal abstecken. Das Gestell von der Entnahmestelle aus weitersetzen und an jedem Fuß einen Pflock einschlagen. Für ein Gefälle einen Klotz unter den unteren Fuß legen, diesen Fuß verschieben, bis das Lot auf der Marke hängt, und dort den Pflock setzen: 1 cm auf 4 m ergibt 0,25 %. Entlang der Pflöcke graben und den Aushub auf der Talseite zu einem Damm feststampfen.

Furchen ziehen. Sie mit demselben leichten Gefälle vom Kanal abzweigen, 30 bis 60 cm auseinander auf Sandboden und 75 cm bis 1,50 m auf Ton, jede über eine Kerbe im Damm gespeist. Wasser laufen lassen, bis der



Die A-Waage: Hängt das Lot auf der Marke, stehen beide Füße gleich hoch.

Boden auch am Furchenende bis in Wurzeltiefe feucht ist, dann die Kerbe schließen und die Furchenenden in einen Abzugsgraben führen, damit überschüssiges Wasser das Feld verlässt.

Einen Schaduf errichten. Zwei Pfosten fest am Wasser eingraben, dazwischen einen Querbalken, auf dem eine drei bis vier Meter lange Stange bei einem Viertel ihrer Länge drehbar aufliegt. Einen Eimer ans lange Ende hängen und einen Stein oder Erdsack ans kurze, so abgestimmt, dass ein voller Eimer mit leichtem Schub steigt.

Oder eine kleine Schraube wickeln. Einen biegsamen Schlauch um eine Stange wickeln, jede Windung etwa so weit versetzt, wie die Stange dick ist. Die Stange in etwa 30° Neigung auf zwei Lagern montieren, so tief, dass die Schlauchmündung bei jeder Umdrehung eine Weile unter Wasser taucht, und oben eine Kurbel anbringen. Die Kurbel so drehen, dass die Mündung beim Eintauchen Wasser schöpft. Kommt nichts oben an, zuerst die andere Richtung versuchen, dann den Winkel verringern oder die Windungen enger legen.

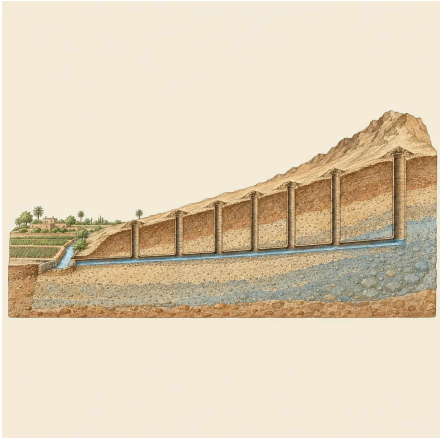
> **Sicherheit.** Auch in schmalen Kanälen mit steilen, rutschigen Ufern ertrinken Menschen: nie allein am Wasser arbeiten und Kinder fernhalten. Gräben flach halten, höchstens kniehoch, und nie in einen tieferen Graben steigen: Seine Wände können ohne Vorwarnung einstürzen. Den Aushub vom Rand fernhalten. Nicht in den Schwenkbereich des Schaduf-Gewichts treten. Stehendes Wasser binnen weniger Tage ablassen, denn darin brüten Mücken. Wo Bilharziose vorkommt, leben die Erreger in stehendem wie fließendem Süßwasser und dringen durch die Haut: jeden Hautkontakt mit Kanalwasser vermeiden. Bewässerungswasser ist kein Trinkwasser.

Geschichte und Entwicklung

In Choga Mami, im Osten des Irak nahe der iranischen Grenze, fanden Ausgräber Rinnen aus der Zeit um 6000 v. Chr., die sie als Bewässerungsgräben deuten; andere datieren sie eher um 5500 v. Chr. Später lebten die Städte Sumers von Kanälen aus Euphrat und Tigris, und Texte aus Lagasch beschreiben um 2400 v. Chr. vollständige Netze.

In Ägypten teilten Erddämme die Flussaue in Becken. Während der Flut ließen Schleusen das Wasser ein; es stand etwa einen Monat und wurde vor der Aussaat abgelassen. Der Schaduf, abgebildet auf einem mesopotamischen Rollsiegel um 2200 v. Chr., erreichte Ägypten im 2. Jahrtausend v. Chr.

Griechische Autoren schreiben die in Ägypten benutzte Wasserschraube Archimedes im 3. Jahrhundert v. Chr. zu; die Assyriologin Stephanie Dalley liest eine Inschrift Sanheribs um 700 v. Chr. als Beschreibung bronzener Schrauben in Ninive, eine bis heute umstrittene Deutung. Qanate, Stollen, die Grundwasser über Kilometer leiten, werden meist auf Iran im 1. Jahrtausend v. Chr. zurückgeführt, sind aber schwer zu datieren; 2015 waren dort noch rund 37.000 in Betrieb.



Ein Qanat fasst Grundwasser unter den Hügeln und führt es durch einen Stollen ans Tageslicht.

1958 vertraten Thorkild Jacobsen und Robert Adams die These, steigender Salzgehalt habe sumerische Bauern vom Weizen zur widerstandsfähigeren Gerste getrieben; Marvin Powell widersprach dieser Theorie 1985. Die Tropfbewässerung, in Israel vom Ingenieur

Simcha Blass entwickelt und ab 1965 von Netafim hergestellt, bringt das Wasser heute bis an den Fuß jeder Pflanze.

Kennzahlen

Älteste bekannte Kanalbewässerung

Choga Mami, Ostirak, um 6000 v. Chr. (manche Schätzungen: 5500 v. Chr.)

Neigung der archimedischen Schraube

Meist etwa 30°; Vitruv nutzt ein 3-4-5-Dreieck, also etwa 37°

Anteil am Ackerland

Rund 18 % des weltweiten Ackerlands waren im Jahr 2000 bewässert (FAO)

Leistung eines Schadufs, eine Person

39–130 Liter pro Minute bei Förderhöhen von 1,8–6,2 m (Feldmessungen im Tschad)

Gefälle der Furchen

0,05–0,5 %, also 0,5 bis 5 m pro Kilometer (FAO)

Quellen

1. Choga Mami · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Choga_Mami
2. Dating Ancient Canal Systems Using Radiocarbon Dating and Archaeological Evidence at Tello/Girsu (Egberts et al., 2023) · Radiocarbon 65(4), Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/radiocarbon/article/dating-ancient-canal-systems-using-radiocarbon-dating-and-archaeological-evidence-at-tellogirsu-southern-mesopotamia-iraq/DFCB7F569B744396C9E4BDA923A8EB07
3. Evolution of Water Lifting Devices (Pumps) over the Centuries Worldwide (Yannopoulos et al., 2015) · Water 7(9), MDPI https://www.pumpfundamentals.com/pumps%20historical.pdf
4. Shadoof · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Shadoof
5. The Ten Books on Architecture, Book X (water screw, ch. 6) · Vitruvius, LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/10*.html
6. Archimedes' screw: optimal design · Chris Rorres, New York University https://math.nyu.edu/Archimedes/Screw/optimal/optimal.html
7. The mystery of the Hanging Garden of Babylon (Stephanie Dalley) · Oxford University Press https://blog.oup.com/2013/06/mystery-hanging-garden-babylon/
8. Ancient Egypt water engineering · University of Wisconsin–Madison, Ancient Engineering Technologies https://ancientengrtech.wisc.edu/ancient-egypt-water-engineering
9. Qanat · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Qanat
10. Irrigation Water Management: Irrigation Methods, ch. 2 Basin irrigation · FAO http://www.fao.org/4/s8684e/s8684e03.htm
11. Irrigation Water Management: Irrigation Methods, ch. 3 Furrow irrigation · FAO http://www.fao.org/4/s8684e/s8684e04.htm
12. Canals, Annexes 2 and 3: How to construct a canal; How to determine the slope of a canal alignment · FAO http://www.fao.org/4/ai585e/ai585e07.pdf
13. Simple methods for aquaculture: contour levelling methods (A-frame level) · FAO https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6707e/x6707e06.htm
14. Irrigation Water Management: Introduction to Irrigation, ch. 7 Salinity · FAO https://www.fao.org/4/R4082E/r4082e08.htm
15. The Challenge of Salinization · Soil Science Society of America https://soils4teachers.org/files/s4t/know-soil-challenge-of-salinization.pdf
16. Salt and Silt in Ancient Mesopotamian Agriculture (Jacobsen and Adams, 1958) · Science 128, KeiBi catalogue, University of Tübingen https://keibi.uni-tuebingen.de/Record/KEI00116827
17. Salt, Seed, and Yields in Sumerian Agriculture. A Critique of the Theory of Progressive Salinization (Powell, 1985) · Zeitschrift für Assyriologie 75, KeiBi catalogue, University of Tübingen https://keibi.uni-tuebingen.de/Record/KEI00062118
18. Water factsheet · FAO https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/faowater/docs/FAOWfactsheet.pdf
19. What Israeli drips did for the world · The Times of Israel https://www.timesofisrael.com/what-israeli-drips-did-for-the-world/
20. Schistosomiasis fact sheet · World Health Organization https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/schistosomiasis
21. The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw (Rorres, 2000) · Journal of Hydraulic Engineering 126(1), ASCE https://math.nyu.edu/Archimedes/Screw/optimal/screw.pdf
22. Water Lifting Devices (Fraenkel), 3.6.3 Archimedean screw and open screw pumps · FAO Irrigation and Drainage Paper 43 https://www.fao.org/4/ah810e/AH810E06.htm
23. Water Lifting Devices (Fraenkel), 4.2 Human power · FAO Irrigation and Drainage Paper 43 https://www.fao.org/4/ah810e/AH810E08.htm

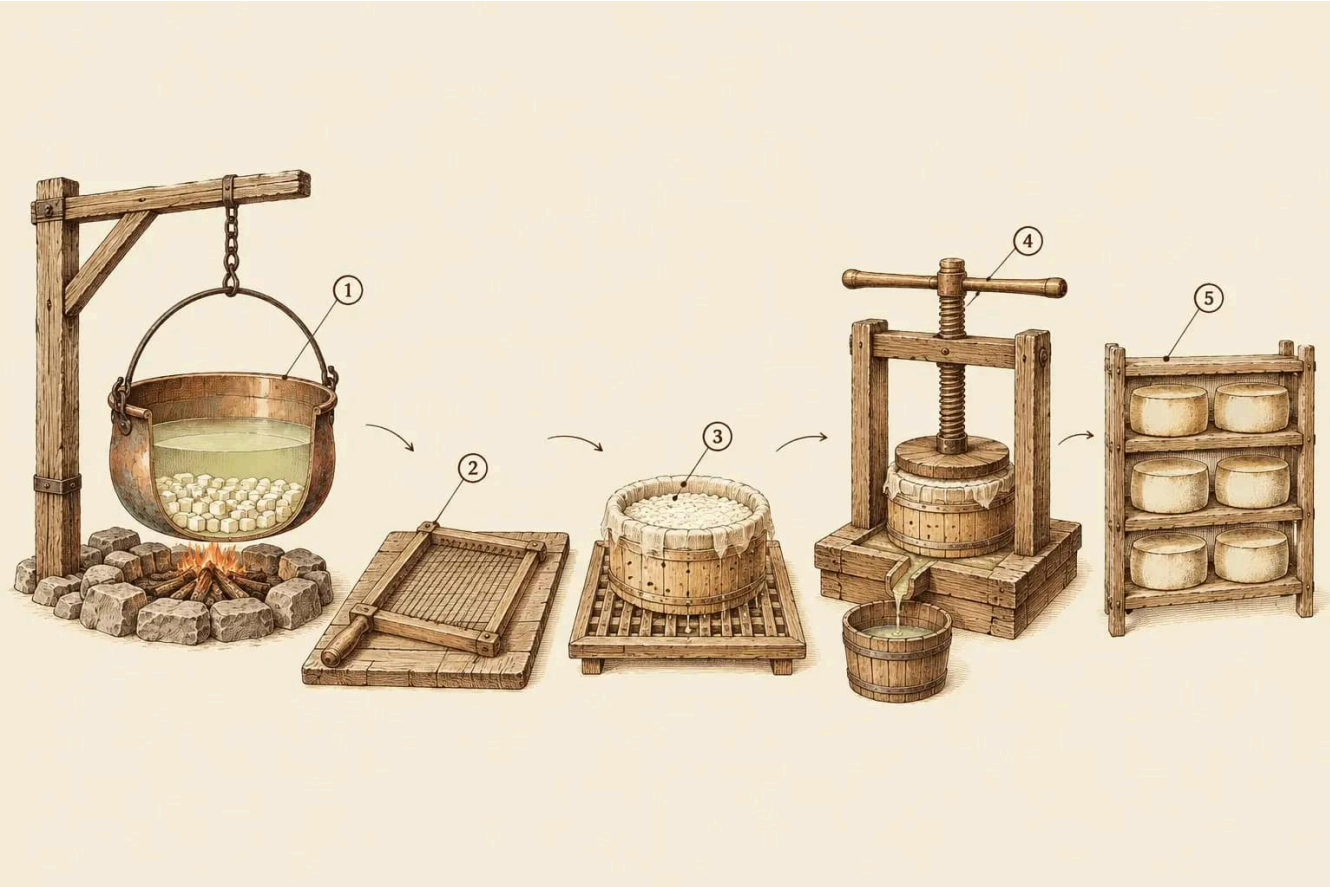
Fakten geprüft am 2026-10-14

Käse

Milch, die monatelang hält

um 5.500 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Töpferei (S. 23)



1 Kupferkessel mit geschnittenem Bruch in der Molke 2 Käseharfe 3 Mit Tuch ausgelegte Käseform 4 Spindelpresse 5 Reifebretter

Käse ist Milch, deren Eiweiß dickgelegt, von der Molke getrennt und meist gesalzen und gereift wurde, sodass er weit länger hält als frische Milch. Milchfettreste in durchlochten jungsteinzeitlichen Gefäßen zeigen, dass Bauern in Europa ihn schon vor mehr als 7000 Jahren herstellten.

Was es ist

Käse ist ein festes Lebensmittel aus Milch: Ihr Eiweiß wird zum Gerinnen gebracht und der wässrige Anteil, die Molke, abgetrennt. Frischkäse isst man innerhalb weniger Tage; Hartkäse wird gepresst, gesalzen und monate- oder jahrelang gereift. In jedem Fall geht der größte Teil des Wassers verloren und mit ihm viel Laktose, der Milchzucker, den viele Erwachsene schlecht vertragen.

Die Tafel begleitet einen Bauernkäse des 18. Jahrhunderts durch seine Stufen: Bruch im Kupferkessel über dem Feuer, die Drahtharfe, die ihn geschnitten hat, eine mit Tuch ausgelegte Form, eine Spindelpresse und die Bretter, auf denen die Laibe reifen.

Wie es funktioniert

Milch ist vor allem Wasser mit Fetttröpfchen, Laktose und Eiweiß. Etwa vier Fünftel des Eiweißes der Kuhmilch sind Kaseine, die in winzigen Klümpchen, den Mizellen, schweben. Jede Mizelle trägt eine haarige Außenschicht aus einem besonderen Kasein, dem Kappa-Kasein, das die Klümpchen auf Abstand hält.

Lab, traditionell aus dem Magen junger Kälber gewonnen, enthält das Enzym Chymosin. Es schneidet das Kappa-Kasein an einer genau bestimmten Stelle und schert die haarige Schicht ab. Mit Hilfe des Kalziums in der Milch verkleben die freigelegten Mizellen zu einem weichen Gel, der Dickete oder Gallerte, die das Fett einschließt. Käser geben das Lab meist bei etwa 30 bis 32 °C zu. Auch Säure lässt Milch gerinnen, oft unterstützt von Hitze: Paneer entsteht, wenn man heißer Milch Zitronensaft oder Zitronensäure zugibt.

Ist die Gallerte fest genug, schneidet der Käser sie in Würfel. Aus jeder Schnittfläche tritt Molke. Rühren und sanftes Erwärmen treiben mehr davon aus, und die Würfelgröße entscheidet, wie trocken der Käse wird. Danach wird der Bruch in Formen gefüllt und gepresst, an der Oberfläche oder im Salzbad gesalzen und zum Reifen gelagert. Beim Reifen zerlegen Bakterien und Enzyme Eiweiß und Fett in kleinere Moleküle, die den Geschmack bilden und die Textur verändern. Das Salz zieht Wasser aus der Oberfläche, bremst unerwünschte Keime und hilft bei der Rindenbildung.

Das Schneiden der Gallerte: Je kleiner die Würfel, desto mehr Molke läuft ab und desto härter wird der Käse.

Wie man ihn herstellt

Der einfachste Käse für zu Hause ist Paneer, der durch Hitze und Säure gerinnt und frisch gegessen wird. Man braucht 2 Liter pasteurisierte Kuhvollmilch, etwa 5 g Zitronensäure, gelöst in 250 ml Wasser (oder den abgeseihten Saft von zwei Zitronen), einen Topf mit dickem Boden, ein Thermometer, ein Sieb, ein Käsetuch, ein Brettchen und ein Gewicht von 2 bis 3 kg.

Die Milch erhitzen. Erhitzen Sie die Milch unter Rühren auf 85 bis 90 °C, damit sie nicht ansetzt, nehmen Sie sie vom Herd und lassen Sie sie auf etwa 70 °C abkühlen. Deutlich heißer gerinnt der Käse hart und trocken, deutlich kühler bleibt er nass.

Gerinnen lassen. Gießen Sie die Säure nach und nach unter sanftem Rühren zu, bis sich weiße Flocken abscheiden und die Molke klar und gelbgrün wird. Womöglich brauchen Sie nicht alles. Lassen Sie den Topf zehn Minuten ruhen.

Abtropfen und pressen. Legen Sie das Sieb mit dem Tuch aus, gießen Sie den Bruch hinein und lassen Sie die Molke ablaufen. Schlagen Sie das Tuch darüber, legen Sie Brettchen und Gewicht auf und pressen Sie 30 bis 60 Minuten, bis der Block zusammenhält.

Kühlen und lagern. Schneiden Sie den Block in Stücke und legen Sie sie ein bis zwei Stunden in Eiswasser, damit sie fester werden. Bewahren Sie den Paneer im Kühlschrank bei höchstens 4 °C auf und essen Sie ihn innerhalb von drei Tagen. Zwei Liter Kuhmilch ergeben etwa 350 g.

Gepresste Labkäse, die wochenlang reifen, brauchen eine abgemessene Starterkultur, Säurekontrollen in jedem Schritt und einen Keller mit passender Temperatur und Luftfeuchte. Lernen Sie sie nach einem vollständigen,

erprobten Rezept oder in einem Kurs, bevor Sie es versuchen.

> **Sicherheit.** Verwenden Sie pasteurisierte Milch: Rohmilch kann Listerien, E. coli und andere gefährliche Bakterien enthalten, und Weichkäse aus Rohmilch ist eine bekannte Quelle der Listeriose, die in der Schwangerschaft besonders gefährlich ist. Heiße Milch verbrüht und kocht leicht über, halten Sie Kinder vom Topf fern. Reinigen Sie jedes Gerät, kühlen Sie den Käse gleich nach der Herstellung und verlassen Sie sich nicht auf Geruch oder Aussehen: Werfen Sie Käse weg, der zu lange oder zu warm gelagert wurde oder ungewöhnlich riecht oder aussieht.

Geschichte und Entwicklung

Die meisten Erwachsenen in den ersten Bauerngemeinschaften vertrugen keine Laktose, Kinder dagegen schon. Mit der abgetrennten Molke verliert Käse den größten Teil der Laktose, und im Joghurt bauen Bakterien einen Teil davon ab. An der dalmatinischen Küste Kroatiens tauchen Milchreste in Gefäßen vor etwa 7700 Jahren auf, Reste vergorener Milchprodukte, Frischkäse oder Joghurt, vor etwa 7200 Jahren.

Ein jungsteinzeitliches Tonsieb wie jene aus Kujawien in Polen, in denen Milchfette gefunden wurden: wohl ein Käsesieb.

In Kujawien in Mittelpolen untersuchte ein Team um Mélanie Salque von der Universität Bristol 50 Scherben von 34 durchlochten Gefäßen der ersten Bauern Mitteleuropas, etwa 7000 bis 7500 Jahre alt, und fand reichlich Milchfett. Kein Molekül ist allein für Käse typisch, doch das Abtrennen von Bruch und Molke ist der naheliegende Zweck solcher Siebe, und die Studie von 2012 wertet sie als ältesten direkten Nachweis der Käseherstellung.

Der älteste erhaltene Käse ist etwa 3600 Jahre alt und lag bei Mumien des Gräberfelds von Xiaohe in Xinjiang. Der römische Autor Columella beschrieb um 65 n. Chr. das Einlaben, Pressen, Salzen und Reifen ganz ähnlich, wie man es heute tut.

Mittelalterliche Klöster bewahrten und verfeinerten viele Käse, und Erwähnungen des Roquefort in den Urkunden der Abtei Conques reichen bis 1070 zurück. In den Vereinigten Staaten blieb Käse ein Erzeugnis der Bauernhöfe, bis Jesse Williams 1851 im Oneida County im Staat New York begann, ihn aus der gesammelten Milch der Nachbarhöfe herzustellen: die erste Käsefabrik der Vereinigten Staaten. Gewerblicher Labextrakt kam in den 1860er- und 1870er-Jahren auf, später reine Bakterienkulturen, die die Herstellung weit gleichmäßiger machten. Das meiste Lab ist heute von Mikroorganismen erzeugtes Chymosin.

Die runden Löcher mancher Alpenkäse sind Blasen aus Kohlendioxid, das Bakterien während der Reifung bilden.

Kennzahlen

Ältester direkter Nachweis
Milchfette in tönernen Sieben, Kujawien (Polen), vor etwa 7000 bis 7500 Jahren

Anteil des Milcheiweißes, der gerinnt
Die Kaseine, etwa 80 % des Eiweißes der Kuhmilch

Übliche Temperatur beim Einlaben
Etwa 30 bis 32 °C

Erste Käsefabrik der Vereinigten Staaten
Jesse Williams, Oneida County, New York, 1851

Quellen

1. Say cheese! Central European farmers did, 7,500 years ago · NBC News https://www.nbcnews.com/id/wbna50177947
2. Evidence of 7,200-year-old cheese making found on the Dalmatian Coast · Penn State University https://www.psu.edu/news/research/story/evidence-7200-year-old-cheese-making-found-dalmatian-coast
3. Extent of κ-casein hydrolysis during renneting of bovine milk (Kayihura, Food Science & Nutrition, 2024) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10916671/
4. Technology of paneer · INFLIBNET e-PG Pathshala (Technology of Milk and Milk Products) https://ebooks.inflibnet.ac.in/ftp04/chapter/technology-of-paneer/
5. History of cheese · International Dairy Foods Association https://www.idfa.org/news-views/media-kits/cheese/history-of-cheese
6. Cheese · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Cheese

Fakten geprüft am 2026-10-12

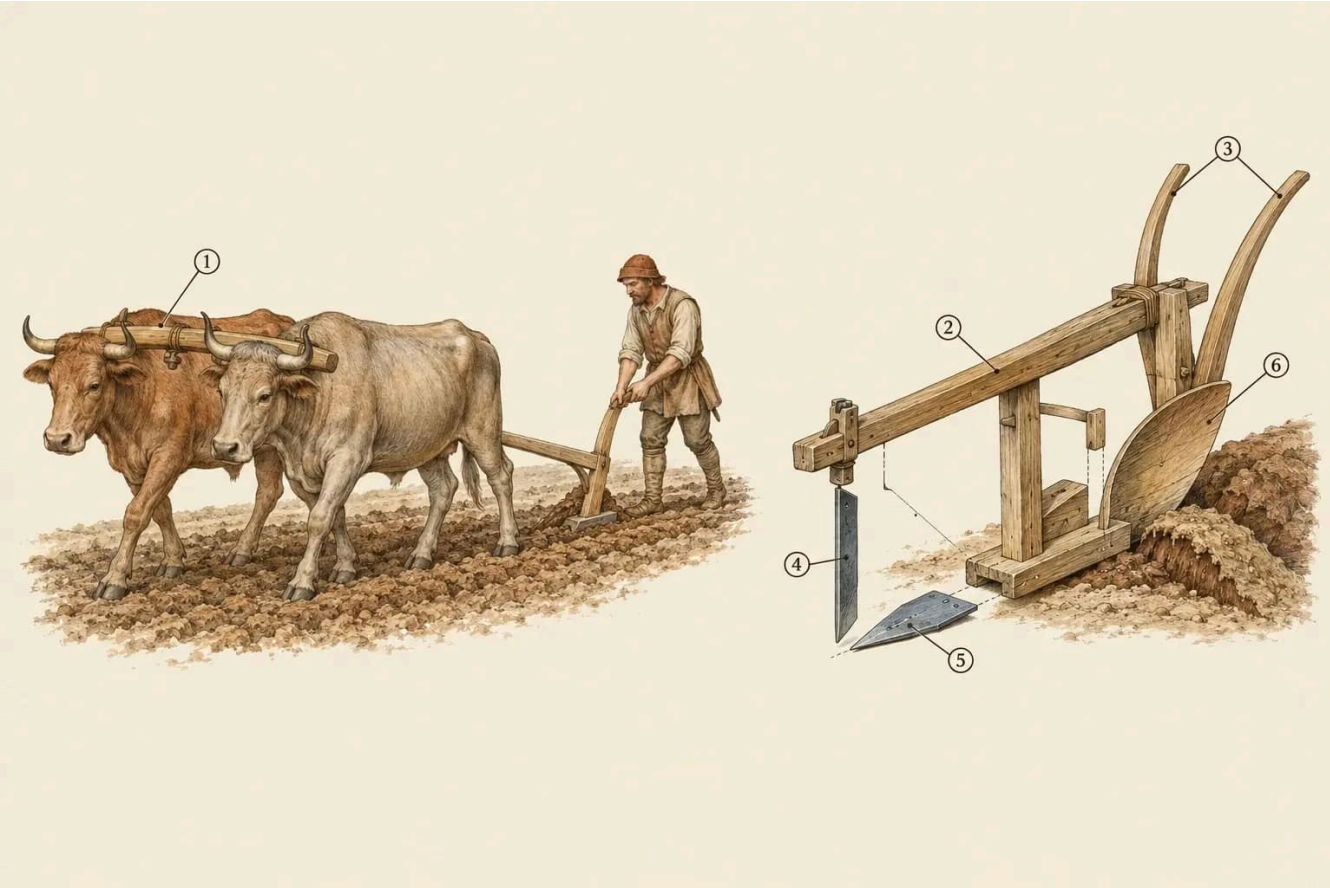
Pflug

Den Boden für die Saat öffnen

um 5.000 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Steinwerkzeuge (S. 5), Seil & Schnur (S. 13)

Führt zu: Fruchtfolge (S. 111)



1 Joch 2 Grindel 3 Sterzen 4 Sech 5 Schar 6 Streichblech

Ein Pflug wird durch den Boden gezogen, um die Erde vor der Aussaat aufzuschneiden und zu lockern. Die ersten Hakenpflüge ritzten nur eine Furche, erst der Streichblechpflug, der die Erde wendet, erschloss die schweren, nassen Böden Nordeuropas.

Was es ist

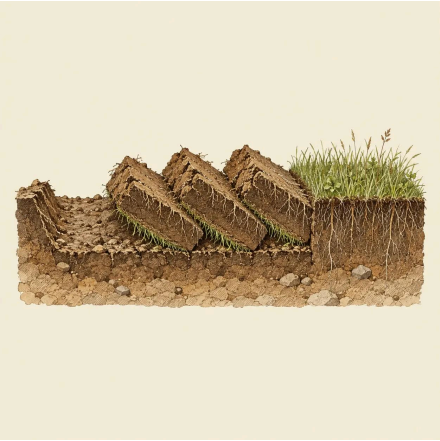
Ein Pflug ist eine Klinge, die von Menschen, Tieren oder einem Motor durch die Erde gezogen wird. Er bricht die oberste Bodenschicht auf, vergräbt Unkraut und die Reste der letzten Ernte und lockert den Boden, sodass eine Egge danach die Schollen zu einem Saatbett zerkleinern kann. Mit Pflug und Ochsengespann konnte eine Familie weit mehr Land bestellen als mit Hacke oder Grabstock.

Der Hakenpflug, auch Ard genannt, hat eine spitze Schar, die durch den Boden schleift und eine flache Rille zieht, ohne die Erde zu wenden. Der Streichblechpflug schneidet einen Erdstreifen ab und dreht ihn um. Die Tafel zeigt beide: links ein Ochsengespann vor einem Hakenpflug, rechts die Teile eines Streichblechpflugs.

Ein Hakenpflug ganz aus Holz.

Wie es funktioniert

Ein Hakenpflug wirkt wie ein Keil. Die Schar läuft in flachem Winkel wenige Zentimeter unter der Oberfläche und drückt die Erde nach oben und zu beiden Seiten. Sie lockert den Boden, ohne ihn zu wenden, was leichten, trockenen Böden entgegenkommt, die ihre Feuchtigkeit behalten sollen. Oft wurde ein Feld zweimal gepflügt, das zweite Mal quer zum ersten, daher waren Hakenpflugfelder meist annähernd quadratisch.



Gewendete Furchenstreifen liegen aneinander, die Grasnarbe nach unten.

Beim Streichblechpflug arbeiten drei Teile nacheinander. Das Sech, ein senkrechtes Messer am Grindel, schneidet den Boden vor. Die Schar, eine flache Klinge nahe der Sohle, trennt den Erdstreifen unten ab. Das Streichblech, ein gewölbtes Brett hinter der Schar, hebt den Streifen an, verdreht ihn und legt ihn umgekehrt an den vorigen. Unkraut und Stoppeln werden vergraben, und der Boden darunter liegt offen für Luft und Frost.

Ein fest angebrachtes Streichblech wirft die Erde immer zur selben Seite. Im Mittelalter pflügte man jeden langen Streifen rund um seine Mittellinie, sodass jeder Durchgang Erde zur Mitte hin wendete und sich der Streifen allmählich zu einem Rücken aufwölbte. Das half, nassen Tonboden zu entwässern.

Ein leichter Hakenpflug braucht ein oder zwei Tiere. Schwere mittelalterliche Pflüge brauchten auf Tonböden bis zu acht Ochsen. Heute zieht ein Traktor mehrere Pflugkörper nebeneinander, und jeder wendet einen 20 bis 30 Zentimeter tiefen Streifen.

Wie man es baut

Ein einfacher Hakenpflug lässt sich allein aus Holz herstellen, mit Axt, Messer und Löffelbohrer. Die Schritte unten sind ein Überblick ohne maßstäbliche Zeichnungen.

Holz suchen. Suchen Sie einen Hartholzast, etwa Esche oder Eiche, mit einer natürlichen Biegung dort, wo ein dicker Ast in einen dünneren übergeht. Der lange Arm wird zum Grindel, der kurze, auf etwa 40 Zentimeter gekürzt, zu Schar und Sohle. Ein in einem Stück gewachsenes Krummholz ist weit stabiler als eine Verbindung.

Schar formen. Arbeiten Sie den kurzen Arm zu einer stumpfen, unten flachen Spitze aus. Sie sollte in einem Winkel von etwa 30 Grad auf den Boden treffen, wenn der Grindel auf Jochhöhe angehoben ist. Blankes Holz nutzt sich schnell ab, schnitzen Sie deshalb eine Ersatzspitze. Eine Spitze aus Eisen hält weit länger.

Sterz anbringen. Bohren Sie dicht über der Schar ein Loch durch den Grindel und setzen Sie einen aufrechten Sterz ein, fest verkeilt, damit der Pflüger lenken und nach unten drücken kann.

Joch bauen. Ein Nackenjoch ist ein passend geformter Balken, der vor dem Widerrist der Ochsen aufliegt, mit Holzbügeln oder Riemen um jeden Hals. Befestigen Sie das vordere Grindelende mit Seil oder Holzpflock an der Jochmitte.

Pflügen. Setzen Sie nur Ochsen ein, die bereits an das Joch gewöhnt sind, und lassen Sie einen erfahrenen Treiber an ihren Köpfen gehen. Beginnen Sie mit kurzen Bahnen auf feuchtem, nicht nassem Boden, und drücken Sie auf den Sterz, damit die Schar im Boden bleibt.

> **Sicherheit.** Ochsen sind kräftig und können in Panik geraten. Stellen Sie sich nie zwischen ein Tier und den Pflug, verwenden Sie an der Anspannung einen schnell lösbaren Knoten und gönnen Sie dem Gespann Pausen und Wasser. Halten Sie sofort an, wenn ein Joch scheuert: Ein schlecht sitzendes Joch verursacht Druckstellen und Verletzungen. Halten Sie Ihre Füße von der Schar fern.

Geschichte und Entwicklung

Der Hakenpflug kam auf, nachdem man Rinder zum Ziehen gezähmt hatte, doch wann genau, weiß niemand. Die ältesten bisher gefundenen Pflugspuren, von Flussschlamm überdeckte Kratzer in Sitten (Sion) in der Schweiz, stammen aus der Zeit von 5100 bis 4700 v. Chr. Jüngere Spuren in Norditalien, in Dänemark und in Prag-Bubeneč werden auf etwa 4300 bis 3500 v. Chr. datiert. Aus dem Nahen Osten sind keine Pflugspuren erhalten, dort könnte der Pflug noch älter sein. Siegelabrollungen und Texte aus Mesopotamien zeigen Pflüge im 3. Jahrtausend v. Chr., manche mit einem Trichter, durch den das Saatgut direkt in die Furche fiel. Ein gepflügtes Feld in Kalibangan im Nordwesten Indiens wird auf etwa 2800 v. Chr. datiert.

Um 1000 v. Chr. erhielten die Pflüge im Nahen Osten eine abnehmbare, austauschbare Schar, und chinesische Bauern verwendeten um 500 v. Chr. eiserne Scharen. Unter der Han-Dynastie, im 1. und 2. Jahrhundert n. Chr., gossen chinesische Werkstätten gewölbte Streichbleche aus Eisen, die den Boden schon mit einem kleinen Gespann sauber wendeten.

In Europa deuten Funde aus dem spätrömischen Britannien auf Pflüge hin, die den Boden wenden konnten, ihre genaue Form ist allerdings umstritten. Der schwere Pflug mit Sech und Streichblech verbreitete sich ab dem 7. Jahrhundert über die Tonebenen des Nordens, oft auf Rädern und von großen Ochsengespannen gezogen. Mit ihm kam mehr Land unter den Pflug, und die langen Streifenfluren des mittelalterlichen Dorfes entstanden.

Im 18. Jahrhundert bauten englische Hersteller leichtere Pflüge. Der Rotherham-Pflug, 1730 in England von Joseph Foljambe patentiert, hatte einen dreieckigen Rahmen und ein mit Eisen beschlagenes Streichblech und ließ sich von zwei Pferden ziehen. Im Mittleren Westen der USA blieb der zähe Prärieboden am Gusseisen kleben. John Lane 1833 und John Deere 1837 bauten Pflüge mit glatten Stahlklingen, die sich beim Schneiden selbst reinigten.

Ein selbstreinigender Stahlpflug: Der klebrige Prärieboden gleitet vom polierten Metall ab.

Ab den 1850er-Jahren zogen Dampfmaschinen Pflüge an Seilen, im 20. Jahrhundert übernahmen Traktoren. Nackter, gewendeter Boden verweht bei Dürre und wird bei Regen abgeschwemmt, wie die Dust Bowl der 1930er-Jahre in den USA zeigte. Viele Landwirte pflügen heute weniger oder gar nicht mehr und säen direkt in die Stoppeln.

Kennzahlen

Älteste gefundene Pflugspuren
Sitten (Sion), Schweiz, 5100–4700 v. Chr.

Arbeitstiefe eines modernen Streichblechpflugs
20–30 cm

Schwerer eiserner Streichblechpflug
China der Han-Zeit, 1.–2. Jahrhundert n. Chr.

Selbstreinigender Stahlpflug
Illinois, 1833–1837

Quellen

1. Plough · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Plough
2. Ard (plough) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Ard_(plough)
3. Europe's oldest plow marks discovered at Anciens Arsenaux site · Archaeology Magazine (archaeologymag.com) https://archaeologymag.com/2024/03/europes-oldest-plow-marks-discovered-at-anciens-arsenaux-site/
4. When was the plough invented? · Joe Roe (archaeologist) https://joeroe.io/2025/08/24/ploughing.html
5. Tillage (chapter 10), D. Franzen · North Dakota State University Extension https://www.ndsu.edu/agriculture/sites/default/files/ebook/Franzen/PDFs/Franzen_Ch10.pdf
6. Development of the Plough: the Rotherham Plough to Now · Farmland Museum and Denny Abbey https://dennyfarmlandmuseum.org.uk/?p=1138
7. Oldest evidence of ploughing in the Czech lands (Bubeneč) · Stone Pages Archaeo News https://www.stonepages.com/news/archives/004695.html
8. Estimating Tillage Draft (TechGuide 2G-210) · Tillers International https://tillersinternational.org/wp-content/uploads/2025/01/EstimatingTillageDraftTechGuide.pdf
9. Matching tillage implements to draught animal potential (F. Inns) · FAO https://www.fao.org/4/w0613t/w0613T0g.htm

Fakten geprüft am 2026-10-11

Holzkohle

Holz, unter Erde langsam verkohlt

um 4.500 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Beherrschung des Feuers (S. 9), Steinwerkzeuge (S. 5)

Führt zu: Bronze (S. 125), Schwarzpulver (S. 184), Eisenverhüttung (S. 138), Stahl (S. 143)

1 Mittlerer Schacht zwischen Stangen 2 Bereits verkohltes Holz 3 Schicht aus Laub, Stroh und Rasensoden
4 Decke aus Erde und Kohlenlösche 5 Luftloch am Fuß des Meilers 6 Noch unverkohltes Holz

Holzkohle entsteht, wenn Holz bei so wenig Luft erhitzt wird, dass es verkohlt statt zu verbrennen; zurück bleibt ein leichter, schwarzer Brennstoff, der überwiegend aus Kohlenstoff besteht. Seit mindestens dem 5. Jahrtausend v. Chr. von Metallwerkern genutzt und später in erdbedeckten Meilern und Gruben hergestellt, lieferte sie den Metallwerkern die Hitze und das reduzierende Gas, um Kupfer und später Eisen aus ihren Erzen zu gewinnen.

Was es ist

Holzkohle ist der Rest von Holz, das mit zu wenig Luft zum Brennen erhitzt wurde. Wasser und die meisten flüchtigen Stoffe entweichen als Rauch, und zurück bleibt ein schwarzer, spröder, leichter Feststoff, der großenteils aus Kohlenstoff besteht.

Bei gleichem Gewicht liefert sie etwa doppelt so viel Wärme wie lufttrockenes Holz. Sie brennt fast ohne Flamme und Rauch und erreicht mit einem Blasebalg Temperaturen, die ein Holzfeuer kaum halten kann. Im Ofen bildet sie

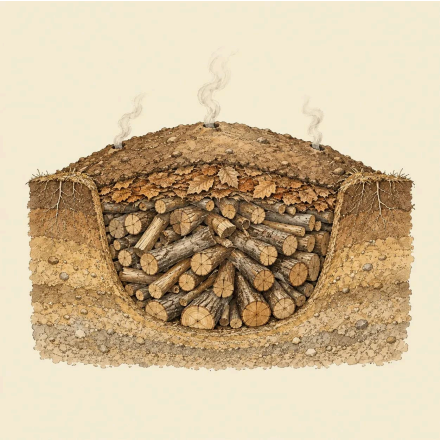
außerdem Kohlenmonoxid, das Gas, das dem Erz den Sauerstoff entzieht. Rund sechstausend Jahre lang war sie der Brennstoff für Kupfer, Bronze und Eisen.

Die Tafel zeigt den erdbedeckten Meiler, wie ihn Köhler in Europas Wäldern bis ins 20. Jahrhundert errichteten: eine Kuppel aus Holz rund um einen mittleren Schacht, mit Laub und Erde abgedeckt und tagelang schwelend.

Dasselbe Holz vorher und nachher: Holzkohle schrumpft und reißt, behält aber die Maserung des Baums.

Wie es funktioniert

Erhitztes Holz trocknet zuerst bei 100 °C oder knapp darunter und erwärmt sich dann auf etwa 280 °C. Beide Schritte kosten Energie, die ein kleiner Teil der Ladung beim Verbrennen liefert. Oberhalb von etwa 280 °C zersetzt sich das Holz von selbst und gibt dabei Wärme ab. Wasser, Säuren, Teere und brennbare Gase entweichen, und Holzkohle bleibt zurück.



Die Grube arbeitet nach demselben Prinzip: Das Holz verkohlt in einem Loch im Boden unter Laub und Erde.

Ohne Wärme von außen erreicht die Reaktion höchstens etwa 400 °C, und die Kohle enthält dann noch rund 30 % teerige Stoffe. Bei 500 °C steigt der feste Kohlenstoff auf etwa 86 %, doch Hitze kostet Ausbeute: Bezogen auf darrtrockenes Holz ergeben sich etwa 42 % Holzkohle bei 300 °C und 33 % bei 500 °C, ohne das Holz, das für die Wärme verbrennt.

Die Erddecke übernimmt die Rolle einer Ofenwand. Sie lässt nur die Luft hinein, die der Köhler durch Löcher am Fuß zulässt. Ein wenig Holz verbrennt, verbraucht diesen Sauerstoff, und seine Wärme gart den Rest. Das Feuer wird im mittleren Schacht entzündet und frisst sich langsam durch den Stapel nach außen bis zum Fuß. Der Rauch zeigt den Fortschritt: dicht und weiß, solange das Holz trocknet, später bläulich, fast klar, wenn eine Zone gar ist. Weil das Holz schrumpft, sackt der Meiler ein und die Decke reißt. Jeder Riss muss sofort geschlossen werden, sonst verbrennt die Kohle zu Asche.

Bauanleitung

Hier der Ablauf für einen kleinen Meiler. Man braucht einige Kubikmeter gut abgelagertes Laubholz wie Eiche, Buche oder Hasel, so gespalten, dass kein Stück dicker als etwa 20 cm ist, dazu Stroh oder Laub, sandige oder lehmige Erde, eine Schaufel, einen Rechen und etwa 100 Liter Wasser.

Platz vorbereiten. Einen ebenen, gut entwässerten Kreis von etwa 6 m Durchmesser bis auf die nackte Erde freiräumen, fern von tief hängenden Ästen und Gebäuden.

Holz um den Schacht setzen. Drei oder vier Stangen in die Mitte schlagen, sodass sie einen Schacht bilden. Ein Gitter aus dünnen Rundhölzern auf den Boden legen, damit die Gase unter dem Stapel ziehen können. Die Scheite

aufrecht und leicht nach innen geneigt dicht an den Schacht stellen und die Lücken mit Kleinholz füllen. Ein Dorfmeiler misst meist etwa 4 m im Durchmesser und ist 1 bis 1,5 m hoch.

Abdecken. Laub, Stroh oder Rasensoden über das Holz legen, darauf 10 bis 20 cm Erde, wenn vorhanden mit Kohlenstaub vermischt. Klebrigen Ton meiden, er reißt beim Trocknen. Rund um den Fuß sechs bis zehn Luftlöcher offen lassen.

Anzünden und hüten. Eine Schaufel Glut in den Schacht geben und mit trockenem Anzündholz nähren, bis der Kern des Stapels brennt. Steigt dichter weißer Rauch gleichmäßig auf, die Öffnung oben teilweise schließen. Von nun an wacht jemand Tag und Nacht: Risse mit feuchter Erde schließen, jedes rot glühende Luftloch zumachen und auf der Seite, die zurückbleibt, neue öffnen. Ein kleiner Meiler kann in ein bis zwei Tagen fertig sein; mittelgroße traditionelle Meiler brauchten zwölf bis vierzehn Tage.

Ersticken, abkühlen, ausziehen. Wird der Rauch dünn und blau, alle Löcher schließen und Erde nachlegen. Warten, bis der Meiler durch und durch kalt ist, bei einem kleinen zwei bis drei Tage, dann abschnittsweise öffnen, die Kohle herausrechen und jedes glimmende Stück mit Sand oder wenig Wasser löschen. Heiße Holzkohle kann sich an der Luft wieder entzünden, daher weiter aufpassen.

> **Sicherheit.** Ein Meiler kann einen Waldbrand auslösen: Die örtlichen Regeln für offenes Feuer beachten, den Platz frei von Bewuchs halten und Wasser, Sand und eine Schaufel bereithalten. Der Rauch enthält viel Kohlenmonoxid, das geruchlos ist und tötet. Auf der windzugewandten Seite bleiben, sich nie über ein Luftloch oder den Schacht beugen und warme Holzkohle nie in geschlossenen Räumen herstellen, abkühlen oder lagern. Nie auf den Meiler steigen: Wenn das Holz schrumpft, kann die Decke über einem glühenden Hohlraum nachgeben und schwere Verbrennungen verursachen. Lederhandschuhe und feste Lederschuhe tragen und Kinder fernhalten.

Geschichte und Entwicklung

Holzkohle ist so alt wie der Gebrauch des Feuers: Jede urgeschichtliche Feuerstelle hinterlässt welche, und Archäologen datieren die Feuerstellen damit. In der Chauvet-Höhle in Frankreich zeichneten Menschen vor etwa 37.000 bis 34.000 Jahren Tiere mit Kiefernholzkohle.

Erst das Metall schuf eine große Nachfrage, auch wenn unbekannt ist, wann Menschen sie zum ersten Mal gezielt herstellten. Im 5. Jahrtausend v. Chr. erhitzten Schmelzer in der südlichen Levante und auf dem iranischen Hochland Kupfererz mit Holzkohle in Tiegeln und kleinen Öfen. In Horvat Beter bei Be’er Scheva stammte das Erz aus dem mehr als 100 km entfernten Wadi Faynan. Eine 1982 veröffentlichte Schätzung, gestützt auf spätere Quellen und Versuche, setzt 20 bis 40 kg Holzkohle je Kilogramm Kupfer an. Bei 100 kg Holzkohle für eine Schmelze von 5 kg und sieben Teilen Holz auf einen Teil Kohle sind das rund 700 kg Holz. In China lagen die ältesten bisher gefundenen Holzkohleöfen, in Xiwubi in der Provinz Shanxi, neben Resten der Kupferverhüttung aus der Erlitou-Zeit, um 1900 bis 1600 v. Chr.

Eisen brauchte nach derselben Schätzung höchstens 10 kg Holzkohle je Kilogramm, Schmieden eingeschlossen, wurde aber in weit größeren Mengen erzeugt, und die Köhlerei wurde zu einem Waldgewerbe. Im englischen Weald wie im Tal von Carranza im Baskenland belieferten Köhler jahrhundertelang Eisenhütten und Schmieden. Sie arbeiteten vom Frühjahr bis zum Herbst und wohnten mit ihren Familien in Hütten bei den Meilern.

Im 18. Jahrhundert verbrauchte ein englischer Hochofen für jede Tonne Roheisen etwa acht Tonnen Holz, verkohlt zu zwei Tonnen Holzkohle. 1709 verhüttete Abraham Darby in Coalbrookdale Eisen mit Koks aus Steinkohle, und der Koks setzte sich nach und nach durch. Anderswo hielt sich die Holzkohle: 2011 wurden in Brasilien noch etwa 30 % des Roheisens mit Holzkohle erzeugt, weltweit weniger als 1 %; das Holz kam aus Eukalyptusplantagen,

aber auch aus Naturwald. Außerdem bleibt sie Grillkohle, Zeichenkohle aus Weide und, aktiviert, der Kohlenstoff in Filtern.

Köhler wohnten in Hütten aus Stangen und Soden neben ihren Meilern, damit der Brand nie unbeaufsichtigt blieb.

Kennzahlen

Selbstständige Verkohlung

Ab etwa 280 °C; gute Holzkohle ist bei rund 500 °C fertig

Kohlenstoffgehalt

Etwa 68 % fester Kohlenstoff bei 300 °C, etwa 86 % bei 500 °C

Älteste Holzkohleöfen in China

Xiwubi (Shanxi), um 1900–1600 v. Chr., neben Resten der Kupferverhüttung

Ausbeute eines Erdmeilers

1 t Holzkohle aus 4 t lufttrockenem Holz bei guter Arbeit, häufiger 1 aus 6

Brennstoff für Kupfer (Schätzung)

Etwa 20–40 kg Holzkohle je Kilogramm Kupfer, nach späteren Quellen und Versuchen

Quellen

1. Simple technologies for charcoal making, chapter 4: Carbonisation processes (FAO Forestry Paper 41) · Food and Agriculture Organization of the United Nations https://www.fao.org/4/x5328e/x5328e05.htm
2. Simple technologies for charcoal making, chapter 6: Making charcoal in earth mounds (FAO Forestry Paper 41) · Food and Agriculture Organization of the United Nations https://www.fao.org/4/X5328E/x5328e07.htm
3. Simple technologies for charcoal making, chapter 5: Earth pits for charcoal making (FAO Forestry Paper 41) · Food and Agriculture Organization of the United Nations https://www.fao.org/4/x5328e/x5328e06.htm
4. Fuel for the Metal Worker (Lee Horne, Expedition 25.1, 1982) · Penn Museum https://www.penn.museum/sites/expedition/fuel-for-the-metal-worker/
5. Charcoal Burning: Keeping an Ancient Craft Alive · Weald & Downland Living Museum https://www.wealddown.co.uk/museum-news/charcoal-burning/
6. Charcoal burning in the valley of Carranza (Bizkaia) · Labayru Fundazioa https://labayru.eus/en/basque-ethnography-at-a-glance/charcoal-burning-in-the-valley-of-carranza-bizkaia
7. Charcoal Burning (Wyre Forest) · Revolutionary Players, History West Midlands https://revolutionaryplayers.org.uk/?p=2368
8. The Chauvet cave: 30 years since its discovery. Contribution from radiocarbon dating · Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) https://www.lsce.ipsl.fr/en/the-chauvet-cave-30-years-since-its-discovery-contribution-from-radiocarbon-dating/
9. Archaeologists Unearth 6,500-Year-Old Copper-Smelting Workshop in Israel · Sci.News https://www.sci.news/archaeology/copper-smelting-workshop-horvat-beter-israel-08923.html
10. Shanxi discovers earliest charcoal kiln relics in China · China Daily https://regional.chinadaily.com.cn/shanxi/2021-08/23/c_654303.htm
11. Invention of Coke Smelting · EBSCO Research Starters https://www.ebsco.com/research-starters/history/invention-coke-smelting
12. Sustainable charcoal (Pesquisa FAPESP 189, 2011) · Pesquisa FAPESP https://revistapesquisa.fapesp.br/en/carvao-vegetal-sustentavel/

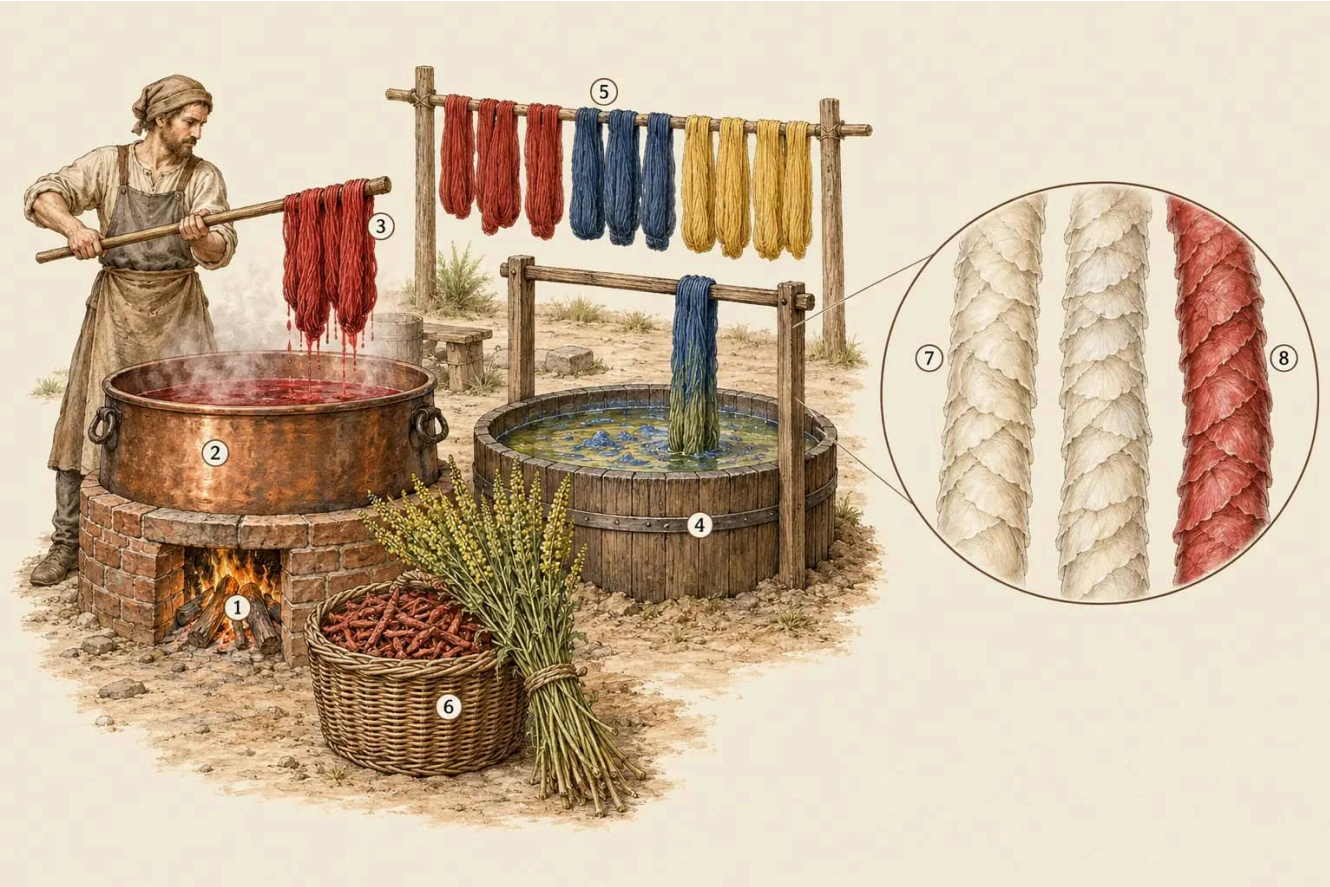
Fakten geprüft am 2026-10-13

Färben

Farbe, die in der Faser bleibt

um 4.200 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Seil & Schnur (S. 13), Töpferei (S. 23), Beherrschung des Feuers (S. 9)



1 Feuer unter dem Kessel 2 Kupferkessel mit Krappbad 3 Auf einem Stab gehobene Stränge 4 Indigoküpe 5 Trockenstange mit roten, blauen und gelben Strängen 6 Krappwurzeln und Färberwau 7 Rohe Wollfaser 8 Gebeizte und rot gefärbte Faser

Beim Färben gelangt die Farbe in die Faser: Der Farbstoff dringt in Garn oder Stoff ein und übersteht das Waschen. Die meisten Pflanzenfarbstoffe wie Krapp und Färberwau geben mit einer Beize, meist Alaun, kräftigere und echtere Farben; Indigo dagegen wird in einer Küpe löslich gemacht und wird an der Luft wieder blau.

Was es ist

Farbe auf einem Stoff liegt obenauf und kann sich abreiben; ein Farbstoff gelangt in Wasser gelöst in die Faser und bleibt dort auch beim Waschen. Die meisten Farbstoffe stammten aus Pflanzen, einige aus Insekten und Meeresschnecken.

Auf ungebeizter Wolle geben Krappwurzel, das klassische Rot, und Färberwau, das klassische Gelb, schwächere Farben, die leichter verblassen und auswaschen. Die Färber fixierten sie mit einer Beize, einem Metallsalz, das zuerst auf die Faser kommt und an das sich der Farbstoff bindet; die längste Zeit war es Alaun. Indigo, das Blau,

löst sich überhaupt nicht in Wasser und muss in einer Küpe chemisch verändert werden, bevor er ins Garn eindringen kann.

Die Tafel zeigt einen Färberhof des späten Mittelalters: ein Krappbad im Kupferkessel (2) über dem Feuer (1), auf einem Stab gehobene Stränge (3), die Indigoküpe (4), Garn auf der Trockenstange (5) und die Färbestoffe (6). Im Kreis liegen vergrößert eine rohe Wollfaser (7), eine mit Alaun gebeizte, noch blasse Faser und eine gebeizte und gefärbte (8) nebeneinander.

Wie es funktioniert

Das Rot des Krapps stammt aus Verbindungen in seinen Wurzeln, vor allem Alizarin und Purpurin. Allein färben sie Wolle in einem schwächeren, stumpferen Orange, das schneller verblasst. Wurde die Wolle vorher in Alaun erhitzt, einem Doppelsulfat von Aluminium und Kalium, nimmt sie Aluminium auf; im Färbebad binden sich die Krappmoleküle daran und bilden eine farbige Verbindung, die sich nicht mehr löst und in der Faser bleibt. Die Beize bestimmt auch den Ton: Krapp ergibt mit Alaun Rot und mit Eisen violettstichige Brauntöne, Wau mit Alaun leuchtendes Gelb und mit Eisen Oliv.

Krapp, Waid und Wau: Rot, Blau und Gelb der europäischen Färber.

Aus der Küpe kommt das Garn gelbgrün; die Luft macht es blau.

Indigo entsteht aus Verbindungen in den Blättern tropischer Indigopflanzen und, in Europa, des Färberwaids. In einer alkalischen Küpe ohne Sauerstoff wird das unlösliche blaue Molekül reduziert: Es nimmt Wasserstoff auf und wird zu Leukoindigo, einer löslichen gelbgrünen Form, die in die Faser zieht. Außerhalb der Küpe verwandelt der Luftsauerstoff es zurück in blauen Indigo, der nun in der Faser festsitzt. Jedes Eintauchen fügt eine Schicht hinzu; dunkles Blau braucht viele.

Vor der Industriechemie übernahmen Bakterien die Reduktion. Waid oder Indigo wurde in Wasser mit einem Alkali, Holzaschenlauge oder gelöschtem Kalk, und mit Kleie als Futter warm gehalten; bei der Gärung verbrauchten die Bakterien den Sauerstoff und verwandelten den Indigo in Leukoindigo. Grün entstand, indem man Blau gelb überfärbte.

Wie man es macht

Hier die Grundzüge der überlieferten Methode für Wolle, kein erprobtes Rezept. Man braucht Wollgarn, Alaun, getrockneten Krapp und Wau sowie Töpfe aus Edelstahl oder unbeschädigtem Email, Stäbe und ein Thermometer, die nur zum Färben dienen.

Die Faser vorbereiten. Das Garn zu lockeren Strängen wickeln und an mehreren Stellen lose abbinden, damit die Farbe jeden Faden erreicht. In warmem Wasser mit milder Seife entfetten. Fasern immer nass ins Bad geben und die Temperatur langsam ändern: Hitzeschocks und Reiben verfilzen Wolle.

Beizen. Maiwa, ein kanadischer Händler für Naturfarbstoffe, nennt Alaun mit 15 Prozent des Trockengewichts der Wolle. Ihn in heißem Wasser lösen, die Wolle zugeben, langsam auf etwa 90 °C erhitzen, knapp unter dem Simmern, und etwa eine Stunde halten. Abkühlen lassen und spülen.

Rot oder gelb färben. Gehackten Krapp über Nacht einweichen, dann mit der gebeizten Wolle eine Stunde oder länger sanft erhitzen und das Garn ruhig wenden. Für europäischen Krapp rät Maiwa, unter etwa 72 °C zu bleiben: Heißere Bäder trüben das Rot ins Braune. Wau wird über Nacht eingeweicht, erhitzt und abgeseiht; dann liegt die gebeizte Wolle etwa eine Stunde in der Brühe, ebenfalls unter etwa 71 °C, denn mehr Hitze trübt das Gelb. Abkühlen im Bad vertieft den Ton.

Blau färben. Eine überlieferte Waid- oder Indigoküpe wurde mit Alkali und Kleie angesetzt und tagelang warm gehalten, bis die gelbgrüne Flüssigkeit eine kupfrige Haut und blauen Schaum zeigte. Das Garn kommt nass und langsam hinein, ohne zu spritzen, denn Luft verdirbt die Küpe; nach der Tauchzeit, die die Methode vorgibt, für Wolle oft 20 Minuten bis eine Stunde, wird es gehoben, ausgedrückt, an der Luft blau und erneut getaucht. Heutige Küpen arbeiten mit anderen Reduktionsmitteln, und Wolle braucht ein weniger alkalisches Bad als Baumwolle (Maiwa nennt pH 9–10 gegenüber 11–12): einer erprobten Anleitung für Wolle folgen und den pH-Wert prüfen.

Spülen und waschen. Nach Krapp oder Wau das Garn im Bad abkühlen lassen, sanft spülen, bis das Wasser klar bleibt, und im Schatten trocknen; erst später mit milder Seife waschen. Nach Indigo das Blau an der Luft ganz entwickeln lassen, in klarem Wasser spülen und das Garn dann in verdünntem Essig einweichen, um das Alkali in der Wolle zu neutralisieren. Zuletzt waschen und prüfen, dass kein Blau auf ein weißes Tuch abfärbt.

> **Sicherheit.** Heiße Bäder verbrühen: den Topf standsicher über der Feuerstelle oder auf einem stabilen Kocher aufstellen, Kinder und Tiere fernhalten. Alaun reizt und darf nicht verschluckt werden; Eisensalze sind in starker Lösung schädlich. Gelöschter Kalk und Lauge verätzen Haut und Augen, Lauge greift auch Aluminiumtöpfe an, und Reduktionsmittel können giftige Dämpfe abgeben, vor allem mit Säuren: Schutzbrille und Handschuhe tragen, die Mittel trocken und beschriftet lagern. Gärende Küpen geben übelriechende Gase ab, also im Freien oder bei guter Lüftung arbeiten. Nie Kochtöpfe oder Küchengeräte verwenden und Färbegerät nie in die Küche zurückgeben. Chrom- und Zinnbeizen, früher verbreitet, sind giftig: nicht verwenden. Verbrauchte Bäder sind nicht harmlos: Beiz- und Eisenbäder und der Küpenschlamm enthalten Metallsalze oder Alkali. Nie in Gewässer, Brunnen oder Regenwasserkanäle gießen; beim örtlichen Entsorger nachfragen, wie man sie entsorgt.

Geschichte und Entwicklung

In der Höhle Dzudzuana in Georgien enthielten über 30.000 Jahre alte Schichten farbige Fasern, die die Ausgräber als mit Pflanzen der Umgebung gefärbten Flachs deuten; die Färbung ist eine Deutung, und die Bestimmung als Flachs wurde angezweifelt.

Der älteste bekannte Indigo, chemisch nachgewiesen, färbt etwa 6200 bis 6000 Jahre alte Baumwolle aus Huaca Prieta in Peru. Der älteste gesicherte Krapp färbt einen ägyptischen Lederköcher von etwa 2124–1981 v. Chr.

Meeresschnecken lieferten den mit Tyros verbundenen Purpur: Haufen zerschlagener Gehäuse belegen die Herstellung auf Kreta zu Beginn des 2. Jahrtausends v. Chr. und in Ugarit in Syrien im 15. und 14. Jahrhundert v. Chr. Kermes, eine Schildlaus der Kermeseiche, gab ein Karmesinrot; die amerikanische Cochenille, die im 16. Jahrhundert nach Europa kam, verdrängte sie nach und nach.

Jede Schnecke lieferte nur wenige Tropfen Farbstoff; für den Handel brauchte man viele Tausende.

Im Mittelalter schlossen sich Färber zu Zünften zusammen, die ihre Rezepte hüteten und die Qualität überwachten; die Londoner Zunft, 1188 erstmals erwähnt, erhielt 1471 eine Urkunde, die ihr erlaubte, Werkstätten zu prüfen und schlechtes Färben zu bestrafen.

1856 gewann William Henry Perkin, ein 18-jähriger Londoner Student, der Chinin herstellen wollte, aus Steinkohlenteer-Chemikalien das Mauvein, den ersten kommerziell erfolgreichen synthetischen Farbstoff. 1868 synthetisierten Carl Graebe und Carl Liebermann das Alizarin, und der Krappanbau ging rasch zurück; Adolf von Baeyer veröffentlichte 1880 eine Indigosynthese, und BASF brachte ihn 1897 auf den Markt.

Kennzahlen

Ältester bekannter Indigo
Auf Baumwolle aus Huaca Prieta (Peru), etwa 6200 bis 6000 Jahre alt

Ältere farbige Fasern
Fasern aus der Höhle Dzudzuana (Georgien), über 30.000 Jahre alt; Flachs umstritten, Färbung erschlossen

Krapp in Ägypten
Nachgewiesen auf einem Lederköcher von etwa 2124–1981 v. Chr.

Londoner Färberzunft
Erstmals 1188 erwähnt; königliche Urkunde 1471

Erster kommerzieller synthetischer Farbstoff
Mauvein, 1856 vom 18-jährigen William Henry Perkin hergestellt

Quellen

1. 30,000-year-old wild flax fibers: testimony for fabricating prehistoric linen (Science, 2009) · Kvavadze, Bar-Yosef et al., Harvard DASH https://dash.harvard.edu/handle/1/4270521
2. Early pre-Hispanic use of indigo blue in Peru (Science Advances, 2016) · Splitstoser, Dillehay, Wouters and Claro https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5023320/
3. The matter of madder in the ancient world · J. Paul Getty Museum https://www.getty.edu/publications/mummyportraits/part-one/3/
4. The Minoan origin of Tyrian purple (Biblical Archaeologist, 1994) · Robert R. Stieglitz, republished by Keftiu https://www.keftiu.com/magazine/the-minoan-origin-of-tyrian-purple/
5. The Dyers' Company and dyeing · The Worshipful Company of Dyers, London https://www.dyerscompany.co.uk/?p=4304
6. Graebe, Carl · Neue Deutsche Biographie https://www.deutsche-biographie.de/118877364.html
7. William Henry Perkin · Science History Institute https://www.sciencehistory.org/historical-profile/william-henry-perkin
8. História da BASF, 1865–1901 · BASF https://www.basf.com/br/pt/who-we-are/organization/history/1865-1901
9. Response to comment on "30,000-year-old wild flax fibers" (Science, 2010) · Kvavadze et al., Hebrew University of Jerusalem https://cris.huji.ac.il/en/publications/response-to-comment-on-30000-year-old-wild-flax-fibers/
10. Natural dye instructions: scouring, mordanting and dyeing · Maiwa https://naturaldyes.ca/instructions
11. Madder: dyeing instructions · Maiwa https://naturaldyes.ca/madder
12. Weld: dyeing instructions · Maiwa https://naturaldyes.ca/weld
13. Indigo: vat instructions · Maiwa https://naturaldyes.ca/indigo

Fakten geprüft am 2026-10-13

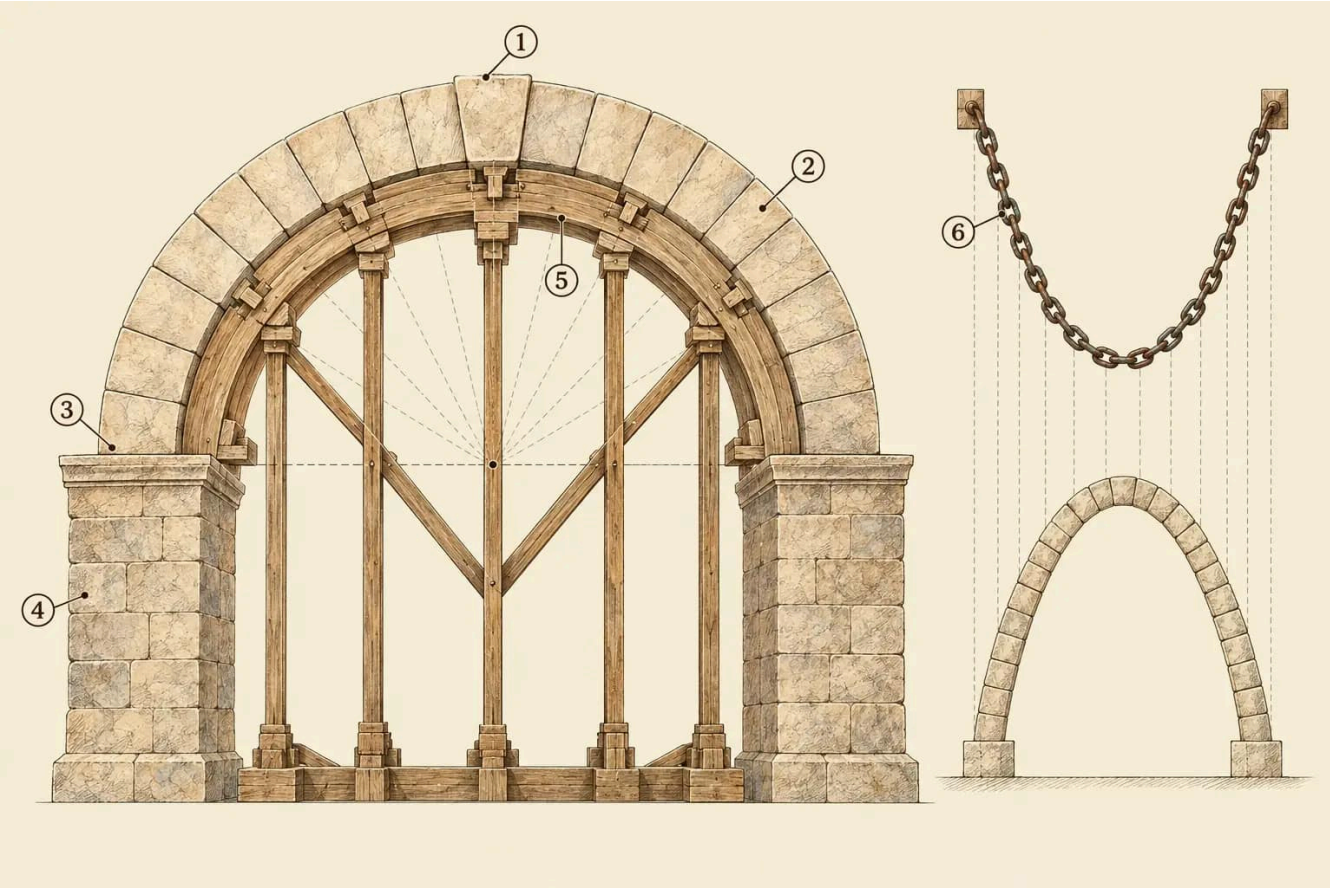
Bogen und Gewölbe

Steine, die einander tragen

um 3.500 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Ziegel (S. 40), Steinwerkzeuge (S. 5)

Führt zu: Aquädukt (S. 148)



1 Schlussstein 2 Keilstein 3 Kämpferstein 4 Widerlager (Pfeiler) 5 Lehrgerüst aus Holz 6 Hängende Kette (Hookes Modell)

Ein Bogen überspannt eine Öffnung mit keilförmigen Steinen, die sich gegenseitig stützen: Die ganze Krümmung steht unter Druck und schiebt ihre Auflager nach außen. In die Tiefe verlängert wird er zum Gewölbe, um seine Achse gedreht zur Kuppel. So wurden seit über fünftausend Jahren Gräber, Brücken, Aquädukte und Kathedralen überdeckt.

Was es ist

Ein Bogen trägt die Last über einer Öffnung auf einer Reihe keilförmiger Steine, den Keilsteinen. Jeder Stein drückt gegen seine Nachbarn, der ganze Ring steht unter Druck, und keine Fuge muss Zug aushalten. Stein und Ziegel halten großen Druck aus, brechen aber, sobald man sie biegt. Ein Steinbalken reißt deshalb über einer Spannweite, die ein Bogen aus demselben Stein mühelos überbrückt.

Bei einem Kragbogen liegt jede Steinlage flach und ragt etwas über die darunter hinaus, bis sich beide Seiten treffen; jeder Stein bleibt liegen, weil das Mauerwerk sein hinteres Ende niederdrückt. So lassen sich ein Gang und sogar eine runde Kammer überdecken, die von Erde oder Mauerwerk ringsum gehalten wird. Bei einem echten

Bogen stehen die Fugen rechtwinklig zur Krümmung, beim Rundbogen zeigen sie alle zu ihrem Mittelpunkt; die Steine lehnen sich aneinander, und der Ring drückt seine Auflager nach außen.

Der oberste Stein ist der Schlussstein. Die untersten auf jeder Seite sind die Kämpfersteine; sie ruhen auf den Pfeilern oder Mauern, die den Bogen tragen, den Widerlagern.

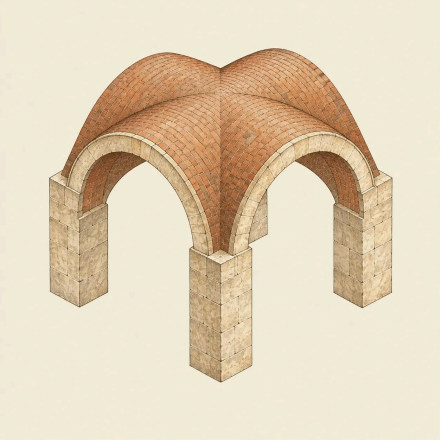
Eine Kragöffnung: Alle Fugen liegen waagrecht, jeden Stein hält die Mauer, die auf seinem hinteren Ende lastet.

Wie es funktioniert

Das Gewicht von oben drückt jeden Keilstein nach unten. Seine Flanken sind schräg, darum kann er nur absinken, wenn er die Nachbarn auseinanderschiebt, und so wandert die Last von Stein zu Stein bis zu den Kämpfern. Dort drückt die Kraft nach unten und zugleich nach außen. Dieser waagrechte Anteil ist der Bogenschub. Neigt sich ein Widerlager oder rutscht es, wird die Spannweite größer, der Scheitel sinkt, und der Bogen kann einstürzen. Je flacher der Bogen, desto größer der Schub.

Den Weg dieser Kraft durch die Steine nennt man Stützlinie. Seit den 1960er-Jahren rechnen Ingenieure, Jacques Heyman folgend, Mauerwerk so, als nähme es keinen Zug auf, gleite nicht und werde nicht zerdrückt. Die Spannungen in den meisten Bögen bleiben gering, deshalb ist Druckversagen selten maßgebend. Ein Bogen steht dann, wenn wenigstens eine Stützlinie ganz innerhalb seiner Dicke verläuft. Erreicht sie den Rand einer Fuge, kann sich die Fuge öffnen wie ein Scharnier; bilden sich genug solcher Gelenke, meist vier, stürzt der Ring ein.

1675 veröffentlichte Robert Hooke als lateinisches Anagramm eine Regel für die ideale Form: Man hängt eine Kette auf und dreht ihre Kurve um. Eine Kette kann nur ziehen und nimmt von selbst die Form an, die ihre Lasten verlangen; umgedreht trägt dieselbe Kurve sie unter reinem Druck.



Ein Kreuzgratgewölbe: Wo sich zwei Tonnen kreuzen, sammelt sich der Schub in den vier Ecken.

Ein Tonnengewölbe ist ein in die Tiefe verlängerter Bogen. Es schiebt auf seiner ganzen Länge nach außen, deshalb brauchen seine Seitenwände viel Masse. Zwei Tonnen, die sich rechtwinklig kreuzen, bilden ein Kreuzgratgewölbe. Sein Schub sammelt sich in den Ecken, und die Wände dazwischen lassen sich mit Fenstern öffnen. Eine Kuppel ist ein um seine senkrechte Achse gedrehter Bogen. Ihre waagrechten Ringe stützen sich gegenseitig, sodass sie oben offen bleiben kann. Die meisten Gewölbe und Kuppeln tragen sich erst, wenn sie geschlossen sind; man mauert sie deshalb auf einem Lehrgerüst, einer vorübergehenden Holzschalung, die der Krümmung der Unterseite folgt.

Wie man ihn baut

Ein Ziegelbogen von etwa 60 cm Spannweite, als Übungsstück auf dem Boden gebaut, eignet sich für einen ersten Versuch zu zweit. Man braucht Ziegel, Mörtel aus hydraulischem Kalk, Bretter, Latten, Nägel, zwei Paar

Hartholzkeile, eine Wasserwaage und eine Schnur.

Die Widerlager setzen. Auf festem, ebenem Grund zwei massive Ziegelblöcke mauern, jeder mindestens 30 cm lang, eine Ziegellänge breit und höchstens vier Schichten hoch. Außen schwere Steine oder gestampfte Erde dagegenpacken, damit ihr Fuß weder nach außen rutschen noch kippen kann.

Das Lehrgerüst bauen. Den Halbkreis in voller Größe aufzeichnen, die Schnur im Mittelpunkt festgesteckt. Aus Brettern zwei Bogenrippen nach dieser Kurve sägen, abzüglich der Lattenstärke, und Latten quer darübernageln. Das Gerüst auf Stützen stellen, unter jeder ein Keilpaar, bündig mit der Oberkante der Widerlager.

Den Ring mauern. Jeden Ziegel hochkant setzen, die Länge quer durch den Bogen: Der Ring ist dann etwa 10 cm hoch und eine Ziegellänge dick. An beiden Kämpfern beginnen und abwechselnd links und rechts hochmauern, damit das Gerüst gleichmäßig belastet wird. Mit der Schnur prüfen, dass jede Fuge zum Mittelpunkt zeigt, und die Keilform den Mörtelfugen überlassen, die außen dicker werden. Den Schlussstein zuletzt mit festem Druck einsetzen, ohne harte Schläge.

Warten, dann ausrüsten. Das frische Mauerwerk vor Sonne, Regen und Frost schützen und nach Angabe des Mörtelherstellers feucht halten. Das Gerüst mindestens eine Woche stehen lassen, bei Kälte oder Nässe länger: Zu frühes Ausrüsten ist eine häufige Einsturzursache. Dann die Keile um wenige Millimeter auf einmal lockern, abwechselnd auf beiden Seiten. Sinkt der Scheitel oder öffnet sich eine Fuge, sofort aufhören, das Gerüst wieder unter den Ring keilen und die Ursache klären, bevor man es erneut versucht.

Zuerst ein Modell prüfen. Eine feine Kette vor einem senkrechten Brett aufhängen und ihre Kurve nachzeichnen. Aus einer Leiste kleine, leicht keilförmige Klötze sägen, deren Fugen rechtwinklig zur Linie stehen, und sie auf einem Karton zusammensetzen, der nach derselben Kurve geschnitten ist, mit einem Anschlag an jedem Fuß. Den Karton herausziehen: Sind die Klötze sauber geschnitten, steht der Bogen ohne Leim.

> **Sicherheit.** Ziegel und Steine körpernah und aus den Knien heben, schwere Stücke zu zweit tragen. Handschuhe und Schutzbrille tragen. Ziegel und Stein möglichst nicht schneiden, denn ihr Staub enthält Quarz; wenn es sein muss, im Freien nass sägen oder mit dem Meißel arbeiten und eine dicht sitzende FFP3-Maske tragen. Kalkmörtel ist ätzend: Haut und Augen schützen, Spritzer sofort abspülen. Beim Ausrüsten nie unter dem Bogen stehen oder hineingreifen; von der Seite mit einer langen Stange arbeiten und alle anderen fernhalten. Jeder größere oder höhere Bogen und jeder, der eine Mauer, einen Weg oder Menschen tragen soll, braucht eine von einem Maurer oder Statiker geprüfte Planung.

Geschichte und Entwicklung

Echte Bögen erscheinen im 4. Jahrtausend v. Chr. in Mesopotamien und Ägypten, aus Lehmziegeln und meist in Kanälen und Gräbern. Seit der 1. Dynastie, um 3000 v. Chr., bauten die Ägypter Gewölbe ohne Lehrgerüst, indem sie die Ziegel in geneigten Ringen gegen eine Stirnwand setzten; in Nubien wird so noch heute gebaut. In Tel Dan im Norden Israels steht eines der ältesten bekannten Bogentore, aus Lehmziegeln vor etwa 1700 v. Chr. erbaut, mit erhaltenem Bogen.

Die Kragtechnik blieb daneben in Gebrauch: Das Schatzhaus des Atreus in Mykene, ein Grab der späten Bronzezeit, hat eine Kragkuppel von 14,5 m Durchmesser. Die Römer errichteten als Erste frei stehende Bögen, in Brücken, Aquäduktarkaden wie dem Pont du Gard sowie in Gewölben und Kuppeln aus Beton wie der des Pantheons mit 43,3 m Weite.

Der Spitzbogen, in der islamischen Architektur längst verbreitet, kam in der zweiten Hälfte des 11. Jahrhunderts nach Westeuropa; bei gleicher Spannweite schiebt er weniger nach außen als ein Rundbogen. Der Chor von Saint-Denis bei Paris (1140–1144) vereinte Spitzbögen, Rippengewölbe und äußere Strebepfeiler. Ab etwa 1160 fügten

Baumeister der Île-de-France Strebebögen hinzu, halbe Bögen, die den Schub des Hochgewölbes über die Seitenschiffe zu äußeren Pfeilern leiten. Weil der Schub nun außen abgeleitet wurde, konnten die Wände zwischen den Pfeilern dünn werden und großen Glasfenstern weichen. In Beauvais stieg das Chorgewölbe auf etwa 48 m; ein Teil stürzte 1284 ein.

Ein Strebebogen: Ein halber Bogen trägt den Gewölbeschub über das Seitenschiff zu einem außen stehenden Pfeiler.

Kennzahlen

Erste echte Bögen
Mesopotamien und Ägypten, 4. Jahrtausend v. Chr., aus Lehmziegeln

Ein frühes, noch stehendes Bogentor
Tel Dan, Lehmziegel, erbaut vor etwa 1700 v. Chr.

Dünnster Halbkreisbogen, theoretisch
Etwa das 0,107-Fache seines Radius, mit radialen Fugen und nur unter Eigengewicht

Chorgewölbe von Beauvais
Etwa 48 m hoch; ein Teil stürzte 1284 ein

Quellen

1. The Origins of the Voussoir Arch (A. Hrychuk Kontokosta, in The Roman Arch, 2025) · Oxford University Press https://academic.oup.com/book/61689/chapter/540990895
2. Mud-Brick (V. L. Emery, UCLA Encyclopedia of Egyptology, 2011) · University of California, Los Angeles https://journalpub.escholarship.org/nelc_uee/article/4007/galley/2583/download
3. The Remarkable Discoveries at Tel Dan (J. C. H. Laughlin, Biblical Archaeology Review 7:5, 1981) · Center for Online Judaic Studies https://cojs.org/the-remarkable-discoveries-at-tel-dan/
4. Brick Brief: Arches · Brick Industry Association https://www.gobrick.com/media/file/brick-brief-arches-may-2012.pdf
5. The effect of stereotomy on the shape of the thrust-line and the minimum thickness of masonry arches (N. Makris and H. Alexakis, 2013) · Archive of Applied Mechanics, Aston University https://research.aston.ac.uk/en/publications/the-effect-of-stereotomy-on-the-shape-of-the-thrust-line-and-the-
6. Arches, vaults and buttresses (S. Huerta, seminar, 2015) · University of Pisa, School of Engineering https://docenti.ing.unipi.it/scuola_dottorato_ingegneria/Seminari2015/2015-Huerta-Seminario1.pdf
7. The stone skeleton (J. Heyman, International Journal of Solids and Structures 2, 1966, pp. 249-279) · Elsevier https://doi.org/10.1016/0020-7683(66)90018-7
8. As hangs the flexible line: equilibrium of masonry arches (P. Block, M. DeJong and J. Ochsendorf, Nexus Network Journal 8:2, 2006) · Springer https://doi.org/10.1007/s00004-006-0015-9
9. Maths in a minute: St Paul's dome · Plus Magazine, University of Cambridge https://plus.maths.org/content/maths-minute-st-pauls-dome
10. Hanging models · Stereotomy Semantic Classification, University of Porto https://ssc.arq.up.pt/semantic-classification/hanging-models/
11. Compound brick vaults by slices in written sources (R. Marín-Sánchez et al., 2021) · Universitat Politècnica de València https://riunet.upv.es/bitstreams/f756ca9a-0877-4029-9a69-dd09bc7f3735/download
12. Treasury of Atreus · J. Siegel, Hampden-Sydney College https://blogs.hsc.edu/drjclassics/?p=379
13. Arch · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Arch
14. Centering (masonry) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Centering_(masonry)
15. Flying buttress · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Flying_buttress
16. Beauvais Cathedral · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Beauvais_Cathedral

Fakten geprüft am 2026-10-14

Bier

Getreidezucker, zu Alkohol vergoren

um 3.500 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Töpferei (S. 23), Brot (S. 27)

1 Gerstenmalz 2 Maischbottich 3 Sudpfanne 4 Kühlschiff 5 Gärbottich 6 Fässer

Bier entsteht, wenn die Stärke gekeimten Getreides in Zucker verwandelt und dieser Zucker von Hefe zu Alkohol vergoren wird. Chemische Spuren von Gerstenbier reichen im Westen des Iran ins 4. Jahrtausend v. Chr. zurück, und das Brauen folgte dem Ackerbau fast überall, wo Getreide wuchs.

Was es ist

Bier ist ein gegorenes Getränk aus Getreide, meist Gerste, mit Wasser, Hefe und in der Regel Hopfen. Hefe kann Stärke nicht verwerten, deshalb wird das Getreide zuerst gemälzt und gemaischt: So wird seine Stärke zu Zucker, den die Hefe zu Alkohol und Kohlendioxid vergärt.

Die Tafel zeigt ein kleines Brauhaus, wie es in Europa vor der Dampfmaschine üblich war, mit den Gefäßen in der Reihenfolge der Arbeit: Malz, Maischbottich, Sudpfanne, Kühlschiff, Gärbottich und Fässer.

Wie es funktioniert

Zuerst wird die Gerste gemälzt: Man weicht sie ein und lässt sie einige Tage keimen. Sobald der Keimling wächst, bildet das Korn Enzyme, die später seinen eigenen Stärkevorrat abbauen. Der Mälzer trocknet das Korn dann auf

der Darre, um das Keimen zu stoppen; die Hitze bestimmt zugleich Farbe und Geschmack des Malzes, von hell bis geröstet.

Beim Maischen wird das geschrotete Malz in heißem Wasser eingeweicht. Zwischen etwa 62 und 68 °C zerlegen die Amylasen des Malzes die Stärke in rund einer Stunde zu Zucker, vor allem Maltose. Eine kühlere Maische lässt mehr vergärbaren Zucker und ein trockeneres Bier entstehen, eine heißere mehr unvergärbaren Zucker und mehr Vollmundigkeit. Die süße Flüssigkeit, die Würze, läuft durch die Spelzen ab, die als Filter dienen.

Das Mälzen: Das keimende Korn bildet die Enzyme, die das Brauen braucht, und die Darre stoppt es, bevor es seine Stärke verbraucht.

Dann wird die Würze eine Stunde oder länger gekocht. Das Kochen tötet die meisten mit dem Getreide eingebrachten Keime ab, stoppt die Enzyme und vertreibt unerwünschte Aromen. Hopfen, der in dieser Phase hinzukommt, liefert Bitterstoffe, die auch das Wachstum vieler Verderbsbakterien hemmen; spät zugegebener Hopfen behält mehr von seinem Duft.

Zuletzt wird die Würze abgekühlt und mit Hefe versetzt. In einigen Tagen verwandelt die Hefe den Zucker in Ethanol und Kohlendioxid, dazu in Ester und andere Stoffe, die den Geschmack prägen. Obergärige Hefe arbeitet warm und steigt nach oben, untergärige Hefe für Lagerbier arbeitet kühl und setzt sich am Boden ab. Eine Lagerzeit lässt das Bier danach klären und reifen.

Wie man es herstellt

Etwa 10 Liter lassen sich in der Küche nach der Brew-in-a-Bag-Methode brauen. Man braucht 2,5 kg geschrotetes helles Malz, etwa 25 g Hopfen, ein Päckchen obergärige Hefe, einen 20-Liter-Topf, einen großen Maischebeutel, ein Thermometer, einen Gäreimer mit Gärröhrchen, eine Bierspindel, ein Desinfektionsmittel ohne Nachspülen sowie Flaschen mit neuen Kronkorken.

Maischen. Erhitzen Sie 14 Liter Wasser auf etwa 70 °C, hängen Sie den Beutel in den Topf und rühren Sie das Malz ein. Die Maische sollte sich bei etwa 66 °C einpendeln. Schalten Sie die Hitze ab, decken Sie den Topf zu und wickeln Sie ihn eine Stunde lang in eine Decke, die vom Kocher fernbleibt. Nehmen Sie die Decke ab, heben Sie den Beutel heraus und lassen Sie ihn abtropfen.

Kochen. Bringen Sie die Würze 60 Minuten lang sprudelnd zum Kochen. Geben Sie den größten Teil des Hopfens zu Beginn für die Bittere, den Rest in den letzten zehn Minuten für das Aroma. Bleiben Sie beim Aufkochen am Topf, denn der Schaum steigt sehr schnell. Reinigen und desinfizieren Sie währenddessen den Gäreimer und alles andere, was die abgekühlte Würze berühren wird; einen sauberen Tauchkühler desinfiziert man, indem man ihn die letzten 15 Minuten in die kochende Würze stellt.

Kühlen und vergären. Kühlen Sie den abgedeckten Topf mit dem Kühler oder im kalten Wasserbad auf etwa 20 °C. Füllen Sie die Würze in den Gäreimer, geben Sie die Hefe dazu, setzen Sie das Gärröhrchen auf und halten Sie 18 bis 20 °C.

Abfüllen. Die Gärung dauert meist ein bis zwei Wochen. Füllen Sie erst ab, wenn die Spindel an drei Tagen hintereinander denselben Wert zeigt und dieser nahe an der erwarteten Enddichte liegt, bei diesem Rezept etwa 1,010 bis 1,015: Ein höherer, gleichbleibender Wert bedeutet eine steckengebliebene Gärung, keine fertige. Lösen Sie 5 bis 6 g Zucker pro Liter in etwas abgekochtem Wasser, rühren Sie ihn behutsam ins Bier, füllen und verschließen Sie die Flaschen und lassen Sie sie zwei Wochen bei Zimmertemperatur stehen, bevor Sie sie kühlen.

Sicherheit. Ein Topf kochender Würze kann schwere Verbrühungen verursachen: Stellen Sie ihn auf einen stabilen Kocher, heben Sie ihn nur zu zweit oder gar nicht und halten Sie Kinder und Tiere fern. Verwenden Sie in Innenräumen nur einen Herd oder Kocher, der dafür zugelassen ist; Gasbrenner für draußen bleiben draußen. Zu viel Zucker zur Nachgärung oder zu frühes Abfüllen kann Flaschen platzen lassen: Verwenden Sie echte Bierflaschen, wiegen Sie den Zucker ab und tragen Sie eine Schutzbrille, wenn ein Sud zu viel Kohlensäure zu haben scheint. Versuchen Sie nie, das Bier zu destillieren. Beachten Sie die örtlichen Vorschriften zum Hausbrauen und zum Alkohol.

Geschichte und Entwicklung

In Mesopotamien teilte man sich einen Krug und sog das Bier durch lange Halme, die unter die schwimmenden Spelzen reichten.

Rückstände in Steinmörsern der Raqefet-Höhle in Israel, etwa 13 000 Jahre alt, wurden als Spuren eines breiartigen Gebräus gedeutet, das natufische Jäger und Sammler für Totenmahle herstellten; diese Deutung ist umstritten. Eine frühe und oft zitierte chemische Spur stammt aus Godin Tepe im Westen des Iran: In Rillen eines Kruges aus dem späten 4. Jahrtausend v. Chr. sitzt Calciumoxalat, der „Bierstein“, den Gerstenbier in Braugefäßen absetzt. Calciumoxalat kommt aber nicht nur in Bier vor, deshalb wird auch diese Deutung angezweifelt.

Mesopotamische Tontafeln erwähnen Bier tausendfach, nennen aber kein Rezept. Am nächsten kommt dem der Hymnus an Ninkasi, die Göttin des Brauens, der um 1800 v. Chr. aufgeschrieben wurde und vom Einweichen des Malzes, vom Ausbreiten der Maische auf Schilfmatten und vom Füllen der Bottiche spricht. In Ägypten war Bier ein Grundnahrungsmittel, und in Abydos wurde eine große Brauerei aus der Zeit um 3000 v. Chr. ausgegraben.

Im Mittelalter würzten europäische Brauer ihr Bier mit Grut, einer Kräutermischung. Abt Adalhard von Corbie erwähnte 822 Hopfen für Bier, und das länger haltbare Hopfenbier setzte sich in den folgenden Jahrhunderten langsam durch. Am 23. April 1516 bestimmten die bayerischen Herzöge in Ingolstadt, dass Bier nur aus Gerste, Hopfen und Wasser bestehen dürfe. Hefe stand nicht auf der Liste, weil ihre Rolle bei der Gärung noch nicht verstanden war; Louis Pasteur zeigte in den 1850er-Jahren, dass Gärung das Werk lebender Zellen ist. Im Carlsberg-Laboratorium in Kopenhagen fand Emil Christian Hansen heraus, dass wilde Hefen in der Brauhefe die „Bierkrankheit“ verursachten. Er zog eine Reinkultur aus einer einzigen guten Hefezelle, die im November 1883 erstmals für einen vollen Sud verwendet wurde, und Lagerbier wurde dadurch weit zuverlässiger. Carlsberg gab die Hefe an andere Brauereien weiter.

Die gelben Lupulindrüsen in der Hopfendolde enthalten die Bitterharze und das Aroma.

Kennzahlen

Frühe chemische Spur von Gerstenbier (umstritten)
Godin Tepe, Iran, spätes 4. Jahrtausend v. Chr.

Übliche Maischtemperatur
Etwa 62 bis 68 °C, wo die stärkespaltenden Enzyme des Malzes am besten arbeiten

Bayerisches Reinheitsgebot
23. April 1516, Ingolstadt: nur Gerste, Hopfen und Wasser

Erste Reinzuchthefe im Brauereibetrieb
Carlsberg, Kopenhagen, November 1883

Quellen

1. Five things I learned about Sumerian beer · University of Chicago Magazine https://mag.uchicago.edu/arts-humanities/five-things-i-learned-about-sumerian-beer
2. Purifying yeast · Carlsberg Group https://www.carlsberggroup.com/pursuit-of-better/scientific-discoveries/purifying-yeast/
3. 500 Jahre Reinheitsgebot: Deutsches Bier, was darf rein und was ist drin · Stiftung Warentest https://www.test.de/500-Jahre-Reinheitsgebot-Deutsches-Bier-was-darf-rein-und-was-ist-drin-4991639-0/
4. The brewing process · Cornell Brewing Program, Cornell University https://blogs.cornell.edu/brewing/?p=116
5. History of beer · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_beer
6. Mashing · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Mashing

Fakten geprüft am 2026-10-12

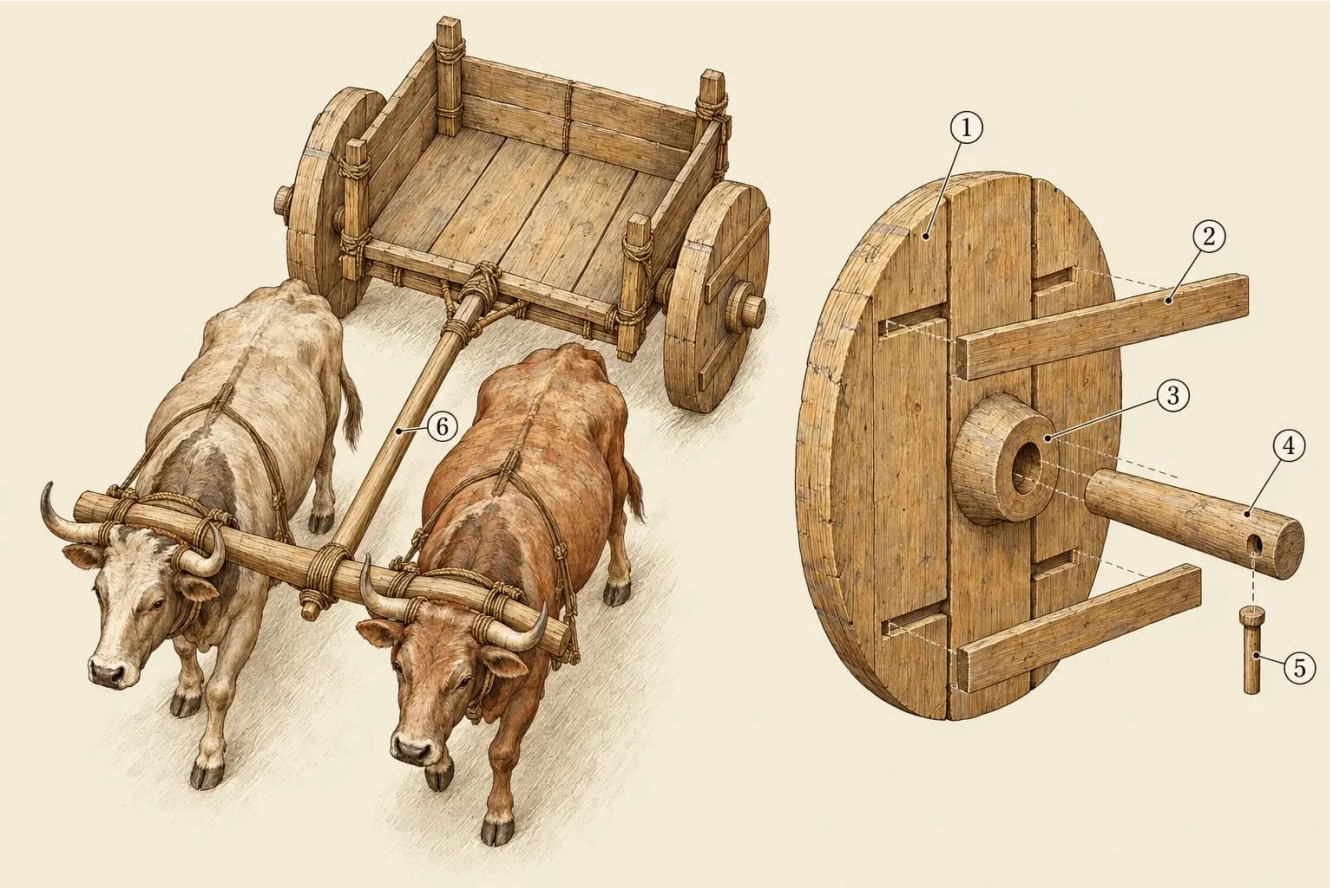
Rad & Achse

Rollen statt Schleifen

um 3.500 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Steinwerkzeuge (S. 5)

Führt zu: Fahrrad (S. 256), Kran & Flaschenzug (S. 152), Spinnrad (S. 192), Dampflokomotive (S. 247), Wasserrad (S. 160)



1 Scheibenbretter 2 Querleiste 3 Nabe 4 Achse 5 Achsnagel (Lünse) 6 Deichsel

Ein Rad, das sich auf einer Achse dreht, lässt eine Last rollen, statt sie über den Boden zu schleifen, und verlagert das Reiben in ein kleines, geschmiertes Lager. Wagen mit Rädern kamen um 3500 v. Chr. in Mesopotamien und Europa auf, und derselbe Gedanke trieb später Winden, Mühlen und Wasserräder an.

Was es ist

Rad und Achse bestehen aus einer Scheibe, die fest auf einer Welle sitzt oder sich um sie dreht. Unter einem Wagen trägt sie eine Last über den Boden. An einer Brunnenwinde oder einem Gangspill vervielfacht sie die Kraft.

Rollen unter einem Schlitten muss man immer wieder nach vorn tragen, ein Rad dagegen bleibt unter der Last. Lange war es schwierig, das Rad gleichmäßig um eine feste Achse laufen zu lassen.

Die Tafel zeigt die Rekonstruktion eines frühen Scheibenrads aus drei Brettern unter einem Ochsenkarren von etwa 3000 v. Chr. Räder dieser Art kamen in vielen Grabungen in Europa und im Nahen Osten zutage.

Wie es funktioniert

Ein gezogener Schlitten drückt mit seinem ganzen Gewicht auf die Kufen und schleift über jede Unebenheit. Auf Rädern entsteht die Reibung nur noch an einer kleinen Stelle, zwischen der Achse und ihrem Loch, während der Radkranz über den Boden rollt.

Auf Rollen gleitet die Last leicht, doch jede Rolle, die hinten frei wird, muss wieder nach vorn getragen werden.

Der Gewinn beruht auf der Hebelwirkung, denn die Oberfläche der Achse liegt viel näher an der Mitte als der Radkranz. Bei einem Rad von 70 Zentimetern Durchmesser auf einer 7 Zentimeter dicken Achse hat der Radkranz den zehnfachen Hebel. Um die Reibung an der Achse zu überwinden, genügt deshalb eine Zugkraft von etwa einem Zehntel dieser Reibung. Der Radkranz muss aber weiterhin über den Boden rollen, was auf weichen oder holprigen Wegen einen eigenen Widerstand erzeugt. Schmiere, meist Tierfett oder Teer, senkt die Reibung an der Achse weiter.

Eine zu dünne Achse bricht, eine zu dicke erhöht die Reibung. Das Loch muss rund und glatt sein, die Achse eng darin sitzen, ohne zu klemmen. Bei manchen frühen Wagen saßen die Räder fest auf den vierkantigen Enden der Achse und drehten sich mit ihr. Der runde Mittelteil der Achse lief dabei in Halterungen unter dem Wagenkasten. Die meisten späteren Wagen hatten eine feste Achse, auf deren Enden sich die Räder drehten, gesichert durch Achsnägel.

Wie man es baut

Ein Scheibenrad für einen leichten Handkarren lässt sich mit Handwerkzeug herstellen. Die Schritte unten sind ein Überblick ohne maßstäbliche Zeichnungen. Ein Wagen für schwere Lasten oder für Zugtiere erfordert die Erfahrung eines Stellmachers.

Holz auswählen. Nehmen Sie ein hartes, zähes, gut abgelagertes Holz wie Eiche, Esche oder Ulme. Sie brauchen drei etwa 5 Zentimeter dicke Bretter, das mittlere breiter als die beiden äußeren.

Scheibe zuschneiden. Legen Sie die Bretter Kante an Kante und reißen Sie mit Schnur und Pflock einen Kreis an. Schneiden Sie quer zur Faser Nuten ein und treiben Sie zwei Querleisten aus Hartholz hinein, die die Bretter zusammenhalten. Die Bretter werden zusätzlich verdübelt. Sägen Sie dann den Kreis aus.

Nabe anbringen. Damit das Rad nicht eiert, braucht die Mitte zusätzliche Stärke. Befestigen Sie auf jeder Seite einen gedrechselten Block, die Nabe, mit eingeleimten Hartholzdübeln, die ganz durch die Scheibe getrieben werden. Bohren Sie das Achsloch rechtwinklig zur Scheibe und glätten Sie es mit einer Raspel oder einem erhitzten Eisenstab.

Achse formen. Behauen Sie ein gerades, astfreies Stück Hartholz. Verjüngen Sie die Enden so, dass sie mit etwas Spiel in die Löcher passen, und bohren Sie durch jede Spitze, knapp außerhalb der Stelle, an der Nabe und Unterlegscheibe sitzen werden, ein Loch für den Achsnagel. Verschrauben Sie die Achse mit Holzklötzen oder Eisenbändern unter der Ladefläche.

Montieren und prüfen. Fetten Sie die Achsenden ein, schieben Sie die Räder auf, legen Sie Scheiben unter und schlagen Sie die Achsnägel ein. Jedes Rad sollte sich frei drehen und rund laufen, ohne zu kippeln. Beladen Sie den Wagen nach und nach und prüfen Sie die Verbindungen nach jeder Probefahrt.

> **Sicherheit.** Dechsel, Äxte und Löffelbohrer verursachen tiefe Schnittwunden, halten Sie deshalb beide Hände hinter der Schneide. Ein beladener Wagen kann am Hang davonrollen und jeden überrollen, der vor ihm steht. Prüfen Sie ihn daher auf ebenem Boden und legen Sie beim Anhalten Keile unter die Räder. Wer das Achsloch mit glühendem Eisen ausbrennt, sollte Wasser bereithalten.

Geschichte und Entwicklung

Zwischen etwa 3600 und 3300 v. Chr. tauchen Hinweise auf das Rad in einem weiten Gebiet auf. Tontafeln aus Uruk in Mesopotamien verwenden ein Schriftzeichen für einen Wagen. Ein Gefäß aus Bronocice in Südpolen trägt eine eingeritzte Darstellung, die wie ein vierrädriger Wagen aussieht. Weitere Funde stammen aus dem Nordkaukasus und den Steppen nördlich des Schwarzen Meeres. Wo die Idee entstand, ist unter Archäologen bis heute umstritten.

Ein bronzezeitliches Streitwagenrad: sechs Speichen und ein Kranz aus gebogenen Felgen, weit leichter als eine volle Scheibe.

Das älteste erhaltene Rad wurde 2002 im Laibacher Moor in Slowenien gefunden. Es hat etwa 70 Zentimeter Durchmesser und besteht aus Eschenbrettern, die Eichenleisten zusammenhalten. Radiokarbondaten setzen es zwischen etwa 3350 und 3100 v. Chr. an. Die etwa 1,2 Meter lange Eichenachse hat vierkantige Enden, die fest im Rad saßen.

Der Anthropologe David Anthony führt das späte Aufkommen des Rades auf die Werkzeuge zurück. Für runde Löcher und gerade Achsen brauchte man gegossene Meißel und Hohleisen aus Kupfer, die im Nahen Osten erst nach etwa 4000 v. Chr. verbreitet waren.

Scheibenräder waren robust, aber schwer, und passten zu langsamen Ochsenkarren. Um 2000 v. Chr. bauten Menschen der Sintaschta-Kultur östlich des Urals leichte Speichenräder für zweirädrige, von Pferden gezogene Streitwagen. Speichenrad und Streitwagen verbreiteten sich in den folgenden Jahrhunderten bis nach Ägypten, Griechenland und China.

Aufziehen des Reifens: Der Eisenring wird heiß aufgelegt und schrumpft beim Abkühlen fest auf das Rad.

Im 1. Jahrtausend v. Chr. begannen keltische Stellmacher, den Radkranz mit einem einzigen Eisenreifen zu beschlagen, der heiß aufgezogen wurde und beim Abkühlen die Fugen fest zusammenzog. Das Verfahren blieb bis ins 20. Jahrhundert üblich.

Das 19. Jahrhundert brachte gespannte Drahtspeichenräder, leicht genug für das Fahrrad, und danach luftgefüllte Gummireifen. Eine Eisenbahnachse funktioniert bis heute ebenso: Die Last ruht auf einem kleinen, geschmierten Lager, während das Rad auf der Schiene rollt.

Kennzahlen

Ältestes erhaltenes Rad
Laibacher Moor, Slowenien, ca. 3150 v. Chr.

Frühe Wagendarstellungen
ca. 3500–3350 v. Chr. (Tafeln aus Uruk, Gefäß von Bronocice)

Speichenrad
ca. 2000 v. Chr., Steppen östlich des Urals

Achsreibung, am Radkranz gespürt
Verringert im Verhältnis von Rad- zu Achsdurchmesser

Quellen

1. Wheel · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Wheel
2. World's oldest wheel found in Slovenia · Government Communication Office of Slovenia https://slovenia.si/art-and-cultural-heritage/worlds-oldest-wheel-found-in-slovenia
3. Replica of the oldest wooden wheel with an axle · City Museum of Ljubljana (MGML) https://mgml.si/en/city-museum/news/667/replica-of-the-oldest-wooden-wheel-with-an-axle-for-the-winner-of-the-26th-tour-of-slovenia/
4. Why It Took So Long to Invent the Wheel · Scientific American https://www.scientificamerican.com/article/why-it-took-so-long-to-inv/
5. Sennacherib's Quarry, 705–681 BCE · Center for Online Judaic Studies https://cojs.org/sennacherib-s_quarry-_705-681_bce/
6. Old Civilization: Layard's Nineveh (1853) · Scientific American https://www.scientificamerican.com/article/old-civilizationlayards-nineveh/
7. Estimating Wagon Draft (TechGuide 2G-213) · Tillers International https://tillersinternational.org/wp-content/uploads/2025/01/EstimatingWagonDraftTechGuide.pdf
8. Friction and Friction Coefficients for various Materials · Engineering ToolBox https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
9. Densities of Solids · Engineering ToolBox https://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d_1265.html

Fakten geprüft am 2026-10-11

Schrift

Wissen, das das Gedächtnis überdauert

um 3.300 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Töpferei (S. 23), Steinwerkzeuge (S. 5)

Führt zu: Stellenwertsystem (S. 99), Druckerpresse (S. 208), Elektrischer Telegraf (S. 289)

1 Zählsteine aus Ton 2 Aufgebrochene Tonkugel mit Zählsteinen 3 Frühe Tafel: Zahlzeichen, Gerste und Krug
4 Zugeschnittener Schreibgriffel aus Schilfrohr 5 Schreiberpalette mit schwarzer und roter Tinte 6 Papyrusrolle

Die Schrift hält Sprache in sichtbaren Zeichen fest, die ein anderer Mensch später lesen kann, weit entfernt oder lange nach dem Tod des Schreibers. Sie entstand mehrmals unabhängig; zu den ältesten Zeugnissen zählen Tafeln aus dem Süden Mesopotamiens um 3300 v. Chr., in die Tempelverwalter Zeichen drückten und ritzten, solange der Ton feucht war.

Was es ist

Schrift ist ein System sichtbarer Zeichen, auf das sich eine Gemeinschaft geeinigt hat und das für die Wörter oder Laute einer Sprache steht. Wer den Schreiber nie getroffen hat, kann die Nachricht trotzdem verstehen, auch Jahrhunderte später.

Gezählt und verbucht wurde lange vor dem Schreiben. Im Vorderen Orient tauchen ab etwa 8000 v. Chr. kleine Tonobjekte in Form von Kegeln, Kugeln oder Scheiben auf. Die Archäologin Denise Schmandt-Besserat deutet sie als Zählsteine für Mengen von Getreide, Öl oder Vieh; andere, etwa Lucy Bennison-Chapman, halten viele für

Gegenstände mit anderem Zweck. Um 3500 v. Chr. schlossen Buchhalter solche Zählsteine in hohle Tonkugeln ein und drückten ihre Formen außen in die Hülle. So ließen sich Mengen festhalten, aber weder ein Name noch ein Satz.

Eine Schrift kann ganze Wörter, Silben oder einzelne Laute wiedergeben, und viele verbinden diese Prinzipien.

Jede Form stand vermutlich für eine Warenart. In einer Tonhülle versiegelt, konnten die Zählsteine eine Schuld festhalten, bis sie beglichen war.

Wie es funktioniert

Zwei Gedanken machten aus dem Zählen ein Schreiben. Der erste gab Menge und Ware getrennte Zeichen. Auf den ältesten Tafeln aus Uruk sind die Zahlen mit dem runden Ende eines Griffels eingedrückt, die Waren daneben mit einer Spitze gezeichnet: fünf Eindrücke und eine Gerstenähre für fünf Maß Gerste. Der Wert eines Zahlzeichens hing noch vom Gezählten ab, mit eigenen Systemen für Getreide, Vieh oder Land.

Der zweite war das Rebusprinzip, also ein Zeichen für seinen Klang zu verwenden. Im Sumerischen klangen „Pfeil“ und „Leben“ gleich, deshalb konnte das Pfeilzeichen auch „Leben“ schreiben, ein Wort, das sich schlecht zeichnen lässt. Lautzeichen erscheinen in Mesopotamien um 3000 v. Chr.

Je nach Winkel hinterlässt die Kante eines zugeschnittenen Schilfrohrs senkrechte, waagrechte oder schräge Keile.

Wer Linien durch feuchten Ton zieht, schiebt ihn zu Wülsten auf. Die Schreiber drückten deshalb zunehmend die Kante eines zugeschnittenen Rohrs ein. Jeder Druck hinterließ einen Keil, und im Lauf des 3. Jahrtausends v. Chr. wurden aus den Bildern Gruppen von Keilen, daher der Name Keilschrift.

Ägyptische Schreiber kauten das Ende eines Binsenstängels zu einem Pinsel und rieben ihn über schwarze oder rote Tintenkuchen in einer Holzpalette. Sie schrieben auf Papyrus, Streifen aus dem Mark der Pflanze, in zwei gekreuzten Lagen gepresst und getrocknet. Alphabete verwendeten später Zeichen für einzelne Laute, sodass einige Dutzend davon jedes Wort schreiben können.

Wie man es baut

Man braucht feinen Ton, Wasser, ein trockenes Schilfrohr oder einen bleistiftdicken Gartenstab, ein Messer und ein feuchtes Tuch.

Ton vorbereiten. Töpferton lässt sich direkt verwenden. Ton vom Flussufer wird eingeweicht, durch ein Tuch gegossen, um groben Sand zu entfernen, und muss dann so weit abtrocknen, dass er einen Daumenabdruck hält, ohne zu kleben. Gut durchkneten, damit keine Luftblasen bleiben.

Tafel formen. Eine Kugel von der Größe eines kleinen Eis zu einem etwa 2 cm dicken Kissen drücken, klein genug für eine Hand.

Griffel schneiden. Etwa 15 cm Rohr absägen. Nahe einem Ende die Seiten mit dem Messer abschaben, bis die Spitze einen quadratischen Querschnitt mit ebenen Flächen und scharfen Kanten hat, dann gerade abschneiden: Eine Ecke im Ton ergibt einen Keil. Das andere Ende durch einen Knoten schneiden, sodass die massive Querwand das Rohr verschließt, und abrunden; ein runder Holzstab geht auch. Senkrecht eingedrückt entsteht ein Kreis, schräg eine D-förmige Kerbe, die beiden Formen der ersten Zahlzeichen.

Schreiben. Die Fläche mit der Längskante des Griffels in Felder teilen und in jedes Feld einen Eintrag setzen. Die Zahl mit dem runden Ende eindrücken und sauber abheben. Dann das Zeichen für das Gezählte mit einer Ecke des eckigen Endes zeichnen, wie die ersten Schreiber, oder aus eingedrückten Keilen zusammensetzen, wie ihre Nachfolger.

Trocknen. Die Tafel einige Tage im Schatten liegen lassen und einmal wenden, damit sie nicht reißt. Getrockneter Ton wird im Wasser wieder weich; erst das Brennen im Ofen, wie bei Keramik, macht ihn dauerhaft.

Das Alphabet ausprobieren. Zehn Wörter laut sprechen und die gehörten Laute notieren, ohne an die Buchstaben ihrer Schreibung zu denken. Jedem Laut ein einfaches Zeichen geben, nach dem alten Kniff: etwas zeichnen, dessen Name mit diesem Laut beginnt. Beginnt kein Wort mit einem Laut, einfach ein Zeichen erfinden. Für jeden neuen Laut ein neues Zeichen ergänzen: Die meisten Alphabete haben zwischen zwanzig und gut vierzig Buchstaben.

> **Sicherheit.** Beim Zuschneiden des Rohrs immer vom Körper weg schneiden. Trockenen Ton nicht schleifen oder fegen: Sein Staub enthält feinen Quarz, der die Lunge schädigt; mit einem feuchten Tuch reinigen. Tafeln nur in einem richtigen Brennofen brennen und nie ein noch feuchtes Stück, das platzen kann.

Geschichte und Entwicklung

Die ältesten Tafeln stammen aus der Schicht Uruk IV im Tempelbezirk von Uruk, meist auf etwa 3350–3200 v. Chr. datiert, von manchen Autoren auf 3200–3100. Aus Uruk und anderen Fundorten sind über 6.000 protokeilschriftliche Tafeln und Fragmente bekannt, überwiegend Abrechnungen. Die Keilschrift blieb über dreitausend Jahre in Gebrauch.

In Ägypten tragen Knochen- und Elfenbeinetiketten aus dem Grab U-j in Abydos, datiert um 3200 v. Chr., bereits Hieroglyphen, einige davon mit Lautwert. Weil die Daten so nah beieinander liegen, ist bis heute umstritten, ob Ägypten die Idee aus Mesopotamien übernahm. Die chinesische Schrift erscheint um 1200 v. Chr. auf den Orakelknochen der Shang aus Anyang, schon voll ausgebildet. In Mesoamerika wurde in Oaxaca um 400 v. Chr. geschrieben, und die gemalten Maya-Glyphen von San Bartolo stammen aus der Zeit von 300 bis 200 v. Chr. Für diese Zeit ist kein Kontakt zum Vorderen Orient bekannt: Es sind eigenständige Erfindungen.

In China rieb der Schreiber einen Tuschestab auf einem nassen Stein und schrieb mit einem spitzen Haarpinsel.

Das Alphabet ging aus den Hieroglyphen hervor. Etwa vierzig kurze Inschriften aus den Türkisminen von Serabit el-Chadim auf dem Sinai und zwei aus dem Wadi el-Hol in Ägypten kommen mit 27 bis 29 Zeichen aus. Ihre Verfasser sprachen eine semitische Sprache und gaben jedem ägyptischen Bild den Anfangslaut seines Namens in ihrer eigenen Sprache: das Haus, *beth*, wurde zu b, das Wasser, *mem*, zu m. Die vorgeschlagenen Datierungen reichen von etwa 1850 bis 1550 v. Chr. Um 1200–1050 v. Chr. schrieben die Phönizier 22

Konsonantenbuchstaben von rechts nach links. Die Griechen übernahmen sie um 800 v. Chr. und ergänzten Vokale, und die Etrusker gaben das Alphabet im 7. Jahrhundert v. Chr. an Rom weiter.

Papier, in China seit dem 2. Jahrhundert v. Chr. hergestellt, wurde später zum üblichen Träger der Schrift und gedruckter Bücher.

Kennzahlen

Älteste Tafeln
Uruk, Südirak, um 3350–3200 v. Chr. (manche Autoren: 3200–3100)

Eigenständige Erfindungen
Mesopotamien, China und Mesoamerika; Ägypten wahrscheinlich, aber umstritten

Phönizisches Alphabet
22 Konsonantenbuchstaben, um 1200–1050 v. Chr.

Frühestes Textkorpus
Über 6.000 protokeilschriftliche Tafeln und Fragmente, meist Abrechnungen

Erstes Alphabet
27 bis 29 Zeichen, Sinai und Ägypten, etwa zwischen 1850 und 1550 v. Chr.

Quellen

1. The state of decipherment of proto-Elamite (Englund, 2004) · Cuneiform Digital Library Initiative https://cdli.earth/files-up/publications/englund2004c.pdf
2. Seals and signs: tracing the origins of writing in ancient South-west Asia (Kelley, Cartolano & Ferrara, 2024) · Antiquity, Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/seals-and-signs-tracing-the-origins-of-writing-in-ancient-southwest-asia/B3C2D400F3F80A7A0162D9035C9C2804
3. The Evolution of Writing (Schmandt-Besserat, 2014) · Denise Schmandt-Besserat, University of Texas at Austin https://sites.utexas.edu/dsb/tokens/the-evolution-of-writing/
4. Reconsidering 'Tokens': The Neolithic Origins of Accounting or Multifunctional, Utilitarian Tools? (Bennison-Chapman, 2019) · Cambridge Archaeological Journal, Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/cambridge-archaeological-journal/article/abs/reconsidering-tokens-the-neolithic-origins-of-accounting-or-multifunctional-utilitarian-tools/7E6C04CB040AD8AA0EA84B94D4D275C4
5. Visible Language: Inventions of Writing in the Ancient Middle East and Beyond (Woods, ed., 2010) · Institute for the Study of Ancient Cultures, University of Chicago https://isac.uchicago.edu/sites/default/files/uploads/shared/docs/oimp32.pdf
6. Early Egyptian Writing (1999) · Archaeology, Archaeological Institute of America https://archive.archaeology.org/9903/newsbriefs/egypt.html
7. Oracle bone (50-31) · Nelson-Atkins Museum of Art https://art.nelson-atkins.org/objects/23289/oracle-bone
8. Evidence of Earliest Maya Writing (report on Saturno, Stuart & Beltrán, Science, 2006) · Mesoweb https://www.mesoweb.org/reports/SanBartoloWriting.html
9. Proto-Sinaitic: Progenitor of the Alphabet (Simons, 2011) · Rosetta 9, University of Birmingham https://rosetta.bham.ac.uk/wp-content/uploads/2024/02/Simons_Proto-Sinaitic_Rosetta9.pdf
10. The alphabet · Deutsche Nationalbibliothek, German Museum of Books and Writing https://mediengeschichte.dnb.de/DBSMZBN/Content/EN/SoundsSymbolsScript/01-alphabet-en.html
11. Papyrus · Centre for the Study of Manuscript Cultures, Universität Hamburg https://www.csmc.uni-hamburg.de/profiling-guide/materials/writing-surfaces/papyrus.html
12. Scribal Palette · Institute of Egyptian Art and Archaeology, University of Memphis https://memphis.edu/egypt/exhibit/palette.php
13. The Cuneiform Stylus (on Cammarosano, Mesopotamia 49, 2014) · Book and Sword https://www.bookandsword.com/2022/12/10/the-cuneiform-stylus/
14. What the Earliest Texts Say About the Invention of Writing · Discover Magazine https://www.discovermagazine.com/what-the-earliest-texts-say-about-the-invention-of-writing-692

Fakten geprüft am 2026-10-14

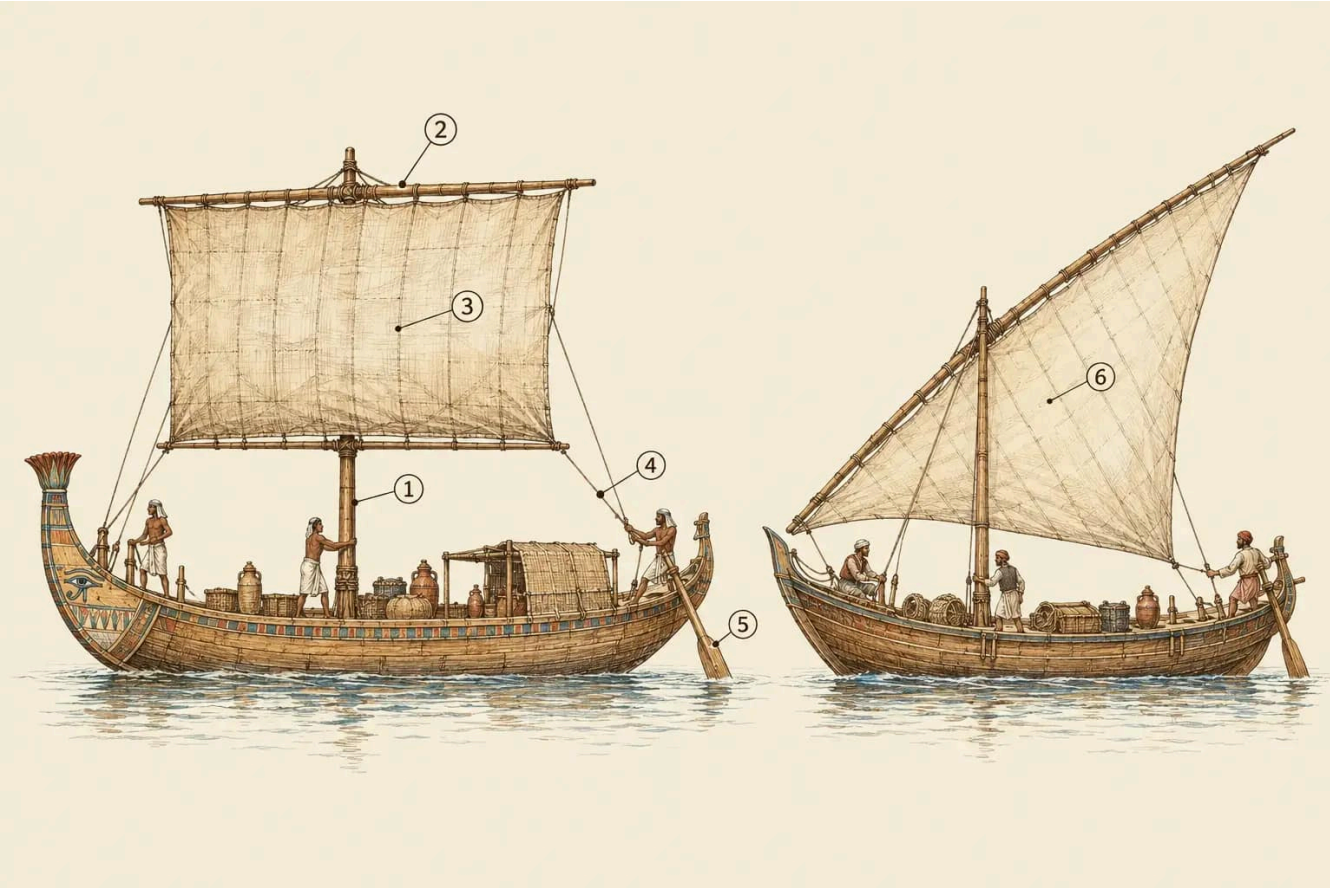
Segel

Den Wind fangen, um zu fahren

um 3.200 v. Chr. · Vorgeschichte · Sesshaftigkeit

Erfordert: Seil & Schnur (S. 13), Weben (S. 44)

Führt zu: Astronavigation (S. 213)



1 Mast 2 Rah 3 Rahsegel 4 Schot 5 Steuerriemen 6 Lateinsegel

Ein Segel ist eine Bahn aus Tuch oder Mattengeflecht, die an einem Mast gesetzt wird, um den Wind einzufangen und ein Boot voranzutreiben. Richtig eingestellt, bewegt es das Boot mit Wind von hinten oder von der Seite und im Zickzack sogar dorthin, woher der Wind kommt.

Was es ist

Ein Segel ist eine Fläche, die man in den Wind stellt, um ein Wasserfahrzeug anzutreiben. Die ersten waren vermutlich Matten oder Häute, die an einer Stange hochgehalten wurden. Später webte man Segel aus Leinen, Wolle oder Baumwolle, heute meist aus Kunstfasern. An einem Mast aufgehängt und mit Leinen eingestellt, bewegt ein Segel ein Boot ohne Treibstoff und ohne Ruderer.

Die Tafel zeigt Rahsegel und Schratsegel. Das Rahsegel hängt quer zum Boot an einer waagerechten Spiere, der Rah, und arbeitet am besten mit Wind von hinten. Ein Schratsegel steht in Längsrichtung des Bootes. Das Lateinsegel ist ein Dreieck an einer langen, schräg stehenden Rah und eignet sich für seitlichen Wind.

Wie es funktioniert

Bei Wind von hinten ist das Prinzip einfach: Die Luft drückt gegen das Segel wie gegen eine offene Hand. Auf diesem Kurs kann ein Boot nicht schneller fahren als der Wind, denn je schneller es wird, desto schwächer ist der Wind, den es noch spürt.

Bei Wind von der Seite arbeitet das Segel wie ein Flügel. Gewölbt und in einem kleinen Winkel zum Wind gestellt, lenkt es die Luftströmung ab, und die Luft drückt ihrerseits auf das Segel zurück, größtenteils seitwärts und zum Teil nach vorn. Der Rumpf und, falls vorhanden, der Kiel stemmen sich gegen das seitliche Abdriften, weil das Wasser gegen sie drückt. Übrig bleibt ein Schub nach vorn. Deshalb kann ein Boot quer zum Wind schneller segeln als direkt vor dem Wind.

Kein Segel kann ein Boot direkt gegen den Wind treiben. Ein modernes Segelboot hält einen Kurs von etwa 40 bis 45 Grad zum Wind. Um ein Ziel in Luv zu erreichen, fährt es im Zickzack und geht bei jeder Wende durch die Windrichtung. Segler nennen das Aufkreuzen.

Die Mannschaft stellt das Segel mit Leinen ein. Mit der Schot (4) holt sie eine untere Ecke des Segels dicht oder fiert sie und bestimmt so seinen Winkel zum Wind. Das Fall zieht die Rah (2) am Mast (1) hoch. Auf einem rahgetakelten Schiff schwenken die Brassen die Rah herum. Bei starkem Wind verkleinert die Mannschaft die Segelfläche, das heißt Reffen. Der Steuerriemen (5), später das Ruder, hält den Kurs.

Bauanleitung

Diese Übersicht beschreibt die Herstellung eines kleinen Rahsegels. Sie ist keine maßhaltige Bauzeichnung und kein Plan zum Nachrüsten beliebiger Boote. Die Takelage muss für das jeweilige Boot ausgelegt sein. Ein qualifizierter Bootsbauer oder Segellehrer muss das Zusammenspiel von Rumpf, Segel und Steuerung, die Stabilität und die Festigkeit der Befestigungen prüfen.

Das Material besorgen. Segeltuch, Garn, Liektau, Rah und Beschläge nach dem geprüften Takelplan auswählen. Dazu kommen Segelnadel und Segelhandschuh. Mastlagerung und Befestigungen müssen diesem Plan entsprechen.

Die Bahnen zuschneiden und verbinden. Die Tuchstreifen nebeneinanderlegen. Nahtüberlappung und Stiche nach den Vorgaben des Plans für die zu erwartenden Lasten ausführen.

Säumen und Liektau annähen. Die Säume nach Plan falten und nähen, dann das Liektau annähen. Tuch und Nähte übertragen die Windlasten; das Tau verstärkt die Kanten. Die Ecken verstärken und die vorgesehenen Ringe oder Ösen einsetzen.

Mit dem Segelhandschuh kann die Hand eine schwere Nadel durch mehrere Lagen Tuch drücken.

Auftakeln. Segel, Fall und Schoten nach dem geprüften Plan anbringen. Prüfen, ob sich die Rah absenken lässt und die Leinen frei laufen.

Vor dem Segeln üben. Ein Segellehrer muss zeigen, wie sich bei dieser Takelage das Segel bergen und der Winddruck verringern lassen. Diese Manöver vor dem Ablegen unter Anleitung üben. Allein das Loswerfen der Schoten kann ein Rahsegel weiter Wind fangen lassen. Die erste Probefahrt in geschütztem Wasser bei leichtem Wind mit einem Segellehrer an Bord machen.

> **Sicherheit.** Eine Bö kann ein kleines Boot in Sekunden zum Kentern bringen. Eine Rettungsweste tragen, den Wetterbericht prüfen und anfangs bei leichtem Wind in Ufernähe segeln, während jemand zusieht. Die Schot nie so belegen, dass sie sich nicht schnell lösen lässt. Eine schwingende Rah oder ein Baum kann den Kopf treffen, und kaltes Wasser erschöpft einen Schwimmer schnell.

Geschichte und Entwicklung

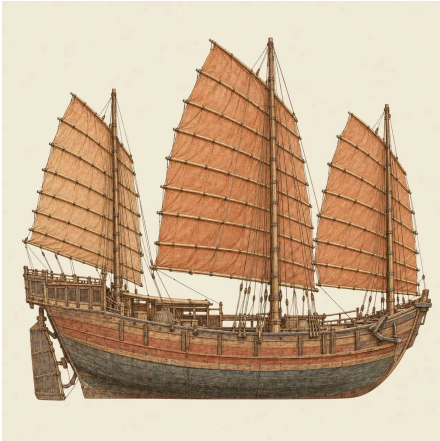
Boote sind viel älter als Segel: Lange bevor die Menschen den Wind nutzten, paddelten, stakten und ruderten sie. Wann das Segel aufkam, ist unsicher, denn Tuch und Matten bleiben selten erhalten. In Kuwait stammen Reste seegängiger Schilfboote mit Bitumenüberzug aus der Zeit zwischen 5500 und 5000 v. Chr. Robert Carter untersucht sie als Belege für frühen Seehandel; die Bootsreste allein belegen keine Nutzung von Segeln.

Das Krebsscherensegel, zwischen zwei Spieren gespannt, trieb austronesische Kanus über den Pazifik.

Frühe mögliche Darstellungen stammen aus Ägypten, um 3200 v. Chr. Ein bemaltes Gefäß aus der Zeit Naqada II im British Museum zeigt ein Boot mit einem Gegenstand an einer Stange. R. L. Bowen deutete ihn als Segel; die andere Lesart ist ein Banner. Das Katalogdatum um 3200 v. Chr. bezieht sich auf diesen möglichen Beleg und ist kein gesichertes Erfindungsdatum. Auf dem Nil trug die Strömung die Boote nach Norden, und der Wind konnte sie wieder nach Süden schieben.

Rahsegel wurden auf ägyptischen, phönizischen, griechischen und römischen Schiffen verwendet, später auch auf Wikingerschiffen, deren Segel oft aus Wolle gewebt waren. Im Pazifik und im Indischen Ozean entwickelten austronesische Seefahrer eigene Takelagen. Die Wörter für „Segel“ in ihren Sprachen reichen etwa fünftausend Jahre zurück, und das Krebsscherensegel trug ihre Auslegerkanus über Tausende Kilometer offenes Meer.

Das Lateinsegel taucht spätestens im 2. Jahrhundert n. Chr. im Mittelmeer auf und wird ab dem 5. Jahrhundert gebräuchlich. Herstellung und Unterhalt waren billiger als beim Rahsegel; deutlich schneller war es wohl nicht. Frühere chinesische Schiffsbilder zeigen Rahsegel. China könnte das mit Bambusstangen versteifte Dschunkensegel um das 12. Jahrhundert übernommen haben. Ein allgemeiner Ersatz der Rahsegel ist damit nicht belegt.



Bambuslatten halten das Dschunkensegel flach und steif.

Ab dem 15. Jahrhundert verwendeten europäische Schiffbauer gemischte Rah- und Lateintakelagen auf Karacken und manchen Karavellen. Diese Traditionen trugen zu den Takelagen späterer Hochseesegler bei. Im 19. und 20. Jahrhundert übernahm die Dampfkraft die Handelsschifffahrt. Segel gibt es weiterhin auf Yachten und Regattabooten, heute aus Kunstfasertuch geschnitten.

Kennzahlen

Frühe mögliche Darstellungen
Ägypten, um 3200 v. Chr.

Lateinsegel
Im Mittelmeer spätestens im 2. Jahrhundert n. Chr.

Höchster Kurs am Wind
Etwa 40–45° bei einem modernen Segelboot

Dschunkensegel mit Latten
Möglicherweise um das 12. Jahrhundert n. Chr. in China übernommen

Quellen

1. Sail · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Sail
2. Junk (ship) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Junk_(ship)
3. Boat remains and maritime trade in the Persian Gulf during the sixth and fifth millennia BC (R. Carter, 2006) · Antiquity https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/abs/boat-remains-and-maritime-trade-in-the-persian-gulf-during-the-sixth-and-fifth-millennia-bc/98224B03E778DE5C9D3EAA806A5ABCF8
4. Egypt's Earliest Sailing Ships (R. L. Bowen, 1960) · Antiquity https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/egypts-earliest-sailing-ships/28F7218895B44D2DC9BF36AECD5B3F79
5. The physics of sailing (J. Wolfe) · School of Physics, UNSW Sydney https://newt.phys.unsw.edu.au/~jw/sailing.html
6. The Ship’s Sail · The Viking Ship Museum https://www.vikingeskibsmuseet.dk/en/professions/education/all-about-the-viking-ship/the-ships-sail
7. Seam · UK Sailmakers https://www.uksailmakers.com/encyclopedia/glossary/seam/
8. Carrack (Não) · The Mariners’ Museum and Park https://exploration.marinersmuseum.org/watercraft/carrack-nao/
9. Hypothetical Reconstruction of an Ancient Egyptian Sea-going Vessel from the Reign of Hatshepsut, 1500 BCE (P. Couser, C. Ward and T. Vosmer, 2009) · RINA Historic Ships conference https://www.ancientportsantiques.com/wp-content/uploads/Documents/ETUDESarchivees/Navires/Min%20of%20the%20Desert/Min-Couser2012.pdf
10. Drag Equation · NASA Glenn Research Center https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/

Fakten geprüft am 2026-10-12

Seife

Fett und Asche gegen Keime

um 2.800 v. Chr. · Antike · Sesshaftigkeit

Erfordert: Beherrschung des Feuers (S. 9), Töpferei (S. 23)

Führt zu: Hygiene und Antisepsis (S. 302)

1 Aschefass (Laugenfass) 2 Topf, der die Lauge auffängt 3 Talg 4 Seifenkessel über dem Feuer 5 Form und geschnittene Stücke

Seife entsteht, wenn man Fett mit einer starken Lauge kocht oder verrührt: Die Lauge spaltet das Fett in Glycerin und in Salze von Fettsäuren, die Fett und Schmutz ins Wasser tragen. Rezepte für seifenartige Reinigungsmittel reichen ins Mesopotamien des 3. Jahrtausends v. Chr. zurück; billige Industrielauge machte Seife im 19. Jahrhundert zum Alltagsprodukt.

Was es ist

Seife ist ein Reinigungsmittel aus Fetten oder Ölen und einer Lauge. Jedes Seifenmolekül hat ein Ende, das sich an Wasser bindet, und einen langen Schwanz, der sich an Fett hält; so kann es Fett, Schmutz und viele Mikroben von der Haut ins Spülwasser tragen. Mit Natriumhydroxid hergestellte Seife wird zu festen Stücken; Kaliseifen bleiben weich oder flüssig. Die Lauge, die man auf dem Hof aus Holzasche gewann, enthielt Kaliumcarbonat, kein modernes Hydroxid, und ergab eine weiche Seife.

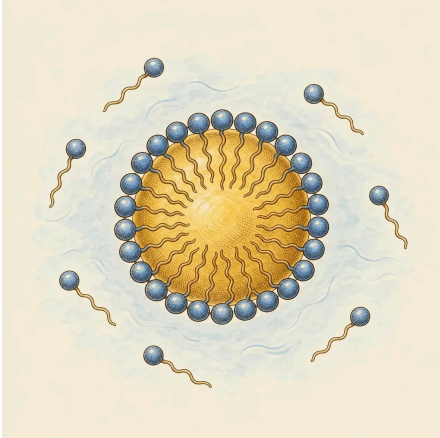
Die Tafel zeigt das Seifensieden, wie es auf Bauernhöfen in Europa und Nordamerika bis ins 19. Jahrhundert üblich war: Wasser, das durch Holzasche läuft und zu Lauge wird, ein Topf, der sie auffängt, ausgelassener Talg, ein Kessel

über dem Feuer und eine Form mit geschnittenen Stücken, die trocknen.

Wie es funktioniert

Fette und Öle sind Triglyceride: drei Fettsäureketten, die an ein Glycerinmolekül gebunden sind. Eine starke Lauge löst diese Bindungen. Jede Fettsäure übernimmt das Natrium oder Kalium der Lauge und wird zum Seifenmolekül, und das Glycerin wird frei. Chemiker nennen die Reaktion Verseifung.

Im Wasser sammeln sich Seifenmoleküle zu winzigen Kugeln, den Mizellen, mit den fettliebenden Schwänzen innen und den wasserliebenden Köpfen außen. Ein Fetttropfen wird in den Kern gezogen und mit ihnen weggespült. Dieselben Schwänze können sich in die Fetthülle mancher Bakterien und Viren schieben, auch der Coronaviren, und sie aufbrechen. Deshalb entfernt Händewaschen mit Seife und Wasser weit mehr Keime als Wasser allein, auch wenn Mikroben mit festerer Hülle widerstandsfähiger sind.



Eine Mizelle: Die fettliebenden Schwänze halten das Fett innen fest, die wasserliebenden Köpfe lassen es mit dem Spülwasser abfließen.

Auf dem Hof stammte die Lauge aus der Asche. Wasser, das man durch ein Fass mit Hartholzasche goss, löste Kaliumsalze, vor allem Kaliumcarbonat, und lief als braune Lauge ab. Sechs bis acht Stunden mit Talg gekocht, ergab sie eine weiche, gallertige Schmierseife, die man in einem Fass aufbewahrte und mit der Kelle entnahm. Gab man am Ende des Kochens Kochsalz hinzu, stieg eine festere Seife als Kuchen auf, den man in Stücke schneiden konnte; doch Salz war teuer, und viele Bauernfamilien verzichteten darauf. Wirklich harte Natronseife verlangte Soda, das aus der Asche von Seetang und Strandpflanzen kam, bis Nicolas Leblanc einen Weg fand, es aus Kochsalz zu gewinnen.

Wie man sie herstellt

Kleine Mengen Seife macht man heute im Kaltverfahren, mit Natriumhydroxid aus dem Seifenbedarf und einem Seifenrechner. Natriumhydroxid ist ätzend und kann in Sekunden blind machen: Das ist Arbeit nur für Erwachsene, in einem ruhigen, aufgeräumten Raum.

Ausrüstung bereitlegen. Nötig sind Schutzbrille, chemikalienfeste Handschuhe und lange Ärmel, eine Digitalwaage mit Grammanzeige, Gefäße aus Edelstahl oder aus Polypropylen, die als beständig gegen heiße Lauge verkauft werden (nie Aluminium, das mit Lauge reagiert), ein Stabmixer, ein Thermometer, eine Silikon- oder ausgekleidete Form und reines Olivenöl oder eine erprobte Ölmischung.

Berechnen. Geben Sie das genaue Gewicht jedes Öls mit einer Überfettung von etwa 5 % in einen Verseifungsrechner ein. Für 500 g Olivenöl ergibt er etwa 64 g Natriumhydroxid und etwa 170 g Wasser. Prüfen Sie das Ergebnis zweimal: Zu viel Lauge macht eine Seife, die die Haut verätzt.

Die Lauge ansetzen. Wiegen Sie im Freien oder am offenen Fenster zuerst das Wasser ab und streuen Sie dann das Natriumhydroxid langsam und unter Rühren hinein, niemals das Wasser auf die Lauge. Die Lösung wird schnell heiß und dampft kurz; atmen Sie die Dämpfe nicht ein. Lassen Sie sie auf etwa 40 °C abkühlen.

Mischen und gießen. Erwärmen Sie das Öl auf eine ähnliche Temperatur, gießen Sie die Lauge dazu und mixen Sie in kurzen Stößen, bis die Masse dick wird wie ein dünner Pudding. Gießen Sie sie in die Form, decken Sie sie ab und lassen Sie sie ein bis zwei Tage stehen.

Reifen lassen. Lösen Sie den Block nach ein bis zwei Tagen aus der Form und schneiden Sie ihn in Stücke. Eine richtig berechnete Seife hat dann fertig reagiert; vier bis sechs Wochen Reifezeit hochkant an einem trockenen, luftigen Ort, bei reiner Olivenölseife länger, lassen Wasser verdunsten, damit die Stücke hart und ergiebig werden. Die Reifezeit rettet keine Seife mit zu viel Lauge: Brennt ein gereiftes Stück noch auf der Haut, werfen Sie den ganzen Ansatz weg.

> **Sicherheit.** Tragen Sie beim Umgang mit Lauge oder frischer Seife immer Schutzbrille und Handschuhe und halten Sie Kinder und Tiere aus dem Raum. Gelangt Lauge auf die Haut, sofort mit viel fließendem Wasser spülen; gelangt sie ins Auge, mindestens 30 Minuten unter fließendem Wasser spülen, während jemand den Notruf wählt. Beschriften Sie jedes Gefäß, verwahren Sie Natriumhydroxid verschlossen in der Originalverpackung und benutzen Sie Geräte, die Lauge enthielten, nie wieder für Lebensmittel. Fassen Sie frische Seife in den ersten Tagen nur mit Handschuhen an.

Geschichte und Entwicklung

Bevor Seife verbreitet war, zerrieb man Seifenkraut in Wasser und wusch mit dem milden Schaum Wolle und Leinen.

Seifenartige Reinigungsmittel sind alt, doch die frühen Belege sind dünn. Babylonische Quellen um 2800 v. Chr. werden oft als ältester Nachweis genannt, und spätere Darstellungen beschreiben mesopotamische Rezepte des 3. Jahrtausends v. Chr., die Öl mit Holzasche erhitzten, um Wolle zu waschen; die Tontafeln selbst werden allerdings selten genau benannt. Der ägyptische Papyrus Ebers verordnet um 1550 v. Chr. tierische Fette oder Pflanzenöle, mit einem alkalischen Salz vermischt, als Heilmittel.

Römische Autoren hielten Seife für ein fremdes Erzeugnis. Plinius der Ältere schrieb sie im 1. Jahrhundert n. Chr. den Galliern zu, die sie aus Talg und Asche herstellten und damit ihr Haar tönten; bei ihm erscheint zum ersten Mal das lateinische Wort sapo. Ein Jahrhundert später beschrieb der Arzt Galen Laugenseife und riet, sich damit zu waschen.

Harte Olivenölseifen kamen aus dem östlichen Mittelmeerraum. Der persische Arzt ar-Razi schrieb um 900 Seifenrezepte auf, und im 13. Jahrhundert war das Seifensieden in den Städten Syriens und Palästinas ein bedeutendes Gewerbe. In Europa stellten Werkstätten in Kastilien und Marseille im 15. Jahrhundert Olivenölseife in großen Mengen her, während Seifensieder im Norden Talg mit Aschenlauge kochten.

Aleppo-Seife aus Oliven- und Lorbeeröl wird in Würfel geschnitten und zum monatelangen Reifen in luftigen Türmen gestapelt.

Billig wurde Seife erst, als ihre Lauge billig wurde. 1791 ließ sich Nicolas Leblanc ein Verfahren patentieren, das Soda aus Salz, Schwefelsäure, Kohle und Kalkstein gewinnt, sodass die Seifensieder nicht mehr auf Pflanzenasche angewiesen waren. 1823 zeigte Michel-Eugène Chevreul, dass Fette Verbindungen aus Glycerin und Fettsäuren sind, und erklärte damit, was im Kessel geschieht. Fabriken wie die 1885 in Warrington gegründete Firma Lever Brothers verkauften Seife in verpackten Markenstücken. Die Hygiene folgte langsam: 1847 ließ Ignaz Semmelweis das Personal seiner Wiener Geburtsklinik die Hände mit Chlorkalklösung desinfizieren, und die Todesfälle durch Kindbettfieber sanken dort im folgenden Jahr von etwa 18 % auf etwa 1 %.

Kennzahlen

Älteste Erwähnung eines seifenartigen Stoffes
Babylon, um 2800 v. Chr.

Die Reaktion
Fett + Lauge → Seife + Glycerin (Verseifung)

Chemie erklärt
Michel-Eugène Chevreul, 1823

Soda aus Kochsalz
Verfahren von Nicolas Leblanc, 1791

Quellen

1. Why soap works · Yale School of Medicine https://medicine.yale.edu/news-article/why-soap-works
2. Soap making (Dallas Bogan, History of Campbell County, Tennessee) · TNGenWeb https://www.tngenweb.org/campbell/hist-bogan/SoapMaking.html
3. Nicolas Leblanc (1742-1806) · European Route of Industrial Heritage https://www.erih.net/how-it-started/stories-about-people-biographies/biography/leblanc
4. Chevreul et la chimie des corps gras · Encyclopædia Universalis https://www.universalis.fr/encyclopedie/chevreul-et-la-chimie-des-corps-gras/
5. Lever Brothers Limited · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/people/cp42536
6. Pioneering hand hygiene: Ignaz Semmelweis and the fight against puerperal fever (Cureus, 2024) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11568873/
7. Codex Standard for Named Animal Fats (CODEX-STAN 211-1999) · FAO/WHO Codex Alimentarius https://www.fao.org/4/y2774e/y2774e05.htm
8. Saponification value of fats and oils as determined from 1H-NMR data: the case of dairy fats (Foods, 2022) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9140812/
9. Soap · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Soap

Fakten geprüft am 2026-10-12

Stellenwertsystem

Ziffern, deren Wert die Stelle bestimmt

um 2.050 v. Chr. · Antike · Sesshaftigkeit

Erfordert: Schrift (S. 87)

Führt zu: Astronavigation (S. 213), Computer (S. 370), Thermometer und Barometer (S. 225)

1 Rechenbrett: eine Linie für jede Zehnerpotenz 2 Kieselstein als Rechenstein
3 Tontafel: tausend als 16 Sechziger und 40, im Sechzigersystem 4 Punkte und Striche der Maya: 2 und 10, im Zwanzigersystem
5 Muschelzeichen für die Null 6 Tausend in indischen Ziffern, wie wir sie schreiben

In einem Stellenwertsystem genügen wenige Ziffern, um jede Zahl zu schreiben, denn der Wert einer Ziffer hängt von der Stelle ab, an der sie steht. Mit einer Null für eine leere Stelle lassen sich Additionen, Multiplikationen und Divisionen schriftlich lösen, Spalte für Spalte und ohne Rechenbrett.

Was es ist

In 707 zählt die erste Sieben Hunderter, die letzte Einer. Darin steckt das ganze Stellenwertsystem: ein kleiner Satz von Zeichen, deren Wert davon abhängt, wo sie stehen. Mit den zehn Ziffern von 0 bis 9 lässt sich jede ganze Zahl schreiben, so groß sie auch sei, ohne dass je ein neues Zeichen nötig wäre.

Ältere Systeme zählten ihre Zeichen zusammen. Ägyptische Schreiber hatten ein Zeichen für die Einer, eines für die Zehner, eines für die Hunderter und wiederholten jedes so oft wie nötig. In römischen Zahlen ist 1888 MDCCCLXXXVIII, dreizehn Zeichen. Solche Zahlen halten eine Summe gut fest, doch rechnen lässt sich mit ihnen

schlecht. Römische und mittelalterliche Rechnungsführer arbeiteten deshalb auf einem Rechenbrett und schrieben nur das Ergebnis auf.

Das Stellenwertsystem macht aus der geschriebenen Zahl ein Rechenbrett auf dem Papier, sodass sich die Rechnung selbst aufschreiben und nachprüfen lässt. Möglich wird das durch die Null. Sie markierte zuerst eine leere Stelle und wurde dann zu einer eigenen Zahl.

Wie es funktioniert

Die Basis ist die Zahl der verschiedenen Ziffern, und jede Stelle zählt das Basisfache der Stelle rechts daneben, im Zehnersystem also das Zehnfache. Im Zehnersystem bedeutet 2748 zwei Tausender, sieben Hunderter, vier Zehner und acht Einer. In 1081 sagt die Null, dass es keine Hunderter gibt; ohne sie sähen 1081 und 181 gleich aus.

Eine babylonische Zahl wurde Keil für Keil in feuchten Ton gedrückt.

Andere Basen folgen derselben Regel. Babylonische Schreiber rechneten in Sechzigern, mit zwei Zeichen: dem senkrechten Keil für eins und dem Winkelhaken für zehn. Tausend sind 16 Sechziger und 40, geschrieben als 16, dann 40. Die Maya rechneten in Zwanzigern, mit einem Punkt für eins, einem Strich für fünf und einer Muschel für null, und stapelten die Stellen von unten nach oben. Tausend sind 2 Vierhunderter, 10 Zwanziger und keine Einer: zwei Punkte über zwei Strichen über einer Muschel. In Kalenderdaten zählte die dritte Stelle 360 Tage statt 400. Computer rechnen im Zweiersystem, in dem 13 als 1101 erscheint: eine Acht, eine Vier, keine Zwei und eine Eins.

Erreicht eine Spalte zehn oder mehr, schreibt man ihre Einer hin und überträgt ihre Zehner in die nächste Spalte; reicht sie nicht, borgt man eins von links. Rückt eine Zahl um eine Stelle nach links, wird sie mit zehn malgenommen. So ist 47 × 23 dasselbe wie 47 × 3 plus 47 × 20, also 141 + 940 = 1081. Das kleine Einmaleins bis 9 × 9 reicht, um zwei beliebige Zahlen zu multiplizieren. Die schriftliche Division arbeitet von links, Stelle für Stelle: eine Ziffer des Ergebnisses schätzen, malnehmen, abziehen, die nächste Ziffer herunterholen.

Wie man es baut

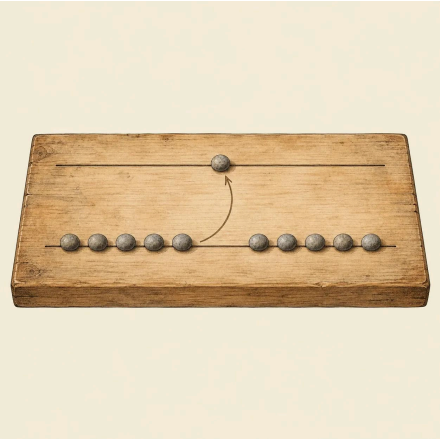
Man braucht ein ebenes Brett oder eine Fläche aus glattem Sand, Kreide oder einen Stock, etwa vierzig Kiesel, Papier und einen Bleistift.

Das Brett anlegen. Ziehen Sie vier parallele Linien im Abstand einer Handbreite: von unten Einer, Zehner, Hunderter und Tausender. Sind alle Überträge gemacht, liegen auf keiner Linie mehr als neun Steine.

Eine Zahl legen. Für 2748 legen Sie 2 Steine auf die Tausenderlinie, 7 auf die Hunderter, 4 auf die Zehner und 8 auf die Einer. Eine leere Linie steht für null.

Mit Übertrag addieren. Addieren Sie 1375, indem Sie 1, 3, 7 und 5 Steine auf dieselben Linien legen. Auf der Einerlinie liegen nun 13: Nehmen Sie zehn weg und legen Sie einen auf die Zehnerlinie, dann bleiben 3. Auf der Zehnerlinie liegen jetzt 12, also wieder übertragen, ebenso bei den Hundertern. Das Brett zeigt 4123.

Multiplizieren. Räumen Sie das Brett ab. Für 47 × 23 legen Sie dreimal 47 und machen die Überträge gleich mit: 141. Dann legen Sie noch zweimal 47, jeden Stein aber eine Linie höher als sonst; das fügt 940 hinzu. Übertragen und 1081 ablesen.



Der Übertrag auf dem Brett: Zehn Steine auf einer Linie werden gegen einen einzigen auf der nächsthöheren getauscht.

Aufs Papier bringen. Rechnen Sie dieselben Aufgaben in Spalten, den Übertrag klein über der nächsten Spalte. Jede Spalte ist eine Linie des Bretts, jede Ziffer eine Zahl von Steinen, jede 0 eine leere Linie.

Die Basis wechseln. Um 4000 Sekunden im Sechzigersystem zu schreiben, teilen Sie durch 60: 66, Rest 40. Teilen Sie 66 durch 60: 1, Rest 6. Lesen Sie den letzten Quotienten und dann die Reste rückwärts: 1, 6 und 40, also 1 Stunde, 6 Minuten und 40 Sekunden.

> **Sicherheit.** Kleine Kiesel können von Kleinkindern verschluckt werden und zum Ersticken führen. Wählen Sie Steine, die zu groß zum Verschlucken sind, oder bewahren Sie das Brett außer Reichweite auf.

Geschichte und Entwicklung

Der älteste sicher datierte Beleg ist eine Notiztafel aus Ur von 2043 v. Chr., die Gewichte im Sechzigersystem zusammenzählt. Um 1800 v. Chr. verwenden babylonische Schultafeln den Stellenwert ganz selbstverständlich. Es gab weder eine Null noch ein Zeichen, das ganze Zahlen von Brüchen trennte, und der Leser schloss aus dem Zusammenhang auf die Größenordnung. Ab etwa 700 v. Chr. setzten manche Schreiber ein Zeichen in eine leere Stelle innerhalb einer Zahl, nie an ihr Ende. Griechische Astronomen behielten die Basis 60 für Brüche bei; daher haben Stunde und Grad bis heute sechzig Minuten.

Die Maya fanden Stellenwert und Null unabhängig. Daten in der Langen Zählung erscheinen im Süden Mexikos ab dem 1. Jahrhundert v. Chr., und Stelen in Uaxactún, datiert auf 357, schreiben leere Stellen mit einem Nullzeichen.

Unsere Ziffern stammen aus Indien. 628 bestimmte Brahmagupta die Null als eine Zahl minus sich selbst und gab Regeln für das Rechnen mit ihr, auch wenn seine Regel, null geteilt durch null sei null, falsch ist. Das 1881 bei Peschawar gefundene Bakhshali-Manuskript schreibt die Null als Punkt; drei seiner Blätter, 2017 mit der Radiokarbonmethode datiert, reichen vom 3. bis ins 10. Jahrhundert, und das Alter des Textes ist umstritten. Die älteste unbestrittene datierte Null Indiens steht in Gwalior, aus dem Jahr 876.

Im späten Mittelalter rechnete man in Europa oft noch mit Messingpfennigen auf einem linierten Tuch.

Im Bagdad des 9. Jahrhunderts schrieb al-Chwarizmi ein Buch über das indische Rechnen, das nur auf Latein erhalten ist; aus seinem Namen wurde das Wort Algorithmus. Fibonacci lernte die Ziffern in Nordafrika und lehrte sie 1202 in seinem Liber abaci. 1299 verbannte die Zunft der Geldwechsler von Florenz sie aus ihren Geschäftsbüchern, und im Norden Europas blieb das Rechenbrett bis ins 16. Jahrhundert in Gebrauch.

Kennzahlen

Stellenwert zur Basis 60

Erstmals sicher datiert in Ur 2043 v. Chr.; um 1800 v. Chr. in babylonischen Schulen üblich

Null als Zahl behandelt

Brahmagupta, Brāhmasphuṭasiddhānta, 628 n. Chr.

Älteste unbestrittene datierte Null in Indien

Inschrift von Gwalior, 876, in den Zahlen 270 und 50

Null der Maya

Nullzeichen auf Stelen von Uaxactún, datiert auf 357

Liber abaci

Fibonacci, Pisa, 1202

Quellen

1. Bases, positions and computations (Chemla, 2025) · Philosophical Transactions of the Royal Society B https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12536272/
2. On the Alleged Counting with Sexagesimal Place Value Numbers in Mathematical Cuneiform Texts from the Third Millennium B.C. (Friberg, 2005) · Cuneiform Digital Library Journal https://cdli.earth/articles/cdlj/2005-2
3. A history of Zero · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Zero/
4. Babylonian numerals · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Babylonian_numerals/
5. Indian numerals · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Indian_numerals/
6. Brahmagupta · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Brahmagupta/
7. Carbon dating finds Bakhshali manuscript contains oldest recorded origins of the symbol 'zero' · Gardens, Libraries and Museums, University of Oxford https://www.glam.ox.ac.uk/node/218481
8. The Bakhshālī Manuscript: A Response to the Bodleian Library's Radiocarbon Dating (Plofker, Keller, Hayashi, Montelle, Wujastyk, 2017) · History of Science in South Asia https://journals.library.ualberta.ca/hssa/index.php/hssa/article/view/22
9. The use of Zero as a placeholder by the Maya (J. G. Atkinson) · Mexicolore https://www.mexicolore.co.uk/maya/home/the-maya-and-zero/1000
10. The Calendar Inscriptions · Archaeology Magazine, Archaeological Institute of America https://archaeology.org/issues/november-december-2012/collection/calendar-inscriptions/
11. Arabic numerals · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/HistTopics/Arabic_numerals/
12. Fibonacci · MacTutor History of Mathematics, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Fibonacci/
13. The mathematician Fibonacci, or how the number 7 came to Europe · Swiss National Museum https://blog.nationalmuseum.ch/en/2020/03/the-mathematician-fibonacci-or-how-the-number-7-came-to-europe/

Fakten geprüft am 2026-10-14

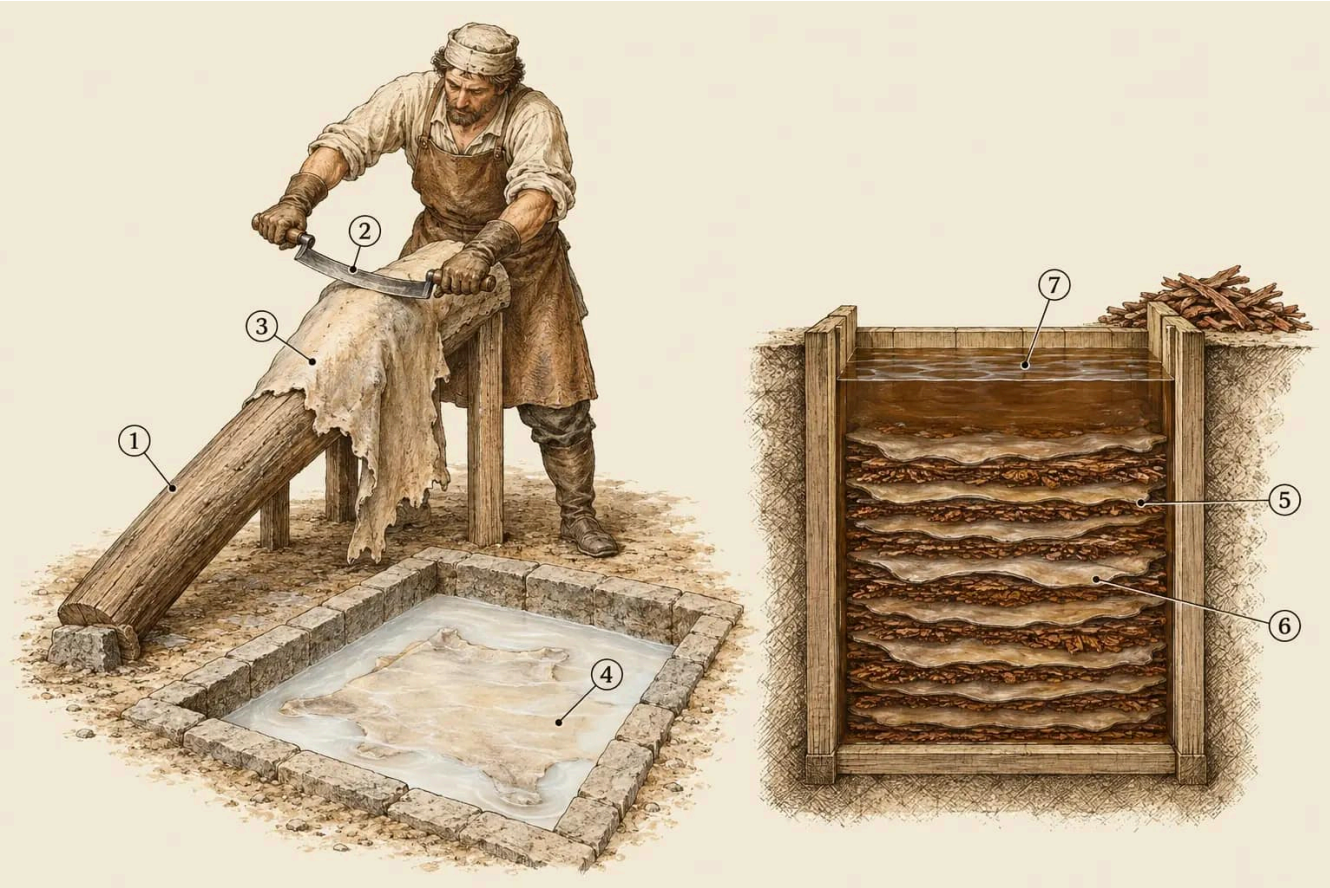
Ledergerbung

Rohhaut, Eichenrinde und monatelange Grubengerbung

um 1.500 v. Chr. · Antike · Sesshaftigkeit

Erfordert: Steinwerkzeuge (S. 5), Beherrschung des Feuers (S. 9)

Führt zu: Kummet (S. 180), Kolbenpumpe (S. 164)



1 Gerberbaum 2 Zweigriffiges Schabmesser 3 Haut beim Enthaaren und Entfleischen 4 Kalkäscher
5 Schicht gemahlener Eichenrinde 6 Haut in der Lohgrube 7 Lohbrühe

Das Gerben macht aus roher Tierhaut, die nass rasch fault und trocken hart wie Holz wird, ein Leder, das geschmeidig bleibt und der Fäulnis weit besser widersteht. Bei der Grubengerbung wird die Haut von Haaren und Fleisch befreit und dann monatelang in Wasser mit gemahlener Eichenrinde gelagert, deren Gerbstoffe sich an die Fasern binden.

Was es ist

Eine frische Haut besteht vor allem aus Wasser und Kollagen, einem Eiweiß, das ein dichtes Fasergeflecht bildet. Bei warmem Wetter beginnt sie nach wenigen Tagen zu faulen. Trocknet sie vorher, wird sie zu Rohhaut, hart und hornig, die im Wasser weich wird und fault, wenn sie nass bleibt.

Leder ist eine Haut, deren Fasern so verändert wurden, dass sie beidem widersteht. Es kann nass werden und wieder trocknen, mit weit geringerer Gefahr, zu faulen oder steif zu werden, es lässt sich schneiden, nähen und formen, und trocken gelagert hält es Jahrhunderte. Schuhe, Geschirre, Eimer und Blasebälge wurden daraus

gemacht. Jäger machten Felle mit Fett und Rauch weich, später nahm man Alaun, und heute wird das meiste Leder mit Chromsalzen gegerbt. Diese Tafel zeigt das Verfahren, das in Europa und am Mittelmeer rund zweitausend Jahre lang üblich war: die pflanzliche Gerbung mit Rinde, in Gruben.

Leder im Schnitt, vergrößert: oben der glatte Narben, darunter das Geflecht der Kollagenfasern. Daneben rohe Haut mit Haar.

Wie es funktioniert

Viele Pflanzen speichern Gerbstoffe, bittere Verbindungen, die sie vor Insekten und Pilzen schützen. Eichenrinde ist reich daran, ebenso Kastanienholz, Sumachblätter, Eichengallen und Akazienschoten. Gemahlene Rinde, in Wasser eingeweicht, ergibt eine braune Flüssigkeit, die Gerber Lohbrühe nannten.

In dieser Brühe dringen die Gerbstoffmoleküle zwischen die Kollagenfasern einer gereinigten Haut und lagern sich an vielen Stellen an. So umhüllt, verkleben die Fasern beim Trocknen nicht mehr, und Bakterien bauen sie viel langsamer ab. Aus der Haut wird festes, braunes Leder.

Der Gerbstoff wandert von außen nach innen. Eine starke Brühe gleich zu Beginn würde die äußeren Schichten verschließen und einen rohen Kern zurücklassen. Deshalb kamen die Häute zuerst in schwache, schon gebrauchte Brühe und dann über Wochen und Monate in immer stärkere.

Zuerst muss die Haut aufgeschlossen werden. Kalkwasser oder eine Lauge aus Holzasche lässt sie quellen, lockert die Haarwurzeln und löst einen Teil des Fetts und der weichen Eiweiße. Danach lassen sich Haare und Oberhaut abschaben und die Fleischseite säubern, sodass der Gerbstoff von beiden Seiten eindringen kann.

Bauanleitung

Hier in Grundzügen das traditionelle Rindenverfahren der Gerbereien, übertragen auf eine einzelne Kuhhaut; es ist kein erprobtes Rezept. Rechnen Sie mit fast einem Jahr. Sie brauchen die Haut eines gesunden Tieres bekannter Herkunft, dichte Bottiche oder Fässer, Kalkhydrat oder Holzasche, viel getrocknete Eichenrinde, einen hölzernen Gerberbaum und ein stumpfes Schabmesser mit zwei Griffen.

Weichen und äschern. Eine gesalzene Haut ein bis zwei Tage in sauberem Wasser weichen, bis sie schlaff ist, dann in Wasser mit Kalkhydrat oder Aschenlauge legen und täglich umrühren. Die Haut ist so weit, wenn sich die Haare mit dem Daumen herausschieben lassen.

Enthaaren und entfleischen. Die Haut mit der Haarseite nach oben über den schrägen Baum legen und das stumpfe Messer vom Körper weg schieben, um die Haare abzustreifen. Umdrehen und die Fleischseite von Fett und Häuten befreien. Den Kalk in mehreren Wasserbädern so gut wie möglich auswaschen, denn Kalkreste in der Haut verderben die Gerbung; die schwache, leicht saure Brühe des nächsten Schritts nimmt den Rest auf.

Rinde vorbereiten. Gefällte Eichen im Frühjahr schälen, die Rinde trocknen, mahlen und einige Tage in Wasser ziehen lassen.

Eichenrinde wird im Frühjahr geschält, wenn der Saft sie vom Holz löst.

In der Grube gerben. Die Haut zuerst in schwache Brühe legen und einige Wochen lang täglich bewegen. Dann flach oder gefaltet zwischen zwei Schichten gemahlener Rinde in einen Bottich legen und mit stärkerer Brühe bedecken. Gerbereien stapelten so viele Häute in einer Grube. Rinde und Brühe alle paar Monate erneuern. Bei J & F J Baker in Devon, der letzten traditionellen Eichenlohgerberei Großbritanniens, liegen die Häute drei Monate in der Brühe und weitere neun Monate mit Rinde geschichtet. Zur Probe einen Span aus der dicksten Stelle schneiden: Das Leder ist gar, wenn das Braun ganz durchgedrungen ist und in der Mitte kein heller Streifen bleibt.

Trocknen und fetten. Ausspülen, langsam im Schatten trocknen lassen und Öl oder Talg einarbeiten, solange das Leder noch feucht ist.

> **Sicherheit.** Kalk und Aschenlauge sind ätzend und können Haut und Augen verätzen. Tragen Sie dichte Handschuhe, Schutzbrille und Stiefel, und verwenden Sie gelöschten Kalk statt Branntkalk, der sich mit Wasser heftig erhitzt. Spritzer auf der Haut sofort mit viel Wasser abspülen; gelangt Kalk ins Auge, ununterbrochen mit sauberem Wasser spülen und sofort ärztliche Hilfe holen. Rohe Häute können Milzbrandsporen tragen. Sie dringen durch Schnitte ein oder werden mit Staub eingeatmet und verursachen schwere Erkrankungen, und man sieht einer Haut nicht an, ob sie belastet ist. Nur Häute von untersuchten Tieren bekannter Herkunft verwenden, nie von verendet aufgefundenen Tieren, Wunden abdecken, trockene Häute nicht schütteln oder ausklopfen, Hände und Kleidung nach der Arbeit waschen. Bei Verdacht auf eine Ansteckung oder wenn nach der Arbeit mit Häuten eine Wunde, Fieber oder Atemnot auftritt, sofort zum Arzt gehen und den Umgang mit Häuten erwähnen. Kalk- und Lohbrühen verschmutzen Gewässer: In dichten Bottichen weit entfernt von Brunnen, Quellen und Bächen halten und verbrauchte Brühe nie auf den Boden, in die Kanalisation oder in Gewässer gießen, sondern fachgerecht entsorgen.

Geschichte und Entwicklung

Lange vor den Lohgruben wurden Felle gespannt, geschabt, mit Fett bearbeitet und geräuchert.

Felle wurden lange vor der Gerbung bearbeitet. In vielen Weltgegenden arbeiteten Jäger Hirn oder andere Fette in eine geschabte Haut ein und räucherten sie dann, damit sie nass werden konnte, ohne hart zu werden. Ötzi, der um 3300 v. Chr. in den Alpen starb, trug Felle von Ziege, Schaf, Hirsch und Kalb, und ein Schuh aus der Höhle Areni-1 in Armenien, datiert auf 3627–3377 v. Chr., besteht offenbar aus Rindsleder. Wie beide behandelt wurden, ist unsicher.

Die pflanzliche Gerbung ist schwer zu datieren: Wie ein antikes Leder behandelt wurde, zeigt nur die chemische Analyse, und Fachleute deuten die Ergebnisse unterschiedlich. Carol van Driel-Murray weist darauf hin, dass Leder der Bronzezeit meist mit Fett, Öl oder Rauch behandelt war. Doch Analysen ägyptischer Leder im Metropolitan Museum, 2017 veröffentlicht, fanden Pflanzengerbstoffe in Objekten des Mittleren oder Neuen Reichs, etwa zwischen 2000 und 1100 v. Chr. Der griechische Botaniker Theophrast schrieb um 300 v. Chr. über Gerbpflanzen, und in Nordwesteuropa kommt gegerbtes Leder mit der römischen Eroberung. In Pompeji arbeitete eine Gerberei mit fünfzehn zylindrischen Becken noch, als der Ausbruch von 79 n. Chr. sie verschüttete.

Die Weißgerbung mit Alaun, die ein Mineralsalz statt Gerbstoff nutzt, lieferte ein helles, weiches Leder, das für Handschuhe geschätzt wurde; Wasser spült das Alaun jedoch heraus, und die Haut kann beim Trocknen wieder hart werden. Die Grubengerbung änderte sich kaum bis zum Ende des 19. Jahrhunderts, als Chromsalze die Arbeit

von Monaten auf Tage verkürzten. Chromgerbung ist ein Industrieverfahren mit giftigen Abfällen und nichts für zu Hause. Lohgares Leder wird bis heute für Sättel, Gürtel und Schuhsohlen hergestellt.

Kennzahlen

Dauer in den Gruben

Rund 12 Monate in einer noch arbeitenden englischen Eichenlohgerberei; 1810 bei schweren Ochsenhäuten 11 bis 18 Monate, manchmal 2 Jahre

Ältester gefundener Lederschuh

Höhle Areni-1, Armenien, 3627–3377 v. Chr.; wie das Leder behandelt wurde, ist unbekannt

Gerberei von Pompeji

15 zylindrische Becken, in Betrieb bis zum Ausbruch von 79 n. Chr.

Äschern

Einige Tage für Ochsen- und Kuhhäute, zwei bis drei Wochen für Kalbfelle (Praxis um 1810)

Älteste in Leder nachgewiesene Pflanzengerbstoffe

Ägyptische Objekte des Mittleren oder Neuen Reichs, etwa 2000–1100 v. Chr. (Analyse veröffentlicht 2017)

Quellen

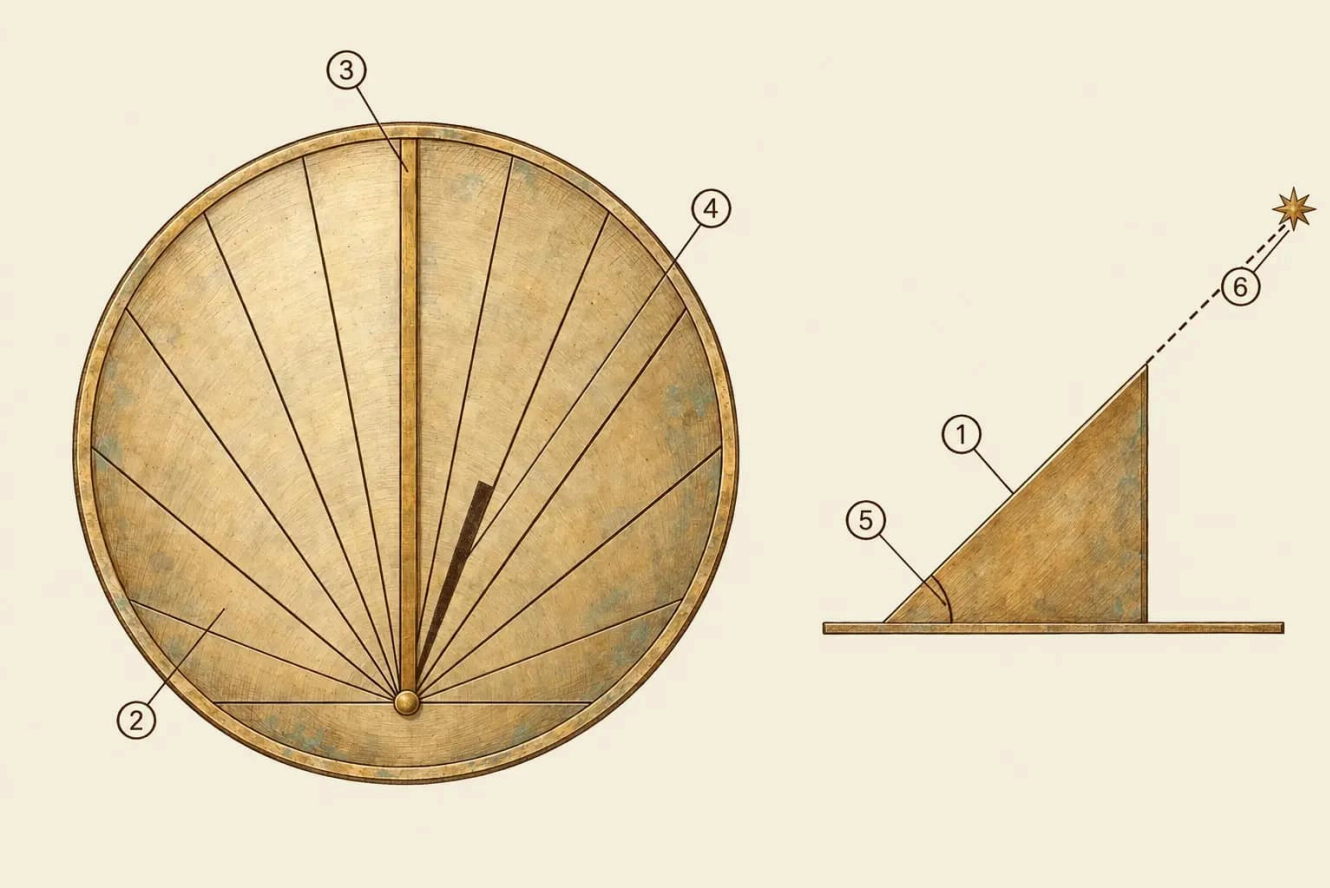
1. Tanning (Encyclopaedia Britannica, 4th edition, 1810) · Encyclopaedia Britannica, transcribed by Jim Clifford, University of Saskatchewan https://jimclifford.ca/early_encyclopedia_britannica/articles/1810/eb_4th_1810_020179.html
2. The Process · J & F J Baker & Co., oak bark tannery, Colyton https://www.jfjbaker.co.uk/the-process
3. Hide Products · Sean Manning, Book and Sword (after C. van Driel-Murray) https://www.bookandsword.com/?p=10459
4. First Direct Evidence of Chalcolithic Footwear from the Near Eastern Highlands (Pinhasi et al., 2010) · PLoS ONE https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0010984
5. Evidence of the use of vegetable tannins in leather tanning in the Middle Kingdom/New Kingdom of ancient Egypt (Elnaggar, 2017) · ICOM-CC Leather and Related Materials Working Group Newsletter https://www.icom-cc.org/dlfile.aspx?file=https://www.icom-cc.org/docs/content/ICOMCC-LRM-Newsletter-june-2017.pdf
6. The large tannery of Pompeii: from restoration to valorisation · Archaeological Park of Pompeii https://pompeiisites.org/en/comunicati/the-large-tannery-of-pompeii-from-restoration-to-valorisation-a-positive-example-of-public-and-private-sector-collaboration/
7. Skins & hides: introduction · Lowimpact.org https://www.lowimpact.org/categories/skins-hides
8. Leather terminology: tawing · Popov Leather https://popovleather.com/pages/leather-terminology-tawing
9. Anthrax: people at increased risk (animal products) · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/anthrax/animal-products/products.html
10. Hydrated Lime, Safety Data Sheet CASDS06 · Cement Australia https://cementaustralia.com.au/sites/default/files/2025-02/CASDS06_Hydrated_Lime.pdf
11. Clothing of the Iceman · South Tyrol Museum of Archaeology https://www.iceman.it/en/clothing/

Fakten geprüft am 2026-10-13

Sonnenuhr

Die Zeit am Schatten ablesen

um 1.500 v. Chr. · Antike · Sesshaftigkeit



1 Polstab (die schattenwerfende Kante) 2 Zifferblatt 3 Mittagslinie 4 Schatten 5 Winkel gleich der geografischen Breite 6 Himmelspol

Eine Sonnenuhr zeigt die Zeit am Schatten, den die Sonne auf eine markierte Fläche wirft. Die ältesten erhaltenen Stücke stammen aus dem Ägypten des 15. Jahrhunderts v. Chr., und bis sich im Spätmittelalter die Räderuhr verbreitete, war sie das wichtigste Mittel, den Tag einzuteilen.

Was es ist

Eine Sonnenuhr ist ein Instrument, das die Tageszeit an der Lage eines Schattens anzeigt. Ein Stab oder ein Blatt, der Gnomon, steht über einer Fläche mit eingezeichneten Linien, und sein Schatten wandert über sie hinweg, während die Sonne über den Himmel zieht.

Die Tafel zeigt eine waagerechte Gartensonnenuhr für 45° Breite, von oben gesehen, daneben den Gnomon von der Seite. Seine schräge Kante, der Polstab, zielt auf den Himmelspol. Dadurch sind die Stunden das ganze Jahr über gleich lang.

Wie es funktioniert

Die Erde dreht sich einmal am Tag um eine Achse, die auf der Nordhalbkugel fast genau auf den Polarstern zeigt. Vom Boden aus gesehen dreht sich die Sonne um dieselbe Achse, und zwar gleichmäßig um 15° pro Stunde. Ein Stab, der parallel zu dieser Achse steht, liegt also im Mittelpunkt des täglichen Sonnenkreises, und die Ebene durch Stab und Sonne dreht sich zu jeder Jahreszeit im selben gleichmäßigen Takt. In der Praxis wird der Polstab nach Norden geneigt (auf der Südhalbkugel nach Süden), und zwar um einen Winkel, der der geografischen Breite entspricht: in Berlin etwa 52,5°, in München 48,1°.

Bei einer waagerechten Sonnenuhr schneidet diese sich drehende Ebene eine flache Platte. Der Schatten wandert darauf ungleichmäßig, deshalb stehen die Stundenlinien nicht in gleichen Abständen. Für den Winkel zwischen Mittagslinie und Stundenlinie gilt eine einfache Regel: Sein Tangens ist gleich dem Sinus der Breite mal dem Tangens von 15° je Stunde Abstand zum Mittag. Bei 45° liegen die Linien für eine bis sechs Stunden nach Mittag bei etwa 11°, 22°, 35°, 51°, 69° und 90°. Um den Mittag drängen sie sich zusammen, gegen sechs Uhr rücken sie auseinander; die Sechsuhrlinie steht rechtwinklig zur Mittagslinie.

Eine Sonnenuhr zeigt die wahre Ortszeit, nicht die Zeit einer Armbanduhr. Die Uhrzeit richtet sich nach dem Mittelmeridian der Zeitzone, bei der Mitteleuropäischen Zeit 15° Ost. Für jedes Grad Länge westlich davon geht die Sonnenuhr 4 Minuten nach, für jedes Grad östlich 4 Minuten vor. Weil die Erdbahn eine Ellipse ist und die Erdachse geneigt steht, eilt die Sonne außerdem im Lauf des Jahres bis zu etwa 16 Minuten vor oder nach: Das ist die Zeitgleichung, die oft in einer kleinen Tabelle neben der Uhr steht. Im Sommer kommt noch eine Stunde Sommerzeit hinzu.

Ägyptische Schattenuhr: Morgens zeigte der Querbalken nach Osten, mittags wurde das Gerät umgedreht.

Wie man sie baut

Man braucht eine ebene Platte aus Schiefer, Stein, Hartholz oder Metall von etwa 30 cm, ein dünnes Dreieck aus Messing oder Aluminium als Gnomon, einen Winkelmesser, ein Lineal, eine Wasserwaage und einen Taschenrechner. Die folgenden Schritte gelten für die Nordhalbkugel; südlich des Äquators liegt der Mittelpunkt nahe dem Nordrand, und der Polstab steigt nach Süden an.

Die Stundenlinien zeichnen. Lesen Sie Ihre geografische Breite auf ein Zehntelgrad genau von einer Karte ab. Markieren Sie den Mittelpunkt der Uhr nahe dem Südrand der Platte und ziehen Sie von dort die Mittagslinie bis zum gegenüberliegenden Rand. Berechnen Sie für jede Stunde den Winkel nach der obigen Regel und tragen Sie die Linie zu beiden Seiten der Mittagslinie ab: die Vormittagsstunden im Westen, die Nachmittagsstunden im Osten. Die Sechsuhrlinien zeichnen Sie direkt im rechten Winkel, denn dort versagt die Formel; diese einfache Uhr zeigt die Stunden von sechs bis achtzehn Uhr.

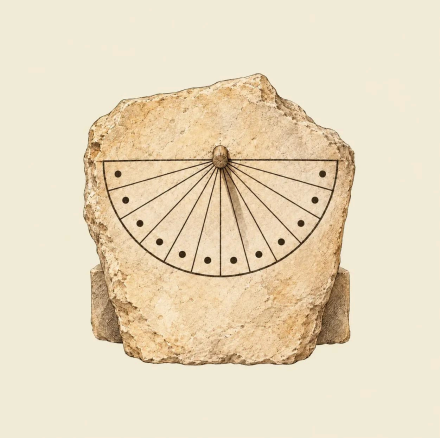
Den Gnomon zuschneiden. Schneiden Sie ein rechtwinkliges Dreieck zu, dessen spitzer Winkel Ihrer Breite entspricht. Befestigen Sie es senkrecht auf der Mittagslinie, die Spitze im Mittelpunkt, sodass die schräge Kante nach Norden ansteigt. Ist das Blatt dicker als zwei, drei Millimeter, rücken Sie die beiden Hälften des Zifferblatts um diese Dicke auseinander: Die Vormittagslinien beginnen an der einen Fläche, die Nachmittagslinien an der anderen.

Geografisch Nord finden. Ein Kompass zeigt nach magnetisch Nord, das um mehrere Grad von geografisch Nord abweichen kann. Stellen Sie an einem sonnigen Tag einen senkrechten Stab auf ebenen Boden, markieren Sie am Vormittag die Spitze seines Schattens und ziehen Sie durch diese Marke einen Kreis um den Fuß des Stabes. Markieren Sie am Nachmittag die Stelle, an der die Schattenspitze den Kreis wieder berührt. Die Verbindungslinie der beiden Marken verläuft von Ost nach West, wobei die Vormittagsmarke im Westen liegt. Wer auf der Vormittagsmarke steht und zur Nachmittagsmarke blickt, hat Norden zur Linken. Das Ergebnis ist nur angenähert, weil sich die Sonnenbahn im Lauf des Tages leicht verschiebt; am genauesten ist es um die Sonnenwenden.

Die Uhr aufstellen. Setzen Sie sie waagerecht auf einen Sockel, die Mittagslinie in Nord-Süd-Richtung und den Gnomon nach Norden ansteigend.

> **Sicherheit.** Schauen Sie nie direkt in die Sonne, auch nicht kurz, und niemals durch ein Fernglas oder eine Linse: Die Augen nehmen dabei schmerzlos und oft dauerhaft Schaden. Entgraten Sie die Kanten eines Metallgnomons und stellen Sie die Uhr so auf, dass niemand auf das Blatt fallen kann.

Geschichte und Entwicklung



Auf einen Kalksteinsplitter gemalte Sonnenuhr, 2013 im Tal der Könige gefunden und ins 13. Jahrhundert v. Chr. datiert.

Die ältesten erhaltenen Sonnenuhren sind ägyptische Schattenuhren aus der Regierungszeit Thutmosis' III. (etwa 1479 bis 1425 v. Chr.). Es sind L-förmige Steinleisten: Morgens zeigte der erhöhte Querbalken an einem Ende nach Osten und warf seinen Schatten auf Marken entlang der Leiste, mittags drehte man das Gerät nach Westen. 2013 fand ein Team der Universität Basel im Tal der Könige, auf dem Boden einer Arbeiterhütte, eine andere Art von Sonnenuhr: einen flachen Kalksteinsplitter mit einem schwarzen Halbkreis in zwölf Feldern und einem Loch in der Mitte für einen Stift.

Die griechische Überlieferung schreibt Anaximander von Milet um 560 v. Chr. zu, den Gnomon nach babylonischem Vorbild in Griechenland eingeführt zu haben. Griechen und Römer meißelten Halbkugeluhren, steinerne Schalen, deren Linien die Tageslichtzeit in zwölf Teile gliederten. Diese Stunden waren ungleich lang: Eine Sommerstunde dauerte länger als eine Winterstunde. Plinius der Ältere nennt für die erste öffentliche Sonnenuhr Roms zwei Daten, 293 und 263 v. Chr. Die zweite war im Ersten Punischen Krieg aus Catania auf Sizilien geholt worden. Da sie für Sizilien berechnet war, ging sie in Rom etwas falsch, diente aber dennoch 99 Jahre, bis man 164 v. Chr. eine genauere daneben aufstellte.

Im 8. Jahrhundert empfahl der englische Mönch Beda Venerabilis Sonnenuhren, die die Gebetsstunden anzeigten, und viele mittelalterliche Kirchen trugen eine einfache eingeritzte Sonnenuhr auf einem Stein ihrer Südwand. Ein Polstab parallel zur Erdachse liefert das ganze Jahr über gleich lange Stunden. Der Astronom Ibn asch-Schatir baute 1371 eine solche Uhr für die Umayyaden-Moschee in Damaskus, und europäische Sonnenuhren nutzen das Prinzip spätestens seit 1446. Räderuhren verbreiteten sich in Europa ab dem 14. Jahrhundert, gingen aber noch lange ungenau und wurden nach der Sonnenuhr gestellt.

Eine Kratzsonnenuhr: Ein Stift im mittleren Loch warf seinen Schatten auf die Linien darunter.

Kennzahlen

Älteste erhaltene Sonnenuhren
Ägypten, Regierungszeit Thutmosis' III. (etwa 1479 bis 1425 v. Chr.)

Scheinbare Bewegung der Sonne
15° pro Stunde um den Himmelspol

Neigung des Polstabs
Gleich der geografischen Breite des Ortes (in Berlin etwa 52,5°)

Zeitgleichung
Die Sonne geht im Lauf des Jahres bis zu etwa 16 Minuten vor oder nach

Quellen

1. Ancient sundials · North American Sundial Society https://sundials.org/index.php/all-things-sundial/ancient-sundials?start=9
2. How sundials work · British Sundial Society https://sundialsoc.org.uk/all-about-sundials/how-sundials-work/
3. Pliny the Elder, Natural History, book 7 (7.212-215 on Rome's first sundials) · Attalus.org (translation) https://www.attalus.org/pliny/hn7c.html
4. Monumental Timekeepers (David Rooney) · Lapham's Quarterly https://www.laphamsquarterly.org/node/11636
5. Sundial · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Sundial
6. History of sundials · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_sundials
7. General Solar Position Calculations · NOAA Global Monitoring Laboratory https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/solareqns.PDF
8. The Sundial Primer: Horizontal Sundial (Carl Sabanski) · The Sundial Primer https://mysundial.ca/tsp/horizontal_sundial.html

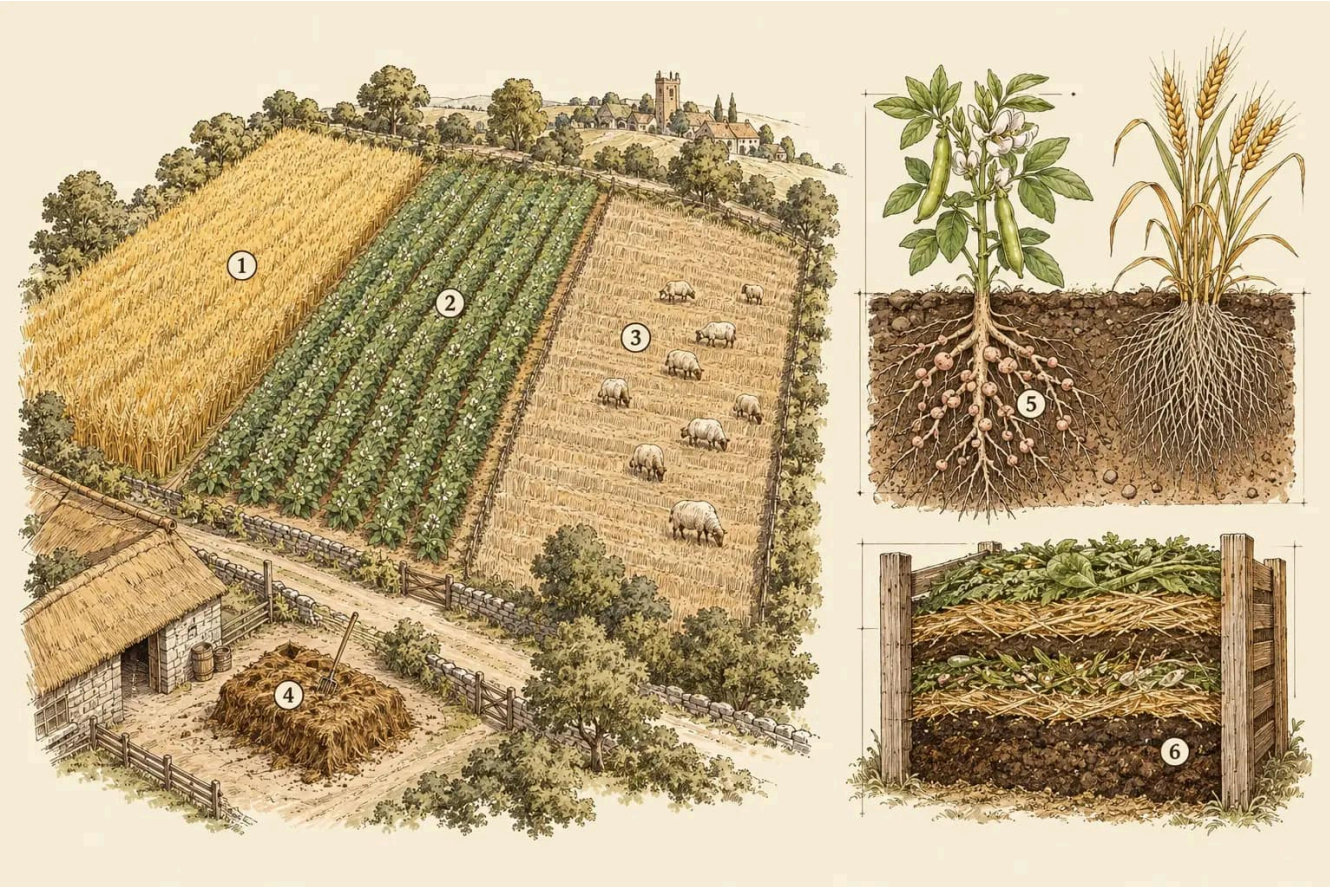
Fakten geprüft am 2026-10-12

Fruchtfolge

Den Acker Jahr für Jahr fruchtbar halten

um 700 v. Chr. · Antike · Sesshaftigkeit

Erfordert: Pflug (S. 61)



1 Winterweizen 2 Bohnen und Erbsen 3 Brache mit weidenden Schafen 4 Misthaufen 5 Wurzelknöllchen einer Ackerbohne 6 Schichten eines Komposthaufens

Bei der Fruchtfolge wechselt von Jahr zu Jahr, was auf einem Feld wächst; Brache, Mist und Hülsenfrüchte geben dem Boden zurück, was ihm die Ernten nehmen. So bleibt der Acker fruchtbar und die Schädlinge jeder Kultur verhungern; in Europa führte der Weg von einem Ruhejahr in jedem zweiten Jahr zu Fruchtfolgen ganz ohne Brache.

Was es ist

Trägt ein Feld Jahr für Jahr dieselbe Pflanze, bringt es meist weniger, wenn man ihm die entzogenen Nährstoffe nicht zurückgibt. Die Wurzeln holen dieselben Nährstoffe aus demselben Boden, und die Schädlinge dieser Kultur finden jedes Frühjahr ihren Wirt wieder. Die Fruchtfolge wechselt nach einem festen Plan, was auf jeder Fläche wächst.

Dazu gehören die Brache, eine Saison ohne Anbau; Mist und Kompost, die Dung und Pflanzenreste in den Boden zurückbringen; und Hülsenfrüchte wie Bohne, Erbse oder Klee, die Stickstoff aus der Luft beisteuern. Die Tafel

zeigt einen Hof mit drei Feldern und seinem Misthaufen. Rechts ist die Wurzel einer Ackerbohne neben der einer Weizenpflanze gezeichnet, darunter ein aufgeschnittener Komposthaufen.

Wie es funktioniert

Außer Wasser und Luft brauchen Pflanzen Mineralstoffe aus dem Boden, drei davon in großer Menge. Stickstoff baut Eiweiß und Blätter auf; Getreide, dem er fehlt, wird gelb. Phosphor dient Wurzeln und Samen. Kalium hält das Wasser in den Zellen und die Halme aufrecht. Jeder Sack Getreide, der den Hof verlässt, nimmt etwas von allen dreien mit.

Stickstoff wird als Erstes knapp, obwohl die Luft zu rund vier Fünfteln aus Stickstoffgas besteht: Pflanzen können dieses Gas nicht nutzen. Hülsenfrüchte schaffen es mit Hilfe von Bodenbakterien, den Rhizobien. Diese siedeln sich in kleinen Verdickungen der Wurzeln an, den Knöllchen, und wandeln Luftstickstoff in Ammoniak um; die Pflanze baut daraus Eiweiß und versorgt die Bakterien im Gegenzug mit Zucker. Verrotten Wurzeln und Stängel oder wird der ganze Bestand grün untergepflügt, kommt ein großer Teil dieses Stickstoffs der nächsten Kultur zugute. Ein gut etablierter Rot- oder Weißklee kann etwa 85 bis 225 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr binden, ein kurzer oder schwacher Bestand deutlich weniger.

Knöllchen an einer Erbsenwurzel. Ein aktives Knöllchen ist innen rosa oder rot.

Phosphor und Kalium kommen nicht aus der Luft; sie kehren mit Mist, Kompost, Harn und Asche zurück.

Der Wechsel bremst auch Krankheiten und Schädlinge, die nur eine Pflanzenfamilie befallen: Fehlt ihr Wirt einige Jahre, gehen die meisten zurück. Manche halten sich viel länger. Die Dauersporen der Kohlhernie, die Kohl und Rüben befällt, bleiben bis zu 20 Jahre im Boden, die Sklerotien der Mehlkrankheit der Zwiebel mindestens 15; auf befallenem Land baut man ihre Wirtspflanzen besser gar nicht mehr an. Die Brache liefert keinen Stickstoff, erlaubt aber, das Unkraut unterzupflügen, und dient als Weide.

So wird es gemacht

Werkzeug: Spaten oder Pflug, Grabegabel und Bretter für einen Behälter.

Das Land aufteilen. Vier gleich große Beete oder Parzellen abstecken und die Kulturen in vier Gruppen ordnen, verwandte Pflanzen zusammen: Hülsenfrüchte (Erbsen, Bohnen); Kohl, Grünkohl, Rüben und Radieschen; Kartoffeln und Tomaten; Zwiebeln und Wurzelgemüse (Lauch, Möhren, Rote Bete, Pastinaken).

Jede Gruppe jährlich ein Beet weiterrücken. Eine übliche Reihenfolge: Hülsenfrüchte, Kohl, Kartoffeln, dann Zwiebeln und Wurzeln. Der Kohl folgt den Hülsenfrüchten und nutzt den Stickstoff, den sie hinterlassen.

Gründüngung auf leerem Boden säen. Nach einer frühen Ernte eine Gründüngung säen und sie, solange sie noch weich ist, einige Wochen vor der nächsten Kultur einarbeiten. Klee, Wicke und Ackerbohne sind Hülsenfrüchte: Man sät sie dort, wo als Nächstes Kohl folgt, nicht dort, wo Erbsen und Bohnen anstehen.

Den Komposthaufen aufsetzen. Auf offenem Boden im Halbschatten einen Behälter von etwa einem Meter Kantenlänge aufstellen. Schichten von rund 15 cm aus weichem, grünem Material (Gras, Gemüseabfälle, frischer Mist von Weidetieren) und trockenem, braunem Material (Stroh, Laub, Karton) abwechseln, mindestens so viel Braun wie Grün. Ab und zu etwas Erde dazugeben; den Haufen feucht halten wie einen ausgedrückten Schwamm.

Ein gut arbeitender Haufen dampft an einem kalten Morgen.

Umsetzen und die Wärme prüfen. Ein langes Thermometer in die Mitte stecken. Ein Haufen, der mehrere Tage 55 °C oder mehr hält, tötet viele Keime und Unkrautsamen, doch so heiß wird nur der Kern: Jedes Mal, wenn er abkühlt, das Äußere mit der Gabel nach innen setzen und den Haufen wieder warm werden lassen. Der Kompost ist reif, wenn er dunkel und krümelig ist und nach Waldboden riecht, nach einigen Monaten bis über einem Jahr.

Mist mit Bedacht einsetzen. Mist von Rindern, Pferden, Schafen, Ziegen oder Geflügel im Herbst ausbringen und einarbeiten, nie auf wachsende Pflanzen.

> **Sicherheit.** Frischer Mist enthält Keime wie *E. coli* und Salmonellen. Mist, der gut verrottet aussieht, und Gartenkompost, der Mist enthält, können sie noch tragen, weil ein Haufen im Garten nie gleichmäßig heiß wird: Beide gelten als frischer Mist. Sie werden mindestens 120 Tage vor der Ernte von Pflanzen ausgebracht, deren essbarer Teil den Boden berührt oder bei Regen und Gießen mit Erde bespritzt werden kann, etwa Salat, Möhren oder Erdbeeren, und mindestens 90 Tage vor anderen Ernten. Niemals Hunde-, Katzen-, Schweine- oder menschliche Ausscheidungen auf Gemüsebeete oder in deren Kompost geben. Nach dem Umgang mit Mist oder Kompost und vor dem Berühren von Lebensmitteln die Hände mit Seife waschen, Gemüse mit Trinkwasser waschen. Schwangere, kleine Kinder, ältere Menschen und Menschen mit geschwächtem Immunsystem sollten kein rohes Gemüse von mit Mist gedüngtem Boden essen.

Geschichte und Entwicklung

Stickstoffisotope in verkohlten Körnern aus 13 jungsteinzeitlichen Fundstätten zwischen Griechenland und Großbritannien zeigen, dass Bauern ihre Felder schon ab etwa 6000 v. Chr. düngten.

Hesiods Rat zur Brache um 700 v. Chr. gehört zu den ältesten erhaltenen Texten darüber und gibt dieser Tafel ihr Datum. Varro beschreibt 37 v. Chr., wie man auf magerem Boden Lupinen oder Bohnen sät und sie anstelle von Dung unterpflügt, sobald sie Hülsen ansetzen. Ein Jahrhundert später hält Columella untergepflügte Lupinen für so gut wie den besten Mist, bezweifelt aber, dass Bohnen, die man für ihre Samen erntet, den Boden verbessern.

In China verlangt das Qimin Yaoshu, ein um 544 n. Chr. von Jia Sixie vollendetes Handbuch des Landbaus, dass Hirsefelder jedes Jahr die Frucht wechseln, und nennt Mungbohne und Adzukibohne als beste Vorfrüchte für Hirse.

Zwischen Loire und Rhein gingen im späten 8. und im 9. Jahrhundert viele fränkische Güter von zwei Feldern, deren Hälfte jedes Jahr ruhte, zu dreien über: Wintergetreide, dann im Frühjahr gesäter Hafer, Gerste, Erbsen und Bohnen, dann Brache. Die Frühjahrssaat braucht Sommerregen, deshalb blieb das System nördlich der Alpen.

Später ersetzten Futterpflanzen die Brache. Die Norfolker Vierfelderwirtschaft des 18. Jahrhunderts, die man mit Charles Townshend verbindet, ließ Weizen, Rüben, Gerste und Klee aufeinander folgen. Der Wirtschaftshistoriker Robert Allen schreibt stickstoffbindenden Pflanzen etwa die Hälfte des Anstiegs der englischen Getreideerträge zwischen Mittelalter und Industrieller Revolution zu.

1838 stellte Jean-Baptiste Boussingault fest, dass Klee und Erbsen in einem Boden ohne organische Substanz Stickstoff gewannen, Weizen und Hafer aber nicht. 1886 führten Hermann Hellriegel und Hermann Wilfarth den Gewinn auf die Wurzelknöllchen und ihre Mikroben zurück, und 1888 isolierte Martinus Beijerinck das Bakterium.

Auf den Rüben gepfercht, fressen die Schafe die Ernte an Ort und Stelle und düngen den Boden für die folgende Gerste.

Kennzahlen

Frühe Spuren von Düngung
Jungsteinzeitliches Europa, ab etwa 6000 v. Chr. (Stickstoffisotope im Getreide)

Dreifelderwirtschaft
Frankenreich, spätes 8. und 9. Jahrhundert; Brache von der Hälfte auf ein Drittel des Landes

Rolle der Knöllchenbakterien
Hellriegel und Wilfarth, 1886; veröffentlicht 1888

Früher schriftlicher Rat zur Brache
Hesiod, Griechenland, um 700 v. Chr.

Stickstoffbindung durch gut etablierten Klee
Etwa 85–225 kg pro Hektar und Jahr

Quellen

1. Hesiod, Works and Days, lines 458–464 (trans. H. G. Evelyn-White) · Theoi Classical Texts Library https://www.theoi.com/Text/HesiodWorksDays.html
2. Varro, On Agriculture, Book I (trans. W. D. Hooper and H. B. Ash) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Varro/de_Re_Rustica/1*.html
3. Columella, On Agriculture, Book II (trans. H. B. Ash) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Columella/de_Re_Rustica/2*.html
4. Manure used by Europe's first farmers 8,000 years ago (Bogaard et al., PNAS 2013) · University of Oxford via ScienceDaily https://www.sciencedaily.com/releases/2013/07/130716134740.htm
5. Millet: Original Chinese Staple (on the Qimin Yaoshu) · Science and Technology Daily https://www.stdaily.com/web/English/2026-05/25/content_522073.html
6. Agricultural technique, in A. Verhulst, The Carolingian Economy · Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/books/carolingian-economy/agricultural-technique/BA332C43E77E49855C580F1276F12809
7. Lynn White Jr., Technology in the Middle Ages (Technology in Western Civilization, vol. 1, 1967, excerpt) · Manchester University (course reading) https://users.manchester.edu/FacStaff/SSNaragon/Kant/LP/Readings/White,%20Plow.html
8. Norfolk four-course system · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Norfolk_four-course_system
9. The Nitrogen Hypothesis and the English Agricultural Revolution: A Biological Analysis (R. C. Allen, 2008) · Journal of Economic History, Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-economic-history/article/nitrogen-hypothesis-and-the-english-agricultural-revolution-a-biological-analysis/7B2406F0F800AA11E4843EDB58D558C6
10. Utilisation biologique de l'azote de l'air : repères chronologiques · Encyclopædia Universalis https://www.universalis.fr/encyclopedie/utilisation-biologique-de-l-azote-de-l-air-reperes-chronologiques/
11. Prof. Dr. Hermann Hellriegel · Anhalt University of Applied Sciences https://www.hs-anhalt.de/en/life/bernburg/campus/history/prof-dr-herrmann-hellriegel.html
12. Is Nitrogen Fixation Oversold with Legume Cover Crops? · University of Nebraska–Lincoln, CropWatch https://cropwatch.unl.edu/2016/nitrogen-fixation-oversold-legume-cover-crops
13. Crop rotation · Royal Horticultural Society https://www.rhs.org.uk/vegetables/crop-rotation
14. Club root · Royal Horticultural Society https://www.rhs.org.uk/disease/club-root
15. Onion white rot · Royal Horticultural Society https://www.rhs.org.uk/disease/onion-white-rot
16. Aged manure is not composted manure · University of Minnesota Extension https://blog-crop-news.extension.umn.edu/2022/02/aged-manure-is-not-composted-manure.html
17. Composting · Royal Horticultural Society https://www.rhs.org.uk/soil-composts-mulches/composting
18. Composting Manure and Other Organic Materials (NebGuide G1315) · University of Nebraska–Lincoln Extension https://extensionpubs.unl.edu/publication/g1315/na/pdf/view
19. Guidelines for Using Manure on Vegetable Gardens (Bulletin 2510) · University of Maine Cooperative Extension https://extension.umaine.edu/publications/2510e/

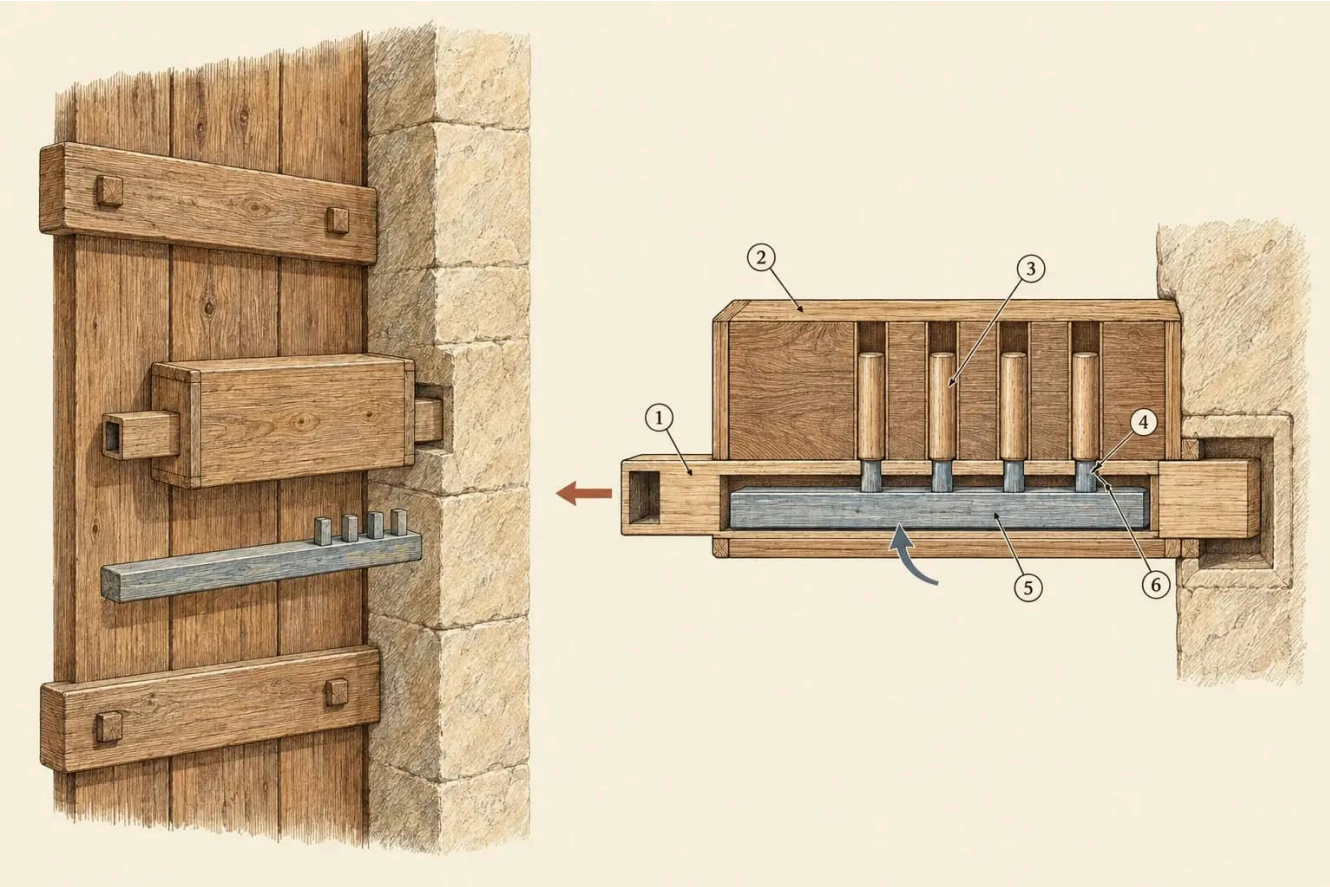
Fakten geprüft am 2026-10-14

Schloss & Schlüssel

Ein Riegel, den nur sein Schlüssel löst

um 700 v. Chr. · Antike · Sesshaftigkeit

Erfordert: Steinwerkzeuge (S. 5)



1 Riegel 2 Schlosskasten 3 Fallstifte 4 Löcher im Riegel 5 Schlüssel 6 Zapfen des Schlüssels

Ein Schloss hält einen Riegel fest, bis ein Schlüssel der richtigen Form ihn freigibt. Hölzerne Stiftschlösser waren im Alten Orient in Gebrauch, und dasselbe Prinzip, im 19. Jahrhundert verfeinert, arbeitet heute in den meisten Schließzylindern.

Was es ist

Ein Schloss hält eine Tür, einen Deckel oder eine Kette geschlossen, und ein Schlüsselschloss soll sich nur mit dem passenden Schlüssel öffnen lassen. Jedes Schlüsselschloss besteht aus einem Riegel, der verschließt, einer Sperre, die den Riegel festhält, und einem Schlüssel, dessen Form die Sperre aufhebt.

Die Tafel zeigt das hölzerne Stiftschloss, das oft ägyptisches Schloss genannt wird. Es kommt ohne Metall und ohne Feder aus und funktioniert doch schon wie ein moderner Stiftzylinder.

Wie es funktioniert

Der Schlosskasten ist ein Holzblock an der Innenseite der Tür. Durch einen Kanal in seinem unteren Teil gleitet ein vierkantiger Riegel, dessen Ende in ein Loch im Türpfosten greift. Der Riegel ist hohl, und seine obere Wand hat

eine Reihe von Löchern. Darüber hängen lose Holzstifte in senkrechten Bohrungen des Kastens. Schiebt man den Riegel vor, fallen die Stifte durch ihr eigenes Gewicht in die Löcher und sperren ihn.

Der Schlüssel ist eine lange, flache Leiste mit Zapfen, die genauso angeordnet sind wie die Löcher. Man schiebt ihn in die Höhlung des Riegels und hebt ihn an. Die Zapfen drücken die Stifte nach oben, bis ihre Unterkante mit der Oberseite des Riegels abschließt, und der Riegel lässt sich samt Schlüssel zurückziehen. Sitzt ein Zapfen falsch, bleibt mindestens ein Stift im Loch.

Spätere Schlösser sperrten den Riegel mit anderen Teilen. Ein Buntbartschloss hat feste Hindernisse, die Besatzungen, auf dem Weg des sich drehenden Schlüssels, und nur ein Schlüssel mit Einschnitten an den richtigen Stellen dreht sich weit genug, um den Riegel zu schieben. Ein Zuhaltungsschloss enthält einen Stapel schwenkbarer Zuhaltungen, die alle genau auf die richtige Höhe gehoben werden müssen, bevor der Riegel passieren kann.

Beim Buntbartschloss lassen die Einschnitte im Bart den Schlüssel an den festen Besatzungen vorbeidrehen.

Der moderne Stiftzylinder behält die Idee von Stiften, die der Schlüssel auf eine bestimmte Höhe heben muss. Ein Messingkern dreht sich in einem festen Gehäuse. Fünf oder sechs Stiftpaare, von kleinen Federn nach unten gedrückt, ragen über die Grenze zwischen beiden Teilen und blockieren den Kern. Die Einschnitte des Schlüssels heben jedes Paar so an, dass die Trennstelle zwischen Kernstift und Gehäusestift genau auf dieser Grenze, der Scherlinie, liegt, und der Kern dreht sich.

Wie man es baut

Ein hölzernes Stiftschloss ist ein gutes Wochenendprojekt für eine Kiste oder einen Schrank. Mit etwas Geduld öffnet man es auch ohne Schlüssel, es ist also ein Anschauungsstück.

Den Riegel bauen. Nehmen Sie eine Hartholzleiste von 40 mm Breite, 45 mm Höhe und 40 cm Länge. Fräsen Sie in die Unterseite eine Nut von 20 mm Breite und 30 mm Tiefe, vom inneren Ende bis über die Mitte hinaus, und leimen Sie darunter eine dünne Leiste, sodass ein Kanal entsteht. Die 15 mm Holz über der Nut bilden die obere Wand. Bohren Sie drei oder vier Löcher von 10 mm in unregelmäßigen Abständen hindurch.

Den Kasten bauen. Fertigen Sie einen Block mit einem vierkantigen Kanal, durch den der Riegel gleitet: vorbohren und mit dem Stechbeitel ausstemmen oder den Block aus vier Brettern um den Riegel herum verleimen. Bohren Sie bei geschlossenem Riegel senkrecht durch den Block bis in die Riegellöcher, damit alles fluchtet. Schneiden Sie für jedes Loch einen Stift aus 10-mm-Rundholz und leimen Sie nahe seinem oberen Ende einen kurzen Bund aus dickerem Rundholz an: So fällt er durch die obere Wand des Riegels und nicht weiter. Sein unteres Ende muss bündig mit der Decke des Kanals abschließen, sonst geht der Schlüssel nicht hinein. Weiten Sie die Bohrungen im Kasten oben für den Bund auf und leimen Sie einen Deckel auf, damit die Stifte im Kasten bleiben.

Den Schlüssel bauen. Hobeln Sie eine flache, etwa 10 mm dicke Leiste, die leicht im Kanal gleitet. Leimen Sie Rundholzzapfen im Abstand der Löcher ein, jeder 15 mm hoch und damit genau so hoch, wie die obere Wand dick ist; Leiste und Zapfen lassen beim Einschieben 5 mm Luft unter der Kanaldecke. Hebt man die Schlüsselleiste bis an die Decke, füllen die Zapfen die Löcher und drücken die Stifte knapp über den Riegel. Lassen Sie über den Bunden genug Platz, damit die Stifte so weit steigen können.

Einbauen und prüfen. Die Stifte fallen durch die Schwerkraft, also gehört der Kasten an eine senkrechte Fläche, etwa die Innenseite einer Schranktür, mit senkrecht hängenden Stiften; das Riegelloch wird in den Rahmen

gestemmt. Bedienen Sie das Schloss von innen oder schneiden Sie daneben eine Öffnung für die Hand. Schleifen Sie die Stifte, bis sie frei fallen, und wachsen Sie den Riegel.

> **Sicherheit.** Spannen Sie das Werkstück vor dem Sägen oder Bohren ein, halten Sie beide Hände hinter der Schneide von Stechbeiteln und tragen Sie beim Bohren oder Fräsen eine Schutzbrille. Bauen Sie ein selbst gemachtes Schloss nie an eine Tür, die im Notfall schnell aufgehen muss, etwa einen Notausgang oder ein Badezimmer.

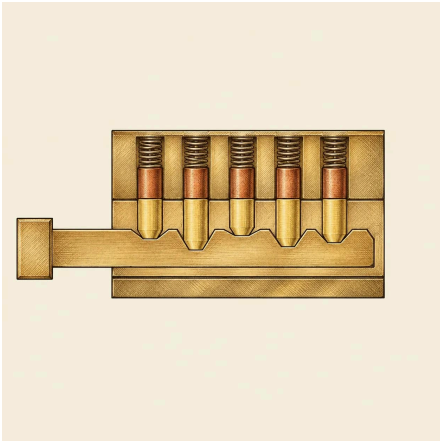
Geschichte und Entwicklung

Schlösser sind schwer zu datieren, weil Holz selten erhalten bleibt. Der französische Ausgräber Paul-Émile Botta fand im Palast des assyrischen Königs Sargon II. in Chorsabad ein Tor, das mit einem großen hölzernen Stiftschloss verschlossen war, und Austen Henry Layard barg in Ninive einen Bronzeschlüssel derselben Form. Oft heißt es, das Schloss von Chorsabad sei 4000 Jahre alt, doch der Palast stammt aus dem 8. Jahrhundert v. Chr., und der Archäologe D. T. Potts hat gezeigt, dass diese Zahl auf einen falsch gelesenen Katalog zurückgeht. Er vermutet außerdem, dass ältere mesopotamische Omentexte bereits Riegel, Stifte und Schloss benennen; dann wäre die Bauart älter als jedes erhaltene Stück. Der Name „ägyptisches Schloss“ kommt von seinem langen Gebrauch in Ägypten, wo es noch im 19. Jahrhundert alltäglich war.

Römische Schlüsselringe öffneten kleine Kästchen; die Schlitze im Bart ließen ihn an den Besatzungen im Schloss vorbei.

Griechische Autoren kannten Schlüssel mit mehreren Zähnen, und römische Schmiede fertigten das Schloss aus Eisen und den Schlüssel aus Bronze, fügten Besatzungen hinzu und bauten Vorhängeschlösser. Kleine römische Schlüssel wurden oft als Fingerringe gefertigt, wohl um Kästchen und Schmuckschatullen statt Türen zu öffnen; römische Kleidung hatte keine Taschen, und ein Schlüssel am Finger war sicher und stets zur Hand. In Colchester wurde ein Holzkästchen in einem Grab beigesetzt, in dessen Schloss der Schlüsselring noch steckte. Mittelalterliche Schlösser waren meist Buntbartschlösser, oft reich verziert, und mit einem dünnen Werkzeug leicht zu überwinden.

In England patentierte Robert Barron 1778 das doppelt wirkende Zuhaltungsschloss. Joseph Bramah ließ sich 1784 ein Zylinderschloss mit Schiebeplättchen patentieren und setzte später eine Belohnung für jeden aus, der das Exemplar in seinem Londoner Schaufenster öffnen würde; meist wird diese Herausforderung auf 1790 datiert, die im Science Museum erhaltene Tafel trägt jedoch das Datum 1801. Dem amerikanischen Schlosser Alfred Hobbs gelang das während der Weltausstellung 1851 in London, nach rund 51 Stunden Arbeit, verteilt auf 16 Tage. 1818 versah Jeremiah Chubb das Zuhaltungsschloss mit einem Detektor: Eine zu hoch gehobene Zuhaltung blockierte das Schloss und verriet den Einbruchsversuch. Abraham Stansbury erhielt 1805 in England ein Patent auf ein Stiftschloss, und Linus Yale sen. ließ sich in den 1840er-Jahren in den Vereinigten Staaten eigene Bauarten patentieren. Sein Sohn Linus Yale jr. patentierte 1861 ein Stiftschloss mit rundem Schlüssel und 1865 ein Schloss, das ein dünner, flacher Stahlschlüssel mit eingeschnittener Kante öffnet. Die meisten Schließzylinder an heutigen Türen gehen auf diese Bauart zurück.



Im Stiftzylinder bringt der Schlüssel jede Trennstelle zwischen den Stiften auf die Scherlinie.

Kennzahlen

Ältestes an Ort und Stelle gefundenes Schloss dieser Art

Palast Sargons II. in Chorsabad, Assyrien, 8. Jahrhundert v. Chr.

Bramahs Herausforderungsschloss

1784 patentiert, ab 1790 oder 1801 (je nach Quelle) mit Belohnung ausgestellt, 1851 nach rund 51 Stunden Arbeit geöffnet

Chubbs Detektorschloss

1818

Flachschlüssel für Stiftzylinder

1865 von Linus Yale jr. patentiert

Quellen

1. Lock and key in ancient Mesopotamia (D. T. Potts, Mesopotamia 25, 1990) · Università di Torino, Mesopotamia https://www.yeshiva.org.il/midrash/pdf/wiki/potts_1990_-_lock_and_key_in_ancient_mes.pdf
2. Lock and key · Encyclopedia.com (Gale) https://www.encyclopedia.com/science-and-technology/technology/technology-terms-and-concepts/lock-and-key
3. Ring (Roman bronze key ring, 547-1871) · Victoria and Albert Museum https://collections.vam.ac.uk/item/O377794/ring/
4. Challenge board for Bramah padlock, 1801 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co50474/challenge-board-for-bramah-padlock
5. Improvement in locks, US patent 48,475 (Linus Yale Jr., 1865) · Google Patents https://patents.google.com/patent/US48475A/en
6. Lock and key · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Lock_and_key
7. An Account of the Manners and Customs of the Modern Egyptians (E. W. Lane, 1836), ch. 1 · Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/ebooks/70796
8. Lock (Encyclopædia Britannica, 11th edition, 1911) · Wikisource https://en.wikisource.org/wiki/1911_Encyclop%C3%A6dia_Britannica/Lock
9. Working model of Egyptian pin lock (1966-364) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co50403/working-model-of-egyptian-pin-lock

Fakten geprüft am 2026-10-12

III

Handwerk & Städte

Töpferscheibe

Ton durch Drehen formen

um 4.000 v. Chr. · Vorgeschichte · Handwerk & Städte

Erfordert: Töpferei (S. 23)

1 Scheibenkopf 2 Tongefäß 3 Senkrechte Welle 4 Halslager 5 Schwungscheibe 6 Spurlager

Die Töpferscheibe ist eine schwere Scheibe, die sich um eine senkrechte Achse dreht, sodass der Ton in ihrer Mitte von den Händen des Töpfers rundum gleichmäßig geformt werden kann. Sie begann vor mehr als sechstausend Jahren im Vorderen Orient als langsame Drehscheibe; die schnelle Scheibe, die genug Schwung speichert, um ein Gefäß aus einem Tonklumpen zu drehen, kam später.

Was es ist

Eine Töpferscheibe ist ein runder, flacher Kopf auf einer senkrechten, frei drehenden Welle. Der Töpfer setzt einen Klumpen feuchten Ton in die Mitte, versetzt ihn in Drehung und drückt mit nassen Händen oder einem Werkzeug dagegen. Da jeder Punkt des Tons nacheinander unter den Händen vorbeiläuft, formt ein einziger gleichmäßiger Druck den ganzen Umfang auf einmal.

Es gibt zwei Arten. Die langsame Scheibe, auch Handtöpferscheibe genannt, wird mit kurzen Stößen von Hand gedreht. Mit ihr gleicht der Töpfer ein aus Tonwülsten aufgebautes Gefäß aus und vollendet den Rand. Die schnelle Scheibe dreht sich von selbst weiter, weil sie schwer ist, und sie läuft schnell genug, um ein Gefäß zu drehen: es in wenigen Minuten aus einem vollen Klumpen hochzuziehen, nur mit der Drehung und den Händen.

Beide Arten gehen ineinander über, und Archäologen unterscheiden heute die Maschine von der Formtechnik, die auf ihr angewandt wurde. Die Tafel zeigt eine Fußtöpferscheibe, eine schnelle, mit dem Fuß angetriebene Scheibe, wie sie in europäischen Werkstätten vor den Elektromotoren üblich war.

Wie es funktioniert

Die Fußscheibe hat eine einzige senkrechte Welle, meist aus Eisen. Oben trägt sie den Scheibenkopf in Hüfthöhe des sitzenden Töpfers. Nahe dem Boden trägt sie die Schwungscheibe, eine dicke, schwere Scheibe aus Holz, Stein oder Beton. Die Welle läuft in zwei Lagern: einem Halslager direkt unter dem Kopf, das sie senkrecht hält, und einem Spurlager unten, in dem ihr spitzes oder gerundetes Ende in einer Pfanne läuft und das ganze Gewicht trägt.

Der Töpfer sitzt auf einer Bank hinter der Scheibe und stößt die Schwungscheibe mit einem Fuß an. Eine schwere Scheibe braucht mehrere Stöße, bis sie läuft, doch dann speichert sie Energie und dreht sich weiter, während die Hände arbeiten. Je schwerer die Schwungscheibe ist und je mehr Gewicht am Rand sitzt, desto länger hält sie ihre Geschwindigkeit. Die meisten Töpfer drehen gegen den Uhrzeigersinn; in Japan dreht man traditionell im Uhrzeigersinn.

Das Drehen folgt einer festen Reihenfolge. Zuerst wird der Ton zentriert: mit beiden Händen gedrückt, bis er rund läuft und nicht mehr schlägt. Dann bricht der Töpfer ihn auf, indem er die Daumen in die Mitte drückt, einen Boden stehen lässt und den Ton zu einem dicken Ring auszieht. Mit einer Hand innen und einer außen zieht er die Wand hoch, mit jedem Durchgang dünner und höher. Zum Schluss wird die Form ausgebaucht oder eingezogen, der Rand geglättet und das Gefäß mit einem Draht vom Kopf abgeschnitten. Hände und Ton bleiben die ganze Zeit nass, und eine an die drehende Wand gehaltene Holzschiene glättet sie und nimmt überschüssiges Wasser ab.

Die Schritte des Drehens: zentrieren, aufbrechen, einen Zylinder hochziehen und formen.

Werkzeuge des Drehers: eine Schiene zum Glätten der Wand, ein Draht zum Abschneiden, ein Schwamm, ein spitzes Holz und eine Abdrehschlinge.

Am Ton lässt sich erkennen, wie ein Gefäß hergestellt wurde. Rillen und Spuren von Fingern und Werkzeugen auf der Innen- und Außenwand und die Art, wie der Ton im Inneren geschichtet ist, erlauben es Archäologen, ein auf der schnellen Scheibe aus dem Klumpen gedrehtes Gefäß von einem aus Wülsten aufgebauten und nur auf einer Scheibe nachgeformten zu unterscheiden. Viele frühe „scheibengedrehte“ Gefäße erweisen sich als von der zweiten Art; so lässt sich die langsame Ausbreitung des Drehens verfolgen. Auch Werkzeuge hinterlassen Spuren: Die Schiene hinterlässt ein glattes Band, und ein Draht, der unter einem noch drehenden Gefäß durchgezogen wird, ein geschwungenes, muschelartiges Muster auf dem Boden.

Wie man sie baut

Eine Fußtöpferscheibe lässt sich in der Werkstatt aus Holz, einer Stahlwelle, zwei Lagern und einer selbst gegossenen Schwungscheibe bauen. Der in den Quellen genannte Bauplan von Mother Earth News verwendet ein Gestell von etwa 75 cm (30 Zoll) Seitenlänge, das auch den Sitz trägt. Die fertige Schwungscheibe wiegt etwa 60 bis 75 kg: Lager, Nabe und Befestigungen für diese Last wählen oder einem vollständigen veröffentlichten Plan folgen.

Das Gestell bauen. Verschrauben Sie ein würfelförmiges Gestell aus Pfosten von 10 × 10 cm und Riegeln von 5 × 10 cm, mit einem Querriegel knapp unter der Oberkante für das obere Lager und einem kräftigen Riegel unten für das untere. Bringen Sie hinten ein Sitzbrett und auf der Trittseite eine Fußstütze etwa in Kniehöhe an.

Welle und Lager einbauen. Nehmen Sie eine gerade Stahlwelle von etwa 25 mm Durchmesser. Schrauben Sie ein Flanschlager flach auf den unteren Riegel, das das Gewicht trägt, und ein zweites Flanschlager flach unter eine Stütze am oberen Riegel, das die Welle senkrecht hält; beide mit ihren Madenschrauben auf der Welle sichern. Flanschlagereinheiten mit Spannlagern sind am einfachsten. Prüfen Sie mit dem Lot, dass die Welle genau senkrecht steht und sich dreht, ohne das Holz zu berühren.

Die Schwungscheibe gießen. Schneiden Sie eine Sperrholzscheibe von etwa 60 cm Durchmesser mit einem Loch genau in der Mitte, stecken Sie die Welle hindurch und schrauben Sie eine auf der Welle befestigte Stahlnabe oder einen Stellring an das Sperrholz. Legen Sie einen Streifen Dachpappe oder Blech um die Scheibe, sodass eine 15 bis 18 cm hohe Form entsteht, setzen Sie Schrauben durch das Sperrholz, die in die Form ragen, und füllen Sie 10 bis 12 cm Beton ein, der um die Nabe herum abbindet. Mindestens zwei Tage warten, bevor Sie sie bewegen, sie während des Aushärtens feucht halten und erst drehen, wenn der Beton die Festigkeit erreicht hat, die sein Hersteller für eine Belastung angibt.

Den Kopf montieren. Setzen Sie die Welle mit der Schwungscheibe in die Lager und befestigen Sie oben einen Scheibenkopf aus Holz oder Metall von 25 bis 30 cm. Drehen Sie die Scheibe von Hand und beheben Sie jedes Schlagen, bevor Ton daraufkommt.

> **Sicherheit.** Die Schwungscheibe ist schwer und läuft lange nach: Finger, Füße und weite Kleidung aus dem Spalt zwischen Scheibe und Gestell heraushalten und die Scheibe nie durch Greifen am Rand anhalten. Nie auf die Schwungscheibe treten oder sich daraufstellen, das kann ihre Befestigung beschädigen. Beim Anrühren von Beton, der ätzend ist, Schutzbrille und Handschuhe tragen. Tonstaub enthält Quarz: Scheibe und Boden nass reinigen, nie trocken fegen.

Geschichte und Entwicklung

Viele Jahrtausende lang formte man Gefäße von Hand, bevor es die Scheibe gab. Zu den frühesten gut untersuchten Drehvorrichtungen für Keramik gehören die aus der südlichen Levante, aus der zweiten Hälfte des 5. Jahrtausends v. Chr.; frühere Scheiben anderswo sind umstritten. Forschungen von Valentine Roux und ihren Kollegen zeigen, dass die Töpfer dort ihre Gefäße aus Wülsten aufbauten und dann auf der Scheibe formten, und dass nur wenige Spezialisten diese Arbeit ausführten, für feine Schalen mit besonderem Rang. Nach dieser Deutung verbreitete sich die frühe Scheibe eher wegen des Ansehens als wegen der Schnelligkeit.

Eine zweiteilige steinerne Drehscheibe: Die obere Scheibe dreht sich auf ihrem Zapfen, der in der Pfanne des unteren Steins sitzt.

In der Uruk-Zeit in Mesopotamien, um 3400 v. Chr., war die schnelle Scheibe in Gebrauch, und eine Töpferscheibe aus Ur wurde auf etwa 3100 v. Chr. datiert. Die Technik erreichte die Ägäis im 3. Jahrtausend v. Chr., wobei umstritten ist, ob sie über Kreta kam, und Britannien erst im 1. Jahrhundert v. Chr. In Amerika stellten Töpfer bis zum Kontakt mit Europäern feine Keramik ganz ohne Scheibe her. Im ägyptischen Mythos formt der Gott Chnum die ersten Menschen auf einer Töpferscheibe.

Wann die Fußscheibe mit langer Welle und Schwungscheibe aufkam, ist unsicher; manche antiken Scheiben wurden mit der Hand oder einem Stock gedreht. Spätere Scheiben nutzten Tretbrett und Kurbel, um die Auf- und Abbewegung des Beins in Drehung umzusetzen, und heute treiben Elektromotoren viele Scheiben an.

Kennzahlen

Frühe auf der Scheibe geformte Keramik
Südliche Levante, zweite Hälfte des 5. Jahrtausends v. Chr.

Schnelle Scheibe in Mesopotamien
In der Uruk-Zeit in Gebrauch, um 3400 v. Chr.

Töpferscheibe aus Ur
Datiert auf etwa 3100 v. Chr.

Ankunft in Britannien
1. Jahrhundert v. Chr.

Quellen

1. Unveiling the sign value of early potter's wheels based on a 3-D morphometric analysis of Late Chalcolithic vessels from the southern Levant (Roux and Harush, 2022) · Bar-Ilan University research portal (Journal of Archaeological Science: Reports) https://cris.biu.ac.il/en/publications/unveiling-the-sign-value-of-early-potters-wheels-based-on-a-3-d-m/
2. Potter's wheel · Buckinghamshire Council Heritage Portal https://heritageportal.buckinghamshire.gov.uk/theme/tbc463
3. Pottery kick wheel plans · Mother Earth News https://www.motherearthnews.com/diy/pottery-kick-wheel-plans-zmaz70ndzgoe/
4. Potter's wheel · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Potter%27s_wheel
5. A preliminary study of rotation velocity regulation in pottery wheel-throwing: fieldwork with Indian potters using the low-inertia kick-wheel (Gandon et al., 2021) · HAL open archive (Journal of Archaeological Science: Reports) https://amu.hal.science/hal-03475151
6. The Ancient Greek potter’s wheel: experimental archaeology and web applications for velocity analysis (Neth and Hasaki, 2021) · Interdisciplinaria Archaeologica https://iansa.eu/papers/IANSA-2021-02-neth.pdf
7. Ceramics Unit 8: Wheel Throwing · Colorado State University Extension (4-H) https://co4h.colostate.edu/wp-content/uploads/sites/27/2026/03/Ceramics-Unit-8-Wheel-Throwing.pdf
8. Weights of clay needed for ware sizes · Lakeside Pottery https://www.lakesidepottery.com/HTML%20Text/Tips/weights-of-clay-needed-for-ware-size.pdf
9. Water of plasticity · Digitalfire Reference Library https://digitalfire.com/test/wopl

Fakten geprüft am 2026-10-12

Bronze

Kupfer und Zinn, gemeinsam härter

um 3.300 v. Chr. · Vorgeschichte · Handwerk & Städte

Erfordert: Töpferei (S. 23), Beherrschung des Feuers (S. 9), Holzkohle (S. 65)

Führt zu: Batterie (S. 243), Zahnräder (S. 156), Eisenverhüttung (S. 138), Kolbenpumpe (S. 164)

1 Tiegel mit flüssiger Bronze 2 Topfblasebalg 3 Tondüse 4 Äußere Tonform 5 Tonkern 6 Gießtrichter und Eingusskanal

Bronze ist Kupfer, legiert mit etwas Zinn, meist etwa einem Zehntel. Sie ist härter als Kupfer, schmilzt bei niedrigerer Temperatur und füllt eine Form gut aus; seit dem 4. Jahrtausend v. Chr. gab sie einem ganzen Zeitalter von Werkzeugen, Waffen, Gefäßen und Statuen ihren Namen.

Was es ist

Bronze ist eine Legierung, ein Metall aus zwei oder mehr Elementen, hier vor allem Kupfer mit einem kleineren Anteil Zinn; das klassische Rezept sind etwa neun Gewichtsteile Kupfer auf einen Teil Zinn. Erhaltene antike Gegenstände enthalten etwa zwei Drittel bis 95 % Kupfer, manchmal auch andere Metalle wie Arsen, Blei oder Zink.

Zinn macht Kupfer härter, sodass eine Klinge die Schneide besser hält. Bronze schmilzt über einen Temperaturbereich um 950 °C, je nach Zinngehalt, reines Kupfer dagegen bei 1.085 °C; die niedrigere Temperatur erreicht ein Holzkohlefeuer mit Blasebalg leichter. Flüssige Bronze fließt außerdem gut in eine Form.

Wie es funktioniert

Reines Kupfer besteht aus Kristallen, deren Atomlagen leicht übereinander gleiten; deshalb lässt es sich biegen und verbeulen. Zinnatome sind größer. In das Kupfer eingestreut, verklemmen sie diese Lagen, sodass sich das Metall schwerer verbiegen und verbeulen lässt. Kaltes Hämmern härtet es weiter, sodass man eine Bronzeklinge gießen und dann an der Schneide durch Hämmern härten konnte.

Der Zinngehalt bestimmt, wofür sich das Metall eignet. Bronze mit etwa 10 % Zinn war der Standard für gegossene Werkzeuge und Waffen; weichere Bronze mit etwa 6 % wurde zu Blech gehämmert. Glockenbronze hat mehr als 20 % Zinn: Sie ist hart und klingt gut, zerbricht aber, wenn sie fällt. Zu viel Zinn macht jede Bronze spröde.

Rohstoffe des bronzezeitlichen Handels: ein „Ochsenhautbarren" aus Kupfer mit vier Griffen und Stücke von Zinn.

Kupfer- und Zinnerze kommen selten am selben Ort vor. Kupfer wurde in vielen Gegenden abgebaut, auf Zypern besonders reichlich; Zinn kam aus weit weniger Regionen, etwa aus Cornwall, dem Taurusgebirge und Afghanistan oder seiner Nachbarschaft. Bronze hing deshalb an langen Handelswegen, und ein Ausfall der Zinnversorgung konnte die Herstellung weit entfernt zum Stillstand bringen.

Eine zweiteilige Steinform: Geschlossen bilden die beiden Hälften das Beil, das Metall wird am schmalen Ende eingegossen.

Einfache Formen wie Flachbeile goss man in offene Formen oder in zweiteilige Formen aus Stein oder Ton. Hohle oder fein gearbeitete Stücke ließen sich im Wachsausschmelzverfahren herstellen. Der Gießer modellierte den Gegenstand in Wachs über einem Tonkern, setzte Wachsstäbe an, aus denen der Eingusskanal wurde, und umhüllte alles mit feinem Ton. Beim Brennen der Form schmolz das Wachs heraus. Die in die heiße Form gegossene Bronze füllte den Raum, den das Wachs hinterlassen hatte, und nach dem Abkühlen wurde die Form zerschlagen. Kunstgießereien arbeiten bis heute so: Sie gießen die Bronze bei weit über 1.000 °C in eine Form, die vorher auf mehrere hundert Grad erhitzt wurde, damit sie nicht reißt.

Wie man sie herstellt

Bronze gießen heißt, mit Metall von über 1.000 °C umzugehen. Lernen Sie es in einem Gießkurs oder einer Schulwerkstatt bei einem erfahrenen Gießer, bevor Sie es anderswo versuchen. Die folgenden Schritte beschreiben einen kleinen Guss im Wachsausschmelzverfahren.

Das Modell formen. Formen Sie einen kleinen Gegenstand aus Gusswachs, massiv und nirgends dicker als ein Finger. Setzen Sie an der dicksten Stelle einen Wachsstab und einen Wachstrichter an: Daraus wird der Eingusskanal.

Einbetten. Setzen Sie den Wachstrichter auf einen Gummi-Gusskegel, stülpen Sie eine Stahlküvette darüber und füllen Sie sie mit einer für den Bronzeguss verkauften Einbettmasse aus Gips und Quarz; nach dem Abnehmen des Kegels bildet der Trichter die Eingussöffnung. Halten Sie sich beim Anrühren, Abbinden und Trocknen genau an die Angaben des Herstellers: Jedes System hat seine eigenen.

Ausschmelzen. Erhitzen Sie die Form kopfüber in einem Brennofen nach dem für die Einbettmasse vorgeschriebenen Brennplan, damit das Wachs ausläuft und die Form völlig trocken ist. Gießen Sie, solange sie

heiß ist: Eine kalte oder feuchte Form kann reißen oder das Metall herausschleudern.

Das Metall schmelzen. Verwenden Sie fertige Gussbronze (Kupfer mit etwa 10 % Zinn) oder wiegen Sie sauberes Kupfer und Zinn im Verhältnis 9 zu 1 ab. Schmelzen Sie es in einem Ton-Graphit-Tiegel in einem Ofen mit Gebläse, geben Sie beim eigenen Legieren das Zinn zuletzt zu und ziehen Sie die Schlacke ab.

Gießen und nacharbeiten. Heben Sie den Tiegel mit geeigneten Zangen und gießen Sie in einem gleichmäßigen Strahl, bis der Trichter voll ist. Abkühlen lassen, die Form abschlagen, den Kanal absägen, dann feilen, ziselieren und polieren.

> **Sicherheit.** Flüssiges Metall verursacht schwere Verbrennungen und Brände. Tragen Sie Schutzkleidung gegen Metallspritzer, einen Gesichtsschutz über einer Schutzbrille, Gießerhandschuhe und -stiefel, die Hose über den Stiefeln, damit kein Metall hineinläuft, und halten Sie Zuschauer fern. Alle Werkzeuge, Formen und Barren müssen völlig trocken sein: Ein Tropfen Wasser unter flüssigem Metall verdampft schlagartig und schleudert es heraus. Über trockenem Sand gießen, nie über Beton, und im Freien oder unter starker Absaugung arbeiten. Nie Schrott unbekannter Zusammensetzung schmelzen: Messing gibt Zinkdämpfe ab, und manche alten Legierungen enthalten Blei oder andere giftige Metalle. Einbettmasse und zerschlagene Formen setzen Quarzstaub frei: nass oder unter Absaugung anrühren und ausformen und einen zertifizierten, dicht sitzenden Atemschutz gegen feinen Quarzstaub tragen.

Geschichte und Entwicklung

Mit Arsen legiertes Kupfer wurde auf dem iranischen Hochland hergestellt, an Fundorten wie Tal-i Iblis, um 3800 bis 3400 v. Chr. Arsenkupfer ist hart, seine Dämpfe sind jedoch giftig. Die älteste bisher bekannte Zinnbronze ist eine Folie aus Pločnik in Serbien, die ihre Ausgräber auf etwa 4650 v. Chr. datieren, auch wenn der Fundzusammenhang angezweifelt wurde; sie wurde vermutlich aus einem Erz erschmolzen, das beide Metalle schon enthielt. Im Vorderen Orient lässt man die Bronzezeit um die Mitte des 4. Jahrtausends v. Chr. beginnen, zunächst vor allem mit Arsenkupfer; Zinnbronze wurde dort im 3. Jahrtausend zur üblichen Legierung. In China begann die Bronzezeit im frühen 2. Jahrtausend v. Chr.

Das Wrack von Uluburun, das um 1300 v. Chr. vor der Südküste der Türkei sank, zeigt den Umfang dieses Handels. Sein Laderaum barg etwa 10 Tonnen zyprisches Kupfer, darunter rund 350 Ochsenhautbarren, und rund eine Tonne Zinn, ungefähr das Verhältnis zehn zu eins der Bronze. In China ließen die Höfe der Shang und Zhou Ritualgefäße für Opfer und Gräber gießen, in einem Verfahren mit Teilformen, das anderswo kein Gegenstück hatte.

Ein Ritualkessel der Shang-Zeit vom Typ ding. Chinesische Gießer gossen solche Gefäße in Formen, die aus vielen Tonteilen zusammengesetzt waren.

Um 1200 v. Chr. unterbrachen Kriege und Wanderungen im östlichen Mittelmeerraum viele Handelswege; eine Erklärung lautet, dass Zinn knapp wurde, doch die Befunde sind von Region zu Region verschieden. Eisen, dessen Erz fast überall vorkommt, ersetzte die Bronze nach und nach bei Werkzeugen und Waffen, je besser die Schmiede es zu verarbeiten lernten. Bronze blieb in Gebrauch für Glocken, Statuen, Spiegel, Münzen und Schiffsbeschläge, heute auch für Lager, Federn und Teile, die dem Meerwasser widerstehen müssen.

Kennzahlen

Klassische Legierung
Etwa 9 Teile Kupfer auf 1 Teil Zinn

Schmelzen
Über einen Bereich um 950 °C, je nach Zinn (reines Kupfer: 1.085 °C)

Älteste bekannte Zinnbronze
Eine Folie aus Pločnik (Serbien), datiert um 4650 v. Chr. (umstritten)

Ladung von Uluburun, um 1300 v. Chr.
Etwa 10 t Kupfer und 1 t Zinn

Quellen

1. Tainted ores and the rise of tin bronzes in Eurasia, c. 6500 years ago (Radivojević et al., Antiquity, 2013) · Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/tainted-ores-and-the-rise-of-tin-bronzes-in-eurasia-c-6500-years-ago/496710374082FC211C512670F0A98004
2. Uluburun Shipwreck · World History Encyclopedia https://www.worldhistory.org/Uluburun_Shipwreck/
3. Metalworking techniques · Victoria and Albert Museum https://www.vam.ac.uk/articles/metalworking-techniques
4. Rodin's lost-wax casting process · North Carolina Museum of Art https://learn.ncartmuseum.org/resources/rodins-lost-wax-casting-process/
5. Jue (ritual wine vessel), Late Shang dynasty · University of Arkansas Museum https://scholarworks.uark.edu/uamumaa/2
6. Bronze · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Bronze
7. Cu-Sn system: calculated phase diagram and invariant reactions (after Shim, Oh, Lee and Lee, 1996) · National Institute of Standards and Technology https://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn.html
8. C90700 tin bronze: data sheet · Wieland Concast, with physical data from the Copper Development Association https://www.concast.com/files/C90700.pdf
9. C91100 tin bronze: data sheet · Wieland Concast, with physical data from the Copper Development Association https://www.concast.com/files/C91100.pdf
10. C91300 bell metal: data sheet · Wieland Concast, with physical data from the Copper Development Association https://www.concast.com/files/C91300.pdf
11. Experimental design of the Cu-As-Sn ternary colour diagram (Radivojević et al., 2018) · Journal of Archaeological Science 90 https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.12.001
12. Arsenic bronze: dirty copper or chosen alloy? A view from the Americas (Lechtman, 1996) · Journal of Field Archaeology 23 https://doi.org/10.1179/009346996791973774
13. From the object to the mould: is there a connection between microstructure of a cast bronze object and its mould material used? (Jochum Zimmermann, Künzler Wagner and Osimitz, 2012) · EXARC Journal https://exarc.net/ark:/88735/10076
14. Castability control in metal casting via fluidity measures (Dewhirst, PhD thesis, 2008) · Worcester Polytechnic Institute https://web.wpi.edu/Images/CMS/A_2.pdf
15. Effect of composition and pouring temperature of Cu-Sn on fluidity and mechanical properties of investment casting (Slamet et al., 2024) · Archives of Foundry Engineering 24(3) https://doi.org/10.24425/afe.2024.151290

Fakten geprüft am 2026-10-12

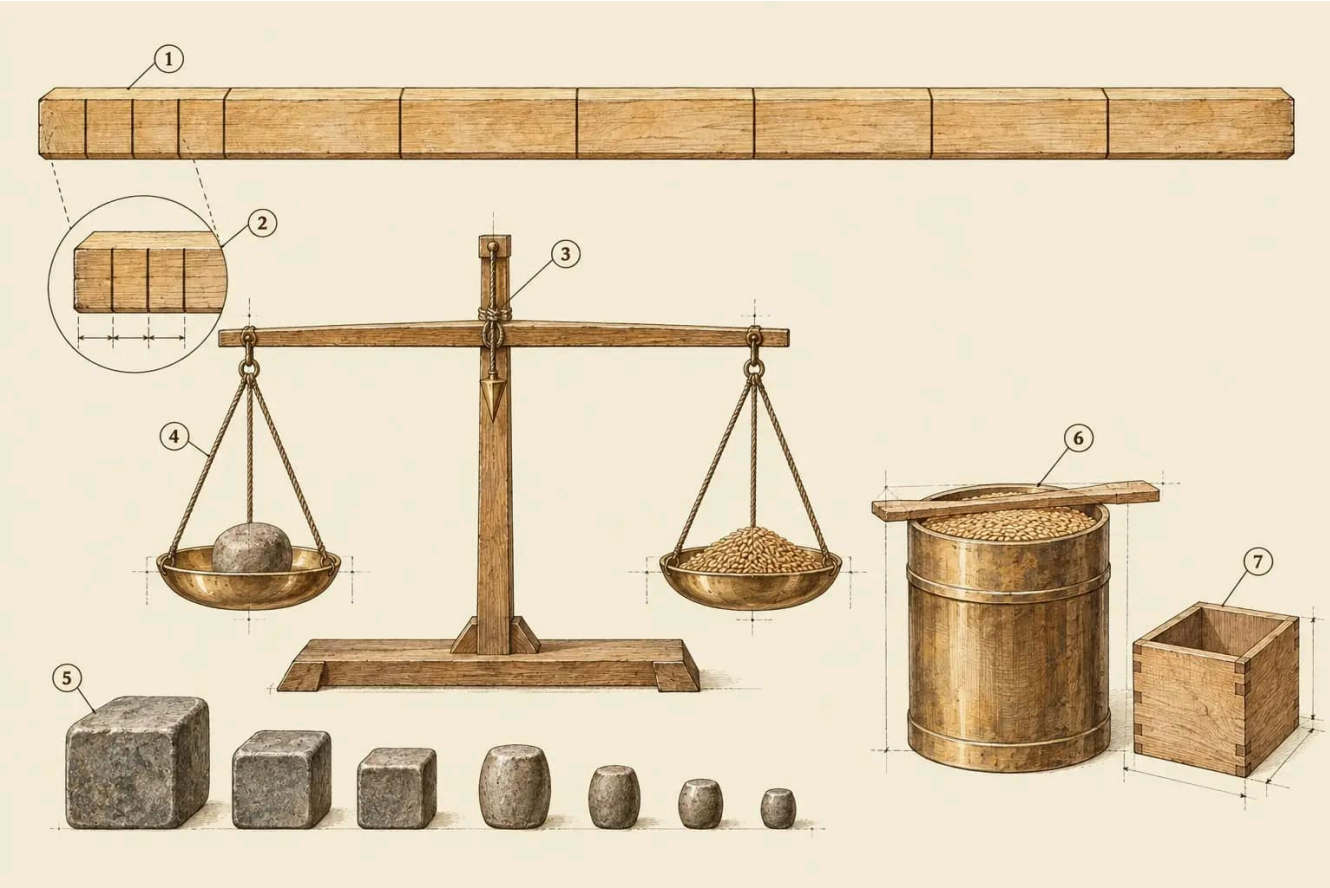
Maße und Gewichte

Elle, Waage und Meter

um 3.000 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Steinwerkzeuge (S. 5), Seil & Schnur (S. 13), Töpferei (S. 23)

Führt zu: Aquädukt (S. 148), Astronavigation (S. 213), Orale Rehydratation (S. 380), Portlandzement (S. 260), Thermometer und Barometer (S. 225)



1 Ellenstab, das Normal der Länge 2 Erste Handbreite, in vier Finger geteilt 3 Waagebalken, genau in der Mitte aufgehängt, mit Zeiger 4 Waagschale an Schnüren 5 Satz Steingewichte 6 Kornmaß mit Abstreichholz 7 Würfel aus der Einheit des Stabs

Ein Maß ist eine im Voraus vereinbarte Länge, ein Gewicht oder ein Volumen, und ein Normal ist der Gegenstand, der es verkörpert: ein Stab, ein Satz Steine oder ein Gefäß, sicher verwahrt und kopiert. Ägypten maß in Ellen, Handbreiten und Fingern, Waagegewichte verbreiteten sich ab etwa 3000 v. Chr. von Mesopotamien aus, und dieselbe Arbeit des Verwahrens und Kopierens führte zu Meter und Kilogramm.

Was es ist

Ein Maß erlaubt es, Dinge zu vergleichen, die nicht nebeneinanderliegen: Balken, die in einem fernen Wald bestellt werden, Getreide, das nach Volumen verkauft wird, Kupfer nach Gewicht. Die Einheiten selbst sind willkürlich. Es kommt darauf an, dass alle Kopien miteinander übereinstimmen.

Ein Normal ist der Gegenstand, der eine Einheit festlegt: ein Stab, ein Gewicht, ein Gefäß. Eine Obrigkeit verwahrt es, und die Gebrauchskopien werden daran geprüft. Die Tafel zeigt die Grundwerkzeuge so, wie ein Handwerker sie nachbauen könnte: einen Ellenstab, eine gleicharmige Waage mit Steingewichten, ein Kornmaß und einen Kasten, der aus einer Länge ein Volumen macht.

Wie es funktioniert

Länge. Die ältesten Einheiten stammen vom Körper: Unterarm, Handbreite, Finger, Fuß. Da Körper verschieden sind, legt ein Stab die gewählte Länge fest. Die ägyptische Königselle hatte 7 Handbreiten zu je 4 Fingern, zusammen 28 Finger, und die erhaltenen Stäbe messen etwa 52 bis 53 cm. Kha, ein in Deir el-Medina bestatteter Bauleiter, erhielt vom König eine vergoldete Elle, arbeitete aber wohl mit einer klappbaren, die im selben Grab lag. Zwei Stäbe vergleicht man ohne Zahlen: nebeneinandergelegt, die Enden bündig.

Gewicht. Eine gleicharmige Waage vergleicht zwei Lasten. Der Balken hängt in seiner Mitte, die Schalen hängen beiderseits im gleichen Abstand, und so steht der Balken nur dann waagerecht, wenn beide Schalen gleich schwer beladen sind. Gewichte sind Stücke aus hartem Stein oder Metall, die man schleift, bis sie einer Referenz die Waage halten, oft unten abgeflacht, damit sie nicht rollen.

In den Städten am Indus im 3. Jahrtausend v. Chr. waren Gewichte meist Würfel aus Hornstein. Eine Untersuchung der Gewichte aus Mohenjo-daro von 1938 ergab eine Einheit von etwa 0,86 g und Gewichte von 1, 2, 4, 8, 16, 32 und 64 Einheiten, danach größere Stufen wie 160, 200, 320 und 640. Am häufigsten waren 16 und 32 Einheiten, etwa 13,7 und 27,4 g. Bei mehreren gängigen Größen wichen die einzelnen Gewichte im Durchschnitt nur um 1 bis 2 % von ihrem Mittelwert ab.

Die Gewichte der Indus-Kultur waren Würfel aus gebändertem Hornstein; bei den kleineren Größen wog jedes etwa halb so viel wie das vorige.

Volumen. Getreide, Öl und Wein wurden mit Gefäßen vereinbarter Größe verkauft, und trockene Ware strich man mit einem geraden Holz, dem Abstreichholz, glatt. Ein Volumen lässt sich auch aus einer Länge ableiten: Die römische Amphore als Maßeinheit war ein Kubikfuß, und das erste Kilogramm war die Masse eines Kubikdezimeters Wasser.

Wie man es baut

Man braucht einen geraden, gut abgelagerten Hartholzstab von etwa 60 cm, einen zweiten Stab für den Waagebalken, kräftige Schnur, zwei gleiche Schalen, harte, feinkörnige Steine, Feilen, einen flachen Schleifstein, ein Anreißmesser, einen Stechzirkel und einige dünne Brettchen.

Das Normal wählen und kopieren. Jede Länge kann zur Einheit werden: ein Unterarm oder ein Zollstock. Ritzen Sie an beiden Enden der Einheit einen feinen Strich quer über den Stab; Striche halten länger als die Stirnflächen, die sich abnutzen. Bewahren Sie dieses Normal trocken auf und prüfen Sie damit nur Kopien. Zum Kopieren legen Sie einen Rohling daneben, übertragen jeden Strich mit dem Messer, drehen die Kopie dann um, legen ihren ersten Strich auf den des Normals und vergleichen die übrigen: Ein Strich, der nicht mehr deckt, zeigt einen Fehler.

Teilen ohne Rechnen. Für 7 Handbreiten öffnen Sie den Zirkel nach Augenmaß und tragen ihn siebenmal entlang des Stabs ab. Verfehlt der letzte Schritt den Endstrich, korrigieren Sie die Öffnung und beginnen neu, bis er genau trifft. Eine Handbreite teilen Sie ebenso in 4 Finger.

Die Waage bauen. Hängen Sie den Balken an einer Schnur oder einem Stift in der Mitte seiner Oberkante auf: So liegt der größte Teil seiner Masse unter dem Drehpunkt, und er pendelt in die Waagerechte zurück. Hängen Sie die

Schalen in Kerben gleichen Abstands zur Mitte, befestigen Sie einen Zeiger und schaben Sie am schwereren Ende, bis der leere Balken waagerecht hängt.

Durch Tauschen der Lasten prüfen. Gleichen Sie einen Stein mit Sand aus und vertauschen Sie dann Stein und Sand. Bleibt der Balken waagerecht, sind die Arme gleich. Andernfalls verschieben Sie eine Kerbe ein wenig, bringen den leeren Balken wieder in die Waagerechte und wiederholen den Versuch. Legen Sie danach kleine Gegenstände in eine Schale und notieren Sie den kleinsten, der den Zeiger bewegt: Genauer als das sind auch die Gewichte nicht, die Sie auf dieser Waage prüfen.

Gewichte nach einer Referenz anfertigen. Auch eine ungenaue Waage kopiert ein Gewicht durch Substitution: Gleichen Sie die Referenz mit Sand aus, nehmen Sie sie heraus und schleifen Sie einen neuen Stein, bis er demselben Sand die Waage hält. Für eine Reihe, in der jedes Gewicht doppelt so schwer ist wie das vorige, schleifen Sie einen Stein, der zwei Einheiten zusammen aufwiegt, dann einen, der diesen Stein und die beiden Einheiten zusammen aufwiegt, und so fort. Prüfen Sie große Gewichte gegen die Summe der kleinen, denn Fehler addieren sich.

Ein Volumen aus dem Stab gewinnen. Bauen Sie einen offenen Kasten, dessen innere Länge, Breite und Tiefe je eine Handbreite messen. Seine Wasserfüllung kann einen Füllstrich an einem Gefäß markieren oder gewogen werden, um ein Gewicht an Ihre Länge zu binden; schon das erste Kilogramm legte auch die Wassertemperatur fest. Getreide schütten Sie locker ein, ohne zu rütteln, und streichen es mit dem Abstreichholz glatt.

> **Sicherheit.** Beim Schleifen von Stein entsteht feiner Staub, der Quarz enthalten kann: Schleifen Sie nass, tragen Sie Schutzbrille und eine Staubmaske FFP2 oder FFP3 und reinigen Sie feucht statt mit dem Besen. Spannen Sie das Werkstück ein, wenn Sie mit dem Messer anreißen. Fertigen Sie keine Gewichte aus Blei. Selbst gebaute Maße sind im Handel nicht zulässig: In den meisten Ländern verlangt der Verkauf nach Gewicht oder Volumen geeichte Messgeräte.

Geschichte und Entwicklung

Waagegewichte tauchen um den Beginn des 3. Jahrtausends v. Chr. in Mesopotamien und Ägypten auf. Mesopotamische Texte bestimmen den Schekel, etwa 8,4 g, als 180 Gerstenkörner, und viele Gewichte sind polierte Steine, manche in Gestalt von Enten oder Löwen. Ein Team der Universität Göttingen verglich 2.274 Gewichte von 127 Fundorten aus der Zeit von etwa 3000 bis 1000 v. Chr. Ähnliche Einheiten verbreiteten sich von Mesopotamien bis nach Europa, während das Industal ein eigenes System hatte. Um den Mittelwert jeder Einheit streuen die Gewichte mit einem Variationskoeffizienten (Standardabweichung geteilt durch den Mittelwert) von etwa 5 bis 6 %. Als das Team auf nachgebauten Waagen 100 Kopien herstellte, jede nach einem zufällig gewählten Vorbild, streuten diese etwa ebenso stark, um 5,4 %, und die Autoren meinen, dass Händler die Einheiten im Einklang hielten, indem sie ihre Gewichte untereinander verglichen, ohne zentrale Obrigkeit.

Städte bewahrten dennoch amtliche Referenzen. In Pompeji trug ein Steintisch am Forum Mulden nach den örtlichen oskischen Maßen; nachdem Augustus die römischen Maße vereinheitlicht hatte, ließ der Stadtrat sie vergrößern und vier weitere einarbeiten. In England ließ Heinrich VII. 1495–1497 ein bronzenes Normal-Yard anfertigen und Kopien an die Städte senden; es erwies sich als ungenau und wurde um 1588 ersetzt.

1791 schlug die Pariser Akademie der Wissenschaften ein Meter von einem Zehnmillionstel der Entfernung vom Pol zum Äquator vor, und Landvermesser maßen dazu den Meridian von Dünkirchen bis Barcelona. 1799 wurden ein Platin-Meter, bestimmt durch seine Endflächen, und ein Kilogramm, gleich einem Kubikdezimeter Wasser, in den französischen Archiven hinterlegt. Bald galt der Stab selbst als Einheit.

Ein öffentlicher Eichtisch: Der Käufer füllte eine Mulde und ließ sie durch das Loch im Boden auslaufen.

1875 unterzeichneten siebzehn Staaten die Meterkonvention, die das Internationale Büro für Maß und Gewicht bei Paris gründete. Ab 1889 war das Meter der Abstand zweier Striche auf einem X-förmigen Stab aus Platin-Iridium bei 0 °C und das Kilogramm die Masse eines Zylinders aus derselben Legierung; Kopien gingen an die Mitgliedstaaten. Spätere Vergleiche zeigten, dass die Kopien langsam vom Original abwichen, 1989–1991 im Median um etwa 25 Mikrogramm. 1960 wurde das Meter über das Licht des Kryptons neu definiert, 1983 über die Lichtgeschwindigkeit. Seit dem 20. Mai 2019 beruht das Kilogramm auf der Planck-Konstante.

Das internationale Kilogramm lag unter Glasglocken; das Meter von 1889 war ein Stab mit X-förmigem Querschnitt.

Kennzahlen

Ägyptische Königselle

7 Handbreiten zu 4 Fingern, zusammen 28; erhaltene Stäbe messen etwa 52 bis 53 cm

Verglichene bronzezeitliche Gewichte

2.274 Gewichte von 127 Fundorten, etwa 3000–1000 v. Chr.

Kilogramm

Ein Zylinder aus Platin-Iridium von 1889; seit dem 20. Mai 2019 über die Planck-Konstante definiert

Indus-Gewichte (Mohenjo-daro)

Einheit etwa 0,86 g; am häufigsten sind 16 und 32 Einheiten, etwa 13,7 und 27,4 g

Erstes Meter und Kilogramm

Platin-Normale, 1799 in den französischen Archiven hinterlegt

Quellen

1. Royal cubit rod inscribed with the name of pharaoh Amenhotep II (Suppl. 8647) · Museo Egizio, Turin https://collezioni.museoegizio.it/en-GB/material/S_8647
2. Cubit rod (Liverpool M13825) · Global Egyptian Museum / World Museum Liverpool https://globalegyptianmuseum.org/detail.aspx?id=4424
3. System of weights (A. S. Hemmy), in E. J. H. Mackay, Further Excavations at Mohenjo-daro (1938) · Archaeological Survey of India https://richardsproat.com/indus_weights/Hemmy-1938-weights-Mohenjodaro-Mackay.pdf
4. Hanging in the Balance: Precision Weighing in Antiquity (William B. Hafford, Expedition 47.2, 2005) · Penn Museum https://www.penn.museum/sites/expedition?p=9719
5. Bronze Age: how the market began (press release, 29 June 2021) · University of Göttingen https://www.uni-goettingen.de/en/73613.html?id=6309
6. Bronze Age weight systems as a measure of market integration in Western Eurasia (Ialongo, Hermann and Rahmstorf, PNAS 118, 2021) · Proceedings of the National Academy of Sciences https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8271817/
7. Bronze Age Merchants Developed Measurement System · Archaeology Magazine https://archaeology.org/news/2021/06/30/210701-bronze-age-weights/
8. Roman Weights and Measures · University of Kent https://blogs.kent.ac.uk/lucius-romans/2017/12/13/roman-weights-and-measures/
9. VII.7.31 Pompeii, Mensa Ponderaria · Pompeii in Pictures https://pompeiiinpictures.com/pompeiiinpictures/R7/7%2007%2031.htm
10. Cooking the volumes (Amelia Carolina Sparavigna, 2012) · arXiv, Politecnico di Torino https://arxiv.org/abs/1201.3774
11. Exchequer standard yard of King Henry VII, 1495-1497 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co57527/exchequer-standard-yard-of-king-henry-vii-1495-1497-rules-measuring-devices-linear-standards
12. Time Line for the Definition of the Meter (William B. Penzes) · National Institute of Standards and Technology https://www.nist.gov/document/museum-timelinepdf
13. Defining the International System of Units (SI) · NIST Museum https://www.nist.gov/nist-museum/defining-international-system-units-si
14. Historical perspective: Unit of mass, kilogram · Bureau International des Poids et Mesures https://www.bipm.org/en/history-si/kilogram
15. Historical perspective: Unit of length, metre · Bureau International des Poids et Mesures https://www.bipm.org/en/history-si/metre
16. The evolution of the metre · Physics World https://physicsworld.com/a/the-evolution-of-the-metre-how-a-product-of-the-french-revolution-became-a-mainstay-of-worldwide-scientific-collaboration/
17. SM052 Analytical balance, circa 1962 · University of Malta Science Museum https://staff.um.edu.mt/rlib1/sm/balance.htm
18. Site 1149, table T17: physical properties by lithology (ODP Leg 185 Initial Reports) · Ocean Drilling Program, Texas A&M University https://www.iodp.tamu.edu/publications/185_IR/chap_04/c4_t17.htm

Fakten geprüft am 2026-10-13

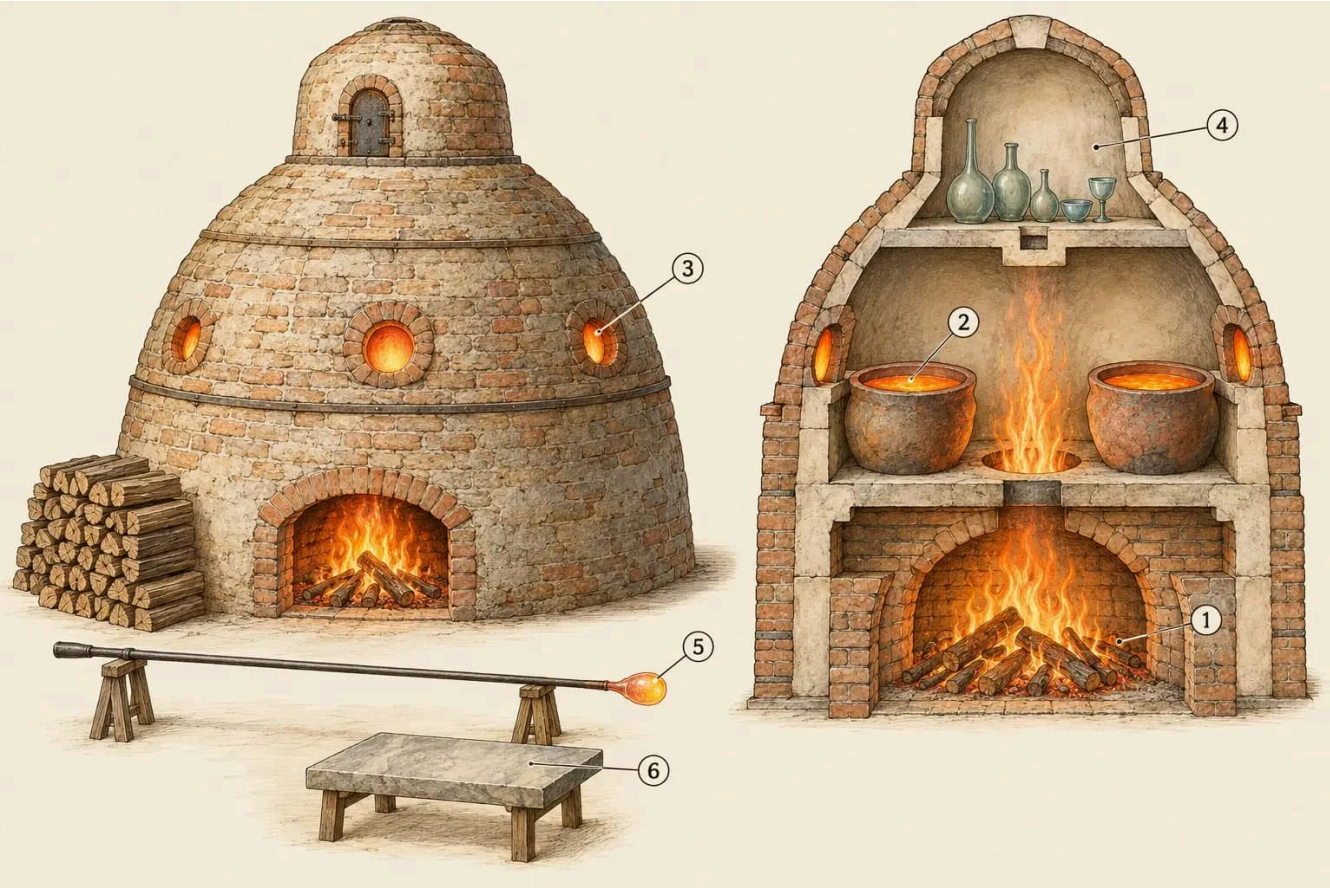
Glas

Geschmolzener, durchsichtiger Sand

um 2.500 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Töpferei (S. 23)

Führt zu: Anästhesie (S. 297), Konserven & Pasteurisierung (S. 251), Brille (S. 200), Glühlampe (S. 326), Penicillin (S. 361), Fotografie (S. 264), Solarzelle (S. 375), Thermometer und Barometer (S. 225), Impfung (S. 238)



1 Feuerkammer 2 Tiegel mit geschmolzenem Glas 3 Arbeitsöffnung 4 Kühlkammer 5 Glasmacherpfeife mit Glasposten 6 Marbel

Glas ist Sand, der mit einem Flussmittel wie Soda und etwas Kalk geschmolzen und abgekühlt wird, bevor er kristallisieren kann; so erstarrt er zu einem harten Festkörper, der in reinem Zustand Licht durchlässt. Zuerst wurden in Mesopotamien Perlen daraus gemacht, zum Alltagsmaterial wurde es, als Glasmacher im östlichen Mittelmeerraum im 1. Jahrhundert v. Chr. lernten, es an der Pfeife aufzublasen.

Was es ist

Glas ist ein Festkörper ohne Kristalle. Wird Sand mit den richtigen Zusätzen geschmolzen und kühlt die Flüssigkeit schnell genug ab, haben die Atome keine Zeit, sich zu einem regelmäßigen Gitter zu ordnen. Sie erstarren in einem ungeordneten Netzwerk. Deshalb ist Glas hart und spröde, und deshalb wird es beim Erhitzen allmählich weich, statt bei einer bestimmten Temperatur zu schmelzen. Klares Glas ist durchsichtig, weil seine Bestandteile wenig sichtbares Licht schlucken und eine gute Schmelze keine Blasen oder Kristalle enthält, die es streuen.

Gewöhnliches Glas, ob antik oder modern, ist Kalk-Natron-Glas. Quarzsand bildet das Netzwerk. Soda, aus dem Mineral Natron oder aus der Asche von Salzwiesenpflanzen gewonnen, senkt die Schmelztemperatur so weit, dass ein Holzfeuer sie erreicht. Kalk, oft als Muschelbruch schon im Sand enthalten, macht das Glas beständig, sodass Wasser es nicht angreift.

Die Tafel zeigt einen runden Glasofen, wie ihn Georgius Agricola 1556 beschrieb, mit Pfeife und Marbel des Glasbläsers.

Wie es funktioniert

Der Ofen hat drei Ebenen. In der untersten Kammer brennt Holz. Die Flammen steigen durch ein rundes Loch in die mittlere Kammer, in der Tontöpfe die Schmelze enthalten; Agricola beschreibt bauchige Töpfe von etwa zwei Fuß Höhe, die durch Öffnungen in der Wand eingesetzt wurden. Die Hitze zieht dann durch eine kleinere Öffnung in die oberste Kammer, die weniger heiß ist und zum Kühlen dient.

Der Glasbläser taucht das Ende einer eisernen Pfeife in einen Topf und dreht sie, um einen Posten geschmolzenen Glases aufzuwickeln, wie Honig auf einem Löffel. Auf dem Marbel, einer glatten Platte aus Stein oder Eisen, rollt er ihn rund und kühlt seine Haut. Durch vorsichtiges Hineinblasen entsteht eine Blase. Dann wärmt er das Stück an der Arbeitsöffnung nach, bläst und schwenkt es, um es zu strecken, und formt es mit Auftreibeisen, Spateln und Holzmodeln. Um den Rand fertigzustellen, wird das Gefäß mit dem Boden an einem massiven Eisenstab, dem Hefteisen, befestigt und von der Pfeife abgesprengt.

Die Werkzeuge des Glasbläsers: Pfeife, Eisenstab, Auftreibeisen, Schere, Spatel und Holzmodel.

Glas schrumpft beim Abkühlen, und seine Außenhaut erstarrt vor dem Inneren. Ein an freier Luft abgekühltes Stück behält innere Spannungen und kann Stunden später zerspringen. Das Kühlen verhindert das: Die fertigen Gefäße kommen in eine heiße Kammer und kühlen über viele Stunden langsam ab. Agricola bemerkte, dass nicht langsam gekühlte Gefäße zerbersten würden.

Farbe entsteht durch Verunreinigungen und Zusätze. Eisen im Sand färbt Glas grün oder braun; Mangan, das Glasmacher der Römerzeit als Entfärbungsmittel zusetzten, gleicht das aus, und Kobalt ergibt ein tiefes Blau.

Wie man es herstellt

Glas wird bei weit über 1.000 °C aus dem Ofen aufgenommen und geformt, solange es noch glüht. Lernen Sie das Glasblasen in einer Glaswerkstatt oder einem Kurs mit Lehrer; wer die Grundlagen beherrscht, kann in vielen Studios Ofenzeit mieten.

Mit Scherben beginnen. Anfänger arbeiten mit fertigem Glas, das als Schmelzscherben gekauft und im Ofen des Studios geschmolzen wird. Glas aus einem Rohgemenge von Sand, Soda und Kalk zu erschmelzen, erfordert höhere Temperaturen und lange Schmelzzeiten, und die Rohpulver sind gefährlich.

Anfangen und marbeln. Das Pfeifenende vorwärmen, in den Topf tauchen und gleichmäßig drehen, um einen kleinen Posten aufzunehmen. Auf dem Marbel rund und gleichmäßig rollen.

Blasen und formen. Kurz hineinblasen, das Mundstück mit dem Daumen verschließen und die Luft sich erwärmen und ausdehnen lassen. Oft an der Arbeitsöffnung nachwärmen und die Pfeife ständig drehen, damit das Glas nicht

absackt. Mit nassen Holzmodeln, Spateln und Auftreibeisen formen und mit dem Auftreibeisen einen schmalen Hals, die Abschlagstelle, zwischen Stück und Pfeife einziehen.

Umsetzen und fertigstellen. Ein Helfer bringt ein Hefteisen mit einem Tropfen heißem Glas an den Boden; die Abschlagstelle mit einem Tropfen Wasser vom Auftreibeisen abschrecken und auf die Pfeife klopfen, damit das Stück aufs Hefteisen übergeht. Nachwärmen, den Rand mit dem Auftreibeisen öffnen und das Stück dann nach Anweisung des Lehrers vom Hefteisen auf eine hitzefeste Unterlage lösen und behutsam in den Kühlofen setzen.

Kühlen. Der Kühlofen hält das Stück auf einer bestimmten Temperatur und kühlt es dann langsam nach einem Plan ab, der zu Glas und Wandstärke passt; bei kleinen Stücken dauert das meist eine Nacht. Erst nach dem vom Lehrer festgelegten Zyklus anfassen.

> **Sicherheit.** Öfen, Arbeitsöffnungen und heißes Glas verursachen schwere Verbrennungen und Brände: Kleidung aus Naturfasern und geschlossene Schuhe tragen, Haare zusammenbinden und jedes Glasstück für heiß halten, solange nicht sicher ist, dass es kalt ist. Eine für Glasarbeit bestimmte Schutzbrille gegen Blendung und Infrarot tragen. Quarzsand und Gemengepulver dürfen nicht eingeatmet werden; das Erschmelzen von Rohglas daher ausgerüsteten Werkstätten überlassen. Jedes fertige Stück im Kühlofen kühlen und heißes Glas nie Wasser oder kalter Zugluft aussetzen: Es kann zerspringen. Nur vom Studio freigegebenes Glas bekannter Zusammensetzung in einem belüfteten Ofen schmelzen: Altes Bleikristall und unbekanntes Farbglas können schädliche Dämpfe abgeben.

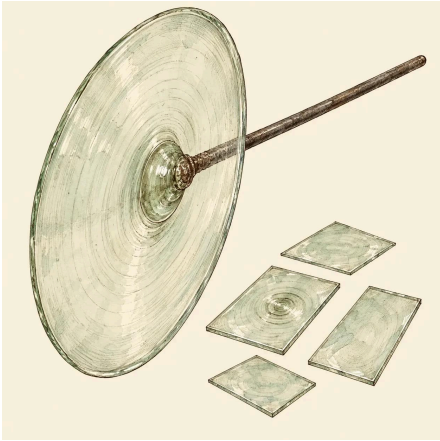
Geschichte und Entwicklung

Ein über einem Kern geformtes Fläschchen: Vor dem Glasblasen baute man kleine Gefäße um einen herausnehmbaren Kern auf.

Glas erscheint zuerst als kleine Perlen in Mesopotamien in der zweiten Hälfte des 3. Jahrtausends v. Chr., wohl als Nebenzweig von Glasuren und Fayence. Die ersten Gefäße, aus dem späten 16. Jahrhundert v. Chr., entstanden im nördlichen Mesopotamien und bald auch in Ägypten durch Kernformung: Heißes Glas wurde um einen Kern aus Ton und Sand auf einem Metallstab gewickelt, mit farbigen Fäden verziert, und nach dem Abkühlen wurde der Kern herausgekratzt.

Später teilte sich die Glasherstellung in zwei Gewerbe. Große Öfen nahe den Küsten der Levante und Ägyptens machten aus Sand und Natron Rohglas, gegossen zu Blöcken von bis zu etwa 10 Tonnen; die Blöcke wurden zerschlagen, und die Brocken gingen über das Mittelmeer zu Werkstätten, die sie wieder einschmolzen und formten. Diese Arbeitsteilung bestand um die Mitte des 1. Jahrtausends v. Chr. In der zweiten Hälfte des 1. Jahrhunderts v. Chr. lernten Handwerker dieser Region, Glas an der Pfeife aufzublasen. Der älteste genau datierte Nachweis, zu Kugeln aufgeblasene Glasröhrchen, stammt aus einer Werkstatt in Jerusalem. Das Blasen machte Glas billig, und im Römischen Reich wurde es zu Tafelgeschirr, Vorratsflaschen und Fensterscheiben.

In Nordeuropa verwendeten die Glasmacher ab etwa 1000 n. Chr. statt Soda Pottasche aus Holzasche. 1291 befahl Venedig seinen Glasmachern, ihre Öfen auf die Insel Murano zu verlegen. George Ravenscroft, der 1674 ein neues klares Glas patentieren ließ, gilt traditionell als Erfinder des englischen Bleikristalls. Jahrhundertelang schnitt man Fensterscheiben aus Mondglas, einer zur flachen Scheibe geschleuderten Blase, oder aus geblasenen Zylindern, die aufgeschnitten und gestreckt wurden; beide Verfahren begrenzten die Größe der Scheiben. In den 1950er-Jahren entwickelten Alastair Pilkington und Kenneth Bickerstaff in St Helens das Floatverfahren, bei dem geschmolzenes Glas auf einem Bad aus flüssigem Zinn zu einem flachen Band zerfließt. Um 1960 lief es wirtschaftlich, heute ist es das übliche Verfahren für Fensterglas.



Mondglas: Eine Blase wird am Hefteisen geöffnet und zu einer Scheibe geschleudert. Die dicke Mitte, wo der Stab saß, ist das Butzen- oder Ochsenauge.

Kennzahlen

Älteste Glasgegenstände
Perlen, Mesopotamien, zweite Hälfte des 3. Jahrtausends v. Chr.

Erste Glasgefäße
Über einem Kern geformt, spätes 16. Jahrhundert v. Chr.

Glasblasen
Zweite Hälfte des 1. Jahrhunderts v. Chr., östlicher Mittelmeerraum

Floatglas
Glas auf einem Bad aus flüssigem Zinn, entwickelt in den 1950er-Jahren

Quellen

1. The history of ancient glass · Republic of Türkiye, Ministry of Culture and Tourism https://www.ktb.gov.tr/EN-120370/the-history-of-ancient-glass.html
2. Composition of Late Hellenistic to Early Roman glass vessels from the Souk excavations, Beirut (Freestone, Brems and Degryse, Rendiconti Lincei, 2025) · UCL Institute of Archaeology https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10215996/1/Freestone_s12210-025-01311-x.pdf
3. Georgius Agricola, De re metallica (1556), trans. H. C. and L. H. Hoover, Book XII · Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/cache/epub/38015/pg38015.txt
4. History of glass · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_glass
5. Float glass · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Float_glass
6. Standard Glass DGG X, Soda-Lime-Silica Glass: viscosity-temperature behaviour measured by the PTB · Deutsche Glastechnische Gesellschaft https://hvg-dgg.de/fileadmin/Standard_Glass_DGG_X.pdf
7. Physical properties of glass · EAG Laboratories https://www.eag.com/app-note/physical-properties-of-glass/
8. Intraoral pressure in ethnic wind instruments (Goss, 2013), citing intraoral pressures up to 200 mbar in glassblowing · arXiv https://arxiv.org/abs/1308.5214
9. Draper point · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Draper_point

Fakten geprüft am 2026-10-12

Eisenverhüttung

Breitere Nutzung um 1200 v. Chr.; Erz, Holzkohle und Rennofen

um 1.200 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Bronze (S. 125), Holzkohle (S. 65)

Führt zu: Fahrrad (S. 256), Konserven & Pasteurisierung (S. 251), Verbrennungsmotor (S. 318), Magnetkompass (S. 196), Elektromotor (S. 281), Elektrischer Generator (S. 277), Räderuhr (S. 204), Druckerpresse (S. 208), Nähmaschine (S. 273), Dampfmaschine (S. 230), Stahl (S. 143), Transformator (S. 335)

1 Blasebälge 2 Düse (Windform aus Ton) 3 Beschickung aus Holzkohle und Erz 4 Ofenwand aus Lehm 5 Eisenluppe 6 Abgestochene Schlacke

Bei der Eisenverhüttung wird Erz mit Holzkohle in einem kleinen Lehmofen erhitzt, dem Blasebälge Luft zuführen. Dieser Rennofen liefert gewöhnlich eine feste, kohlenstoffarme Luppe. Der Schmied verdichtet sie und verarbeitet sie zu Schmiedeeisen.

Was es ist

Eisen gehört zu den häufigsten Elementen der Erdkruste, doch als Metall findet man es fast nie. Es steckt als Oxid in Erzen: im roten Hämatit, im schwarzen Magnetit, im braunen Raseneisenerz, das man aus Sümpfen gräbt. Beim Verhütten wird diesen Erzen der Sauerstoff entzogen, und das Metall bleibt zurück.

Fast dreitausend Jahre lang diente dazu der Rennofen, ein etwa meterhoher Ofen aus Lehm, in dem Holzkohle im Luftstrom der Blasebälge brennt. Er liefert die Luppe, einen schwammigen Klumpen aus Eisen, in dem noch Schlacke steckt. Glühend gehämmert wird die Luppe zu Schmiedeeisen, das zäh ist und sich leicht schmieden

lässt. Pflugscharen, Nägel und Schwerter wurden daraus gemacht, bis in Europa am Ende des Mittelalters der Hochofen an seine Stelle trat.

Innen ist eine rohe Luppe ein Schwamm aus Eisen und Schlacke. Erst stundenlanges Schmieden macht daraus einen Stab.

Wie es funktioniert

Vor der Luftdüse verbrennt die Holzkohle und heizt den Ofen auf. Weiter oben im Schacht, wo Sauerstoff knapp ist, bildet sie Kohlenmonoxid. Dieses Gas steigt durch die Beschickung und nimmt dem Eisenoxid dabei den Sauerstoff weg. Das Erz gibt seinen Sauerstoff in Stufen ab, und oberhalb von etwa 900 °C läuft die Reaktion schnell.

Die Luppe wird zuerst heiß mit leichten Schlägen verdichtet; zwischen den Schmiedegängen kann man sie wieder erhitzen.

Der Ofen arbeitet bei rund 1.100 bis 1.200 °C und liefert gewöhnlich eine feste, kohlenstoffarme Luppe. Reines Eisen schmilzt bei 1.538 °C; kohlenstoffreiches Eisen kann jedoch schon bei Rennofentemperaturen schmelzen. Kieselsäure und andere Erzminerale verbinden sich mit einem Teil des Eisenoxids zu eisenreicher Schlacke, die je nach Zusammensetzung bei etwa 1.180 °C fließen kann. Die Schlacke läuft an der Düse vorbei nach unten. Durch dieses Tonrohr tritt die Luft ein, und knapp darunter sammeln sich die Metallkörner zur Luppe. Die Schlacke wird durch einen Bogen am Ofenfuß abgelassen oder sammelt sich in einer Grube darunter.

Die Luppe kommt als glühende, poröse Masse voller Schlacke und Holzkohle aus dem Ofen. Eine brüchige Luppe braucht anfangs vorsichtige Schläge, etwa mit einem Holzhammer. Sie kann auch erst abkühlen und vor dem Verdichten erneut erhitzt werden; sofortiges Hämmern bei Weißglut ist nicht zwingend. Wiederholtes Erhitzen und Schmieden verdichtet das Metall und treibt einen großen Teil der Schlacke aus. Der Gewichtsverlust hängt von der Luppe und der Schmiedearbeit ab. Der Kohlenstoffgehalt ist meist niedrig und ungleichmäßig, sodass weiches Eisen und Stahlbereiche in derselben Luppe vorkommen können.

Bauanleitung

Was folgt, ist der Ablauf einer kleinen Verhüttung in groben Zügen, keine Bauzeichnung mit Maßen. Man braucht Lehm, gemischt mit Sand und Stroh, dazu Erz, sehr viel Holzkohle, Blasebälge oder ein Gebläse und eine Mannschaft für einen ganzen Tag.

Das Erz vorbereiten. Das Erz im offenen Feuer rösten, damit das Wasser entweicht und es mürbe wird, dann in etwa zentimetergroße Stücke brechen. Die Holzkohle auf etwa zwei Zentimeter zerkleinern und den Staub aussieben, damit das Gas durch die Beschickung strömen kann.

Den Schacht aufbauen. Auf trockenem Boden einen Lehmzylinder errichten, etwa einen Meter hoch und innen 25 bis 30 cm weit, mit Wänden von mehreren Fingern Stärke. Unten ein Loch für die Düse lassen und einen Bogen, den man öffnen und mit Lehm wieder verschließen kann. Mehrere Tage langsam trocknen lassen und zum Schluss innen ein kleines Feuer machen.

Vorheizen und beschicken. Den Schacht mit Holzkohle füllen und Luft zuführen, bis er auf ganzer Höhe glüht. Bei WIRG-Versuchen werden etwa 1 kg Erz und 1 kg Holzkohle je Charge im Abstand von 10–15 Minuten zugegeben; insgesamt werden 15–20 kg von beidem je Durchgang angegeben. Das sind 15–20 Doppelchargen, entsprechend etwa 2,5–5 Stunden Beschickung bei diesem Takt, ohne fünf Stunden ununterbrochenes Nachlegen vorauszusetzen. Die angegebene Dauer von rund fünf Stunden umfasst das abschließende Ausbrennen; das Vorheizen kommt hinzu. Zusätzliche Holzkohle für das Vorheizen und die letzte reine Holzkohlecharge einplanen: Die Doppelchargen decken den gesamten Brennstoffbedarf nicht ab.

Den Wind regeln. Temperatur und Absinken der Beschickung beobachten und die Luftzufuhr so anpassen, dass Reduktion und Schlackenfluss weiterlaufen. Die Kohlenstoffaufnahme hängt vom Verhältnis von Holzkohle zu Erz, der Ofenatmosphäre, der Verweilzeit und der Schlackenchemie ab. Mehr Luft allein lässt keine sichere Aussage über die Bildung von Gusseisen zu: Manche Versuche ergaben bei höherem Luftdurchsatz kohlenstoffärmeres Eisen. Angestaute Schlacke bei Bedarf abstechen; WIRG nennt einen ersten Abstich nach etwa drei Stunden.

Herausholen und verdichten. Nach dem Ausbrennen der letzten Charge die Ofenbrust öffnen und die Luppe mit der Zange herausnehmen. Bei einer brüchigen Luppe vorsichtig beginnen, etwa mit einem Holzhammer, und erst kräftiger schlagen, sobald sie besser zusammenhält. Abkühlen und erneutes Erhitzen vor dem Verdichten sind ebenfalls möglich. Zwischen den Schmiedegängen in der Esse nachheizen, bis ein zusammenhängender Stab entsteht.

> **Sicherheit.** Ein Rennofen arbeitet bei über 1.100 °C. Flüssige Schlacke verursacht tiefe Verbrennungen und Brände. Im Freien auf freiem, trockenem Boden arbeiten, fern von trockenem Gras, und trockenen Sand bereithalten. Werkzeuge und den Boden am Abstich trocken halten. Wasser darf weder heiße oder flüssige Schlacke berühren noch in den heißen Ofen gelangen: Die schlagartige Dampfbildung kann eine Explosion auslösen. Lederstiefel, Handschuhe, Schürze und Augenschutz tragen und nie vor dem Abstichbogen stehen. Oben entweicht Kohlenmonoxid: Das Gesicht von der Öffnung fernhalten und niemals in geschlossenen Räumen verhütten. Feuchter Lehm oder feuchtes Erz kann beim Erhitzen platzen.

Geschichte und Entwicklung

Eisen wurde bearbeitet, bevor man es verhütten konnte. Einige der ältesten Eisengegenstände sind aus Meteoriten gehämmert, die Nickel enthalten. Funde sprechen für frühe Verhüttung in Anatolien, in der heutigen Türkei; Ort und Zeitpunkt der Erfindung bleiben jedoch unsicher. Bruchstücke aus Kaman-Kalehöyük, die auf etwa 1800 v. Chr. datiert werden, enthalten zum Teil Kohlenstoffstahl, und ihr ungleichmäßiger Kohlenstoffgehalt spricht für Schmiede, die noch experimentierten. Um 1250 v. Chr. schrieb der hethitische König Hattusili III. einen Brief über die Herstellung von „gutem Eisen“.

Um 1200 v. Chr. wurde Eisen im Nahen Osten breiter genutzt, wobei die Regionen es zu unterschiedlichen Zeiten übernahmen. Die Verhüttung war schon vorher bekannt. Um 1100 v. Chr. war es auf Zypern und in der Levante gebräuchlich, der größte Teil Europas verwendete es ab etwa 800 v. Chr., und um 500 v. Chr. kannte man Rennöfen vom Mittelmeer bis nach Skandinavien. Anders als Kupfer und Zinn für die Bronze ließ sich Eisenerz fast überall abbauen.

Afrika hatte eigene Traditionen, mit Öfen in Nubien schon im 7. Jahrhundert v. Chr. und in Westafrika spätestens im 6. China lernte die Verhüttung im Rennofen wahrscheinlich um das 8. Jahrhundert v. Chr. aus dem Westen kennen und ging früh zu Öfen über, die heiß genug waren, um flüssiges Gusseisen zu erzeugen.

Topfblasebälge: Pumpt man die Lederbezüge abwechselnd, strömt die Luft ohne Unterbrechung.

In Europa wogen die Luppen jahrhundertelang etwa zwei Kilogramm, klein genug, um sie von Hand zu schmieden. Römische Öfen, bis zu zwei Meter hoch, lieferten Luppen von 10 bis 15 kg, und um 1500 konnten wassergetriebene Hämmer Luppen von 100 kg und mehr bearbeiten. Der Hochofen von Lapphyttan in Schweden war bereits seit der Mitte des 12. Jahrhunderts in Betrieb. In den späteren Jahrhunderten des Mittelalters verbreiteten sich Hochöfen stärker und erzeugten um 1500 Gusseisen in großen Mengen; Rennöfen gingen allmählich zurück. Die katalanischen Schmieden in Spanien und Südfrankreich arbeiteten noch Mitte des 19. Jahrhunderts.

Kennzahlen

Ofentemperatur
Etwa 1.100–1.200 °C (reines Eisen schmilzt bei 1.538 °C)

Dauer einer Ofenreise
Etwa 5 Stunden für Beschickung und Ausbrennen in WIRG-Versuchen; Vorheizen zusätzlich

Breitere Nutzung
Um 1200 v. Chr. im Nahen Osten; Verhüttung ist älter

Beschickung
In WIRG-Versuchen etwa 1 kg Erz und 1 kg Holzkohle je Charge, alle 10–15 Minuten

Größe der Luppe
Etwa 2 kg in der frühen Eisenzeit, 10–15 kg in römischen Öfen

Quellen

1. Bloomery · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Bloomery
2. Iron and Steel in Early Europe · H. Föll, Kiel University https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_a/backbone/ra_3_1.html
3. Experimental Bloomery 4: The smelt · Wealden Iron Research Group https://www.wealdeniron.org.uk/?p=930
4. Questioning Diversity (of Iron) in the Workplace: Bloomery Iron, Cast Iron, China and the West (Liu & Wood, 2025) · Internet Archaeology 69 https://www.intarch.ac.uk/journal/issue69/14/full-text.html
5. Kaman-Kalehöyük · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Kaman-Kaleh%C3%B6y%C3%BCk
6. The explosion of No. 5 Blast Furnace, Corus UK Ltd, Port Talbot · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/pubns/web34.pdf
7. Lee Sauder and Skip Williams Smelt Iron · H. Föll, Kiel University https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_a/advanced/aa_2_5.html
8. Experimental Bloomery Ironmaking: The Bloom · Wealden Iron Research Group https://www.wealdeniron.org.uk/Expt/bloom.htm
9. Experimental Bloomery Ironmaking: The Smelt · Wealden Iron Research Group https://www.wealdeniron.org.uk/Expt/smelt.htm
10. Medieval Iron in Society (Rapport H 34) · Jernkontoret https://www.jernkontoret.se/en/publications/history-of-mining-and-metallurgy1/Publications/rapport-h-34/
11. The Innovation and Adoption of Iron in the Ancient Near East (Erb-Satullo, 2019) · Journal of Archaeological Research, Springer Nature https://link.springer.com/article/10.1007/s10814-019-09129-6
12. Flow Rates · Darrell Markewitz, Wareham Forge https://www.warehamforge.ca/ironsmelting/flowrates.html
13. Experimental Iron Smelting: Norse Bellows Air · Darrell Markewitz, Wareham Forge https://warehamforge.ca/ironsmelting/norse-air.html
14. The St Fagans Experimental Bloomery: the First Six Years (Young, 2005) · Historical Metallurgy Society News 59 https://historicalmetallurgy.org/media/pjwd2b5o/hmsnews59.pdf

Fakten geprüft am 2026-10-12

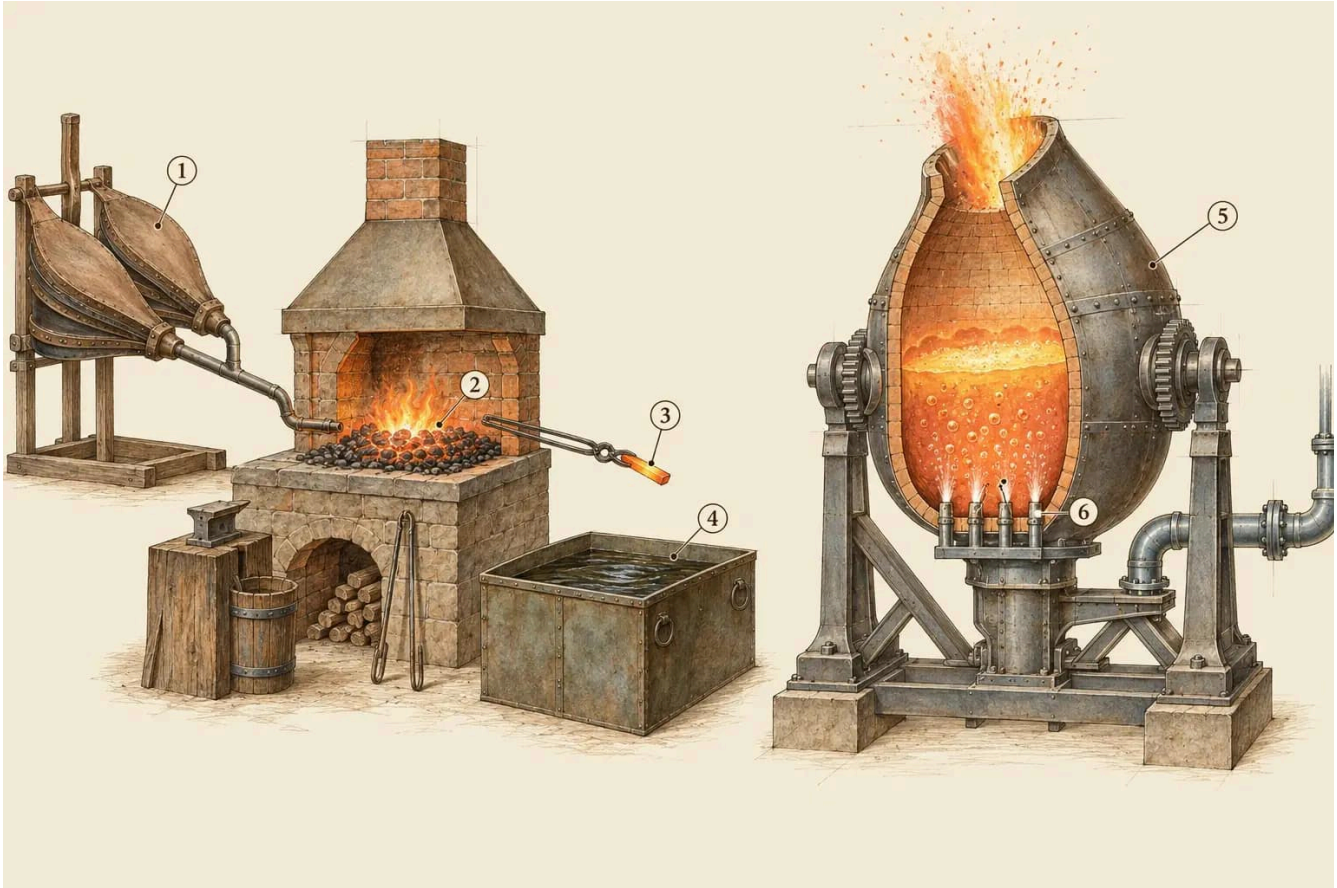
Stahl

Eisen mit genau dosiertem Kohlenstoff

um 1.000 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Eisenverhüttung (S. 138), Holzkohle (S. 65)

Führt zu: Verbrennungsmotor (S. 318), Magnetkompass (S. 196), Druckerpresse (S. 208), Stahlbeton (S. 313), Nähmaschine (S. 273), Dampfturbine (S. 330), Wasserturbine (S. 268), Windkraftanlage (S. 344)



1 Blasebalg 2 Schmiedeesse 3 Heißer Stahl in der Zange 4 Abschreckbecken 5 Bessemerbirne 6 Luftdüsen im Boden der Birne

Stahl ist Eisen mit einem kleinen, gezielt eingestellten Anteil Kohlenstoff, meist zwischen etwa 0,1 und 1,5 %. Er lässt sich heiß schmieden; mit genug Kohlenstoff wird er durch Erhitzen und Abschrecken hart und durch Anlassen danach zäher, wobei er etwas Härte verliert.

Was es ist

Reines Eisen ist weich: Ein Messer daraus verbiegt sich und wird schnell stumpf. Gibt man etwas Kohlenstoff hinzu, einige Zehntel Prozent bis etwa anderthalb, lässt sich das Metall weiterhin heiß schmieden. Enthält es genug davon, wird es, glühend in Wasser oder Öl getaucht, hart genug, um Eisen zu schneiden. Diese Legierung ist Stahl.

Mit seinem Kohlenstoffgehalt liegt er zwischen zwei anderen Werkstoffen. Schmiedeeisen enthält fast keinen Kohlenstoff: Es ist zäh und gut schweißbar, lässt sich aber nicht härten. Gusseisen enthält 2 bis 4 %: Es lässt sich in

Formen gießen, ist aber spröde und nicht schmiedbar. Stahl dagegen macht der Schmied durch Erhitzen und Abkühlen hart oder zäh. Heute ist er mit großem Abstand das meistverwendete Metall.

Wie es funktioniert

Kohlenstoffatome sind klein und sitzen in den Lücken zwischen den Eisenatomen. Kaltes Eisen nimmt kaum Kohlenstoff auf, der Überschuss bildet hartes Eisenkarbid. In langsam abgekühltem Stahl liegt es in dünnen Lamellen zwischen weichem Eisen, ein festes Gefüge, das sich noch feilen lässt.

Oberhalb von etwa 727 °C beginnt sich das Eisengitter in eine Form umzuordnen, die Kohlenstoff löst. Sobald die Umwandlung abgeschlossen ist, haftet kein Magnet mehr. Welche Temperatur und Haltezeit nötig sind, damit genug Karbid in Lösung geht, hängt von der Stahlsorte ab. Kühlt der Stahl langsam ab, scheidet sich der Kohlenstoff wieder als Karbid aus. Beim Abschrecken bleibt dafür keine Zeit: Er sitzt in einem verspannten Gitter fest, dem Martensit, sehr hart und spröde wie Glas.

Deshalb wird der Stahl angelassen: auf etwa 200 bis 350 °C wiedererwärmt. Die Spannung lässt nach, und er wird bei etwas geringerer Härte viel zäher. Auf blankem Stahl bildet sich dabei eine dünne Oxidschicht, deren Farbe der Temperatur folgt, von hellem Strohgelb bei etwa 210 °C über Braun und Purpur bis Dunkelblau bei etwa 290 °C. Diese Farben, die auch von Zeit und Oberfläche abhängen, waren lange der grobe Anhaltspunkt des Schmieds: Strohgelb für ein Rasiermesser oder einen Stechbeitel, Purpur bis Blau für eine Feder. Weichglühen, also Erhitzen und sehr langsames Abkühlen, ergibt dagegen den weichsten Zustand, der sich leicht sägen und feilen lässt.

Wird der Schaft erhitzt, wandern die Farben zur Schneide; der Schmied kühlt das Werkzeug, sobald die richtige dort ankommt.

Unter etwa 0,3 % Kohlenstoff härtet Stahl kaum; mehr Kohlenstoff macht ihn härter, aber weniger schlagzäh. Eisen, das in Holzkohle verpackt stundenlang rotglühend gehalten wird, nimmt an der Oberfläche Kohlenstoff auf. Wird es danach abgeschreckt, erhält es eine harte Haut über einem zähen Kern: Das ist Einsatzhärten.

Bauanleitung

Die Wärmebehandlung ist der Teil der Stahlherstellung, den eine kleine Werkstatt leisten kann. Man beginnt mit einem Stab aus bekanntem unlegiertem Werkzeugstahl mit hohem Kohlenstoffgehalt und hebt das Datenblatt des Lieferanten auf: Es nennt Temperaturen, Haltezeiten und Abschreckmittel genau. Eine alte Feile ist die traditionelle Quelle, doch ihr Stahl ist unbekannt, und manche billige Feile ist nur an der Oberfläche gehärtet.

Weichglühen und formen. Den Stab so weichglühen, wie es das Datenblatt angibt. Der traditionelle Weg, ihn auf dunkle Rotglut zu bringen und über Nacht in Holzasche abkühlen zu lassen, ist nur ungefähr. Den weichen Stab zu einem kleinen Durchschlag oder Flachmeißel schleifen und dabei kühl halten.

Härten. Das Arbeitsende gleichmäßig im Holzkohlefeuer oder mit dem Gasbrenner erhitzen. Die alte Regel lautet: bis ein Magnet nicht mehr haftet, dann noch etwas weiter, bis kirschrot im Schatten; Temperatur und Haltezeit aus dem Datenblatt sind verlässlicher. Das Stück gerade und vollständig in das dort genannte Abschreckmittel tauchen, bei kleinem Werkzeug meist Öl, in einem Bad von mehreren Litern, das deutlich unter seinem Flammpunkt bleibt. Das Stück auf und ab bewegen, bis es abgekühlt ist.

Prüfen. Eine neue Feile soll über das gehärtete Ende gleiten, ohne zu greifen. Greift sie, hat vielleicht nur die Oberfläche im Feuer Kohlenstoff verloren, oder das Härten ist misslungen: eine kleine Stelle blank schleifen und erneut prüfen, bevor man wieder erhitzt.

Sofort anlassen. Das Datenblatt nennt Anlasstemperatur und -dauer, die ein Ofen am besten einhält: Üblich ist eine Stunde bei Temperatur, Abkühlen auf Raumtemperatur und eine zweite Stunde. Der traditionelle Weg ist schneller, aber nur ungefähr. Das Ende mit Schleifpapier blank machen, den Schaft langsam erwärmen und zusehen, wie die Farben zur Spitze wandern. Das Werkzeug kühlen, wenn Braun bis Purpur, etwa 260 bis 270 °C, die Schneide eines Flachmeißels erreicht, oder Strohgelb, etwa 220 °C, die eines Stechbeitels.

> **Sicherheit.** Schmiedehitze verursacht tiefe Verbrennungen, und Stahl unterhalb der Rotglut sieht kalt aus, obwohl er es nicht ist: Jedes Stück als heiß behandeln. Schutzbrille tragen, beim Abschrecken mit Gesichtsschutz darüber, Lederhandschuhe für heiße Stücke, aber nie am Schleifbock, dazu Lederschuhe und Kleidung aus Baumwolle oder Wolle. Im Freien oder bei starker Lüftung arbeiten, denn die Esse gibt Kohlenmonoxid ab und heißes Öl Rauch. Einen Ölbehälter aus Metall mit Metalldeckel griffbereit verwenden und das Werkstück ganz und zügig eintauchen, was Stichflammen begrenzt. Brennt es, den Deckel schließen; nie Wasser auf brennendes Öl gießen oder in heißes Öl gelangen lassen. Einen Pulverlöscher bereithalten. Gehärteten, nicht angelassenen Stahl nie schlagen, biegen, fallen lassen oder zu brechen versuchen: Er kann zerspringen und scharfe Splitter schleudern.

Geschichte und Entwicklung

Fundstücke aus Kaman-Kalehöyük in Anatolien, um 1800 v. Chr., enthalten bereits Stahl, wohl zufällig. Eine Bergmannshacke vom Berg Adir in Galiläa, lange ins 12. Jahrhundert v. Chr. datiert, zeigt ein abgeschrecktes, leicht angelassenes Gefüge, doch ihre Datierung wird inzwischen bezweifelt. Kein einzelner Fund legt den Beginn der absichtlichen Stahlherstellung fest. Diese Tafel setzt ihn als Konvention um 1000 v. Chr. an, die Zeit, in der Eisen in der Levante zwischen etwa 1100 und 900 v. Chr. allgemein in Gebrauch kam.

Ein nach dem Brand zerschlagener Tiegel und der Stahlkuchen, den er enthielt.

In Südindien wurde Eisen mit kohlenstoffreichem Material in Tontiegeln eingeschlossen und zu gleichmäßigen Kuchen mit 1 bis 1,5 % Kohlenstoff geschmolzen; Tiegel aus Kodumanal in Tamil Nadu stammen etwa aus dem 2. Jahrhundert v. Chr. Dieser Tiegelstahl, später in Europa Wootz genannt, ist der Stahl der gemusterten Klingen, die als Damaszenerstahl bekannt sind. In Sri Lanka erzeugten Öfen an Berghängen, vom Monsun angeblasen, vom 7. bis zum 11. Jahrhundert Stahl, vielleicht für den Handel über den Indischen Ozean.

China ging noch einen anderen Weg. Ein Grab des Staates Yan aus dem frühen 3. Jahrhundert v. Chr. enthält schon gehärteten Stahl, doch chinesisches Eisen war damals meist Gusseisen. Entzog man ihm Kohlenstoff, entstanden weichere Metalle: Tagelang an der Luft heiß gehalten oder in einem Frischherd unter dem Gebläse gerührt, wurde Gusseisen zu Stahl oder Schmiedeeisen. Ausgegrabene Frischherde stammen aus dem 1. Jahrhundert v. Chr.

Im frühneuzeitlichen Europa wurde zementiert, ein zuerst in Deutschland entwickeltes Verfahren. In Derwentcote in England lagen ab etwa 1730 Stäbe aus schwedischem Eisen in Holzkohle sechs bis zehn Tage bei über 1.100 °C; den Blasenstahl bündelte man und verschweißte ihn im Feuer zu Gerbstahl. Um 1740 schmolz der Uhrmacher Benjamin Huntsman Blasenstahl in Tiegeln und goss ihn zu gleichmäßigem Stahl.

1856 blies Henry Bessemer Luft durch flüssiges Roheisen: Kohlenstoff und Silizium verbrannten, und ihre Wärme hielt das Metall flüssig. In den 1860er-Jahren folgten Siemens-Martin-Öfen. 1952 gingen in Linz in Österreich Konverter in Betrieb, die mit reinem Sauerstoff blasen; sie erzeugen bis heute den Großteil des Stahls, Elektroöfen, die vor allem Schrott schmelzen, etwa 29 %.

In der Zementierkiste liegen die Eisenstäbe eine Woche oder länger in Holzkohle und kommen mit Blasen bedeckt heraus.

Kennzahlen

Kohlenstoff
Etwa 0,1–1,5 %; Schmiedeeisen hat weniger, Gusseisen 2–4 %

Anlassfarben
Strohgelb bei etwa 220 °C, Purpur bei etwa 270 °C, Dunkelblau bei etwa 290 °C

Weltproduktion 2024
Rund 1,9 Milliarden Tonnen, davon 29 % aus Elektroöfen

Härtetemperatur
Die Umwandlung beginnt bei etwa 727 °C; jede Sorte hat ihre eigene Härtetemperatur und Haltezeit

Bessemer-Blasen
Etwa 15 Tonnen Roheisen in 10–20 Minuten zu Stahl

Quellen

1. Iron and Steel in Early Europe · H. Föll, Kiel University https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_a/backbone/ra_3_1.html
2. A Brief History of Martensites · Sethna group, Cornell University https://sethna.lassp.cornell.edu/Tweed/Martensite_History.html
3. The Transition from Bronze to Iron in Canaan: Chronology, Technology, and Context (Yahalom-Mack & Eliyahu-Behar, 2015) · Radiocarbon, Cambridge University Press https://doi.org/10.2458/azu_rc.57.18563
4. Early iron in China, Korea, and Japan (Wagner) · Donald B. Wagner https://donwagner.dk/KoreanFe/KoreanFe.html
5. Crucible steel in South India: preliminary investigations on crucibles from some newly identified sites (Srinivasan & Griffiths) · MRS Online Proceedings Library, Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-online-proceedings-library-archive/article/abs/crucible-steel-in-south-indiapreliminary-investigations-on-crucibles-from-some-newly-identified-sites/0C7F9DB996F0DD5758502D8F62201947
6. Wootz Crucible Steel: A Newly Discovered Production Site in South India (Srinivasan, 1994) · Papers from the Institute of Archaeology, UCL https://student-journals.ucl.ac.uk/pia/article/id/164
7. Wind-Powered Furnaces · Archaeology, Archaeological Institute of America https://archive.archaeology.org/9609/newsbriefs/srilanka.html
8. History of Derwentcote Steel Furnace · English Heritage https://www.english-heritage.org.uk/visit/places/derwentcote-steel-furnace/history/
9. A Crucible of Steel History · West Yorkshire Steel https://westyorkssteel.com/blog/a-crucible-of-steel-history
10. Bessemer Process · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/Bessemer_Process
11. Bessemer Converter · Sheffield Museums https://www.sheffieldmuseums.org.uk/whats-on/bessemer-converter/
12. The history of LD steelmaking: back to the roots · Primetals Technologies https://www.primetals.com/en/metals-magazine/the-history-of-ld-steelmaking-back-to-the-roots/
13. 60 years of the Linz-Donawitz (LD) process · voestalpine https://www.voestalpine.com/stahl/en/Stories/60-years-of-the-Linz-Donawitz-LD-process
14. The share of EAF in global steel production in 2024 increased to 29.1% (worldsteel data) · GMK Center https://gmk.center/en/news/the-share-of-eaf-in-global-steel-production-in-2024-increased-to-29-1/
15. Austenitizing, Magnetism, and Heat Treating · Larrin Thomas, Knife Steel Nerds https://knifesteelnerds.com/2019/03/18/magnet-heat-treating/
16. Steel Tempering Temperatures: Colour Chart · West Yorkshire Steel https://westyorkssteel.com/technical-information/steel-heat-treatment/tempering-temperatures

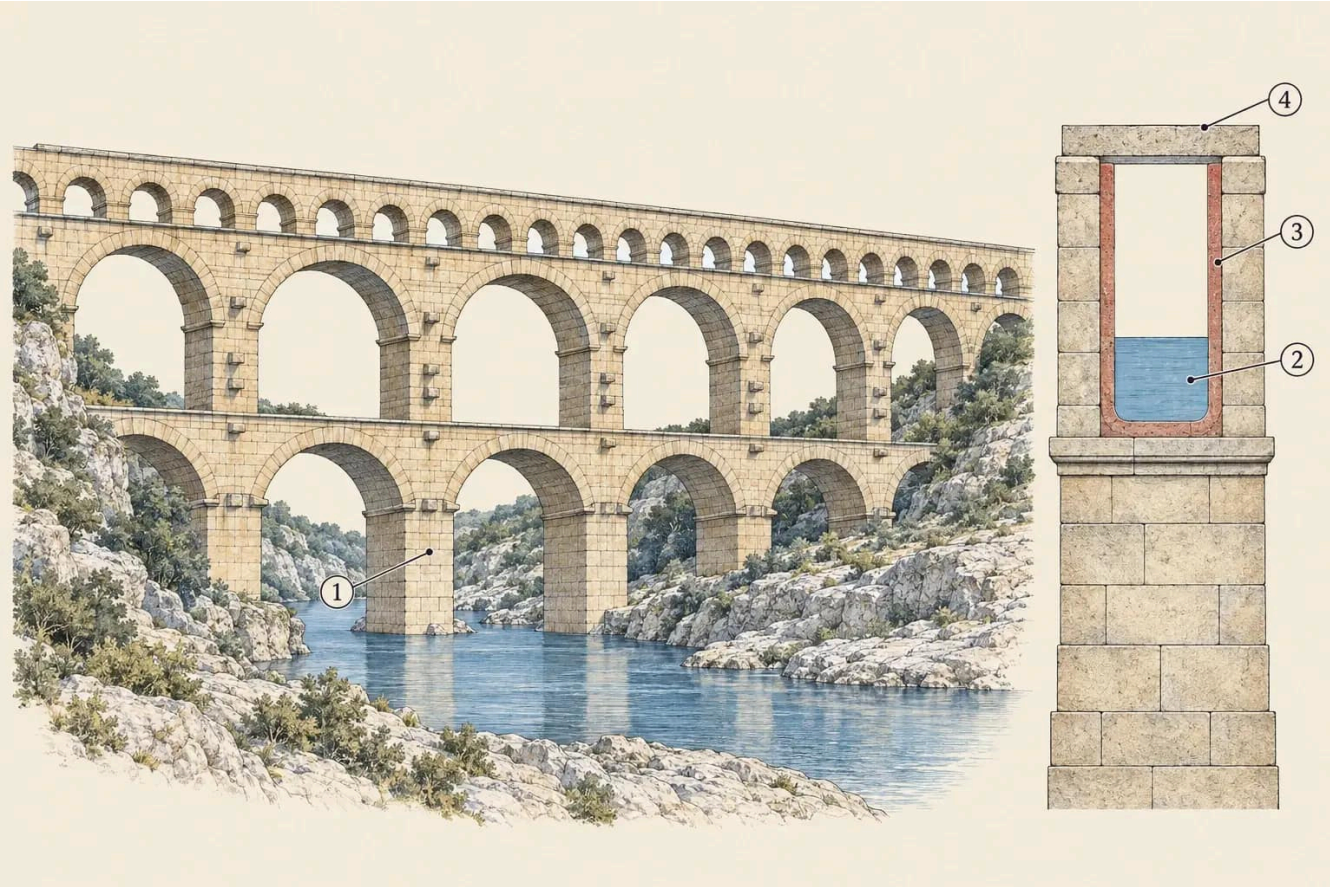
Fakten geprüft am 2026-10-14

Aquädukt

Wasser, allein von der Schwerkraft geführt

um 690 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Ziegel (S. 40), Maße und Gewichte (S. 129), Kalk und Kalkmörtel (S. 31), Bewässerung (S. 52), Bogen und Gewölbe (S. 74)



1 Arkaden (Pfeiler und Bögen) 2 Wasserkanal (specus) 3 Wasserdichter Putz (opus signinum) 4 Deckplatten

Ein Aquädukt leitet Wasser von einer fernen Quelle in eine Stadt, und zwar in einem Kanal, der auf ganzer Länge ganz leicht abfällt, sodass allein die Schwerkraft das Wasser in Bewegung hält. Die Römer bauten Hunderte davon, in Tunneln, in überdeckten Gräben und auf Bogenreihen wie dem Pont du Gard; manche lieferten Zehntausende Kubikmeter am Tag.

Was es ist

Ein Aquädukt ist ein künstlicher Wasserlauf, der Wasser von einer Quelle dorthin bringt, wo Menschen es brauchen. Den größten Teil seiner Strecke sieht man nicht: ein überdeckter Kanal aus Stein oder Beton, der in einem Graben oder Tunnel am Hang entlangläuft. Die hohen Bogenreihen, an die man zuerst denkt, stehen nur dort, wo der Kanal ein Tal überqueren musste, ohne an Höhe zu verlieren.

Die Tafel zeigt eine solche Talbrücke, wie sie im 1. Jahrhundert n. Chr. bei Nîmes über den Gardon gebaut wurde. Der Kanal verläuft auf der obersten Bogenreihe.

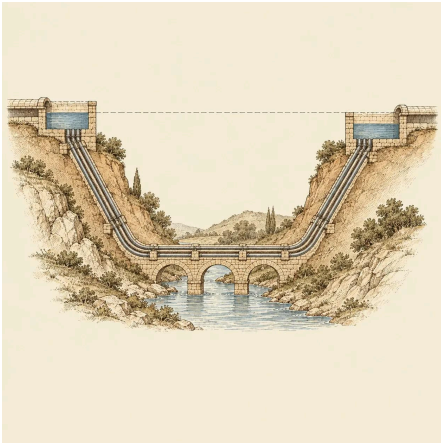
Wie es funktioniert

Wo das Wasser in einem offenen Gerinne fließt, also auf dem größten Teil eines Aquädukts, muss der Kanal von der Quelle bis zur Stadt stetig fallen, darf nie ansteigen und nie zu steil werden. Bei zu wenig Gefälle fließt das Wasser träge und lagert seinen Schlamm ab, bei zu viel greift es den Putz an. Der Aquädukt von Nîmes ist etwa 50 km lang und verliert zwischen Quelle und Stadt nur 12 bis 13 m (die Messungen weichen leicht ab), im Mittel also rund 25 cm pro Kilometer, auf manchen Abschnitten deutlich weniger. Auf dem Pont du Gard selbst beträgt das Gefälle nur wenige Zentimeter.

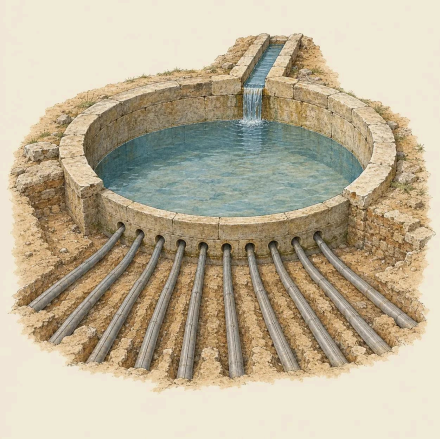
Der Kanal, specus genannt, war meist etwa so breit wie ein Mann und etwas höher, damit Arbeiter hineingehen und ihn reinigen konnten. Boden und Wände trugen opus signinum, einen Kalkmörtel mit zerstoßenen Ziegeln und Scherben, der hart abbindet und dicht hält. Gerundete Wülste am Fuß der Wände schlossen die Ecken, wo Lecks zuerst entstehen. Steinplatten oder ein Gewölbe deckten den Kanal ab, hielten Schmutz und Sonne fern und verhinderten, dass sich das Wasser erwärmte.

Ein solches Gefälle über Dutzende Kilometer abzustecken, war Sache der Vermesser. Vitruv beschreibt im späten 1. Jahrhundert v. Chr. den Chorobat, einen langen Holztisch, an dessen Loten, bei Wind an einer mit Wasser gefüllten Rinne, man ablesen konnte, ob er waagrecht stand. Mit ihm und mit Visierstangen übertrug ein Trupp eine Höhenlinie durch die ganze Landschaft und markierte das Gefälle an Pflöcken.

Tiefe Täler ließen sich auch mit einem Düker, einer Druckleitung, überwinden. Das Wasser floss in ein Becken am diesseitigen Hang, lief durch dichte Bleirohre hinab, querte die Talsohle auf einer niedrigen Brücke und stieg am Gegenhang zu einem zweiten, etwas tiefer gelegenen Becken auf. Schon Vitruv beschreibt diese Anordnung und nennt die lange, fast waagrechte Strecke über die Talsohle venter, den Bauch. Düker sparten Mauerwerk, doch das Blei war teuer, und die Verbindungen mussten hohem Druck standhalten. Nach der üblichen Übersetzung sieht sein Text auch Entlüftungen vor, durch die eingeschlossene Luft entweicht; was sein Fachwort genau meint, ist allerdings umstritten. Für gewöhnliche Leitungen zog er Tonrohre vor, weil er Wasser aus Bleirohren für ungesund hielt.



Ein Düker: Das Wasser steigt am Gegenhang wieder an, aber nie ganz bis auf seine Ausgangshöhe.



Das runde Verteilerbecken von Nîmes, aus dem zehn Bleirohre das Wasser in die Stadtviertel führten.

In der Stadt erreichte das Wasser ein Verteilerbauwerk, das castellum. Vitruv beschreibt eines, das in drei Teile gegliedert ist, mit getrennten Abgängen für die öffentlichen Brunnen, die Thermen und die Privathäuser, so angelegt, dass die Brunnen als letzte trockenfielen. Das erhaltene in Nîmes ist ein rundes Becken von etwa 5,5 m Durchmesser, aus dem zehn Bleirohre die Viertel versorgten. Das Wasser floss Tag und Nacht; was nicht gebraucht wurde, spülte die Abwasserkanäle. Vitruv fügt hinzu, dass die Abgaben der Privathaushalte den Unterhalt des Aquädukts bezahlen sollten. Für Nîmes reichen die Schätzungen der Wassermenge von etwa 20.000 bis 40.000 m^3 am Tag, und das Wasser brauchte rund einen Tag von der Quelle bis in die Stadt.

Wie man ihn baut

Große römische Aquädukte verlangten öffentliche Mittel, geübte Vermesser und große Bautrupps. Im Gartenmaßstab bringen dieselben Grundsätze Wasser ohne Pumpe von einer Quelle oder einem Regenwassertank zu einem Teich oder Beet.

Höhen ermitteln. Markieren Sie Quelle und Ziel und messen Sie den Höhenunterschied. Ein durchsichtiger, mit Wasser gefüllter Schlauch dient als moderner Chorobat: An beiden Enden steht das Wasser gleich hoch. Setzen Sie alle paar Meter einen Pflock und notieren Sie dessen Höhe.

Der Chorobat: ein Nivelliertisch von etwa 20 römischen Fuß, geprüft mit Loten oder mit Wasser in einer Rinne.

Gefälle festlegen. Ein glatter Kanal mit sauberem Wasser braucht meist einige Millimeter Gefälle pro Meter; bemessen Sie ihn für die erwartete Wassermenge und vermeiden Sie steile Abschnitte, auf denen das Wasser zu schnell flösse. Verteilen Sie das Gefälle so gleichmäßig, wie es das Gelände erlaubt, und folgen Sie lieber in einem Bogen der Höhenlinie, als eine Kuppe zu überqueren, an der das Wasser stehen bliebe.

Graben und Kanal verlegen. Heben Sie den Graben auf die markierten Tiefen aus, verdichten Sie die Sohle und verlegen Sie den Kanal: Halbschalen aus gebranntem Ton, eine gemauerte Rinne mit einem Putz aus hydraulischem Kalk- oder Zementmörtel, der vor dem ersten Wasser aushärten muss, oder einfach ein Rohr. Prüfen Sie das Gefälle an jeder Verbindung mit dem Schlauch. Bei Mauerwerk die Fugen abdichten und die Innenecken ausrunden.

Absetzbecken einbauen. Bauen Sie gleich hinter der Quelle ein kleines Becken, in dem das Wasser langsamer wird und seinen Sand ablagert, bevor es in den Kanal fließt. Ein Gitter hält Laub zurück, ein Überlauf verhindert, dass ein Hochwasser die Anlage sprengt.

Abdecken. Schließen Sie den Kanal mit Platten oder Ziegeln. Abgedecktes Wasser bleibt sauberer und kühler, und es wachsen weniger Algen darin.

> **Sicherheit.** Grabenwände können einstürzen, besonders in lockerem oder nassem Boden: vor der Arbeit in einem tiefen Graben abstützen oder abschrägen und nie allein darin arbeiten. Für Wasser, das Menschen oder Tiere trinken, keine Bleirohre und kein Bleilot verwenden, und die Anlage als Nicht-Trinkwasser betrachten: Das Wasser nicht trinken. Kalkmörtel ist ätzend: Handschuhe und Schutzbrille tragen, beim trockenen Mischen von Kalk auch eine Staubmaske. Jedes offene Becken ist für kleine Kinder eine Ertrinkungsgefahr: einzäunen oder abdecken. Bögen oder Mauern über Kopfhöhe bedeuten Arbeit in der Höhe mit schweren Steinen: ein richtiges Gerüst verwenden und einen Maurer um Rat fragen.

Geschichte und Entwicklung

Wasserleitungen sind viel älter als Rom. Der assyrische König Sanherib ließ zwischen etwa 703 und 690 v. Chr. einen Kanal nach Ninive bauen, der bei Jerwan ein Tal auf einer über 280 m langen Kalksteinbrücke überquerte. Sie gilt oft als älteste bekannte Aquäduktbrücke.

Roms erster Aquädukt, die Aqua Appia, wurde 312 v. Chr. unter dem Zensor Appius Claudius Caecus begonnen, der auch die Via Appia anlegte. Er war etwa 16,5 km lang und lag fast vollständig unter der Erde. Weitere folgten: der Anio Vetus 272 v. Chr., die über 90 km lange Aqua Marcia 144 v. Chr., schließlich Aqua Claudia und Anio Novus,

vollendet 52 n. Chr. Ende des 1. Jahrhunderts ernannte Kaiser Nerva Frontinus zum Wasserbeauftragten; seine Schrift verzeichnet neun Aquädukte der Stadt mit ihren Längen und den Betrügereien, auf die er stieß.

Der Pont du Gard entstand wahrscheinlich zwischen etwa 40 und 60 n. Chr., manche Untersuchungen dehnen den Zeitraum bis 80 aus. Seine drei Reihen haben 6, 11 und 35 Bögen; 12 weitere der obersten Reihe sind verloren. Die großen Kalksteinblöcke seiner Bögen, manche bis zu 6 Tonnen schwer, liegen ohne Mörtel aufeinander. Der Aquädukt von Nîmes fiel außer Betrieb, als Ablagerungen und Wurzeln ihn verstopften, vermutlich bis zum 6. Jahrhundert. Die Brücke blieb auch deshalb erhalten, weil man sie als Flussübergang nutzte; 1743–1747 setzte Henri Pitot eine Straßenbrücke an ihre unterste Reihe, seit 1985 ist sie Welterbe.

Mittelalterliche Städte und Klöster bauten kleinere Aquädukte, und moderne Versorgungsnetze verbinden Freispiegelkanäle und Stollen mit Druckleitungen, Pumpen und Hochbehältern. Ein gleichmäßiges, sanftes Gefälle bestimmt bis heute Kanäle, Abwassersysteme und andere Leitungen, in denen das Wasser durch Schwerkraft fließt.

Kennzahlen

Erster Aquädukt Roms
Aqua Appia, 312 v. Chr., etwa 16,5 km, fast ganz unterirdisch

Pont du Gard
Etwa 48 m hoch, drei Bogenreihen, erbaut um 40–60 n. Chr.

Aquädukt von Nîmes
Etwa 50 km lang bei 12 bis 13 m Gefälle (rund 25 cm pro km)

Geschätzte Wassermenge in Nîmes
Etwa 20.000 bis 40.000 m^3 am Tag (Schätzungen schwanken)

Quellen

1. Jerwan Aqueduct · Columbia University, Media Center for Art History https://mcid.mcah.columbia.edu/mapping-mesopotamian-monuments/jerwan-aqueduct
2. Frontinus, De aquis urbis Romae, Book I (trans. R. H. Rodgers) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Frontinus/De_Aquis/Rodgers/1**.html
3. Vitruvius, The Ten Books on Architecture, Book VIII · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/8*.html
4. Pont du Gard · Structurae https://structurae.net/fr/ouvrages/pont-du-gard
5. Nîmes: the castellum · Archaeology Magazine (Archaeological Institute of America) https://archive.archaeology.org/onsite/provence/nimes2.html
6. Pont du Gard · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Pont_du_Gard
7. Roman hydraulic engineering: the Pont du Gard aqueduct and Nemausus (Nîmes) castellum (Water, 2021) · MDPI https://www.mdpi.com/2073-4441/13/1/54
8. Hydraulics of Roman aqueducts: myths, fables, realities · University of Queensland (H. Chanson) https://staff.civil.uq.edu.au/h.chanson/rom_aq.html
9. Pont du Gard · Wikipédia https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont_du_Gard
10. Manning's n table (after Chow, Open-channel hydraulics, 1959) · San Diego State University (V. M. Ponce) https://ponce.sdsu.edu/open_channel_hydraulics_05_manningsntable.html

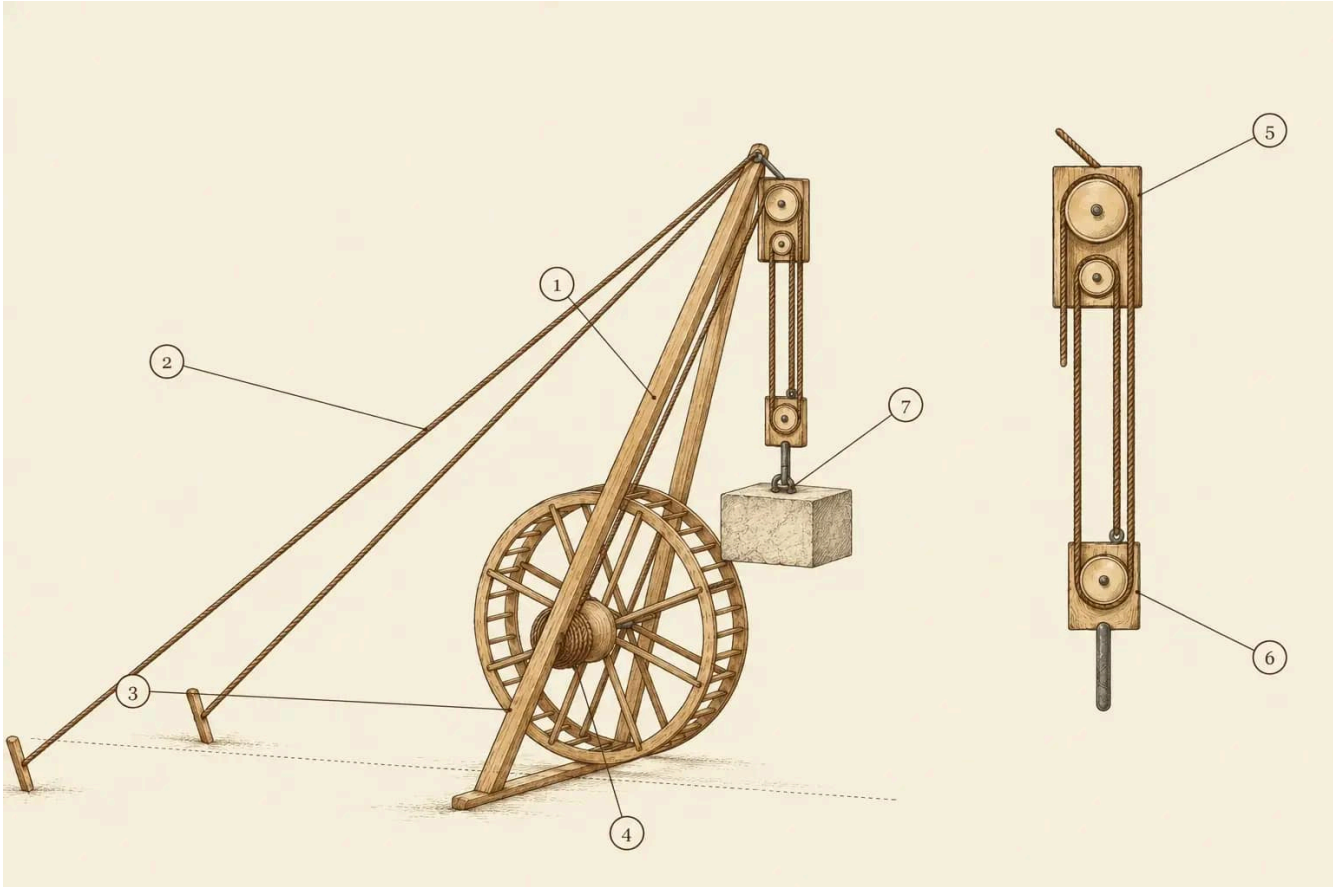
Fakten geprüft am 2026-10-12

Kran & Flaschenzug

Mehr heben, als man wiegt

um 515 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Seil & Schnur (S. 13), Rad & Achse (S. 83)



1 Bein des Holzgestells 2 Abspannseil 3 Tretrad 4 Seiltrommel 5 Obere Flasche mit zwei Rollen
6 Untere Flasche mit einer Rolle 7 Wolf im Stein

Ein Kran hebt eine Last, indem er Weg gegen Kraft eintauscht: Ein Seil läuft über mehrere Rollen und auf eine Trommel, die eine Winde oder ein Tretrad dreht, sodass wenige Menschen einen Stein heben, der ein Vielfaches ihres Gewichts wiegt. Griechische Baumeister nutzten Kräne seit dem späten 6. Jahrhundert v. Chr.; Römer und mittelalterliche Bauleute errichteten damit Tempel und Kathedralen und beluden Schiffe.

Was es ist

Ein Kran ist ein Gerüst, das eine Last in der Luft hält, während Menschen oder Maschinen sie heben. Der antike Kran bestand aus drei Teilen: einem Holzgestell oder Mast, gehalten von Abspannseilen, einem Satz Rollen an seiner Spitze und einer Winde an seinem Fuß. Die Winde war eine waagrechte Welle, die man mit Hebeln drehte, oder ein großes Rad, in dem Männer liefen: das Tretrad.

Jedes seiner Teile, Hebel, Rad und Seil, ist älter als der Kran. Er verbindet sie so, dass die kleine Kraft weniger Menschen, über einen langen Weg aufgebracht, zu einer großen Kraft über einen kurzen Weg wird.

Wie es funktioniert

Eine einzelne feste Rolle ändert nur die Richtung des Zuges. Der Gewinn entsteht, wenn die Last an einer losen Rolle hängt. Das Seil hält sie dann mit zwei Strängen, und jeder trägt die Hälfte des Gewichts. Um den Stein einen Meter zu heben, muss man zwei Meter Seil ziehen, aber mit halber Kraft.

Der einfachste Flaschenzug: Zwei Seilstränge tragen die lose Rolle, man muss nur etwa das halbe Gewicht aufbringen.

Mehr Rollen in beiden Flaschen verteilen die Last auf mehr Stränge. Vitruv benennt im späten 1. Jahrhundert v. Chr. die Flaschenzüge nach der Zahl ihrer Rollen: drei beim Trispastos, fünf beim Pentaspastos, viele beim Polyspastos. Mit fünf Strängen hält ein Zug, der dem Gewicht von 20 kg entspricht, etwa 100 kg, ohne Reibung gerechnet. Die Reibung in den Rollenachsen frisst einen Teil des Gewinns, und zwar umso mehr, je mehr Rollen man hinzufügt.

Die Winde vervielfacht die Kraft ein zweites Mal. Ein Seil auf einer dünnen Welle, die mit langen Hebeln gedreht wird, wirkt wie ein Wellrad: Sind die Hebel zehnmal so lang wie der Radius der Welle, ist die Kraft am Seil zehnmal so groß wie die an den Hebeln. Das Tretrad funktioniert genauso, nur ist das Gewicht der Männer, die darin laufen, die treibende Kraft. Für sehr schwere Lasten beschreibt Vitruv eine Trommel, breit genug, dass Männer darin gehen können, und kräftiger als ein Spill.

Griechische Hebezange: Zieht man am Ring, pressen sich die Spitzen in die Kerben im Block.

Die Last muss auch gefasst werden. Griechische Baumeister schlugen Löcher oder U-förmige Rillen für Seile in ihre Blöcke, benutzten eiserne Zangen, deren Spitzen in seitliche Löcher griffen, oder setzten einen Wolf, einen schwalbenschwanzförmigen Eisenkeil, in ein Loch an der Oberseite. Diese Spuren, an Tempelsteinen noch heute zu sehen, sind der wichtigste Beleg für den Einsatz von Kränen. Vitruv beschreibt eiserne Zangen unter der unteren Flasche, deren Zähne in Löcher im Stein greifen. Baukräne dieser Art hatten kaum seitliche Reichweite; man setzte einen Block daher nahe an seinem Platz ab und schob ihn mit Hebeln in die richtige Lage.

Wie man ihn baut

Ein Tischmodell zeigt, wie Rollen und Winde die Kraft vervielfachen. Halten Sie es klein: Es ist ein Anschauungsmodell, kein Hebegerät.

Das Gestell bauen. Binden Sie zwei Rundhölzer oder Besenstiele von etwa 1 m Länge nahe dem oberen Ende zusammen, stellen Sie die Füße etwa 50 cm auseinander auf ein Grundbrett und schrauben Sie sie fest. Spannen Sie das Brett mit Zwingen an einen stabilen Tisch, damit das Modell nicht kippen kann, und spannen Sie zwei Halteschnüre von der Spitze zu Ösen hinten am Brett, sodass sich das Gestell leicht nach vorn neigt, die Last aber über dem Brett hängt.

Den Flaschenzug einscheren. Hängen Sie oben eine kleine Flasche mit zwei Rollen auf, darunter eine Flasche mit einer Rolle. Binden Sie eine kräftige Schnur oben an die untere Flasche, führen Sie sie über eine obere Rolle, unter der unteren Rolle durch und über die zweite obere Rolle. Nun tragen drei Stränge die untere Flasche.

Eine Winde anbringen. Bohren Sie unten durch jedes Bein ein Loch und stecken Sie ein kurzes Rundholz durch beide, sodass es sich frei dreht; kleben Sie an ein Ende eine Kurbel; das freie Schnurende wird erst nach der ersten Messung unten in der Mitte festgebunden. Bohren Sie in ein Bein ein Loch für einen herausnehmbaren Stift: Steckt er, liegt die Kurbel daran an und hält die Last. Halten Sie die Kurbel fest, wann immer Sie den Stift zum Weiterkurbeln herausziehen.

Den Gewinn messen. Machen Sie diese erste Messung, bevor die Schnur an der Welle festgebunden ist. Wiegen Sie die untere Flasche und hängen Sie dann einen Sandbeutel von höchstens 500 g daran. Ziehen Sie langsam und gleichmäßig mit einer Federwaage am freien Ende und heben Sie den Beutel nur einige Dutzend Zentimeter: Die Waage sollte etwas mehr als ein Drittel von Beutel und Flasche zusammen anzeigen, der Rest ist Reibung. Setzen Sie den Beutel ab, binden Sie die Schnur in der Mitte der Welle fest und vergleichen Sie den Weg der Kurbel mit der Höhe, um die der Beutel steigt.

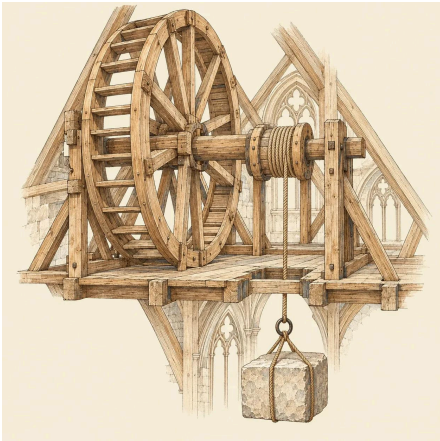
> **Sicherheit.** Die Hand an der Kurbel lassen, solange die Last oben ist: Eine einfache Welle läuft zurück, sobald man sie loslässt. Das Modell so aufstellen, dass ein fallender Beutel weder Hände noch Füße treffen kann, und die Finger von den Rollen und der Wickelwelle fernhalten. Das Modell nicht vergrößern, um schwere Gegenstände zu heben: Echtes Heben verlangt Geräte, die für das Heben und Absenken hängender Lasten zugelassen sind, bedient von Personen, die im Anschlagen ausgebildet sind.

Geschichte und Entwicklung

Die Rolle erscheint auf einem assyrischen Relief des 9. Jahrhunderts v. Chr. Im 7. Jahrhundert v. Chr. schlugen griechische Bauleute in Isthmia und Korinth Seilrillen in Blöcke von 200 bis 400 kg, und manche Forscher meinen, dass man damals schon Hebegestelle erprobte. Üblich wurden Kräne auf griechischen Baustellen um 515 v. Chr., als Spuren für Hebezangen und Wölfe an Tempeln wie dem des Apollon in Delphi auftauchen. Die erste klare schriftliche Beschreibung des Flaschenzugs steht in den Mechanischen Problemen, einer griechischen Schrift des frühen 3. Jahrhunderts v. Chr.

Römische Bauleute nutzten sowohl die Winde als auch das Tretrad. Ein Relief vom Grabmal der Familie der Haterier in Rom, um 100 n. Chr. entstanden, zeigt einen Tretradkran bei der Arbeit. Nach modernen Schätzungen, die einen Flaschenzug mit drei Reihen zu je fünf Rollen annehmen, hob der größte Flaschenzugkran, der Polyspastos, mit vier Männern an der Winde etwa 3 Tonnen und mit einem Tretrad etwa 6 Tonnen. Die schwersten römischen Blöcke, etwa die Architrave von Baalbek, erforderten mehrere Kräne oder andere Mittel.

Tretradkräne tauchen um 1225 wieder in französischen Bauabrechnungen auf, und Hafenkräne sind in Utrecht 1244, Antwerpen 1263 und Brügge 1288 bezeugt. Gotische Baumeister betrieben ihre Hebewerke oft vom Dachstuhl aus, über den Gewölben, die sie gerade bauten, und in englischen Kirchtürmen stehen noch mehrere mittelalterliche Treträder. Der große Hafenkran von Danzig, 1442–1444 erbaut, brannte 1945 aus, sein Holzwerk wurde wiederaufgebaut. 1586 richtete Domenico Fontana den vatikanischen Obelisken auf, geschätzt 330 bis 360 Tonnen schwer, mit einem hölzernen Hebeturm. Ab 1801 trieben zwei Dampfmaschinen die Kräne auf der Baustelle des Londoner Hafenbeckens London Dock an, und in den 1840er-Jahren baute William Armstrong wassergetriebene hydraulische Kräne; Elektromotoren und Stahlausleger kamen später, doch Kräne heben bis heute mit Flaschenzügen und einer Trommel.



Ein mittelalterliches Tretrad über den Gewölben: Das Seil läuft von der Trommel durch eine Öffnung im Boden nach unten.

Kennzahlen

Ältester sicherer Nachweis
Hebespuren an griechischen Tempelblöcken, um 515 v. Chr.

Hafenkran von Danzig
Erbaut 1442–1444, Holzwerk nach 1945 wiederaufgebaut

Römischer Polyspastos (moderne Schätzung)
Etwa 3 t mit vier Männern an der Winde, etwa 6 t mit Tretrad

Vatikanischer Obelisk, 1586
Etwa 330 bis 360 t (Schätzungen schwanken), von Domenico Fontana aufgerichtet

Quellen

1. J. J. Coulton, Lifting in early Greek architecture (Journal of Hellenic Studies 94, 1974) · Society for the Promotion of Hellenic Studies (copy hosted by the University of Athens) https://eclass-b.uoa.gr/modules/document/file.php/BAAG112/630416_Lifting%20in%20Early%20Greek%20Architecture_Coulton_Journal%20of%20Hellenic%20Studies1974.pdf
2. Vitruvius, The Ten Books on Architecture, Book X (hoisting machines) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/10*.html
3. Greek temple ruins suggest lifting machines in use 1.5 centuries earlier than previously believed · University of Notre Dame, via Newswise https://www.newswise.com/articles/greek-temple-ruins-suggest-lifting-machines-in-use-1-5-centuries-earlier-than-previously-believed
4. Rochester Bridge Trust magazine: John Rennie and the London Dock (steam engines working the construction cranes, 1801) · Rochester Bridge Trust https://rbt.org.uk/wp-content/uploads/2021/11/RBT-40pp-A4-Magazine-Single-Pages-Updated.pdf
5. Crane (machine) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Crane_(machine)
6. Treadwheel crane · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Treadwheel_crane
7. Treadwheel crane, Harwich (built 1667): wheels of 16 ft on an axle of 13½ in · The Harwich Society https://www.harwich-society.co.uk/maritime-heritage-trail/treadwheel-crane/
8. Block and tackle (friction: the sheave friction factor of API RP 9B) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Block_and_tackle
9. Human power (sustained output of a labourer, after Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Human_power

Fakten geprüft am 2026-10-12

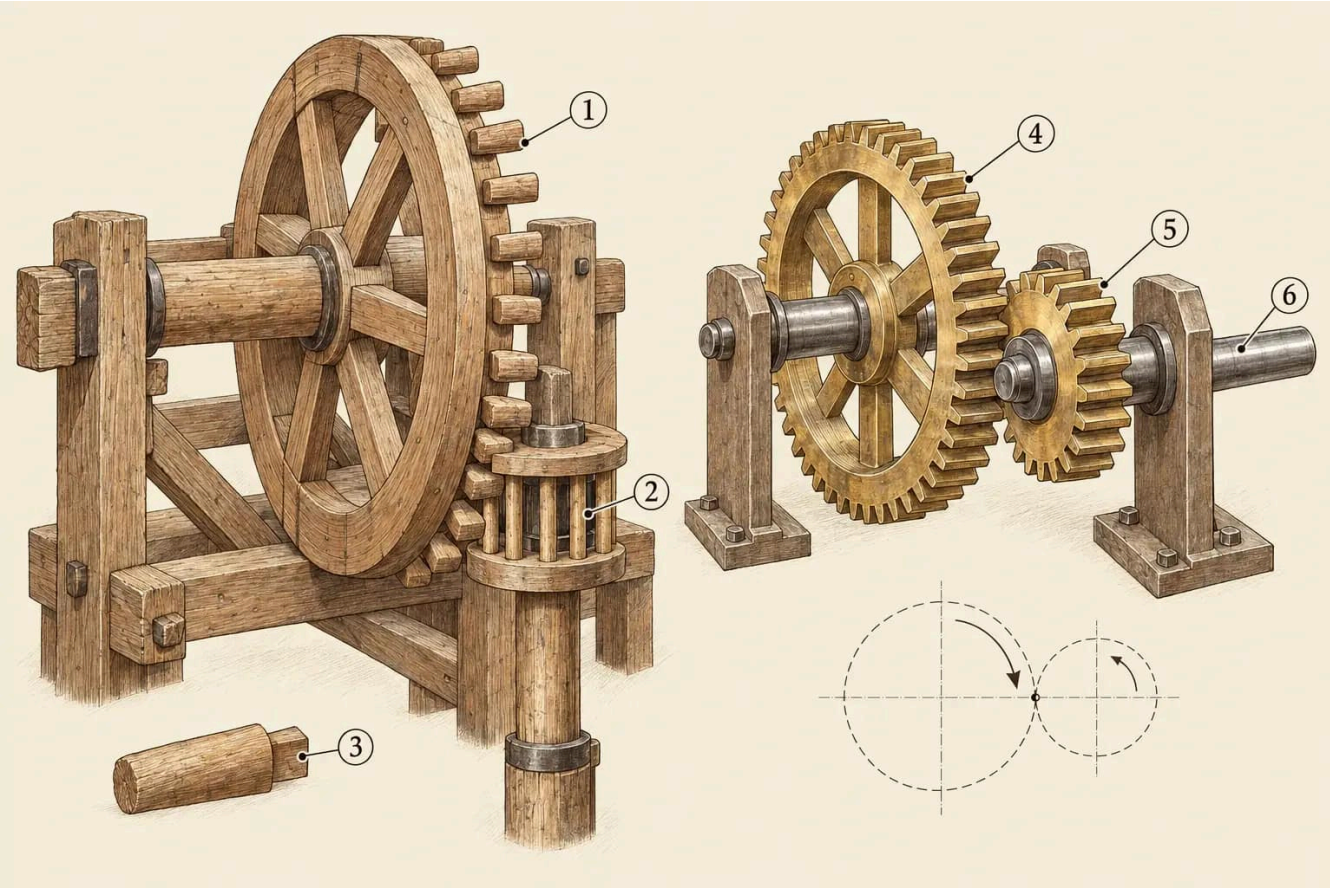
Zahnräder

Zähne tauschen Tempo gegen Kraft

um 300 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Bronze (S. 125)

Führt zu: Räderuhr (S. 204), Nähmaschine (S. 273), Dampfmaschine (S. 230), Wasserrad (S. 160), Windmühle (S. 188)



1 Kammrad mit Holzkämmen 2 Laternenrad 3 Loser Holzkamm 4 Stirnrad 5 Ritzel 6 Welle

Ein Zahnrad ist ein Rad mit Zähnen, die in die Zähne eines anderen Rades greifen, sodass eine Welle eine andere ohne Schlupf antreiben kann. Über die Zähnezahl tauscht der Konstrukteur Drehzahl gegen Kraft, ändert die Drehrichtung oder hält ein genaues Übersetzungsverhältnis ein.

Was es ist

Ein Zahnrad ist ein Rad mit Zähnen am Umfang. Greifen diese Zähne in die eines zweiten Zahnrads, zwingt die Drehung des einen Rades das andere mitzudrehen, und dabei rutscht nichts durch. Zahnräder treiben Mühlen, Uhren, Fahrräder und Autogetriebe an.

Treibt ein kleines Zahnrad ein großes an, dreht sich das große langsamer, aber mit mehr Drehkraft, dem Drehmoment. Zwei ineinandergreifende Stirnräder laufen gegenläufig, und ein Kammrad oder ein Kegelrad lenkt die Bewegung um einen rechten Winkel um. Weil Zähne nicht rutschen können, hält ein Räderwerk außerdem sein Übersetzungsverhältnis über Jahre, und genau darauf ist eine Uhr angewiesen.

Wie es funktioniert

Man nehme zwei Zahnräder mit 60 und 15 Zähnen. Jedes Mal, wenn ein Zahn des großen Rades die Eingriffsstelle passiert, passiert sie auch ein Zahn des kleinen. Eine Umdrehung des großen Rades ergibt also vier Umdrehungen des kleinen. Das Drehzahlverhältnis entspricht dem Verhältnis der Zähnezahlen. Die Leistung, die hineingeht, kommt abzüglich der Reibung wieder heraus, also verhält sich das Drehmoment umgekehrt: Das kleine Rad dreht sich viermal so schnell und hat ein Viertel des Drehmoments.

Die Tafel zeigt zwei Familien. Links das hölzerne Getriebe einer Mühle: Ein Kammrad, in dessen Kranz auf einer Seite Zapfen sitzen, die Kämme, treibt ein Laternenrad an, das aus runden Stöcken zwischen zwei Scheiben besteht. Ein abgenutzter Kamm lässt sich einzeln herausschlagen und ersetzen. Rechts sind Stirnräder aus Metall mit geformten Zähnen auf parallelen Wellen zu sehen.

Mit einfachen Zapfen wird das getriebene Rad bei jedem Zahn, der in Eingriff kommt und wieder austritt, kurz schneller und dann wieder langsamer. Das bringt Lärm, Erschütterungen und Verschleiß. Für eine gleichförmige Übersetzung müssen die Zahnflanken Kurven folgen, die so gewählt sind, dass der Druck zwischen zwei Zähnen immer durch denselben Punkt auf der Verbindungslinie der Wellen geht. Die Zykloide, die man lange in Uhren verwendete, leistet das. Ebenso die Evolvente, also die Kurve, die das Ende eines straff gespannten Fadens beschreibt, wenn man ihn von einem Kreis abwickelt. Evolventenräder halten ihr Verhältnis auch dann, wenn die Wellen etwas zu weit auseinanderliegen, und sie sind leichter herzustellen. Fast alle modernen Zahnräder haben deshalb diese Form.

Jede Umdrehung der Schnecke rückt das Rad um genau einen Zahn weiter.

Eine Schnecke ist eine Schraube, die in ein Zahnrad greift. Sie kann ein oder mehrere Gewindegänge haben. Die abgebildete Schnecke ist eingängig und schiebt das Rad pro Umdrehung um einen Zahn weiter. Bei einem Rad mit 30 Zähnen ergibt das eine Untersetzung von 30 zu 1. Ob das Rad die Schnecke rückwärts antreiben kann, hängt von Geometrie und Reibung ab. Schwingungen können die Selbsthemmung aufheben. Hebezeuge und Winden zum Heben von Lasten brauchen deshalb eine unabhängige Bremse, die die Last hält. Eine Zahnstange, ein gerader gezahnter Stab, wandelt Drehung in geradlinige Bewegung um.

Bauanleitung

Genaue Zahnräder aus Metall erfordern eine Drehbank mit Teilscheibe oder eine Verzahnungsmaschine. Ein hölzernes Kammrad mit Laternenrad, wie es hier skizziert ist, lässt sich mit Handwerkzeug bauen.

Die Übersetzung wählen. Die Zähnezahlen nach der benötigten Abtriebsdrehzahl festlegen, zum Beispiel 45 Kämme und 8 Stöcke, also etwa 5,6 zu 1. Zahlen ohne gemeinsamen Teiler verteilen den Verschleiß, weil jeder Kamm der Reihe nach auf jeden Stock trifft.

Die Teilung anreißen. Kämme und Stöcke müssen genau im selben Abstand stehen, der Teilung, gemessen auf ihren Teilkreisen. Den Kreis anreißen und mit dem Stechzirkel abtragen. Ein Millimeter Fehler pro Schritt summiert sich über den ganzen Umfang.

Das Rad bauen. Den Kranz aus abgelagertem Hartholz wie Eiche fertigen, aus überlappenden Segmenten, damit die Faser der Rundung folgt, und an Armen befestigen, die durch die Welle gezapft sind. An jeder Markierung ein Loch stemmen und Kämme aus dichtem, zähem Holz einschlagen, jeweils mit einem Zapfen, der durch den Kranz reicht und dahinter verkeilt wird. Die arbeitenden Enden abrunden.

Das Laternenrad bauen. Zwei Scheiben auf der Welle befestigen, beide auf demselben Teilkreis bohren und runde Stöcke dazwischen einschlagen.

Den Eingriff einstellen. Beide Wellen so in festen Lagern montieren, dass die Kämme etwa zur Hälfte in die Lücken zwischen den Stöcken reichen, mit etwas Spiel. Die Räder langsam von Hand drehen, Stellen, die klemmen, mit Kreide markieren und nacharbeiten. Die Zähne mit Talg schmieren.

> **Sicherheit.** Ineinandergreifende Zahnräder ziehen Finger, Haare und lose Kleidung genau dort ein, wo die Zähne zusammenkommen. Eine Schutzabdeckung anbringen, Haare und Ärmel zusammenbinden und nie in ein Getriebe greifen, das sich drehen kann: zuerst den Antrieb anhalten und sichern.

Geschichte und Entwicklung

Zahnstange und Ritzel wandeln Drehung in geradlinige Bewegung um.

Die *Mechanischen Probleme*, um 280 v. Chr. in der Schule des Aristoteles verfasst, beschreiben Räder, die sich berühren und gegenläufig drehen, erwähnen aber keine Zähne. Vielleicht waren es glatte Räder, die allein über Reibung liefen. Die ältesten erhaltenen Zahnräder sind kleine Metallräder aus der Zeit der Streitenden Reiche in China, aus dem 4. Jahrhundert v. Chr., die im Museum von Luoyang aufbewahrt werden.

Im Alexandria des 3. Jahrhunderts v. Chr. baute Ktesibios eine Wasseruhr, in der ein steigender Schwimmer eine Stange und Trommeln mit gleichen Zähnen bewegte, wie Vitruv später beschrieb. Archimedes wird um 250 v. Chr. die Schnecke zugeschrieben.

Das größte Fragment des Mechanismus von Antikythera mit seinem vierspeichigen Hauptrad.

Im Jahr 1901 fanden Taucher in einem Wrack vor der griechischen Insel Antikythera das komplexeste Räderwerk, das aus der Antike bekannt ist. Der Mechanismus wurde im 2. oder 1. Jahrhundert v. Chr. gebaut und ist in 82 Fragmenten erhalten, die 30 Zahnräder aus Bronze enthalten, etwa ein Drittel der ursprünglichen Maschine. Von Hand gedreht, zeigte er die Stellungen von Sonne, Mond und Planeten an und sagte Finsternisse voraus.

Um 25 v. Chr. beschrieb Vitruv eine Wassermühle, in der eine gezahnte Trommel auf der Radwelle ein größeres waagerechtes Rad antrieb, das den Mühlstein drehte. Kammräder und Laternenräder dieser Art trieben die Mühlen in den folgenden fünfzehn Jahrhunderten an. Mechanische Uhren verbreiteten sich in Europa ab etwa 1300. Der Bau der astronomischen Uhr des Giovanni de’ Dondi wird traditionell auf 1348–1364 datiert. Die Bauzeit ist jedoch umstritten: Das Wissenschafts- und Technikmuseum in Mailand nennt 1365–1380. In den 1490er-Jahren zeichnete Leonardo da Vinci Zahnformen in die Notizbücher, die heute Codices Madrid heißen.

Philippe de La Hire untersuchte um 1694 die Zahnkurven, und um 1754 stellte Leonhard Euler die Regel auf, der die Zähne für eine gleichförmige Übersetzung folgen müssen. Im 19. Jahrhundert trieben Zahnräder aus Gusseisen und später aus maschinell verzahntem Stahl die Fabriken an, und in den meisten Maschinen verdrängte die Evolvente die Zykloide.

Kennzahlen

Übersetzung

Bestimmt durch die Zähnezahlen: Treiben 60 Zähne ein Rad mit 15 Zähnen an, dreht sich das kleine Rad 4-mal so schnell

Älteste erhaltene Zahnräder

China, Zeit der Streitenden Reiche (4. Jahrhundert v. Chr.)

Mechanismus von Antikythera

30 erhaltene Zahnräder aus Bronze, 2. oder 1. Jahrhundert v. Chr.

Verzahnungstheorie

La Hire (um 1694) und Euler (um 1754) ermittelten die Kurven für eine gleichförmige Übersetzung

Quellen

1. Gear · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Gear
2. A Model of the Cosmos in the ancient Greek Antikythera Mechanism (Freeth et al., 2021) · Scientific Reports https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7955085/
3. Geared power transmission technology (J. J. Coy, 1983) · NASA Technical Reports Server https://ntrs.nasa.gov/citations/19830011851
4. Vitruvius, De architectura, Book IX, chap. 8 (Ctesibius's water clock) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/9*.html
5. Vitruvius, De architectura, Book X, chap. 5 (water wheels and mills) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/10*.html
6. Self-locking of worm gear reducers · Tsubakimoto Chain https://tt-net.tsubakimoto.co.jp/tecs/engd/gen/engd_gen_ggm_gis_sfl.asp?lang=en
7. KWG Ground Worms and Worm Wheels: specifications · KHK Gears https://khkgears.net/pdf/kwg.pdf
8. L'Astrario di Giovanni Dondi · Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo da Vinci https://artsandculture.google.com/story/l%E2%80%99astrario-di-giovanni-dondi-museo-nazionale-della-scienza-e-della-tecnologia-leonardo-da-vinci/0gURs225ZTyrJA?hl=it
9. Engrenage · Office québécois de la langue française https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/2091942/engrenage
10. Machinists' and Draftsmen's Handbook (Lobben, 1910), p. 325: a derrick crab worked out · Project Runeberg https://runeberg.org/lobben/0345.html
11. Effect of geometry and operating conditions on spur gear system power loss (Anderson and Loewenthal, NASA TM-81426, 1980) · NASA Technical Reports Server https://ntrs.nasa.gov/citations/19800010132
12. Human power: comfortable one-hand cranking (Jansen and Slob, ICED 03, 2003) · The Design Society https://www.designsociety.org/download-publication/23972/human_power_comfortable_one-hand_cranking

Fakten geprüft am 2026-10-12

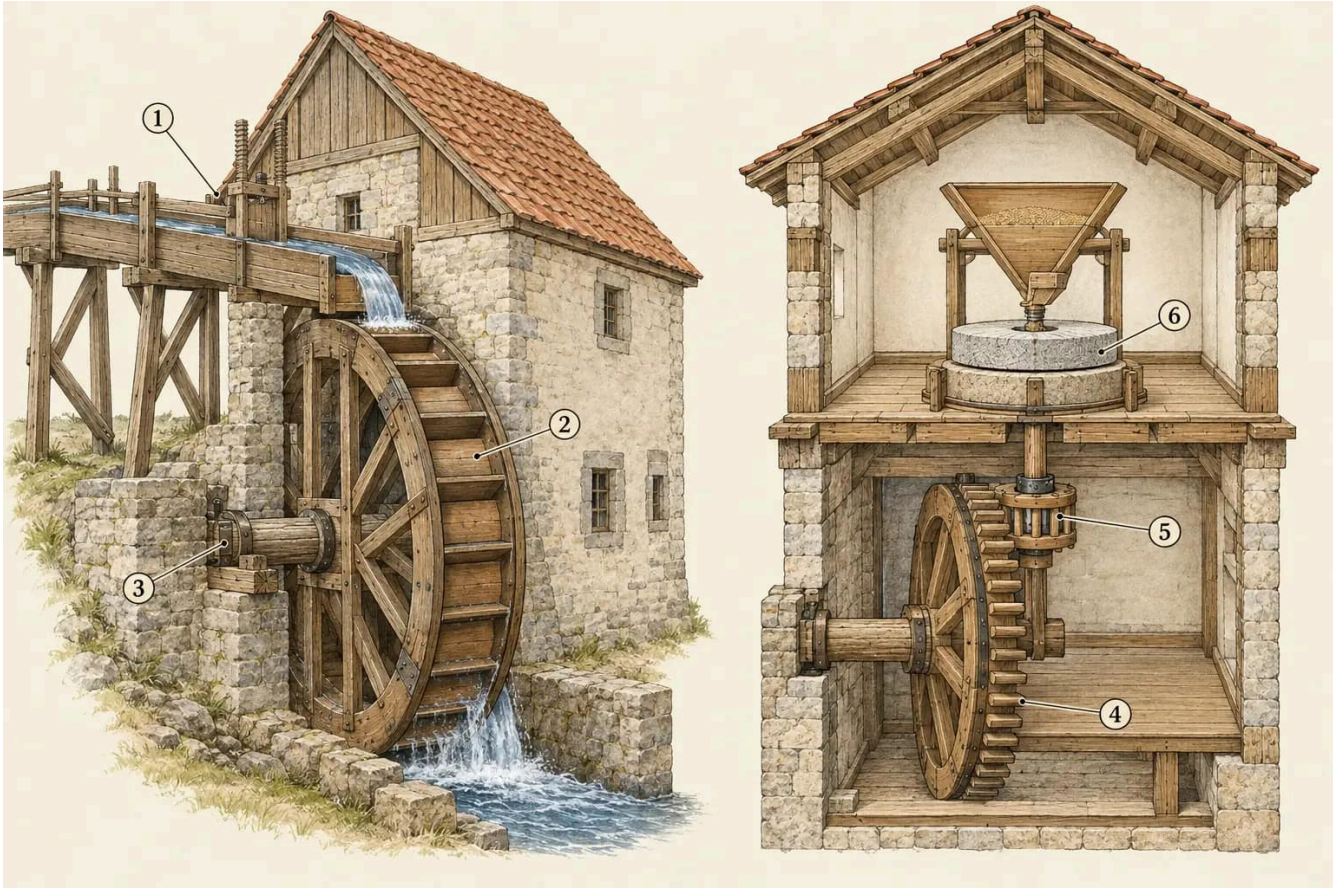
Wasserrad

Ein Fluss, in Arbeit verwandelt

um 300 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Rad & Achse (S. 83), Zahnräder (S. 156)

Führt zu: Wasserturbine (S. 268), Windmühle (S. 188)



1 Gerinne und Schütz 2 Zellen 3 Radwelle 4 Kammrad 5 Stockrad 6 Mühlsteine

Ein Wasserrad verwandelt die Strömung oder das Gefälle von Wasser in eine Drehbewegung, die Zahnräder an Mühlsteine, Hämmer, Blasebälge oder Pumpen weitergeben. Vom 3. Jahrhundert v. Chr. bis ins 19. Jahrhundert war es nach Menschen und Tieren die wichtigste Quelle mechanischer Kraft.

Was es ist

Ein Wasserrad ist ein Rad mit Schaufeln oder Zellen, das von fließendem Wasser gedreht wird, und seine Welle treibt Maschinen an. Zweitausend Jahre lang mahlte es Getreide. Seit dem Mittelalter walkte es auch Tuch, sägte Holz, bewegte die Blasebälge und Hämmer der Schmieden und pumpte Wasser aus Bergwerken.

Ein unterschlächtiges Rad taucht seine Schaufeln in einen Bach, und die Strömung schiebt sie weiter. Einfache traditionelle Bauformen brauchen kein Wehr und setzen nur einen kleinen Teil der verfügbaren Wasserenergie in Arbeit um. Ein oberschlächtiges Rad wie das auf dieser Tafel bekommt Wasser von oben aus einer Rinne und dreht sich durch dessen Gewicht in den Zellen. Die Fallhöhe muss mindestens dem Raddurchmesser entsprechen. Ein natürliches Gefälle mit Wasserfassung und Kanal kann dafür ausreichen; Damm und Teich sind optional. Ein

mittelschlächtiges Rad erhält Wasser auf Höhe der Welle. Der Wirkungsgrad hängt von Bauform und Wasserzufuhr ab; verbesserte unterschlächtige Räder können ebenfalls hohe Wirkungsgrade erreichen.

Ein unterschlächtiges Rad: Die Strömung drückt gegen die untersten Schaufeln.

Wie es funktioniert

Wasser, das in einem Mühlteich aufgestaut ist, speichert durch seine Höhe Energie. In der oberschlächtigen Mühle führt das Gerinne (1), ein hölzerner Trog, das Wasser über den Scheitel des Rades, und mit einem Schütz kann der Müller das Rad anlaufen lassen, anhalten und seine Geschwindigkeit regeln. Das Wasser fällt in die Zellen (2) auf der absteigenden Seite. Diese Seite ist schwer, die andere leer, und so dreht sich das Rad langsam, mit wenigen Umdrehungen pro Minute. Die Zellen halten ihr Wasser so lange wie möglich und leeren sich erst kurz vor dem tiefsten Punkt in den Untergraben.

Die verfügbare hydraulische Leistung ist $P = \rho g Q H$: Wasserdichte ρ mal Erdbeschleunigung g mal Volumenstrom Q mal Fallhöhe H. Bei einer Wasserdichte von etwa 1.000 kg/m^3 und $g = 9{,}81$ m/s^2 ergeben 100 Liter pro Sekunde (0,1 m^3/s) und vier Meter Fallhöhe etwa 3,92 kW vor Verlusten. Ein gut gebautes oberschlächtiges Rad setzt den größten Teil davon in Arbeit an seiner Welle um.

Die Mühle mit waagerechtem Rad kommt ohne Getriebe aus: Die Welle des Rades ist zugleich die Spindel des Mühlsteins.

Im Inneren der Mühle trägt die Welle (3) das Kammrad (4), ein großes Zahnrad, dessen Kämme das kleine Stockrad (5) auf einer senkrechten Welle antreiben. Wie bei einer Windmühle wird der Antrieb dabei von waagerecht auf senkrecht umgelenkt und schneller, denn das Wasserrad läuft langsam, während der obere Mühlstein sich viel schneller drehen muss. Dieser Läuferstein (6) zermahlt das Getreide, das aus einem Trichter nachrinnt, gegen den feststehenden Bodenstein darunter.

Manche Mühlen haben überhaupt keine Zahnräder. In der Mühle mit waagerechtem Rad, die lange in Irland, Skandinavien und rund ums Mittelmeer verbreitet war, liegt ein kleines Rad flach unter dem Boden im Wasserstrahl einer steilen Rinne, und seine senkrechte Welle dreht den Läuferstein direkt. Einfache traditionelle Bauformen sind preiswert und setzen einen vergleichsweise kleinen Anteil der verfügbaren Wasserenergie in Arbeit um. Verbesserte waagerechte Räder können hohe Wirkungsgrade erreichen.

Bauanleitung

Diese Skizze gilt für ein kleines oberschlächtiges Rad, das eine Pumpe oder eine leichte Maschine antreibt. Wer Wasser aus einem Bach ableiten will, braucht dafür meist eine Genehmigung.

Das Gefälle finden. Einen Bach mit mindestens zwei Metern Gefälle suchen. Einen Kanal graben, den Obergraben, der weiter oben vom Bach abzweigt und mit sehr geringer Neigung verläuft, sodass er am Rad deutlich über dem Bachbett ankommt.

Das Rad bemessen. Das Rad etwas kleiner als die Fallhöhe machen, damit das Wasser ein kurzes Stück in die oberste Zelle fällt. Die Breite richtet sich nach der Wassermenge. Zellen, die nur teilweise gefüllt sind, verschütten ihr Wasser später.

Welle und Arme bauen. Eine Welle aus Eiche verwenden, an den Stellen für die Arme vierkantig behauen, mit eisernen Zapfen an den Enden, die in Lagern aus Hartholz oder Bronze auf Pfeilern aus Stein oder Beton laufen.

Radkränze und Zellen fertigen. Die Zellen schräg zwischen zwei Ringe aus Brettern, die Radkränze, setzen und die Innenseite mit Brettern schließen. Das Rad vor dem Betrieb wässern, damit das Holz quillt und die Fugen dicht werden.

Gerinne und Schütz einbauen. Das Wasser in einem Holztrog auf Böcken bis über den Scheitel des Rades führen, mit einem Schieber und einem Überlauf, der das Wasser am stehenden Rad vorbeileitet. Prüfen, ob das Rad ausgewuchtet ist, dann das Schütz nach und nach öffnen.

> **Sicherheit.** Ein gefülltes Rad ist schwer und bleibt nicht sofort stehen: nie daraufsteigen oder hineingreifen, solange es sich dreht. Vor Wartungsarbeiten die Wasserzufuhr absperren, das Schütz gegen erneutes Öffnen verriegeln und austretendes Wasser am Rad vorbeileiten. Den vollständigen Stillstand prüfen. Von einem sicheren Ort aus zurückgehaltenes Wasser ablassen und Rad sowie angetriebene Maschinen mit für die verbleibenden Lasten geeigneten Sicherungen festsetzen, damit gespeicherte Energie sie nicht bewegen kann. Eine fachkundige Person muss diese Trennung herstellen und prüfen. Schnelles Wasser in einem Kanal kann einen Erwachsenen umwerfen und ertränken, deshalb den Untergraben einzäunen und dort nie allein arbeiten. Alle zugänglichen Zahnräder mit Schutzabdeckungen versehen, die Hände und Kleidung fernhalten.

Geschichte und Entwicklung

Die ersten Räder hoben Wasser. Im 3. Jahrhundert v. Chr. beschrieb Philon von Byzanz ein Rad mit Kammern, das in Ägypten zur Bewässerung diente. Der Historiker M. J. T. Lewis vertritt die Ansicht, dass wassergetriebene Getreidemühlen im selben Jahrhundert aufkamen, zuerst mit senkrechter, dann mit waagerechter Welle. Die früheste klare Beschreibung einer Wassermühle mit Getriebe stammt von Vitruv um 25 v. Chr.: Ein unterschlächtiges Rad treibt den Mühlstein über eine gezahnte Trommel und ein größeres waagerechtes Rad an.

In Barbegal bei Arles in Südfrankreich bauten die Römer sechzehn oberschlächtige Räder in zwei Reihen zu je acht einen Hang hinunter, gespeist von einem Aquädukt. Die Anlage wurde im 2. Jahrhundert n. Chr. gebaut. In China nutzte Du Shi im Jahr 31 n. Chr. Wasserkraft, um die Blasebälge von Eisengießereien zu betreiben.

In Nordafrika und im Nahen Osten hob die Noria, ein großes, von der Strömung gedrehtes Rad mit Krügen am Kranz, Wasser in Bewässerungskanäle und versorgte Städte. Im 10. Jahrhundert beschrieb der Arzt al-Razi eine solche Anlage im Irak, die etwa 153.000 Liter in der Stunde förderte.

Im mittelalterlichen Europa wurden die Wassermühlen immer zahlreicher. Das Domesday Book von 1086 zählte in England rund sechstausend, und die Räder trieben bald auch Walkstampfen, Sägen, Schmiedebälge und Schwanzhämmer an.

In den 1750er-Jahren testete der englische Ingenieur John Smeaton Modellräder. Bei vergleichbarer verfügbarer Wasserenergie leisteten seine oberschlächtigen Modelle mindestens doppelt so viel Arbeit wie seine unterschlächtigen Modelle. Seine Ergebnisse veröffentlichte er 1759. Dieses Verhältnis gilt für die getesteten

Bauformen und lässt sich nicht auf alle Wasserräder übertragen. Das Laxey Wheel auf der Isle of Man, 1854 fertiggestellt, um Wasser aus den Bergwerken von Laxey zu pumpen, misst 22,1 Meter im Durchmesser. Ab 1827 begann die Turbine von Benoît Fourneyron das Wasserrad zu verdrängen, und die Turbinen heutiger Wasserkraftwerke gehen auf sie zurück.

Eine Noria: Die Strömung dreht das Rad, und das Rad hebt einen Teil des Flusses an.

Kennzahlen

Erste Beschreibung
Philon von Byzanz, 3. Jahrhundert v. Chr. (ein Schöpfrad)

Ober- oder unterschlächtig
Oberschlächtig mindestens doppelt so effizient in Smeatons Versuchen bei vergleichbarer verfügbarer Wasserenergie (1759)

England, 1086
Rund 6.000 Mühlen im Domesday Book

Größtes betriebsfähiges Rad
Laxey, Isle of Man: 22,1 m Durchmesser, gebaut 1854

Quellen

1. Water wheel · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Water_wheel
2. Vitruvius, De architectura, Book X, chap. 5 (water wheels and mills) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/10*.html
3. The Scientists, the Engineers, and the Water Wheel · JSTOR Daily https://daily.jstor.org/the-scientists-the-engineers-and-the-water-wheel
4. Great Laxey Wheel · Manx National Heritage https://manxnationalheritage.im/?p=18117
5. John Smeaton · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/John_Smeaton
6. Providing and using work equipment safely: A brief guide · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/pubns/indg291.pdf
7. The second century CE Roman watermills of Barbegal: Unraveling the enigma of one of the oldest industrial complexes · Science Advances, American Association for the Advancement of Science https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6124920/
8. Waterwheel · Energy Education, University of Calgary https://www.energyeducation.ca/encyclopedia/Waterwheel
9. Gravity water wheels as a micro hydropower energy source: A review based on historic data, design methods, efficiencies and modern optimizations · Politecnico di Torino, institutional repository https://iris.polito.it/handle/11583/2712517
10. High hydraulic performance in horizontal waterwheels · Universitat de Girona, Research Portal https://recerca.udg.edu/en/publications/high-hydraulic-performance-in-horizontal-waterwheels/

Fakten geprüft am 2026-10-12

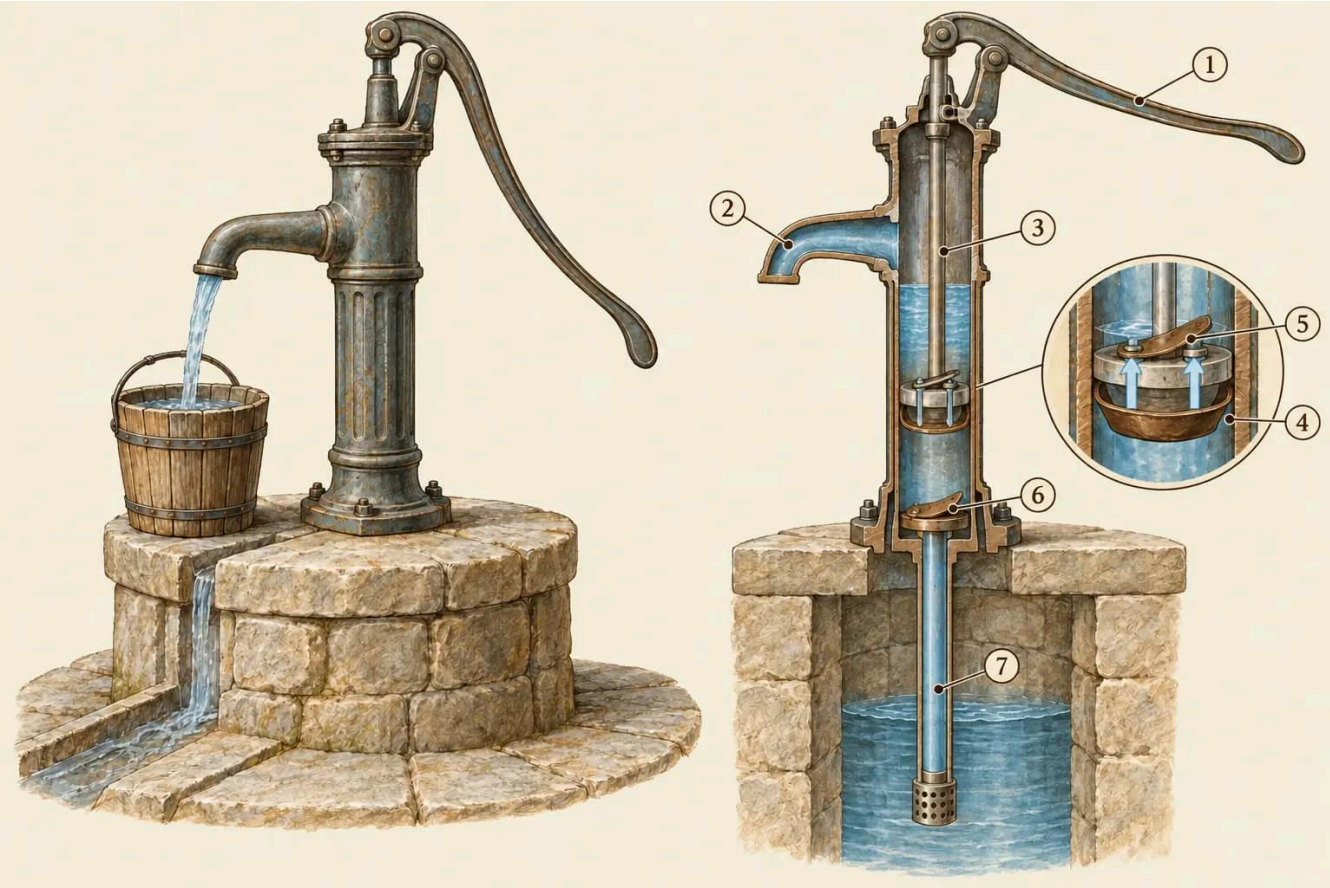
Kolbenpumpe

Wasser gehoben mit Kolben und Ventil

um 270 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Bronze (S. 125), Ledergerbung (S. 103)

Führt zu: Kältetechnik (S. 285), Dampfmaschine (S. 230)



1 Schwengel 2 Auslauf 3 Kolbenstange 4 Ledermanschette 5 Kolbenventil 6 Fußventil 7 Saugrohr

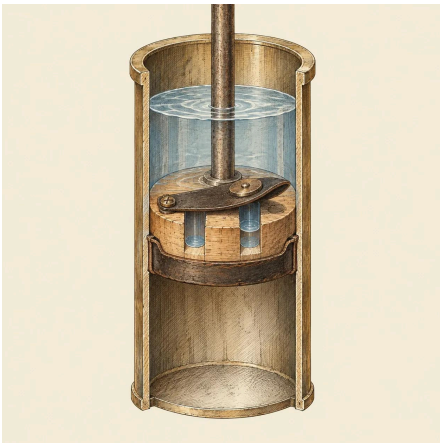
Eine Kolbenpumpe bewegt Wasser mit einem Kolben, der in einem Zylinder auf und ab gleitet, zwischen zwei Ventilen, die das Wasser nur in eine Richtung durchlassen. Die Druckpumpe wird Ktesibios von Alexandria im 3. Jahrhundert v. Chr. zugeschrieben; die Saugpumpe, die das Wasser von unten heraufholt, verbreitete sich im spätmittelalterlichen Europa und stand später auf Dorfbrunnen in aller Welt.

Was es ist

Eine Kolbenpumpe bewegt Wasser mit einem Kolben, der in einem Rohr auf und ab gleitet, zwischen zwei Ventilen, die sich nur in eine Richtung öffnen. Seit über zweitausend Jahren entwässern solche Pumpen Bergwerke, speisen Brunnen, löschen Brände und holen Wasser aus Schächten.

Die Saugpumpe, auch Hubpumpe genannt, steht über dem Wasser und zieht es durch ein Rohr herauf. Die Druckpumpe sitzt im Wasser oder unterhalb ihres Auslasses und presst das Wasser unter Druck hinaus. Die Tafel zeigt eine Saugpumpe des 19. Jahrhunderts auf einem abgedeckten Dorfbrunnen.

Wie es funktioniert



Beim Hub hält das Wasser darüber die Klappe geschlossen; beim Abwärtsgang hebt sie sich und das Wasser strömt hindurch.

Am Boden des Zylinders sitzt das Fußventil, eine Klappe aus Leder oder Gummi, die sich hebt, um Wasser einzulassen, und dann auf ihren Sitz zurückfällt. Der Kolben trägt eine zweite Klappe über Bohrungen, die ihn durchlaufen, und eine Ledermanschette am Rand. Sie öffnet sich nach oben, sodass das Wasser darüber sie gegen die Wand drückt.

Zieht der Schwengel den Kolben hoch, bleibt dessen Ventil zu, und das Wasser auf dem Kolben steigt zum Auslauf. Unter dem Kolben sinkt der Druck, und die Luft, die auf den Wasserspiegel im Brunnen drückt, schiebt Wasser durch das Saugrohr und das Fußventil nach. Beim Abwärtsgang schließt das Fußventil, das Kolbenventil öffnet sich, und der Kolben gleitet durch das Wasser nach unten.

Auf der Saugseite arbeitet die Atmosphäre, und ihr Druck hat eine Grenze. Auf Meereshöhe hält das Gewicht der Luft einer Wassersäule von etwa 10,3 Metern das Gleichgewicht, oder 76 Zentimetern Quecksilber. Undichtigkeiten, Reibung und Wasser, das bei niedrigem Druck zu sieden beginnt, begrenzen eine Handsaugpumpe auf etwa 7 Meter, im Gebirge auf weniger.

Eine Druckpumpe treibt das Wasser durch ein Druckventil hinaus, so hoch, wie Kraft und Rohre es erlauben. Tiefbrunnen-Handpumpen setzen den Zylinder unter den Wasserspiegel und bewegen den Kolben über ein langes Gestänge, sodass die Saughöhe keine Grenze mehr setzt. Zwei abwechselnd arbeitende Zylinder oder ein doppelt wirkender Kolben, der bei beiden Hüben fördert, glätten den Strom, und ein Windkessel am Auslass, in dem eingeschlossene Luft zusammengepresst wird und sich wieder ausdehnt, macht aus den Stößen einen gleichmäßigen Strahl.

Wie man sie baut

Eine kleine Saugpumpe für einen flachen Brunnen oder eine Regentonne lässt sich aus Kunststoffrohr bauen. Der Wasserspiegel muss weniger als etwa 6 Meter unter dem Zylinder liegen; am besten arbeitet sie bei 3 bis 4 Metern.

Zylinder. 60 bis 80 cm glattes PVC-Rohr von etwa 50 mm Durchmesser senkrecht befestigen, mit einem T-Stück oben als Auslauf. Ein dünneres Rohr führt von seinem unteren Ende ins Wasser. Jede Verbindung unterhalb des Kolbens muss luftdicht sein.

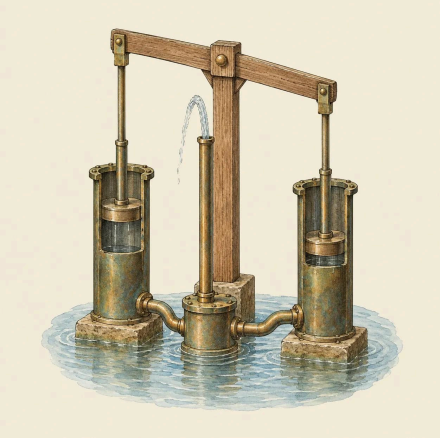
Fußventil. Den Zylinder unten mit einem Stopfen verschließen, in den ein Loch von etwa 2 cm gebohrt ist. Darüber eine Scheibe aus Leder oder Fahrradschlauch legen, an einer Kante als Scharnier festgeschraubt und mit einer Unterlegscheibe beschwert.

Kolben. Einen Pfropfen aus Hartholz oder Kunststoff etwas kleiner als die Bohrung zuschneiden, durchbohren und die Löcher mit einer gleichen Klappe abdecken. Darunter eine Manschette aus dickem Leder oder Gummi klemmen, den Rand nach oben gebogen und die Mitte ausgeschnitten, damit die Löcher frei bleiben. Leder vor dem Einbau wässern. Eine Stange verbindet den Kolben mit einem etwa meterlangen Hebel, der an einem Pfosten gelagert ist.

Anfüllen und warten. Ein Glas sauberes Wasser in den Zylinder gießen, damit Manschette und Ventile abdichten, dann pumpen. Läuft die Pumpe über Nacht leer, zuerst das Fußventil prüfen.

> **Sicherheit.** Einen Brunnen nie offen lassen: mit einer Platte oder einem Deckel verschließen, der einen Erwachsenen trägt, und Kinder fernhalten. Nie in einen Brunnen steigen, die Luft unten kann zu wenig Sauerstoff enthalten. Finger vom Drehpunkt fernhalten. Die Durchführung des Rohrs abdichten, den Boden vom Brunnen weg abfallen lassen, Latrinen und Tiere weit entfernt halten. Nur mit Trinkwasser anfüllen, denn es läuft in den Brunnen. Leder, Fahrradschlauch und gewöhnlicher Kunststoff sind nicht für Trinkwasser gemacht: Die Pumpe für Gieß- oder Brauchwasser nutzen oder ganz aus Teilen bauen, die für Trinkwasser zugelassen sind. Brunnenwasser erst trinken, wenn eine Untersuchung es für unbedenklich erklärt hat; Abkochen tötet Keime, entfernt aber keine Chemikalien.

Geschichte und Entwicklung



Die Pumpe des Ktesibios, wie Vitruv sie beschreibt: zwei Bronzezylinder, die abwechselnd arbeiten und ein einziges Steigrohr speisen.

Die Druckpumpe wird Ktesibios zugeschrieben, einem Ingenieur in Alexandria um 270 v. Chr. Vitruv beschrieb um 25 v. Chr. ihre Bronzezylinder und Ventile. Eine Bestandsaufnahme von Richard Stein aus dem Jahr 2007 zählt dreizehn römische Metallpumpen, meist aus Bronze, und achtzehn aus Eichenholz, die meisten in Brunnen gefunden; die aus Silchester liegt im Museum von Reading.

Um 1206 beschrieb al-Dschazari eine von einem Wasserrad angetriebene Pumpe mit zwei gegenläufigen Kolben und echten Saugrohren. Im späten Mittelalter kamen Saugpumpen in die europäischen Bergwerke. 1556 beschrieb Georgius Agricola Sätze von drei übereinander angeordneten Pumpen mit je etwa sieben Metern Rohr, die das Wasser von Kasten zu Kasten hoben.

1638 berichtete Galilei, keine Saugpumpe könne Wasser höher als achtzehn Florentiner Ellen heben, etwa 10,5 Meter, und meinte, die Säule reiße unter ihrem eigenen Gewicht. Sein Schüler Torricelli fand 1644 die Ursache (manche Darstellungen nennen 1643): In einem Glasrohr steht Quecksilber etwa 76 cm hoch, getragen vom Gewicht der Luft. 1648 trug Pascals Schwager das Rohr auf dessen Bitte auf den Puy de Dôme, wo das Quecksilber etwa 8,5 cm tiefer stand.

In London ließ Richard Newsham 1721 eine Feuerspritze patentieren, deren zwei Pumpen einen Windkessel speisten und so einen ununterbrochenen Strahl lieferten. Für die Bergwerke hatte Thomas Newcomen schon 1712 bei Dudley seine erste Dampfmaschine gebaut, die deren Pumpen antrieb. In Indien ergab 1974 eine Prüfung durch UNICEF, dass drei Viertel der in den sieben Jahren zuvor gebohrten Brunnen kein Wasser lieferten. Daraufhin entwickelten UNICEF, die Regierung und die Firma Richardson and Cruddas die India Mark II, deren Zylinder im Bohrloch sitzt und die Wasser aus 50 Metern Tiefe fördert. Sie ist millionenfach im Einsatz und wird in mehr als 40 Länder exportiert.

Eine Feuerspritze nach Art Newshams: zwei Pumpen, von langen Hebeln bewegt, und ein Windkessel, der den Strahl gleichmäßig hält.

Kennzahlen

Theoretische Saughöhe
Rund 10,3 m Wassersäule auf Meereshöhe, so viel, wie das Gewicht der Luft tragen kann

Praktische Saughöhe
Rund 7 m zwischen Wasserspiegel und Handpumpe

Druckpumpe des Ktesibios
Alexandria, um 270 v. Chr.; überliefert durch Vitruv, um 25 v. Chr.

Gefundene römische Pumpen
13 aus Metall, meist Bronze, und 18 aus Holz (Bestandsaufnahme von 2007)

Handpumpe India Mark II
Förderhöhen von 10 bis 50 m, Zylinder 63,5 mm, millionenfach eingebaut seit Ende der 1970er-Jahre

Quellen

1. Vitruvius, On Architecture, Book X, chapter 7 (Gwilt translation, 1826) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/10*.html
2. Roman Wooden Force Pumps (R. J. B. Stein), in Énergie hydraulique et machines élévatrices d'eau dans l'Antiquité, 2007 · Publications du Centre Jean Bérard, OpenEdition Books https://books.openedition.org/pcjb/405
3. Horror vacui? The syphon experiment · Museo Galileo, Florence https://www.imss.fi.it/vuoto/eesper1.html
4. Horror vacui? Torricelli's barometric experiment · Museo Galileo, Florence https://www.imss.fi.it/vuoto/eesper2.html
5. Horror vacui? The void within a void · Museo Galileo, Florence https://imss.fi.it/vuoto/eesper3.html
6. Barometers · Encyclopedia.com https://www.encyclopedia.com/earth-and-environment/atmosphere-and-weather/meteorological-instruments/barometers
7. Al-Jazari, Badi al-Zaman (Dictionary of Scientific Biography) · Encyclopedia.com https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/al-jazari-badi-al-zaman-abu-l-izz-ismail-ibn-al-razzaz
8. Georgius Agricola, De re metallica, Book VI (Hoover translation, 1912) · Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/ebooks/38015
9. Mine Pumping in Agricola's Time and Later (R. P. Multhauf, 1959) · Smithsonian Institution, via Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/ebooks/31024
10. Hand pumps for water lifting · Practical Action https://samplecontents.library.ph/en-practical_action/Energy/Mechanical%20Power/KnO-100411_Human-powered%20handpumps/page5.html
11. No. 6 pump (public-domain handpump specification) · Rural Water Supply Network https://www.rural-water-supply.net/en/implementation/public-domain-handpumps/no-6-pump
12. Water lifting devices, chapter 3.5: reciprocating displacement pumps · Food and Agriculture Organization of the United Nations https://www.fao.org/4/ah810e/ah810e06.htm
13. India Mark II handpump specification · Rural Water Supply Network https://www.rural-water-supply.net/en/implementation/public-domain-handpumps/india-mark-ii
14. How three handpumps revolutionised rural water supplies: the India Mark II · Rural Water Supply Network https://rwsn.blog/2013/03/19/how-three-handpumps-revolutionised-rural-water-supplies-the-india-mark-ii/
15. A history of UNICEF work on water, sanitation and hygiene in India · UNICEF India https://www.unicef.org/india/stories/history-unicef-work-water-sanitation-and-hygiene-india
16. ASME Landmark: Newcomen Engine · Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/ASME-Landmark:Newcomen_Engine
17. Fire Engine (Newsham, patented 1721) · Colonial Williamsburg Foundation https://history.org/primary-content/fire-engine/
18. Suction pump · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Suction_pump

Fakten geprüft am 2026-10-14

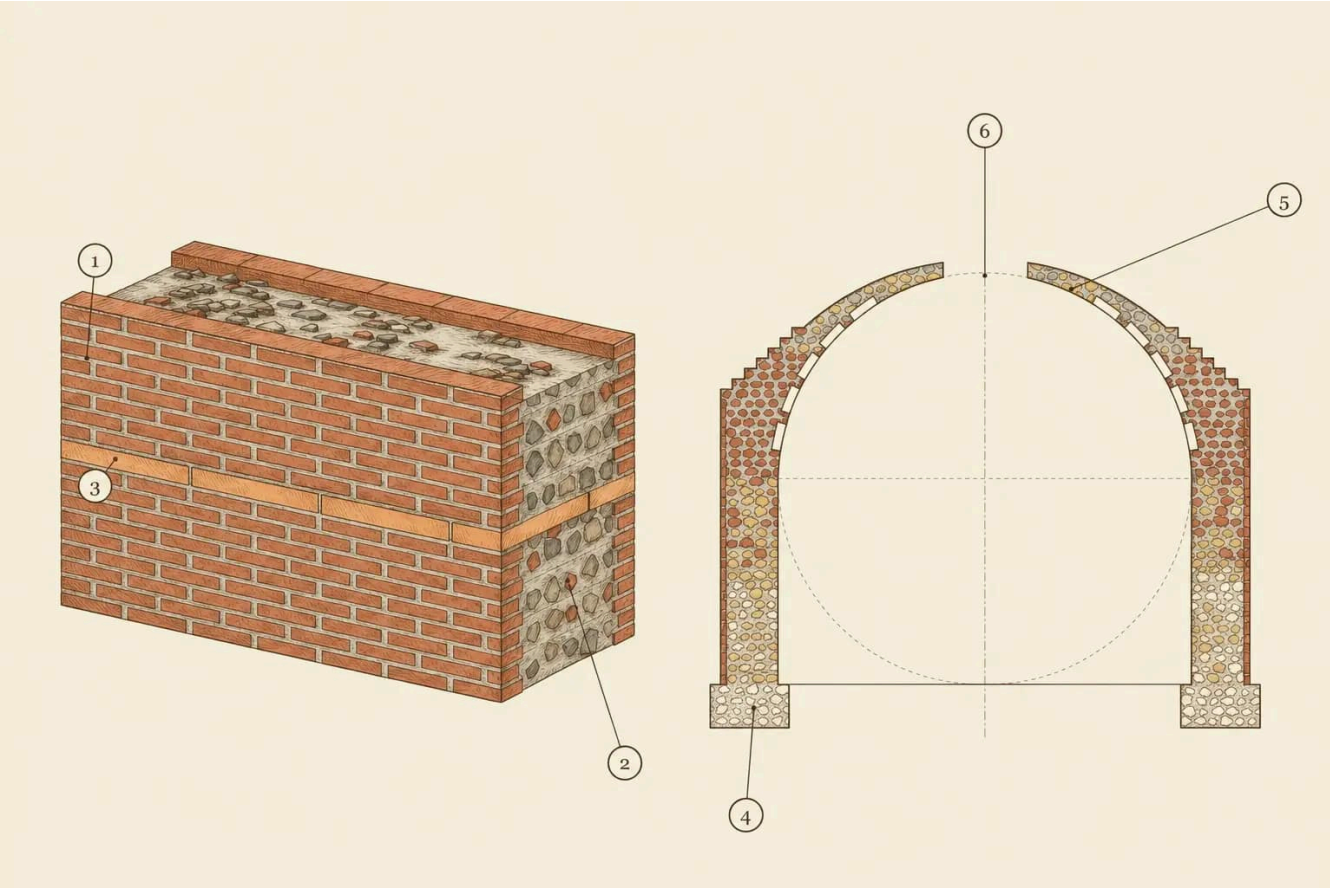
Römischer Beton

Kalk, Vulkanasche und Bruchstein

um 200 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Ziegel (S. 40), Beherrschung des Feuers (S. 9), Kalk und Kalkmörtel (S. 31)

Führt zu: Portlandzement (S. 260)



1 Ziegelschale 2 Kern aus Bruchstein und Mörtel 3 Schicht großer flacher Ziegelplatten 4 Schwerer Travertin im Fundament 5 Leichter Bims und Tuff in der oberen Kuppel 6 Opaion

Römischer Beton ist Kalkmörtel, der um Bruchsteine oder Ziegelbrocken gestampft wird; in seiner bekanntesten Form enthält der Mörtel Vulkanasche. Die Asche lässt ihn sogar unter Wasser hart werden; er trug die Gewölbe Roms, seine Häfen und die unbewehrte Kuppel des Pantheons, bis heute die größte ihrer Art.

Was es ist

Römischer Beton, opus caementicium, ist eine Masse aus Steinbrocken, die ein Kalkmörtel zusammenhält; in vielen römischen Bauten enthielt er Vulkanasche. Die Römer nannten die Brocken caementa; daher stammt das Wort Zement. Seit dem 2. Jahrhundert v. Chr. konnten Baumeister damit Mauern, Gewölbe und Kuppeln errichten, die mit Haustein allein nicht zu erreichen waren, billiger und mit weniger Fachkräften.

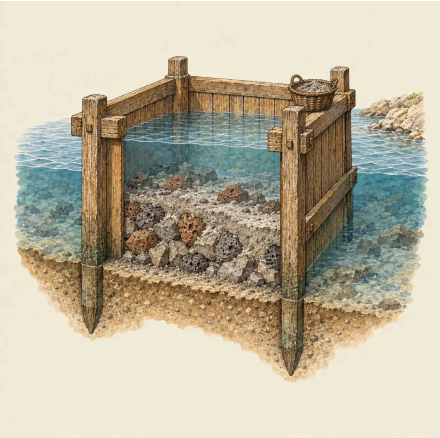
Zwei Dinge unterscheiden ihn von einem einfachen Kalkmörtel: die Vulkanasche, mit der er sogar unter Wasser erhärtet, und eine Bauweise in Lagen aus Bruchstein zwischen Schalen aus Ziegeln oder kleinen Steinen.

Wie es funktioniert

Das Bindemittel beginnt als Kalkstein. Im Ofen gebrannt, gibt er Kohlendioxid ab und wird zu Branntkalk; mit Wasser gelöscht, quillt er unter starker Erwärmung auf und wird zu Löschkalk. Mörtel aus reinem Luftkalk härtet langsam, indem er Kohlendioxid aus der Luft aufnimmt, und bleibt dort weich, wo keine Luft hinkommt.

Ein Kalkofen: Der Kalkstein liegt auf einem Bogen über dem Feuer und kommt als weißer Branntkalk heraus.

Vulkanasche ändert das. Die Asche vom Golf von Neapel, nach der Stadt Pozzuoli Puzzolan genannt, enthält viel Kieselsäure und Tonerde in glasiger, reaktionsfreudiger Form. Sie reagiert mit Kalk und Wasser zu neuen bindenden Mineralen, sodass der Mörtel durch Reaktion mit Wasser statt mit Luft erhärtet, auch untergetaucht. Vitruv bemerkte um 25 v. Chr., dass dieser vulkanische Sand aus der Gegend von Baiae und dem Vesuv, mit Kalk und Bruchstein gemischt, unter Wasser ebenso hart wurde wie an Land.

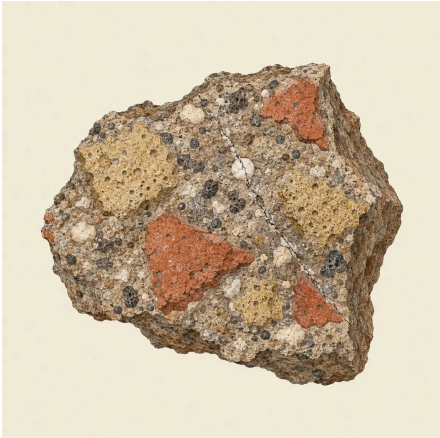


Meeresbeton: Hölzerne Kästen im Meer wurden mit Aschemörtel und Bruchstein gefüllt.

Für Häfen rammten die Bauleute Holzpfähle in den Meeresgrund, verbanden sie zu einer Umschließung und füllten diese mit Mörtel und Tuffbrocken direkt ins Wasser; Vitruv beschreibt auch Umschließungen, die vor dem Füllen leergepumpt wurden. Plinius der Ältere beschrieb solche Molen als eine einzige Steinmasse, die jeden Tag fester werde. 2017 zeigte ein Team um die Geologin Marie Jackson, dass Meerwasser langsam Teile der Asche löst und neue Minerale, darunter der seltene Aluminium-Tobermorit und Phillipsit, in ihren Poren wachsen. Nach Ansicht des Teams helfen diese verzahnten Kristalle dem Beton, Rissen zu widerstehen.

Die Arbeiter bauten römischen Beton in Lagen auf. Sie legten eine Lage faustgroßer Steine oder Ziegelbrocken aus, stampften Mörtel hinein und wiederholten das Lage um Lage; den Mörtel trug man in Körben zur Mauer. Die Schalen aus Ziegeln oder kleinen Quadern dienten als verlorene Schalung. In Abständen liefen Schichten großer flacher Ziegelplatten durch die Mauer und verbanden die Schalen mit dem Kern.

2023 untersuchte ein Team am MIT unter Admir Masic die kleinen weißen Kalkklümpchen im römischen Beton. Es kam zu dem Schluss, dass die Bauleute einen Teil des Kalks als Branntkalk zugaben, der die Mischung bei der Reaktion erhitzt. Die Klümpchen wirken als Vorrat: Dringt Wasser in einen Riss, löst es dort Kalk und lagert Calciumcarbonat ab, das den Spalt schließt. Das Team stellte danach moderne Probemörtel mit Branntkalk her, ließ sie reißen und Wasser hindurchlaufen; laut dem Bericht des MIT schlossen sich die Risse in etwa zwei Wochen, während eine Vergleichsprobe ohne Branntkalk undicht blieb.



Die weißen Klümpchen sind Kalkeinschlüsse. Wo ein Riss einen davon kreuzt, kann Wasser den Kalk lösen und den Riss mit Calcit füllen.

Römischer Beton ist weniger druckfest als moderner Beton aus Portlandzement und gewinnt nur langsam an Festigkeit. Die Baumeister rechneten damit: Im Pantheon trugen in die Mauern eingelassene Ziegelbögen die Lasten, während der Beton aushärtete.

Wie man ihn herstellt

Ein kleiner Probeblock von etwa 30 cm Länge zeigt, wie sich das Material verhält. Er dient nur der Anschauung und nie als tragendes Bauteil. Verwenden Sie Produkte, die für Kalkarbeiten und Denkmalpflege verkauft werden.

Material besorgen. Sie brauchen pulverförmiges Kalkhydrat, natürliches Puzzolan oder ein anderes für Kalkmörtel angebotenes Puzzolan und Zuschlag: saubere Ziegelbrocken oder Steine von Walnuss- bis Eigröße. Tragen Sie von Anfang an Handschuhe und Schutzbrille, arbeiten Sie an einem gut belüfteten Ort und vermeiden Sie Staub.

Mörtel anrühren. Verwenden Sie die Raumteile, die der Puzzolan-Hersteller für Kalkhydrat angibt. Setzen Sie eine dicht sitzende Partikelmaske auf, wie es die Sicherheitsdatenblätter verlangen, und mischen Sie die Pulver trocken. Geben Sie anschließend nach und nach Wasser hinzu, bis der Mörtel steif und klebrig ist, nicht flüssig.

Schalen mauern. Feuchten Sie Ziegel und Ziegelbruch vorher an, ohne dass Wasser darauf steht, damit sie dem frischen Mörtel nicht das Wasser entziehen. Mauern Sie zwei kurze, dünne Ziegelschalen in Kalkmörtel, jeweils eine Handbreit hoch. Sie dienen als Schalung und bleiben stehen.

Kern füllen. Mörtel zwischen die Schalen streichen, den Zuschlag hineindrücken und dann mit einem hölzernen Stampfer weiteren Mörtel in die Lücken stampfen, bis keine Hohlräume bleiben. In Lagen von etwa 6 bis 8 cm arbeiten, damit der Mörtel jedes Stück umhüllt, und mit einer Schicht flacher Ziegelplatten quer über den ganzen Block abschließen.

Langsam aushärten lassen. Das Werk mindestens zwei Wochen feucht und schattig halten, mit nassen Jutesäcken abdecken und vor Frost schützen. Kalk und Puzzolan werden noch monatelang fester; den Block nach einigen Monaten aufschlagen, um zu sehen, wie weit er erhärtet ist.

> **Sicherheit.** Kalk ist ätzend. Er verbrennt die Haut und kann blind machen: Handschuhe, lange Ärmel und dicht schließende Schutzbrille tragen, jeden Spritzer sofort mit viel klarem Wasser abspülen und bei Augenkontakt ärztliche Hilfe holen. Beim Schütten und Trockenmischen von Kalk und Puzzolan eine dicht sitzende Partikelmaske tragen. Löschen Sie keinen Branntkalk selbst und versuchen Sie nicht das römische „Heißmischen“: Branntkalk und Wasser reagieren heftig, kochen und spritzen. Diese Hausmischung ist nicht geprüft: nicht für Stufen, Mauern oder sonst etwas verwenden, das eine Last tragen muss.

Geschichte und Entwicklung

Kalkmörtel war im Mittelmeerraum lange vor Rom in Gebrauch; die römischen Baumeister machten daraus einen tragenden Baustoff. Um 150 v. Chr. war Beton weit verbreitet, manche Forscher setzen seine Anfänge ein Jahrhundert früher an. Beton, der unter Wasser abbindet, wurde wahrscheinlich am Golf von Neapel entwickelt, wo die Asche vorkommt, noch vor dem Ende des 2. Jahrhunderts v. Chr.; welche erhaltenen Hafenbauten die ältesten sind, ist umstritten.

In der Kaiserzeit trug er die meisten Großbauten. Der Hafen des Herodes in Caesarea, ab etwa 22 v. Chr. gebaut, entstand mit Asche, die aus Italien herangeschafft wurde. Das Pantheon, unter Hadrian etwa zwischen 117 und 125 n. Chr. neu errichtet, hat eine Kuppel von 43,3 m Durchmesser mit einer runden Öffnung von etwa 9 m im Scheitel. Seine Mauern sind rund 6 m dick, und der Zuschlag wechselt vom schweren Travertin der Fundamente über Tuff und Ziegel bis zu leichtem Bims und Tuff in der oberen Kuppel. Sie ist bis heute die größte unbewehrte Betonkuppel der Welt.

Nach dem Ende des Weströmischen Reiches wurde großer Betonbau selten, und Kalkmörtel diente wieder vor allem als Bindemittel für Mauerwerk. Moderner Beton aus Portlandzement, oft mit Stahl bewehrt, bindet schneller ab und ist fester, kann aber im Meerwasser innerhalb weniger Jahrzehnte reißen, und sein Stahl kann rosten, wenn er schlecht hergestellt oder geschützt ist. Forscher untersuchen heute Bohrkerne römischer Häfen und die Kalkeinschlüsse, um Beton zu entwickeln, der länger hält und weniger Kohlendioxid freisetzt.

Kennzahlen

Bindemittel
Kalk, oft mit Vulkanasche (Puzzolan)

Mischung für Bauten unter Wasser
Etwa 1 Teil Kalk auf 2 Teile Asche (Vitruv)

Kuppel des Pantheons
43,3 m Durchmesser, ohne Bewehrung, vollendet um 125 n. Chr.

Dichte des Pantheon-Betons
Etwa 2.200 kg/m^3 in den Fundamenten, 1.350 kg/m^3 nahe dem Scheitel

Quellen

1. Vitruvius, The Ten Books on Architecture, Book II (lime and pozzolana) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/2*.html
2. Vitruvius, The Ten Books on Architecture, Book V, chapter 12 (harbours) · LacusCurtius, University of Chicago https://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Vitruvius/5*.html
3. Hot mixing and the durability of ancient Roman concrete (news release, 6 January 2023) · MIT News https://news.mit.edu/2023/roman-concrete-durability-lime-casts-0106
4. How seawater strengthens ancient Roman concrete (news release, 3 July 2017) · University of Utah, via EurekAlert! https://www.eurekalert.org/news-releases/778694
5. The Pantheon: crown jewel of Roman concrete (David Moore, Constructor, 2002) · Associated General Contractors of America (Constructor magazine) https://www.ancientportsantiques.com/wp-content/uploads/Documents/ETUDESarchivees/Ma%c3%a7onnerie/B%c3%a9tonRomain/RomanConcretePantheon-Moore2002.pdf
6. Roman concrete · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Roman_concrete
7. A comparison of the chemical and engineering characteristics of ancient Roman hydraulic concrete with a modern reproduction of Vitruvian hydraulic concrete (Gotti, Oleson et al., Archaeometry 50, 2008) · University of Oxford / Wiley (Archaeometry) https://www.ancientportsantiques.com/wp-content/uploads/Documents/ETUDESarchivees/Ma%C3%A7onnerie/B%C3%A9tonRomain/RomanConcrete-Gotti2008.pdf
8. Building for Eternity: the History and Technology of Roman Concrete Engineering in the Sea (J. P. Oleson ed., 2014) · Oxbow Books https://www.ancientportsantiques.com/wp-content/uploads/Documents/AUTHORS/Oleson2014-BuildingforEternity.pdf
9. Building a Roman pila: the ROMACONS experiment at Brindisi, September 2004 · J. P. Oleson, University of Victoria https://web.uvic.ca/~jpoleson/Harbour%20Concrete/ROMACONS04Pila.html
10. FEM static and dynamic modeling of Roman vaulted monuments in opus caementicium (R. Perucchio, 2012) · University of Rochester, via SAHC Masters https://msc-sahc.org/wp-content/uploads/2020/07/5-fem-roman-vaults-guimaraes-1oct2012.pdf

Fakten geprüft am 2026-10-12

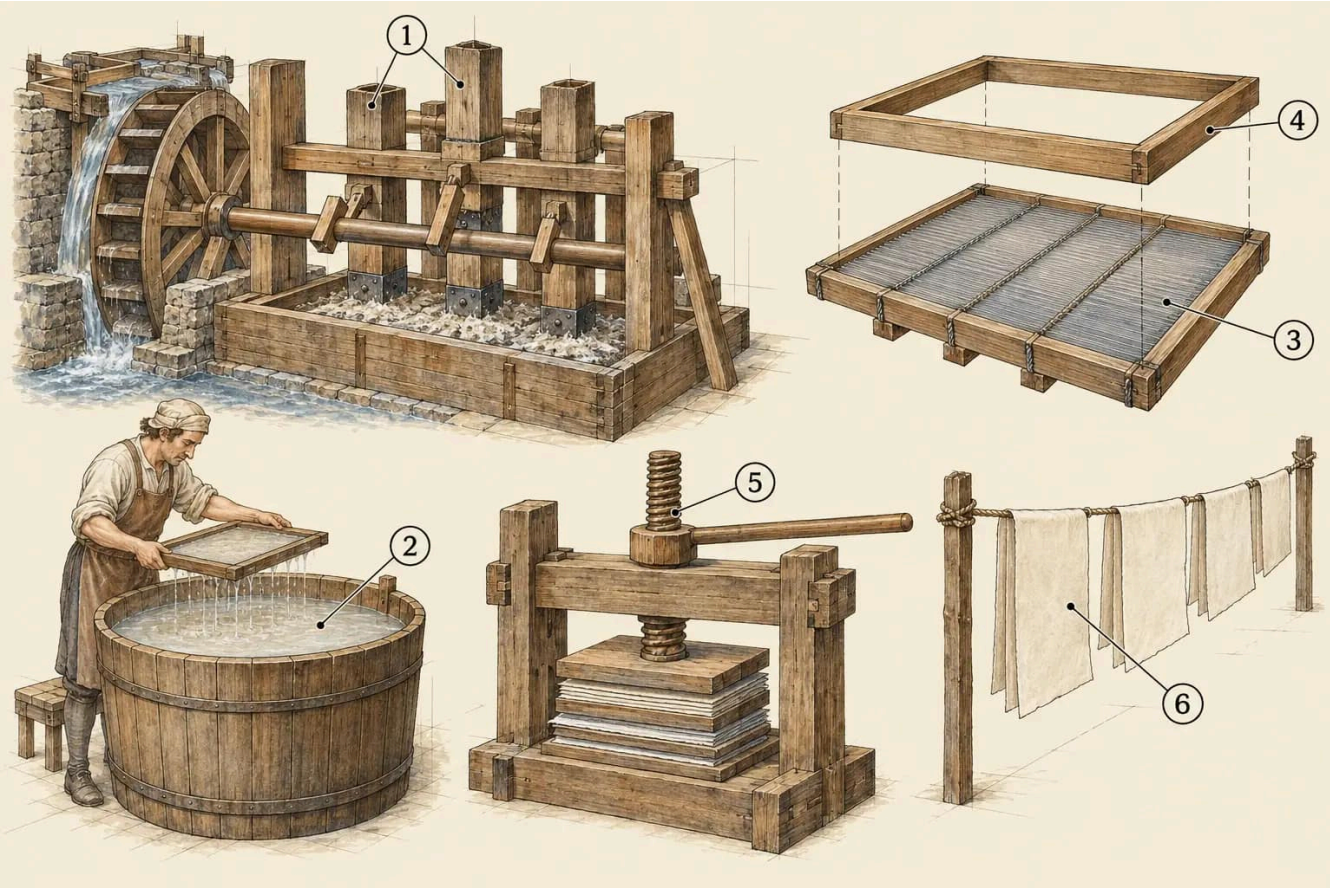
Papier

Ein billiger Träger für das Gedächtnis

um 150 v. Chr. · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Töpferei (S. 23)

Führt zu: Heißluftballon (S. 234), Druckerpresse (S. 208)



1 Stampfwerk, das Lumpen zu Faserbrei schlägt 2 Bütte mit Faserbrei 3 Schöpfform 4 Deckel
5 Spindelpresse mit einem Pauscht aus Filzen und Bogen 6 Zum Trocknen aufgehängte Bogen

Papier ist eine dünne Lage aus Pflanzenfasern, die in Wasser geschlagen, auf einem Sieb geschöpft und getrocknet wird, bis die Fasern aneinander haften. Leichter als Bambusstreifen und billiger als Seide oder Pergament, trug es Schrift und später Druck vom China der Han in die übrige Welt.

Was es ist

Papier ist ein Blatt aus Pflanzenfasern, die man voneinander gelöst, in Wasser verteilt und zu einer dünnen Lage abgesetzt hat. Beim Trocknen hält diese Lage ohne Leim zusammen. Papyrus dagegen besteht aus Streifen vom Mark der Papyrusstaude, eines Sauergrases, die kreuzweise aufeinandergepresst werden, und Pergament ist Tierhaut.

Es lässt sich sogar aus Abfällen wie Lumpen und abgenutzten Fischernetzen herstellen. Seit rund zweitausend Jahren trägt es Schrift, Druck, Geld und Landkarten.

Die Tafel zeigt das europäische Handverfahren, das bis zur Ablösung durch Maschinen im 19. Jahrhundert üblich war.

Wie es funktioniert

Seine Festigkeit verdankt Papier der Cellulose, dem langen Molekül der pflanzlichen Zellwände. Im Wasser geschlagen, quellen die Fasern auf und spalten sich in feine Fibrillen. Wenn die nasse Lage trocknet, zieht das Wasser die Fasern eng aneinander, und überall, wo sie sich berühren, bilden sich Wasserstoffbrücken. Nässe löst sie wieder, deshalb reißt nasses Papier so leicht.

Rinde, Hanf, Lumpen und alte Netze: die Stoffe, die Cai Lun in seinem Bericht von 105 nennt.

Zuerst wird der Rohstoff zu Faserbrei. In China weichte man Rinde, Hanf und später Bambus ein, kochte sie und zerstampfte sie. In Europa ließ man Lumpen aus Leinen und Hanf einige Wochen lang faulen und schlug sie dann in Trögen mit hölzernen Stampfen, die von Nocken auf der Welle eines Wasserrads gehoben wurden.

Feine Rippdrähte, kräftigere Kettdrähte und ein aufgenähtes Wasserzeichen aus Draht.

Der Brei wird in einer Bütte mit Wasser verrührt, bis er wie dünne Milch aussieht. Der Schöpfer taucht die Schöpfform ein, einen Holzrahmen mit feinen gespannten Drähten, und hebt sie waagerecht heraus. Ein loser Rahmen, der Deckel, liegt obenauf und begrenzt den Rand des Bogens. Während das Wasser abläuft, schüttelt der Schöpfer die Form kurz nach beiden Seiten, damit sich die Fasern kreuz und quer legen und miteinander verfilzen.

Der Gautscher stürzt die Form auf einen Wollfilz, und der nasse Bogen bleibt auf dem Filz liegen. Filze und Bogen wachsen zu einem Pauscht, der in einer Spindelpresse den größten Teil seines Wassers abgibt. Danach trocknen die Bogen auf Leinen. Für Feder und Tinte tauchte man europäische Bogen in tierischen Gelatineleim, denn ohne ihn läuft die Tinte aus wie auf Löschpapier.

Wie man Papier herstellt

Lumpen aus Baumwolle oder Leinen, Hanf und der Bast des Maulbeerbaums sind die einfachsten Fasern. Holz muss maschinell geschliffen oder chemisch aufgeschlossen werden.

Fasern vorbereiten. Schneiden Sie die Lumpen in kleine Stücke. Weichen Sie sie mehrere Tage ein und schlagen Sie sie dann mit einem Stößel oder Holzhammer auf einem flachen Stein, bis sich eine Prise, in einem Glas Wasser geschüttelt, in einzelne Fasern ohne sichtbare Fäden auflöst. Rinde kocht man zuerst einige Stunden in Wasser mit Holzasche, in einem Topf aus Eisen oder Edelstahl (nie aus Aluminium). Dann spült man sie, bis das Wasser klar abläuft und sich die Fasern nicht mehr glitschig anfühlen, und schlägt sie anschließend.

Schöpfform und Deckel bauen. Fertigen Sie zwei gleiche Rahmen aus geradfaserigem Holz in der gewünschten Bogengröße. Über einen davon spannen Sie ein feines Sieb: Messingdraht, dicht gewebtes Tuch oder dünne Bambus- oder Grashalme, die nebeneinander festgebunden werden, wie es die Papiermacher in Asien taten. Der leere Rahmen ist der Deckel.

Bogen schöpfen. Füllen Sie die Wanne mit Wasser und geben Sie Faserbrei hinzu, bis das Wasser trüb wird. Halten Sie Form und Deckel zusammen, tauchen Sie sie an der abgewandten Seite ein, heben Sie sie flach heraus und schütteln Sie sacht, während das Wasser abläuft.

Gautschen und pressen. Nehmen Sie den Deckel ab, stürzen Sie die Form mit dem Sieb nach unten auf einen feuchten Filz und drücken Sie entlang der Rückseite, damit der Bogen auf dem Filz bleibt. Legen Sie einen weiteren Filz darauf und wiederholen Sie den Vorgang. Pressen Sie den Stapel zwischen beschwerten Brettern oder in einer Spindelpresse.

Trocknen und leimen. Hängen Sie die Bogen über eine Leine oder streichen Sie sie mit einer Bürste auf ein glattes Brett. Wer mit Tinte darauf schreiben will, taucht die trockenen Bogen in warme, dünne Gelatine oder Stärkekleister und lässt sie erneut trocknen.

> **Sicherheit.** Lauge aus Holzasche verätzt Haut und Augen: Tragen Sie Handschuhe und Schutzbrille, und kochen Sie Fasern im Freien. Der Boden rund um eine Bütte bleibt nass und rutschig. Wassergetriebene Stampfwerke und Spindelpressen können Finger zerquetschen: Kuppeln Sie vor jedem Hineingreifen das Wasserrad ab, sichern Sie die Stampfer gegen Herabfallen und lösen Sie die Presse.

Geschichte und Entwicklung

Jahrhundertelang galt Cai Lun als Erfinder, ein Beamter am Hof der Östlichen Han, der 105 n. Chr. dem Kaiser ein Verfahren meldete, Papier aus Rinde, Hanfabfällen, Lumpen und Fischernetzen herzustellen. Die Archäologie hat das Datum weiter zurückverlegt: Ein Fragment mit einer gezeichneten Karte aus einem Grab in Fangmatan in der Provinz Gansu stammt aus dem 2. Jahrhundert v. Chr. Wahrscheinlich hat Cai Lun das Verfahren verbessert und das Papier zum Schreiben brauchbar gemacht.

Die Papiermacherei gelangte nach Korea, nach Vietnam und bis zum frühen 7. Jahrhundert nach Japan. Die Erzählung, chinesische Gefangene aus der Schlacht am Talas 751 hätten sie nach Samarkand gebracht, wird bezweifelt, denn dort war Papier schon früher in Gebrauch. Aus der islamischen Welt kam das Handwerk nach Spanien, wo man in Xàtiva im 12. Jahrhundert Papier herstellte.

Im 13. Jahrhundert führten die Mühlen von Fabriano in Italien wassergetriebene Stampfwerke, die Leimung mit Gelatine und das Wasserzeichen ein. Ulman Stromer gründete 1390 in Nürnberg die erste belegte Papiermühle im deutschen Raum.

1799 ließ sich der Franzose Louis-Nicolas Robert eine Maschine patentieren, die Papier auf einem endlos umlaufenden Drahtsieb bildete. Die Brüder Fourdrinier finanzierten ihre Weiterentwicklung in England, und moderne Maschinen folgen noch derselben Anordnung. In den 1840er Jahren zeigten Friedrich Gottlob Keller in Sachsen und Charles Fenerty in Nova Scotia, dass Holzschliff die Lumpen ersetzen kann. Holzschliff machte Papier viel billiger und half den Zeitungen zu wachsen. Viel davon war jedoch sauer, und zahlreiche Bücher des 19. Jahrhunderts sind vergilbt und brüchig geworden, während Hadernpapier aus dem 15. Jahrhundert noch geschmeidig ist.

In der Papiermaschine wurde die Schöpfform zum endlosen Drahtsieb und der Bogen zur durchgehenden Bahn.

Kennzahlen

Ältestes bekanntes Fragment
Karte aus Fangmatan (Gansu), zwischen 179 und 141 v. Chr.

Bericht des Cai Lun an den Kaiser
105 n. Chr.

Erste Papiermühle im deutschen Raum
Nürnberg, 1390

Leistung einer Büttenmannschaft von Hand
Etwa 1.000 bis 4.500 Bogen an einem langen Arbeitstag

Erstes Patent auf eine Papiermaschine
Louis-Nicolas Robert, Frankreich, 1799

Quellen

1. History of paper · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_paper
2. The oldest paper on Earth to be displayed (Fangmatan map) · Hong Kong SAR Government https://www.info.gov.hk/gia/general/199809/05/0904159.htm
3. Cai Lun invents paper · EBSCO Research Starters https://ebsco.com/research-starters/history/cai-lun-invents-paper
4. Topics in Preservation Science: Fabriano paper · Library of Congress https://loc.gov/preservation/outreach/tops/albro/index.html
5. The history of papermaking · Confederation of European Paper Industries (CEPI) https://cepi.org/?p=768
6. Magnolia PaperWeight: an app for hand papermakers and paper conservators · Magnolia Editions (Donald Farnsworth) https://www.magnoliaeditions.com/wp-content/uploads/2021/05/PaperWeight-article-V2.1.pdf
7. Cranberry Corner No. 5 · Guild of Book Workers Newsletter (Edward H. Snider) https://guildofbookworkers.org/sites/default/files/newsletter/gbw115/paper.html
8. European Papermaking Techniques 1300–1800 · University of Iowa (Timothy Barrett) https://paper.lib.uiowa.edu/european.php
9. Chain lines · Mills Archive https://millsarchive.org/glossary/a-z-glossary/2794

Fakten geprüft am 2026-10-11

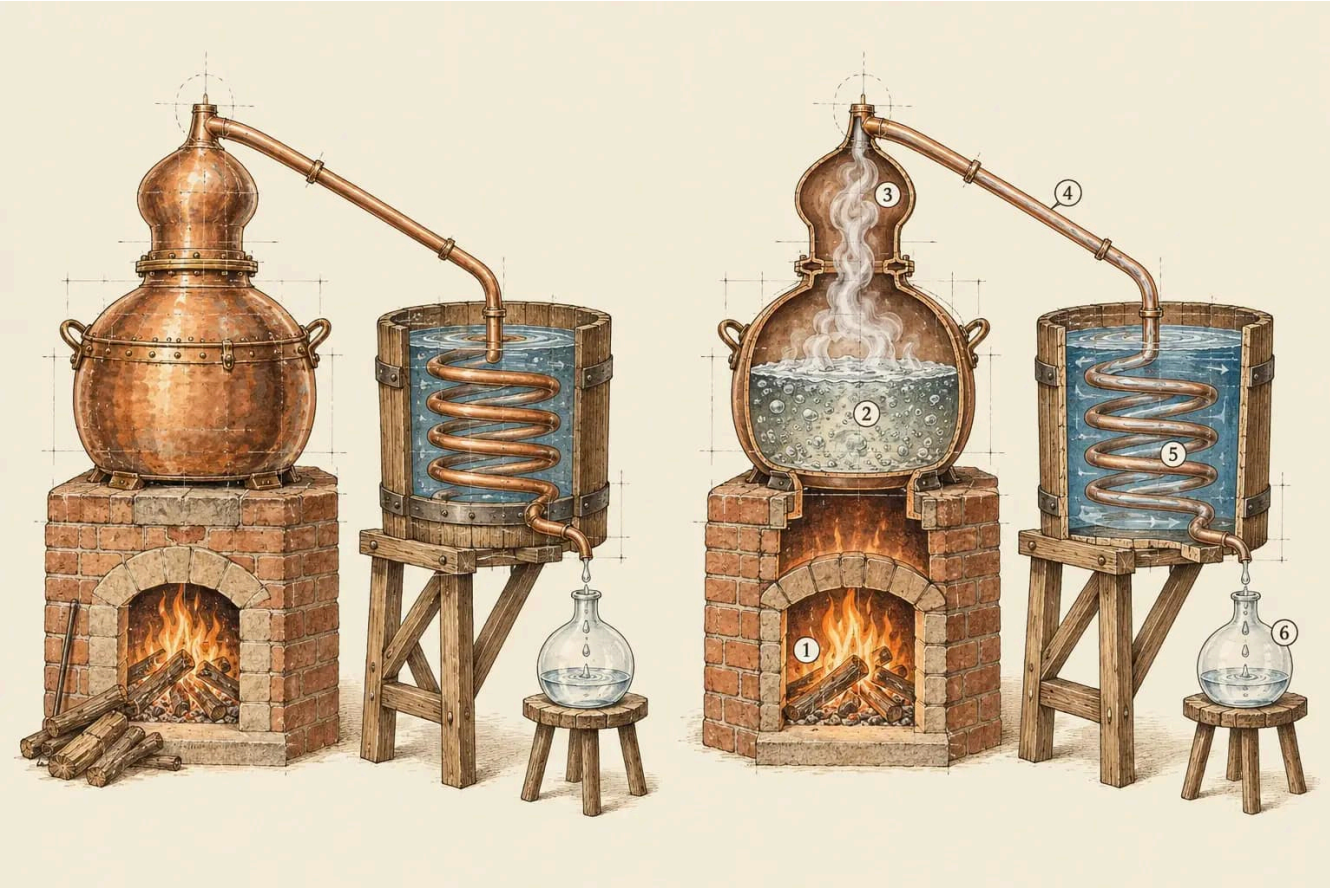
Destillation

Trennen durch Verdampfen und Kondensieren

um 300 · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Töpferei (S. 23), Beherrschung des Feuers (S. 9)

Führt zu: Hygiene und Antisepsis (S. 302), Verbrennungsmotor (S. 318), Kältetechnik (S. 285)



1 Feuer im Ofen 2 Blase mit siedender Flüssigkeit 3 Helm 4 Dampfrohr 5 Kühlschlange im Fass mit kaltem Wasser 6 Vorlage

Bei der Destillation wird eine Flüssigkeit erhitzt, bis ein Teil verdampft, und der Dampf in einem anderen Gefäß wieder zu Flüssigkeit abgekühlt; so lassen sich ihre Bestandteile trennen. Um 300 n. Chr. im römischen Ägypten beschrieben, lieferte sie reines Wasser, Duftwässer und ätherische Öle, Alkohol für die Medizin und seit dem 19. Jahrhundert die Kraftstoffe aus Erdöl.

Was es ist

Destillieren heißt, Stoffe durch Verdampfen und Kondensieren zu trennen. Man erhitzt eine Flüssigkeit, meist bis zum Sieden, bis ein Teil verdampft, leitet den Dampf ab und kühlt ihn, sodass er in einem anderen Gefäß wieder flüssig wird. Was nicht verdampft, bleibt in der Blase zurück: Salz, Schlamm, Farbstoffe, die meisten Keime.

Apotheker stellten so Arzneien und Duftwässer her, Parfümeure holten damit den Duft aus Blüten, Ärzte gewannen starken Alkohol, mit dem sie Arzneistoffe lösten und Wunden behandelten. Labore und Krankenhäuser verwenden destilliertes Wasser, weil es fast keine gelösten Salze mehr enthält, und aus demselben Grund füllt man es in Bleiakkus nach.

Die Tafel zeigt eine Brennblase aus dem frühen 16. Jahrhundert, wie sie die ersten gedruckten Destillierbücher abbildeten: einen kupfernen Kessel auf einem kleinen Ofen, einen gewölbten Helm und ein Rohr, das sich durch ein Fass mit kaltem Wasser windet und in eine Flasche tropft.

Wie es funktioniert

Jede Flüssigkeit gibt Dampf ab, umso mehr, je wärmer sie ist. Sie siedet, wenn der Druck dieses Dampfes dem Luftdruck gleichkommt. Auf Meereshöhe siedet Wasser bei 100 °C, Ethanol, der Alkohol im Wein, bei etwa 78 °C und Methanol bei etwa 65 °C. Salze verdampfen kaum, deshalb liefert kondensierter Dampf aus kochendem Meerwasser Süßwasser.

Das Feuer heizt die Blase, der Dampf steigt in den Helm. Von dort läuft er durch ein Rohr in die Kühlschlange, eine Rohrspirale im kalten Wasser, das ihm die Wärme entzieht. Der Dampf schlägt sich im Kupfer nieder und tropft in die Vorlage.

In der Florentiner Flasche schwimmt das Öl oben, das Wasser läuft durch das Seitenrohr ab.

Ätherische Öle gewinnt man durch Wasserdampfdestillation. Dampf strömt durch Blüten, Blätter oder Schalen und nimmt ihr Duftöl mit. Öl und Wasser mischen sich nicht, also steuert jedes seinen eigenen Dampfdruck bei, und das Gemisch siedet unter 100 °C, auch wenn das Öl allein erst über 250 °C sieden würde. So geht das Öl über, ohne zu verbrennen, und setzt sich in der Vorlage als eigene Schicht ab.

Verdampfen zwei mischbare Flüssigkeiten zugleich, etwa Wasser und Alkohol, bleibt die Trennung unvollständig. Der Dampf enthält mehr vom flüchtigeren Stoff, aber nie nur ihn, und so brannten Destillateure das Erzeugnis ein zweites Mal. Eine Fraktionierkolonne wiederholt das in einem Durchgang viele Male: Aufsteigender Dampf trifft auf zurücklaufende Flüssigkeit, den Rücklauf, und auf jeder Stufe kondensiert ein Teil und verdampft erneut. Raffinerien zerlegen so Rohöl nach Siedebereichen in Gas, Benzin, Kerosin, Diesel und schwere Rückstände.

Wie man es macht

Dieser Abschnitt behandelt nur eines: trinkbares Wasser aus salzigem oder schlammigem Wasser. Er beschreibt nicht die Herstellung von Alkohol. Schnapsbrennen ohne Erlaubnis ist in vielen Ländern verboten, und eine schlecht geführte Brennblase kann Methanol anreichern, das schon in kleinen Mengen blind macht und tötet und sich weder schmecken noch riechen lässt.

Solardestille. Füllen Sie wenige Zentimeter Wasser in eine flache, dunkle Wanne in praller Sonne. Decken Sie sie mit sauberem Glas oder mit hitzebeständiger, lebensmittelechter Klarsichtfolie ab, so geneigt, dass die Tropfen an der Unterseite zu einer Rinne an der tiefen Kante laufen, die in ein abgedecktes Glasgefäß führt. Dichten Sie die Ränder ab, damit kein Dampf entweicht. In tropischer Sonne liefert eine gut gebaute Anlage zwei bis drei Liter pro Quadratmeter und Tag; anderswo und mit behelfsmäßigem Material ist es weniger.

Topf und Deckel. Füllen Sie einen großen Metalltopf halb und stellen Sie ihn aufs Feuer. In die Mitte kommt eine kleine, saubere Metallschale auf einem Stein, ihr Rand deutlich über dem Wasser. Legen Sie einen Metalldeckel umgekehrt auf, den Griff zur Schale hin, und kühlen Sie ihn mit Schnee, kaltem Wasser oder einem nassen Tuch; einen Glasdeckel nie so kühlen, er kann zerspringen. Halten Sie das Wasser nur leicht siedend: Starkes Sprudeln spritzt Rohwasser in die Schale.

Liegt der Deckel umgekehrt, läuft das Kondenswasser zum Griff und tropft in die Schale.

Auf Lecks achten. Lassen Sie ein paar Tropfen des aufgefangenen Wassers auf einem sauberen dunklen Teller trocknen. Eine weiße Kruste zeigt, dass Rohwasser in das Auffanggefäß spritzt oder sickert. Ein sauberer Teller beweist sonst nichts: weder dass die Destille gut trennt noch dass das Wasser unbedenklich ist, denn auch klares Wasser kann schädliche Stoffe enthalten, und das klärt nur eine Laboranalyse.

Grenzen kennen. Die Destillation hält Salz, Metalle wie Blei, Nitrat und Keime zurück. Stoffe, die nahe 100 °C oder darunter sieden, etwa manche Lösungsmittel und Kraftstoffe, entfernt sie nicht zuverlässig, und andere Chemikalien gehen mit dem Dampf über: Kann die Quelle chemisch belastet sein, suchen Sie eine andere. Bewahren Sie das Wasser in sauberen, abgedeckten Gefäßen aus Glas, Edelstahl oder lebensmittelechtem Kunststoff auf, denn Keime kommen schnell zurück. Meiden Sie glasierte Töpferware, deren Glasur Blei abgeben kann.

> **Sicherheit.** Dampf verbrüht schlimmer als kochendes Wasser: Deckel immer vom Gesicht weg anheben. Verschließen Sie nie ein Gefäß, das erhitzt wird, und binden Sie seinen Deckel nie fest; der Dampf braucht einen Ausweg, sonst kann der Topf bersten. Gewöhnliches Glas springt über der Flamme oder bei plötzlicher Kälte. Behalten Sie das Feuer im Auge, halten Sie es von trockenem Gras fern und Kinder auf Abstand. Destillieren Sie nie Kraftstoff, Alkohol oder unbekannte Flüssigkeiten: Ihre Dämpfe entzünden sich, und Methanol aus Vergorenem geht ins Destillat über.

Geschichte und Entwicklung

In Tepe Gawra im Nordirak fand man Gefäße aus dem 5. und 4. Jahrtausend v. Chr. mit einer Rinne um den Rand, die womöglich kondensierte Flüssigkeit auffing. In Versuchen, die 2020 veröffentlicht wurden, lieferten Nachbauten Duftwasser, doch ihr ursprünglicher Zweck ist weiter umstritten.

Die ersten klaren Beschreibungen von Destillen stammen aus dem römischen Ägypten. Um 300 n. Chr. schrieb der Alchemist Zosimos von Panopolis über Destillierapparate mit einem oder mehreren Rohren und schrieb manche davon Maria der Jüdin zu. Alchemisten und Ärzte der islamischen Welt übernahmen das Gerät, und aus seinem arabischen Namen al-anbiq wurde „Alembik“. Im 9. Jahrhundert verfasste der Philosoph al-Kindi ein Buch über Parfüm und Destillation mit über hundert Rezepten.

Der Tribikos der alexandrinischen Alchemisten leitete den Dampf durch drei Röhren in drei Flaschen.

In Bologna beschrieben Ärzte in den 1270er-Jahren das aqua vitae, „Lebenswasser“, aus Wein destillierten Alkohol, der als Heilmittel diente. In Straßburg veröffentlichte der Wundarzt Hieronymus Brunschwig 1500 das erste gedruckte Handbuch über das Brennen medizinischer Wässer und 1512 ein umfangreicheres Werk.

1830 ließ sich der Ire Aeneas Coffey eine Zwei-Kolonnen-Destille patentieren, die ohne Unterbrechung lief statt in einzelnen Bränden. Um 1854 betrieb Samuel Kier in Pittsburgh eine der ersten Erdölraffinerien und destillierte Rohöl zu Lampenpetroleum. 2011 entfiel noch rund ein Drittel der weltweit installierten Entsalzungskapazität auf die Destillation, oft aus Anlagen, die die Abwärme von Kraftwerken nutzen.

Kennzahlen

Siedepunkte auf Meereshöhe
Wasser 100 °C, Ethanol etwa 78 °C, Methanol etwa 65 °C

Einfache Solardestille
Etwa 2,3–3 Liter pro Quadratmeter und Tag in tropischer Sonne

Entsalzung 2011
Rund ein Drittel der Weltkapazität durch Destillation, 60 % durch Umkehrosmose

Erste klare Beschreibung einer Destille
Zosimos von Panopolis, Ägypten, um 300 n. Chr.

Kontinuierliche Kolonnendestille
1830 von Aeneas Coffey patentiert

Quellen

1. Ancient Distillation and Experimental Archaeology about the Prehistoric Apparatuses of Tepe Gawra (Belgiorno, 2020) · EXARC Journal https://exarc.net/ark:/88735/10508
2. Zosimos of Panopolis · Complete Dictionary of Scientific Biography, via Encyclopedia.com https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/zosimos-panopolis
3. Classic kit: Mary's bath (Sella, 2009) · Chemistry World, Royal Society of Chemistry https://www.chemistryworld.com/opinion/classic-kit-marys-bath/3004925.article
4. Distillation · Foundation for Science, Technology and Civilisation (Muslim Heritage) https://muslimheritage.com/distillation/
5. Al-Kindī's Attack on Alchemy and His Perfume Making (Inoue, 2017) · Orient 52, Society for Near Eastern Studies in Japan https://www.jstage.jst.go.jp/article/orient/52/0/52_72/_article
6. Aqua vitae (Wondrich) · The Oxford Companion to Spirits and Cocktails, Oxford University Press https://www.spiritsanddistilling.com/dictionary/acref-9780199311132-e-1030
7. Coffey, Aeneas · The Oxford Companion to Spirits and Cocktails, Oxford University Press https://www.spiritsanddistilling.com/dictionary/id/acref-9780199311132-e-1328
8. Distilling reliable remedies: Hieronymus Brunschwig's Liber de arte distillandi (1500) (Taape) · Ambix 61, Apollo repository, University of Cambridge https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/260374
9. Liber de arte Distillandi de Compositis (Brunschwig, 1512) · Science History Institute https://digital.sciencehistory.org/works/1jcqz5i
10. Steam Distillation: Separation Theory (Nichols) · LibreTexts Chemistry https://chem.libretexts.org/Courses/SUNY_Oneonta/Chem_221%3A_Organic_Chemistry_I_(Bennett)/2%3ALab_Textbook_(Nichols)/05%3A_Distillation/5.05%3A_Steam_Distillation/5.5C%3A_Separation_Theory
11. Drinking Water Treatment: Distillation (G1493) · University of Nebraska–Lincoln Extension https://extensionpubs.unl.edu/publication/g1493/html/view
12. Solar distillation · Practical Action https://samplecontents.library.ph/en-practical_action/Energy/Solar%20energy/solar-distillation/page5.html
13. Some Petroleum Pioneers of Pittsburgh (Mann, 2009) · Heinz History Center https://www.heinzhistorycenter.org/wp-content/uploads/2022/08/4-Petroleum-Pioneers.pdf
14. Modern technology and economical developments in desalination on emphasis of nuclear methodology (Abdallah) · Acta Technica Corviniensis, 2018 https://acta.fih.upt.ro/pdf/2018-2/ACTA-2018-2-08.pdf
15. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data (Sharqawy, Lienhard and Zubair, 2010) · Desalination and Water Treatment 16, via DSpace@MIT https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/69157

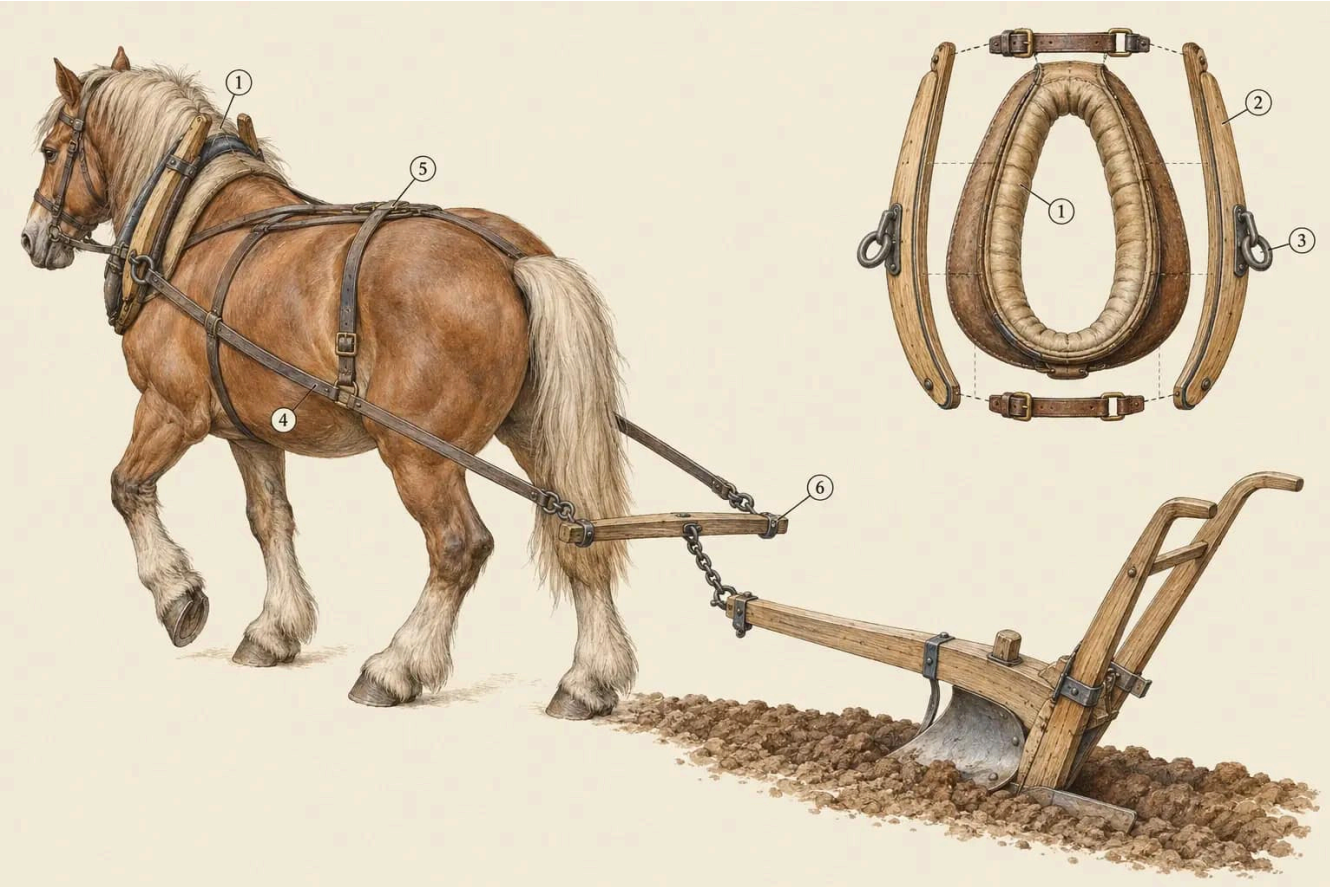
Fakten geprüft am 2026-10-14

Kummet

Das Pferd zieht mit den Schultern

um 480 · Antike · Handwerk & Städte

Erfordert: Ledergerbung (S. 103), Seil & Schnur (S. 13)



1 Gepolstertes Kummet 2 Kummetbügel 3 Zughaken 4 Zugstrang 5 Rückenriemen 6 Ortscheit

Das Kummet ist ein steifer, gepolsterter Ring, der an den Schultern des Pferdes anliegt; die Zugstränge sind nahe dem Buggelenk daran eingehängt. So kann sich das Pferd mit seinem ganzen Gewicht in die Last legen, ohne auf die Luftröhre zu drücken, und im mittelalterlichen Europa übernahm es einen großen Teil der Pflug- und Fuhrarbeit der Ochsen.

Was es ist

Das Kummet ist ein mit Stroh gestopfter Lederring, so geformt, dass er am Halsansatz vor den Schultern sitzt. Zwei gebogene Hölzer oder Eisen, die Kummetbügel, sind in eine umlaufende Rinne geschnallt, und an ihnen hängen die Zugstränge, die die Last ziehen. Ein Rückenriemen hält die Stränge auf Höhe, und ein hölzerner Querbalken, das Ortscheit, verbindet ihre Enden mit dem Pflug oder Wagen.

In diesem Geschirr schiebt das Pferd mit Brust und Schultern, so wie ein Mensch sich gegen einen Handkarren stemmt. Zusammen mit dem genagelten Hufeisen und dem schweren Pflug half das Kummet dem Pferd, auf vielen Höfen Nordeuropas im Mittelalter den Ochsen abzulösen.

Wie es funktioniert

Zuerst gingen Pferde wie Ochsen unter dem Joch. Die Deichsel eines Streitwagens führte zu einem Joch auf Hals oder Widerrist des Gespanns, der Erhebung über den Schultern, gehalten von einem Riemen um jeden Hals. Ägyptische Wagenpferde trugen gegabelte Jochsättel, die auf den Schultern auflagen, und griechische und römische Gespanne zogen vor allem gegen einen Brustriemen. Richard Lefebvre des Noëttes rekonstruierte all das als Riemen, der hochrutschte und auf die Luftröhre drückte. Spätere Versuche widersprechen ihm (siehe Geschichte).

Das „Kehl-Gurt-Geschirr", wie Historiker es lange zeichneten: ein Joch auf dem Widerrist, ein Halsriemen und ein Bauchgurt.

Ochsen passen besser unter ein Joch. Ihr Hals ist kurz und dick, und viele Rassen haben vor dem Widerrist einen Buckel oder Muskelwulst, gegen den der Balken drücken kann. Das Stirn- oder Hornjoch wird an die Hörner gebunden; das Widerristjoch liegt vor den Schultern auf dem Hals. Das Pferd dagegen hat einen langen Hals, und die Luftröhre liegt dicht unter der Haut.

Ochsen unter einem Widerristjoch: Der Balken drückt vor den Schultern auf den Hals, Holzbügel schließen ihn nach unten.

Zuerst kam das Brustblatt: ein breiter Riemen quer über die Brust, unterhalb der Luftröhre, an dessen Enden die Stränge ansetzen. Es ist leicht und wird bei leichten Kutschen noch benutzt, doch unter schwerer, ruckender Last verrutscht es und scheuert.

Das Kummet verteilt dieselbe Zugkraft auf eine größere, steifere Fläche. Seine Innenseite liegt auf den Muskeln vor den Schulterblättern und lässt an der Kehle Luft. Die Bügel bilden einen festen Rahmen, sodass jeder Strang am ganzen Kummet zieht. Für Zugrinder schätzte W. Micuta von der Stiftung Bellerive die Auflage eines gut gepolsterten Kummets auf etwa 1.200 cm^2 an beiden Schultern, gegenüber rund 200 cm^2 beim Widerristjoch.

Die Zuglinie ist so wichtig wie die Polsterung. Die Zughaken an den Bügeln sitzen etwas über dem Buggelenk, und jeder Strang soll im rechten Winkel zur Schräge der Schulter abgehen. Steigen die Stränge zu einem hoch liegenden Anhängepunkt, hebeln sie das Kummet gegen die Kehle. Das Ortscheit dreht sich um seine Mitte, sodass das Pferd im Gehen die Schultern bewegen kann, ohne an der Last zu rucken.

Wie man es baut

Kummets werden vom Sattler genäht, mit einem harten Strohwulst vorn und einer glatten Innenseite zum Pferd hin. Ein solides gebrauchtes Kummet, sorgfältig angepasst, ist meist besser als ein selbst gebautes.

Größe wählen. Gemessen wird innen, von oben nach unten: 16 Zoll (41 cm) oder weniger für ein Pony, 24 Zoll (61 cm) oder mehr für ein schweres Kaltblut. Ein Pferd mit dickem Hals braucht zudem ein oben weiteres Kummet.

Sitz prüfen. Drücken Sie das Kummet an die Schultern, wie unter Zug. An den Seiten sollen flache Finger zwischen Rand und Hals passen, aber nicht die ganze Hand. An der Kehle bleiben etwa 5 cm frei. Ein zu kurzes Kummet rutscht hoch und würgt; ein zu langes sinkt auf das Buggelenk und scheuert.

Bügel anpassen. Sie sollen auf ganzer Länge flach in der Rinne liegen. Erst den unteren Riemen schließen, dann den oberen gerade durchziehen.

Stränge einstellen. Der Rückenriemen trägt die Stränge in der richtigen Höhe, der Bauchgurt hindert sie daran, unter Zug hochzusteigen. Beide so verstellen, dass jeder Strang im rechten Winkel zur Schulter vom Zughaken abgeht, und so tief anspannen, dass die Stränge das Kummet nie nach oben ziehen.

Das Spiel an der Kehle prüft man mit an die Schultern gedrücktem Kummet.

Auf Druckstellen achten. Kurz abgeriebenes Haar an der Schulter ist das erste Warnzeichen: Den Sitz korrigieren, bevor die Haut aufgeht, und ein wundes Pferd bis zur Heilung ruhen lassen. Nimmt ein Pferd ab, braucht es ein Polster oder ein kleineres Kummet. Bei jeder Pause das Kummet anheben, damit die Schultern abkühlen; abends Kummet und Schultern säubern.

> **Sicherheit.** Ein Kaltblut kann fast eine Tonne wiegen; es kann ausschlagen, durchgehen oder Sie gegen den Wagen drücken. Lernen Sie bei einem erfahrenen Fahrer, und lassen Sie das Pferd beim An- und Abspannen von einem Helfer halten. Halten Sie sich beim An- und beim Abspannen jedes Mal genau an die Abfolge, die man Ihnen beigebracht hat. Steigen Sie nie über einen Strang, stellen Sie sich nie zwischen Pferd und Last, und binden Sie sich nie mit Seil oder Leine an die Last. Sprechen Sie das Pferd an, bevor Sie die Hinterhand berühren. Gönnen Sie Pausen und Wasser, und hören Sie auf, wenn das Pferd Not zeigt oder das Geschirr verrutscht.

Geschichte und Entwicklung

China gab das Joch als Erstes auf. Ein Lackkasten aus dem Staat Chu, bemalt im 4. Jahrhundert v. Chr., zeigt Pferde, die gegen einen Querholm vor der Brust ziehen, und das weichere Brustblatt ist auf Reliefs der Han-Zeit häufig. Die früheste klare Darstellung eines Kummetgeschirrs ist ein Wandbild in Höhle 257 von Mogao bei Dunhuang, datiert auf 477–499 n. Chr., auch wenn die Polsterung darauf undeutlich ist. Pita Kelekna setzt Brustblatt und Kummet schon ins 1. Jahrtausend v. Chr.

Nach Europa gelangte das Kummet im Frühmittelalter, wohl über Zentralasien. Lynn White verortete es um 800 im Karolingerreich; W. Micuta nennt das 11. Jahrhundert. Im 12. war es verbreitet. Mit Hufeisen für nasse Böden und Hafer aus der Dreifelderwirtschaft übernahmen Pferde in Teilen des Nordens das Pflügen, schneller als Ochsen.

Jahrzehntelang galt, dass das antike Geschirr Pferde erwürgte. Lefebvre des Noëttes testete 1910 einen Nachbau und kam auf kaum mehr als 500 kg für zwei Pferde. In 1977 veröffentlichten Versuchen baute Jean Spruytte ägyptische, griechische und römische Geschirre nach, zeigte, dass der frühere Nachbau falsch war, und zog mit einem davon etwa eine Tonne über Sand. Diese Arbeiten lassen dem Kummet seinen Nutzen für langsames, schweres Ziehen wie beim Pflügen und räumen mit der Vorstellung auf, antike Pferde seien von ihrem Geschirr erstickt worden.

Kennzahlen

Früheste klare Darstellung
Höhle 257 von Mogao, Dunhuang (China), 477–499 n. Chr.

Kummetgrößen
Etwa 16 bis 24 Zoll (41–61 cm), innen von oben nach unten gemessen

Auflagefläche (Zugrinder)
Etwa 1.200 cm^2 für ein gepolstertes Kummet an beiden Schultern, gegenüber etwa 200 cm^2 beim Widerristjoch (Schätzung von W. Micuta)

In Europa
Um 800 im Karolingerreich; im 11.–12. Jahrhundert verbreitet

Spiel an der Kehle
Etwa 5 cm, mit an die Schultern gedrücktem Kummet

Quellen

1. Technology in the Middle Ages (Lynn White Jr., in Technology in Western Civilization, 1967) · Oxford University Press (course reading, Manchester University) https://users.manchester.edu/facstaff/ssnaragon/kant/lp/Readings/White,%20Plow.html
2. L'attelage dans l'Antiquité. Le prestige d'une erreur scientifique (Marie-Claire Amouretti, 1991) · Annales. Économies, Sociétés, Civilisations 46-1 https://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1991_num_46_1_278939
3. Roman Traction Systems: the dorsal yoke (Judith A. Weller) · Roman Science and Technology, humanist.de https://humanist.de/rome/rts/dorsal.html
4. The Lefebvre des Noëttes review page · Roman Science and Technology, humanist.de https://humanist.de/rome/ldn/index.html
5. The Swiss collar for developing countries (W. Micuta) · FAO https://www.fao.org/4/V0600T/v0600T0j.htm
6. Collars, Hames and Harness Fitting (Horse & Mule Association of America, Leaflet 276, 1944) · Small Farmer's Journal https://smallfarmersjournal.com/collars-hames-and-harness-fitting/
7. Hitching Safely (Jenifer Morrissey, with Doc Hammill) · Rural Heritage https://ruralheritage.com/hitching-safely/
8. Horse Collar Harnessing: Ancient Carriage Tech · Science and Technology Daily https://www.stdaily.com/web/English/2025-10/24/content_420664.html
9. Efficient equine transport (Pita Kelekna) · Cambridge University Press blog https://cambridgeblog.org/2009/05/efficient-equine-transport/
10. Horse collar · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Horse_collar

Fakten geprüft am 2026-10-14

Schwarzpulver

Der Sprengstoff für Feuerwaffen und Bergbau

um 850 · Mittelalter · Handwerk & Städte

Erfordert: Beherrschung des Feuers (S. 9), Holzkohle (S. 65)

1 Mühlengebäude 2 Wasserrad 3 Bewaldeter Wall zwischen den Gebäuden 4 Pulverfass mit Kupferreifen 5 Pulverhorn 6 Salpeterkristalle

Schwarzpulver ist ein Gemisch aus Salpeter, Holzkohle und Schwefel, das äußerst schnell abbrennt und dabei heißes Gas und eine Wolke aus festen Rauchteilchen freisetzt. Chinesische Alchemisten stießen im 9. Jahrhundert darauf, und in den folgenden fünfhundert Jahren wurde es zum Treibmittel für Raketen, Feuerwaffen und Kanonen, später auch zu einem Werkzeug für Bergbau und Bauwesen.

Was es ist

Schwarzpulver ist der älteste bekannte chemische Sprengstoff. Es ist ein schwarzes oder dunkelgraues Pulver aus drei Stoffen: Salpeter (Kaliumnitrat), Holzkohle und Schwefel. Die meisten Brennstoffe brauchen zum Brennen Luft, Schwarzpulver bringt seinen Sauerstoff dagegen selbst mit und brennt deshalb auch in einem geschlossenen Raum. In einem Sekundenbruchteil wird ein großer Teil seiner Masse zu heißem Gas, und dessen Druck kann eine Kugel aus einem Lauf treiben oder Gestein spalten.

Bis ins 19. Jahrhundert war es der einzige gebräuchliche Sprengstoff und das Treibmittel aller Feuerwaffen. Früher hieß es meist einfach Schießpulver; der Name Schwarzpulver grenzt es von den rauchlosen Pulvern ab, die es ab

den 1880er-Jahren in Feuerwaffen ersetzten. Verwendet wird es noch in Feuerwerk, in Zündschnüren, in Vorderladern und in manchen Steinbrüchen.

Die Tafel zeigt eine Pulvermühle des 18. Jahrhunderts von außen. Die Mühlen standen weit voneinander entfernt an einem Fluss, der ihre Räder antrieb, mit Erdwällen und Bäumen dazwischen, damit eine Explosion in einem Gebäude nicht so leicht auf das nächste übergriff. Am Brandywine in Delaware hatten viele auf drei Seiten schwere Steinmauern, dazu ein leichtes Dach und eine leichte Front zum Fluss, sodass die Druckwelle einer Explosion über das Wasser entwich. Neben der Szene sind ein Fass mit Reifen aus Kupfer, das weit seltener Funken schlägt als Eisen, ein Pulverhorn, in dem Soldaten und Jäger ihr Pulver trugen, und Salpeterkristalle zu sehen.

Wie es funktioniert

Verbrennung ist eine Reaktion zwischen einem Brennstoff und Sauerstoff. In einem Holzfeuer stammt der Sauerstoff aus der Luft, und das Feuer kann nur so schnell brennen, wie Luft an das Holz gelangt. Im Schwarzpulver steckt der Sauerstoff im Salpeter, der eng mit dem Brennstoff vermischt ist. Wird das Pulver erhitzt, zerfällt der Salpeter und gibt seinen Sauerstoff direkt an den Brennstoffteilchen ab, und die Reaktion muss nicht auf Luft warten.

Jeder Bestandteil hat seine eigene Aufgabe. Salpeter ist das Oxidationsmittel und macht den größten Teil der Masse aus. Holzkohle ist der Hauptbrennstoff; sie ist porös, sodass schon wenig davon dem Sauerstoff eine große Oberfläche bietet. Schwefel ist ebenfalls ein Brennstoff, wichtig ist er aber vor allem, weil er die Zündtemperatur des Gemischs senkt und es schneller abbrennen lässt. Die Reinheit des Salpeters und die Holzart, aus der die Kohle stammte, veränderten das Verhalten eines Pulvers, und deshalb achteten die Pulvermacher so sorgfältig auf beides.

Die Reaktionsprodukte sind teils Gase, vor allem Kohlendioxid, Stickstoff und Kohlenmonoxid, teils feste Kaliumsalze. Etwas weniger als die Hälfte der Masse wird zu Gas. Der Rest entweicht als dichter weißer Rauch oder bleibt als Rückstand im Lauf einer Waffe, der deshalb oft gereinigt werden musste.

Schwarzpulver deflagriert: Es brennt sehr schnell ab, doch die Reaktion springt durch Wärme von Korn zu Korn über. Loses Pulver an der freien Luft verpufft mit einem Blitz und einer Rauchwolke. Ist es in einem Lauf eingeschlossen, kann das Gas nicht entweichen, der Druck steigt, das Pulver brennt noch schneller, und das Gas treibt das Geschoss hinaus. Brisante Sprengstoffe wie TNT oder Dynamit detonieren dagegen. Eine Stoßwelle läuft mit mehreren Kilometern pro Sekunde durch sie hindurch, schneller als der Schall in diesem Material, und die Reaktion ist fast augenblicklich vorüber, mit einem zertrümmernden Schlag. Schwarzpulver gibt einen längeren, weicheren Stoß. Das passt zu einem Treibmittel, das ein Geschoss beschleunigen soll, ohne den Lauf zu sprengen. Aus demselben Grund lösten Steinbrucharbeiter damit lange Zeit Steinblöcke ab, die Dynamit zertrümmert hätte.

Funken, Flammen, Reibung, ein Schlag oder statische Elektrizität können Schwarzpulver entzünden, und in Pulvermühlen kamen viele Arbeiter ums Leben. Herstellung, Lagerung und Transport unterliegen fast überall dem Sprengstoffrecht.

Geschichte und Entwicklung

Chinesische Alchemisten der Tang-Dynastie erhitzten auf der Suche nach Elixieren für ein langes Leben Salpeter, Schwefel und viele andere Stoffe. Ein daoistischer Text, der meist auf die Mitte des 9. Jahrhunderts datiert wird, warnt Alchemisten vor bestimmten salpeterhaltigen Gemischen: Einige, die sie erhitzt hatten, verbrannten sich Hände und Gesicht, und sogar ihr Haus ging in Flammen auf. Ob schon ein älterer Text von 808 ein ähnliches Gemisch beschreibt, ist unter Historikern umstritten. Das Gemisch erhielt den Namen *huoyao*, „Feuerarznei“.

Chinesische Heere setzten es bald im Krieg ein. Das *Wujing Zongyao*, ein 1044 abgeschlossenes Militärkompendium, beschreibt Brand- und Rauchwaffen und enthält die ältesten erhaltenen schriftlichen Rezepturen. Ein Seidenbanner aus Dunhuang, gemalt um die Mitte des 10. Jahrhunderts, zeigt eine Feuerlanze, und Truppen der Song setzten Feuerlanzen 1132 bei der Belagerung von De'an ein. Im 13. Jahrhundert schleuderten Verteidiger der Jin und der Song Pulverbomben von ihren Mauern auf die belagernden Heere der Mongolen, und das Rohr der Feuerlanze wurde nun aus Metall gefertigt und mit Geschossen geladen. Die in der Provinz Heilongjiang gefundene bronzene Handkanone trägt kein Datum, doch ihr Fundort verbindet sie mit Kämpfen, die für 1288 überliefert sind; damit gehört sie zu den ältesten bekannten erhaltenen Feuerwaffen.

Die Feuerlanze, ein an einen Speer gebundenes Pulverrohr, spie auf kurze Entfernung einige Sekunden lang Flammen.

Frühe chinesische Handfeuerwaffen waren kurze Bronzerohre, die an einer Holzstange befestigt wurden.

Im 13. Jahrhundert gelangte das Wissen um das Pulver über das Mongolenreich und die islamische Welt nach Westen. Im Sultanat der Mamluken beschreibt die im späten 13. Jahrhundert verfasste Abhandlung des Syrers Hasan al-Rammah Brandsätze und Raketen, und der englische Ordensbruder Roger Bacon erwähnte das Pulver 1267. Die ersten europäischen Belege und Abbildungen von Feuerwaffen stammen aus den 1320er-Jahren: 1326 bestellte die Stadt Florenz Metallkanonen und ihre Munition, und eine Abhandlung, die Walter de Milemete 1326/27 für den jungen Eduard III. schrieb, enthält die Zeichnung eines Geschützes. Zwanzig Jahre später setzten die Engländer in der Schlacht von Crécy wahrscheinlich einige kleine Geschütze ein. Im 15. Jahrhundert konnten Belagerungsgeschütze hohe mittelalterliche Mauern binnen Wochen zum Einsturz bringen, und die Festungsbaumeister antworteten mit niedrigen, dicken Mauern und abgewinkelten Bastionen.

Schwer zu beschaffen war vor allem der Salpeter. In Europa durften Salpetersieder die Böden von Ställen, Taubenschlägen und Kellern aufgraben, und später legten Regierungen Salpeterplantagen an, in denen er sich in Haufen aus Erde und Mist bildete. Im 17. Jahrhundert kauften die europäischen Handelskompanien große Mengen in Indien, in Gujarat, Bihar und Bengalen. 1775 wurde der Chemiker Antoine Lavoisier einer der vier Kommissare der neuen königlichen Pulververwaltung Frankreichs und arbeitete von seinem Labor im Pariser Arsenal aus daran, Versorgung und Qualität des französischen Pulvers zu verbessern. Im 19. Jahrhundert belieferten Natriumnitratlager in der chilenischen Wüste die Sprengstoff- und Düngemittelindustrie, bis deutsche Chemiker im frühen 20. Jahrhundert lernten, Stickstoffverbindungen aus der Luft zu gewinnen.

Salpeter bildet sich langsam dort, wo organische Abfälle in feuchtem Boden verrotten, und jahrhundertelang kratzte man ihn von Wänden und Böden wie diesen.

Pulvermühlen gehörten zu den gefährlichsten Arbeitsstätten des Industriezeitalters. In den 1802 eröffneten Mühlen von du Pont am Brandywine in Delaware gab es 288 Explosionen und mindestens 228 Tote, bevor sie 1921 geschlossen wurden. Die Arbeiter wurden am Tor nach Streichhölzern und nach Metall an Kleidung und Schuhen durchsucht. Mit Schwarzpulver wurden Kanäle, Tunnel und Bergwerke vorgetrieben: Einer der frühesten Belege für Sprengarbeit in einem Bergwerk stammt von 1627 aus

Banská Štiavnica (Schemnitz) im Königreich Ungarn. Ab den 1870er-Jahren löste Dynamit es bei den meisten Sprengarbeiten ab, und in den 1880er- und 1890er-Jahren ersetzten rauchlose Pulver aus Nitrocellulose das Schwarzpulver in Feuerwaffen. Erhalten hat es sich in Feuerwerk, in Zündschnüren und bei Schützen, die mit historischen Waffen schießen.

Kennzahlen

Frühe schriftliche Warnung
Mitte des 9. Jahrhunderts, ein daoistischer alchemistischer Text, China

Älteste erhaltene schriftliche Rezepturen
1044, das Militärkompendium Wujing Zongyao

Eine der ältesten erhaltenen Feuerwaffen
Bronzene Handkanone aus Heilongjiang, nach dem Fundzusammenhang um 1288 datiert

Erste europäische Abbildung einer Feuerwaffe
1326/27, Handschrift des Walter de Milemete, England

Pulvermühlen von du Pont, Delaware (1802–1921)
288 Explosionen, mindestens 228 Tote

Quellen

1. China in 1000 CE, Song dynasty module: gunpowder · Asia for Educators, Columbia University https://afe.easia.columbia.edu/songdynasty-module/tech-gunpowder.html
2. Christ Church MS 92: Walter of Milemete, De nobilitatibus, sapientiis et prudentiis regum (1326–1327) · Christ Church, Oxford (manuscript catalogue) https://www.chch.ox.ac.uk/sites/default/files/2023-09/MS-92.pdf
3. Eleutherian Mills (Hagley), National Register of Historic Places nomination form · U.S. National Park Service https://npgallery.nps.gov/NRHP/GetAsset/NHLS/66000259_text
4. Powder Yard Trail · Hagley Museum and Library https://www.hagley.org/pyt
5. Antoine-Laurent Lavoisier · Science History Institute https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/antoine-laurent-lavoisier/
6. History of gunpowder · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_gunpowder
7. Heilongjiang hand cannon · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Heilongjiang_hand_cannon

Fakten geprüft am 2026-10-12

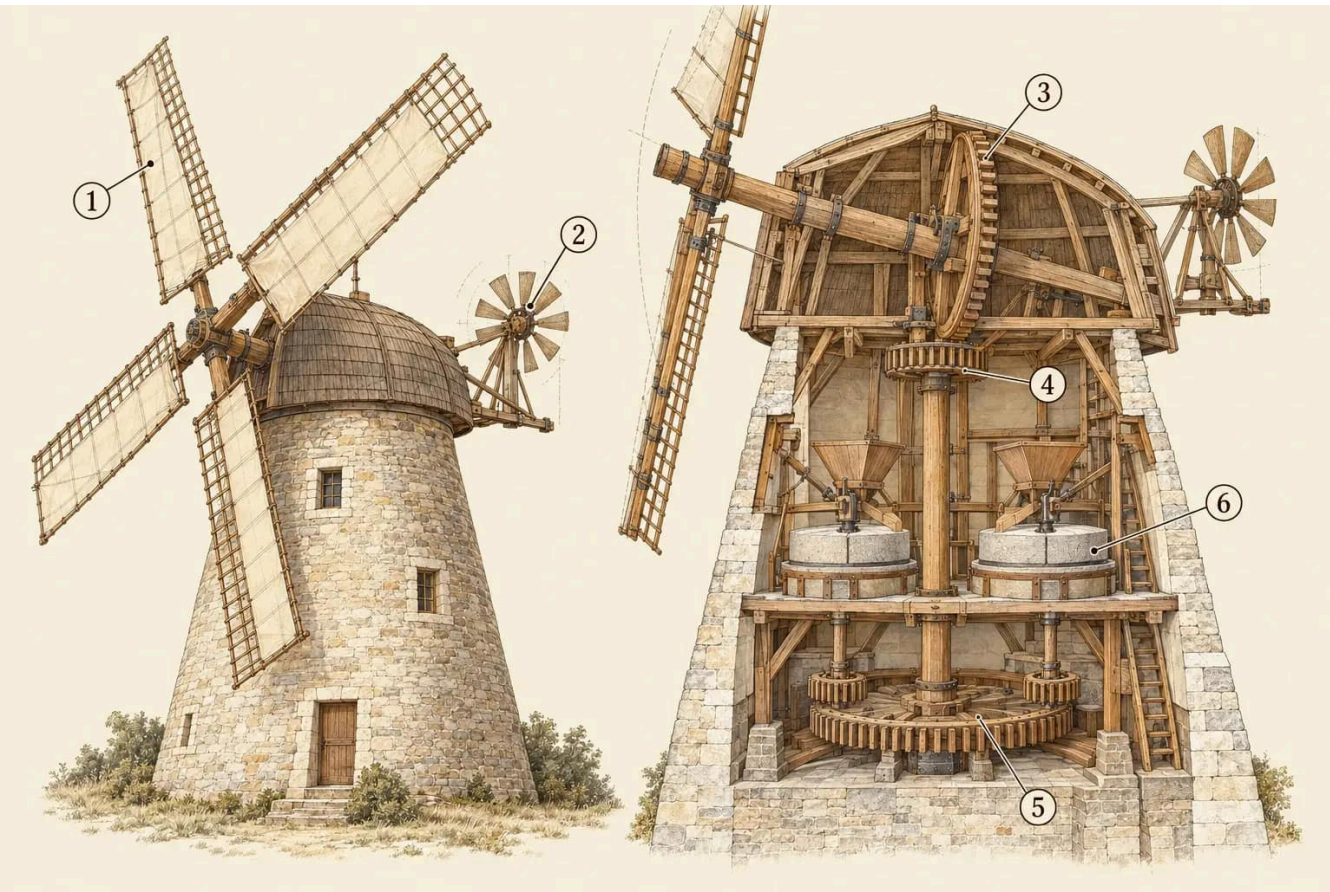
Windmühle

Wind, zu Mehl gemahlen

um 900 · Mittelalter · Handwerk & Städte

Erfordert: Zahnräder (S. 156), Wasserrad (S. 160), Seil & Schnur (S. 13)

Führt zu: Windkraftanlage (S. 344)



1 Flügel 2 Windrose 3 Kammrad 4 Bunkler 5 Stirnrad 6 Mahlgang

Eine Windmühle fängt den Wind mit großen Flügeln ein und leitet seine Kraft über Zahnräder aus Holz und Eisen zu einem Mühlstein, der Getreide mahlt. Vom 12. Jahrhundert bis zum Aufkommen der Dampfmaschine war sie neben dem Wasserrad die wichtigste Quelle mechanischer Kraft in Europa.

Was es ist

Eine Windmühle verwandelt bewegte Luft in eine Drehbewegung und diese Drehung in nützliche Arbeit. Die längste Zeit ihrer Geschichte bestand diese Arbeit darin, Korn zu Mehl zu mahlen. Windmühlen entwässerten aber auch Polder, sägten Holz, pressten Ölsaaten und zerstießen Farbstoffe.

Gezeichnet ist hier eine Turmwindmühle, im Norden auch Holländer genannt: ein fester Steinturm mit einer drehbaren Kappe, die die Flügel in den Wind stellt. Diese Bauart verbreitete sich seit dem Spätmittelalter in ganz Europa, weil ein gemauerter Turm große Flügel und schweres Mahlwerk trägt und alles vor dem Wetter schützt.

Wie es funktioniert

Der Wind drückt gegen die Flügel, die leicht verwunden und schräg gestellt sind. Sie arbeiten wie die Blätter eines Propellers: Ein Teil des Drucks wird zu einem Drehmoment, das die Flügelwelle antreibt, eine schwere, fast waagerechte Welle, die in der Kappe gelagert ist.

Auf der Flügelwelle sitzt das Kammrad, ein großes Rad, dessen Kämme seitlich in den Radkranz eingesetzt sind. Es greift in den kleineren Bunkler auf der senkrechten Königswelle. So wird die Drehung aus der Waagerechten in die Senkrechte umgelenkt und zugleich schneller. Weiter unten treibt das große Stirnrad für jeden Mahlgang ein kleines Steinritzel. In der Mühle von Gedney Dyke in Lincolnshire trieb ein Kammrad mit 96 Kämmen einen Bunkler mit 68, und ein Stirnrad mit 120 Zähnen Ritzel mit 18: Die Steine liefen damit rund neunmal schneller als die Flügel.

Die Bockwindmühle dreht sich als Ganzes auf ihrem Bock; bei der Turmwindmühle dreht sich nur die Kappe.

Der Läufer ruht auf der Haue am Kopf des eisernen Mühleisens, das durch den festen Bodenstein heraufkommt.

Das Mühleisen, eine eiserne Spindel, steigt durch den festliegenden Bodenstein nach oben. Auf seinem Kopf sitzt die Haue, ein Eisenbalken oder -kreuz, der in Aussparungen im Auge des oberen Läufersteins greift und dessen ganzes Gewicht trägt. In manchen Mühlen liegt das Stirnrad über den Steinen und der Antrieb kommt von oben über eine kurze Eisenwelle, doch der Läufer ruht auch dann auf dem Mühleisen. Das Korn rinnt aus dem Trichter ins Auge. Die in beide Steine gehauenen Furchen schneiden es und schieben das Mahlgut nach außen zum Rand, wo es als Mehl austritt. Mit dem Lichtwerk hebt oder senkt der Müller das Mühleisen, und dieser Spalt bestimmt, wie fein das Mehl wird.

Die Leistung des Windes wächst mit der dritten Potenz seiner Geschwindigkeit: Doppelt so starker Wind bringt die achtfache Energie. Kein Rotor kann mehr als 59,3 % davon nutzen, wie Albert Betz 1920 veröffentlichte. Alte Mühlen bleiben weit darunter.

Wie man sie baut

Eine Windmühle braucht eine eingespielte Gemeinschaft: Zimmerleute, Maurer, einen Schmied und einen Müller, der Steine schärfen kann. Die folgenden Schritte nennen die Reihenfolge der Arbeit und die wichtigen Entscheidungen; die Maße sind Sache des Mühlenbauers.

Den Standort wählen. Eine freie Anhöhe, fern von Bäumen und Gebäuden, offen zur Hauptwindrichtung. Hinter einem Baum oder Haus bleibt die Luft auf etwa das Zwanzigfache seiner Höhe verwirbelt; auf der Windseite sollten Hindernisse daher weit entfernt sein.

Den Turm hochziehen. Ein sich verjüngender Turm aus Stein oder Ziegel mit dicken Mauern am Fuß. Oben trägt er einen waagerechten Kranz aus Holz oder Eisen, auf dem die Kappe auf Rollen läuft.

Welle und Räder fertigen. Die Flügelwelle wird aus einem Eichenstamm gebeilt und an den Verschleißstellen mit Eisen beschlagen; seit dem späten 18. Jahrhundert goss man sie oft aus Gusseisen. Die Räder sind aus Hartholz, die Kämme sind einzelne Teile, häufig aus Hainbuche oder Apfelholz, die man bei Abnutzung ersetzt.

Die Flügel bauen. Vier Ruten tragen je ein Gitter aus Latten, über das Segeltuch gespannt wird. Bei stehender Mühle und angeketteten Flügeln spannt der Müller je nach Wind mehr oder weniger Tuch auf, so wie ein Seemann refft.

Die Steine auswählen. Der Stein muss hart und porös sein. Französischer Süßwasserquarzit aus La Ferté-sous-Jouarre war in ganz Europa begehrt. Ein solcher Stein wurde meist aus mehreren Stücken mit Gips zusammengesetzt und mit Eisenreifen gebunden.

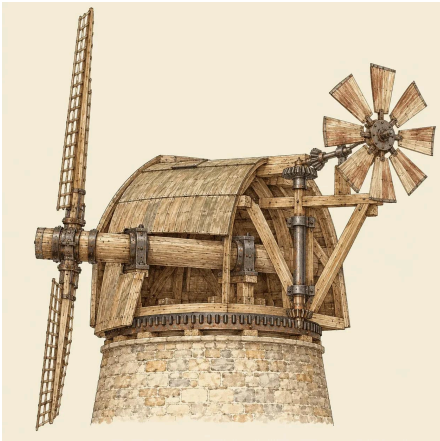
Die Bremse einbauen. Ein hölzernes Bremsband umfasst den Kranz des Kammrads. Es muss die Flügel auch bei starkem Wind halten, deshalb wird es zuerst bei leichter Brise erprobt; ein Mühlenbauer muss bestätigen, dass Bremse und Flügelketten die Mühle auch im Sturm halten, bevor sie arbeitet.

> **Sicherheit.** Nie durch den Lauf der Flügel gehen, auch wenn sie sich langsam drehen, und keinen Flügel anfassen, bevor die Bremse angezogen und die Flügel angekettet sind. Das Wetter beobachten: Tücher abnehmen und die Mühle sichern, bevor ein Sturm aufzieht, denn im Sturm kann niemand mehr an den Flügeln arbeiten. Im Inneren Hände, Haare und weite Kleidung von laufenden Rädern und Wellen fernhalten. Eine heißgelaufene Bremse kann die Kappe entzünden, und viele Mühlen sind so abgebrannt. Mehlstaub in der Luft ist brennbar, offenes Feuer ist im Inneren deshalb verboten.

Geschichte und Entwicklung

Die ersten gut belegten Windmühlen standen in Sistan, im heutigen Grenzgebiet von Iran und Afghanistan. Arabische Geographen beschreiben sie im 10. Jahrhundert, möglicherweise sind sie älter. Ihre Flügel drehen sich um eine senkrechte Achse, zwischen Mauern, die den Wind bündeln.

Die Windmühle mit waagerechter Welle taucht in Europa Ende des 12. Jahrhunderts auf. Einer der ältesten datierten Belege betrifft eine Bockwindmühle in Weedley in Yorkshire, die 1185 in einem Verzeichnis von Templergütern steht. Die Turmwindmühle, bei der sich nur die Kappe dreht, setzte sich später durch und erlaubte viel größere Mühlen.



Die Windrose dreht die Kappe auf ihrem Zahnkranz, bis die Flügel wieder im Wind stehen.

1745 ließ sich der englische Schmied Edmund Lee die Windrose patentieren, ein kleines Flügelrad an der Rückseite der Kappe. Dreht der Wind, beginnt sie zu laufen und dreht die Kappe, bis die Flügel wieder im Wind stehen. 1772 führte der schottische Mühlenbauer Andrew Meikle die Jalousieflügel ein, deren Klappen sich bei Böen von selbst öffnen.

Die Niederlande zählten Mitte des 19. Jahrhunderts neun- bis zehntausend Windmühlen, zum Mahlen und vor allem zur Entwässerung. Dampfmaschinen und später Elektromotoren lösten sie ab; heute stehen dort noch rund tausend. Moderne Windkraftanlagen nutzen dieselbe Rotorphysik, um Generatoren anzutreiben.

Kennzahlen

Drehzahl der Flügel
Etwa 10–15 U/min bei Arbeitswind

Drehzahl des Läufersteins
Etwa 100–150 U/min

Leistung
Wächst mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit

Theoretische Obergrenze
59,3 % der Windenergie (Betz-Grenze)

Quellen

1. Windmill · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Windmill
2. Betz's law · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law
3. Fantail (windmill) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Fantail_(windmill)
4. Technical descriptions of English windmills · The Mills Archive Trust https://millsarchive.org/2019/09/13/technical-descriptions-of-english-windmills/31
5. Weedley windmill site (R. Gregory) · The Mills Archive Trust https://millsarchive.org/library/index/?which=8434
6. First Windmill Use · Environment & Society Portal, Rachel Carson Center https://www.environmentandsociety.org/taxonomy/term/5347

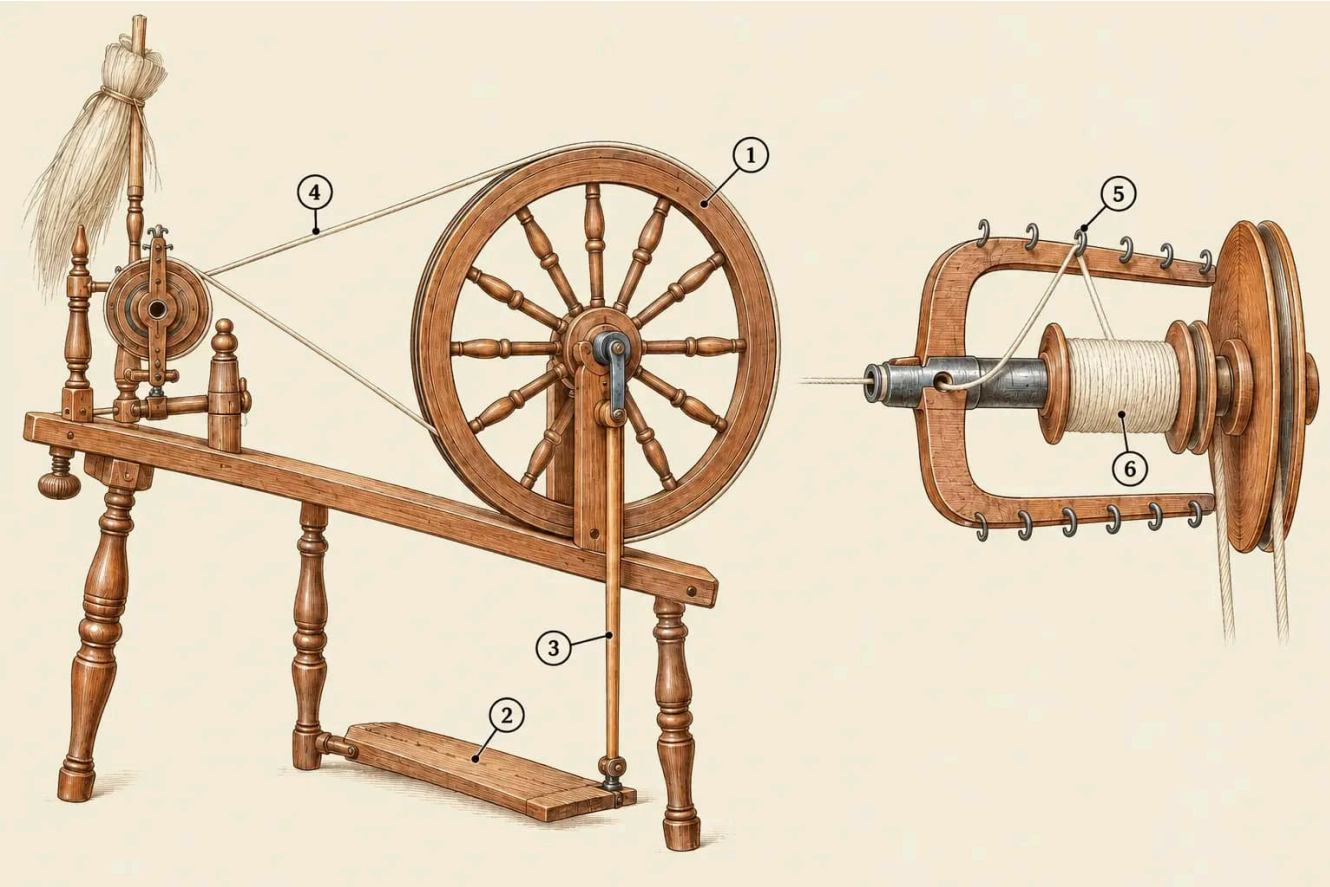
Fakten geprüft am 2026-10-11

Spinnrad

Faser schneller zu Garn

um 1000 · Mittelalter · Handwerk & Städte

Erfordert: Rad & Achse (S. 83), Seil & Schnur (S. 13)



1 Antriebsrad 2 Tritt 3 Pleuel (Tretstange) 4 Antriebsschnur 5 Flügel mit Haken 6 Spule

Das Spinnrad verdreht lose Fasern zu Garn mit einer Spindel, die von einem großen Rad angetrieben wird, viel schneller als eine Handspindel. Das Flügelspinnrad, in Deutschland um 1480 bekannt, wickelt das Garn beim Spinnen zugleich auf eine Spule, sodass Spinnen und Aufwickeln sich nicht mehr abwechseln.

Was es ist

Spinnen verwandelt eine Masse kurzer Fasern, etwa Wolle, Flachs oder Baumwolle, in einen durchgehenden Faden. Zwei Dinge geschehen zugleich: Die Fasern werden zu einem dünnen, gleichmäßigen Strang ausgezogen, und der Strang wird verdreht, damit die Fasern einander festhalten. Die Drehung gibt dem Garn seine Festigkeit.

Jahrtausendelang geschah das mit der Handspindel, einem mit einem Wirtel beschwerten Stab, den die Finger in Drehung versetzen. Das Spinnrad setzt die Spindel auf ein Gestell und treibt sie mit einem großen Rad über eine Schnur an. Eine Umdrehung des großen Rades dreht die kleine Spindel viele Male, sie verdrillt also weit schneller, als es eine Hand könnte.

Die Tafel zeigt ein sächsisches Spinnrad, ein Tretspinnrad mit Flügel, wie es seit dem 16. Jahrhundert in ganz Europa verbreitet war, hier in einer Form des 18. Jahrhunderts.

Wie es funktioniert

Beim großen Handrad, einer frühen Bauart, zeigt die Spindel einfach auf die Spinnerin. Sie dreht das Rad, hält die Faser schräg zur Spindelspitze und geht rückwärts, während sie ein Stück Garn auszieht und die Drehung hineinläuft. Dann hält sie an, hält das Garn quer zur Spindel und dreht das Rad erneut, um das fertige Stück aufzuwickeln. Spinnen und Aufwickeln wechseln sich ab.

Vor dem Rad: Handspindel und Rocken. Der Wirtel hält die Spindel in Drehung.

Der Flügel beseitigt diese Pause. Das Garn tritt durch ein Loch am vorderen Ende in eine hohle Spindel ein, das Einzugsloch, kommt durch ein seitliches Loch wieder heraus, läuft an einem Arm eines U-förmigen Flügels entlang über einen seiner Haken und auf eine Spule, die lose auf der Spindel sitzt. Flügel und Spule haben je eine eigene Rillenscheibe, verschieden groß. Eine einzige endlose Antriebsschnur läuft zweimal um das große Rad und einmal um jede Scheibe, sodass die kleinere Spulenscheibe etwas schneller läuft als der Flügel.

Die Drehung des Flügels verdreht das Garn. Der kleine Geschwindigkeitsunterschied zwischen Spule und Flügel wickelt es so schnell auf, wie es entsteht. Ab und zu hält die Spinnerin das Rad an und legt das Garn auf einen anderen Haken um, damit sich die Spule gleichmäßig füllt, und stellt mit einer Spannschraube, die das Flügelwerk auf der Bank verschiebt, die Schnur straffer oder lockerer.

Handkarden: Die Wolle wird zwischen zwei Karden kardiert und zu spinnfertigen Rollen gewickelt.

Der Tritt macht beide Hände frei. Eine Kurbel an der Radachse ist über eine Holzstange, die Pleuelstange, mit einem gelenkig gelagerten Brett unter dem Fuß der Spinnerin verbunden. Jeder Tritt gibt dem Rad einen Schub. Eine Hand führt die Faser zu, vom Rocken oder von einer Rolle kardierter Wolle, die andere regelt die Drehung. Sächsische Räder dienten vor allem für lange Fasern wie Flachs und Wolle. Flachs wird auf einen Rocken gelegt und wenige Fasern auf einmal davon abgezogen. Wolle wird zuerst zwischen zwei Handkarden kardiert und zu einer weichen Rolle gewickelt, damit die Fasern locker liegen und sich gleichmäßig ausziehen lassen.

Wie man es baut

Ein Flügelspinnrad braucht gedrechselte Teile und sorgfältige Passarbeit, eine Aufgabe für einen erfahrenen Holzwerker mit Drehbank. Ein einfacheres Rad der ältesten Art zeigt das Prinzip und spinnt Wolle.

Die Bank bauen. Ein kräftiges Brett von etwa 1 m Länge auf drei oder vier Beinen, hoch genug, um im Sitzen oder Stehen zu arbeiten. An einem Ende einen Pfosten für das Rad befestigen, am anderen einen kürzeren Pfosten für den Spindelkopf.

Das Rad einbauen. Jedes große, rund laufende Rad mit Rillenfelge eignet sich: ein Holzrad aus Nabe, Speichen und Felge oder ein altes Fahrradrad ohne Reifen. Auf einer Achse im Pfosten lagern und nahe der Felge einen Griff

zum Drehen anbringen.

Den Spindelkopf bauen. Zwei kleine Stützen auf dem kurzen Pfosten halten einen geraden, an einem Ende zugespitzten Stahlstab in Lederschlaufen oder kleinen Kugellagern. Zwischen den Stützen eine kleine Rillenscheibe auf dem Stab befestigen. Der Stab liegt quer zur Bank, parallel zur Radachse, die Scheibe genau in einer Flucht mit der Rille des Rades, damit die Schnur gerade läuft; die Spitze zeigt zu der Seite, an der Sie stehen.

Die Schnur auflegen. Eine Schlinge aus kräftiger Baumwollschnur um Felge und Spindelscheibe knoten, straff genug, dass sie die Spindel ohne Rutschen antreibt. Hat das Rad etwa den zehnfachen Durchmesser der Scheibe, dreht sich die Spindel bei jeder Radumdrehung etwa zehnmal.

Spinnen. Ein Anfangsgarn am Spindelschaft festbinden, ein paar Windungen aufwickeln und es dann in einer Spirale bis zur Spitze führen, sodass es über die Spitze abläuft. Sein Ende mit kardierter Wolle überlappen, das Rad langsam drehen und schräg zur Spitze zurückziehen, während die Drehung in die Faser läuft. Zum Aufwickeln das Rad kurz zurückdrehen, um die Spirale zu lösen, das Garn quer zur Spindel halten und vorwärts drehen; dann das Garn wieder in einer Spirale zur Spitze führen. Ist die Spindel voll, das Garn auf die Haspel wickeln, den Strang an mehreren Stellen locker abbinden, abnehmen und waschen, um die Drehung zu fixieren.

Die Handhaspel: Das gesponnene Garn wird vor dem Waschen und Färben zu einem Strang bekannter Länge gewickelt.

> **Sicherheit.** Finger, Haare und weite Ärmel vom drehenden Rad, der Schnur und der Spindel fernhalten, vor dem Lösen eines Knotens das Rad anhalten und die scharfe Spindelspitze abdecken, wenn das Rad nicht benutzt wird. Prüfen, dass ein Fahrrad- oder Holzrad fest sitzt und nicht schlägt, bevor man es schnell dreht. Kleine Kinder von einem laufenden Rad fernhalten.

Geschichte und Entwicklung

Wo das Spinnrad erfunden wurde, ist umstritten. Manche Historiker verorten es in Indien zwischen etwa 500 und 1000 n. Chr., andere in China, wo es um 1090 weit verbreitet war, oder in der islamischen Welt, wo es um 1030 bezeugt und in den 1230er-Jahren in Bagdad deutlich abgebildet ist. Europa erreichte es im 13. Jahrhundert; europäische Abbildungen stammen von etwa 1280, und die Zunftordnung von Speyer erwähnt es Ende des 13. Jahrhunderts (je nach Quelle 1280 oder 1298). In Europa blieben Rad und Spindel lange nebeneinander in Gebrauch.

Der Flügel erscheint auf einer deutschen Abbildung um 1480, und auch Leonardo da Vinci zeichnete einen. Im 16. Jahrhundert kam der Tritt hinzu; eine Überlieferung schreibt ihn 1533 einem Braunschweiger Handwerker zu. Gegenüber der Handspindel steigerte das Rad die Leistung einer Spinnerin erheblich. Der Historiker Lynn White brachte das größere Angebot an Leinenlumpen, und damit an billigem Papier für den Buchdruck, mit dem Spinnrad in Verbindung.

In den 1760er-Jahren baute James Hargreaves die Spinning Jenny, die viele Spindeln zugleich antrieb, und Richard Arkwrights Waterframe sowie Samuel Cromptons Mule von 1779 verlegten das Spinnen in die Fabrik. Im 20. Jahrhundert machte Mahatma Gandhi das Charkha, ein einfaches, von Hand gedrehtes Spinnrad, zum Sinnbild indischer Selbstständigkeit, und Handspinnerinnen und -spinner arbeiten bis heute am Tretspinnrad.

Kennzahlen

Erste Spinnräder
Umstritten: Indien, China oder islamische Welt, spätestens im 11. Jahrhundert

Frühe Erwähnung in Europa
Zunftordnung von Speyer, spätes 13. Jahrhundert

Ältester Flügel
Deutsche Abbildung um 1480

Tritt
Im 16. Jahrhundert hinzugefügt

Quellen

1. Spinning Wheel, British (Saxony wheel with flyer) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co44835
2. Spinning (Bette Hochberg, Encyclopedia of Clothing and Fashion) · Encyclopedia.com (Gale) https://www.encyclopedia.com/fashion/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/spinning
3. Saxon wheel; spinning wheel · Horniman Museum and Gardens https://www.horniman.ac.uk/object/11.40
4. Spinning wheel · Aotea Utanganui, Museum of South Taranaki https://museumofsouthtaranaki.wordpress.com/2016/03/11/spinning-wheel/
5. Spinning wheel · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Spinning_wheel
6. Choosing the whorl to make the yarn you want (Rudy Amann) · Spin Off https://spinoffmagazine.com/choosing-the-whorl-to-make-the-yarn-you-want/
7. Sliding hook flyer, double drive: assembly instructions · Ashford Wheels & Looms https://ashford.co.nz/instructions/SHFDD.pdf
8. DRS spinning wheels revisited · A Fisherman Knits http://gansey.blogspot.com/2018/07/drs-spinning-wheels-revisited.html

Fakten geprüft am 2026-10-12

Magnetkompass

Eine Nadel, die nach Norden zeigt

um 1088 · Mittelalter · Handwerk & Städte

Erfordert: Eisenverhüttung (S. 138), Stahl (S. 143)

Führt zu: Astronavigation (S. 213)

1 Kardanringe 2 Kessel 3 Kompassrose 4 Magnetnadel 5 Pinne 6 Magneteisenstein

Ein Magnetkompass ist eine frei drehbare Magnetnadel, die sich nach dem Magnetfeld der Erde ausrichtet und so bei jedem Wetter Norden anzeigt. Im 11. Jahrhundert in China beschrieben und um 1190 in Europa auf See belegt, erlaubte er Seeleuten, auch außer Sicht des Landes und unter Wolken einen Kurs zu halten.

Was es ist

Ein Kompass ist ein kleiner Magnet, der sich frei drehen kann. Sich selbst überlassen, stellt er sich entlang der Feldlinien des Erdmagnetfelds ein, mit einem Ende zum magnetischen Norden und dem anderen zum magnetischen Süden. Wer weiß, wo Norden liegt, kann daraus jede andere Richtung ablesen, bei Nacht, im Nebel oder außer Sicht des Landes.

Die Tafel zeigt einen Schiffskompass aus dem 16. Jahrhundert. Die Magnetnadel ist unter eine Papierscheibe mit aufgemalter Windrose geklebt, sodass sich die ganze Kompassrose mit ihr dreht. Die Rose ruht auf einer Pinne in

einem hölzernen Kessel, und der Kessel hängt in einer kardanischen Aufhängung, damit er waagerecht bleibt, wenn das Schiff rollt.

Wie es funktioniert

Die Erde verhält sich ungefähr wie ein riesiger Stabmagnet. Ihr Feld ist schwach, an der Oberfläche etwa ein halbes Gauß, doch eine leichte Nadel auf einer guten Pinne braucht nur sehr wenig Kraft, um sich zu drehen. Die Nadel schwingt, bis ihr eigenes Feld mit dem waagerechten Anteil des Erdfelds übereinstimmt, und kommt dann zur Ruhe.

Am Magneteisenstein entlanggestrichen, wird eine Stahlnadel selbst zum Magneten.

Zuerst muss die Nadel magnetisiert werden. In Eisen und Stahl wirken winzige Bereiche, die Domänen, jeweils wie ein Magnet, doch sie zeigen in alle Richtungen und heben sich gegenseitig auf. Streicht man die Nadel immer in derselben Richtung mit einem Magneteisenstein, einem von Natur aus magnetischen Stück Magnetit, richten sich viele von ihnen aus, und die Nadel behält diese Ordnung. Harter Stahl hält sie am besten. Weiches Eisen verliert sie schnell, und bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts mussten Seeleute ihre Nadeln mit einem an Bord mitgeführten Magneteisenstein nachstreichen.

Eine frühe Methode: eine Nadel auf einem Schwimmer, frei drehbar auf ruhigem Wasser.

Der magnetische Norden ist nicht der geografische Pol. Der Winkel zwischen beiden, die Missweisung oder Deklination, ändert sich von Ort zu Ort und langsam im Lauf der Jahre. Das Feld ist außerdem geneigt: Auf der Nordhalbkugel zieht es das Nordende der Nadel nach unten, auf der Südhalbkugel das Südende, nahe den Magnetpolen besonders steil. Diese Inklination gleichen Kompassmacher mit einem kleinen Gewicht aus. An Bord lenken eiserne Beschläge und Ladung die Nadel zusätzlich ab, ein Fehler, den man Deviation nennt.

Auf der Tafel halten die spitze Pinne und das kleine Hütchen an der Nadel die Reibung gering. An der Kompassrose liest der Rudergänger den Kurs gegen eine feste Marke am Kessel ab. Der Glasdeckel hält den Wind ab, und die Kardanringe verhindern, dass die Rose kippt, wenn das Schiff rollt.

Wie man ihn baut

Die Nadel herstellen. Nehmen Sie eine stählerne Nähnadel oder einen dünnen Streifen harten Stahls von etwa 5 cm Länge. Zu weiches Eisen bleibt nicht magnetisch.

Die Nadel magnetisieren. Streichen Sie die Nadel mit einem Pol eines Magneteisensteins oder Magneten von der Mitte zu einem Ende und heben Sie den Stein am Ende jedes Strichs in einem weiten Bogen ab. Wiederholen Sie das zwanzig- bis dreißigmal, immer in derselben Richtung.

Auf Wasser prüfen. Stecken Sie die Nadel durch ein kurzes Stück Kork oder trockenes Schilfrohr und lassen Sie sie in einer Schale mit ruhigem Wasser schwimmen, fern von Eisen. Stellen Sie fest, welches Ende nach Norden zeigt, und markieren Sie es. Nördlich der Tropen prüfen Sie das nachts am Polarstern oder am kürzesten Schatten zum wahren Mittag, der dann nach Norden zeigt; südlich der Tropen zeigt dieser Schatten nach Süden.

Eine Pinne anbringen. Drücken Sie einen kleinen Kegel in ein Reststück dünnes Messingblech, um ein Hütchen zu formen, und befestigen Sie es in der Mitte der Nadel. Setzen Sie eine spitze Nadel senkrecht in den Boden eines hölzernen Kessels und legen Sie das Hütchen darauf. Gleichen Sie die Nadel mit einem Tupfer Wachs aus, bis sie waagerecht liegt.

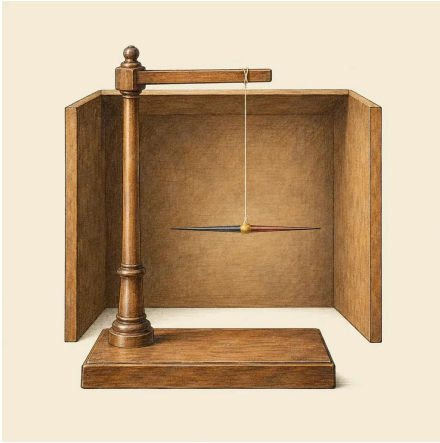
Rose und Deckel hinzufügen. Kleben Sie die Nadel unter eine leichte Scheibe, auf der die Kompassstriche markiert sind, mit der Nordmarke über dem Nordende der Nadel. Malen Sie innen am Kessel eine feste Marke, den Steuerstrich, und richten Sie ihn auf den Bug aus: An ihm liest man den Kurs auf der Rose ab. Eine Glasscheibe über dem Kessel hält Zugluft fern.

Aufhängen. Für das Modell eines Schiffskompasses hängen Sie den Kessel in zwei Ringe, die rechtwinklig zueinander drehbar gelagert sind. Ein selbst gebauter Kompass bleibt ein Demonstrationsstück: Navigieren Sie nicht danach, bevor Sie ihn mit einem bewährten Kompass verglichen haben.

Geschichte und Entwicklung

In China wie in Griechenland wusste man schon vor mehr als zweitausend Jahren, dass Magneteisenstein Eisen anzieht. Texte aus der Han-Zeit erwähnen ein nach Süden weisendes Gerät für die Wahrsagung, vielleicht einen Löffel aus Magneteisenstein, doch die Historiker sind sich nicht einig, was es war.

Das Militärhandbuch *Wujing Zongyao*, um 1044 zusammengestellt, beschreibt einen dünnen Eisenfisch, der rotglühend erhitzt, in Nord-Süd-Richtung liegend abgekühlt und dann auf Wasser gesetzt wurde, wo er nach Süden zeigte. Um 1088 beschrieb Shen Kuo Nadeln, die durch Reiben an Magneteisenstein magnetisiert und dann auf Wasser schwimmend oder an einem Seidenfaden hängend verwendet wurden. Er bemerkte auch, dass die Nadel etwas östlich von genau Süd zeigt, eine frühe Aufzeichnung der Missweisung. Zwischen 1111 und 1117 schrieb Zhu Yu, dass Schiffslotsen auf die Nadel achteten, wenn Wolken Sonne und Sterne verdeckten.



Shen Kuo hielt eine an einem einzelnen Seidenfaden hängende Nadel für die beste Aufhängung.

In Europa beschrieb der englische Gelehrte Alexander Neckam um 1190 Seeleute, die eine magnetisierte Nadel benutzten. Ein persischer Text von 1232 enthält die erste Erwähnung in der islamischen Welt. 1269 beschrieb Petrus Peregrinus einen trockenen Kompass auf einer Pinne, und um 1300 verbreitete sich der trockene Dosenkompass mit Rose im Mittelmeerraum.

Flüssigkeitskompasse, die das Schwingen der Rose dämpfen, setzten sich im 19. und frühen 20. Jahrhundert durch, und im ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts folgte der Kreiselkompass, der den geografischen Norden ohne Magnetismus findet.

Kennzahlen

Auf Wasser schwimmender Eisenfisch
Wujing Zongyao, um 1044

Nadelkompass und Missweisung beschrieben
Shen Kuo, um 1088

Erste belegte Nutzung auf See
China, zwischen 1111 und 1117

Erste europäische Erwähnung
Alexander Neckam, um 1190

Stärke des Erdmagnetfelds
Etwa 0,5 Gauß (50 Mikrotesla)

Quellen

1. History of the compass · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_compass
2. Compass · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Compass
3. Shen Kuo: first Renaissance man · AAAS https://www.aaas.org/shen-kuo-first-renaissance-man
4. Lodestone, c. 1700–1720 (NAV0710) · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-42922
5. Dry card compass, 1838 (ACO0005) · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-7085

Fakten geprüft am 2026-10-11

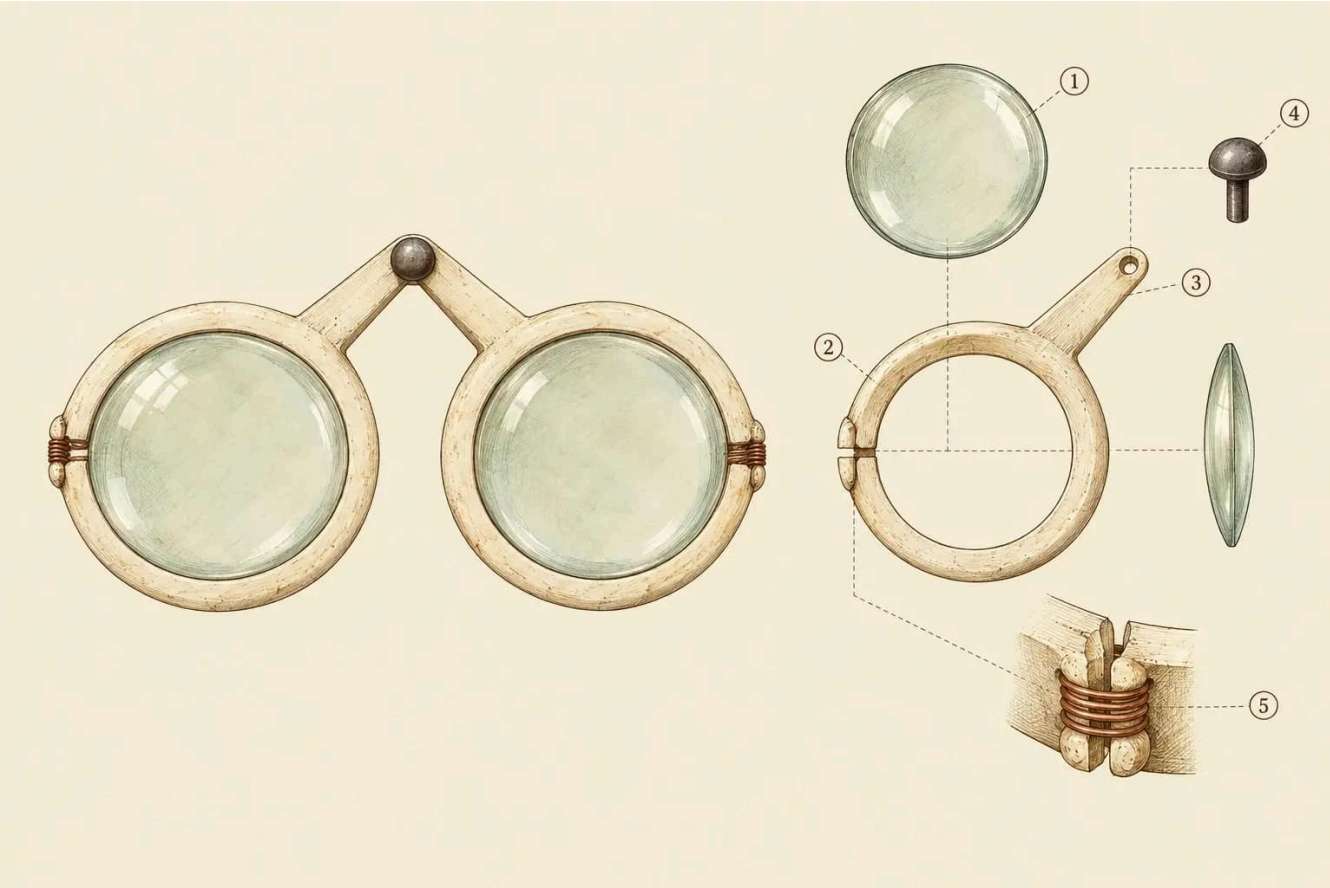
Brille

Linsen, die das Arbeitsleben verlängern

um 1286 · Mittelalter · Handwerk & Städte

Erfordert: Glas (S. 134)

Führt zu: Mikroskop (S. 217), Fernrohr (S. 221)



1 Bikonvexe Glaslinse 2 Fassungsring aus Knochen 3 Griff 4 Eisenniet 5 Bindung aus Kupferdraht

Eine Brille ist ein Paar Linsen in einer Fassung vor den Augen, das Alters- und Weitsichtigkeit, Kurzsichtigkeit oder Astigmatismus ausgleicht. Sie entstand in den 1280er-Jahren in Italien als Lesehilfe für ältere Menschen; Gläser für Kurzsichtige kamen im 15. Jahrhundert hinzu, Bügel im 18.

Was es ist

Eine Brille setzt vor jedes Auge eine Linse, damit das Licht die Netzhaut schon um das richtige Maß gebrochen erreicht. Die ersten Brillen halfen Menschen ab etwa vierzig beim Lesen und bei feiner Arbeit, wenn das Scharfstellen auf Leseabstand schwer geworden war.

Das Paar auf der Tafel ist die älteste Form, die Nietbrille des 14. und 15. Jahrhunderts. Jedes Glas sitzt in einem Ring aus Knochen, Holz oder Horn. Von jedem Ring geht ein kurzer Griff ab, und beide Griffe sind durch einen einzigen Niet verbunden. Bügel gibt es keine: Der Niet liegt auf dem Nasenrücken, die Ringe klemmen die Nase von beiden Seiten. Wer sie trug, musste den Kopf ruhig halten oder die Brille mit einer Hand stützen.

Wie es funktioniert

Im Auge verändert eine weiche Linse ihre Form, um nahe oder ferne Dinge scharf abzubilden. Mit dem Alter wird sie steifer, und der nächste Punkt, den das Auge noch scharf sieht, rückt weg: Beim Kind liegt er wenige Zentimeter vor dem Gesicht, bei den meisten Sechzigjährigen außer Armeslänge. Das ist die Alterssichtigkeit, und deshalb waren die ersten Brillen Lesebrillen.

Der Lesestein, eine Kuppel aus Kristall oder Glas, die man auf die Seite legte, war die Lupe vor der Brille.

Eine Sammellinse, in der Mitte dicker als am Rand, lässt das Licht schon vor dem Auge etwas zusammenlaufen und übernimmt so einen Teil der Arbeit, die die Augenlinse nicht mehr schafft. Optiker messen diese Brechkraft in Dioptrien, dem Kehrwert der Brennweite in Metern. Ein Leseglas mit +2 Dioptrien sammelt paralleles Licht in einem Punkt 50 cm hinter dem Glas.

Kurzsichtigkeit ist ein anderer Fehler der Scharfeinstellung und kann zur Alterssichtigkeit hinzukommen. Der Augapfel ist etwas zu lang oder die Optik zu stark, und Fernes verschwimmt. Eine Zerstreuungslinse, in der Mitte dünner, fächert das Licht vor dem Auge leicht auf und verschiebt das Bild zurück auf die Netzhaut. Solche Gläser schliff man in Florenz schon im 15. Jahrhundert. Beim Astigmatismus unterscheidet sich die Brechkraft des Auges in zwei zueinander senkrechten Richtungen, sodass Linien in einer Richtung unschärfer erscheinen als in der anderen. Zur Korrektur braucht es ein Glas, das in einer Richtung stärker gekrümmt ist als in der anderen; solche Gläser kamen erst viel später.

Wie man sie baut

Für eine Nietbrille wie auf der Tafel braucht man zwei Linsen, ein Stück Knochen oder Hartholz, Kupferdraht und einen kleinen Niet.

Der Glasrohling, mit Pech an einem Holzgriff befestigt, wurde mit nassem Schleifmittel in einer Bronzeschale bearbeitet und dann auf Leder poliert.

Gläser beschaffen. Für eine Brille, durch die man wirklich schauen will, nimmt man zwei Gläser aus einer billigen Lesebrille. Selbst schleifen ist eine historische Vorführung: Wie ein Brillenmacher reibt man eine Glasscheibe von etwa 4 cm Durchmesser mit nassem Schleifpulver in einem Werkzeug, das auf die gewünschte Krümmung ausgehöhlt ist, mit immer feinerer Körnung, und poliert sie dann mit Polierrot auf Leder oder Filz. Für ein Glas mit +2 Dioptrien aus gewöhnlichem Glas brauchen beide Seiten einen Krümmungsradius von etwa 50 cm, eine sehr flache Wölbung. Ein von Hand geschliffenes Glas hat keine genaue Stärke, und seine optische Mitte sitzt nicht vor der Pupille.

Ringe aussägen. Mit dem Zirkel zwei Kreise, etwas größer als die Gläser, auf eine flache Knochen- oder Buchsbaumplatte reißen und mit einer feinen Säge ausschneiden. An jedem Ring bleibt eine Lasche für den Griff stehen. Innen in jeden Ring eine V-förmige Nut schneiden, in die der Glasrand greift.

Aufschneiden und binden. Jeden Ring auf der dem Griff gegenüberliegenden Seite durchsägen. Den Ring leicht aufbiegen, das Glas in die Nut schieben und den Spalt schließen, indem man dünnen Kupferdraht mehrmals um zwei kleine Nasen beiderseits des Schnitts wickelt.

Griffe vernieten. Am Ende jedes Griffs ein kleines Loch bohren, die Griffe übereinanderlegen und einen Kupfer- oder Eisenniet setzen, nur so fest gestaucht, dass sich die Hälften noch zusammenklappen lassen. An den Innenkanten, wo die Ringe die Nase berühren, kleine Kerben feilen, damit sie besser halten.

> **Sicherheit.** Glas nass schleifen und eine Staubmaske tragen: Glas- und Schleifstaub schaden der Lunge. Beim Bohren von Knochen und Schneiden von Draht eine Schutzbrille tragen und geschliffenes Glas vorsichtig anfassen. Nie durch eine Linse in die Sonne schauen und nie eine Linse in der Sonne neben Papier oder Holz liegen lassen, sie kann ein Feuer entfachen. Dieses Paar ist eine Nachbildung: Es ersetzt keine vom Augenoptiker angepasste Brille, und damit nie Auto fahren.

Geschichte und Entwicklung

Polierte Kristalle und Glas dienten schon lange vor der Brille dazu, Schrift zu vergrößern. Der Schritt, vor jedes Auge eine gefasste Linse zu setzen, geschah um 1280 bis 1290 in Italien. Wo genau, ist unbekannt: Oft werden Pisa und Florenz genannt, und eine venezianische Verordnung von 1300 bestrafte bereits Glasmacher, die gläserne „Scheiben für die Augen“ als Bergkristall verkauften. In einer Predigt in Florenz sagte der Dominikaner Giordano da Pisa 1306, die Kunst, Brillen zu machen, sei noch keine zwanzig Jahre alt, und er habe mit dem Mann gesprochen, der die ersten gemacht habe. Dessen Name ist nicht überliefert.

Die älteste bekannte gemalte Brille zeigt ein Fresko von Tommaso da Modena aus dem Jahr 1352 im Kapitelsaal von San Nicolò in Treviso: Ein Dominikanerkardinal liest dort mit einer Nietbrille. Echte Fassungen sind selten erhalten. Ein Paar aus Knochen aus dem 15. Jahrhundert fand man in Trig Lane an der Themse in London, zu einer Zeit, als jedes Jahr Tausende Brillen aus den Niederlanden nach London kamen. 1466 bestellte der Herzog von Mailand zweihundert Paar, nach Lebensalter abgestuft, ein Zeichen, dass die Glasstärken schon recht einheitlich waren.

Doppelbrille vom Ende des 18. Jahrhunderts: oben der Teil für die Ferne, unten der Teil zum Lesen.

Zu Beginn des 16. Jahrhunderts korrigierten Brillen Kurz- wie Weitsichtigkeit, und Stege aus Leder oder Fischbein ersetzten den Niet. Um 1730 soll der Londoner Optiker Edward Scarlett starre Bügel eingeführt haben, die seitlich gegen den Kopf drückten. In Briefen von 1784 und 1785 beschrieb Benjamin Franklin seine „Doppelbrille“, deren Gläser zur Hälfte für die Ferne und zur Hälfte zum Lesen dienten. Im 19. Jahrhundert kam der Kneifer mit seiner Feder auf, im 20. folgten Kunststofffassungen, leichtere Kunststoffgläser und später dünnere hochbrechende Gläser.

Kennzahlen

Frühes venezianisches Zeugnis
Verordnung vom 2. April 1300 über gläserne „Scheiben für die Augen“

Erste gemalte Brille
1352, Fresko von Tommaso da Modena in Treviso

Bügel
Dem Londoner Optiker Edward Scarlett zugeschrieben, um 1730

Zeugnis zur Datierung
Predigt des Giordano da Pisa, Florenz 1306: die Kunst sei „noch keine zwanzig Jahre“ alt

Übliches Leseglas
+2 Dioptrien, also 50 cm Brennweite

Quellen

1. History of spectacles · College of Optometrists, British Optical Association Museum https://www.college-optometrists.org/history-of-spectacles
2. Spectacles (bone rivet spectacles from Trig Lane) · London Museum https://www.londonmuseum.org.uk/collections/v/object-407684/spectacles/
3. Medieval Eyeglasses: Wearable Technology of the Thirteenth Century · Medievalists.net https://www.medievalists.net/2016/03/medieval-eyeglasses-wearable-technology-of-the-thirteenth-century/
4. The Earliest Depiction of Eyeglasses in a Painted Work of Art · HistoryofInformation.com https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=1447
5. A Venetian ordinance on the production of lenses (2 April 1300) · HistoryofInformation.com https://historyofinformation.com/detail.php?id=2217
6. Renaissance Vision from Spectacles to Telescopes (Vincent Ilardi, 2007), book description · American Philosophical Society, via Goodreads https://www.goodreads.com/book/show/1685277.Renaissance_Vision_from_Spectacles_to_Telescopes
7. Benjamin Franklin invents bifocal glasses · HISTORY.com https://www.history.com/this-day-in-history/may-23/benjamin-franklin-invents-bifocal-glasses
8. University Physics Volume 3, 2.5 The Eye · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/2-5-the-eye
9. Presbyopia · EyeWiki, American Academy of Ophthalmology https://eyewiki.org/Presbyopia
10. A Review of Depth of Focus in Measurement of the Amplitude of Accommodation (Burns, Allen, Edgar and Evans, Vision 2, 2018) · MDPI, via PubMed Central https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6835437/
11. Optics of the Human Eye (Atchison and Smith, 2nd edition, 2023) · CRC Press https://www.routledge.com/Optics-of-the-Human-Eye/Atchison/p/book/9781003128601
12. Schematic eyes: Gullstrand, Gullstrand-Emsley and reduced eyes (lecture notes) · Al-Mustaqbal University https://www.uomus.edu.iq/img/lectures21/MUCLecture_2024_11210775.pdf

Fakten geprüft am 2026-10-12

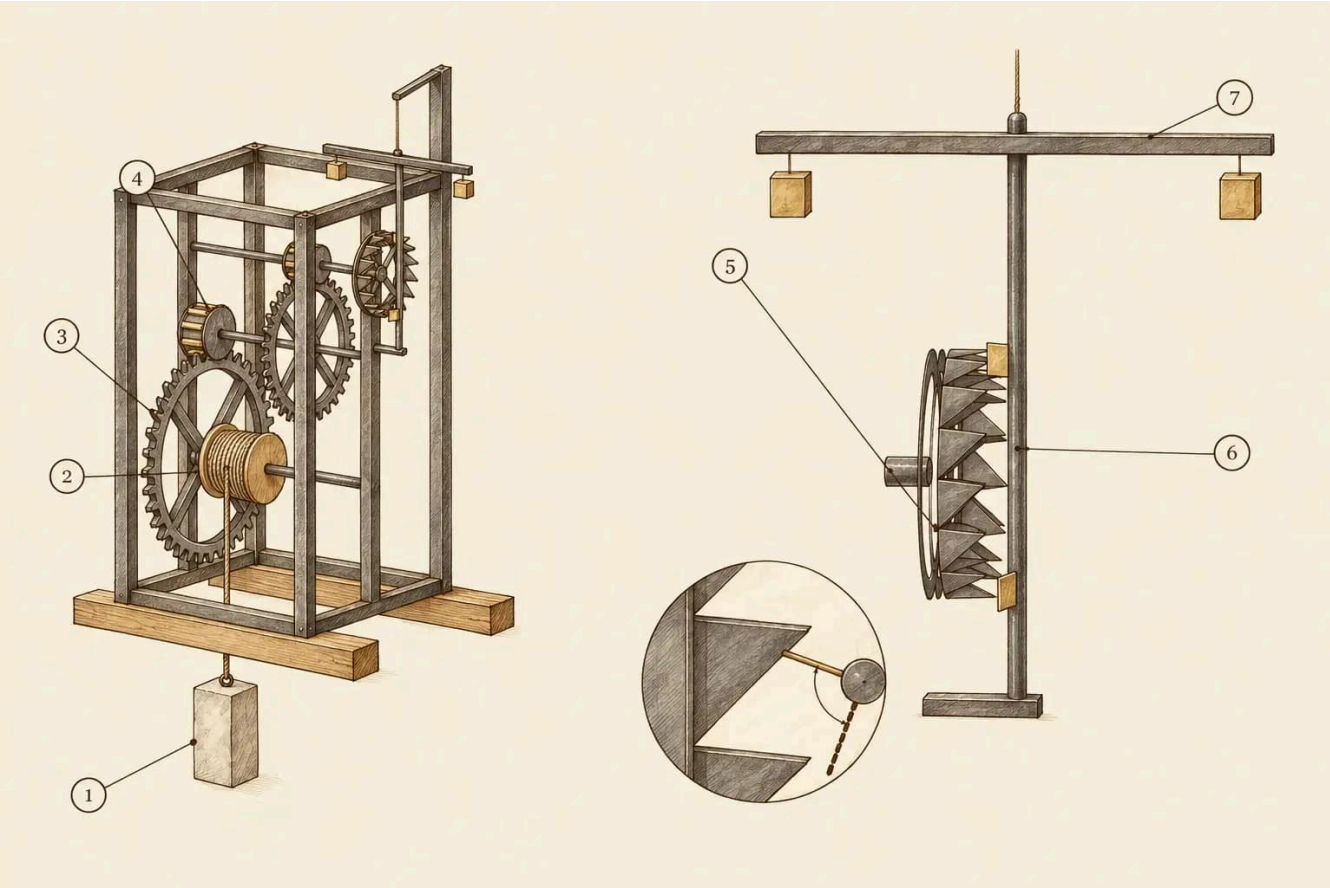
Räderuhr

Zeit in gleiche Schläge geteilt

um 1300 · Mittelalter · Handwerk & Städte

Erfordert: Zahnräder (S. 156), Eisenverhüttung (S. 138)

Führt zu: Astronavigation (S. 213)



1 Antriebsgewicht 2 Trommel mit Seil 3 Großes Rad 4 Laternenritzel 5 Kronrad 6 Spindel mit Paletten 7 Waag mit Gewichten

In einer Räderuhr treibt ein sinkendes Gewicht ein Räderwerk an, und eine Hemmung lässt dieses Räderwerk nur in kleinen, gleichmäßigen Schritten vorrücken. Die ersten entstanden Ende des 13. Jahrhunderts in Europa: große Eisenmaschinen in Kirchtürmen, die die Stunden auf einer Glocke schlugen.

Was es ist

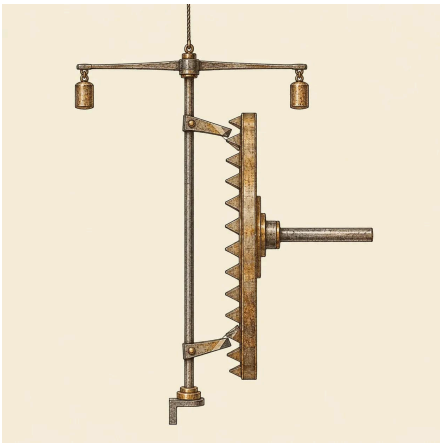
Eine Räderuhr teilt die Zeit in gleiche Schläge und zählt sie mit Zahnrädern. Die frühesten, ab dem Ende des 13. Jahrhunderts gebaut, waren große Gestelle aus Schmiedeeisen in Kirch- oder Stadttürmen. Ein schweres Steingewicht trieb sie an, eine Spindelhemmung mit Waag regelte sie: ein hin- und herschwingender Balken, der die Räder nur in kleinen, regelmäßigen Schritten weiterlaufen ließ. Viele hatten gar kein Zifferblatt; sie schlugen zu den Stunden eine Glocke, und man erfuhr die Zeit mit dem Ohr.

In der Kathedrale von Salisbury läuft eine Uhr dieser Art noch heute im Kirchenschiff. Man setzt sie meist mit einer Uhr gleich, die dort 1386 erwähnt wird, und nennt sie deshalb oft die älteste noch laufende Uhr der Welt; diese Datierung beruht auf indirekten Hinweisen, und auch andere Uhren werden für den Titel genannt. Ihre Räder sitzen in einem Eisengestell mit vier Pfosten, das mit verkeilten Zapfen statt mit Schrauben zusammengehalten wird. Ein Gewicht treibt das Gehwerk, das die Zeit hält, ein zweites das Schlagwerk, das die Glocke läutet.

Wie es funktioniert

Das Gewicht hängt an einem Seil, das um eine hölzerne Trommel gewickelt ist. Sinkt es langsam, dreht es die Trommel und das große Rad auf derselben Welle. Das große Rad treibt ein kleines Ritzel auf der nächsten Welle, die ein weiteres Rad trägt, und so fort bis zum Hemmungsrad. Bei jedem Übergang vom Rad zum Ritzel dreht sich die nächste Welle schneller.

Sich selbst überlassen, würde das Gewicht das Räderwerk durchdrehen und in Sekunden herabfallen. Das verhindert die Hemmung. Das Hemmungsrad ist ein Kronrad, dessen sägeförmige Zähne aus einer Stirnseite hervorstehen. Davor hängt die Spindel, ein senkrechter Stab mit zwei kleinen Lappen, den Paletten: Die eine trifft die Zähne oben am Rad, die andere unten, ungefähr im rechten Winkel zueinander versetzt. Ein Zahn drückt die obere Palette beiseite und dreht die Spindel; dadurch gerät die untere Palette vor einen Zahn auf der anderen Seite des Rades, der sie in die Gegenrichtung zurückstößt. So pendelt die Spindel hin und her, und das Rad rückt bei jedem Ausschlag in eine Richtung um einen halben Zahn vor, bei jedem Hin und Her um einen ganzen.



Die Spindelhemmung von der Seite gesehen, wobei die Zähne rings um den Kranz des Kronrads in einer Reihe erscheinen: Das Rad stößt abwechselnd die beiden Lappen an, und die beschwerte Waag schwingt oben auf der Spindel hin und her.

Die Waag ist ein waagerechter Balken quer über dem oberen Ende der Spindel, mit einem kleinen Gewicht nahe jedem Ende. Ihre Trägheit bremst jeden Schlag. Schiebt man die Gewichte nach außen, wird der Schlag langsamer und die Uhr geht nach; schiebt man sie nach innen, geht sie vor. Die Waag hat keine eigene Schwingungsdauer, darum hängt der Gang auch von der Antriebskraft, der Reibung und dem Zustand des Öls ab, und eine übliche Abweichung lag bei etwa einer Viertelstunde am Tag. Der Türmer stellte die Uhr nach einer Sonnenuhr und zog die Gewichte täglich auf.

Wie man sie baut

Ein Funktionsmodell einer Spindelhemmung mit Waag aus Sperrholz und Hartholzdübeln lässt sich mit Handwerkzeug bauen. Es tickt und zeigt, wie die Hemmung ein sinkendes Gewicht im Zaum hält; ohne Zifferblatt zeigt es keine Uhrzeit. Das Folgende gibt einen Überblick über die Arbeitsschritte: Für Zahnformen und Achsabstände nach einem veröffentlichten, bemaßten Bauplan für ein Hemmungsmodell aus Holz arbeiten.

Das Gestell bauen. Zwei etwa 40 cm hohe Pfosten mit Querstreben verbinden und für drei waagerechte Wellen übereinander in den Abständen des Plans bohren. Dübel als Wellen nehmen und die Löcher mit kurzen Messingröhrchen ausfüttern, damit sie leicht laufen. Das Gestell auf einen schweren Sockel oder eine Wandkonsole schrauben, damit es nicht kippen kann.

Das Räderwerk anfertigen. Auf die untere Welle kommen eine Trommel für die Schnur und das große Rad, auf die mittlere ein Laternenritzel aus Dübelstäben und ein zweites Rad, auf die obere ein weiteres Laternenritzel und das Kronrad. Jedes Rad muss ohne Klemmen und ohne Überspringen in sein Ritzel greifen; deshalb die Zähne nach dem Profil des Plans aussägen und glatt feilen.

Ein Laternenritzel: runde Stäbe zwischen zwei Scheiben, von Hand leicht herzustellen, greifen in die Zähne des größeren Rades.

Die Hemmung anfertigen. Das Kronrad braucht eine ungerade Zahl von Zähnen, üblich sind 15, die aus einer Stirnseite herausstehen: Sie werden an der Kante eines kurzen Rings aus dünnem Sperrholz oder Hartholz ausgesägt, der dann auf die Stirnseite einer Scheibe geleimt wird. Die Spindel, einen geraden Dübel, senkrecht vor dem Rad lagern, mit zwei dünnen Paletten im Winkel von etwa 90 Grad auf Höhe des oberen und des unteren Radrandes. Wegen der ungeraden Zähnezahl trifft eine Palette eine Zahnspitze, während die andere vor einer Lücke steht. Die Waag, einen leichten Balken von etwa 30 cm mit zwei verschiebbaren Gewichten, quer oben auf der Spindel befestigen.

Ohne Gewicht einregulieren. Das Räderwerk mit einem Finger an der Trommel von Hand drehen und prüfen, dass die Paletten abwechselnd arbeiten: Ein Zahn oben fällt ab, dann fängt ein Zahn unten die andere Palette, ohne dass ein Zahn übersprungen wird oder etwas klemmt. Die Paletten nur bei abgenommenem Gewicht biegen oder befeilen. Dann eine Schnur, deren zulässige Last das Gewicht deutlich übersteigt, um die Trommel wickeln, ihr Ende daran festbinden, das im Plan angegebene Gewicht anhängen, bei einem kleinen Holzmodell oft 1 bis 2 kg. Zum Einstellen des Schlags das Gewicht abnehmen oder abstützen, die Waaggewichte ein wenig verschieben, das Gewicht wieder hängen lassen und die Schläge einer Minute zählen; so lange wiederholen, bis der Schlag gleichmäßig ist.

> **Sicherheit.** Rutscht eine Palette ab, läuft das Räderwerk durch und das Gewicht fällt: Vor jedem Eingriff an der Hemmung das Gewicht abnehmen oder abstützen und es in einer geschlossenen Führung laufen lassen, einem Rohr oder Kasten, die am Boden endet. Hände, Füße und Haustiere aus seiner Bahn halten. Beim Aussägen der Zähne das Werkstück einspannen und die Hände hinter dem Sägeblatt halten; beim Bohren eine Schutzbrille tragen.

Geschichte und Entwicklung

Wasseruhren und Sonnenuhren maßen die Zeit seit Jahrtausenden, bevor es Räderuhren gab. Der entscheidende Schritt, ein Mechanismus, der ein Gewicht in regelmäßigen Rucken sinken lässt, gelang irgendwo in Europa im späten 13. Jahrhundert, und in der ersten Hälfte des 14. Jahrhunderts sind große öffentliche Uhren in italienischen Städten bezeugt. Uhren tauchen damals in den Akten von Kathedralen und Klöstern auf, doch dasselbe lateinische Wort, horologium, bezeichnete auch Wasseruhren, sodass sich die erste Räderuhr nicht benennen lässt. Ende des 14. Jahrhunderts liefen in vielen Kathedralen große Eisenuhren; das Werk der Uhr von Wells aus dem Jahr 1392 steht heute im Science Museum in London, ihr Zifferblatt noch in der Kathedrale.

Das Schlagwerk zieht am Draht, der Hammer schlägt gegen die Glocke, und die Stunde ist in der ganzen Stadt zu hören.

Die große Wende kam 1656–1657, als Christiaan Huygens nach einer Idee Galileis eine Uhr mit einem Pendel regelte. Ein Pendel schwingt fast unabhängig von der Antriebskraft in gleicher Zeit. Huygens' erste Pendeluhr wich um weniger als eine Minute am Tag ab, seine späteren um weniger als zehn Sekunden. Viele Turmuhren wurden umgebaut; die von Salisbury und Wells verloren ihre Waag zugunsten eines Pendels, und Salisbury erhielt bei der Restaurierung 1956 eine nachgebaute Spindel mit Waag. Um 1675 gab die Unruhspirale den Taschenuhren einen Gangregler mit eigener

Schwingungsdauer; ihre Abweichung sank auf etwa zehn Minuten am Tag, weit hinter einer Pendeluhr, aber viel besser als zuvor.

Kennzahlen

Erste Räderuhren
Europa, Ende des 13. Jahrhunderts

Gilt als älteste noch funktionierende Uhr
Kathedrale von Salisbury, um 1386; ohne Zifferblatt, schlägt die Stunden

Gangabweichung einer Waaguhr
Etwa eine Viertelstunde am Tag, je nach Bauart und Pflege

Pendeluhr (Huygens)
1656; anfangs unter einer Minute am Tag, später unter 10 Sekunden

Quellen

1. What to see: the world's oldest clock · Salisbury Cathedral https://www.salisburycathedral.org.uk/discover/what-to-see/
2. Wells Cathedral clock, 1392 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co1347/wells-cathedral-clock-1392
3. A walk through time: the revolution in timekeeping · National Institute of Standards and Technology https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/popular-links/walk-through-time/walk-through-time-revolution
4. Clocks in the Scientific Revolution · World History Encyclopedia https://www.worldhistory.org/article/2315/clocks-in-the-scientific-revolution/
5. Oldest clock · Guinness World Records https://guinnessworldrecords.com/world-records/oldest-clock
6. Model of verge escapement with foliot regulator · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/object/ModelVergeEscapementWithFoliotRegulator.html
7. Salisbury Cathedral clock · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Salisbury_Cathedral_clock
8. Dynamics of the verge and foliot clock escapement (P. Hoyng and A. C. T. Nieuwenhuizen) · arXiv https://arxiv.org/abs/1604.06681
9. Turret clock, Cotehele (c. 1490) · National Trust Collections https://www.nationaltrustcollections.org.uk/object/347888
10. Cotehele clock · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Cotehele_clock
11. Before Big Ben (Jonathan Betts) · Building Conservation https://buildingconservation.com/articles/bigben/bigben.html

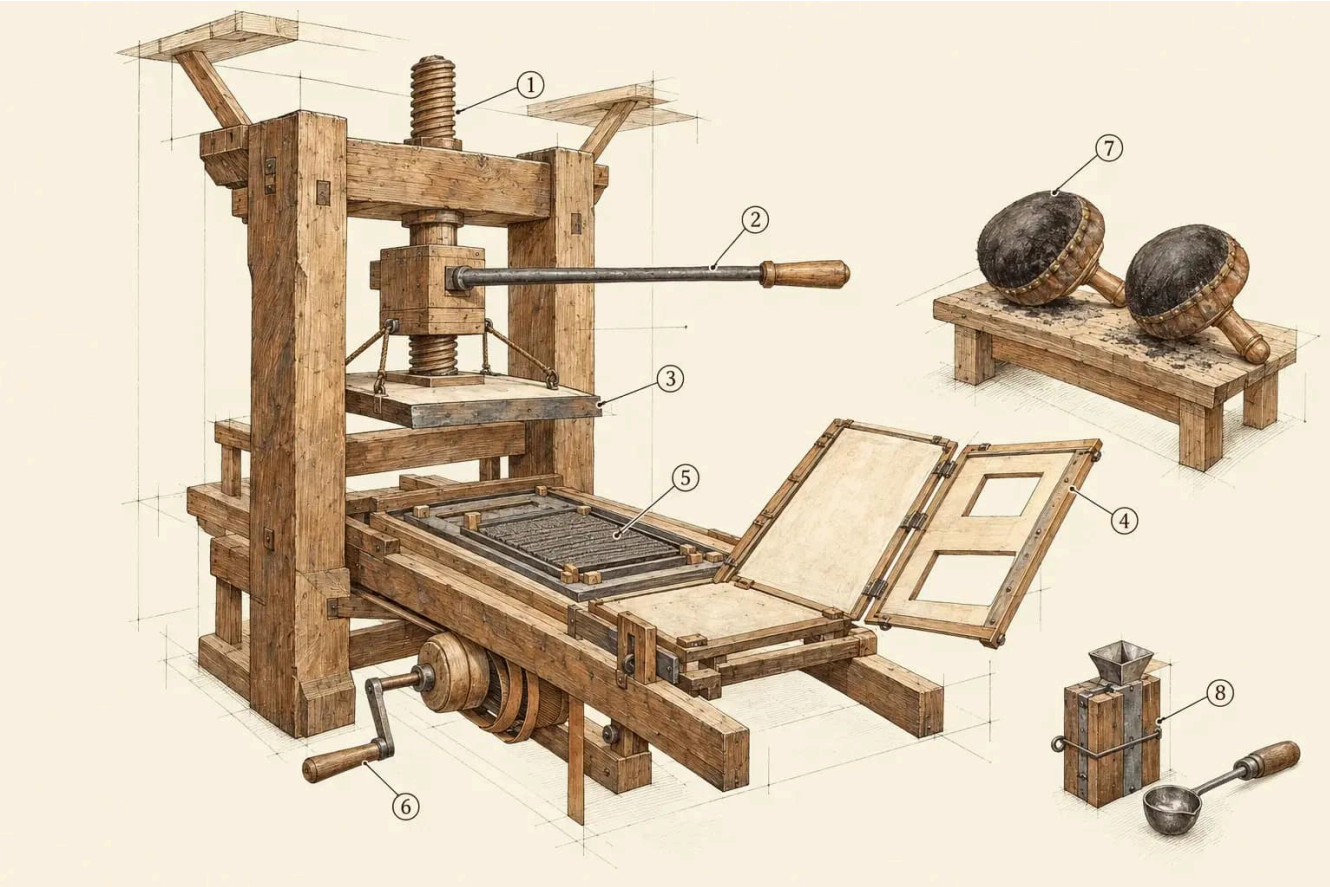
Fakten geprüft am 2026-10-12

Druckerpresse

Bewegliche Lettern, tausendfach kopiert

um 1440 · Mittelalter · Handwerk & Städte

Erfordert: Papier (S. 172), Eisenverhüttung (S. 138), Schrift (S. 87), Stahl (S. 143)



1 Spindel 2 Bengel 3 Tiegel 4 Deckel und Rähmchen 5 Druckform auf dem Fundament (Karren) 6 Kurbel 7 Druckerballen 8 Handgießinstrument zum Gießen der Lettern

Die Druckerpresse drückt mit einer hölzernen Spindel eingefärbte Metalllettern auf feuchtes Papier, sodass sich eine Textseite an einem Tag hunderte Male vervielfältigen lässt. Gutenberg verband sie um 1440 mit gegossenen beweglichen Lettern und einer Druckfarbe auf Ölbasis, und innerhalb von fünfzig Jahren hatte sich der Buchdruck über ganz Europa verbreitet.

Was es ist

Eine Druckerpresse bringt Farbe durch Druck auf Papier. In Metall gegossene Buchstaben werden nebeneinander zu einer Seite gesetzt, eingefärbt, mit einem feuchten Bogen bedeckt und unter einer flachen Platte zusammengepresst. Hebt man den Bogen ab, trägt er ein Spiegelbild der Lettern, das sich richtig herum lesen lässt.

Die Maschine selbst war eine alte Idee. Spindelpressen quetschten seit römischer Zeit Trauben und Oliven aus, und Papiermacher pressten mit ihnen nasse Bogen. Neu war die Verbindung der Presse mit wiederverwendbaren

Metalllettern, die sich schnell und in genauen Maßen gießen ließen, mit einer Farbe, die auf Metall haftete, und mit billigem Papier.

Wie es funktioniert

Die Arbeit beginnt bei den Lettern. Ein Stempelschneider feilt die Form eines Buchstabens spiegelverkehrt in das Ende eines Stahlstabs. Diese Patrize wird in ein kleines Kupferstück geschlagen und hinterlässt dort einen vertieften Buchstaben, die Matrize. Die Matrize kommt unten in das Handgießinstrument, der Gießer gießt flüssiges Metall hinein, und einen Augenblick später öffnet er das Instrument und lässt eine Letter herausfallen, ein kleines Stäbchen, auf dessen Stirnseite der Buchstabe steht.

Die beiden Hälften des Instruments lassen sich auf die Breite jedes Buchstabens verschieben, während die Höhe jeder Letter gleich bleibt.

Gutenbergs Instrument ließ sich für ein schmales „i“ oder ein breites „M“ einstellen, ohne die Höhe der Letter zu verändern. Nur deshalb können Tausende einzelner Lettern zusammenstehen und gleichmäßig drucken. Das Metall, eine Legierung aus Blei, Zinn und Antimon, schmilzt bei niedriger Temperatur, füllt feine Einzelheiten aus und nutzt sich langsam ab.

Druckerballen waren mit Wolle oder Rosshaar gestopft und wurden auf die Lettern getupft.

Der Setzer nimmt die Lettern aus dem Setzkasten, reiht sie Zeile für Zeile im Winkelhaken auf und baut daraus die Seiten. Diese werden dann in einem eisernen Rahmen, dem Schließrahmen, mit Keilen fest eingeschlossen. So entsteht die Druckform, die auf einem flachen Steinfundament im Karren der Presse liegt.

Ein Drucker betupft die Lettern mit zwei Druckerballen, die er mit einer Farbe aus Ruß und Leinöl beladen hat. Sein Partner legt einen feuchten Bogen auf den Deckel, einen mit Pergament bespannten Klapprahmen, und klappt das Rähmchen darüber, damit die Ränder sauber bleiben. Deckel und Rähmchen werden auf die Druckform heruntergeklappt. Mit der Kurbel fährt man den Karren unter den Tiegel. Ein Zug am Bengel dreht die Spindel um den Bruchteil einer Umdrehung, der Tiegel drückt nach unten, und der Bogen ist bedruckt.

Wie man sie baut

Für eine funktionierende Presse braucht man einen Zimmermann, einen Schmied und jemanden, der Buchstaben schneiden kann.

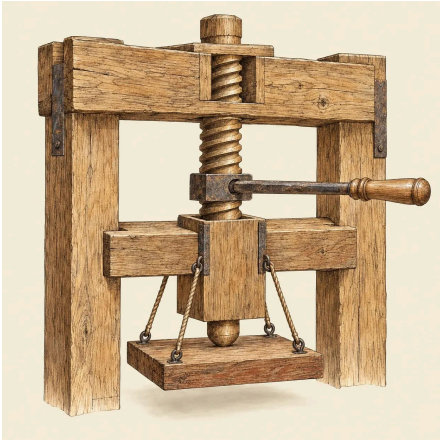
Gestell bauen. Verbinden Sie zwei schwere, aufrechte Wangen aus Eiche oben mit einem Kopfstück und weiter unten mit einem Querholz, und verstreben Sie das Ganze gegen Boden und Decke. Gibt das Gestell nach, verschwimmt der Abdruck.

Spindel und Tiegel anfertigen. Eine Spindel aus hartem, feinfaserigem Holz wie Buchsbaum oder Birnbaum, mit grobem Gewinde geschnitten, läuft in einer Mutter, die im Kopfstück sitzt. Unter der Mutter dreht sich die Spindel in einer viereckigen Holzbüchse, die durch ein Führungsbrett gleitet und sich nicht mitdrehen kann. An dieser Büchse hängt an Schnüren der flache Tiegel, damit er gerade nach unten fährt, ohne sich zu drehen.

Karren einbauen. Ein glatter Stein in einem Holzkasten gleitet auf Schienen unter den Tiegel. Eine Kurbel, eine Welle mit Griff und Lederriemen, zieht ihn hinein und heraus.

Lettern gießen. Das ist Arbeit für eine eingerichtete Gießerei. Schneiden Sie Stahlstempel, schlagen Sie sie in Kupfer und gießen Sie in einem zweiteiligen Instrument, mit den unten genannten Vorkehrungen. Ohne Gießerei drucken auch Buchstaben, die in das Hirnholz eines Hartholzes geschnitzt sind, wenn auch langsamer und weniger gleichmäßig.

Farbe herstellen. Reiben Sie Lampenruß in Leinölfirnis ein, also in Leinöl, das durch Erhitzen bereits eingedickt ist, bis die Masse so dick wie Honig ist. Kaufen Sie den Firnis fertig oder lassen Sie ihn von jemand Erfahrenem kochen, denn erhitztes Öl ist brandgefährlich.



Die Büchse gleitet im Führungsbrett, ohne sich zu drehen, deshalb senkt sich der an Schnüren hängende Tiegel gerade herab.

Papier anfeuchten. Leicht feuchtes Papier nimmt die Farbe viel besser an. Legen Sie es über Nacht zwischen nasse Bogen.

> **Sicherheit.** Gießen Sie Lettern nur in einer Werkstatt, die für flüssiges Blei eingerichtet ist: mit temperaturgeregeltem Schmelztiegel, Rauchabsaugung, Gesichtsschutz, Lederschürze und Handschuhen. Flüssiges Letternmetall spritzt heftig, wenn es mit Wasser oder einem feuchten Werkzeug in Berührung kommt; wärmen Sie Kellen und Gießinstrumente deshalb vor. Blei ist giftig: Essen Sie nie bei der Arbeit, bewahren Sie Krätze und Staub in geschlossenen Behältern auf und waschen Sie sich danach die Hände. Mit Leinöl getränkte Lappen können sich beim Trocknen selbst entzünden; breiten Sie sie im Freien flach aus oder bewahren Sie sie in einer geschlossenen Blechdose mit Wasser auf. Halten Sie sich vom Schwenkbereich des Bengels fern.

Geschichte und Entwicklung

Bewegliche Lettern wurden zuerst in China hergestellt. In den 1040er-Jahren druckte Bi Sheng mit Schriftzeichen aus gebranntem Ton, ein Verfahren, das Shen Kuo festhielt. Koreanische Drucker gossen später Lettern aus Bronze, und das älteste erhaltene Buch, das mit Metalllettern gedruckt wurde, das *Jikji*, stammt aus dem Jahr 1377. Wer chinesische Schriftzeichen druckt, in China wie in Korea, braucht Tausende verschiedener Lettern, was das Verfahren teuer machte.

Johannes Gutenberg, ein Mainzer Handwerker mit einer Ausbildung in der Metallbearbeitung, arbeitete etwa von 1437 bis 1444 in Straßburg am Buchdruck. In einem Prozess von 1439 sprechen Zeugen von einer Presse, von Blei und von Formen für ein geheimes Unternehmen, in dem man meist frühe Druckversuche sieht. Zurück in Mainz druckte er mit Geld von Johann Fust etwa zwischen 1452 und 1455 die 42-zeilige Bibel. Es entstanden etwa 180 Exemplare, die meisten auf Papier, die übrigen auf Pergament; 48 oder 49 sind erhalten.

Das Gewerbe breitete sich schnell aus. Bis 1480 arbeiteten Drucker an etwa 110 Orten, bis 1500 in etwa 270 Städten, die bis dahin über zwanzig Millionen Exemplare hergestellt hatten.

Um 1800 verdoppelte die Stanhope-Presse, die ganz aus Eisen gebaut war, die Leistung. 1814 druckte die dampfgetriebene Zylinderdruckmaschine von Friedrich Koenig *The Times* mit 1.100 Bogen pro Stunde.

Kennzahlen

Gutenbergs erste Druckversuche
Späte 1430er-Jahre, wahrscheinlich Straßburg

Letternmetall
Blei, Zinn und Antimon

Druckorte in Europa bis 1500
Etwa 270

42-zeilige Bibel
Um 1455, etwa 180 Exemplare, 48 oder 49 erhalten

Leistung einer Holzpresse um 1600
Etwa 1.500 bis 3.600 Drucke pro Arbeitstag

Quellen

1. Printing press · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Printing_press
2. The Gutenberg Bible · Library of Congress https://www.loc.gov/exhibits/bibles/interactives/gutenberg/index.html
3. Johannes Gutenberg (Scientist of the Day) · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/johannes-gutenberg/
4. Shen Kuo · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Shen_Kuo
5. Joseph Moxon, Mechanick Exercises on the Whole Art of Printing (1683): the press · Transcription by R. Holme https://rholme.taths.org.uk/texpic/20/20_02a/20_02a.htm
6. Making Books: the Renaissance and Today, glossary of the Beaver Press · MIT OpenCourseWare https://ocw.mit.edu/courses/21h-343j-making-books-the-renaissance-and-today-spring-2016/pages/end-view

Fakten geprüft am 2026-10-11

IV

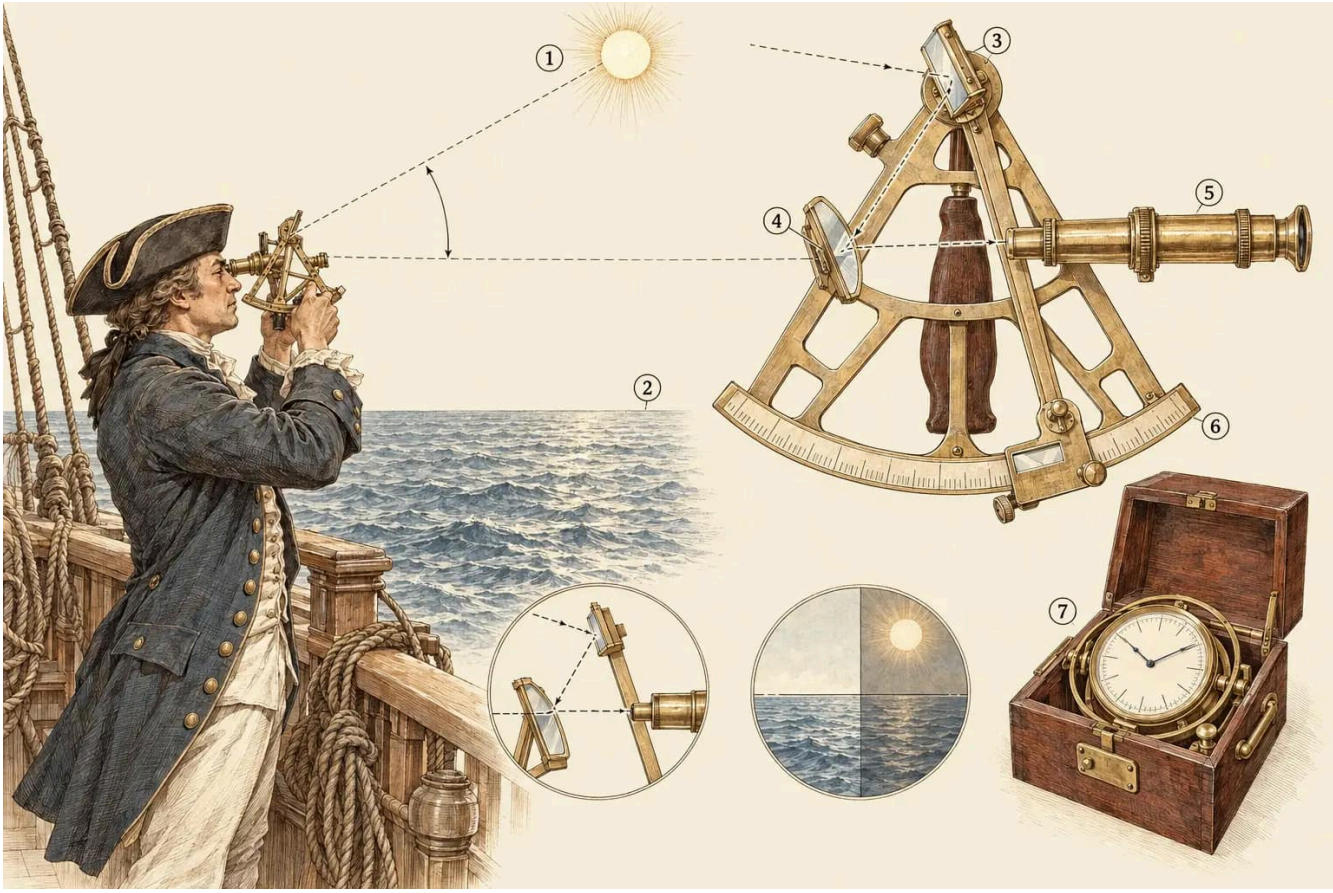
Wissenschaft & Industrie

Astronavigation

Die Schiffsposition am Himmel ablesen

um 1460 · Renaissance · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Magnetkompass (S. 196), Segel (S. 91), Stellenwertsystem (S. 99), Maße und Gewichte (S. 129), Räderuhr (S. 204)



1 Sonne 2 Kimm (Meereshorizont) 3 Indexspiegel 4 Horizontspiegel, zur Hälfte verspiegelt 5 Fernrohr 6 Gradbogen 7 Schiffschronometer

Die Astronavigation bestimmt den Ort eines Schiffes aus der Höhe von Sonne, Mond und Sternen über dem Horizont. Die Breite ergibt sich aus dem Polarstern, den portugiesische Lotsen um 1460 mit dem Quadranten maßen, oder aus der Mittagssonne; für die Länge braucht man die Uhrzeit eines Bezugsmeridians, die ab den 1760er-Jahren Chronometer und Monddistanztafeln lieferten.

Was es ist

Außer Sichtweite der Küste halten Kompass und geschätzte Fahrt den Kurs, doch die Fehler summieren sich. Der Himmel liefert eine Kontrolle, denn die Höhe eines Sterns oder der Sonne über dem Horizont hängt davon ab, wo man steht.

Die Breite, also der Abstand nördlich oder südlich des Äquators, kam zuerst: Die Lotsen des Indischen Ozeans lasen sie mit Fingern oder dem Kamal am Polarstern ab, und Europäer brachten im 15. Jahrhundert Quadranten und Astrolabien auf See. Die Länge hängt von der Zeit ab und blieb bis ins 18. Jahrhundert ein schweres Problem. Die Tafel zeigt einen Sextanten und ein Schiffschronometer aus dieser späteren Zeit.

Wie es funktioniert

Der Polarstern steht dicht an dem Himmelspunkt über der Erdachse. Am Nordpol steht er fast im Zenit, am Äquator fast auf dem Horizont. Dazwischen entspricht seine Höhe ungefähr der Breite. Zur Zeit des Kolumbus lag er 3,5° neben dem Pol, und die Lotsen mussten ihre Messung berichtigen; heute ist der Abstand kleiner als ein Grad.

Südlich des Äquators nimmt man die Sonne zur wahren Mittagszeit, wenn sie am höchsten steht. Ihr Winkel zum Himmelsäquator, die Deklination, schwankt im Lauf des Jahres zwischen etwa 23,4° N und 23,4° S und lässt sich im Voraus berechnen. Steht die Mittagssonne im Süden, ist die Breite gleich 90° minus Sonnenhöhe plus Deklination, wobei Süd negativ zählt. Steht sie im Norden, wie immer südlich der Wendekreise, ist die Breite gleich Deklination minus (90° minus Höhe).

Am frühen Quadranten hängt ein Lot vor einer Skala, während man den Stern entlang einer Kante anpeilt. Das Seeastrolabium hängt an einem Ring; für die Sonne dreht der Navigator die Alhidade, bis ein Lichtstrahl durch das obere Loch auf das untere fällt. Beide pendeln auf einem rollenden Deck, und Fehler von mehreren Grad waren üblich.

Das Seeastrolabium wurde schwer und durchbrochen gegossen, damit der Wind es nicht ins Pendeln brachte.

Oktant und Sextant messen dagegen von der Kimm aus. Das Sonnenlicht trifft den Indexspiegel auf dem beweglichen Arm, wird zum Horizontspiegel geworfen und von dort ins Fernrohr. Eine Hälfte des Horizontspiegels ist durchsichtig, man sieht die Kimm also direkt neben der gespiegelten Sonne. Mit eingeschwenkten Blendgläsern schwenkt der Navigator den Arm, bis der Unterrand der Sonne die Kimm berührt, und liest den Bogen ab. Tafeln berichtigen dann Augeshöhe, Refraktion und den halben Sonnendurchmesser von etwa 16′. Die doppelte Spiegelung verdoppelt den Winkel, deshalb misst ein Bogen von einem Sechstelkreis bis 120°.

Für die Länge gilt: Die Erde dreht sich um 15° pro Stunde. Geht die Sonne durch den Ortsmeridian, während eine auf Greenwich gestellte Uhr 15 Uhr zeigt, steht das Schiff etwa 45° westlich von Greenwich; hinzu kommt die Zeitgleichung, die Abweichung der wahren von der mittleren Sonnenzeit um bis zu 16 Minuten. Schwierig war eine Uhr, die auf See genau bleibt. Die andere Methode, die Monddistanz, vergleicht den gemessenen Winkel zwischen Mond und einem hellen Stern mit gedruckten Tafeln und gewinnt daraus die Bezugszeit.

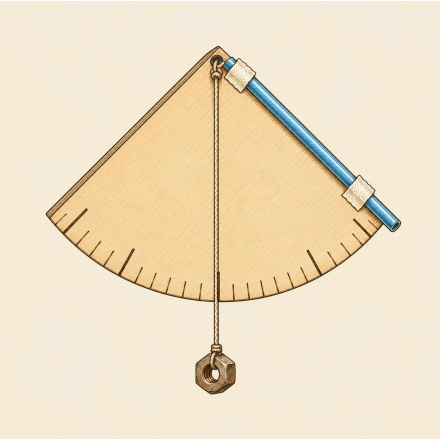
Zwischen zwei Beobachtungen wird die Koppelnavigation aus Kompass, Log und Uhr auf der Karte geführt; jeder astronomische Standort berichtigt sie.

Wie man vorgeht

Ein Quadrant aus Karton bestimmt die Breite auf ein bis zwei Grad genau, also auf 100 bis 200 km.

Den Quadranten bauen. Aus festem Karton einen Viertelkreis mit etwa 15 cm Radius schneiden. Mit dem Winkelmesser den Bogen von 0 an der einen geraden Kante bis 90 an der anderen einteilen. Einen Trinkhalm an der Kante mit der 90 festkleben. An der Ecke einen Faden mit einer Schraubenmutter aufhängen. Der Faden zeigt dann den Winkel des Halms über der Waagerechten.

Den Polarstern messen. In einer klaren Nacht auf der Nordhalbkugel die Verbindungslinie der beiden hinteren Kastensterne des Großen Wagens um etwa das Fünffache ihres Abstands verlängern, dort steht der Polarstern. Ihn



Durch den Halm peilen und ablesen, wo der Faden die Skala kreuzt.

durch den Halm anpeilen, den Faden zur Ruhe kommen lassen und ablesen. Der Mittelwert aus fünf Messungen ergibt die ungefähre Breite.

Oder die Mittagssonne über den Schatten messen. Nie die Sonne anpeilen. Einen geraden Stab auf ebenem Boden aufstellen und mit dem Lot prüfen, dass er senkrecht steht. Um die Mittagszeit alle fünf Minuten die Schattenspitze markieren: Der kürzeste Schatten zeigt den wahren Mittag, der selten auf 12 Uhr nach der Uhr fällt. Die Sonnenhöhe ist der Winkel, dessen Tangens Stabhöhe durch Schattenlänge ist; man kann das Dreieck auch maßstäblich zeichnen und den Winkel mit dem Winkelmesser abnehmen.

Nach dem Datum berichtigen. Die Deklination der Sonne für den Tag in einem Jahrbuch nachschlagen, nördlich positiv. Nördlich der Wendekreise gilt: Breite = 90° − Höhe + Deklination. Am 11. April beträgt die Deklination etwa +8°. Wirft ein 100 cm hoher Stab einen kürzesten Schatten von 77 cm, ist die Höhe etwa 52,4° und die Breite 90 − 52,4 + 8 = 45,6° N, nahe an Lyon mit 45,8°. Danach mit einer Karte vergleichen.

> **Sicherheit.** Nie in die Sonne sehen, weder mit bloßem Auge noch durch einen Halm, ein Rohr, ein Fernglas oder eine Visiereinrichtung, auch nicht kurz; Sonnenbrillen schützen nicht, und der Schaden ist bleibend. Nachts zu zweit gehen, eine Lampe mitnehmen und Abstand halten von Klippenrändern, Kais, Ufern und offenem Wasser.

Geschichte und Entwicklung

Die Seefahrer des Pazifiks fuhren ohne Instrumente. Sie steuerten nach den Auf- und Untergangspunkten der Sterne und schätzten die Breite an der Höhe des Kreuzes des Südens. 1976 führte Mau Piailug so das Kanu Hōkūleʻa von Hawaiʻi nach Tahiti.

Beim Kamal der Lotsen des Indischen Ozeans hielt man einen Knoten zwischen den Zähnen und damit ein kleines Brett im festen Abstand, dessen Kanten von der Kimm bis zum Stern reichten. Ahmad ibn Madschid aus Oman schrieb dieses Wissen 1490 nieder.

Der Kamal: Jeder Knoten stand für die Höhe des Polarsterns in einem bekannten Hafen.

Diogo Gomes berichtet, er habe auf einer Fahrt nach Guinea um 1460 den Polarstern mit dem Quadranten gemessen; seine Daten sind unsicher. Nach der Überquerung des Äquators in den 1470er-Jahren hielten sich die Portugiesen an die Mittagssonne, das Astrolabium und die Deklinationstafeln von Abraham Zacuto, 1496 in Leiria gedruckt. Es folgten der Jakobsstab und um 1594 der Davis-Quadrant. John Hadley stellte seinen Oktanten 1731 der Royal Society vor. John Harrisons Uhr H4 wurde 1761 auf See erprobt; Nevil Maskelynes Nautical Almanac, 1766 für das Jahr 1767 erschienen, brachte Monddistanztafeln. Regelmäßige Funkzeitsignale gab es ab 1904, und GPS war 1995 voll einsatzfähig.

Kennzahlen

Ein Breitengrad
Etwa 111 km (60 Seemeilen)

Erddrehung
15° Länge pro Stunde, 1° alle 4 Minuten

Deklination der Sonne
Im Lauf des Jahres zwischen etwa 23,4° N und 23,4° S

Polarstern mit dem Quadranten auf See gemessen
Diogo Gomes, um 1460

Hadleys Oktant
Am 13. Mai 1731 der Royal Society vorgestellt

Quellen

1. What is a mariner's astrolabe? · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/stories/space-astronomy/what-mariners-astrolabe
2. Quadrant · The Mariners' Museum and Park https://exploration.marinersmuseum.org/object/quadrant/
3. Mariner's astrolabe · The Mariners' Museum and Park https://exploration.marinersmuseum.org/?p=211
4. Back staff · The Mariners' Museum and Park https://exploration.marinersmuseum.org/object/back-staff/
5. Martin Behaim: his life and his globe (E. G. Ravenstein, 1908), pp. 15–17 · Universitätsbibliothek Freiburg https://dl.ub.uni-freiburg.de/diglit/ravenstein1908/0029/ocr
6. Martin Behaim: his life and his globe, Zacuto's Almanach · Universitätsbibliothek Freiburg https://dl.ub.uni-freiburg.de/diglit/ravenstein1908/0031/ocr
7. The navigator Ahmad ibn Majid · AramcoWorld https://archive.aramcoworld.com/issue/200504/the.navigator.ahmad.ibn.majid.htm
8. The Star Compass · Polynesian Voyaging Society https://worldwidevoyage.hokulea.com/education-at-sea/polynesian-navigation/the-star-compass/
9. Wayfinding revival · Science Learning Hub, University of Waikato https://www.sciencelearn.org.nz/resources/631-wayfinding-revival
10. John Hadley · MacTutor, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/DNB/Hadley.html
11. Octant / sextant · Museo Galileo https://catalogue.museogalileo.it/multimedia/OctantSextantBis.html
12. Who was John Harrison? · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/discover/explore/longitude-found-john-harrison
13. John Harrison · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/john-harrison
14. Nevil Maskelyne and the lunar method · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/stories/topics/longitude-found-nevil-maskelyne-lunar-method
15. The Evolution of Time Measurement, Part 5: Radio Controlled Clocks (M. A. Lombardi, 2012) · NIST https://tf.nist.gov/general/pdf/2536.pdf
16. The System: Celebrating 20 Years of GPS · GPS World https://www.gpsworld.com/the-system-celebrating-20-years-of-gps/
17. Longitude and Local Noon · ESO, Sea and Space https://www.eso.org/public/outreach/eduoff/seaspace/navigation/navastro/navastro-5.html
18. Declination of the Sun · Plymouth State University https://vortex.plymouth.edu/dept/tutorials/sun/sun4a.html
19. The American Practical Navigator (Pub. 9), chapter 14: Instruments for celestial navigation · National Geospatial-Intelligence Agency https://thenauticalalmanac.com/2019_Bowditch-_American_Practical_Navigator/Volume-_1/05-%20Part%203-%20Celestial%20Navigation/Chapter%2014-%20Instruments%20For%20Celestial%20Navigation.pdf
20. The American Practical Navigator (Pub. 9), appendix B: Calculations and conversions (dip of the horizon) · National Geospatial-Intelligence Agency https://thenauticalalmanac.com/2019_Bowditch-_American_Practical_Navigator/Volume-_1/13-%20Appendices/Appendix%20B-%20Calculations%20and%20Conversions.pdf
21. Mate sextant, Kelvin & Hughes, 1967 (NAV1204) · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-43416
22. The calculation of astronomical refraction in marine navigation (G. G. Bennett, 1982) · Journal of Navigation https://doi.org/10.1017/S0373463300022037
23. General Solar Position Calculations · NOAA Global Monitoring Laboratory https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/solareqns.PDF

Fakten geprüft am 2026-10-14

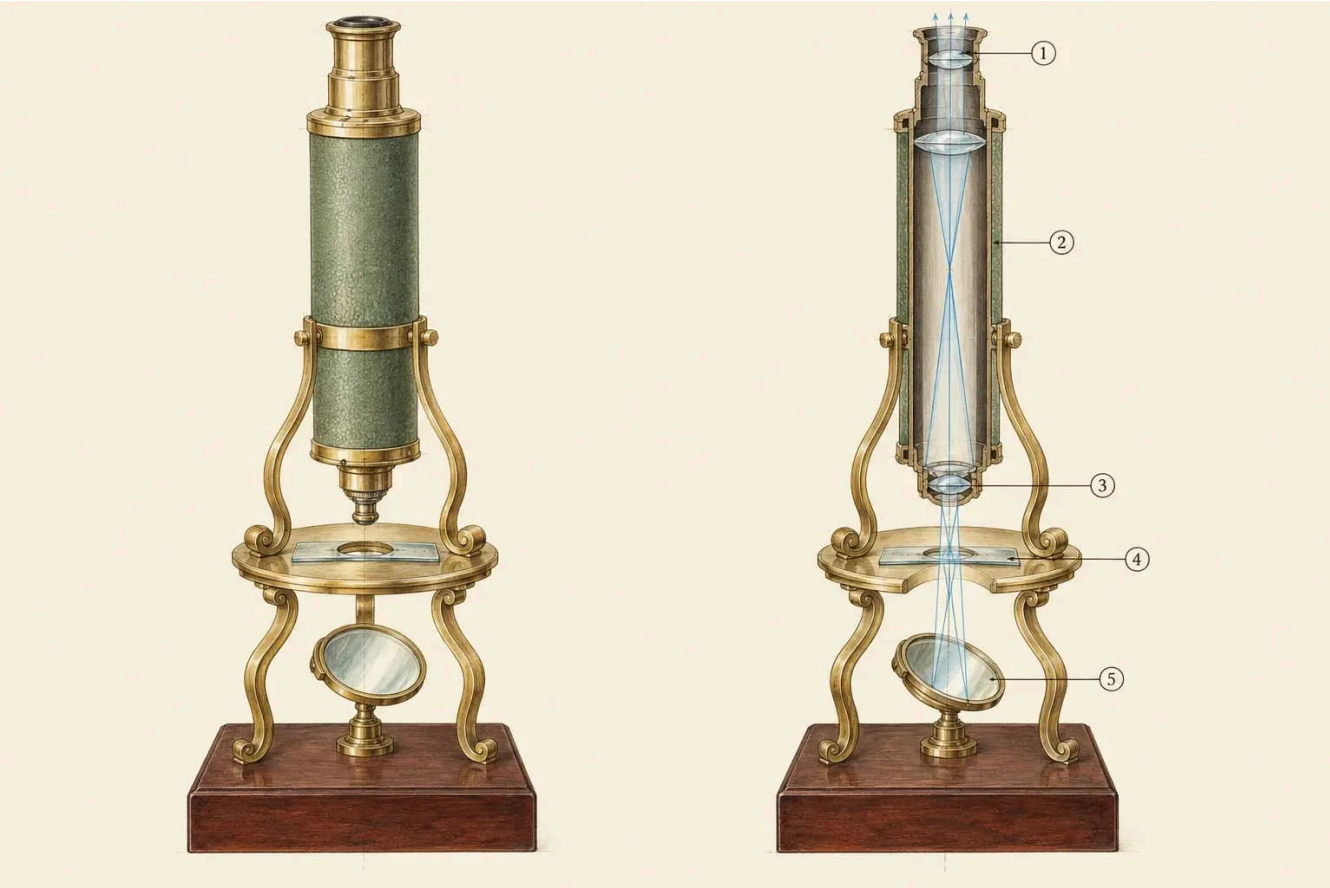
Mikroskop

Eine Welt, zu klein für das Auge

um 1590 · Renaissance · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Brille (S. 200)

Führt zu: Hygiene und Antisepsis (S. 302)



1 Okular 2 Tubus 3 Objektiv 4 Objekttisch mit Objektträger 5 Hohlspiegel

Ein Mikroskop zeigt mit einer oder mehreren Linsen, was für das Auge zu klein ist. Zusammengesetzte Instrumente mit zwei Linsen in einem Rohr entstanden um 1600 in den Niederlanden, und in den 1670er-Jahren machten Antoni van Leeuwenhoeks winzige Einzellinsen erstmals Bakterien und Einzeller sichtbar.

Was es ist

Ein Mikroskop zeigt Einzelheiten, die für das bloße Auge zu klein sind, von einem Zehntelmillimeter bis hinab zu wenigen Tausendstelmillimetern. Die einfachste Form, das einfache Mikroskop, ist nur eine sehr starke Linse dicht vor dem Auge. Das zusammengesetzte Mikroskop hat zwei Linsen oder Linsengruppen in einem Rohr: Die erste erzeugt ein vergrößertes Bild, die zweite vergrößert dieses Bild noch einmal.

Das Instrument auf der Tafel ist ein zusammengesetztes Mikroskop der Bauart, die der Londoner Instrumentenmacher Edward Culpeper um 1725 bis 1730 entwickelte. Drei geschwungene Messingbeine auf einem

Holzsockel tragen den Objekttisch, drei weitere die Hülse, in der der Tubus zum Scharfstellen auf und ab gleitet. Ein Hohlspiegel unter dem Tisch sammelt Tages- oder Kerzenlicht und lenkt es von unten durch das Präparat.

Wie es funktioniert

Das Präparat, oft ein dünner Schnitt oder ein Flüssigkeitstropfen auf einem Glasträger, liegt über einem Loch im Objekttisch. Der Spiegel wirft das Licht von unten hindurch. Knapp über dem Träger erzeugt das kleine, stark gewölbte Objektiv im Tubus ein reelles, vergrößertes und umgekehrtes Bild. Das Okular oben wirkt wie eine Lupe auf dieses Bild. Auf der Tafel sitzt unter der Augenlinse eine Feldlinse, die den auf einmal sichtbaren Ausschnitt vergrößert.

Die beiden Vergrößerungen multiplizieren sich. Ein Objektiv mit zehnfacher und ein Okular mit zehnfacher Vergrößerung ergeben zusammen das Hundertfache. Durch Heben oder Senken des Tubus stellt man scharf; bei starker Vergrößerung ist der scharfe Bereich nur wenige Tausendstelmillimeter tief.

Mehr Vergrößerung zeigt nicht immer mehr. Frühe Linsen brachen jede Farbe ein wenig anders und umgaben das Bild mit Farbsäumen. Joseph Jackson Lister behob das um 1830 weitgehend mit Objektiven aus zwei Glassorten. Später im Jahrhundert zeigte Ernst Abbe, der mit der Firma Zeiss in Jena zusammenarbeitete, dass die Wellennatur des Lichts selbst eine Grenze setzt: Ein herkömmliches Lichtmikroskop trennt keine zwei Punkte, die viel näher als etwa 0,2 µm beieinanderliegen, ungefähr die halbe Wellenlänge des sichtbaren Lichts; der genaue Wert hängt von der Lichtfarbe und der Apertur des Objektivs ab. Für noch Kleineres braucht man das Elektronenmikroskop oder besondere Fluoreszenzverfahren.

Leeuwenhoeks Instrument von der Seite: Die lange Schraube hebt den Präparatdorn, die kurze schiebt ihn zur Linse hin oder von ihr weg.

Wie man es baut

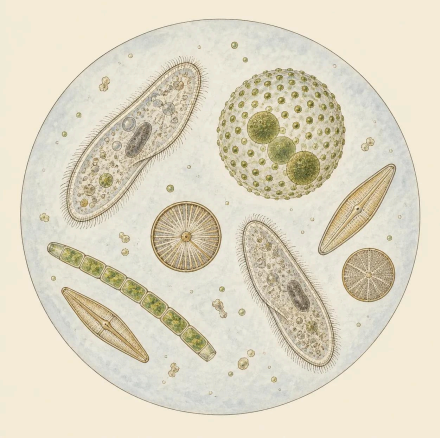
Ein Einlinsenmikroskop nach Leeuwenhoeks Art kann ein sorgfältiger Bastler bauen, und es vergrößert hundertfach oder mehr.

Die Linse. Am einfachsten ist eine Kugel aus Glas oder Saphir von 2 bis 3 mm Durchmesser, wie man sie für die Optik oder für Glasfaserkoppler kaufen kann. Eine 2-mm-Kugel aus gewöhnlichem Glas hat eine Brennweite von etwa 1,5 mm, vom Kugelmittelpunkt aus gemessen, und vergrößert rund 150fach. Das Präparat muss nur etwa einen halben Millimeter von der Glasoberfläche entfernt sein. Leeuwenhoek stellte Linsen auch durch Schmelzen von Glas her; die Spitze eines dünnen Glasstabs zu erhitzen, bis sich eine runde Perle bildet, funktioniert, braucht aber eine Gasflamme und gehört in die Hände von Leuten, die das Arbeiten an der Glasbläserlampe gelernt haben.

Die Fassung. In zwei dünne Messing- oder Aluminiumstreifen von etwa 5 × 2,5 cm ein Loch von etwa halbem Kugeldurchmesser bohren; es dient als Blende und schneidet den unscharfen Rand der Linse ab. Jedes Loch innen ansenken, damit die Kugel darin sitzt, die Linse zwischen die Streifen legen und diese nahe den Rändern vernieten oder verschrauben. Alle Grate abfeilen und die Ecken runden.

Der Präparathalter. Hinter der Platte einen kleinen Block auf einer langen Schraube anbringen, die durch einen Winkel läuft, sodass man ihn durch Drehen hebt und senkt. Am Block einen Dorn oder ein Deckglas mit geschliffenen Kanten befestigen, das das Präparat knapp hinter der Linse hält, dazu eine zweite Schraube durch

den Block, die gegen die Platte drückt und den Abstand einstellt. Feine Gewinde verwenden: Das Präparat muss bis auf einen halben Millimeter an die Linse heran und sich um Hundertstelmillimeter verschieben lassen.



Ein Tropfen Teichwasser bei etwa hundertfacher Vergrößerung: Pantoffeltierchen, eine Volvox-Kolonie, Kieselalgen und eine Grünalge.

Der Gebrauch. Die Linse dicht vors Auge halten, ohne es zu berühren, das Präparat auf der anderen Seite, und gegen ein helles, diffuses Licht schauen, eine weiße Wand oder einen bedeckten Himmel. Ein Tropfen Teichwasser auf einem Deckglas zeigt sich bewegende Urtierchen und Algen.

> **Sicherheit.** Nie ein Mikroskop oder seinen Spiegel auf die Sonne richten: Gebündeltes Sonnenlicht kann das Auge augenblicklich und dauerhaft schädigen. Heißes Glas sieht aus wie kaltes; Perlen und Stäbe auf einer hitzefesten Unterlage abkühlen lassen und Gasflammen von allem Brennbaren fernhalten. Beim Bohren von Metall eine Schutzbrille tragen. Teichwasser ist nicht sauber: Nach dem Umgang damit die Hände waschen.

Geschichte und Entwicklung

Brillenmacher in den Niederlanden setzten als Erste zwei Linsen in ein Rohr, etwa zwischen 1590 und 1620. Spätere Berichte schrieben das Zacharias Janssen aus Middelburg zu, stützen sich aber vor allem auf Aussagen seines Sohnes, die Jahrzehnte danach gemacht wurden; auch Cornelis Drebbel und andere bauten ähnliche Instrumente. 1624 schickte Galilei eines seiner „occhialini“ an Federico Cesi, und im Jahr darauf schlug Johannes Faber, Mitglied von Cesis Accademia dei Lincei, den Namen Mikroskop vor.

Robert Hookes Micrographia, 1665 von der Royal Society herausgegeben, machte das zusammengesetzte Mikroskop berühmt. Ihre achtunddreißig Kupferstiche zeigten einen Floh, eine Laus und einen dünnen Korkschnitt, dessen leere Kammern Hooke Zellen nannte. In Delft sah der Tuchhändler Antoni van Leeuwenhoek mit einer einzigen Linse feinere Einzelheiten. Er baute mehrere Hundert kleine Mikroskope, manche mit über 250facher Vergrößerung, und schickte ab 1673 Briefe an die Royal Society, in denen er Blutkörperchen, Samenzellen und Scharen „kleiner Tierchen“ beschrieb. In einem Brief von 1676 über Pfefferwasser schilderte er Lebewesen, die wir heute als Bakterien kennen, die ersten je gesehenen; 1683 fand er ähnliche im Belag seiner Zähne.

Hookes Mikroskop aus den 1660er-Jahren: Eine mit Wasser gefüllte Glaskugel bündelt das Licht einer Öllampe auf das Präparat.

Erst im 19. Jahrhundert überholte das zusammengesetzte Mikroskop die einfache Linse, als Listers achromatische Objektive und Abbes Theorie es zu einem genauen Laborgerät machten. Elektronenmikroskope, seit den 1930er-Jahren gebaut, blicken weit unter die Grenze des Lichts, und seit den 1990er-Jahren erlauben manche Fluoreszenzverfahren auch Lichtmikroskopen, sie zu unterschreiten.

Kennzahlen

Erste zusammengesetzte Mikroskope
Niederlande, etwa 1590–1620; der Erfinder ist umstritten

Leeuwenhoeks beste Linsen
Etwa 70- bis über 250fach, Auflösung um 1 µm

Grenze des herkömmlichen Lichtmikroskops
Etwa 0,2 µm, die halbe Wellenlänge des sichtbaren Lichts

Der Name
1625 von Johannes Faber aus der Accademia dei Lincei vorgeschlagen

Hookes Micrographia
1665, 38 Kupferstiche; erster biologischer Gebrauch des Wortes „Zelle“

Quellen

1. Museum of Microscopy: The Leeuwenhoek Microscope · Molecular Expressions, Florida State University https://micro.magnet.fsu.edu/primer/museum/leeuwenhoek.html
2. Culpeper microscope with boxfoot made by George Adams in 1738 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co119233
3. Johannes Faber (biography) · Museo Galileo https://catalogue.museogalileo.it/biography/JohannesFaber.html
4. Galileo and the microscope: timeline (estoria04) · Museo Galileo (IMSS) https://brunelleschi.imss.fi.it/esplora/microscopio/dswmedia/storia/pdf/estoria04.pdf
5. Fleas, mould and plant cells: under a 17th-century microscope · British Library https://www.bl.uk/stories/blogs/posts/fleas-mould-and-plant-cells-under-a-17th-century-microscope
6. History of the achromatic and aplanatic microscope · Antique Microscopes (Brian Stevenson) https://www.microscope-antiques.com/hxachromatic.html
7. De microscoop van Antoni van Leeuwenhoek · Koninklijke Nederlandse Vereniging voor Microbiologie https://www.knvm.org/outreach/mijlpalen-in-de-microbiologie/de-microscoop-van-antoni-van-leeuwenhoek
8. Robert Hooke (Museum of Microscopy) · Molecular Expressions, Florida State University https://micro.magnet.fsu.edu/primer/museum/hooke.html
9. Hooke's Microscope · Lens on Leeuwenhoek https://lensonleeuwenhoek.net/node/7761
10. Museum of Microscopy: Culpeper microscope · Molecular Expressions, Florida State University https://micro.magnet.fsu.edu/primer/museum/culpeper.html
11. Culpeper tripod microscope · The Golub Collection, University of California, Berkeley https://golubcollection.berkeley.edu/thumb181
12. Descriptive Catalogue of the Collection of Microscopes in charge of the Utrecht University Museum (P. H. van Cittert, 1934) · Utrecht University Library https://objects.library.uu.nl/download/1874-307223/fulltext
13. University Physics Volume 3, 2.8 Microscopes and Telescopes · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/2-8-microscopes-and-telescopes
14. Resolution · Nikon MicroscopyU https://www.microscopyu.com/microscopy-basics/resolution

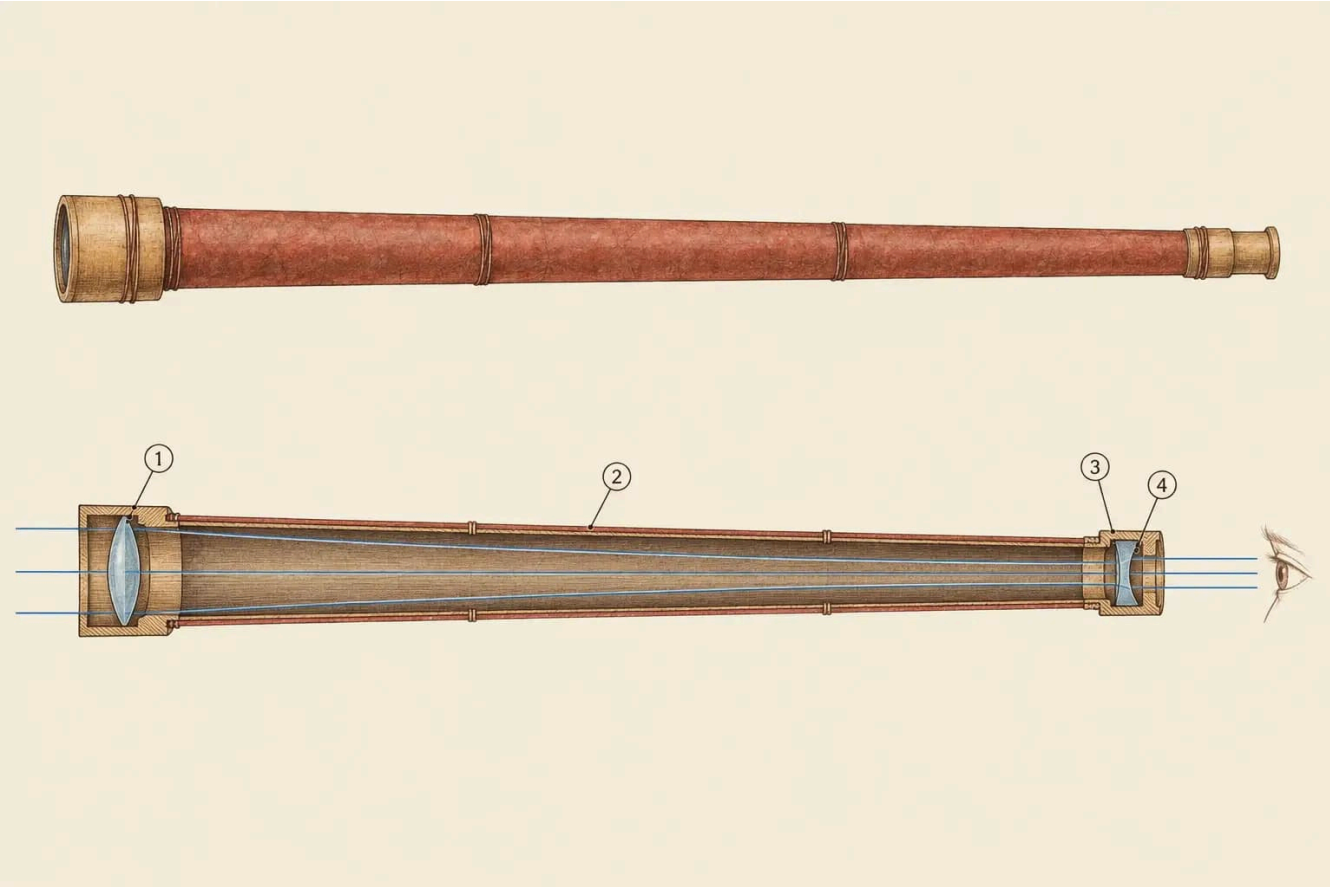
Fakten geprüft am 2026-10-12

Fernrohr

Das Ferne heranholen

1608 · Renaissance · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Brille (S. 200)



1 Sammellinse (Objektiv) 2 Hauptrohr 3 Okularfassung 4 Zerstreuungslinse (Okular)

Ein Fernrohr sammelt mit einer Linse oder einem Spiegel das Licht eines fernen Gegenstands und vergrößert das Bild, das dabei entsteht. Brillenmacher in den Niederlanden bauten 1608 die ersten, und Galileis verbesserte Instrumente zeigten Ende 1609 Berge auf dem Mond und im Januar 1610 vier Monde, die Jupiter umkreisen.

Was es ist

Ein Fernrohr lässt ferne Dinge näher erscheinen. Sein wichtigstes Element, das Objektiv, sammelt viel mehr Licht als die Pupille und erzeugt ein Bild des fernen Gegenstands. Beim Linsenfernrohr ist das Objektiv eine Linse vorn im Rohr, beim Spiegelteleskop ein gewölbter Spiegel am hinteren Ende; ein kleineres Okular vergrößert dieses Bild dann für das Auge.

Das Instrument auf der Tafel ist eines der beiden erhaltenen Fernrohre Galileo Galileis im Museo Galileo in Florenz. Sein Hauptrohr besteht aus zwei hölzernen Halbschalen, die von Kupferdraht zusammengehalten und mit Papier überzogen sind. Eine kurze Fassung vorn hält das Objektiv, eine Sammellinse von 51 mm Durchmesser und 1330

mm Brennweite; eine zweite hinten hält das Okular, eine kleine Zerstreuungslinse. Das Instrument vergrößert 14fach und zeigt nur ein Himmelsfeld von einem Viertelgrad, etwa den halben Durchmesser des Vollmonds.

Wie es funktioniert

Das Licht eines Sterns oder eines fernen Kirchturms kommt als nahezu paralleles Bündel an. Das Objektiv bricht dieses Bündel so, dass es auf einen Punkt zuläuft, den Brennpunkt, der bei Galileis Fernrohr 1330 mm hinter der Linse liegt. Allein würde das Objektiv dort ein kleines, umgekehrtes Bild erzeugen.

Bei der galileischen Bauart fängt das zerstreuende Okular das zusammenlaufende Licht vor dem Brennpunkt ab. Es fächert die Strahlen gerade so weit auf, dass sie wieder parallel laufen, nun aber unter steileren Winkeln als beim Eintritt: Das Auge sieht den Gegenstand größer und aufrecht. Die Vergrößerung ist die Brennweite des Objektivs geteilt durch die des Okulars, ohne dessen Minuszeichen: 1330 mm durch 94 mm ergibt etwa 14.

1611 schlug Johannes Kepler ein sammelndes Okular vor. Das keplersche Fernrohr zeigt ein umgekehrtes Bild, was einen Astronomen nicht stört, und ein viel größeres Gesichtsfeld; es wurde zum gewöhnlichen astronomischen Linsenfernrohr. Eine Linse bricht außerdem jede Farbe etwas anders und umgibt helle Objekte mit Farbsäumen. Isaac Newton umging das, indem er das Licht mit einem Hohlspiegel sammelte, der alle Farben gleich zurückwirft.

Newtons Spiegelteleskop ersetzte die Objektivlinse durch einen gewölbten Metallspiegel am Boden eines kurzen Rohrs; ein kleiner Planspiegel lenkt das Licht zur Seite.

Wie man es baut

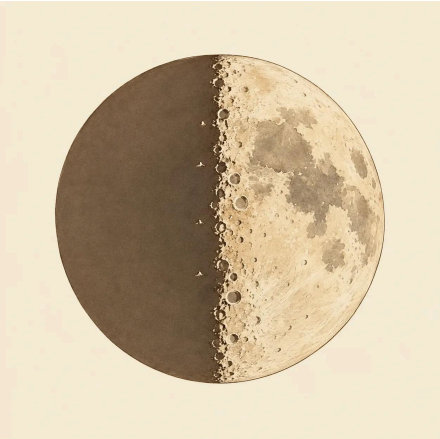
Ein galileisches Fernrohr wie das Galileis braucht zwei Linsen und ein Rohr von etwa einem Meter.

Linsen wählen. Als Objektiv eine Sammellinse von etwa +1 Dioptrie (1000 mm Brennweite) und 40 bis 50 mm Durchmesser; eine Einzellinse geht, ein achromatisches Linsenpaar vom Optikversand liefert ein schärferes Bild. Als Okular eine Zerstreuungslinse von etwa −10 Dioptrien (−100 mm Brennweite) und 20 bis 25 mm Durchmesser. Dieses Paar vergrößert 1000 : 100 = 10fach.

Rohr bauen. Die Linsen müssen etwa 900 mm auseinander sitzen: Objektivbrennweite minus Okularbrennweite, diese ohne Minuszeichen gerechnet. Zwei Papp- oder Kunststoffrohre nehmen, die ineinander gleiten, damit sich die Länge um einige Zentimeter verstellen lässt. Innen mattschwarz streichen oder auskleiden, um Streulicht zu vermeiden.

Linsen fassen. Das Objektiv am vorderen Ende zwischen zwei Ringen aus Pappe oder Holz halten, genau senkrecht zum Rohr. Das Okular in eine kurze Kappe am hinteren Ende setzen, die hohle Seite zum Auge.

Scharfstellen und beobachten. Das Rohr auf etwas Festes legen, ein Fotostativ oder einen Zaun, und die Rohre verschieben, bis ein ferner Schornstein scharf erscheint. Nachts zeigt es die Krater des Mondes und an einem ruhigen Abend die vier größten Jupitermonde.



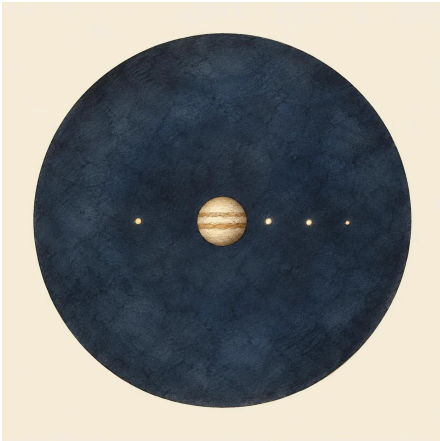
Im ersten Viertel zeigten Gipfel, die jenseits der Schattengrenze schon Licht bekamen, Galilei, dass der Mond Berge hat.

> **Sicherheit.** Nie ein Fernrohr oder irgendeine Linse auf die Sonne richten, auch nicht kurz oder bei Sonnenuntergang, und es nie so stehen lassen, dass Kinder es tun könnten: Gebündeltes Sonnenlicht kann das Auge sofort und dauerhaft schädigen und das Rohr entzünden. Für die Sonnenbeobachtung durch ein Fernrohr braucht man einen eigens dafür gebauten Filter, der die ganze vordere Öffnung bedeckt, fest sitzt, vor jedem Gebrauch auf Kratzer und Löcher geprüft und nach Herstelleranleitung verwendet wird. Finsternisbrillen und ins Okular geschraubte Filter schützen hinter einem Fernrohr nicht.

Geschichte und Entwicklung

Am 2. Oktober 1608 beantragte Hans Lipperhey, Brillenmacher in Middelburg, bei den Generalstaaten in Den Haag ein Patent auf ein Instrument, mit dem man ferne Dinge sehen könne, als wären sie nah. Jacob Metius aus Alkmaar reichte einige Wochen später einen ähnlichen Antrag ein, weitere beanspruchten die Idee, und das Patent wurde verweigert. Kein Fernrohr dieser ersten Hersteller ist erhalten; das von Lipperhey vergrößerte wohl etwa dreifach.

Die Nachricht vom „holländischen Perspektiv“ verbreitete sich rasch. In England benutzte Thomas Harriot schon im Sommer 1609 ein sechsfach vergrößerndes Instrument, und in Padua baute Galilei, der seine Linsen selbst schliff, im Sommer 1609 ein dreifach vergrößerndes Perspektiv und führte im August dem venezianischen Senat ein achtfaches vor. Im Herbst erreichte er etwa das Zwanzigfache; die Quellen sind uneins, ob er den Mond zuerst mit diesem oder mit einem schwächeren Instrument untersuchte. Sein zweites erhaltenes Fernrohr vergrößert 21fach. Im März 1610 beschrieb sein schmales Buch Sidereus Nuncius Berge auf dem Mond, unzählige Sterne in der Milchstraße und vier Monde, die Jupiter umkreisen. Den Namen telescopio schlug 1611 Fürst Federico Cesi vor, der Gründer der Accademia dei Lincei.



Jupiter und seine vier großen Monde liegen fast auf einer Linie; Galilei sah sie im Januar 1610 von Nacht zu Nacht die Plätze tauschen.

Danach bauten Astronomen immer längere Linsenfernrohre, um die Farbunschärfe zu verringern. Chester Moore Hall fertigte um 1733 achromatische Objektive aus zwei Glassorten, die sich aber erst durchsetzten, als John Dollond sie Ende der 1750er-Jahre herzustellen begann. Newtons Spiegelteleskop, 1668 entworfen und in einer zweiten Ausführung um die Jahreswende 1671/72 der Royal Society gezeigt, wurde zum Vorbild der Spiegelteleskope, die William Herschel selbst baute; mit einem davon entdeckte er 1781 den Planeten Uranus.

Kennzahlen

Erstes schriftliches Zeugnis
Patentantrag von Hans Lipperhey, Den Haag, 2. Oktober 1608

Lipperheys Instrument
Vermutlich etwa dreifache Vergrößerung

Galileis Fernrohr in Florenz
Objektiv 51 mm, Brennweite 1330 mm, 14fach

Sidereus Nuncius
Erschienen in Venedig im März 1610

Newtons Spiegelteleskop
Entworfen 1668; zweite Ausführung 1671/72 der Royal Society vorgeführt

Quellen

1. Galileo's telescope (inv. 2427) · Museo Galileo https://catalogue.museogalileo.it/object/GalileosTelescope.html
2. Instruments: Galileo's telescopes · Museo Galileo (IMSS) https://brunelleschi.imss.fi.it/pencil/eng/html/Tools/01%20Cannocchiale.htm
3. Scientist of the Day: Hans Lipperhey · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/hans-lipperhey/
4. Galileo's telescope: reflecting telescopes · Museo Galileo (IMSS) https://brunelleschi.imss.fi.it/esplora/cannocchiale/dswmedia/storia/estoria6_st.html
5. History of the achromatic and aplanatic microscope (Hall and Dollond) · Antique Microscopes (Brian Stevenson) https://www.microscope-antiques.com/hxachromatic.html
6. Telescope · The Galileo Project, Rice University https://galileo.library.rice.edu/sci/instruments/telescope.html
7. 7-foot Newtonian (reflector) telescope · Royal Museums Greenwich https://www.rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-11122
8. Galileo's telescope (inv. 2427): measurements of the lenses · Museo Galileo (IMSS) https://imss.fi.it/news/cielimedicei/01/estrumento2.html
9. Galileo's knowledge of optics and the functioning of the telescope, revised (Y. Zik and G. Hon) · arXiv https://arxiv.org/abs/1307.4963
10. Learning from Galileo's errors (E. Bernieri) · arXiv https://arxiv.org/abs/1206.4244
11. Telescopes of Galileo (V. Greco, G. Molesini and F. Quercioli), Applied Optics 32, 6219–6226 · Optica Publishing Group https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-32-31-6219
12. University Physics Volume 3, 2.8 Microscopes and Telescopes · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/2-8-microscopes-and-telescopes
13. University Physics Volume 3, 4.5 Circular Apertures and Resolution · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/4-5-circular-apertures-and-resolution
14. Astronomy 2e, 6.1 Telescopes · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/astronomy-2e/pages/6-1-telescopes

Fakten geprüft am 2026-10-12

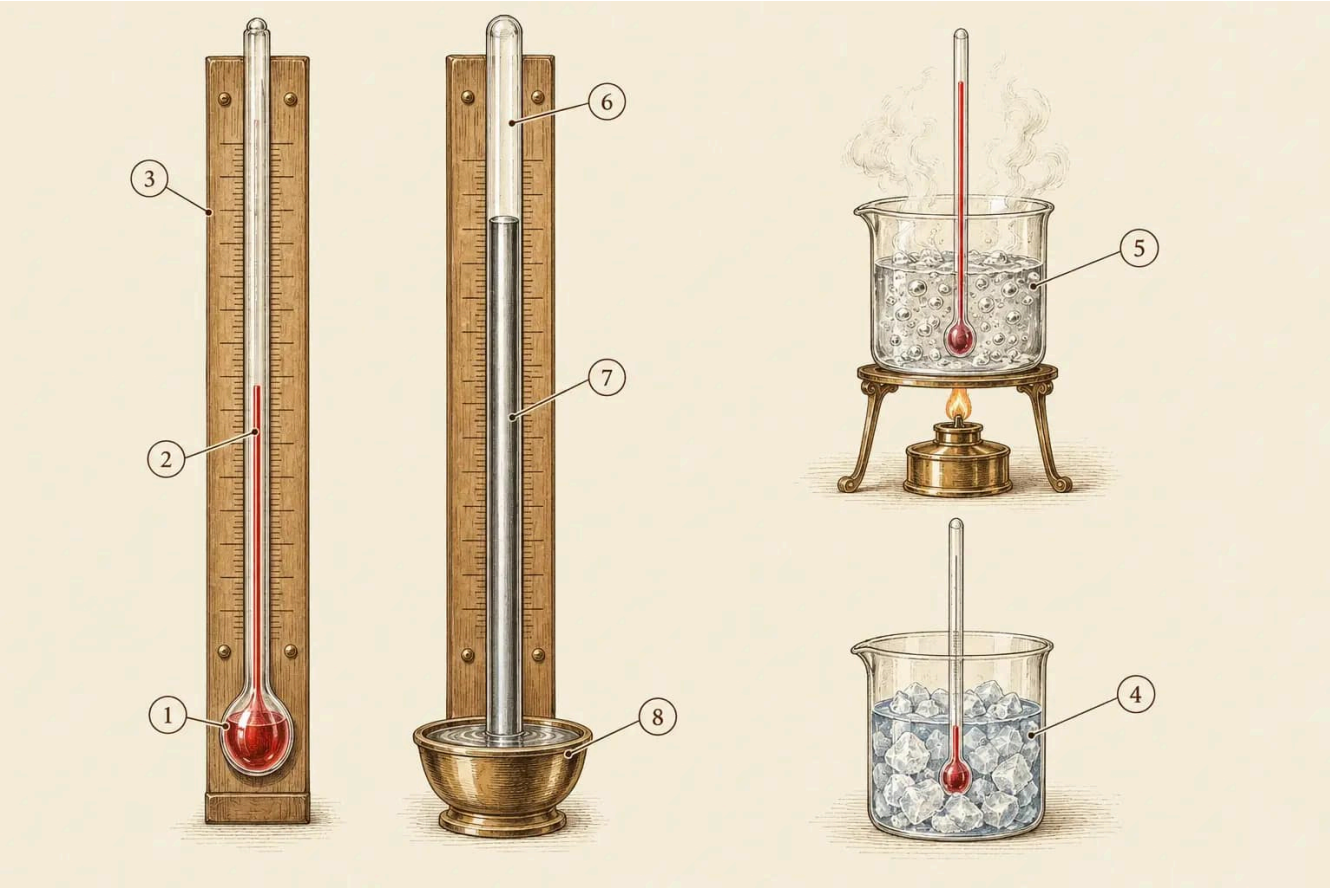
Thermometer und Barometer

Temperatur und Luftdruck, am Glas abgelesen

um 1654 · Renaissance · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Glas (S. 134), Maße und Gewichte (S. 129), Stellenwertsystem (S. 99)

Führt zu: Kältetechnik (S. 285)



1 Gefäß mit der Flüssigkeit 2 Feiner Glasstiel 3 Skala 4 Schmelzendes Eis, unterer Fixpunkt (0 °C)
5 Siedendes Wasser, oberer Fixpunkt (100 °C bei 1013,25 hPa) 6 Leerer Raum am geschlossenen Rohrende
7 Quecksilbersäule, etwa 760 mm 8 Offenes Gefäß (Zisterne)

Ein Thermometer zeigt die Temperatur als Länge eines Flüssigkeitsfadens in einem feinen Glasrohr, abgelesen an einer Skala, die schmelzendes Eis und siedendes Wasser festlegen. Sein Gegenstück, das Barometer, wiegt die Luft über die Höhe der Flüssigkeitssäule, die die Atmosphäre tragen kann: auf Meereshöhe rund 760 mm Quecksilber.

Was es ist

Ein Thermometer macht aus der Temperatur eine Länge, die man ablesen kann. Ein gläsernes Gefäß voller Flüssigkeit geht in ein Rohr mit sehr enger Bohrung über. Erwärmt sich die Flüssigkeit, dehnt sie sich aus, und ihr Faden steigt an einer Skala entlang.

Das Barometer kam aus denselben italienischen Werkstätten und wiegt die Luft über uns über die Höhe einer Flüssigkeitssäule. Mit gleich gebauten Thermometern konnten Beobachter in verschiedenen Städten ihre

Messungen vergleichen, wie es das erste Wetternetz ab 1654 tat.

Wie es funktioniert

Flüssigkeiten dehnen sich beim Erwärmen ein wenig aus: Ethanol um etwa 0,11 % seines Volumens je Grad, Quecksilber um etwa 0,018 %, Glas viel weniger. Die Bohrung macht das sichtbar, denn das ganze zusätzliche Volumen des Gefäßes muss in sie ausweichen. Ein Gefäß mit einem Fünftel Kubikzentimeter Alkohol gewinnt je Grad etwa 0,2 mm^3; in einer Bohrung von 0,2 mm Durchmesser ergibt das einen Schritt von etwa 7 mm.

Eine Skala braucht Punkte, die jeder nachstellen kann. Reines Eis schmilzt immer bei derselben Temperatur, und reines Wasser siedet immer bei derselben Temperatur, solange der Luftdruck gleich ist. Die Celsius-Skala nennt sie 0 und 100 und legt hundert gleiche Schritte dazwischen. Im Gebirge siedet Wasser bei niedrigerer Temperatur, ungefähr ein Grad weniger je 300 m Höhe. Kalibrieren heißt, ein Instrument mit diesen Punkten oder mit einer verlässlichen Referenz zu vergleichen und die Abweichung zu notieren; ohne das können zwei Thermometer um mehrere Grad auseinanderliegen. Auch in der Küche zählt das: Die britische Lebensmittelbehörde verlangt 70 °C, zwei Minuten lang im Kern gegarter Speisen gehalten.

Reines Wasser zieht sich zwischen 0 und 4 °C beim Erwärmen zusammen und gefriert bei 0 °C. Frühe versiegelte Thermometer enthielten Alkohol, ab dem 18. Jahrhundert die Präzisionsinstrumente meist Quecksilber, das in einem weiten Bereich flüssig bleibt und das Glas nicht benetzt.

Torricellis Barometer war ein etwa meterlanges, einseitig geschlossenes Glasrohr, mit Quecksilber gefüllt und umgekehrt in eine Schale mit Quecksilber gestellt. Die Säule sank, bis etwa 760 mm über der Schale stehen blieben, darüber ein fast leerer Raum. Ihr Gewicht hält dem Druck der Luft auf die offene Oberfläche die Waage. Quecksilber ist 13,6-mal dichter als Wasser, also bräuchte ein Wasserbarometer über 10 m Rohr, dieselbe Höhe, die eine Saugpumpe begrenzt.

Nahe dem Meeresspiegel fällt die Säule um etwa einen Millimeter je 11 m Aufstieg, ein Barometer misst also auch die Höhe. Ein fallendes Barometer kündigt oft Wind und Regen an, ein steigendes schönes Wetter. Dosenbarometer ersetzen die Flüssigkeit durch eine versiegelte Metalldose, die sich verformt.

Wie man es baut

Das Flüssigkeitsthermometer ist ein Lehrinstrument: Vergleichen Sie es mit einer Referenz, um seinen Fehler zu kennen, und benutzen Sie es nie für Lebensmittel oder zur Fiebermessung. Das Einmachglas-Barometer zeigt nur, ob der Druck steigt oder fällt.

Das Flüssigkeitsthermometer. Nehmen Sie eine kleine Glasflasche von etwa 100 ml, einen durchsichtigen Trinkhalm von mindestens 25 cm und Knetmasse. Mischen Sie Wasser und 70-prozentigen Isopropylalkohol zu gleichen Volumenteilen und tönen Sie das Gemisch mit Lebensmittelfarbe: Es dehnt sich stärker aus als Wasser und vermeidet dessen eigenartiges Verhalten nahe dem Gefrierpunkt. Füllen Sie die Flasche randvoll, schieben Sie den Halm tief in die Flüssigkeit und dichten Sie den Hals mit Knete ab, ohne Luftblase. Bei Raumtemperatur sollte die Flüssigkeit etwa 8 cm über der Knete stehen; geben Sie mit einer Pipette durch den Halm etwas zu oder nehmen Sie etwas weg. Je größer die Flasche und je dünner der Halm, desto größer der Schritt je Grad. Kleben Sie einen Papierstreifen hinter den Halm.

Der untere Fixpunkt: Die Flasche bleibt im schmelzenden Eis, bis der Faden stillsteht.

Die Punkte festlegen. Stellen Sie die Flasche in eine Schüssel mit zerstoßenem Eis und etwas Wasser, tief genug, um sie bis zum Hals zu bedecken. Rühren Sie um, warten Sie, bis der Faden stillsteht, was eine Viertelstunde dauern kann, und markieren Sie 0; die Flüssigkeit muss noch über der Knete sichtbar sein. Lassen Sie sie wieder Raumtemperatur annehmen und stellen Sie sie dann neben einem digitalen Küchenthermometer in eine Schüssel mit warmem Leitungswasser von etwa 40 °C, rühren Sie um, warten Sie, bis beide Anzeigen stillstehen, und markieren Sie den Wert der Referenz; der Faden darf das obere Ende nicht erreichen. Scheitert eine der beiden Proben, ändern Sie die Flüssigkeitsmenge oder die Flasche und legen Sie beide Punkte neu fest. Teilen Sie den Abstand in gleiche Schritte und vergleichen Sie bei Raumtemperatur mit der Referenz, um Ihren Fehler zu kennen. Drücken Sie nie auf die Flasche.

Ein Einmachglas-Barometer: Steigt der Druck, sinkt die Membran ein und die Halmspitze hebt sich.

Das Einmachglas-Barometer. Schneiden Sie den Hals eines Luftballons ab, spannen Sie ihn straff über ein weites Einmachglas und binden Sie ihn mit Schnur fest, damit keine Luft durchkommt. Kleben Sie ein Ende eines langen Halms auf die Mitte der Membran und lassen Sie das andere über den Rand ragen, vor einer Karte. Steigt der Außendruck, sinkt die Membran ein und die Spitze hebt sich. Die eingeschlossene Luft dehnt sich auch bei Wärme aus: Ein Grad bewegt den Zeiger etwa so stark wie 3,5 hPa Druck. Stellen Sie das Glas aus der Sonne in einen Raum mit möglichst gleichbleibender Temperatur und vergleichen Sie seine Bewegungen mit der Drucktendenz des Wetterdienstes.

Ablesen. Halten Sie das Auge auf Höhe des Fadenendes.

> **Sicherheit.** Bauen Sie nie ein Instrument mit Quecksilber: Sein Dampf ist giftig. Zerbricht ein altes Quecksilberthermometer, bringen Sie Menschen und Tiere hinaus und halten Sie sie fern, öffnen Sie die Fenster nach draußen und schließen Sie die Türen zum Rest der Wohnung. Weder Staubsauger noch Besen benutzen. Auf hartem Boden schieben Sie mit Handschuhen die Kügelchen mit fester Pappe zusammen, heben sie auf ein feuchtes Papiertuch, nehmen die feinsten mit Klebeband auf und verschließen alles in einem beschrifteten Beutel. Auf Teppich oder Polstern schneiden Sie die verschmutzte Stelle heraus oder legen das Stück beiseite und fragen das örtliche Gesundheits- oder Umweltamt. Lüften Sie nach der Reinigung mindestens 24 Stunden und geben Sie die Abfälle nach den örtlichen Vorgaben bei einer Sammelstelle für Sonderabfall ab. Isopropylalkohol ist entzündlich und giftig: von Flammen und Kindern fernhalten. Nehmen Sie heißes Leitungswasser, nie kochendes, und bringen Sie Glas nie direkt vom Eis ins heiße Wasser.

Geschichte und Entwicklung

Philon von Byzanz und Heron von Alexandria wussten, dass erwärmte Luft sich ausdehnt und Wasser durch ein Rohr schiebt. Benedetto Castelli erinnerte sich, wie Galilei um 1600 ein solches Thermoskop vorführte, und 1612 hatte der Arzt Santorio in Venedig es mit einer Skala versehen, um Fieber zu verfolgen. Da es offen war, reagierte es auch auf den Luftdruck.

Torricelli beschrieb das Quecksilberbarometer in einem Brief vom Juni 1644. 1648 trug Pascals Schwager Florin Périer eines auf den Puy de Dôme, wo die Säule etwa 8,5 cm tiefer stand als unten in Clermont. In Florenz schlossen Handwerker im Dienst von Großherzog Ferdinand II. Alkohol in versiegeltes Glas ein, und 1654 schickte der Großherzog gleich gebaute Thermometer an das erste Wetternetz.

Daniel Gabriel Fahrenheit fertigte ab den 1710er-Jahren in Amsterdam Quecksilberthermometer und veröffentlichte sein Verfahren 1724. Anders Celsius schlug seine Skala 1742 vor, mit 0 am Siedepunkt und 100 am

Gefrierpunkt; bald nach seinem Tod 1744 wurde sie umgedreht. 1848 schlug William Thomson, später Lord Kelvin, eine absolute Skala vor, deren Nullpunkt heute bei −273,15 °C liegt.

1868 legte Carl Wunderlich, gestützt auf rund 25.000 Kranke, den Normalwert bei etwa 37 °C und den Beginn des Fiebers bei etwa 38 °C fest. Robert FitzRoy begann 1861 mit britischen Sturmwarnungen und veröffentlichte im August desselben Jahres die erste öffentliche Vorhersage in der Times. Digitale Sensoren und Thermometer mit anderen Flüssigkeiten haben Quecksilberthermometer inzwischen weitgehend abgelöst; viele Länder beschränken sie heute.

Galileis Thermoskop: Kühlt die Luft im Kolben ab, steigt das Wasser im Hals.

Kennzahlen

Fixpunkte (Celsius)
0 °C für schmelzendes Eis, 100 °C für Wasser, das bei 1013,25 hPa siedet

Ausdehnung je Grad
Ethanol etwa 0,11 % seines Volumens, Quecksilber etwa 0,018 %

Körpertemperatur (Wunderlich, 1868)
Im Mittel etwa 37 °C; 38 °C „wahrscheinlich fieberhaft“; Daten von rund 25.000 Kranken

Luftdruck auf Meereshöhe
Rund 760 mm Quecksilber oder rund 10,3 m Wasser

Erstes Wetternetz
1654, eingerichtet von Ferdinand II. der Toskana mit versiegelten Alkoholthermometern

Quellen

1. Letter by Castelli on the invention of the thermoscope · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/indepth/LetterByCastelliOnInventionThermoscope.html
2. Medici meteorological network · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/multimedia/MediciMeteorologicalNetworkBis.html
3. Fifty-degree thermometer · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/object/FiftydegreeThermometer.html
4. Thermometers of the Accademia del Cimento · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/section/ThermometersAccademiaCimentoArtScienceGlassware.html
5. Torricellian experiment · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/indepth/TorricellianExperiment.html
6. This Month in Physics History: Torricelli demonstrates the existence of a vacuum · APS News, American Physical Society https://www.aps.org/apsnews/2012/10/torricelli-demonstrates-existence-vacuum
7. Blaise Pascal (Scientist of the Day) · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/blaise-pascal/
8. On September 19, 1648, Pascal conducted an experiment that proved the existence of atmospheric pressure · Scientific Russia https://en.scientificrussia.ru/articles/under-atmospheric-pressure
9. Fahrenheit, Daniel Gabriel (ADB and NDB entries) · Deutsche Biographie, Bavarian Academy of Sciences https://www.deutsche-biographie.de/sfz14129.html
10. Daniel Gabriel Fahrenheit · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/biography/DanielGabrielFahrenheit.html
11. The Legacy of Anders Celsius · JSTOR Daily https://daily.jstor.org/the-legacy-of-anders-celsius/
12. Kelvin: History · National Institute of Standards and Technology https://www.nist.gov/si-redefinition/kelvin/kelvin-history
13. Wunderlich, Das Verhalten der Eigenwärme in Krankheiten (1868) · HistoryofMedicine.com (Jeremy Norman) https://archive.historyofmedicine.com/id/3542
14. Thermometry and the role of fever in medicine · Healio https://www.healio.com/news/hematology-oncology/20120325/thermometry-and-the-role-of-fever-in-medicine
15. Robert FitzRoy and the early Met Office · Met Office https://www.metoffice.gov.uk/research/library-and-archive/archive-hidden-treasures/robert-fitzroy
16. Air pressure · NOAA JetStream https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/air-pressure
17. Learning lesson: the "dry" barometer · NOAA JetStream https://www.noaa.gov/jetstream/ll-pressure2
18. Cubical expansion coefficients of liquids · The Engineering ToolBox https://www.engineeringtoolbox.com/cubical-expansion-coefficients-d_1262.html
19. Calibrating your food thermometer · Texas A&M AgriLife Extension https://agrilifeextension.tamu.edu/calibrating-your-food-thermometer
20. High-altitude cooking (Guide E-215) · New Mexico State University Cooperative Extension https://pubs.nmsu.edu/_e/E215/
21. Cooking your food · Food Standards Agency https://www.gov.uk/government/publications/cooking-your-food/cooking-your-food
22. What to do if a mercury thermometer breaks · US Environmental Protection Agency https://www.epa.gov/mercury/what-do-if-mercury-thermometer-breaks

Fakten geprüft am 2026-10-14

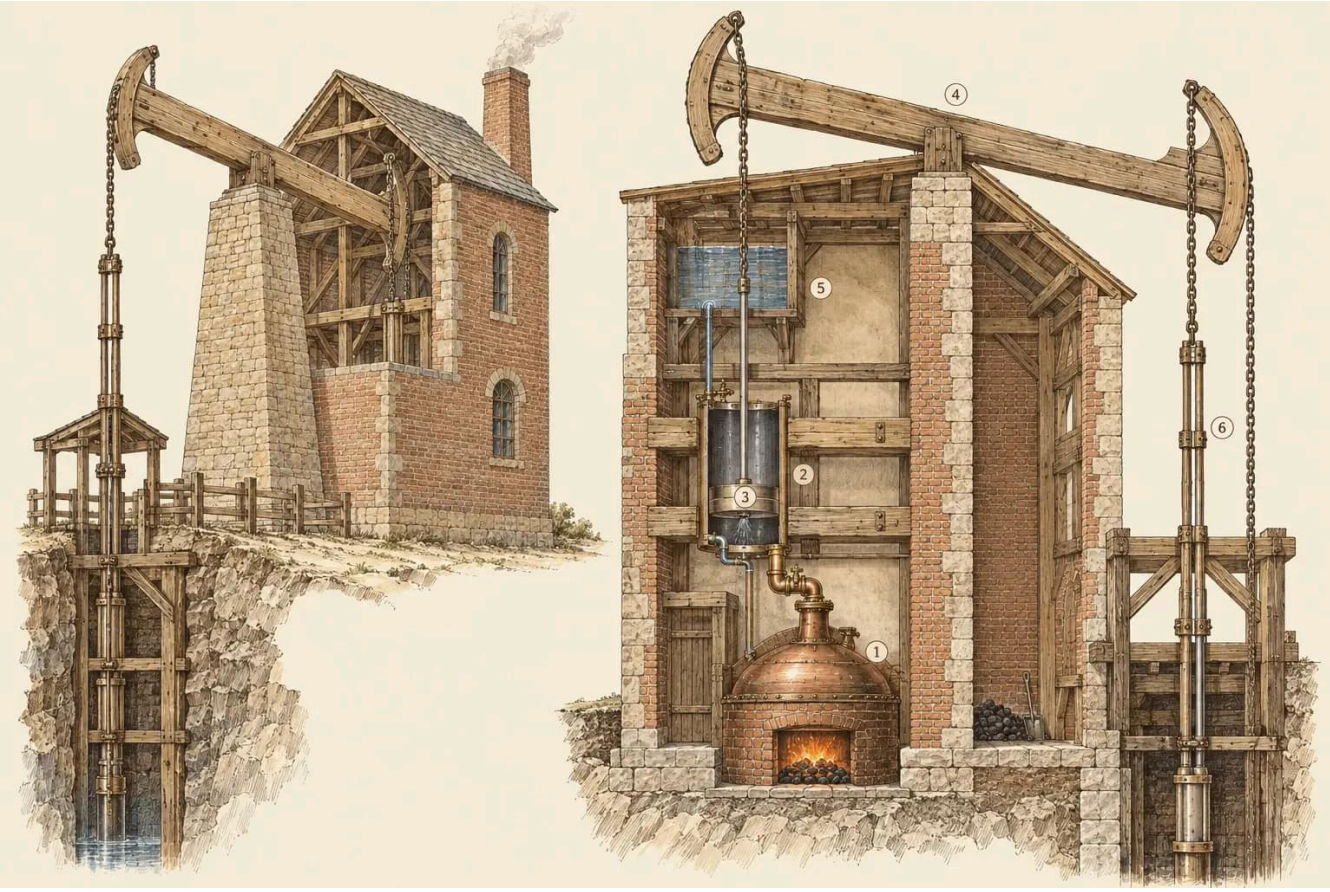
Dampfmaschine

Wärme, in Bewegung verwandelt

1712 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Eisenverhüttung (S. 138), Zahnräder (S. 156), Kolbenpumpe (S. 164)

Führt zu: Verbrennungsmotor (S. 318), Kältetechnik (S. 285), Dampflokomotive (S. 247), Dampfturbine (S. 330)



1 Kessel 2 Zylinder 3 Kolben 4 Balancier 5 Einspritzwasserbehälter 6 Pumpengestänge

Eine Dampfmaschine verwandelt die Wärme eines Feuers in Bewegung, indem Dampf einen Kolben antreibt. Thomas Newcomens Maschine von 1712 pumpte Wasser aus Bergwerken, und James Watts Verbesserungen ab 1765 machten die Dampfkraft so billig, dass sie die Fabriken der Industriellen Revolution antreiben konnte.

Was es ist

Eine Dampfmaschine nutzt den Dampf von kochendem Wasser, um einen Kolben zu bewegen, und macht so aus Brennstoff mechanische Arbeit. Die ersten pumpten Wasser aus Bergwerken, spätere trieben Räder, Spinnereien, Schiffe und Lokomotiven an.

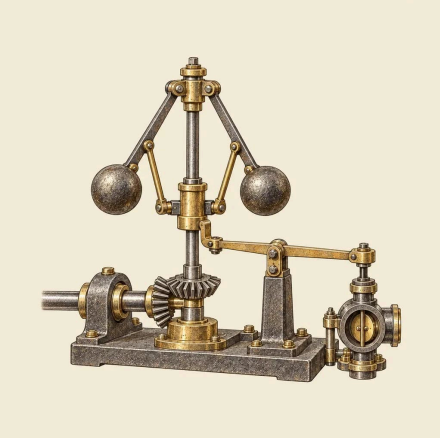
Die Maschine auf der Tafel entspricht dem Typ, den Thomas Newcomen 1712 baute. Man nennt sie atmosphärische Dampfmaschine, weil die Arbeit vom Druck der Außenluft geleistet wird; der Dampf dient nur dazu, ein Vakuum zu erzeugen. Der Kessel arbeitet kaum über dem Luftdruck und kann daher weit weniger leicht platzen als die Hochdruckkessel des 19. Jahrhunderts.

Wie es funktioniert

Im Mittelpunkt steht ein senkrechter, oben offener Zylinder mit einem Kolben darin. Der Kolben hängt an einer Kette am einen Ende eines großen Balanciers aus Holz, der auf der Mauer des Maschinenhauses schwingt. Am anderen Ende hängt das Pumpengestänge, das durch den Schacht bis zu den Pumpen am Grund der Grube reicht.

Das schwere Pumpengestänge zieht sein Ende des Balanciers nach unten und hebt dadurch den Kolben; Dampf aus dem darunterliegenden Kessel füllt den Zylinder. Ein Ventil sperrt den Dampf ab. Ein Strahl kalten Wassers aus dem Behälter wird in den Zylinder gespritzt, der Dampf kondensiert sofort zu ein wenig Wasser, und zurück bleibt ein Teilvakuum. Die Luft über dem Kolben drückt nun stärker als der dünne Dampf darunter. Bei einem Zylinder von einem halben Meter Durchmesser kann dieser Druckunterschied theoretisch etwa 20 Kilonewton erreichen, so viel wie das Gewicht von zwei Tonnen; die nutzbare Kraft lag deutlich darunter. Der Kolben sinkt, der Balancier kippt, und das Gestänge hebt sich und fördert Wasser aus der Grube.

Die Aeolipile des Heron von Alexandria drehte sich im 1. Jahrhundert n. Chr. durch Dampfstrahlen, leistete aber keine nützliche Arbeit.



An späteren Watt-Maschinen schwingen die Kugeln des Reglers nach außen, wenn die Maschine schneller läuft, und drosseln das Dampfventil.

Strömt wieder Dampf ein, treibt er die Luft durch ein kleines Schnüffelventil hinaus, während das Kondenswasser durch ein eigenes Rohr mit Rückschlagventil abfließt. Der Takt wiederholt sich etwa zwölfmal in der Minute. Eine am Balancier hängende Stange mit Knaggen, der Steuerbaum, öffnet und schließt die Ventile selbsttätig.

Bei jedem Hub kühlt der kalte Strahl den Zylinder ab, und die nächste Dampfladung muss ihn erst wieder erwärmen, bevor sie ihn füllen kann. Der größte Teil der Kohle geht für dieses Aufheizen drauf.

James Watt kondensierte den Dampf deshalb in einem getrennten, ständig kalten Gefäß, während der Zylinder heiß blieb. Später schloss er den Zylinder oben, ließ den Dampf auf beide Seiten des Kolbens wirken und fügte ein Getriebe für die Drehbewegung hinzu. Damit konnte die Maschine Werkstätten antreiben und nicht mehr nur Pumpen.

Wie man sie baut

Eine atmosphärische Maschine braucht einen Kupferschmied oder Kesselbauer, einen Gießer, der einen Zylinder gießen und ausbohren kann, einen Zimmermann für den Balancier und einen Maurer für das Haus.

Den Kessel bauen. Früher war das eine genietete Hülle aus Kupfer oder Schmiedeeisen mit gewölbter Oberseite, über einem Feuerrost eingemauert, mit einem gewichtsbelasteten Sicherheitsventil, Probierhähnen für den Wasserstand und einem Speiserohr. Eine betriebsfähige Nachbildung braucht einen Kessel, den ein qualifizierter Kesselbauer entworfen, geprüft und abgenommen hat; improvisieren Sie nie einen.

Den Zylinder gießen und bohren. Der Zylinder steht dicht über dem Kessel auf schweren Balken, die in den Mauern ruhen, und ist mit ihm nur durch ein kurzes Dampfrohr verbunden. Seine Bohrung muss über die ganze Länge rund und glatt sein, sonst leckt der Kolben; genaues Bohren gehörte zu den schwierigsten Aufgaben des 18. Jahrhunderts.

Den Kolben einpassen. Dichten Sie den Rand des Kolbens mit Seil oder Leder ab und halten Sie oben eine dünne Wasserschicht als zusätzliche Dichtung.

Den Balancier aufrichten. Fertigen Sie ihn aus Eiche, mit gebogenen Bogenstücken an beiden Enden, damit die Ketten senkrecht ziehen. Legen Sie seine Mittelachse auf eine dicke Mauer.

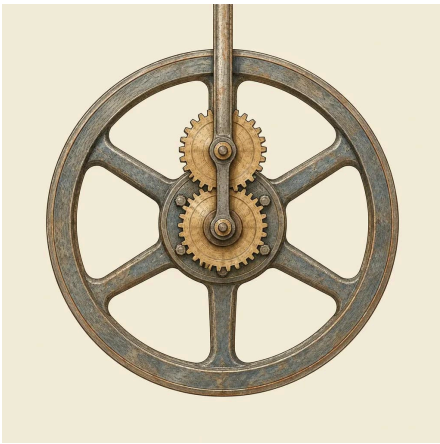
Die Ventile einbauen. Ein Ventil lässt Dampf ein, ein anderes spritzt kaltes Wasser aus einem hoch im Haus stehenden Behälter ein; ein Schnüffelventil lässt Luft hinaus, und ein Rohr mit Rückschlagventil leitet das Kondenswasser ab. Betätigen Sie sie zuerst von Hand, später über Knaggen an einer Stange, die am Balancier hängt.

> **Sicherheit.** Ein Kessel, dessen Sicherheitsventil verstopft, verklemmt oder überlastet ist, kann explodieren: Versperren oder trennen Sie den Abblaseweg nie, und legen Sie nie zusätzliches Gewicht auf das Ventil. Dampf und heißes Wasser verbrühen schwer. Halten Sie während des Betriebs Abstand zu Balancier, Ketten und Pumpengestänge, und zäunen Sie den Schacht ein.

Geschichte und Entwicklung

Heron von Alexandria beschrieb im 1. Jahrhundert n. Chr. eine Kugel, die von Dampfstrahlen gedreht wurde, doch sie blieb eine Kuriosität. 1690 zeigte Denis Papin, dass kondensierender Dampf unter einem Kolben ein Gewicht heben kann. Thomas Savery ließ sich 1698 eine Pumpe ohne Kolben patentieren. Sie saugte Wasser an, indem Dampf in einem Gefäß kondensierte, und drückte es dann mit Dampfdruck höher, schaffte aber nur bescheidene Förderhöhen.

Newcomen, ein Eisenwarenhändler aus Dartmouth, und sein Partner John Calley stellten 1712 die erste funktionierende Maschine in einer Kohlengrube bei Dudley Castle auf. Da Saverys Patent das Heben von Wasser durch Feuer abdeckte, wurden Newcomens Maschinen bis zu dessen Ablauf 1733 unter diesem Patent gebaut. Als Newcomen 1729 starb, liefen in Großbritannien und Europa bereits mehr als hundert davon.



Watts Sonne-und-Planet-Getriebe von 1781 machte aus dem Auf und Ab des Balanciers eine Drehung.

1763 sollte James Watt, Instrumentenbauer an der Universität Glasgow, ein Modell einer Newcomen-Maschine reparieren. Zwei Jahre später kam ihm die Idee des getrennten Kondensators, den er 1769 patentieren ließ. Mit Matthew Boulton begann er 1776, Maschinen zu verkaufen. Sie brauchten etwa ein Viertel des Brennstoffs einer gleich starken Newcomen-Maschine. Um 1800, als Watts Patent auslief, setzten Richard Trevithick und andere auf Hochdruckdampf und bauten kleinere, leichtere Maschinen, die bald auf Schienen und in Schiffe kamen.

Kennzahlen

Erste Maschine im Betrieb
1712, Kohlengrube Conygree bei Dudley, England

Arbeitstakt
Etwa 12 Hübe pro Minute

Watts getrennter Kondensator
Erdacht 1765, patentiert 1769, rund 75 % weniger Brennstoff

Dampfdruck im Newcomen-Kessel
Etwa 0,07 bis 0,14 bar über dem Luftdruck

Newcomen-Maschinen bis 1729
Mehr als 100

Quellen

1. Newcomen atmospheric engine · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Newcomen_atmospheric_engine
2. Watt steam engine · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Watt_steam_engine
3. Newcomen atmospheric engine (object 1920-124) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co50900/newcomen-atmospheric-engine-atmospheric-steam-engine
4. ASME Landmark: Newcomen Engine · Engineering and Technology History Wiki (ASME) https://ethw.org/ASME-Landmark:Newcomen_Engine
5. A new age · Science Museum https://blog.sciencemuseum.org.uk/a-new-age/

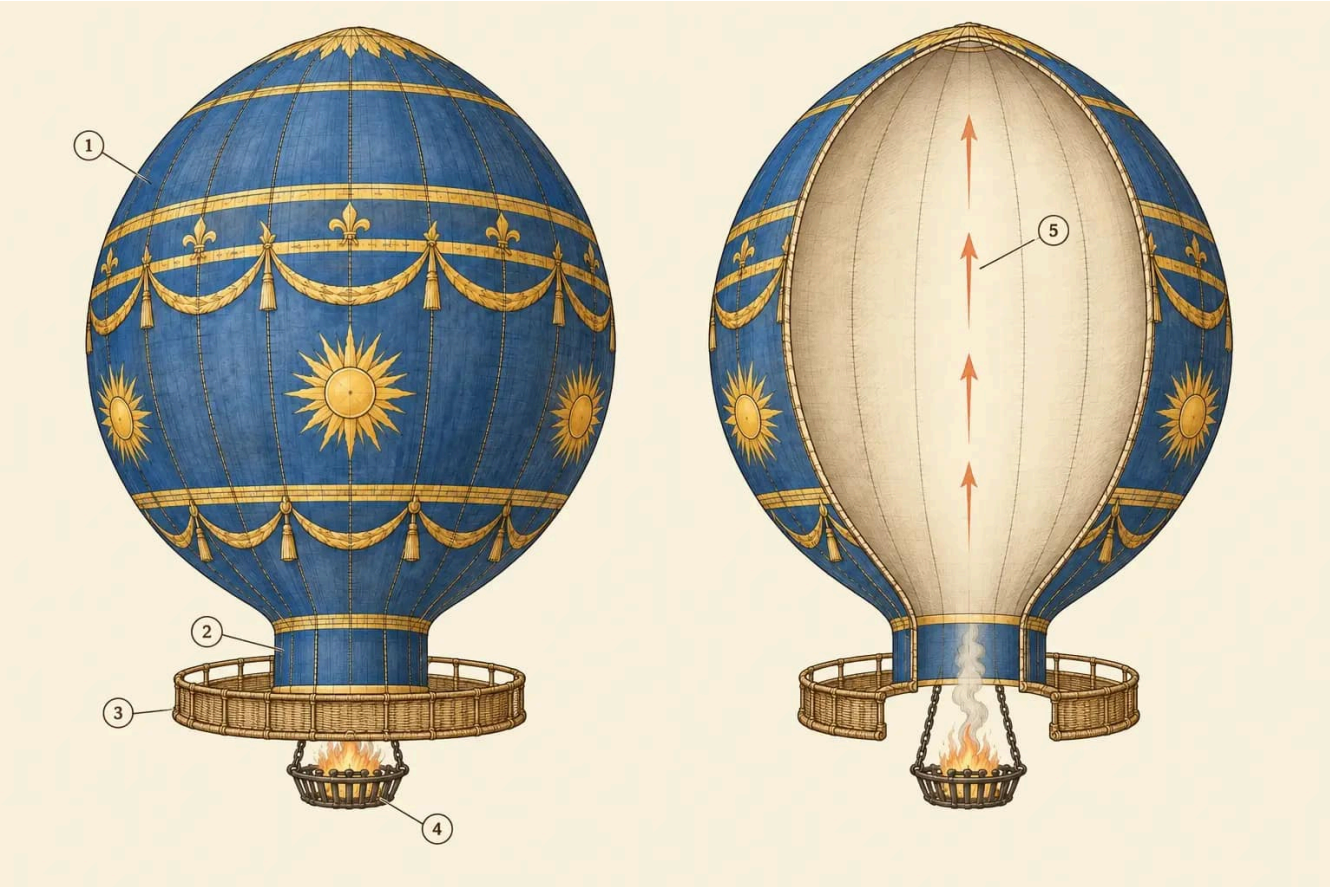
Fakten geprüft am 2026-10-11

Heißluftballon

Auf warmer Luft steigen

1783 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Papier (S. 172), Beherrschung des Feuers (S. 9), Weben (S. 44)



1 Hülle 2 Offener Hals 3 Galerie aus Weidengeflecht 4 Feuerkorb 5 Aufsteigende Warmluft

Ein Heißluftballon steigt, weil die erwärmte Luft in seiner Hülle leichter ist als die kühlere Luft ringsum. Die Brüder Montgolfier, die 1782 ein kleines Modell in einem Zimmer hatten fliegen lassen, führten 1783 in Frankreich erstmals einen öffentlich vor, und am 21. November jenes Jahres trug ihr Ballon zwei Männer über Paris, der erste freie Flug von Menschen.

Was es ist

Ein Heißluftballon ist ein großer, leichter Sack, die Hülle, unten offen und mit erwärmter Luft gefüllt. Warme Luft hat eine geringere Dichte als kalte, sodass der Sack und was darunter hängt weniger wiegen als die Außenluft, die sie verdrängen, und das Ganze steigt. Nichts treibt ihn an: Ein Ballon steigt, wenn man die Luft in ihm erhitzt, sinkt, wenn sie abkühlt, und treibt mit dem Wind.

Der Ballon auf der Tafel ist der, den Joseph und Étienne Montgolfier, Papiermacher aus Annonay, für den ersten freien Flug mit Menschen an Bord am 21. November 1783 bauten. Berichten zufolge war er etwas über 20 m hoch. Er bestand aus Stoff, als Leinen oder Taft beschrieben, mit Papier gefüttert, mit einem alaunhaltigen Firnis gegen

Feuer bestrichen und blau und gold bemalt. Eine ringförmige Galerie aus Weidengeflecht hing um den offenen Hals und trug die beiden Luftfahrer, ein eiserner Feuerkorb mit brennendem Stroh hing in der Mitte der Öffnung.

Wie es funktioniert

Beim Luftdruck auf Meereshöhe wiegt ein Kubikmeter Luft von 20 °C etwa 1,2 kg. Auf 100 °C erwärmt, wiegt dasselbe Volumen nur noch rund 0,95 kg, weil sich die Luft ausgedehnt hat und ein Teil davon aus dem offenen Hals entwichen ist. Jeder Kubikmeter heißer Luft in der Hülle liefert also etwa ein Viertelkilogramm Auftrieb, der zuerst die Hülle und die Ausrüstung tragen muss, bevor ein Passagier mitfliegen kann. Ein Ballon braucht deshalb ein großes Volumen, um etwas zu tragen: Die Hülle der Montgolfiers von 1783 fasste mehr als tausend Kubikmeter.

Die warme Luft steigt in die Kuppel und drückt gegen den Stoff. Die Wärme entweicht langsam durch das Gewebe und den Hals, darum muss die Luft immer wieder erwärmt werden. 1783 gabelten die Luftfahrer Stroh durch Öffnungen in der Galerie in den Feuerkorb; um zu steigen, legten sie nach, um zu sinken, ließen sie das Feuer herunterbrennen. Beim ersten Flug fing die Hülle mehrmals Feuer, und sie löschten die Brandstellen mit nassen Schwämmen.

Ein moderner Ballon arbeitet genauso, nur mit besseren Werkstoffen. Die Hülle ist aus Nylon oder Polyester, der Korb aus Weidengeflecht, und ein Propanbrenner bläst kurze, kräftige Flammenstöße in die Mündung der Hülle. Der Pilot steigt oder sinkt, um Winde mit anderen Richtungen zu finden; nur so kann er steuern.

Ein moderner Ballon: Propanflaschen in einem Weidenkorb und ein Brenner unter der offenen Mündung einer Nylonhülle.

Wie man ihn baut

Ein Modell aus Seidenpapier, mit warmer Luft aus einem Haartrockner gefüllt, zeigt das Prinzip ohne jede Flamme. Es muss groß und leicht sein, denn die Luft aus einem Haartrockner ist nur mäßig heiß.

Bahnen zuschneiden. Eine Kartonschablone für eine Bahn anfertigen: eine lange, spitze Blattform von 2 m Länge und 40 cm an der breitesten Stelle, unten gerade abgeschnitten, wo sie 8 cm breit ist. Acht Bahnen aus möglichst dünnem Seidenpapier zuschneiden und die Bögen bei Bedarf mit Klebestift aneinanderfügen.

Die Hülle kleben. Die Bahnen Kante an Kante mit etwa 1 cm Überlappung zusammenkleben, sodass die Spitzen oben zusammentreffen und die geraden unteren Enden eine runde Öffnung bilden. Die Spitze mit einem kleinen runden Flicken schließen. Die Öffnung auf einen Ring aus dünnem Draht oder leichtem Karton von 20 cm Durchmesser kleben, damit sie offen bleibt.

Füllen. Drinnen, in einem kühlen, zugfreien Raum, die Hülle von einem Helfer oben halten lassen, die Öffnung nach unten. Zwei bis drei Minuten lang Luft aus einem Haartrockner auf höchster Stufe von etwa 20 cm unterhalb in die Öffnung blasen, den Trockner dabei bewegen und seinen Lufteinlass frei halten. Den Trockner ausschalten und wegnehmen, bevor man loslässt, damit allein die warme Luft im Inneren trägt. Zieht der Sack nach oben, steigt er zur Decke und sinkt wieder, wenn die Luft abkühlt; tut er es nicht, ist die Luft für sein Gewicht nicht heiß genug, und dünneres Papier oder eine größere Hülle helfen.

Ein Modell aus acht Papierbahnen: Warme Luft aus einem Haartrockner kann es heben, wenn das Papier leicht genug ist.

> **Sicherheit.** Einen Papierballon nie mit einer Kerze, einem Brenner oder irgendeiner Flamme erwärmen und nie Himmelslaternen steigen lassen: Sie kommen noch brennend herunter und lösen Brände aus. Den Haartrockner mindestens 20 cm vom Papier entfernt halten, seinen Lufteinlass nie verdecken und sofort aufhören, wenn das Papier sich bräunt oder brenzlig riecht. Echte Heißluftballone fliegen nur Piloten mit Lizenz und zugelassenem Gerät.

Geschichte und Entwicklung

Joseph Montgolfier ließ im November 1782 einen kleinen Seidenballon in einem Zimmer aufsteigen und baute danach mit seinem Bruder Étienne größere. Am 4. Juni 1783 schickten sie auf dem Marktplatz von Annonay einen unbemannten Ballon aus Stoff und Papier von etwa 11 m Durchmesser hoch, der weit über die Stadt stieg und nach rund zehn Minuten mehr als anderthalb Kilometer entfernt niederging.

Am 19. September 1783 trug in Versailles, vor Ludwig XVI. und Marie-Antoinette, ein Ballon ein Schaf, eine Ente und einen Hahn in einem Korb. Zwei Monate später, am 21. November, stiegen Jean-François Pilâtre de Rozier, ein Lehrer der Naturwissenschaften, und der Marquis d'Arlandes, ein Offizier, im Park des Château de la Muette am Bois de Boulogne im Westen von Paris auf. Sie flogen etwa 25 Minuten, höchstens rund 900 m hoch, und landeten auf freiem Feld nahe der heutigen Place d'Italie, etwa 9 km entfernt. Zehn Tage später starteten Jacques Charles und Nicolas-Louis Robert in den Tuilerien mit einem Wasserstoffballon. Gasballone blieben viel länger in der Luft, und Heißluft wurde danach kaum noch verwendet.

Die ersten Passagiere, in Versailles im September 1783: ein Schaf, eine Ente und ein Hahn.

Der Heißluftballon kehrte Ende der 1950er-Jahre zurück, als der Amerikaner Ed Yost eine Hülle aus Kunstfaserstoff mit einem Brenner für Flaschenpropan verband. Sein Flug ab Bruning in Nebraska am 22. Oktober 1960 gilt als der erste eines modernen Heißluftballons, und ab 1961 verkaufte seine Firma Raven Industries Heißluftballone für den Sport.

Kennzahlen

Erster öffentlicher Aufstieg
Annonay, 4. Juni 1783, unbemannt

Erste Passagiere
Ein Schaf, eine Ente und ein Hahn, Versailles, 19. September 1783

Erster freier Flug von Menschen
21. November 1783, Paris: etwa 25 Minuten, rund 9 km

Auftrieb heißer Luft
Etwa 0,25 kg je Kubikmeter bei Luft von 100 °C gegenüber 20 °C, auf Meereshöhe

Moderner Ballon
Ed Yost, Bruning (Nebraska), 22. Oktober 1960: Propanbrenner

Quellen

1. Model of Montgolfier balloon used in first demonstration to carry human passengers in free flight · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co29133/model-of-montgolfier-balloon-used-in-first-demonstration-to-carry-human-passengers-in-free-flight
2. Montgolfier balloon · The Museum of Flight, Seattle https://www.museumofflight.org/aircraft/montgolfier-baloon
3. Smithsonian recalls 1st manned (balloon) flight · The Christian Science Monitor https://www.csmonitor.com/1983/1205/120524.html
4. Scientist of the Day: Jacques-Alexandre Charles · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/jacques-alexandre-charles
5. How the CIA's secret balloon program led Ed Yost to invent the modern hot air balloon · Seattle Ballooning https://seattleballooning.com/how-the-cia-secret-balloon-program-led-ed-yost-to-invent-the-modern-hot-air-balloon/
6. Ed Yost · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Ed_Yost
7. 21 November 1783 · This Day in Aviation https://www.thisdayinaviation.com/?p=9465
8. Montgolfier brothers (Hall of Fame) · San Diego Air & Space Museum https://sandiegoairandspace.org/hall-of-fame/honoree/montgolfier-brothers
9. Scientist of the Day: The Montgolfier Brothers · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/the-montgolfier-brothers/
10. Earth Atmosphere Model (metric units) · NASA Glenn Research Center https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/atmosmet.html
11. Drag of a Sphere · NASA Glenn Research Center https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-of-a-sphere

Fakten geprüft am 2026-10-12

Impfung

Den Körper im Voraus schulen

1796 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Glas (S. 134)

Führt zu: Penicillin (S. 361)

1 Milchkuh, Quelle der Kuhpocken 2 Melkerin 3 Lanzette in ihrem Etui 4 Glasfläschchen 5 Gänsekiel und Tintenfass 6 Jenners Inquiry (1798)

Eine Impfung trainiert das Immunsystem mit einer abgeschwächten, abgetöteten oder unvollständigen Form eines Erregers, damit der Körper die echte Krankheit später abwehren kann. Edward Jenner zeigte 1796, dass Kuhpocken vor den Pocken schützen, und zwei Jahrhunderte später machten Impfungen die Pocken zur ersten ausgerotteten Krankheit des Menschen.

Was es ist

Eine Impfung bereitet den Körper auf eine Infektionskrankheit vor, meist bevor er ihr begegnet. Der Mensch erhält eine abgeschwächte, abgetötete oder unvollständige Form des Erregers oder den Bauplan für einen seiner Bestandteile. Das Immunsystem reagiert darauf wie auf eine echte Infektion, nur mit weit geringerem Risiko, als es die Krankheit selbst mit sich bringt, und behält die Begegnung im Gedächtnis. Kommt der echte Erreger später, setzt die Abwehr schnell ein und stoppt ihn meist, bevor er ernsten Schaden anrichtet.

Das Fachwort Vakzination stammt vom lateinischen *vacca*, Kuh. Der erste Impfstoff nutzte die Kuhpocken, eine leichte Krankheit der Rinder, die sich Melkerinnen an den Händen holten, zum Schutz vor den Pocken, einer der tödlichsten Krankheiten der Geschichte. Die Tafel ist eine Komposition: die ländliche Umgebung des Versuchs von 1796 und daneben Gegenstände der Zeit, eine Lanzette in ihrem Etui, ein Glasfläschchen, ein Federkiel und das Buch, das Jenner 1798 veröffentlichte.

Wie es funktioniert

Das Immunsystem lernt Erreger an ihren molekularen Formen zu erkennen, den Antigenen. Bei einer ersten Begegnung braucht es Tage, um die passenden Zellen zu finden und zu vermehren. Manche weiße Blutkörperchen, die B-Zellen, bilden Antikörper, die sich an den Erreger heften und ihn zur Zerstörung markieren. Andere, die T-Zellen, töten infizierte Zellen und steuern die Abwehr. Diese Verzögerung erklärt, warum eine erste Infektion schwer verlaufen kann.

Nach überstandener Infektion bleibt ein Bestand an Gedächtniszellen zurück, manchmal lebenslang. Eine zweite Begegnung mit demselben Antigen löst eine schnellere und stärkere Reaktion aus. Ein Impfstoff ermöglicht diese erste Begegnung mit weit geringerem Risiko als die Krankheit selbst.

Kuhpocken schützten vor den Pocken, weil die beiden Viren eng verwandt sind: Ihre Antigene ähneln sich so sehr, dass die Immunität gegen das eine auch das andere abdeckt. Spätere Impfstoffe wurden auf andere Weise hergestellt. Manche enthalten einen lebenden, so abgeschwächten Erreger, dass er nur selten krank macht, ein Verfahren, das Louis Pasteur begründete; sie werden nicht jedem verabreicht, weil ein Mensch mit sehr schwachem Immunsystem trotzdem daran erkranken kann. Andere nutzen einen abgetöteten Erreger, ein gereinigtes Bruchstück oder ein unschädlich gemachtes Gift. Die neuesten geben den Zellen den genetischen Code, mit dem sie kurze Zeit ein harmloses Protein des Erregers herstellen.

Bei Krankheiten, die von Mensch zu Mensch übertragen werden, kann sich ein Erreger kaum noch ausbreiten, sobald genug Menschen einer Gemeinschaft immun sind und ihn nicht mehr weitergeben. Diese Herdenimmunität schützt auch Menschen, die einen bestimmten Impfstoff nicht erhalten können oder schlecht darauf ansprechen. Der nötige Anteil hängt davon ab, wie ansteckend die Krankheit ist und wie gut und wie lange der Impfstoff die Übertragung verhindert. Wundstarrkrampf, den man sich über Erde und nicht von anderen Menschen holt, bietet keinen solchen gemeinsamen Schutz.

Impfstoffe werden unter strenger arzneimittelrechtlicher Aufsicht entwickelt und hergestellt und meist von medizinischem Fachpersonal verabreicht. Wie jedes Arzneimittel können sie Nebenwirkungen haben, die nach der Zulassung überwacht werden.

Wie Impfstoffe hergestellt werden

Den größten Teil des 19. Jahrhunderts über gab es nur einen Impfstoff, den gegen die Pocken, und die Hauptschwierigkeit bestand darin, das Virus von einem Geimpften zum nächsten am Leben zu halten.

Von Arm zu Arm. Noch konnte niemand das Kuhpockenvirus im Labor vermehren, also wurde es in Menschen weitergeführt. Etwa eine Woche nach der Impfung bildete sich an der Impfstelle eine Blase. Der Impfarzt öffnete sie mit einer Lanzette und impfte mit ihrer klaren Flüssigkeit, der sogenannten Lymphe, den nächsten Menschen. Um Impfstoff über größere Entfernungen zu verschicken, trocknete man die Lymphe auf kleinen Elfenbeinspitzen, Federkielen oder Fäden oder schloss sie zwischen Glasplättchen ein und befeuchtete sie vor dem Gebrauch wieder. Die spanische Balmis-Expedition, die 1803 in See stach, brachte den Impfstoff in 22 Waisenjungen über den

Atlantik, von denen während der Überfahrt jeweils zwei geimpft wurden. Mit der Lymphe konnten von Mensch zu Mensch auch andere Krankheiten übertragen werden, darunter die Syphilis.

Elfenbeinspitzen und versiegelte Glasplättchen brachten getrocknete Lymphe von einem Impfarzt zum nächsten.

Kälberlymphe. In Neapel hielten Impfärzte das Virus schon seit dem frühen 19. Jahrhundert in Kälbern am Leben. Nachdem das Verfahren 1864 auf einem Ärztekongress in Lyon vorgestellt worden war, verbreitete es sich in Frankreich und dann in ganz Europa. Man impfte die Kälber mit flachen Ritzen auf einer rasierten Hautstelle und sammelte einige Tage später den Inhalt der Pusteln. 1891 zeigte der englische Arzt Sydney Copeman, dass Glycerin, mit diesem Brei vermischt, im Lauf einiger Wochen die meisten Bakterien darin abtötete, das Virus aber verschonte. Glycerinierte Kälberlymphe, in dünne Glasröhrchen eingeschmolzen, wurde um 1900 in Großbritannien zum Standardimpfstoff. Als Virologen im 20. Jahrhundert das Virus in den Impfstoffbeständen untersuchten, stellten sie fest, dass es sich um Vaccinia handelte, ein Pockenvirus, das mit den Kuhpocken verwandt, aber nicht mit ihnen identisch ist.

Die Teams des Ausrottungsprogramms spürten jeden Fall auf und impften die Menschen in seinem Umfeld.

Gefriergetrockneter Impfstoff und gegabelte Nadel. Flüssige Lymphe verlor in tropischer Hitze binnen ein, zwei Tagen ihre Wirksamkeit. In den Laboren des Lister Institute in Elstree nördlich von London entwickelte Leslie Collier einen gefriergetrockneten, durch zugesetztes Pepton geschützten Impfstoff, der sich ohne Kühlung monatelang hielt; er arbeitete dort zwischen 1948 und 1955 daran. In der 1967 begonnenen Ausrottungskampagne verwendete die WHO ausschließlich gefriergetrockneten Impfstoff und ließ die Chargen von Referenzlaboren in Kanada und den Niederlanden prüfen. Zu Beginn der Kampagne erfüllte weniger als ein Zehntel der verwendeten Impfstoffe die Anforderungen. Die gegabelte Impfnadel (Bifurkationsnadel), in den 1960er-Jahren bei Wyeth Laboratories in den Vereinigten Staaten entwickelt, ist ein kurzer Stahlstab, der in zwei Zinken endet; zwischen ihnen hält sich ein einzelner Tropfen Impfstoff. Der Impfende drückte sie etwa fünfzehnmal auf kleiner Fläche in die Haut des Oberarms. Sie kam mit einem Viertel des bis dahin nötigen Impfstoffs aus, ließ sich sterilisieren und wiederverwenden, und ihre Handhabung ließ sich in wenigen Minuten beibringen.

Moderne Impfstoffe. Abgeschwächte Lebendimpfstoffe enthalten einen Erreger, der so weit abgeschwächt wurde, dass er nur selten krank macht: Das Masernvirus etwa wurde abgeschwächt, indem man es über viele Generationen in Zellkulturen vermehrte, und der BCG-Impfstoff gegen Tuberkulose ist ein abgeschwächtes Bakterium. Totimpfstoffe gehen von einem Erreger aus, der in Kultur gezüchtet wird, Viren etwa in Eiern oder Zellkulturen, und dann mit einer Chemikalie wie Formaldehyd abgetötet wird; so entstand der Polioimpfstoff von Jonas Salk aus dem Jahr 1955. Toxoide gegen Wundstarrkrampf und Diphtherie sind bakterielle Gifte, die auf ähnliche Weise unschädlich gemacht werden. Untereinheiten-Impfstoffe enthalten nur ausgewählte, gereinigte Teile des Erregers: Der gentechnisch hergestellte Hepatitis-B-Impfstoff, 1986 in den Vereinigten Staaten zugelassen, ist ein Virusprotein, das Hefezellen mit dem passenden Gen bilden. mRNA-Impfstoffe enthalten überhaupt keinen Bestandteil des Erregers. Die Boten-RNA wird von Enzymen nach einer DNA-Vorlage abgeschrieben, gereinigt und in winzige Fettpartikel verpackt, die sie in die Zellen bringen.

Qualitätskontrolle. Am Anfang der Produktion steht eine tiefgefroren gelagerte Saatbank aus Viren, Bakterien oder Zellen, damit sich der Stamm von Charge zu Charge nicht verändert. Die Hersteller prüfen jede Charge auf Identität, Sterilität, Reinheit und Wirksamkeit und bewahren Rückstellmuster auf. In den meisten Ländern begutachtet eine nationale Behörde mit ihrem Kontrolllabor diese Ergebnisse und wiederholt manchmal die Prüfungen, bevor eine Charge freigegeben werden darf.

> **Sicherheit.** Dieser Abschnitt beschreibt, wie Labore und Fabriken Impfstoffe hergestellt haben. Versuchen Sie nie, selbst einen Impfstoff herzustellen: Zu Hause hergestelltes Material kann gefährliche Erreger enthalten, schwere Infektionen auslösen und keinen verlässlichen Schutz bieten. Verwenden Sie nur zugelassene Impfstoffe aus freigegebenen Chargen, verabreicht von medizinischem Fachpersonal oder, bei den wenigen dafür zugelassenen Produkten, genau nach Verordnung.

Geschichte und Entwicklung

Lange vor den Impfstoffen gab es die Variolation, die absichtliche Ansteckung eines gesunden Menschen mit Material aus einer Pockenpustel. Meist folgte eine mildere Erkrankung und danach lebenslange Immunität, doch manche starben daran. Das Verfahren war in China, Indien und im Osmanischen Reich seit Langem bekannt. Lady Mary Wortley Montagu lernte es in Konstantinopel kennen und ließ 1721 in London ihre Tochter variolieren, was zu seiner Verbreitung in Großbritannien beitrug.

Bauern im Westen Englands war lange aufgefallen, dass Melkerinnen, die Kuhpocken gehabt hatten, von den Pocken verschont zu bleiben schienen. Der Chirurg John Fewster sprach 1768 darüber, und 1774 übertrug der Bauer Benjamin Jesty aus Dorset während einer Epidemie absichtlich Kuhpocken auf seine Frau und zwei ihrer Kinder.

Edward Jenner, Arzt in Berkeley in der Grafschaft Gloucestershire, machte aus der volkstümlichen Beobachtung ein Experiment. Am 14. Mai 1796 entnahm er Material aus einer Kuhpockenpustel an der Hand der Melkerin Sarah Nelmes und brachte es in den Arm von James Phipps ein. Einige Wochen später setzte er den Jungen Pockenmaterial aus, und Phipps erkrankte nicht. Die Royal Society veröffentlichte seinen ersten Bericht nicht; deshalb ließ Jenner den Fall 1798 zusammen mit weiteren auf eigene Kosten in einem schmalen Buch drucken, der *Inquiry*. Innerhalb weniger Jahre verbreitete sich die Impfung in ganz Europa und auf dem amerikanischen Kontinent.

Ende der 1870er-Jahre stellte Louis Pasteur fest, dass eine gealterte Kultur von Hühnercholera-Bakterien nicht mehr krank machte, die Vögel aber weiterhin schützte. 1881 entwickelte er einen Impfstoff gegen Milzbrand bei Schafen und danach einen gegen Tollwut. Am 6. Juli 1885 begann der neunjährige Joseph Meister, den ein tollwütiger Hund gebissen hatte, die Behandlung und überlebte. Er gilt meist als erster gegen Tollwut geimpfter Mensch, doch Historiker haben frühere Versuche an Patienten im Mai und Juni 1885 gefunden. Das Tollwutvirus braucht meist Wochen, bis es das Gehirn erreicht; eine Impfung bald nach dem Biss, vor jedem Symptom, konnte die Krankheit deshalb noch verhindern. Jeder Verdacht auf eine Ansteckung erfordert sofortige ärztliche Hilfe. Das 20. Jahrhundert brachte Impfstoffe gegen Diphtherie, Wundstarrkrampf, Keuchhusten, Tuberkulose, Kinderlähmung, Masern und viele andere Krankheiten.

Pasteur stellte Impfstoffe her, indem er den Erreger der Krankheit selbst abschwächte.

1967 startete die Weltgesundheitsorganisation eine verstärkte Kampagne zur Ausrottung der Pocken. Der letzte natürliche Fall trat 1977 in Somalia auf, und am 8. Mai 1980 erklärte die Weltgesundheitsversammlung die Krankheit für ausgerottet. 2020 wurden Impfstoffe auf Basis von Boten-RNA, an denen über Jahrzehnte geforscht worden war, weniger als ein Jahr nach der Identifizierung des Virus gegen COVID-19 eingesetzt.

Kennzahlen

Jenners erste Impfung
14. Mai 1796, Berkeley (Gloucestershire)

Beginn von Joseph Meisters Tollwutbehandlung
6. Juli 1885, Paris

Gegabelte Impfnadel
1960er-Jahre, Wyeth Laboratories; ein Viertel der zuvor nötigen Impfstoffmenge

Sterblichkeit der Pocken
Etwa 30 % der Fälle (Variola major)

Pocken für ausgerottet erklärt
8. Mai 1980, Weltgesundheitsorganisation

Quellen

1. Smallpox · World Health Organization https://www.who.int/health-topics/smallpox
2. Jenner, Fewster and Jesty · British Society for the History of Medicine https://bshm.org.uk/jenner-fewster-and-jesty/
3. The final years 1877–1887 · Institut Pasteur https://www.pasteur.fr/en/about-us/final-years-1877-1887
4. Edward Jenner · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Jenner
5. Edward Jenner's ivory vaccination points, England, 1821 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co148487/edward-jenners-ivory-vaccination-points-england-1821-vaccination-point
6. Ivory vaccination points in a wooden box, Europe, 1801-1900 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co148479/ivory-vaccination-points-europe-1801-1900-vaccination-point
7. Vaccine points used by Edward Jenner · Wellcome Collection https://wellcomecollection.org/works/j36r9neu
8. The XIX century smallpox prevention in Naples and the risk of transmission of human blood-related pathogens · Journal of Translational Medicine https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4328853/
9. Sydney Arthur Monckton Copeman · Royal College of Physicians https://history.rcp.ac.uk/inspiring-physicians/sydney-arthur-monckton-copeman
10. Collier, Professor Leslie Harold (papers) · Wellcome Collection https://wellcomecollection.org/works/egjmdv8t
11. Smallpox vaccines · World Health Organization https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/smallpox-vaccines
12. Donald Ainslie Henderson (1928–2016): smallpox eradication, leadership and legacy · The Journal of Infectious Diseases https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5388283/
13. Different types of vaccines · History of Vaccines (College of Physicians of Philadelphia) https://historyofvaccines.org/vaccines-101/what-do-vaccines-do/different-types-vaccines/
14. Lot release of vaccines by NRAs/NCLs · World Health Organization https://www.who.int/teams/health-product-policy-and-standards/standards-and-specifications/norms-and-standards/vaccine-standardization/lot-release-of-vaccines
15. Smallpox and its eradication (Fenner, Henderson, Arita, Ježek, Ladnyi), chapter 7 · World Health Organization https://iris.who.int/handle/10665/39485
16. Smallpox vaccination in 2003: key information for clinicians · Clinical Infectious Diseases https://doi.org/10.1086/374792
17. Expected vaccine reactions (smallpox vaccine) · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/smallpox/hcp/vaccines/expected-vaccine-reactions.html
18. Vaccination, Encyclopaedia Britannica, 9th edition, volume 24 · Wikisource https://en.wikisource.org/wiki/Page:Encyclop%C3%A6dia_Britannica,_Ninth_Edition,_v._24.djvu/40

Fakten geprüft am 2026-10-12

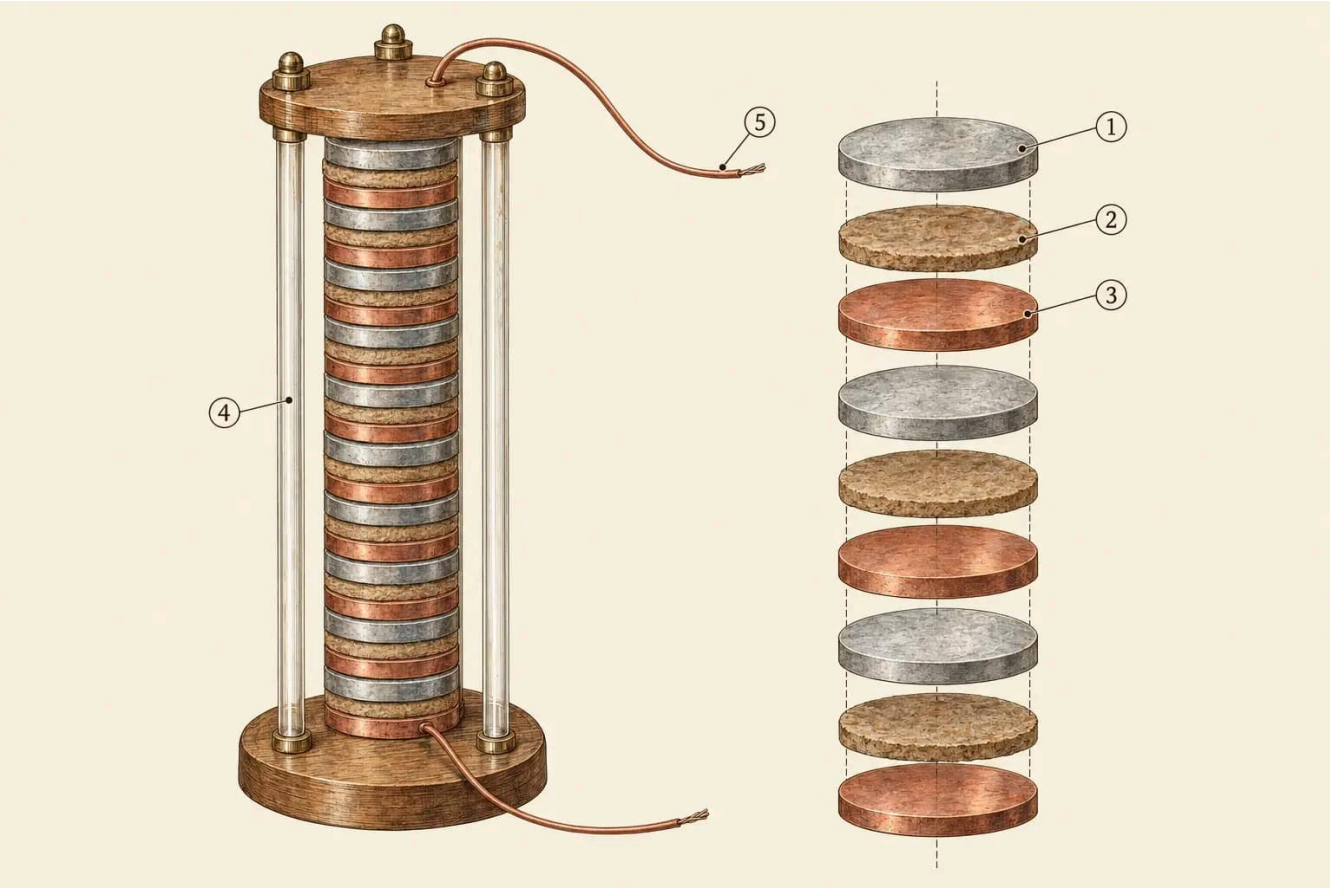
Batterie

Chemie, die Strom treibt

1800 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Bronze (S. 125)

Führt zu: Elektromotor (S. 281), Elektrischer Generator (S. 277), Bleiakkumulator (S. 307), Solarzelle (S. 375), Elektrischer Telegraf (S. 289)



1 Zinkscheibe 2 Pappe, mit Salzlake getränkt 3 Kupferscheibe 4 Glasstab als Halterung 5 Anschlussdraht

Eine Batterie gewinnt aus chemischen Reaktionen an zwei Elektroden, getrennt durch einen Elektrolyten, der Ionen leitet, einen gleichmäßigen elektrischen Strom. Alessandro Voltas Säule aus Zink, Kupfer und Salzlake war im Jahr 1800 die erste, und jede spätere Zelle, vom Telegrafenelement bis zum Lithium-Akku im Telefon, beruht auf demselben Prinzip.

Was es ist

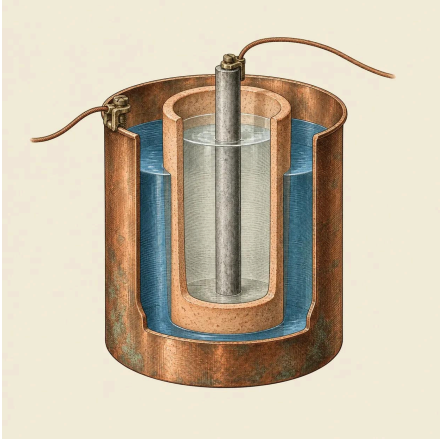
Eine Batterie speichert Energie in chemischer Form und gibt sie als elektrischen Strom wieder ab, sobald ein Stromkreis mit einer Lampe oder einem anderen Verbraucher ihre beiden Pole verbindet. Die Grundeinheit heißt Zelle. Zur Zeit Alessandro Voltas bezeichnete „Batterie“ mehrere zusammengeschaltete Zellen, etwa die Säule, die er im Jahr 1800 aufschichtete; heute nennt man auch einzelne Zellen so.

Vor der Säule gab es Elektrizität nur als kurze Funken. Die Säule lieferte einen Strom, der stundenlang floss.

Wie es funktioniert

Jede Zelle der Säule besteht aus einer Zinkscheibe, einer Kupferscheibe und dazwischen einer Scheibe aus Pappe oder Stoff, die mit Salzwasser getränkt ist. Zink gibt Elektronen leichter ab als Kupfer. Auf der Zinkseite gehen Metallatome als Ionen in die Salzlake über und lassen ihre Elektronen in der Scheibe zurück. Auf der Kupferseite nimmt eine Reaktion die Elektronen wieder auf, wobei sie im Salzwasser gelösten Sauerstoff verbraucht oder Wasserstoff freisetzt. Verbindet ein äußerer Stromkreis die beiden Enden, fließen Elektronen durch ihn vom Zink zum Kupfer, und Ionen, die durch die feuchte Schicht wandern, schließen den Kreis.

Ein Zink-Kupfer-Paar in Salzlake liefert knapp ein Volt. Schichtet man zwanzig Paare in Reihe, addieren sich die Spannungen. Das reicht für ein deutliches Kribbeln in feuchten Fingern, und genau so prüfte Volta seine Säulen. Die Stromstärke hängt von der Fläche der Scheiben ab und davon, wie schnell die Reaktion ablaufen kann.



Im Daniell-Element schlägt sich Kupfer am Gefäß nieder statt Wasserstoff, deshalb bleibt die Spannung stabil.

Während die Säule arbeitet, wird der gelöste Sauerstoff am Kupfer knapp, und Wasserstoffbläschen beginnen es zu bedecken, sodass der Strom nachlässt. Außerdem drückt das Gewicht der Säule die Salzlake aus den unteren Lagen, und das Zink korrodiert. 1836 gab John Frederic Daniell jedem Metall eine eigene Flüssigkeit: Zink in eine Lösung, Kupfer in Kupfersulfat, getrennt durch eine poröse Wand. Statt Wasserstoff scheidet sich nun Kupfer ab, und die Zelle hält lange Zeit etwa 1,1 Volt.

In einer wiederaufladbaren Zelle treibt ein Strom in Gegenrichtung die Reaktion rückwärts.

Wie man sie baut

Eine kleine Säule liefert nur wenig Spannung und schwachen Strom, zeigt das Prinzip aber deutlich.

Man braucht fünfzehn bis zwanzig Kupferscheiben (alte Kupfermünzen genügen), ebenso viele Zinkscheiben (Zinkblech oder verzinkte Unterlegscheiben), Löschpapier oder Pappe, etwas kleiner zugeschnitten, Salz, Wasser, zwei isolierte Drähte und am besten ein Voltmeter.

Das Metall reinigen. Jede Kupferscheibe mit feinem Schleifpapier blank reiben.

Die Zwischenlagen tränken. Zwei gehäufte Löffel Salz in einem Glas Wasser auflösen und die Pappe darin einweichen. Jede Scheibe ausdrücken, bis sie feucht ist, aber nicht mehr tropft. Salzlake, die an der Säule herabläuft, schließt die Zellen kurz.

In fester Reihenfolge stapeln. Eine Kupferscheibe, eine feuchte Zwischenlage und eine Zinkscheibe auflegen, dann bis oben in derselben Reihenfolge wiederholen. Die Reihenfolge nie auf halber Höhe umkehren und nie zulassen, dass sich die beiden Metalle einer Zelle am Rand der Zwischenlage berühren.

Die Säule halten. Drei Stäbe aus Holz oder Glas, in einen Sockel gesteckt, halten den Stapel gerade, ohne auf ihn zu drücken.

Anschließen und prüfen. Einen Draht an der untersten Kupferscheibe befestigen, den anderen an der obersten Zinkscheibe. Zu erwarten ist knapp ein Volt pro Zelle. Eine rote LED braucht etwa zwei Volt und sehr wenig Strom: ihr langes Bein an das Kupferende, das kurze an das Zinkende anschließen und sie nur mit vier oder fünf Zellen versuchen, an denen sie schwach leuchten sollte. Falsch herum an mehr Zellen angeschlossen, kann eine LED

Schaden nehmen. Wenn die Zwischenlagen nach einigen Stunden trocken sind, die Säule zerlegen und die Scheiben waschen und trocknen.

> **Sicherheit.** Die Säule selbst hat nur eine niedrige Spannung, aber ein Kurzschluss an einer starken Batterie erhitzt Drähte so stark, dass sie die Haut verbrennen und die Isolierung schmelzen. Die Pole deshalb nie direkt miteinander verbinden. Keine Batterie je an das Stromnetz anschließen oder versuchen, sie an einer Steckdose zu laden. Handelsübliche Batterien nicht öffnen: Bleiakkus enthalten Schwefelsäure, die Haut und Augen verätzt, und geben beim Laden explosiven Wasserstoff ab; Lithiumzellen können in Brand geraten, wenn sie durchstochen, gequetscht oder kurzgeschlossen werden. Kupfersulfat und Zinksalze sind giftig: Handschuhe und Schutzbrille tragen, Hände waschen und die Materialien von Kindern fernhalten.

Geschichte und Entwicklung

Galvanis Froschschenkel zuckten jedes Mal, wenn ein Bogen aus zwei Metallen Nerv und Muskel verband.

In den 1780er-Jahren beobachtete der Bologneser Anatom Luigi Galvani, dass präparierte Froschschenkel zuckten, wenn sie gleichzeitig zwei verschiedene Metalle berührten. 1791 veröffentlichte er seine Theorie der „tierischen Elektrizität“. Alessandro Volta, Professor für Physik in Pavia, war dagegen überzeugt, dass die Metalle die Elektrizität erzeugten und der Frosch sie nur anzeigte. Er wollte das ganz ohne Tier beweisen.

Zuerst verband er Becher mit Salzlake durch Metallstreifen, dann baute er die kompaktere Säule. Am 20. März 1800 beschrieb er beide in einem auf Französisch verfassten Brief an Sir Joseph Banks, den Präsidenten der Royal Society in London. Die Gesellschaft druckte ihn noch im selben Jahr mit einem Stich der Säule, der ersten veröffentlichten Abbildung einer Batterie.

Wenige Wochen später zerlegten William Nicholson und Anthony Carlisle mit einer Säule Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Einige Jahre danach stellte Humphry Davy mit großen Batterien erstmals Natrium und Kalium dar. Napoleon sah 1801 in Paris zu, wie Volta die Säule vorführte, und belohnte ihn. Die Einheit der elektrischen Spannung, das Volt, trägt seinen Namen.

Telegrafenleitungen brauchten einen gleichmäßigen Strom, und das Daniell-Element lieferte ihn. 1859 rollte Gaston Planté zwei Bleibleche mit einer Trennschicht dazwischen zu einer Spirale und tauchte sie in verdünnte Schwefelsäure. Johann Ritter hatte schon 1803 eine experimentelle Ladungssäule vorgeführt, doch erst Plantés Zelle war ein praxistauglicher Akku. Von Camille Faure 1881 verbessert, startet der Bleiakku bis heute die meisten Autos.

Plantés Spirale aus Bleiblechen in verdünnter Säure ließ sich immer wieder laden und entladen.

1866 baute Georges Leclanché eine Zelle aus einem Zinkstab, einem in Mangandioxid gepackten Kohlestab und einer Lösung aus Ammoniumchlorid; 1868 waren bereits zwanzigtausend davon in Telegrafennetzen in Betrieb. Spätere Erfinder dickten die Flüssigkeit zu einer Paste ein, und diese Trockenbatterie versorgte die ersten Taschenlampen und die Radios der 1920er-Jahre. Die ersten zylindrischen Alkali-Mangan-Zellen kamen 1959 in den Handel, und Anfang der 1990er-Jahre folgten Lithium-Ionen-Zellen.

Kennzahlen

Bekanntgabe
20. März 1800, in einem Brief an die Royal Society

Spannung einer Zink-Kupfer-Zelle
Unter 1 V in Salzlake; 1,1 V im Daniell-Element

Erster praxistauglicher Akku
Bleiakku von Gaston Planté, 1859

Lithium-Ionen-Zellen im Handel
Anfang der 1990er-Jahre

Quellen

1. Voltaic Pile (1800) · National High Magnetic Field Laboratory https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/voltaic-pile-1800/
2. Electricity and Magnetism Timeline, 1800 to 1819 · National High Magnetic Field Laboratory https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/timeline/1800-1819/
3. Volta and the Pile · The Electrochemical Society, Electrochemistry Encyclopedia https://knowledge.electrochem.org/encycl/art-v01-volta.htm
4. Scientist of the Day: Alessandro Volta · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/alessandro-volta
5. Timeline of Battery Development · LibreTexts Chemistry https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Chem1_(Lower)/16%3A_Electrochemistry/16.07%3A_Timeline_of_Battery_Development
6. Battery History · Energizer https://oem.energizer.com/english/battery-history/

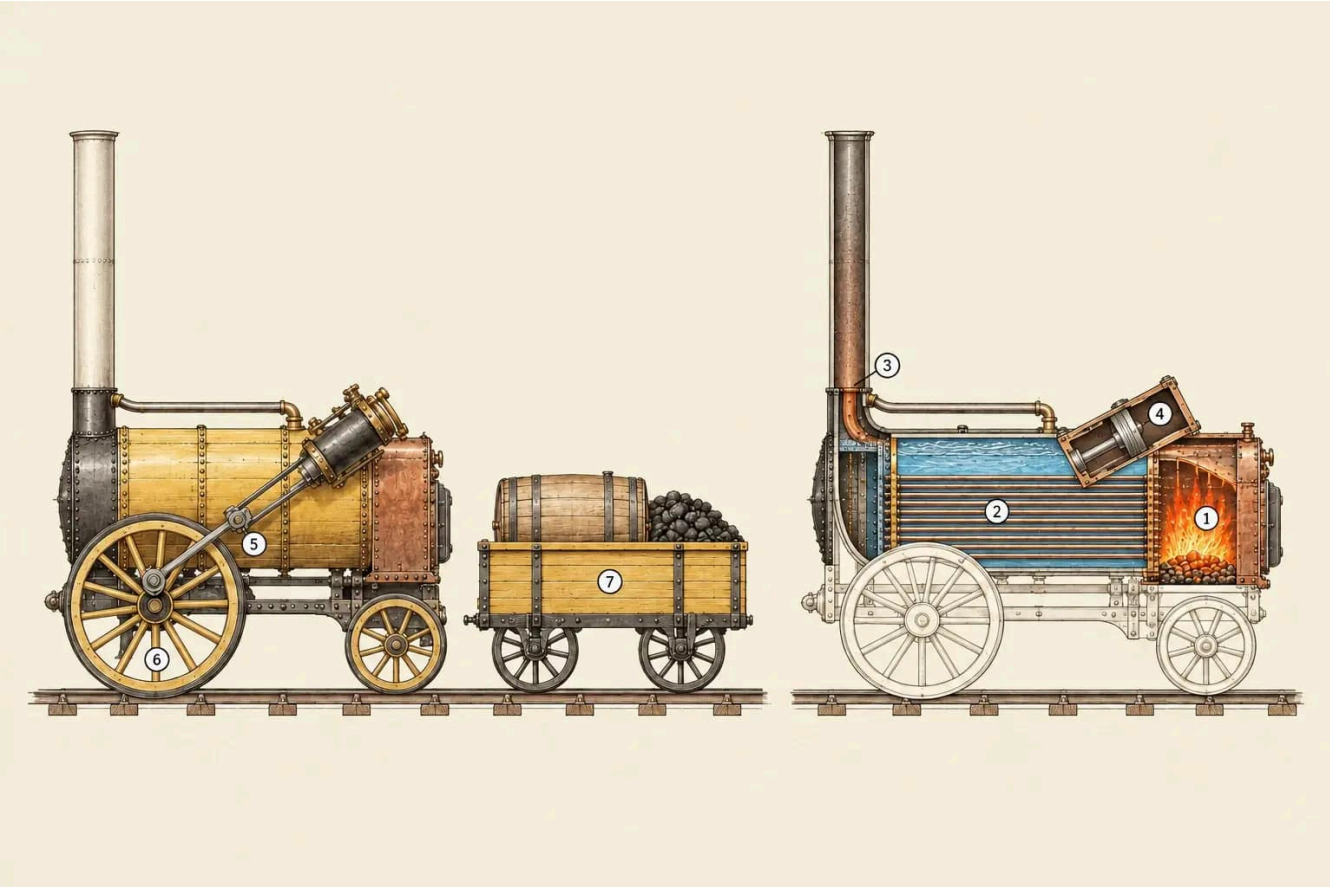
Fakten geprüft am 2026-10-11

Dampflokomotive

Dampfkraft auf Schienen

1804 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Dampfmaschine (S. 230), Rad & Achse (S. 83)



1 Feuerbüchse 2 Rauchrohre 3 Blasrohr und Schornstein 4 Zylinder 5 Treibstange 6 Treibrad 7 Tender

Eine Dampflokomotive ist eine Dampfmaschine auf Rädern, die Brennstoff und Wasser mitführt und Züge auf Schienen zieht. Richard Trevithick ließ 1804 in Wales die erste fahren, und Robert Stephensons Rocket von 1829 setzte das Muster, dem die meisten späteren Lokomotiven folgten: ein Kessel voller Rauchrohre, ein Blasrohr unter dem Schornstein und Zylinder, die die Räder direkt antreiben.

Was es ist

Eine Dampflokomotive ist eine Dampfmaschine auf einem Fahrgestell mit Rädern, gebaut, um Züge auf einer Eisenbahn zu ziehen. Sie führt Kohle oder Koks und Wasser mit, verbrennt den Brennstoff in einer Feuerbüchse und verwandelt den Druck des Dampfes über Kolben und Stangen in die Drehung ihrer Treibräder. Ihre eisernen Räder laufen auf Schienen aus Eisen oder Stahl und rollen dort viel leichter als Räder auf einer Straße, sodass eine einzige Maschine viele beladene Wagen ziehen kann.

Die Tafel zeigt die Rocket, 1829 von Robert Stephenson and Company in Newcastle upon Tyne gebaut. Sie vereinte in einer Maschine einen Kessel mit vielen Rauchrohren und ein Blasrohr; beides blieb bei späteren Dampflokomotiven üblich.

Wie es funktioniert

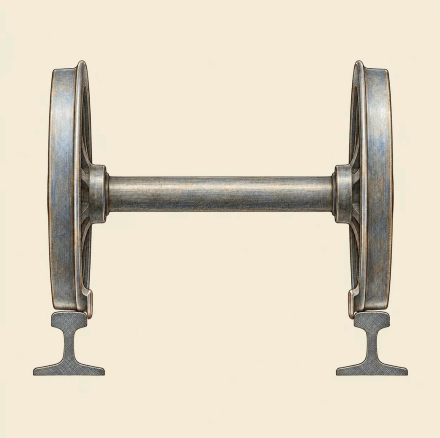
Das Feuer brennt auf einem Rost in der Feuerbüchse am hinteren Ende. Seine heißen Gase ziehen nach vorn durch den Langkessel, in 25 kupfernen Rohren von etwa 76 mm Durchmesser, die vom Wasser umspült werden. Viele kleine Rohre bieten dem Wasser weit mehr heißes Metall als ein einziges großes Flammrohr: Bei der Rocket hatten die Rohre ein Mehrfaches der Heizfläche der Feuerbüchswände (die Angaben in den Quellen weichen ab). Über dem Wasser sammelt sich Dampf mit etwa 3,4 bar Überdruck.

Vom Kessel strömt der Dampf zu den beiden Zylindern, einem auf jeder Seite. Ein Schieber lässt ihn erst hinter den Kolben und dann davor, sodass der Kolben in beide Richtungen gedrückt wird. Jede Kolbenstange bewegt eine Treibstange, die einen Kurbelzapfen im großen Vorderrad derselben Seite dreht. Das Gewicht auf diesem Räderpaar, bei der Rocket etwa 2,6 Tonnen, begrenzt zusammen mit der Haftung zwischen Rad und Schiene, wie stark die Lok ziehen kann, bevor die Räder durchrutschen.

Das Blasrohr stößt den Abdampf in den Schornstein und facht das Feuer bei jedem Kolbenhub an.

Der Abdampf verlässt die Zylinder durch ein Rohr, das in einer Düse unter dem Schornstein endet. Jeder Stoß reißt den Rauch mit und saugt frische Luft durch das Feuer. Je stärker die Maschine arbeitet, desto kräftiger wird der Zug, was dem Kessel hilft, mit dem Dampfverbrauch der Zylinder Schritt zu halten; der Heizer muss trotzdem nachfeuern und Wasser nachspeisen.

Wie man sie baut



Der Spurkranz an der Innenkante jedes Rades hält den Radsatz zwischen den Schienen.

Lokomotiven in voller Größe entstehen in Eisenbahnwerkstätten. Kesselschmiede biegen Eisen- oder Stahlbleche, nieten sie zu Langkessel und Feuerbüchse und setzen die Rohre in die Rohrwände an beiden Enden ein. Bevor er angeheizt werden darf, wird der Kessel mit Wasser bei einem Druck über dem Betriebsdruck geprüft, den die geltenden Vorschriften festlegen, und von einem unabhängigen Sachverständigen abgenommen. Gießer gießen die Zylinder, Mechaniker bohren sie aus und setzen Kolben und Schieber ein, und die Räder erhalten heiß aufgezogene Radreifen aus Eisen. Museumsbahnen, die heute Lokomotiven aufarbeiten, unterliegen vergleichbaren Prüfungen und Abnahmen.

Ein Modell ganz ohne Dampf zeigt, wie die Räder angetrieben werden.

Rad aussägen. Aus Sperrholz eine Scheibe von etwa 20 cm Durchmesser sägen. Einen Rundstab als Achse fest in die Mitte leimen und 5 cm von der Mitte ein zweites Loch für den Kurbelzapfen bohren, in das ein kurzer Rundstab geleimt wird. Zwei aufrechte Klötze auf ein Grundbrett schrauben und so durchbohren, dass die Achse mit Spiel darin liegt und sich das Rad frei dazwischen dreht.

Zylinder bauen. Ein etwa 15 cm langes Papp- oder Kunststoffrohr auf einen Holzklotz leimen, der neben dem Rad auf das Grundbrett geschraubt ist, sodass das Rohr in der Ebene des Rades liegt und seine Achse in Höhe der Radachse auf deren Mitte zeigt. Ein Rundstab, der darin leicht gleitet, ist die Kolbenstange.

Verbinden. Eine dünne Holzleiste von etwa 25 cm als Treibstange zuschneiden. Ein Ende passend zum Kurbelzapfen bohren, das andere mit einem kleinen Nagel drehbar am Ende der Kolbenstange befestigen. Prüfen, dass sich das Rad ganz herumdrehen lässt, ohne dass die Stange an das Rohr stößt.

Bewegen. Die Kolbenstange hin- und herschieben: Das Rad dreht sich einmal für je 10 cm vor und 10 cm zurück. Dabei zeigen sich die beiden Totpunkte, an denen Kurbelzapfen, Achse und Ende der Kolbenstange in einer Linie liegen und Schieben nichts bewirkt. Bei echten Lokomotiven mit zwei Zylindern sind die Kurbeln beider Seiten um eine Vierteldrehung versetzt, sodass immer eine außerhalb ihres Totpunkts steht.

> **Sicherheit.** Niemals Wasser in einem geschlossenen Gefäß erhitzen oder einen Kessel selbst bauen: Dampf unter Druck kann ein Gefäß zerreißen und schwere Verbrühungen verursachen. Echtdampfmodelle nur aus handelsüblichen Bausätzen mit geprüften Kesseln und funktionierenden Sicherheitsventilen betreiben, unter Aufsicht eines Erwachsenen. Die Finger von der Kurbel fernhalten, wenn sich das Rad dreht.

Geschichte und Entwicklung

Richard Trevithick, ein Ingenieur aus Cornwall, baute für das Eisenwerk Penydarren in Merthyr Tydfil die erste Lokomotive, die auf Schienen fuhr. Am 21. Februar 1804 zog sie zehn britische Tonnen Eisen, etwa 10 t, in fünf Wagen, auf denen siebzig Männer mitfuhren, über die Pferdebahn zum Kanal bei Abercynon, rund 14 km, nach seinem eigenen Bericht mit fast 8 km/h. Auf der Rückfahrt brach ein Bolzen, der Kessel wurde undicht, und die Maschine kam erst am nächsten Tag zurück. Sie war zu schwer für die gusseisernen Platten der Strecke, die unter ihr brachen, und endete als ortsfeste Maschine, die einen Schmiedehammer antrieb.

Auf der Pferdebahn von Penydarren führten kurze, auf Steinblöcke genagelte Gussplatten Räder ohne Spurkranz; unter dem Gewicht der Lokomotive brachen sie.

Im Oktober 1829 veranstaltete die Liverpool and Manchester Railway in Rainhill Vergleichsprüfungen, um ihre Lokomotiven auszuwählen. Fünf Maschinen traten an, nur die Rocket bestand alle Prüfungen. Ihre Prüfläufe ergaben je nach Berechnung Durchschnitte von 19 bis 23 km/h; ohne Last erreichte sie etwa 48 km/h. Sie gewann den Preis von 500 Pfund sowie den Auftrag für die Lokomotiven der Strecke. Bei der Eröffnung der Bahn 1830 erfasste die Rocket den Abgeordneten William Huskisson, der an seinen Verletzungen starb. Binnen achtzehn Monaten wurde sie stark umgebaut, nach weniger als zehn Jahren abgestellt. Ihre Reste kamen 1862 in das Londoner Patent Office Museum und gehören heute zur Sammlung der Science Museum Group.

Spätere Lokomotiven wurden viel größer, mit mehr gekuppelten Rädern, die das Gewicht trugen und schwere Züge zogen, und mit höherem Druck. Am 3. Juli 1938 erreichte die Mallard der London and North Eastern Railway auf einem Gefälle südlich von Grantham 203 km/h, bis heute der Rekord für Dampftraktion. Sie wurde 1963 ausgemustert, als Diesel- und Elektroloks den Betrieb übernahmen.

Kennzahlen

Erste Fahrt auf Schienen

21. Februar 1804, Eisenwerk Penydarren, Merthyr Tydfil: zehn britische Tonnen Eisen (etwa 10 t) und 70 Männer

Kessel der Rocket

25 kupferne Rauchrohre, etwa 3,4 bar Überdruck

Lokomotivprüfungen von Rainhill, Oktober 1829

Die Rocket fuhr bei den Prüfläufen im Schnitt 19 bis 23 km/h und ohne Last etwa 48 km/h

Geschwindigkeitsrekord unter Dampf

Mallard, 3. Juli 1938: 203 km/h

Quellen

1. Rocket locomotive (object 1862-5) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co26704
2. Richard Trevithick’s steam locomotive · Amgueddfa Cymru – Museum Wales https://museum.wales/blog/1012
3. London & North Eastern Railway steam locomotive 'Mallard' · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co205732
4. Rocket's engineering excellence · Science and Industry Museum https://blog.scienceandindustrymuseum.org.uk/rocket-engineering-excellence/
5. Stephenson's Rocket · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Stephenson%27s_Rocket
6. Penydarren tramplate · Amgueddfa Cymru – Museum Wales https://museum.wales/collections/online/object/11d39d27-d867-308a-b20a-9398afef1c6e
7. The Penydarren Tramroad · Industrial Railway Society, Industrial Railway Record https://shop.irsociety.co.uk/Archives/59/Penydarren.htm
8. Rocket · steamlocomotives.org https://www.steamlocomotives.org/locomotives/rocket
9. Rocket 0-2-2 Liverpool & Manchester Railway · Preserved British Steam Locomotives https://preservedbritishsteamlocomotives.com/rocket-0-2-2-liverpool-manchester-railway/

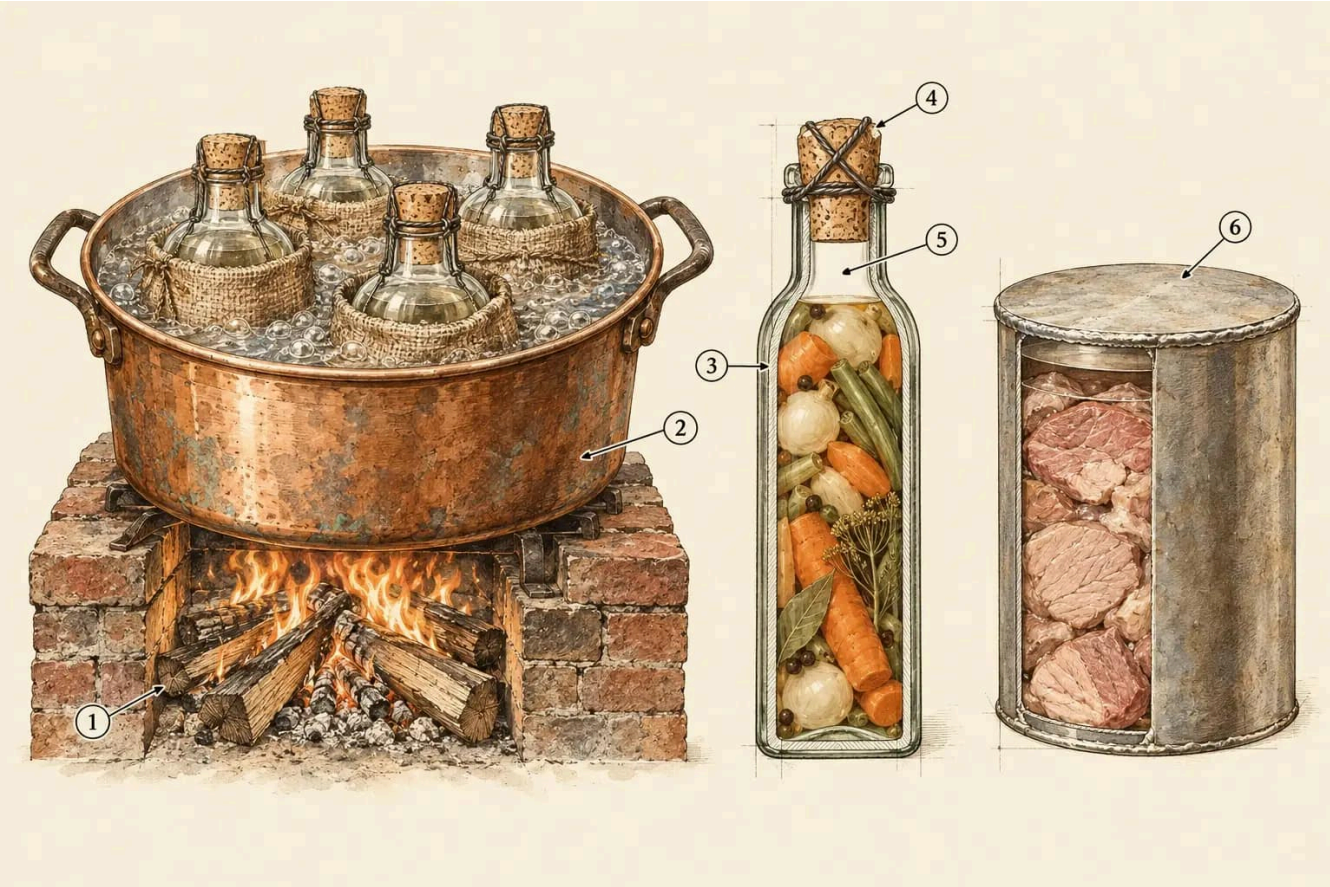
Fakten geprüft am 2026-10-12

Konserven & Pasteurisierung

Verschließen, erhitzen, Keime fernhalten

1810 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Glas (S. 134), Eisenverhüttung (S. 138), Beherrschung des Feuers (S. 9)



1 Holzfeuer 2 Kupferkessel mit kochendem Wasser 3 Glasflasche mit Gemüse 4 Mit Draht festgebundener Korken 5 Freiraum unter dem Korken 6 Angelöteter Deckel einer Weißblechdose

Beim Einkochen wird ein Lebensmittel in Gläser oder Dosen gefüllt, dicht verschlossen und so lange erhitzt, dass die Mikroben absterben, die es verderben würden; der dichte Deckel hält neue fern. Nicolas Appert veröffentlichte das Verfahren 1810, Louis Pasteur erklärte es ein halbes Jahrhundert später, und seine sanftere Hitzebehandlung, die Pasteurisierung, machte Milch, Wein und Bier sicherer.

Was es ist

Salzen und Trocknen bewahren Lebensmittel, indem sie den Mikroben das Wasser entziehen. Beim Einkochen tötet man sie ab: Das Lebensmittel kommt in ein Glas oder eine Dose, wird verschlossen und so lange erhitzt, bis die Mikroben tot sind, die es verderben oder krank machen könnten. Solange der Verschluss hält, dringen keine neuen Keime ein, und der Inhalt bleibt monatelang ohne Kühlung haltbar.

Die Tafel zeigt Nicolas Apperts Verfahren von 1810, verkorkte Flaschen in kochendem Wasser, neben der verlöteten Weißblechdose, die man bald darauf in England übernahm. Die Pasteurisierung, eine mildere Verwandte, erhitzt

Milch, Wein oder Bier unterhalb des Siedepunkts. Sie tötet die meisten Krankheitserreger, aber nicht jede Mikrobe, daher gehört pasteurisierte Milch in den Kühlschrank.

Wie es funktioniert

Bei 100 °C sterben die aktiven Zellen von Bakterien, Hefen und Schimmelpilzen binnen Minuten. Solange das Glas heiß ist, entweicht Luft unter dem Deckel. Beim Abkühlen zieht sich der Inhalt zusammen, der Dampf im Kopfraum kondensiert, und das Vakuum presst den Deckel fest auf den Rand.

Am schwersten zu bekämpfen ist Clostridium botulinum. Seine Spore übersteht das Kochen, und Sporen sitzen auf den meisten frischen Gemüsen. An der Luft ruhen sie; in einem verschlossenen Glas mit feuchtem, säurearmem Inhalt bei Zimmertemperatur keimen sie aus und bilden Botulinumtoxin, einen der giftigsten bekannten Stoffe, oft ohne sichtbares Zeichen.

Bei pH 4,6 oder darunter können die Sporen nicht wachsen. Die meisten Obstsorten, Konfitüre, Essiggurken sowie Tomaten und Feigen mit zugesetzter Säure sind daher nach einem kochenden Wasserbad sicher, das die verderbenden Hefen und Schimmelpilze abtötet. Gemüse, Fleisch und Fisch sind weniger sauer. Ihre Sporen müssen bei 116–121 °C abgetötet werden, und so heiß wird Wasser nur unter Druck: in einem Druckeinkochtopf bei etwa 0,7 bis 1 bar Überdruck, der wie ein Autoklav für die Küche arbeitet. Für jedes Lebensmittel, jede Füllart und Glasgröße gibt es dort eine erprobte Zeit; bei 100 °C bräuchte es Stunden für dieselbe Wirkung, und kein erprobtes Rezept kocht diese Lebensmittel im Wasserbad ein.

Ein Druckeinkochtopf hält den Dampf unter Druck, sodass die Gläser 116–121 °C statt 100 °C erreichen.

Die Einkochzeiten werden mit Thermometern an der Stelle gemessen, die in jedem Glas und bei jedem Lebensmittel am langsamsten warm wird. In der Höhe siedet Wasser unter 100 °C, deshalb verlangen die Tabellen dort mehr Zeit oder Druck.

Die Pasteurisierung arbeitet mit niedrigeren Temperaturen. Molkereien erhitzen Milch meist 15 Sekunden auf 72 °C oder 30 Minuten auf 63 °C und kühlen sie dann. Das tötet die aktiven Erreger von Tuberkulose, Salmonellose und anderen Krankheiten, die einst über Milch kamen. Sporen und manche harmlose Mikroben überleben, deshalb wird die Milch ohne Kühlung binnen Tagen sauer.

Wie man es macht

Halten Sie sich nur an erprobte amtliche Anleitungen: in den USA an den USDA-Leitfaden und das National Center for Home Food Preservation, in Kanada an Health Canada, sonst an die Lebensmittelbehörde Ihres Landes. Die folgenden Schritte gelten nur für das kochende Wasserbad und für saure Lebensmittel.

Ein geprüftes Rezept wählen. Genau einhalten: Glasgröße, Kopfraum, zugesetzte Säure (Zitronensaft aus der Flasche oder Zitronensäure bei Tomaten), Zeit und Höhenkorrektur. Zwiebeln oder Paprika in Tomaten können sie unsicher machen.

Ausrüstung bereitlegen. Ein hoher Topf mit Deckel und Rost, Einkochgläser mit unbeschädigtem Rand, neue zweiteilige Deckel (ein flacher Deckel mit Dichtmasse, gehalten von einem Schraubring) und eine Glasheberzange. Alles in heißem Spülwasser waschen. Bei Einkochzeiten unter 10 Minuten die leeren Gläser vorher 10 Minuten in kochendem Wasser sterilisieren, dazu eine Minute je 300 m Höhe über 300 m.

Der flache Deckel mit Dichtring dient nur einmal; der Schraubring hält viele Jahre.

Füllen und schließen. Den angegebenen Kopfraum lassen, Luftblasen austreiben, den Rand abwischen und den Ring nur so fest aufschrauben, dass Luft noch entweichen kann.

Einkochen. Die Gläser auf den Rost ins heiße Wasser stellen, mindestens 2,5 cm bedeckt (5 cm bei mehr als 30 Minuten). Die Zeit erst ab sprudelndem Kochen messen; hört das Kochen auf, die Zeit von vorn beginnen. Am Ende die Hitze abstellen, den Deckel abnehmen und fünf Minuten warten.

Abkühlen und prüfen. Die Gläser aufrecht herausheben und 12 bis 24 Stunden stehen lassen. Ringe abnehmen und auf jeden Deckel drücken: Ein dichter Deckel ist nach innen gewölbt und gibt nicht nach. Ein undichtes Glas in den Kühlschrank stellen und binnen weniger Tage essen.

Lagern und kontrollieren. Datierte Gläser kühl, dunkel und trocken lagern. Vor dem Öffnen auf gewölbte oder lose Deckel, Undichtigkeit, Schaum, Trübung, Schimmel oder fremden Geruch achten.

> **Sicherheit.** Botulismus ist selten, kann aber tödlich sein. Gemüse, Fleisch, Fisch, Geflügel oder Gerichte daraus nie im Wasserbad, im Backofen oder im offenen Topf einkochen, außer sie wurden nach einem erprobten Rezept sauer eingelegt: Sonst braucht es einen Druckeinkochtopf und ein erprobtes Druckverfahren. Für Milch und Milchprodukte gibt es kein erprobtes Verfahren für zu Hause: Sie nie einkochen. Nie eine Zeit verkürzen oder die Säure verringern. Nie ein verdächtiges Glas kosten: Das Gift ist weder zu sehen noch zu riechen noch zu schmecken. Im Zweifel wegwerfen. Verschwommenes oder doppeltes Sehen, hängende Lider, verwaschene Sprache, Schluckbeschwerden oder sich ausbreitende Schwäche nach dem Essen von Eingemachtem sind ein Notfall: sofort den örtlichen Notruf wählen (in Europa die 112). Kochendes Wasser und heiße Gläser verbrühen, deshalb die Zange benutzen.

Geschichte und Entwicklung

Appert, ein Pariser Konditor, begann seine Versuche in den 1790er-Jahren, als das Frankreich der Revolutionskriege haltbare Vorräte brauchte. Am 30. Januar 1810 gewährte ihm der Staat 12.000 Francs unter der Bedingung, das Verfahren zu veröffentlichen, und sein Buch erschien im selben Jahr. Warum es funktionierte, wusste er nie.

Im selben Jahr erhielt Peter Durand ein britisches Patent, das Dosen aus Weißblech einschloss, also verzinntem Eisenblech. Bryan Donkin und John Hall kauften es und eröffneten 1812 eine Konservenfabrik, in der jede Dose von Hand gelötet wurde. Ab 1813 belieferten sie Armee und Marine. 1981 vermutete das Team von Owen Beattie, Blei aus schlecht gelöteten Dosen habe John Franklins verschollene Arktisexpedition von 1845 geschwächt; Knochenstudien von 2013 und 2018 zeigten, dass die Männer einen Großteil dieses Bleis schon vor der Reise aufgenommen hatten, und die Ergebnisse von 2018 stützen nicht, dass es eine entscheidende Ursache war.

Die ersten Dosen öffnete man mit Hammer und Meißel; Dosenöffner kamen erst Jahrzehnte später.

Louis Pasteur zeigte in den 1850er- und 1860er-Jahren, dass lebende Mikroben Gärung und Verderb bewirken, und ließ sich 1865 das Erhitzen von Wein patentieren. Die Pasteurisierung von Milch wurde 1886 vorgeschlagen. Milch übertrug damals

Tuberkulose, Scharlach und Durchfall bei Säuglingen, doch der Historiker Peter Atkins stellte fest, dass sich das Verfahren in Großbritannien langsam ausbreitete und vor den 1920er-Jahren wenig bewirkte; 1921 wurde etwa die Hälfte der Londoner Milch erhitzt.

Konservenfabriken gingen Mitte des 19. Jahrhunderts zu Dampfautoklaven über. In den 1890er-Jahren kamen Maschinen, die Dosen ohne Lötung verschlossen, Anfang des 20. Jahrhunderts setzte sich die gefalzte „Sanitary"-Dose durch, und ab etwa 1900 wurden die Zeiten bakteriologisch festgelegt. Ab den 1980er-Jahren verdrängte die Schweißnaht nach und nach die gelötete Längsnaht.

Kennzahlen

Apperts Preis
12.000 Francs vom französischen Staat am 30. Januar 1810, unter der Bedingung, das Verfahren zu veröffentlichen

Säurearme Lebensmittel
116–121 °C, nur unter Druck erreichbar

Botulismus
Beschwerden meist 12–36 Stunden nach dem Essen; tödlich in 5–10 % der Fälle

Säuregrenze für das Wasserbad
pH 4,6 oder darunter

Pasteurisierung von Milch
72 °C für 15 Sekunden oder 63 °C für 30 Minuten

Quellen

1. Ensuring Safe Canned Foods · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/ensuring-safe-canned-foods/
2. How to Use Boiling Water and Pressure Canners · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/recommended-canners/
3. Recommended Jars and Lids · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/recommended-jars-and-lids/
4. Cooling Jars and Testing Jar Seals · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/cooling-jars-and-testing-jar-seals/
5. Selecting the Correct Processing Time · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/selecting-the-correct-processing-time/
6. Sterilization of Empty Jars · National Center for Home Food Preservation, University of Georgia https://nchfp.uga.edu/how/can/general-information/sterilization-of-empty-jars/
7. Preventing Botulism · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/botulism/prevention.html
8. Home canning safety · Health Canada https://www.canada.ca/en/health-canada/services/general-food-safety-tips/home-canning-safety.html
9. Canning Controversies: No to Home Canning Dairy Products · Clemson Cooperative Extension, Home & Garden Information Center https://hgic.clemson.edu/canning-controversies/
10. Botulism (fact sheet) · World Health Organization https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/botulism
11. Nicolas Appert · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/Nicolas_Appert
12. Nicolas Appert · Encyclopedia.com (World of Invention; Encyclopedia of Food and Culture) https://www.encyclopedia.com/people/food-and-drink/food-and-cooking-biographies/nicolas-appert
13. 30 janvier 1810 : Nicolas Appert, inventeur de la conserve · Hérodote.net https://www.herodote.net/30_janvier_1810-evenement-18100130.php
14. Scientist of the Day: Bryan Donkin · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/bryan-donkin/
15. Food processing: canning (Technology in Australia 1788–1988) · Australian Science and Technology Heritage Centre, University of Melbourne https://austehc.unimelb.edu.au/tia/084.html
16. Louis Pasteur : un héritage universel · Institut Pasteur https://www.pasteur.fr/fr/journal-recherche/dossiers/louis-pasteur-heritage-universel
17. White Poison? The Social Consequences of Milk Consumption, 1850–1930 (Atkins, 1992) · Social History of Medicine 5, Durham University https://pjatkins.webspace.durham.ac.uk/wp-content/uploads/sites/201/2022/07/White-Poison-1992.pdf
18. Raw Milk Misconceptions and the Danger of Raw Milk Consumption · U.S. Food and Drug Administration https://www.fda.gov/food/buy-store-serve-safe-food/raw-milk-misconceptions-and-danger-raw-milk-consumption
19. Western researchers acquit tins in expedition's fate · Western News, Western University https://news.westernu.ca/2013/04/western-researchers-acquit-tins-in-expeditions-fate/
20. Researchers provide new insights into fate of Franklin Expedition · University of Saskatchewan https://news.usask.ca/articles/research/2018/researchers-provide-new-insights-into-fate-of-franklin-expedition-.php

Fakten geprüft am 2026-10-14

Fahrrad

Zwei Räder, von Beinen angetrieben

1817 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Rad & Achse (S. 83), Eisenverhüttung (S. 138)

1 Lenker 2 Steuerkopf und Gabel 3 Sattel 4 Kurbel und Kettenblatt 5 Kette 6 Hinteres Ritzel 7 Luftreifen

Das Fahrrad ist ein zweirädriges Fahrzeug, das der Fahrer durch Lenken im Gleichgewicht hält und mit den Beinen antreibt, über Pedale, eine Kette und ein Ritzel am Hinterrad. Aus Karl Drais' hölzerner Laufmaschine von 1817 entstand 1885 das kettengetriebene Sicherheitsniederrad; mit luftgefüllten Reifen braucht man darauf für eine Strecke nur einen Bruchteil der Energie, die das Gehen kostet.

Was es ist

Ein Fahrrad trägt einen Menschen auf zwei hintereinander angeordneten Rädern. Der Fahrer sitzt auf einem Sattel, hält das Rad durch Lenken aufrecht und treibt das Hinterrad mit den Beinen an, über Pedale, Kurbeln und eine Kette. Es hat keinen Motor, und für die übliche Wartung genügt einfaches Handwerkzeug.

Die Tafel zeigt ein Sicherheitsrad der 1890er-Jahre, die Bauform, von der fast alle heutigen Fahrräder abstammen: zwei gleich große Räder, ein Rahmen aus Stahlrohren in Form zweier Dreiecke und Reifen, die mit Luft gefüllt sind.

Wie es funktioniert

Das Gleichgewicht kommt aus der Lenkung. Beginnt das Rad zu kippen, dreht der Fahrer das Vorderrad ein wenig zur Seite der Neigung, und die Räder laufen wieder unter seinen Schwerpunkt. Im Schritttempo müssen diese Korrekturen größer ausfallen, deshalb schlingert ein langsames Fahrrad.

Die Pedale drehen zwei Kurbeln, die um 180 Grad versetzt auf einer Achse unten im Rahmen sitzen. Ein großes Kettenblatt an der rechten Kurbel zieht eine Rollenkette, und die Kette dreht ein kleines Ritzel an der Hinterradnabe. Bei 44 Zähnen vorn und 18 hinten dreht sich das Hinterrad bei jeder Kurbelumdrehung etwa 2,4-mal, und ein Rad von 70 cm Durchmesser rollt dabei rund 5,4 m weit. Ältere Maschinen mit Pedalen an der Vorderradnabe kannten diese Übersetzung nicht: Wer pro Kurbelumdrehung weiter kommen wollte, brauchte ein größeres Rad.

Eine saubere, geölte Kette überträgt fast die gesamte Arbeit der Beine auf das Rad, in Laborversuchen bis etwa 99 Prozent. Auf ebener Strecke gehen oberhalb von etwa 30 km/h drei Viertel oder mehr der Kraft des Fahrers in die Verdrängung der Luft. Bei gleicher Anstrengung ist ein Radfahrer etwa dreimal so schnell wie ein Fußgänger, sodass ihn eine Strecke viel weniger Energie kostet; Schätzungen reichen von einem Drittel bis zu einem Fünftel dessen, was das Gehen verbraucht.

Ein Luftreifen gibt um einen Stein herum nach, statt das ganze Fahrzeug darüber hinwegzuheben. Auf schlechten Straßen läuft er deshalb ruhiger und verschwendet weniger Kraft als die zuvor üblichen Vollgummireifen. Dünne Drahtspeichen unter Spannung halten eine leichte Stahlfelge rund und steif.

Der Reifen der 1890er-Jahre: ein aufgepumpter Schlauch in einem Mantel aus Gummi und Gewebe.

Wie man es baut

Die Laufmaschine von 1817 hatte keine Pedale: Man stieß sich abwechselnd mit beiden Füßen vom Boden ab und bremste mit einer Schnur, die auf das Hinterrad wirkte.

Drais' Maschine war Arbeit für Zimmermann und Stellmacher: ein Eschenbalken, zwei Holzräder mit Eisenreifen, eine Vordergabel, die sich um einen Eisenbolzen drehte, ein gepolsterter Sattel, ein Brett für die Unterarme und eine Hinterradbremse, die über eine Schnur gezogen wurde. Um diese Art des Fahrens heute auszuprobieren, baut man am sichersten ein kleines, intaktes Fahrrad zum Laufrad um; Rahmen, Räder und Bremsen bleiben dann die, für die es gebaut wurde.

Fahrrad wählen. Es muss so klein sein, dass der Fahrer bei ganz abgesenktem Sattel mit beiden Füßen flach auf dem Boden und leicht gebeugten Knien sitzt, und es braucht zwei Handbremsen, vorn und hinten: Eine Rücktrittbremse funktioniert nicht mehr, sobald die Kette abgenommen ist. Prüfen, dass der Rahmen keine Risse hat, die Räder rund laufen und beide Bremsen funktionieren.

Antrieb abbauen. Beide Pedale mit einem Pedalschlüssel abschrauben; das linke Pedal hat ein Linksgewinde und löst sich im Uhrzeigersinn. Zum Abnehmen der Kette das Kettenschloss öffnen oder mit einem Kettennieter einen Bolzen herausdrücken, oder das einer Fahrradwerkstatt überlassen. Wer einen Kurbelabzieher hat, entfernt auch Kurbeln und Kettenblatt, damit sich nichts an den Beinen verfangen kann.

Sattel einstellen. Den Sattel absenken, bis beide Füße flach aufstehen; die Markierung für die Mindesteinstecktiefe der Sattelstütze muss dabei im Rahmen verborgen bleiben. Dann die Klemme fest anziehen.

Bremsen prüfen. Jeden Hebel ziehen und dabei das Rad nach vorn schieben: Das Rad muss stehen bleiben. Andernfalls die Bremse nachstellen oder in einer Fahrradwerkstatt einstellen lassen, bevor jemand fährt.

Rollen lernen. Auf einem ebenen, ruhigen Weg zuerst im Gehen probieren, dann abwechselnd mit beiden Füßen abstoßen, für kurze Rollstrecken die Füße anheben und zum Anhalten bremsen.

> **Sicherheit.** Einen Helm tragen und abseits vom Verkehr fahren. Vor jeder Fahrt Bremsen, Achsmuttern oder Schnellspanner und Sattelklemme prüfen. Die Finger von drehenden Speichen und, falls noch montiert, von den Zähnen des Kettenblatts fernhalten und keinen Hang hinabfahren, bevor man sicher anhalten kann.

Geschichte und Entwicklung

Karl Drais, Beamter der badischen Forstverwaltung, fuhr am 12. Juni 1817 mit seiner Laufmaschine aus Mannheim hinaus. Die Berichte nennen 13 bis 15 km in etwa einer Stunde; eine gestoppte Fahrt über 12,5 km ergab einen Schnitt von über 12 km/h, mehr als das Doppelte eines Fußgängers. In Frankreich wurde die Maschine ab 1818 als vélocipède verkauft, in Großbritannien als hobby horse nachgebaut. Ein erhaltenes Exemplar wiegt 23 kg; die erhaltenen Maschinen haben eine über eine Schnur betätigte Hinterradbremse. Die Straßen waren schlecht, und nach wenigen Jahren geriet die Laufmaschine aus der Mode.

In den 1860er-Jahren wurden in Paris Kurbeln und Pedale am Vorderrad angebracht. Ob die Idee vom Wagenbauer Pierre Lallement oder aus der Werkstatt von Pierre Michaux stammt, ist bis heute umstritten. Lallement nahm sie mit in die Vereinigten Staaten und erhielt dort am 20. November 1866 ein Patent; Michaux' Maschinen lösten Ende des Jahrzehnts in Frankreich die erste Radfahrbegeisterung aus. Wegen ihrer eisenbeschlagenen Holzräder hießen sie auf Englisch boneshakers, Knochenschüttler. In den 1870er-Jahren machten Drahtspeichen und Vollgummireifen die Räder leichter, und das Vorderrad wuchs, so weit die Beine des Fahrers reichten. Diese Hochräder waren schnell, doch bei einem Hindernis konnte der Fahrer kopfüber über den Lenker stürzen.

Beim Hochrad der 1870er-Jahre trieben die Pedale das Vorderrad direkt an, die Geschwindigkeit hing also von dessen Größe ab.

Das Sicherheitsrad löste dieses Problem: Der Fahrer sitzt tief zwischen zwei kleinen Rädern, und eine Kette treibt das Hinterrad an. 1885 baute John Kemp Starley in Coventry das Rover; das in London aufbewahrte Exemplar wiegt 16,8 kg und hat noch Vollgummireifen. 1887 oder 1888 (die Quellen weichen ab) fertigte John Boyd Dunlop, Tierarzt in Belfast, luftgefüllte Reifen für das Dreirad seines Sohnes an und ließ sie am 7. Dezember 1888 patentieren. Das Patent wurde später für ungültig erklärt, weil Robert William Thomson dieselbe Idee schon in den 1840er-Jahren patentiert hatte, doch Ende 1890 gingen Dunlops Reifen in Belfast in Produktion. Innerhalb weniger Jahre wurden Diamantrahmen und Luftreifen zum Standard, und Frauen fuhren das Sicherheitsrad ebenso wie Männer. Freilauf, Gangschaltung und bessere Bremsen kamen später hinzu, ohne die Bauform zu ändern.

Kennzahlen

Erste Fahrt mit der Laufmaschine

12. Juni 1817, ab Mannheim: 13 bis 15 km in etwa einer Stunde (die Berichte weichen ab)

Dunlops Luftreifen-Patent

7. Dezember 1888 (später für ungültig erklärt: R. W. Thomson hatte die Idee in den 1840er-Jahren patentiert)

Wirkungsgrad der Kette

Bis etwa 99 % bei sauberer, geölter Kette

Rover-Sicherheitsrad

1885, Coventry; 16,8 kg, Kettenantrieb, Vollgummireifen

Energie im Vergleich zum Gehen

Ein Drittel bis ein Fünftel für dieselbe Strecke (Schätzungen weichen ab)

Quellen

1. Draisienne · Encyclopædia Universalis https://www.universalis.fr/encyclopedie/draisienne/
2. Rover 'Safety' Bicycle, 1885 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co25833/rover-safety-bicycle-1885
3. J. B. Dunlop · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/J._B._Dunlop
4. Pierre Lallement and the Modern-Day Pedal Bicycle · Connecticut Humanities https://connecticuthistory.org/pierre-lallement-and-the-modern-day-pedal-bicycle-today-in-history-november-20
5. Bicycle performance · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Bicycle_performance
6. Laufmaschine (draisine) by Karl Drais · Klassik Stiftung Weimar https://www.klassik-stiftung.de/startseite/digital/sammlungshighlights/laufmaschine/
7. Gain Ratios · Sheldon Brown https://www.sheldonbrown.com/gain.html
8. Glossary: Chain · Sheldon Brown https://www.sheldonbrown.com/gloss_ch.html
9. H. Renold · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/H._Renold
10. Roller chain sprocket diameters · Engineers Edge https://www.engineersedge.com/hardware/roller_chain_sprocket_diameters_13887.htm

Fakten geprüft am 2026-10-12

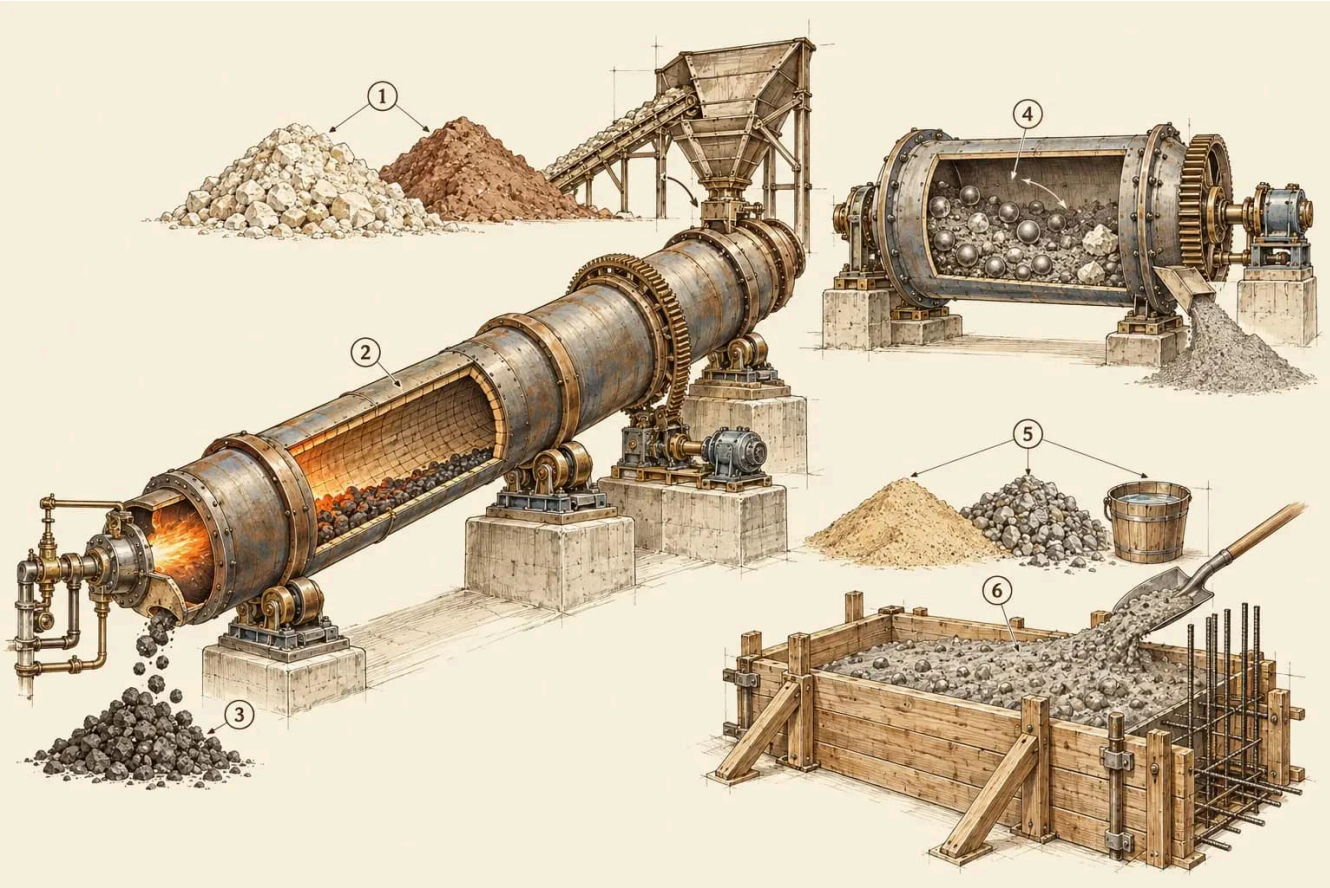
Portlandzement

Das Bindemittel, das unter Wasser erhärtet

1824 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Kalk und Kalkmörtel (S. 31), Römischer Beton (S. 168), Maße und Gewichte (S. 129)

Führt zu: Stahlbeton (S. 313)



1 Gebrochener Kalkstein und Ton 2 Drehrohrofen, Flamme am unteren Ende 3 Klinkerknollen 4 Mühle: Klinker mit etwas Gips 5 Sand, Kies und Wasser für die Mischung 6 Holzschalung mit frischem Beton

Portlandzement entsteht, wenn Kalkstein und Ton bei etwa 1450 °C zu harten Knollen, dem Klinker, gebrannt und mit etwas Gips gemahlen werden. Mit Wasser erhärtet er durch eine chemische Reaktion, auch unter Wasser, und mit Sand und Kies gebunden ergibt er Beton, den meistverwendeten Baustoff der Welt.

Was es ist

Portlandzement ist ein graues Pulver: Kalkstein und Ton, gebrannt, bis sie teilweise zu harten Brocken schmelzen, dem Klinker, der dann mit etwas Gips gemahlen wird. Mit Wasser entsteht ein Leim, der in wenigen Stunden steif wird und wochenlang weiter erhärtet.

Er ist ein hydraulisches Bindemittel: Er erhärtet, indem er mit Wasser reagiert, in einer nassen Baugrube ebenso wie im Meer. Mörtel aus Luftkalk dagegen härtet langsam durch Karbonatisierung an der Luft. Römischer Beton widerstand dem Wasser dank Puzzolan, vulkanischer Asche, deren Kieselsäure mit dem Löschkalk reagiert. Im

Portlandzement sind Kalk und die Kieselsäure des Tons schon im Ofen verbunden; das Pulver braucht nur noch Wasser und wird weit fester.

Mit Sand und Kies ergibt er Beton: Diese Gesteinskörnung füllt den größten Teil des Volumens, der Zement verklebt sie.

Wie es funktioniert

Klinker, wie er aus dem Ofen kommt; mit etwas Gips gemahlen, wird er zu Zement.

Brennen. Das Rohmehl besteht meist zu etwa vier Fünfteln aus Kalkstein, dazu Ton oder Schiefer, die Kieselsäure, Tonerde und Eisenoxid liefern. Im Ofen gibt der Kalkstein sein Kohlendioxid ab und wird zu Branntkalk, der sich dann mit den Mineralen des Tons verbindet. Bei etwa 1450 °C schmilzt ein Teil des Brennguts, der Rest sintert zu dunklen Knollen. Ein üblicher Klinker enthält rund 55 % Alit und 20 % Belit, zwei Calciumsilikate; Alit bildet sich nur bei scharfem Brand über etwa 1300 °C. Danach wird der Klinker rasch gekühlt.

Mahlen. Der Klinker wird mit etwa 5 % Gips sehr fein gemahlen. Der Gips verhindert, dass das Aluminat im Klinker den Leim schon wenige Minuten nach dem Anmachen versteifen lässt.

Abbinden. Im Wasser bilden Alit und Belit Calciumsilikathydrate, ein schlecht kristallisiertes Gel, das aus jedem Korn wächst und die Körner miteinander verbindet; dabei entstehen Calciumhydroxid und Wärme. Alit liefert die Frühfestigkeit, Belit den Zuwachs nach der ersten Woche.

Wasser und Festigkeit. Überschüssiges Wasser hinterlässt Poren, und Poren schwächen den Beton. 1918 zeigte Duff Abrams am Lewis Institute in Chicago, dass die Festigkeit vor allem vom Verhältnis von Wasser zu Zement abhängt; die meisten Mischungen liegen zwischen 0,4 und 0,6 (Masse). Beton, der zu früh austrocknet, reagiert nicht weiter; in manchen Versuchen erreichte er nur etwa die Hälfte der Festigkeit von feucht gehaltenem Beton.

Wie man es baut

Klinker braucht einen Industrieofen, aber Sackzement innerhalb seines Haltbarkeitsdatums lässt sich auf einem Brett von Hand mischen, etwa für ein Pfostenfundament oder eine kleine Gartenplatte. Alles, was ein Gebäude oder ein Fahrzeug trägt, braucht die Planung eines Ingenieurs.

Die Schalung. Für eine Platte bis auf festen Boden ausheben, eine Schotterschicht verdichten und ringsum Bretter hochkant setzen, außen mit Pflöcken gehalten, die Oberkante waagrecht, die Innenseite geölt. Beim Fundament ist das Loch selbst die Form.

Trocken mischen, dann sparsam wässern. Eine gängige Regel ist ein Eimer Zement auf zwei Eimer scharfen Sand und drei Eimer gewaschenen Kies bis 20 mm. Den trockenen Haufen umschaufeln, bis er gleichmäßig grau ist, dann Wasser in eine Mulde gießen und das trockene Gemisch vom Rand her nach und nach hineinschaufeln. Ein Wert von 0,5 bedeutet etwa 12,5 Liter für einen 25-kg-Sack, das Wasser im feuchten Sand mitgerechnet. Aufhören, sobald die Mischung überall nass und weich genug ist, um die Form zu füllen und verdichtet zu werden, aber auf der Schaufel noch ihre Form hält: Mehr Wasser macht sie leichter zu verarbeiten, den erhärteten Beton aber schwächer.

Einbringen, verdichten, feucht halten. Die Form lagenweise füllen, jede Lage mit einem Stab stochern und an die Bretter klopfen, damit die Luft entweicht; die Oberfläche mit einer Latte abziehen. Den frischen Beton schon

Das Wasser kommt in eine Mulde im trockenen Gemisch und wird vom Rand her eingearbeitet.

während der Arbeit vor Sonne und Wind schützen. Sobald die Oberfläche keine Abdrücke mehr annimmt, mindestens 7 Tage unter Folie oder nassem Jutesack feucht halten, bei kühlem Wetter länger, und vor Frost schützen.

Einen Würfel prüfen. Eine oder zwei geölte Formen von 10 cm Innenmaß mit derselben Mischung füllen, in zwei Lagen, jede gestochert, und unter derselben nassen Abdeckung wie die Platte lagern. Ein Baustoffprüflabor drückt solche Würfel nach 7 und 28 Tagen in einer Presse und gibt ihre Festigkeit an; so wird Beton auf der Baustelle geprüft. Einen Würfel mit dem Hammer zu zerschlagen, sagt wenig aus und schleudert Splitter und Staub.

> **Sicherheit.** Frischer Zement ist stark alkalisch. Eingeschlossen zwischen Haut und Handschuh oder Stiefel, kann er schwere Verätzungen verursachen. Wasserdichte Handschuhe, lange Ärmel, die Hose über den Stiefeln und eine Schutzbrille tragen. Zement auf der Haut sofort abwaschen; bei Spritzern ins Auge mindestens 15 Minuten mit reichlich klarem Wasser spülen und ärztliche Hilfe holen. Das Pulver reizt die Lunge: Säcke im Freien mit dem Wind im Rücken und mit FFP3-Maske ausleeren. Beim Schneiden von erhärtetem Beton entsteht Quarzstaub: eine Säge mit Wasserzufuhr und eine FFP3-Maske mit geprüftem Dichtsitz verwenden. Ein Sack wiegt 25 kg: aus den Knien heben oder zu zweit.

Geschichte und Entwicklung

1756 sollte der englische Ingenieur John Smeaton den Leuchtturm auf den Eddystone-Felsen vor Plymouth neu bauen und prüfte Kalke für einen Mörtel, der zwischen zwei Gezeiten abbindet. Die besten stammten aus tonhaltigem Kalkstein; er mauerte den Turm mit hydraulischem Kalk und Puzzolan. In Frankreich zeigte Louis Vicat 1817–1818, wie Ton dem Kalk das Abbinden unter Wasser ermöglicht, und stellte aus Kreide und Ton einen künstlichen hydraulischen Kalk her, für eine Brücke in Souillac.

Smeatons Turm auf dem Eddystone, 1759: verzahnte Steine in einem Mörtel, der im Meerwasser abbindet.

Am 21. Oktober 1824 erhielt Joseph Aspdin, Maurer in Leeds, ein Patent auf einen Kunststein, „den ich Portlandzement nenne“, nach dem hellen Stein der Halbinsel Portland in Dorset. Sein Produkt war wohl zu schwach gebrannt, um nach heutigem Maßstab als Portlandzement zu gelten. In den 1840er-Jahren brannten sein Sohn William und Isaac Charles Johnson, beide bei London, die Mischung bis zum Klinker, den frühere Hersteller als totgebrannt weggeworfen hatten; beide beanspruchten die Entdeckung. Diese Tafel nennt 1824, das Jahr des Namens.

Frederick Ransome ließ sich 1885 einen Drehrohrofen patentieren. Seine Versuche in England scheiterten, doch ein ölbeheizter Ofen dieser Art lief 1890 in Pennsylvania, und solche Öfen verdrängten bald die feststehenden Öfen.

2018 wurden nach Chatham House weltweit über 4 Milliarden Tonnen Zement im Jahr hergestellt, und diese Produktion verursachte etwa 8 % der weltweiten CO_2-Emissionen. Mehr als die Hälfte stammte aus dem Kalkstein selbst, der im Ofen sein Kohlendioxid abgibt. Hersteller ersetzen einen Teil des Klinkers durch Hüttensand, Flugasche, kalzinierten Ton oder Kalksteinmehl, um diesen Anteil zu senken.

Kennzahlen

Brenntemperatur
Etwa 1450 °C

Übliche Handmischung
1 Raumteil Zement, 2 Sand, 3 Kies

Weltproduktion
Über 4 Milliarden Tonnen im Jahr, etwa 8 % der weltweiten CO_2-Emissionen (2018)

Gips
Etwa 5 %, mit dem Klinker vermahlen

Wasserzementwert
Meist 0,4 bis 0,6 (Masse)

Quellen

1. About cement · Cement Kilns (D. Moore), history of the British cement industry https://www.cementkilns.co.uk/cement.html
2. Aspdin's 1824 patent · Cement Kilns (D. Moore) https://cementkilns.co.uk/cemkilndoc008.html
3. Early rotary kilns · Cement Kilns (D. Moore) https://cementkilns.co.uk/early_rotary_kilns.html
4. Hard-Headed Man (M. Rinde, 2015) · Science History Institute, Distillations https://www.sciencehistory.org/stories/magazine/hard-headed-man/
5. Aberthaw Lime and Cement Works, Rhoose (listing record 83144) · Cadw, via British Listed Buildings https://britishlistedbuildings.co.uk/300083144-aberthaw-lime-and-cement-works-rhoose
6. Louis Vicat · École polytechnique https://225.polytechnique.fr/en/225-stories/louis-vicat.html
7. Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete (Lehne & Preston, 2018) · Chatham House https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston-final.pdf
8. Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018 (R. M. Andrew, 2019) · Earth System Science Data https://essd.copernicus.org/articles/11/1675/2019/
9. Composition of cement · Penn State College of Engineering https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/construction/curing/composition%20of%20cement.htm
10. Curing concrete: normal, hot and cold weather · Penn State College of Engineering https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/construction/curing/curing.html
11. Water-cement ratio of concrete · Gilson Company https://www.globalgilson.com/blog/water-cement-ratio-of-concrete
12. Properties of concrete · University of Memphis, Civil Engineering https://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/section_3_properties.html
13. Cement · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/construction/healthrisks/hazardous-substances/cement.htm
14. Cutting paving blocks, kerbs and flags · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/construction/healthrisks/hazardous-substances/cutting-paving-blocks-kerbs-and-flags.htm
15. Cement hydration · MC-Bauchemie, MCpedia https://www.mc-bauchemie.com/mcpedia/cement-hydration

Fakten geprüft am 2026-10-14

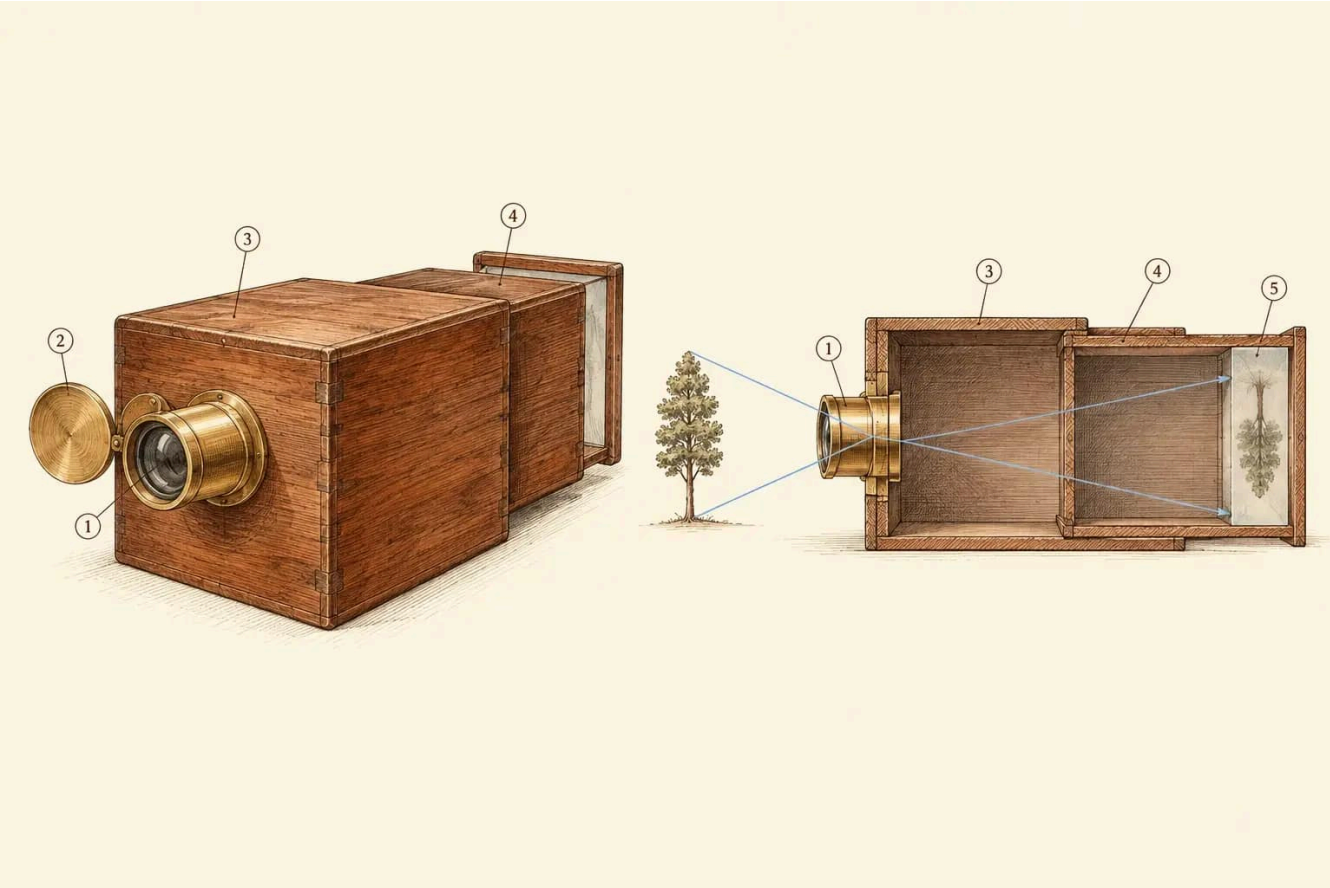
Fotografie

Licht, das eine Spur hinterlässt

um 1827 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Glas (S. 134)

Führt zu: Röntgenaufnahme (S. 353)



1 Objektiv in seiner Messingfassung 2 Schwenkbarer Objektivdeckel aus Messing 3 Vorderer Kasten 4 Verschiebbarer hinterer Kasten 5 Mattscheibe zum Scharfstellen

Die Fotografie hält das von einem Objektiv erzeugte Bild auf einer Fläche fest, die das Licht chemisch verändert. Nicéphore Niépce schuf 1826 oder 1827 die älteste erhaltene Kamerafotografie, und die Daguerreotypie, 1839 in Paris öffentlich gemacht, war das erste Verfahren, das dem Publikum verkauft wurde: Kameras und Platten waren binnen Wochen im Handel.

Was es ist

Die Fotografie hält ein Bild aus Licht fest. Ein Objektiv wirft ein kleines Bild der Szene auf eine Fläche, die mit einem lichtempfindlichen Stoff beschichtet ist; nach der Behandlung bleiben die hellen und dunklen Stellen der Szene dauerhaft darauf. Das Wort bedeutet „Zeichnen mit Licht“, und die ersten Fotografen sprachen von Bildern, die sich selbst zeichnen.

Die Kamera auf der Tafel ist das Modell, das Alphonse Giroux 1839 in Paris nach den Plänen von Louis Daguerre zu verkaufen begann, die erste in Serie für das Publikum gebaute Kamera. Sie besteht aus zwei Holzkästen, von

denen einer im anderen gleitet. Der vordere trägt ein einfaches Objektiv in einer Messingfassung mit einem runden Messingdeckel, der zur Belichtung zur Seite geschwenkt wird. Hinten zeigt eine Mattscheibe das Bild zum Scharfstellen; danach ersetzt man sie durch eine Kassette mit der lichtempfindlichen Platte.

Wie es funktioniert

Das Licht jedes Punktes der Szene geht durch das Objektiv und wird auf einem Punkt an der Rückwand der Kamera vereinigt. So entsteht ein kleines, scharfes, auf dem Kopf stehendes Abbild der Szene, dasselbe Bild, das die Camera obscura seit der Renaissance zeigte. Schiebt man den hinteren Kasten hinein oder heraus, bis das Bild auf der Mattscheibe scharf ist, stellt man scharf.

Zeichner benutzten solche Kastenkameras lange vor der Fotografie; ein Spiegel wirft das Bild nach oben auf eine Scheibe, wo man es nachzeichnen kann.

Die Fotografie brauchte ein Mittel, dieses Bild zu bewahren. Manche Silberverbindungen dunkeln im Licht nach, manche Harze härten darin aus. Niépce beschichtete eine Zinnplatte mit Asphalt (Judenpech), gelöst in Lavendelöl. Wo Licht auftraf, härtete der Asphalt; danach wusch ein Lösungsmittel die weich gebliebenen Stellen ab, und zurück blieb ein Bild aus Asphalt auf blankem Metall.

Die Daguerreotypie arbeitete mit Silber. Eine versilberte, polierte Kupferplatte wurde über Joddampf lichtempfindlich gemacht, einige Minuten in der Kamera belichtet, über erhitztem Quecksilber entwickelt, das sich an den belichteten Stellen niederschlug, und in Salzwasser oder „Fixiersalz“ fixiert. Heraus kam ein spiegelndes, einmaliges Positiv mit feinen Einzelheiten. Talbots Kalotypie funktionierte anders: Sie lieferte ein Papiernegativ, von dem man im Kontakt beliebig viele Positivabzüge machen konnte, das Prinzip des größten Teils der späteren Fotografie auf Film.

Wie man sie baut

Zwei einfache Versuche zeigen zu Hause die beiden Hälften der Fotografie: Eine Lochkamera erzeugt das Bild, Cyanotypie-Papier hält das Licht chemisch fest. Eine Daguerreotypie gehört nur in ein professionelles Labor mit Abzug und geschulter Aufsicht: Sie arbeitet mit erhitztem Quecksilber und Jod, beide giftig.

Die Kamera bauen. Eine lichtdichte Schachtel nehmen, etwa einen Schuhkarton, und innen mattschwarz streichen. In die Mitte einer Stirnseite ein Loch von etwa 2 cm schneiden und darüber ein Stück dünne Alufolie kleben, mit einer Nadel durchstochen; ein Loch von etwa 0,3 mm passt zu einer Schachtel von 10 bis 15 cm Tiefe. Das Nadelloch mit einer Klappe aus schwarzem Karton abdecken, die sich heben und senken lässt: Das ist der Verschluss.

Das Bild betrachten. In die gegenüberliegende Seite ein Fenster schneiden und mit Transparentpapier bekleben. Vor einer hellen Szene, Kopf und Schachtel unter einem dunklen Tuch, sieht man das umgekehrte Bild auf dem Papier, genau wie in einer Camera obscura.

Eine Cyanotypie machen. Fertig beschichtetes „Sonnenpapier“, nach Herstelleranleitung verwendet, ist am einfachsten. Die Cyanotypie, 1842 von John Herschel veröffentlicht, nutzt Eisensalze, die sich im Ultraviolett zu Berliner Blau färben. Ein Blatt oder einen Farnwedel unter einer Glasscheibe einige Minuten in der Sonne auf das Papier legen, dann das Papier in Wasser spülen und trocknen lassen.

Weitergehen. Für eine Aufnahme durch das Nadelloch ist die Cyanotypie viel zu langsam: Die Belichtung dauerte Wochen. Um mit der Schachtel selbst zu fotografieren, das Transparentpapier durch eine lichtdichte Rückwand

Ein Cyanotypie-Fotogramm: Wo der Farn das Licht abhielt, blieb das Papier weiß.

ersetzen, die Ränder mit schwarzem Klebeband abdichten und in der Dunkelkammer Schwarzweiß-Fotopapier oder -Film einlegen. Entwickelt und fixiert wird mit den üblichen Dunkelkammerchemikalien, mit Handschuhen, bei guter Lüftung und nach den Angaben auf den Etiketten.

> **Sicherheit.** Cyanotypie-Chemikalien und Dunkelkammerbäder reizen Haut, Augen und Atemwege: Handschuhe und Schutzbrille tragen, die Mittel von Lebensmitteln, Kindern und Haustieren fernhalten und nach Etikett entsorgen. Wer die Cyanotypie-Lösung selbst ansetzt, erhitzt Kaliumhexacyanoferrat(III) nie und mischt es nie mit Säuren. Nicht durch das Nadelloch oder sonst etwas in die Sonne schauen. Historische Verfahren mit Quecksilber, Cyanid oder Äther gehören ausschließlich in ein professionelles Labor mit Absaugung.

Geschichte und Entwicklung

Die Camera obscura war lange vor der Fotografie bekannt, und im 18. Jahrhundert trugen Zeichner tragbare Kästen mit sich, um Landschaften nachzuzeichnen. Chemiker wussten, dass Silbersalze im Licht dunkeln, doch niemand konnte das Nachdunkeln aufhalten. Auf seinem Gut in Saint-Loup-de-Varennes in Burgund erhielt Nicéphore Niépce 1816 flüchtige Kamerabilder und 1826 oder 1827 den Blick aus seinem Arbeitszimmerfenster, heute die älteste erhaltene Kamerafotografie, aufbewahrt im Harry Ransom Center in Austin. Ihre Belichtung wird meist mit mehreren Tagen angegeben, manche Berichte sprechen von etwa acht Stunden.

Niépce ging 1829 eine Partnerschaft mit Louis Daguerre ein und starb 1833. Daguerre arbeitete weiter, und am 19. August 1839 wurde sein Verfahren in einer gemeinsamen Sitzung der Académie des sciences und der Académie des beaux-arts im Einzelnen erklärt; der französische Staat hatte es gekauft und gab es zur freien Nutzung frei, außer in England und Wales, wo ein Patent darauf genommen wurde. In England machte Henry Talbot schon seit einigen Jahren Bilder auf Papier und gab im selben Jahr sein erstes Verfahren bekannt; 1840 erdachte er das Kalotypie-Negativ und veröffentlichte es 1841.

Eine Daguerreotypie war eine einzelne versilberte Platte, unter Glas in einem kleinen Klappetui aufbewahrt.

Ab 1851 brachte das nasse Kollodiumverfahren von Frederick Scott Archer die Negative auf Glas, schärfer als Papier und viel schneller als die Daguerreotypie, doch die Platte musste binnen Minuten beschichtet, belichtet und entwickelt werden. In den 1880er-Jahren verkauften Fabriken gebrauchsfertige Trockenplatten: George Eastman begann 1880, sie für den Verkauf herzustellen, und brachte 1888 die erste Kodak heraus, einen Kasten mit Film für hundert Aufnahmen, den man zum Entwickeln als Ganzes ins Werk zurückschickte. Der Farbfilm setzte sich im 20. Jahrhundert durch, und an dessen Ende begannen elektronische Sensoren die Chemie abzulösen; vor ihnen erzeugt noch immer ein Objektiv das Bild, wie in Giroux' Kasten.

Kennzahlen

Älteste erhaltene Kamerafotografie
Niépce, Saint-Loup-de-Varennes, 1826 oder 1827; Zinnplatte 16,7 × 20,3 cm

Belichtungszeit
Wohl mehrere Tage Sonnenlicht (manche Berichte nennen etwa 8 Stunden)

Daguerreotypie veröffentlicht
19. August 1839, Académie des sciences, Paris

Papiernegativ (Kalotypie)
1840 von Henry Talbot erdacht, 1841 veröffentlicht

Erste Kodak
1888, geladen mit Film für 100 Aufnahmen

Quellen

1. The Niépce Heliograph · Harry Ransom Center, University of Texas at Austin https://www.hrc.utexas.edu/niepce-heliograph/
2. Daguerre introduced photography 175 years ago · George Eastman Museum https://www.eastman.org/blog/daguerre-introduced-photography-175-years-ago
3. Giroux Daguerreotype camera · Victoria and Albert Museum https://collections.vam.ac.uk/item/O1427511/giroux-daguerreotype-camera-camera-daguerre-louis/
4. Hill & Adamson: salted paper prints and the calotype · University of Glasgow Archives & Special Collections https://www.gla.ac.uk/myglasgow/archivespecialcollections/discover/specialcollectionsa-z/hilladamson/saltedpaperprints
5. Collodion glass negatives and the attendant photographic process · Bibliothèque nationale de France https://expositions.bnf.fr/les-nadar/en/the-nadars/collodion-glass-negatives.html
6. Album of cyanotypes of British and Foreign Ferns (Anna Atkins) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co416960
7. Kodak and the Eastman company · Duke University Libraries https://library.duke.edu/rubenstein/scriptorium/eaa/kodak.html
8. Richard Beard (daguerreotype patent in England and Wales) · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/people/cp40983/richard-beard
9. Historique et description des procédés du daguerréotype et du diorama (Daguerre, 1839) · Internet Archive https://archive.org/details/bub_gb_Ae4TAAAAQAAJ
10. History and practice of photogenic drawing on the true principles of the Daguerréotype (McLean, 1839) · Wellcome Collection, via Internet Archive https://archive.org/details/b29310301
11. Replica of Daguerre-Giroux camera · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8189231/replica-of-daguerre-giroux-camera
12. From Daguerreotype to Digital: the daguerreotype process · The Historic New Orleans Collection https://hnoc.org/virtual-exhibitions/from_daguerreotype_to_digital/daguerreotype-process

Fakten geprüft am 2026-10-12

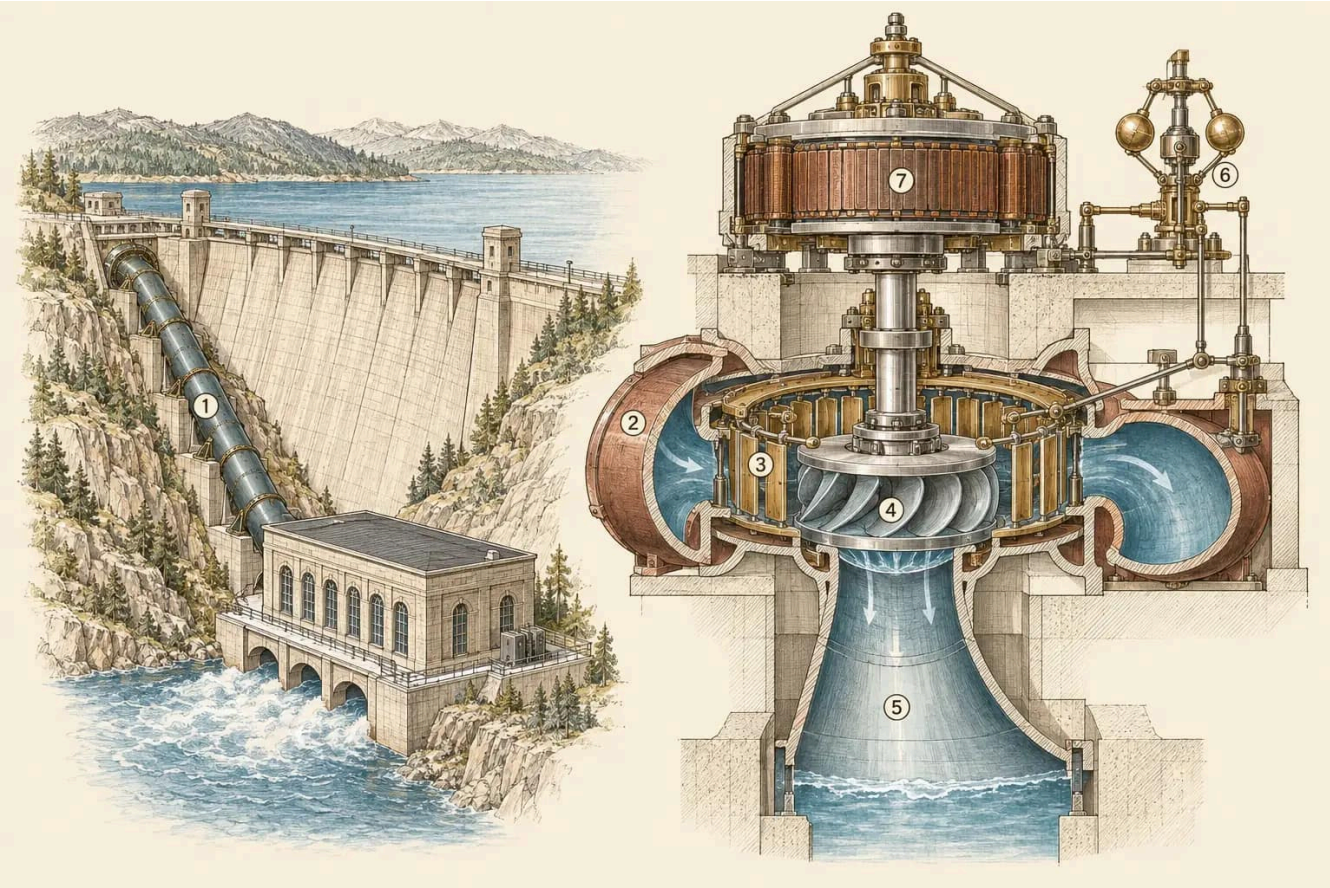
Wasserturbine

Fallendes Wasser wird zu Strom

1827 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Wasserrad (S. 160), Stahl (S. 143), Elektrischer Generator (S. 277)

Führt zu: Aluminium (S. 340)



1 Druckrohrleitung 2 Spiralgehäuse 3 Leitschaufeln 4 Laufrad 5 Saugrohr 6 Drehzahlregler 7 Generator

Eine Wasserturbine ist ein Laufrad mit Schaufeln, das Wasser unter Druck sehr schnell antreibt, entweder in einem geschlossenen Gehäuse oder durch einen Strahl. Wie das Wasserrad nutzt sie die Energie fallenden Wassers, aber in einer viel kleineren und schnelleren Maschine, und seit den 1880er-Jahren treibt sie die Generatoren der Wasserkraftwerke an.

Was es ist

Eine Wasserturbine ist ein Rad mit gekrümmten Schaufeln, das Laufrad, das Wasser unter Druck sehr schnell dreht. Wie das Wasserrad bezieht sie ihre Energie aus Wasser, das aus einer gewissen Höhe fällt. Ein oberschlächtiges Rad dreht sich jedoch an der Luft unter dem Gewicht des Wassers in seinen Zellen, ein unterschlächtiges Rad unter dem Druck der Strömung, mit wenigen Umdrehungen pro Minute. Die Turbine erhält ihr Wasser durch eine Rohrleitung und läuft zehn- bis hundertmal schneller, sodass eine viel kleinere Maschine dieselbe Leistung bringt.

Dank ihrer Drehzahl kann sie einen Generator mit wenig oder ganz ohne Übersetzung antreiben. Fast jedes Wasserkraftwerk nutzt eine von drei Bauarten: das Pelton-Rad, die Francis-Turbine oder die Kaplan-Turbine.

Wie es funktioniert

In einer Gleichdruck- oder Freistrahlturbine wandelt eine Düse den gesamten Druck in einen schnellen Strahl um, und das Laufrad dreht sich in Luft. In einer Überdruckturbine ist das Laufrad eingeschlossen und voll Wasser; der Druck sinkt zwischen den Schaufeln, die wie gewölbte Flügel arbeiten.

Das Pelton-Rad ist eine Freistrahlturbine für große Fallhöhen und kleine Wassermengen. Eine Schneide teilt jeden Becher, spaltet den Strahl und wirft jede Hälfte fast vollständig zurück. Die Francis-Turbine, eine Überdruckturbine und die verbreitetste Bauart, deckt mittlere Fallhöhen ab, etwa 40 bis 600 Meter. Die Kaplan-Turbine, ein Propeller mit drehbaren Flügeln an der Nabe, dient bei geringen Fallhöhen und großen Wassermengen, unterhalb von etwa 80 Metern.

Die Schneide jedes Bechers teilt den Strahl und lenkt beide Hälften zurück.

Die Tafel zeigt einen Francis-Maschinensatz. Das Wasser fließt durch die Druckrohrleitung (1) in das Spiralgehäuse (2), das sich um die Maschine windet und dabei enger wird, damit das Wasser von allen Seiten gleichmäßig eintritt. Die Leitschaufeln (3) versetzen es in Drall und regeln die Durchflussmenge. Es strömt von außen nach innen durch das Laufrad (4) und verlässt es nach unten durch das Saugrohr (5), ein sich erweiterndes Rohr, das es allmählich abbremst und einen Teil der Restenergie zurückgewinnt.

Die verfügbare Leistung beträgt $P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta$: Dichte des Wassers ρ (etwa 1.000 kg/m^3), Erdbeschleunigung g (9,81 m/s^2), Durchfluss Q in m^3/s, Nettofallhöhe H in Metern und Wirkungsgrad η. Bei 100 Metern Fallhöhe, 0,2 m^3/s und 85 % für Turbine und Generator zusammen ergibt sich $P = 1.000 \times 9{,}81 \times 0{,}2 \times 100 \times 0{,}85 \approx 167$ kW. Große Francis-Turbinen allein erreichen über 90 %.

Der Generator (7) sitzt auf derselben Welle, und seine Frequenz folgt der Drehzahl. Der Drehzahlregler (6) hält sie konstant: Er schließt die Leitschaufeln, wenn die Welle schneller wird, und öffnet sie, wenn sie langsamer wird. Er muss allmählich arbeiten, denn wer eine lange Druckleitung plötzlich schließt, löst einen Druckstoß aus, der das Rohr sprengen kann. Bei 100 Umdrehungen pro Minute braucht ein Generator 60 Pole für 50 Hertz.

Bauanleitung

Ein Rad aus Löffeln, gespeist über einen Gartenschlauch aus einem Bach, kann eine Fahrradlampe zum Leuchten bringen. Fragen Sie zuerst den Grundeigentümer und die Wasserbehörde: In den meisten Ländern braucht man für die Entnahme aus einem Gewässer eine Genehmigung.

Fallhöhe messen. Legen Sie einen Schlauch von der Entnahmestelle bis zum Standort des Rades, halten Sie das obere Ende unter Wasser und lassen Sie es laufen, bis keine Luft mehr austritt. Verschließen Sie dann das untere Ende mit einem Manometer: Jedes Bar statischer Druck entspricht etwa 10,2 Metern Fallhöhe. Ein Nivelliergerät und eine Messlatte, bachabwärts von einem markierten Punkt zum nächsten versetzt, dienen zur Kontrolle.

Durchfluss messen. Ein Rinnsal unter etwa 5 Litern pro Sekunde leiten Sie durch ein Rohr in einem kleinen Erddamm und stoppen, wie lange ein Eimer zum Volllaufen braucht. Bei einem größeren Bach stoppen Sie einen Schwimmer über 10 Meter, multiplizieren seine Geschwindigkeit mit etwa 0,85 und dann mit Breite und mittlerer Tiefe.

Leistung berechnen. Mit 8 Metern Fallhöhe und 0,3 Litern pro Sekunde im Schlauch führt das Wasser P = 1.000 × 9,81 × 0,0003 × 8 ≈ 24 W mit sich. Schlauch und Düse verbrauchen einen Teil der Fallhöhe, und ein selbst gebautes Rad mit Dynamo macht nur aus einem bescheidenen Teil des Rests Strom. Rechnen Sie mit einigen Watt, vielleicht genug für einen Fahrraddynamo mit 3 Watt, und messen Sie, was tatsächlich ankommt. Lassen Sie den größten Teil des Bachs den Fischen.

Zwei Löffel nebeneinander bilden einen einfachen geteilten Becher.

Laufrad bauen. Befestigen Sie eine Sperrholzscheibe von etwa 30 cm Durchmesser auf einer Stahlachse, die in zwei Lagern läuft. Schrauben Sie acht bis zehn Paare Esslöffel an den Rand, jeweils nebeneinander, sodass ihre Mulden über den Rand ragen, zum Strahl zeigen und zusammen eine Schneide bilden.

Strahl ausrichten. Setzen Sie eine Strahldüse auf den Schlauch und klemmen Sie sie so fest, dass der Strahl die Schneiden tangential trifft. Ohne Verluste träte er mit 12,5 m/s aus; mit der Reibung im Schlauch sind etwa 10 m/s wahrscheinlicher. Die Löffel arbeiten am besten mit der halben Strahlgeschwindigkeit, gemessen auf dem Kreis, auf dem der Strahl sie trifft: etwa 270 Umdrehungen pro Minute bei 35 cm Durchmesser.

Dynamo anbringen. Setzen Sie eine zweite, glatte Scheibe von etwa 35 cm Durchmesser auf die Achse und drücken Sie die Laufrolle eines Seitenläuferdynamos gegen ihren Rand. Bei 270 Umdrehungen pro Minute bewegt er sich wie ein Fahrradreifen bei etwa 18 km/h. Verbinden Sie ihn mit zwei isolierten Drähten mit einer Fahrradlampe: Am Fahrrad führt der Rahmen den Strom zurück, hier muss es ein Draht tun. Leiten Sie das Wasser unterhalb des Rades zurück in den Bach.

> **Sicherheit.** Arbeiten Sie nie allein an einem Bach und betreten Sie ihn nicht bei Hochwasser: Schnelles, kaltes Wasser reißt Menschen um und lässt sie ertrinken. Ein Schlauch, der 8 Meter hinabführt, steht schon unter fast einem Bar. Öffnen und schließen Sie lange Leitungen langsam, denn ein plötzliches Absperren erzeugt einen Druckstoß, der Verbindungen sprengt. Halten Sie Augen und Finger aus dem Strahl, schützen Sie das Laufrad mit einer Abdeckung und sperren Sie das Wasser ab, bevor Sie es berühren. Isolieren Sie jede Verbindung und halten Sie die Finger auch von der Dynamorolle fern. Größere Generatoren erreichen gefährliche Spannungen: Schließen Sie nie einen an die Elektroinstallation eines Gebäudes an.

Geschichte und Entwicklung

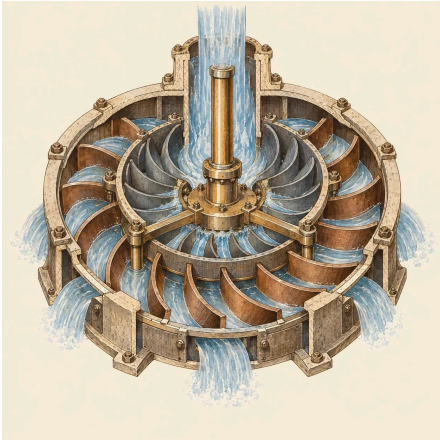
1825 baute Claude Burdin, Professor an der Bergbauschule von Saint-Étienne, in Pontgibaud eine Turbine mit 67 % Wirkungsgrad. Sein ehemaliger Schüler Benoît Fourneyron machte daraus eine Industriemaschine: Im April 1827 stellte er im Eisenwerk von Pont-sur-l'Ognon eine Turbine von sechs PS bei 1,40 Metern Fallhöhe auf.

1849 baute James B. Francis in Lowell, Massachusetts, eine verbesserte, von außen nach innen durchströmte Turbine und veröffentlichte 1855 seine Versuche. In den Goldgräbergebieten Kaliforniens baute Lester Pelton 1878 sein erstes Rad und ließ 1880 den geteilten Becher patentieren.

1878 beleuchtete Lord Armstrong sein Haus Cragside in Northumberland mit Bogenlampen, gespeist durch das Wasser der Seen auf dem Anwesen. In Appleton, Wisconsin, lieferte ein Kraftwerk ab dem 30. September 1882 Gleichstrom. 1895 nahm das Adams-Kraftwerk an den Niagarafällen Westinghouse-Generatoren von 5.000 PS in Betrieb, die Wechselstrom nach dem System von Nikola Tesla lieferten; ab November 1896 erreichte der Strom

Buffalo. Viktor Kaplan meldete 1913 sein Patent auf verstellbare Laufradschaufeln an, und die erste industrielle Kaplan-Turbine lief 1919 in Velm in Niederösterreich.

2023 gab es weltweit 1.412 GW Wasserkraftleistung. Der Drei-Schluchten-Damm in China kommt allein auf 22,5 GW, und für seinen Stausee wurden rund 1,3 Millionen Menschen umgesiedelt. Dämme versperren Wanderfischen den Weg und halten Sedimente zurück: Laut einer 2019 veröffentlichten Studie flossen nur noch 37 % der 246 längsten Flüsse der Welt auf ganzer Länge frei.



In Fourneyrons Turbine strömt das Wasser nach außen, von den festen Leitschaufeln in den drehenden Kranz.

Kennzahlen

Erste industrielle Turbine
Benoît Fourneyron, April 1827, Pont-sur-l'Ognon (Frankreich): 6 PS bei 1,40 m Fallhöhe

Peltons geteilte Becher
US-Patent 233.692 vom 26. Oktober 1880

Wasserkraft weltweit
1.412 GW installierte Leistung (2023)

Verfügbare Leistung
$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta$

Größtes Kraftwerk
Drei-Schluchten-Damm, China: 22,5 GW

Quellen

1. Usine de transformation des métaux dite forges de Pont-sur-l'Ognon (IA70000081) · Ministère de la Culture, base Mérimée https://pop.culture.gouv.fr/notice/merimee/IA70000081
2. Instrument de démonstration en mécanique des fluides n° 5 : tourniquet hydraulique · Inventaire du patrimoine, Région Bourgogne-Franche-Comté https://patrimoine.bourgognefranchecomte.fr/dossier/pdf/IM21008546
3. Boyden Hydraulic Turbines (landmark brochure) · American Society of Mechanical Engineers https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/ResourceFiles/AboutASME/Who%20We%20Are/Engineering%20History/Landmarks/5-Boyden-Hydraulic-Turbines-1871.pdf
4. #157 Pelton Waterwheel Collection · American Society of Mechanical Engineers https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/157-pelton-waterwheel-collection
5. US 233,692: Water-wheel (L. A. Pelton, 26 October 1880) · United States Patent Office, via Google Patents https://patents.google.com/patent/US233692A/en
6. 100 Jahre Kaplan-Turbine (H. Jaberg, WasserWirtschaft 6/2014) · Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen, TU Graz https://www.hfm.tugraz.at/fileadmin/user_upload/pics/news/2020/201406_Helmut_Jaberg_Viktor-Kaplan-Kaplanturbine.pdf
7. History of Cragside · National Trust https://www.nationaltrust.org.uk/visit/north-east/cragside/history-of-cragside
8. Milestones: Vulcan Street Plant, 1882 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Vulcan_Street_Plant,_1882
9. Milestones: Adams Hydroelectric Generating Plant, 1895 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Adams_Hydroelectric_Generating_Plant,_1895
10. Niagara Power Houses · Edison Tech Center https://edisontechcenter.org/niagara/
11. Types of Hydropower Turbines · U.S. Department of Energy, Water Power Technologies Office https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines
12. Turbine types · Electrical and Mechanical Services Department, Hong Kong SAR Government https://re.emsd.gov.hk/english/other/hydroelectric/Turbine_types.html
13. Glossary of Hydropower Terms · U.S. Bureau of Reclamation https://www.usbr.gov/power/edu/Glossary%20of%20Hydropower%20Terms.pdf
14. Hydraulic head · Energy Education, University of Calgary https://energyeducation.ca/encyclopedia/Hydraulic_head
15. Water (FAO Training Series), chapter 3: Estimates of water flow · FAO https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705e/x6705e03.htm
16. 2024 World Hydropower Outlook · International Hydropower Association https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook
17. Thousands being moved from China's Three Gorges, again (Reuters) · Eco-Business https://www.eco-business.com/news/thousands-being-moved-from-chinas-three-gorges-again/
18. New study: just one-third of the world's longest rivers remain free-flowing · McGill University Reporter (on Grill et al., Nature 569, 2019) https://reporter.mcgill.ca/new-study-just-one-third-of-the-worlds-longest-rivers-remain-free-flowing/
19. Fluid Machinery, lectures 26–27: Pelton wheel · NPTEL, Indian Institute of Technology Kanpur https://archive.nptel.ac.in/content/storage2/courses/112104117/chapter_7/7_5.html
20. Pelton Impulse Water Turbine Design Formulas · Engineers Edge https://www.engineersedge.com/hydraulic/pelton_impulse_water_turbine_15629.htm

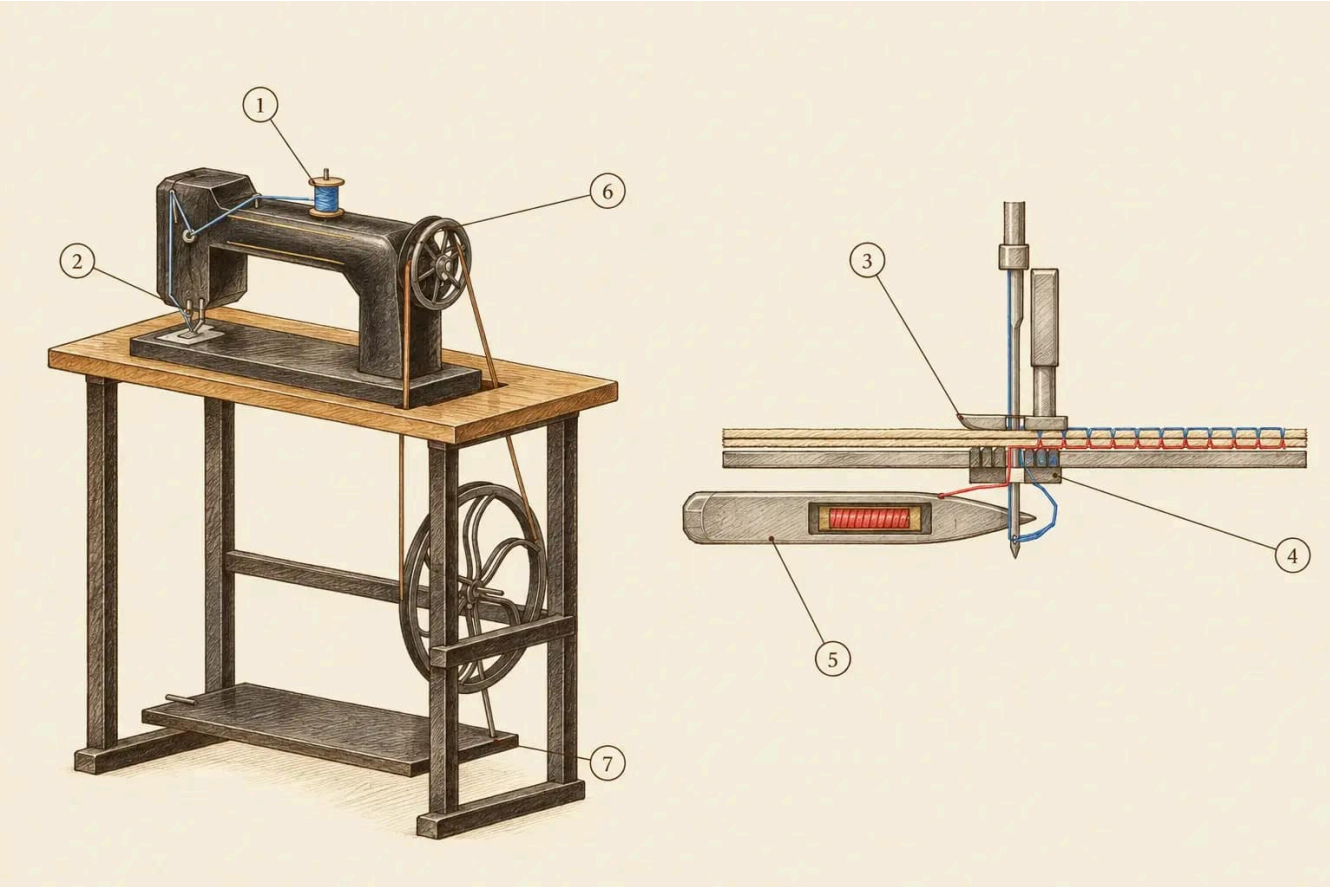
Fakten geprüft am 2026-10-14

Nähmaschine

Tausend Stiche pro Minute

1830 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Zahnräder (S. 156), Eisenverhüttung (S. 138), Weben (S. 44), Stahl (S. 143)



1 Garnrolle des Oberfadens 2 Nadelstange und Nadel 3 Nähfuß 4 Transporteur 5 Schiffchen mit Spule 6 Handrad 7 Tritt und Schwungrad

Eine Nähmaschine verbindet Stoff mit maschinell gebildeten Stichen, meist indem sie einen Oberfaden, geführt von einer Nadel mit dem Öhr nahe der Spitze, um einen Unterfaden aus einem Schiffchen oder einer Spulenkapsel schlingt. Barthélemy Thimonniers Kettenstichmaschine von 1830 war die erste, die in einer Werkstatt arbeitete; Elias Howes Steppstich-Patent von 1846 und Isaac Singers Maschine von 1851 machten sie zum Werkzeug von Industrie und Haushalt.

Was es ist

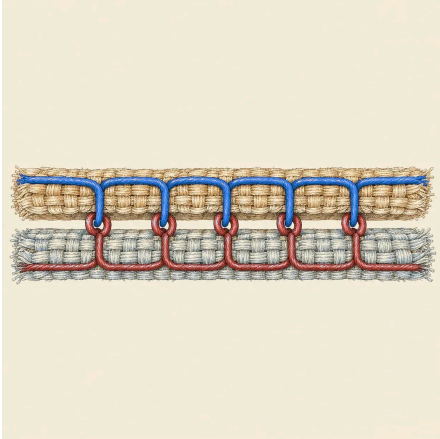
Eine Nähmaschine sticht eine eingefädelte Nadel immer wieder durch den Stoff und verschlingt den Faden bei jedem Durchgang, damit die Stiche halten. Ihr Mechanismus wiederholt wenige Bewegungen: Die Nadel fährt hinab und wieder hinauf, ein Greifer oder ein Schiffchen fängt den Faden unter dem Stoff, und der Stoff rückt um einen Stich weiter.

Die meisten Maschinen nähen einen Doppelsteppstich: Zwei Fäden, einer von oben und einer von unten, verschlingen sich in der Mitte des Stoffes. Die typische Maschine der 1860er- bis 1880er-Jahre, mit der das

Maschinennähen in Werkstätten und Wohnungen kam, war ein gusseiserner Oberteil auf einem Tretgestell, mit gerader Nadel und bootsförmigem Schiffchen.

Wie es funktioniert

Die Nadel einer Nähmaschine hat ihr Öhr nahe der Spitze, anders als eine Handnähnadel, und sie wird nie losgelassen: Sie bleibt in ihrer Stange eingespannt, während Spitze und Öhr durch den Stoff gehen. Sie führt den Oberfaden durch das Gewebe und das Loch der Stichplatte. Sobald sie wieder steigt, hält die Reibung unter dem Stoff etwas Faden zurück, und neben der Nadel öffnet sich eine kleine Schlinge.



Im fertigen Steppstich verschlingen sich Ober- und Unterfaden zwischen den Stofflagen.

In diesem Augenblick fährt das spitze Schiffchen durch die Schlinge und trägt dabei eine kleine Spule mit Unterfaden. Die Schlinge gleitet um das Schiffchen herum und hinten ab, sodass der Oberfaden nun den Unterfaden umschließt. Der Fadenhebel vorn an der Maschine zieht dann den Oberfaden an, und die Kreuzung wandert in die Mitte des Stoffes. Spannfedern an beiden Fäden bestimmen, wo sie liegt: Ist ein Faden zu straff, sieht man den Knoten auf einer Seite.

Das Langschiffchen trägt die Spule mit dem Unterfaden; der Faden tritt durch ein Loch in seiner Seite aus, wo eine kleine, hier nicht gezeichnete Feder seine Spannung einstellt.

Zwischen zwei Stichen muss der Stoff weiter. Der Nähfuß drückt ihn auf eine kleine gezahnte Leiste, den Transporteur, der durch Schlitze der Stichplatte aufsteigt, den Stoff um eine Stichlänge nach hinten schiebt und wieder absinkt. Dieselbe Hauptwelle, die über eine Kurbel die Nadelstange bewegt, treibt von unten Schiffchen und Transporteur an, sodass alle drei im Takt bleiben. Bei einer Tretnähmaschine wippen die Füße einen breiten eisernen Tritt, eine Stange dreht ein schweres Schwungrad, und ein Lederriemen überträgt die Bewegung hinauf zum Handrad am Arm.

Der ältere einfädige Kettenstich braucht keinen Unterfaden. In Thimonniers Maschine zog eine Hakennadel jede neue Schlinge durch die vorige; spätere einfädige Kettenstichmaschinen arbeiten mit einer Öhrnadel und einem Greifer darunter, der jede Schlinge für den nächsten Stich festhält. Der Kettenstich ist schnell, aber zieht man am Fadenende am Schluss der Naht, kann sich die ganze Naht auflösen.

Wie man sie baut

Eine funktionierende Nähmaschine braucht gehärtete Nadeln, Nocken und genau passende Teile aus einer mechanischen Werkstatt. Ein großes Modell auf einem einfachen Rahmen zeigt, wie sich die beiden Fäden eines Steppstichs verschlingen.

Rahmen bauen. Ein Stück locker gewebtes Jutegewebe über einen Bilderrahmen oder Stickrahmen spannen und in bequemer Höhe befestigen, sodass man darunter greifen kann.

Nadel bauen. Einen Rundstab aus Holz von etwa 30 cm Länge und 8 mm Dicke an einem Ende mit dem Bleistiftspitzer stumpf anspitzen und etwa 1 cm von der Spitze ein 4-mm-Loch bohren. Einen dicken Wollfaden in einer Farbe durch dieses Öhr fädeln und ein Ende von etwa 15 cm hängen lassen.

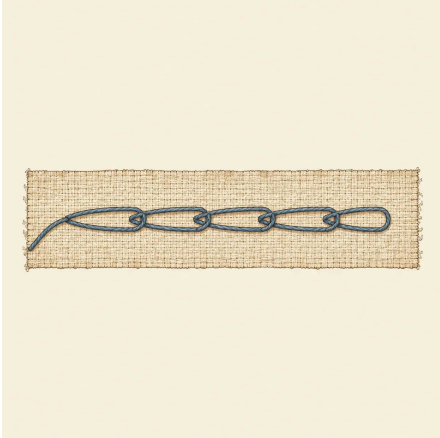
Schiffchen bauen. Etwa zwei Meter Wollfaden in einer zweiten Farbe um eine Wäscheklammer oder ein kleines Holzschiffchen wickeln. Vor dem ersten Stich das Ende jedes Fadens mit Klebeband hinten am Rahmen befestigen, damit es nicht durchrutscht.

Nähen. Eine Person sticht die Nadel durch das Gewebe, bis das Öhr deutlich darunter ist, und hebt sie dann um einen Zentimeter, während sie den Faden über dem Stoff festhält, sodass sich darunter eine Schlinge öffnet. Eine zweite Person schiebt das Schiffchen von vorn nach hinten durch die Schlinge und wickelt bei Bedarf Faden ab. Die Nadel wieder hochziehen und beide Fäden straffen, bis die Kreuzung im Gewebe verschwindet. Den nächsten Stich etwa 2 cm weiter auf dem Stoff setzen und wiederholen. Dreht man den Rahmen um, sieht man beide Farben zwischen den Seiten verbunden.

> **Sicherheit.** Beim Bohren das Werkstück in einen Schraubstock oder mit einer Zwinge spannen und die Finger vom Bohrer fernhalten. An einer echten Nähmaschine die Finger von der laufenden Nadel fernhalten, nie unter den Nähfuß greifen, solange die Maschine läuft, und eine elektrische Maschine vor dem Einfädeln, dem Nadelwechsel oder dem Entfernen von Fusseln ausschalten und den Stecker ziehen.

Geschichte und Entwicklung

Seit dem späten 18. Jahrhundert ließen sich mehrere Erfinder Nähvorrichtungen patentieren, doch die erste Maschine im Produktionseinsatz baute der französische Schneider Barthélemy Thimonnier, patentiert 1830. Sie nähte mit einer Hakennadel einen Kettenstich, nach Art der Tamburinstickerei. Bald arbeiteten 80 seiner Maschinen in einer Pariser Werkstatt an Militärkleidung. Eine Menge Schneider, die um ihr Auskommen fürchteten, drang ein und zerstörte sie. Die meisten Berichte datieren den Angriff auf 1831, einige auf zehn Jahre später. Thimonnier starb 1857.



Beim Kettenstich hält nur die nächste Schlinge die vorige fest. Die letzte wird von keiner weiteren Schlinge gehalten; zieht man den Faden an diesem Ende, löst sich die Naht Schlinge um Schlinge.

In den Vereinigten Staaten erhielt Elias Howe am 10. September 1846 das Patent Nr. 4.750 für eine Steppstichmaschine. Sie arbeitete mit einer gebogenen Nadel, deren Öhr nahe der Spitze saß, und einem Schiffchen für den zweiten Faden, und er gab an, sie nähe 250 Stiche pro Minute. 1851 ließ Isaac Merritt Singer eine Maschine patentieren, deren gerade Nadel sich über einem flachen Tisch auf und ab bewegte, die bis heute übliche Anordnung. Die Patente überschnitten sich, und die Hersteller verklagten einander, bis Howe, Singer, Wheeler and Wilson sowie Grover and Baker 1856 ihre Patente in der Sewing Machine Combination bündelten; Howe erhielt für jede verkaufte Maschine eine Lizenzgebühr.

Singers Teilhaber Edward Clark verkaufte die Maschinen auf Raten und über Vertreter, die von Haus zu Haus gingen. 1875 wurden rund 250.000 Singer-Maschinen lizenziert, gegenüber etwa 104.000 beim nächsten Konkurrenten, Wheeler and Wilson. Umlaufgreifer ersetzten bei schnellen Maschinen das Schiffchen, seit dem Ende des 19. Jahrhunderts wurden Elektromotoren eingebaut, und Bekleidungsfabriken hingen bald von Reihen motorgetriebener Maschinen ab, die mehrere tausend Stiche pro Minute nähten.

Kennzahlen

Thimonniers Maschine

1830 in Frankreich patentiert; 80 Maschinen nähten in Paris Uniformen, bis Schneider sie zerstörten

Singers Patent

12. August 1851: gerade Nadel, die sich senkrecht über einem flachen Tisch bewegt

Lizenzierte Singer-Maschinen 1875

Rund 250.000 lizenzierte Maschinen, mehr als doppelt so viele wie der nächste Konkurrent

Howes Steppstich-Patent

US-Patent Nr. 4.750, 10. September 1846; nach seinen Angaben 250 Stiche pro Minute

Sewing Machine Combination

1856, der erste Patentpool der amerikanischen Industrie

Quellen

1. Copy of Thimonnier's chain-stitch sewing machine, 1830 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co44718/copy-of-thimonniers-chain-stitch-sewing-machine-1830-sewing-machines
2. Sewing Machine (Designs for Democracy) · U.S. National Archives https://www.archives.gov/exhibits/designs_for_democracy/symbols_and_substance/articles/sewing_machine_1.html
3. Isaac M. Singer (Scientist of the Day) · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/isaac-m-singer/
4. 'New Family' sewing machine (model 12/12k) · Victoria and Albert Museum https://collections.vam.ac.uk/item/O1351206
5. The Invention of the Sewing Machine (Grace Rogers Cooper, Smithsonian Institution, 1968) · Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/files/32677/32677-h/32677-h.htm
6. Singer New Family sewing machine, 1865 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co44768/singer-new-family-sewing-machine-1865-1
7. Instructions for using and adjusting the Singer 12K sewing machine · ISMACS International (Needlebar archive) https://ismacs.net/needlebar/main/manuals/singer12k/
8. Howe Machine Company instruction book · ISMACS International (Needlebar archive) https://ismacs.net/needlebar/main/manuals/howe/index4.html
9. Singer oscillating shuttle machines: retiming · Singer Sewing Info https://www.singersewinginfo.co.uk/28timing
10. Needles for domestic Singer sewing machines · Singer Sewing Info https://www.singersewinginfo.co.uk/needles

Fakten geprüft am 2026-10-12

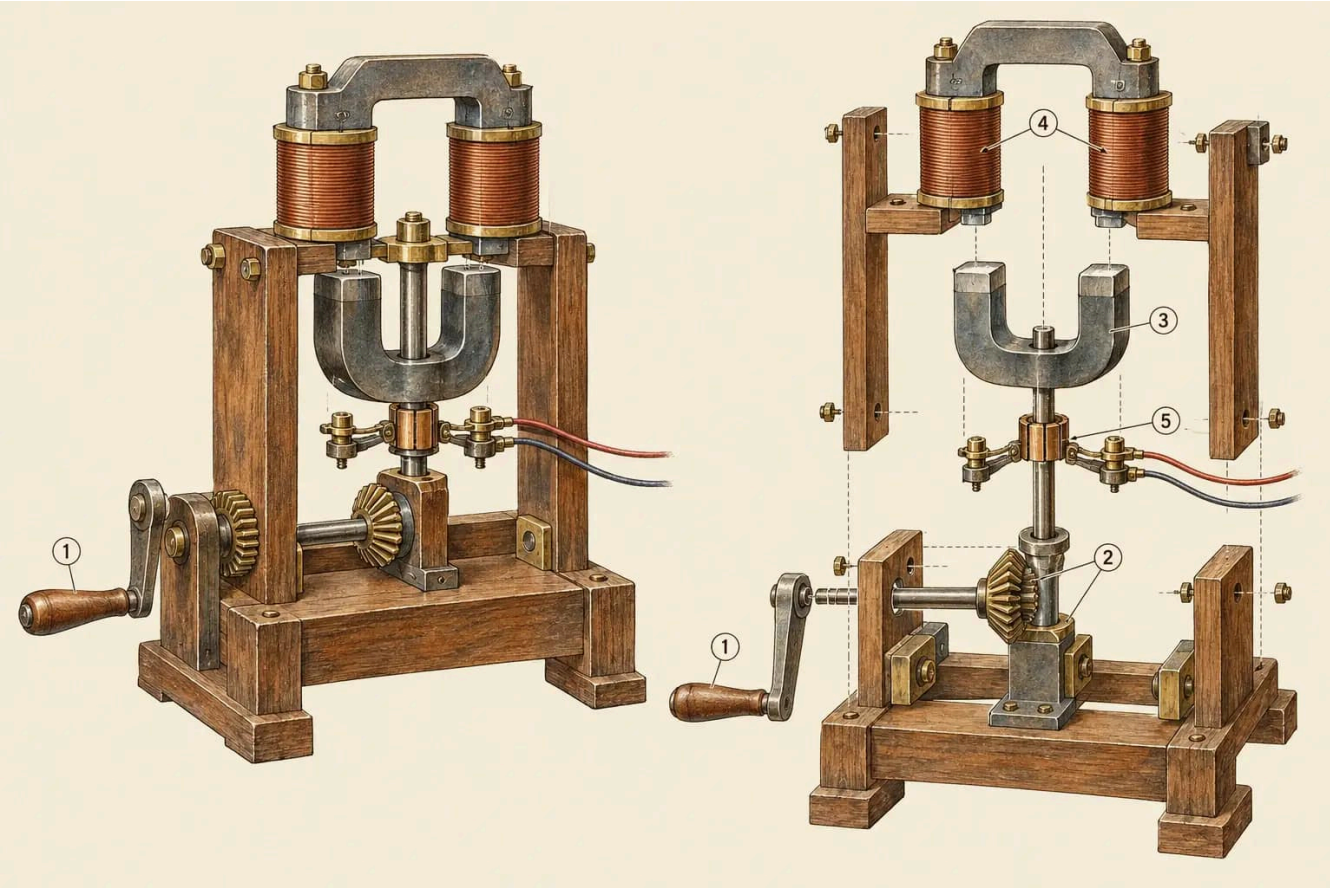
Elektrischer Generator

Bewegung, in Strom verwandelt

1831 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Batterie (S. 243), Eisenverhüttung (S. 138)

Führt zu: Aluminium (S. 340), Bleiakkumulator (S. 307), Glühlampe (S. 326), Radio (S. 349), Dampfturbine (S. 330), Transformator (S. 335), Wasserturbine (S. 268), Windkraftanlage (S. 344), Röntgenaufnahme (S. 353)



1 Handkurbel 2 Kegelräder 3 Hufeisenmagnet 4 Spulen auf Eisenkernen 5 Kommutator und Bürsten

Ein elektrischer Generator wandelt mechanische Bewegung in elektrischen Strom um, indem er einen Magneten und eine Drahtspule aneinander vorbeibewegt. Michael Faraday entdeckte das Prinzip 1831, und fast der gesamte heute verbrauchte Strom stammt noch immer aus Maschinen, die darauf beruhen.

Was es ist

Ein Generator wandelt mechanische Arbeit, etwa von einer Handkurbel, einem Wasserrad, einer Dampfmaschine oder einer Turbine, in elektrischen Strom um. Dazu braucht er einen Magneten, eine Spule aus Kupferdraht und eine Vorrichtung, die das eine am anderen vorbeibewegt.

Batterien sind teuer und erschöpfen sich; Generatoren erzeugten Strom in großen Mengen aus Kohle oder fallendem Wasser. Kraftwerke, Lichtmaschinen im Auto, Fahrraddynamos und Windkraftanlagen arbeiten alle nach diesem Prinzip.

Wie es funktioniert

Das Prinzip heißt elektromagnetische Induktion. Ändert sich der magnetische Fluss durch eine Spule (also wie viel Feld sie durchsetzt), entsteht zwischen ihren Enden eine Spannung. Bleibt der Fluss gleich, entsteht keine Spannung. Je schneller sich der Fluss ändert und je mehr Windungen die Spule hat, desto höher ist die Spannung.

Faradays Induktionsring: Die Nadel schlug nur in dem Augenblick aus, in dem die Batterie angeschlossen oder abgetrennt wurde.

Bei der Maschine auf der Tafel, die Hippolyte Pixii 1832 baute, dreht eine Kurbel über ein Paar Kegelräder eine senkrechte Welle. Die Welle trägt einen dauermagnetischen Hufeisenmagneten, dessen Pole dicht unter zwei feststehenden Spulen auf Eisenkernen vorbeistreichen. Kommt ein Nordpol unter eine Spule, wächst der Fluss durch sie, und der Strom fließt in eine Richtung. Entfernt sich der Pol, nimmt der Fluss ab, und der Strom kehrt sich um. Der Südpol wiederholt dann den Ablauf mit umgekehrtem Feld, die Maschine allein erzeugt also Wechselstrom.

Pixii fügte auf Anregung von André-Marie Ampère einen Kommutator hinzu: einen Schalter auf der Welle, der die beiden Ausgangsanschlüsse bei jeder halben Umdrehung vertauscht, genau dann, wenn der Strom seine Richtung wechselt. So entsteht ein pulsierender Gleichstrom, mit dem man Batterien laden oder Wasser zerlegen kann.

Faradays Scheibe von 1831 lieferte einen schwachen, aber stetigen Gleichstrom.

Sobald Strom fließt, werden die Spulen selbst zu Magneten und bremsen die Bewegung. Deshalb geht die Kurbel schwerer, wenn eine Lampe angeschlossen ist. Die abgegebene elektrische Energie entspricht der Arbeit, die Hand oder Maschine hineinstecken, abzüglich der Verluste durch Reibung und Wärme.

Dauermagnete waren im 19. Jahrhundert schwach, deshalb verwendeten große Maschinen Elektromagnete. In einer selbsterregten Dynamomaschine speist ein Teil des eigenen Stroms diese Magnete. Der schwache Restmagnetismus im Eisen erzeugt einen kleinen Strom, der das Feld verstärkt, das wiederum den Strom erhöht, bis sich die Spannung auf einem Wert einpendelt, den die Drehzahl und die Sättigung des Eisens bestimmen. Ein moderner Kraftwerksgenerator dreht einen Elektromagneten in feststehenden Wicklungen; mit zwei Polen läuft er bei 50 Hertz mit 3.000 Umdrehungen pro Minute, bei 60 Hertz mit 3.600.

Wie man ihn baut

Eine kleine handgekurbelte Wechselstrommaschine kann eine LED oder ein Taschenlampenbirnchen zum Leuchten bringen.

Den Läufer bauen. Eine Scheibe aus Sperrholz oder Hartholz mit etwa 15 cm Durchmesser zuschneiden. Acht flache Scheibenmagnete (Ferrit oder Neodym) gleichmäßig verteilt nahe am Rand auf eine Seite kleben, sodass die nach außen weisenden Flächen abwechselnd Nord, Süd, Nord, Süd zeigen. Mit Schnur umwickeln, denn ein loser Magnet fliegt bei hoher Drehzahl davon.

Die Spulen wickeln. Acht flache Spulen aus Kupferlackdraht von 0,3 bis 0,5 mm Stärke wickeln, jede mit einigen hundert Windungen und alle im selben Drehsinn, auf einen Wickelkörper etwa von der Größe eines Magneten.

Den Ständer montieren. Die Spulen auf einem Brett parallel zum Läufer befestigen, jede gegenüber einem Magneten, mit einem Abstand von wenigen Millimetern. Benachbarte Spulen stehen immer entgegengesetzten Polen gegenüber, deshalb in Reihe schalten und dabei jede zweite Spule umgekehrt anschließen; dann addieren sich ihre Spannungen.

Übersetzen. Ein Riemen von einer großen Riemenscheibe an der Kurbel zu einer kleinen auf der Läuferwelle erhöht die Drehzahl auf das Vier- bis Fünffache.

Gleichrichten und prüfen. Die Maschine liefert Wechselstrom. Vier Dioden in Brückenschaltung machen daraus pulsierenden Gleichstrom. Eine LED über einen Widerstand von 1 Kiloohm und 0,5 Watt an die Brücke anschließen; er hält den Strom unter etwa 20 Milliampere, solange die Ausgangsspannung unter etwa 20 Volt bleibt. Vor kräftigem Kurbeln die Spannung mit einem Messgerät prüfen. Zum Laden eines Akkus braucht man einen passenden Laderegler für dessen Typ, Dioden allein genügen nicht.

Ohne gekaufte Magnete kann man Stahlstäbe in einer Spule magnetisieren, die einige Sekunden lang von einer Batterie gespeist wird, mit einer Autoglühlampe in Reihe, die den Strom begrenzt. Eine selbsterregte Dynamomaschine braucht, einmal durch den Restmagnetismus in Gang gesetzt, überhaupt keinen Dauermagneten.

> **Sicherheit.** Drehende Teile erfassen Finger, Haare und lose Kleidung: Riemen und Läufer abdecken. Neodym-Magnete schnappen so heftig zusammen, dass sie die Haut einklemmen und zersplittern können; von Herzschrittmachern fernhalten. Die Spannung steigt mit der Drehzahl, und größere Maschinen erreichen gefährliche Werte. Einen selbst gebauten oder tragbaren Generator nie an die Hausinstallation oder an das Stromnetz anschließen: Strom, der ins Netz zurückfließt, kann Arbeiter an den Leitungen töten. Eine solche Verbindung darf nur eine Elektrofachkraft mit einem vorschriftsmäßigen Umschalter herstellen.

Geschichte und Entwicklung

1820 zeigte Hans Christian Ørsted, dass ein elektrischer Strom eine Kompassnadel ablenkt. Michael Faraday schloss daraus, dass umgekehrt auch Magnetismus Elektrizität erzeugen müsste. Am 29. August 1831 wickelte er an der Royal Institution in London zwei Spulen auf einen Eisenring und sah, wie die Nadel eines Galvanometers jedes Mal ausschlug, wenn er an der anderen Spule eine Batterie anschloss oder abtrennte. Im Herbst desselben Jahres ließ er eine Kupferscheibe zwischen den Polen eines Magneten rotieren und gewann daraus einen stetigen Strom. Am 24. November 1831 legte er seine Ergebnisse der Royal Society vor.

Innerhalb eines Jahres baute Pixii, ein Pariser Instrumentenbauer, die handgekurbelte Maschine auf der Tafel. 1866 und 1867 stellten Samuel Alfred Varley, Werner Siemens und Charles Wheatstone unabhängig voneinander die selbsterregte Dynamomaschine vor, und Siemens gab dem dynamoelektrischen Prinzip seinen Namen. Um 1870 baute Zénobe Gramme einen Ringanker, der einen gleichmäßigen Strom lieferte.

Am 4. September 1882 begann Thomas Edisons Pearl Street Station in New York, Gleichstrom mit 110 Volt aus sechs dampfgetriebenen „Jumbo“-Dynamos zu liefern. Über weite Entfernungen setzte sich später der Wechselstrom durch, weil Transformatoren seine Spannung erhöhen können; 1891 übertrug eine Drehstromleitung Energie über 175 km von Lauffen am Neckar nach Frankfurt. Charles Parsons kuppelte 1884 einen Dynamo mit einer Dampfturbine, und seither liefern turbinengetriebene Generatoren den Strom der meisten großen Kraftwerke. 1975 ging am Grand-Coulee-Staudamm die erste von drei Einheiten mit je 600 MW in Betrieb, mit einem Ständer von 22 Metern Durchmesser.

Der Gramme-Ring verteilte die Wicklung rund um den Anker, sodass der Strom kaum noch pulsierte.

Kennzahlen

Entdeckung der Induktion
29. August 1831, durch Michael Faraday

Pixiis magnetelektrische Maschine
Paris, 1832

Selbsterregte Dynamomaschine
1866 bis 1867 (Varley, Siemens, Wheatstone)

Pearl Street Station, 1882
Sechs Dynamos mit je etwa 100 kW, 110 V Gleichstrom

Quellen

1. Michael Faraday · The Institution of Engineering and Technology (IET) Archives https://www.theiet.org/membership/library-archives/the-iet-archives/biographies/michael-faraday/
2. Magnetoelectric machine by Pixii · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/object/MagnetoelectricMachineByPixii.html
3. Chronik: Generatoren · VDE Verband der Elektrotechnik https://www.vde.com/de/geschichte/chronik/generatoren
4. Milestones: Pearl Street Station, 1882 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Pearl_Street_Station

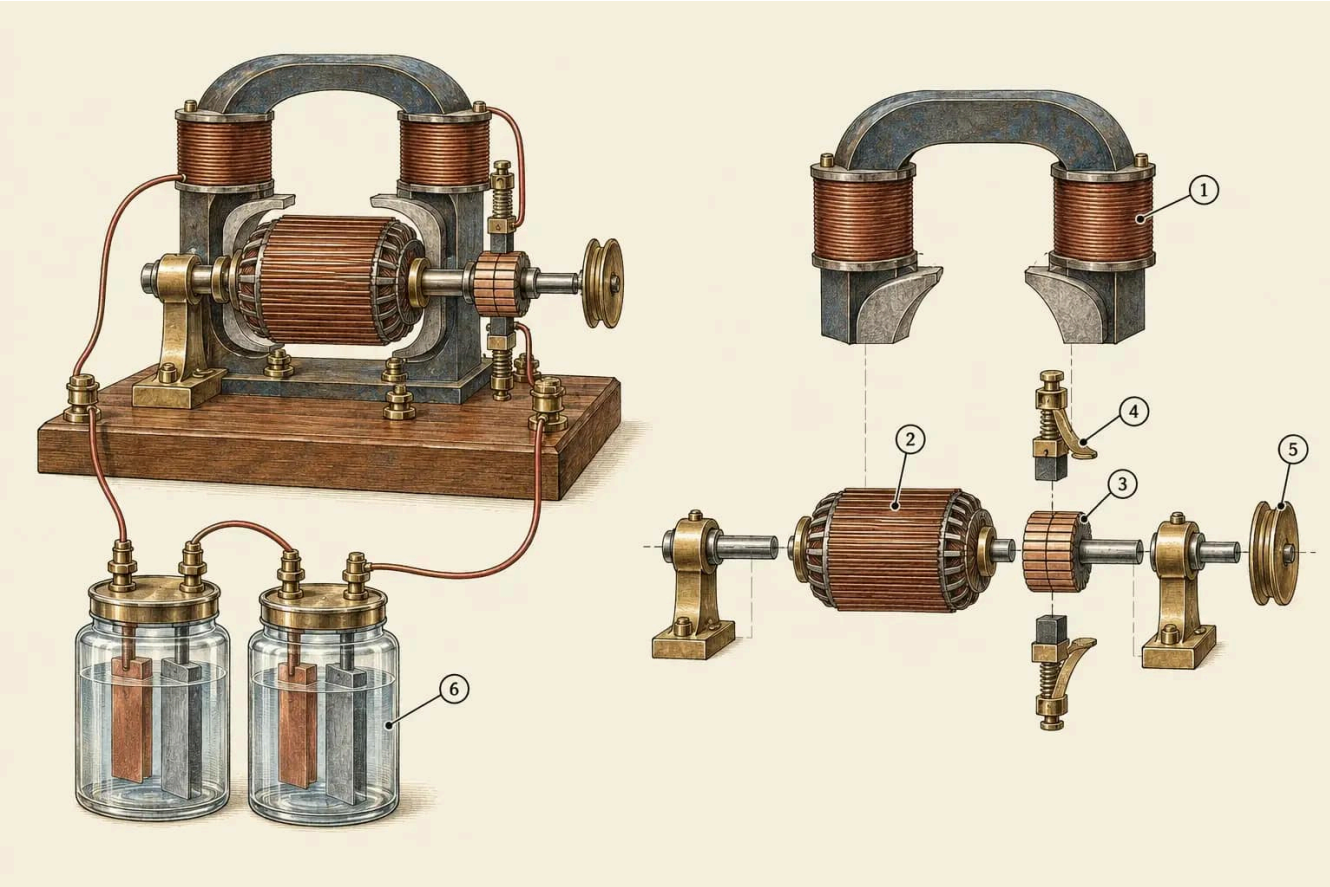
Fakten geprüft am 2026-10-11

Elektromotor

Strom, der eine Welle dreht

1834 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Batterie (S. 243), Eisenverhüttung (S. 138)



1 Feldmagnet 2 Ankerwicklung 3 Kommutator 4 Bürste 5 Welle und Riemenscheibe 6 Batterie

Ein Elektromotor macht aus Strom eine Drehung: Eine stromdurchflossene Spule zwischen Magnetpolen wird seitlich gedrückt, und ein Kommutator oder ein Drehfeld sorgt dafür, dass dieser Druck immer in dieselbe Richtung wirkt. Moritz Jacobis Motor von 1834 leistete weit mehr als alle früheren; heute verbrauchen motorgetriebene Systeme rund die Hälfte des Stroms auf der Welt.

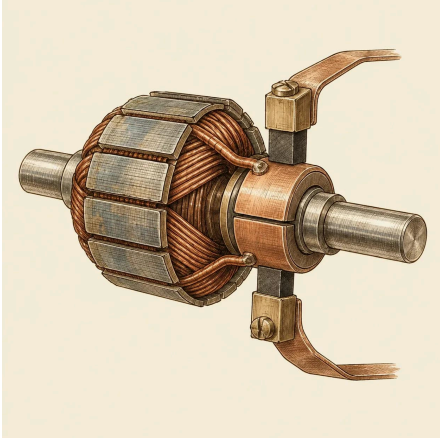
Was es ist

Ein Elektromotor wandelt elektrischen Strom in eine Drehbewegung um. Er treibt Ventilatoren, Pumpen, Aufzüge, Straßenbahnen und Werkzeugmaschinen an. Die Electric Motor Systems Platform des 4E-Programms der Internationalen Energieagentur schätzt, dass motorgetriebene Systeme 2023 rund 53 % des Stroms weltweit verbrauchten.

Die Tafel zeigt einen batteriegespeisten Gleichstrommotor aus dem späten 19. Jahrhundert.

Wie es funktioniert

Ein stromdurchflossener Draht in einem Magnetfeld wird seitlich gedrückt, quer zum Strom und quer zum Feld. Liegt eine Spule zwischen zwei Polen, fließt der Strom in ihren beiden Längsseiten in entgegengesetzter Richtung. Die eine Seite wird nach oben gedrückt, die andere nach unten, und die Spule dreht sich.



Zweiteiliger Kommutator: Bei jeder halben Umdrehung wechseln die Bürsten die Hälfte.

Sich selbst überlassen, würde die Spule sich drehen, bis sie quer zum Feld steht, ein wenig pendeln und dort stehen bleiben. Das verhindert der Kommutator. Er ist ein Ring auf der Welle, in gegeneinander isolierte Segmente geteilt, die jeweils mit der Spule verbunden sind; zwei feste Bürsten schleifen darauf und führen den Strom zu. In der einfachsten Form mit zwei Segmenten gleiten die Bürsten nach jeder halben Umdrehung auf das andere Segment, der Strom in der Spule kehrt sich um, und das Drehmoment behält seine Richtung.

Ein Maschinenanker trägt viele Spulen rund um eine Eisentrommel, jede mit eigenen Segmenten, damit das Drehmoment gleichmäßig bleibt. Das Eisen ist aus dünnen, isolierten Blechen geschichtet, denn in einem massiven Kern flössen Wirbelströme, die Leistung als Wärme verschwenden. Das Feld liefern bei vielen kleinen Motoren Dauermagnete, bei den meisten Maschinen des 19. Jahrhunderts wie der auf der Tafel Elektromagnete.

Ein drehender Anker arbeitet zugleich als Generator. In seinen Spulen entsteht eine Spannung, die der Versorgung entgegenwirkt, die Gegenspannung, und sie wächst mit der Drehzahl. Beim Anlaufen fehlt sie noch, deshalb kann der Strom ein Vielfaches des Betriebswerts erreichen. Mit steigender Drehzahl wächst die Gegenspannung und der Strom sinkt, bis das Drehmoment der Last entspricht. Dreht man dieselbe Maschine von Hand, bei erregtem Feld und angeschlossener Last, liefert sie Strom: Motor und Generator sind ein und dasselbe Gerät, nur in umgekehrter Richtung betrieben.

Asynchronmotoren für Wechselstrom haben keinen Kommutator. Feste Wicklungen mit zeitlich versetzten Strömen erzeugen ein Drehfeld. Es induziert Ströme in den Kupfer- oder Aluminiumstäben des Läufers, der sich etwas langsamer dreht als das Feld.

Wie man ihn baut

Für den Schulmotor braucht man eine 1,5-V-Zelle (Mono oder Mignon), etwa einen Meter Kupferlackdraht von 0,5 bis 0,8 mm, zwei große Büroklammern, einen Scheibenmagneten aus Ferrit oder Neodym, ein kräftiges Gummiband und feines Schleifpapier.

Spule wickeln. Den Draht 10- bis 20-mal um einen Filzstift wickeln und an jedem Ende 4 bis 5 cm gerade lassen. Jedes freie Ende zweimal um das Bündel schlingen, damit es hält. Die beiden Enden müssen auf gegenüberliegenden Seiten austreten, in einer Linie durch die Spulenmitte: Sie bilden die Achse.

Kommutator herstellen. An einem Ende den Lack ganz abschleifen. Am anderen die Spule so aufrecht halten, wie sie später steht, und den Lack nur von der oberen Hälfte des Drahts entfernen. Dieses Ende leitet eine halbe Umdrehung lang und isoliert die andere Hälfte, so wird die Spule nie zurückgedrückt; den toten Halbkreis überwindet sie mit Schwung.

Halter montieren. Jede Büroklammer zu einer Stütze mit flachem Fuß unten und kleiner Öse oben biegen. Das Gummiband der Länge nach um die Zelle über beide Füße spannen, sodass es jede Klammer fest an einen Pol

Der Büroklammer-Kommutator: oben blankes Kupfer, unten bleibt der Lack, so fließt Strom nur in der halben Umdrehung, in der die blanke Seite auf der Klammer liegt.

drückt. Den Magneten seitlich unter die Ösen auf die Zelle setzen, wo er am Stahlmantel haftet. Die Spule wenige Millimeter über dem Magneten in die Ösen legen.

Anwerfen. Der Spule einen leichten Schubs geben. Pendelt sie nur, die Spule umdrehen oder die blanke Seite nachschleifen.

Größer bauen. Ein stärkerer Magnet gibt mehr Drehmoment; mehr Windungen helfen auch, solange der längere Draht den Strom nicht zu stark senkt. Ein Werkstattmotor hat mehrere Spulen auf einem geblechten Eisenkern, einen Kommutator mit vielen Segmenten und gefederte Bürsten wie auf der Tafel.

> **Sicherheit.** Nur eine oder zwei gewöhnliche 1,5-V-Zellen verwenden, nie das Stromnetz, eine Autobatterie oder einen Lithium-Ionen-Akku. Die Spule ist fast ein Kurzschluss, und solche Quellen liefern genug Strom, um die Haut zu verbrennen, den Draht zu schmelzen oder einen Brand zu verursachen. Auch eine kleine Zelle wird heiß, ob der Motor läuft oder nicht: nur kurz und unter Aufsicht betreiben, und die Zelle abklemmen, sobald sie oder der Draht warm wird, vor jedem Nachstellen oder Schleifen und nach dem Versuch. Neodymmagnete schnappen so hart zusammen, dass sie die Haut einklemmen, und können zersplittern. Von Herzschrittmachern und anderen Implantaten fernhalten und außer Reichweite kleiner Kinder aufbewahren: Zwei verschluckte Magnete können sich durch die Darmwand hindurch anziehen.

Geschichte und Entwicklung

Faradays Rotation (1821): Das freie Drahtende kreist um den Magneten.

1820 sah Hans Christian Ørsted eine Kompassnadel neben einem stromdurchflossenen Draht ausschlagen. Am 3. September 1821 ließ Michael Faraday einen in Quecksilber tauchenden Draht um einen Magneten kreisen, und 1822 drehte Peter Barlow ein sternförmiges Rad zwischen Magnetpolen. Beides waren Vorführungen mit kaum nutzbarer Leistung. Starke Felder kamen mit dem Elektromagneten, den William Sturgeon Mitte der 1820er-Jahre baute, und um 1832 bauten William Ritchie und Sturgeon drehende Maschinen mit Kommutator.

Im Mai 1834 vollendete Moritz Hermann Jacobi in Königsberg einen Motor mit acht hufeisenförmigen Elektromagneten, der etwa 15 Watt leistete. Diese Tafel setzt 1834 an: Faraday zeigte das Prinzip, und Sturgeons kleine Maschine drehte schon einen Bratspieß, doch Jacobis Maschine war weit stärker, und kein anderer Erbauer erreichte sie vor etwa 1839. Thomas Davenports amerikanisches Patent folgte 1837.

Batterien machten den Betrieb teuer, bis der Generator billigen Strom lieferte. 1873 zeigte sich, dass ein Dynamo von Zénobe Gramme als Motor lief, wenn ein anderer ihn speiste. Galileo Ferraris in Turin erforschte das Drehfeld ab 1885 und veröffentlichte im März 1888; Nikola Tesla, unabhängig von ihm in New York, erhielt sein Patent auf den Induktionsmotor am 1. Mai 1888. Heute treiben elektronisch geschaltete Dauermagnetmotoren Drohnen und Elektroautos an.

Kennzahlen

Jacobis Motor, Mai 1834
Etwa 15 W bei 60–130 U/min, gespeist aus Zink-Kupfer-Zellen

Erstes US-Motorpatent
Thomas Davenport, Patent Nr. 132, Februar 1837

Magnetisches Drehfeld
Galileo Ferraris, veröffentlicht im März 1888; Patent von Nikola Tesla, 1. Mai 1888

Anteil am Stromverbrauch der Welt
Rund 53 % für motorgetriebene Systeme im Jahr 2023

Quellen

1. The invention of the electric motor 1800–1854 · Elektrotechnisches Institut, Karlsruhe Institute of Technology https://www.eti.kit.edu/english/1376.php
2. Jacobi's Motor · Elektrotechnisches Institut, Karlsruhe Institute of Technology https://www.eti.kit.edu/english/1382.php
3. 200 Years Ago, Faraday Invented the Electric Motor · IEEE Spectrum https://spectrum.ieee.org/200-years-ago-faraday-invented-the-electric-motor
4. Barlow's Wheel – 1822 · National High Magnetic Field Laboratory https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/barlow-s-wheel-1822/
5. Replica of William Sturgeon's rotary electromagnetic engine · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co36713/replica-of-william-sturgeons-rotary-electromagnetic-engine
6. Zenobe Gramme · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/Zenobe_Gramme
7. Milestones: Rotating Fields and Early Induction Motors, 1885–1888 · IEEE, Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Rotating_Fields_and_Early_Induction_Motors,_1885-1888
8. Tesla's Electro-magnetic motor · Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Tesla's_Electro-magnetic_motor
9. AC Motors · HyperPhysics, Georgia State University https://hyperphysics.gsu.edu/hbase/magnetic/motorac.html
10. Simple DC Motor (demonstration 5K40.18) · Oberlin College Physics Department https://www2.oberlin.edu/physics/catalog/demonstrations/em/simpledcmotor.html
11. Policy Brief: Electric Motor Systems, why are they important? · IEA 4E Electric Motor Systems Platform (EMSA) https://www.iea-4e.org/emsa/publications/policy-brief-electric-motor-systems-why-are-they-important/
12. College Physics 2e, 22.8 Torque on a Current Loop: Motors and Meters · OpenStax, via LibreTexts https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/Book%3A_College_Physics_(OpenStax)/22%3A_Magnetism/22.08%3A_Torque_on_a_Current_Loop_-_Motors_and_Meters
13. College Physics 2e, 23.6 Back Emf · OpenStax, Rice University https://openstax.org/books/college-physics-2e/pages/23-6-back-emf
14. RE-280RA/SA metal-brush motor datasheet · Mabuchi Motor Co. (copy hosted by the University of North Carolina at Charlotte) https://webpages.charlotte.edu/~jmconrad/ECGR4161-2009-01/labs/re_280rasa.pdf

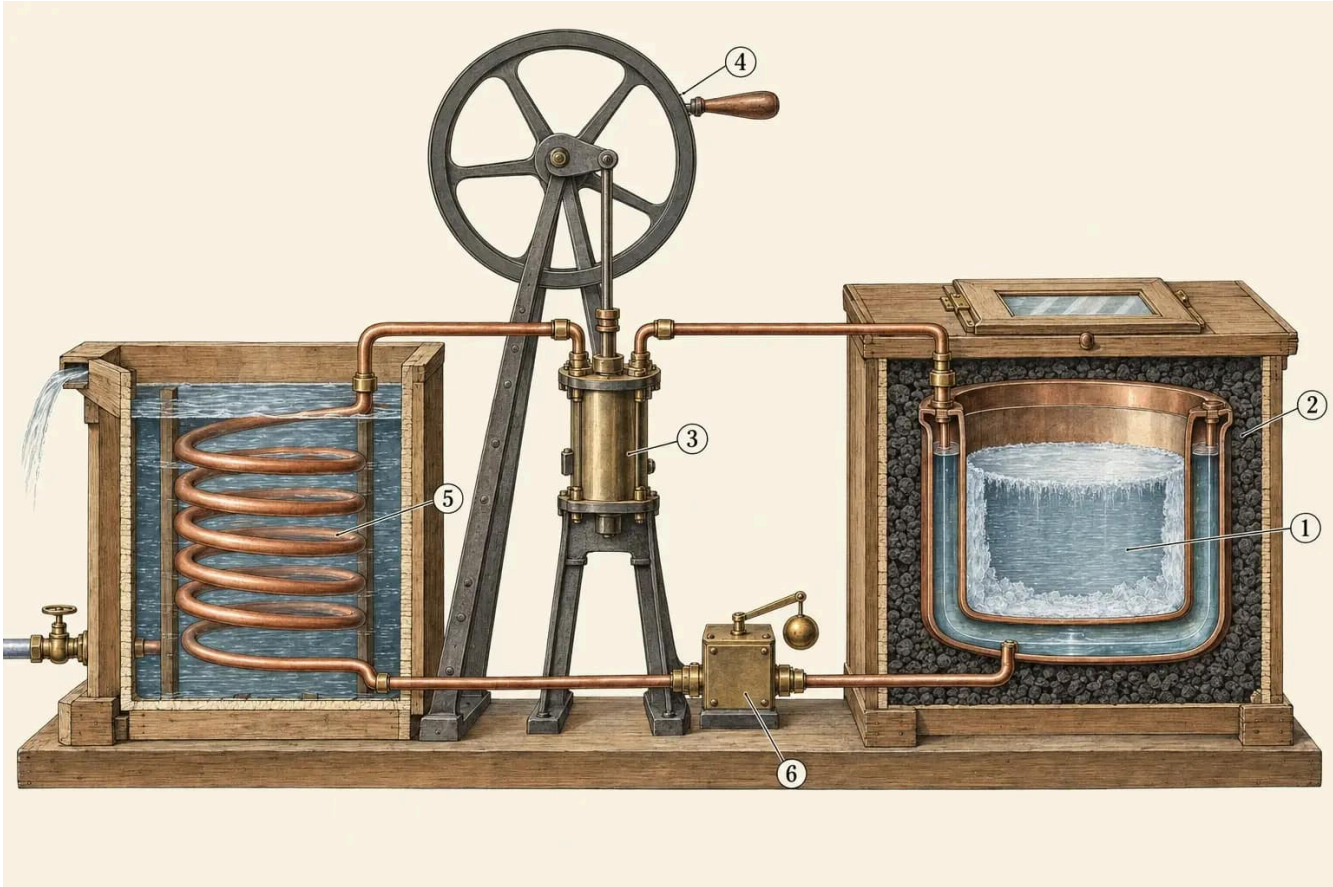
Fakten geprüft am 2026-10-14

Kältetechnik

Wärme aus einem Kasten pumpen

1834 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Dampfmaschine (S. 230), Kolbenpumpe (S. 164), Thermometer und Barometer (S. 225), Destillation (S. 176)



1 Doppelwandige Pfanne mit dem zu gefrierenden Wasser 2 Mit Holzkohle gefüllter Kasten 3 Pumpe 4 Schwungrad und Griff 5 Kühlschlange im Kühlwasserbottich 6 Ventilkasten mit Gewichtsventil

Kältetechnik hält einen Raum kälter als seine Umgebung, indem sie darin eine Flüssigkeit verdampfen lässt, die dabei Wärme aufnimmt, und den Dampf nach draußen führt, verdichtet und wieder verflüssigt. Jacob Perkins ließ 1834 in London die erste geschlossene Kompressionskältemaschine patentieren; Ammoniakmaschinen kühlten in den 1870er-Jahren Brauereien und Schiffe, und elektrische Haushaltskühlschränke verbreiteten sich ab Ende der 1920er-Jahre.

Was es ist

Ein Kühlschrank holt Wärme aus einem geschlossenen Raum und gibt sie nach außen ab, vom Kalten zum Warmen, also entgegen der Richtung, in der Wärme von selbst fließt. Lebensmittel halten länger, weil die Bakterien und Schimmelpilze, die sie verderben, in der Kälte langsam wachsen. Dieselben Maschinen erzeugen Eis, kühlen Bier beim Brauen, bringen gefrorenes Fleisch über die Ozeane und klimatisieren Gebäude.

Fast alle arbeiten nach dem Kaltdampf-Kompressionsprinzip. Die Tafel zeigt dessen erste funktionierende Form: eine Äthermaschine, die der Ingenieur John Hague in London nach Jacob Perkins' Patent von 1834 baute. Die

Pumpe wurde von Hand betrieben.

Wie es funktioniert

Eine verdampfende Flüssigkeit entzieht allem, was sie berührt, Wärme; so kühlt auch der Schweiß die Haut. Je niedriger der Druck, desto niedriger die Siedetemperatur: Äther siedet an offener Luft bei etwa 35 °C, in einem Gefäß, in dem eine Pumpe den Druck niedrig hält, aber weit unter dem Gefrierpunkt des Wassers.

Der doppelte Tontopf nutzt denselben Effekt: Wasser, das aus dem feuchten Sand verdunstet, entzieht dem inneren Topf Wärme.

Bei Hagues Maschine enthält die doppelwandige Kupferpfanne in ihrer inneren Schale das zu gefrierende Wasser, und zwischen den beiden Wänden befindet sich der Äther. Die Pumpe saugt oben aus diesem Mantel den Ätherdampf ab, sodass der flüssige Äther weiter siedet und dem Wasser Wärme entzieht, bis es gefriert. Rund um die Pfanne gestampftes Holzkohlepulver bremst die Wärme, die aus dem Raum eindringt.

Dieselbe Pumpe drückt den Dampf dann in eine gewundene Kupferrohrschlange in einem Bottich mit fließendem Wasser. Ein Ventil, belastet mit etwa 15 Pfund pro Quadratzoll, also etwas mehr als einem bar, hält den Dampf in der Schlange unter Druck. Verdichtet und vom Wasser gekühlt, wird der Dampf wieder flüssig und gibt die Wärme ab, die er der Pfanne entzogen hat, dazu die an der Pumpe geleistete Arbeit. Die Flüssigkeit passiert das Ventil, ihr Druck sinkt, und sie fließt in den Mantel zurück, um erneut zu sieden. Dieselbe Äthermenge läuft so immer wieder um, ohne verbraucht zu werden.

Ein heutiger Kühlschrank tut dasselbe mit einem elektrischen Verdichter, einem Rohrgitter an der Rückseite, das die Küche wärmt, einem dünnen Rohr oder Ventil, an dem der Druck fällt, und einem Verdampfer im Innenraum. Absorptionskühlschränke ersetzen die Pumpe durch eine Flüssigkeit, die den Kältemitteldampf aufnimmt, und einen Brenner oder Heizstab, der ihn wieder austreibt.

Wie man sie baut

Ein echter Kältekreislauf enthält einen flüchtigen Stoff unter Druck. Äther ist leicht entzündlich, sein Dampf kann explodieren; Ammoniak ist giftig; heutige Kältemittel lagern flüssig unter mehreren bar, und manche sind brennbar. Die Maschinen werden in Fabriken gebaut und befüllt; das Öffnen, Füllen oder Entleeren eines Kreislaufs gehört nach den örtlichen Vorschriften in die Hände qualifizierter Kältetechniker. Keinen Verdichter und keinen Druckbehälter selbst bauen und niemals die Rohre eines alten Kühlschranks durchtrennen oder anbohren.

Den zugrunde liegenden Effekt zeigt gefahrlos ein Topf-in-Topf-Verdunstungskühler.

Töpfe wählen. Zwei neue, saubere unglasierte Terrakottatöpfe nehmen, der eine rundum etwa 5 cm weiter als der andere; der innere, der die Lebensmittel berührt, muss für Lebensmittel zugelassen sein, niemals ein alter Blumentopf. Die Abflusslöcher mit Ton oder einem Korken verschließen.

Zwischenraum füllen. Eine Schicht Sand in den großen Topf geben, den kleinen daraufstellen und den Zwischenraum bis zum Rand mit Sand füllen.

Befeuchten. Sauberes Wasser in den Sand gießen, bis er durchtränkt, aber nicht überflutet ist. Den inneren Topf mit einem feuchten Baumwolltuch abdecken.

Aufstellen. Den Kühler in den Schatten stellen, wo trockene Luft ihn umströmt. Wasser, das durch die Außenwand sickert, verdunstet und entzieht Sand und Innentopf Wärme. Bei heißer, trockener Luft kann das Innere einige Grad kühler bleiben als die Umgebung; bei feuchter Luft ist der Effekt gering. Ein- bis zweimal am Tag Wasser nachgießen.

> **Sicherheit.** Ein Verdunstungskühler verlangsamt den Verderb nur: Er erreicht nicht die 5 °C oder weniger, die Fleisch, Fisch und Milchprodukte brauchen. Nur für ganzes, unangeschnittenes Obst und Gemüse verwenden, das sich auch bei Raumtemperatur hält, nie für geschnittenes Obst, Salate oder gekochte Speisen, und die Temperatur mit einem Thermometer prüfen. Sand und Tuch sauber halten und die Töpfe regelmäßig austrocknen lassen, damit sich kein Schimmel bildet. Den Kreislauf eines Kühlschranks oder einer Klimaanlage niemals öffnen, anstechen oder erhitzen.

Geschichte und Entwicklung

Bevor Maschinen in die Küche kamen, kühlte ein Eisblock den zinkverkleideten Eisschrank.

Lange vor jeder Maschine lagerte man Wintereis in Gruben und Eiskellern und kühlte Wasser in porösen Krügen. In Schottland zeigte William Cullen, dass eine Flüssigkeit, die bei vermindertem Druck rasch verdunstet, in seinem bekanntesten Versuch Äther, das umgebende Wasser bis zum Gefrieren abkühlt; die Berichte datieren die Arbeiten zwischen 1748 und 1756. Es blieb ein Laborversuch. 1805 beschrieb der Amerikaner Oliver Evans einen geschlossenen Kompressionskreislauf, baute ihn aber nie.

Jacob Perkins, ein in London lebender amerikanischer Erfinder, ließ am 14. August 1834 eine geschlossene Maschine patentieren. Hague baute sie; sie erzeugte etwas Eis, fand aber keine Käufer. Zum Geschäft wurde die Idee in den 1850er-Jahren, als James Harrison in Australien und Alexander Twining in den Vereinigten Staaten die ersten verkauften Eismaschinen bauten. 1859 ließ Ferdinand Carré in Frankreich eine Absorptionsmaschine mit in Wasser gelöstem Ammoniak patentieren. In den 1870er-Jahren entwarf Carl von Linde in München Ammoniak-Kompressionsmaschinen; eine der ersten ging 1876 an eine Brauerei in Triest. Im selben Jahr brachte das französische Schiff Frigorifique, von Charles Tellier ausgerüstet, erstmals gekühltes Fleisch auf dem Seeweg zwischen Rouen und Buenos Aires.

Kleine Elektromotoren machten den Haushaltskühlschrank möglich. Der Monitor Top von General Electric aus dem Jahr 1927, dessen Verdichter in einer Trommel auf dem Gehäuse saß, kostete bei der Einführung etwa 525 Dollar und binnen weniger Jahre nur noch rund 200. Fluorchlorkohlenwasserstoffe wie Freon, 1928 entwickelt und ab Anfang der 1930er-Jahre industriell hergestellt, ersetzten dann die giftigen oder brennbaren Kältemittel der ersten Haushaltsgeräte, etwa Schwefeldioxid, Methylchlorid und Ammoniak. Später zeigte sich, dass sie die Ozonschicht zerstören; das Montrealer Protokoll von 1987 leitete ihren Ausstieg ein, und 2016 nahm die Kigali-Änderung ihre Nachfolger auf, die teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW), starke Treibhausgase. Nach einer Schätzung des Internationalen Instituts für Kältetechnik von 2024 verbrauchen Kühlung und Klimatisierung etwa ein Fünftel des weltweiten Stroms.

Der Monitor Top von 1927: Der Verdichter sitzt in der Trommel, und die Kupferschlange um sie herum gibt die dem Innenraum entzogene Wärme ab.

Kennzahlen

Perkins' Patent
Britisches Patent Nr. 6662, 14. August 1834, Äther als Arbeitsstoff

Carrés Ammoniak-Absorptionsmaschine
1859, Frankreich

Anteil der Kühlung am weltweiten Strom
Etwa 20 % (Internationales Institut für Kältetechnik)

Gewichtsventil an Hagues Maschine
Belastet mit etwa 15 Pfund pro Quadratzoll (etwa 1 bar)

Montrealer Protokoll zu ozonschädigenden Gasen
Unterzeichnet 1987, in Kraft 1989; HFKW 2016 in Kigali aufgenommen

Quellen

1. #274 Perkins Vapor-Compression Cycle for Refrigeration (landmark brochure) · American Society of Mechanical Engineers https://www.asme.org/getmedia/cb9bea09-6d23-425e-bfe5-5f6d786919fb/274-Perkins-Vapor-Comp-Refrig.pdf
2. Froid · Encyclopédie Larousse https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/froid/53766
3. Historical beginnings: using natural refrigeration · Chillventa / NürnbergMesse https://www.chillventa.de/en/expert-insights/refrigeration/beginnings-of-refrigeration
4. Cornerstones of compression: making cold · COMPRESSORtech2 https://www.compressortech2.com/news/cornerstones-of-compression-making-cold/8054876.article
5. GE Monitor-Top Refrigerator · Albany Institute of History & Art https://albanyinstitute.org/online-exhibition/50-objects/section/ge-monitor-top-refrigerator
6. The Montreal Protocol · UNEP Ozone Secretariat https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol
7. New IIR figures highlight the role of the refrigeration sector · International Institute of Refrigeration https://iifiir.org/en/news/de-nouveaux-chiffres-de-l-iif-mettent-en-lumiere-la-place-du-secteur-du-froid
8. Got a question about Monitor Top refrigerators? (model history) · cool386.com https://www.cool386.com/ge/ge1.html
9. Diethyl ether: phase change data (vapour pressure, enthalpy of vaporization) · NIST Chemistry WebBook https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C60297&Mask=4
10. Diethyl ether (compound summary, vapor pressure) · PubChem, National Library of Medicine https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3283

Fakten geprüft am 2026-10-12

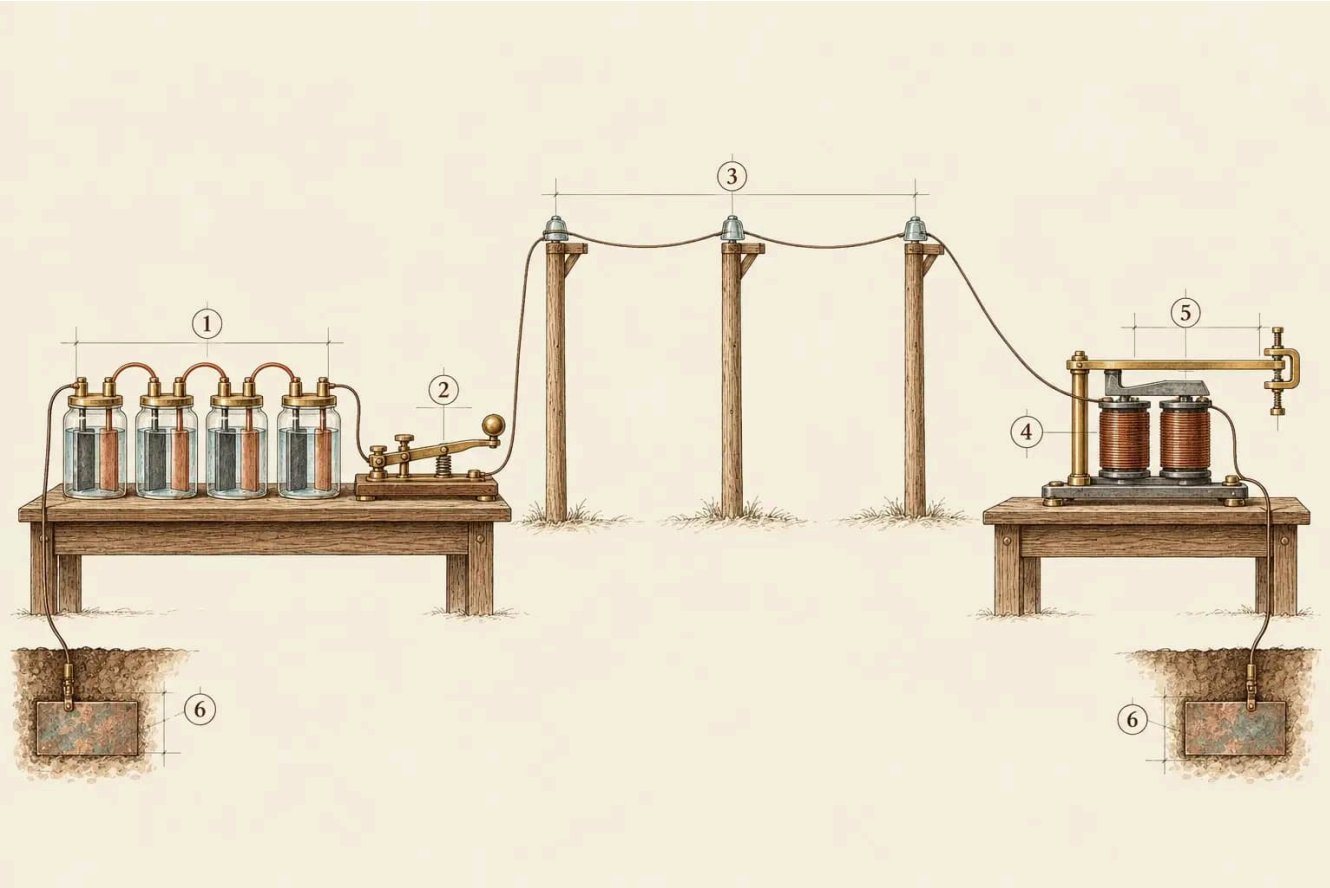
Elektrischer Telegraf

Schriftliche Nachrichten über einen Draht

1837 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Batterie (S. 243), Schrift (S. 87)

Führt zu: Radio (S. 349), Telefon (S. 322)



1 Batterie 2 Taste 3 Leitungsdraht auf Isolatoren 4 Elektromagnet des Klopfers 5 Ankerhebel 6 Erdplatte

Der elektrische Telegraf überträgt Nachrichten als Stromstöße aus einer Batterie über einen Draht; eine Taste schaltet sie ein und aus, und am anderen Ende macht ein Elektromagnet sie lesbar. William Cooke und Charles Wheatstone ließen 1837 in Großbritannien einen Nadeltelegrafen patentieren, Samuel Morse und Alfred Vail führten 1838 ihren Schreibtelegrafen vor, und dreißig Jahre später verbanden Kabel die Kontinente.

Was es ist

Ein elektrischer Telegraf schickt geschriebene Nachrichten als elektrische Signale durch einen Draht. An einem Ende öffnet und schließt ein Telegrafist einen Stromkreis; am anderen Ende bewegt sich ein Gerät, sooft Strom fließt. Die Buchstaben werden mit einem Code buchstabiert. Bei den ersten Fünfnadelgeräten von Cooke und Wheatstone wiesen Nadeln auf Buchstaben einer Tafel; spätere Nadeltelegrafen arbeiteten mit einem Code aus Ausschlägen nach links und rechts.

Die Tafel zeigt die einfachste Form, die Eindrahtleitung für das Morsealphabet: eine Batterie, eine Taste, eine Reihe von Masten und auf der Empfangsstation einen Klopfer. Der Erdboden selbst führt den Strom zurück.

Wie es funktioniert

Die Batterie ist eine Reihe von Zellen, jede ein Paar aus Zink- und Kupferplatte in einer Flüssigkeit, in Reihe geschaltet, damit sich ihre Spannungen addieren. Ein Pol der Batterie führt über eine vergrabene Metallplatte zur Erde, der andere zur Taste. Die Taste ist ein gefederter Messinghebel: Drückt man sie, schließt sie einen Kontakt und verbindet die Batterie mit der Leitung.

Der Strom läuft durch den Leitungsdraht, der auf Glasisolatoren ruht, damit er nicht in das nasse Holz der Masten abfließt, und durch die Spulen eines Elektromagneten auf der Gegenstation. Von dort geht er über eine zweite Erdplatte in den Boden und kehrt durch das Erdreich zur Batterie zurück. Die Erde als Rückleiter spart die Hälfte des Drahtes.

Solange Strom fließt, werden die Spulen zum Magneten und ziehen einen eisernen Anker an, der an einem drehbaren Hebel sitzt; der Hebel schlägt mit einem Klick an einen Anschlag. Lässt man die Taste los, hebt eine Feder den Hebel mit einem anders klingenden Klick an einen zweiten Anschlag. Ein kurzer Druck ergibt einen Punkt, ein längerer einen Strich, und Gruppen davon stehen für Buchstaben und Ziffern. Morses erste Geräte prägten oder schrieben Punkte und Striche auf einen laufenden Papierstreifen, doch die Telegrafisten merkten bald, dass sie die Klicks mit dem Ohr lesen konnten.

Eine Morsetaste: Ein Druck auf den Knopf schließt den Kontakt unter dem Hebel.

Wie man ihn baut

Taste und Klopfer lassen sich auf einem Tisch bauen und mit einer kleinen Batterie betreiben, sodass das Prinzip gut zu sehen ist.

Elektromagnet wickeln. Etwa 30 Meter Kupferlackdraht von 0,2 mm Durchmesser in ordentlichen Lagen um einen etwa 10 cm langen Eisennagel oder Bolzen wickeln, beide Enden frei lassen und den Lack am letzten Zentimeter jedes Endes abkratzen. Die Spule hat dann etwa 16 Ohm, sodass eine 4,5-Volt-Batterie aus drei AA-Zellen weniger als 0,3 Ampere hindurchschickt.

Klopfer bauen. Ein Loch in ein Holzbrett bohren und den Nagel aufrecht, mit dem Kopf nach oben, darin festleimen, ohne die Wicklung zu quetschen. Aus einer Konservendose einen Weißblechstreifen von etwa 1 × 8 cm schneiden, die Kanten glatt feilen und ein Ende so auf einen Holzklotz schrauben, dass das freie Ende einige Millimeter über dem Nagelkopf liegt. Den Streifen so biegen, dass er nach dem Drücken zurückfedert, und dicht über dem freien Ende eine Schraube in einen kleinen Holzwinkel drehen: Der Streifen schlägt beim Anziehen auf den Nagel und beim Zurückfedern an die Schraube. Den Abstand auf 2 bis 3 mm einstellen und den Streifen so lange nachbiegen, bis er kräftig angezogen wird und trotzdem zurückfedert.

Taste bauen. Einen federnden Messingstreifen oder ein gefaltetes Stück Blech so auf ein zweites Brett schrauben, dass ein Ende etwas hochsteht. Unter das freie Ende eine Reißzwecke oder Schraube als Kontakt setzen.

Verdrahten. Ein Spulenende mit einem Pol eines Halters für drei AA-Zellen verbinden, den anderen Pol mit dem festen Kontakt der Taste und den Tastenstreifen mit dem anderen Spulenende. Zwischen den Brettern gewöhnliche Klingelleitung von höchstens etwa 10 Metern verwenden: Längerer oder dünnerer Draht erhöht den Widerstand, und der Streifen wird dann womöglich nicht mehr angezogen.

Senden. Die Taste drücken: Der Streifen schnappt mit einem Klick auf den Nagel und springt beim Loslassen zurück. Mit einem Partner einen Code vereinbaren und kurze Wörter senden.

> **Sicherheit.** Nur eine kleine Batterie mit wenigen Volt verwenden und niemals etwas an das Stromnetz anschließen. Die Taste nicht lange gedrückt halten, weil Spule und Zellen warm werden, und nach dem Versuch die Batterie abklemmen. Die Batteriepole nie direkt miteinander verbinden. Geschnittene Blechkanten sind scharf, daher entgraten und Handschuhe tragen.

Geschichte und Entwicklung

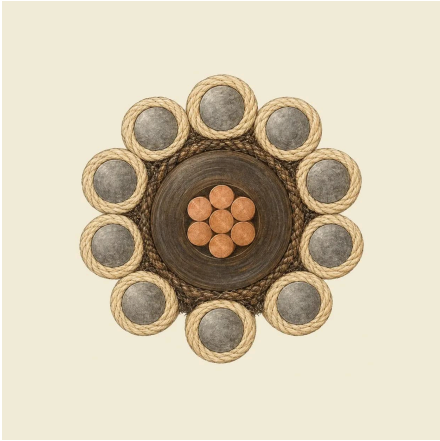
Vor der Elektrizität gab Chappes optischer Telegraf Signale von Turm zu Turm weiter; eine Nachricht gelangte in etwa einer halben Stunde von Paris nach Lille.

Das Wort Telegraf bezeichnete zuerst das optische System von Claude Chappe und seinen Brüdern, das 1791 vorgeführt wurde. Die erste Linie, von Paris nach Lille, ging 1794 in Betrieb und war etwa 230 km lang. In den Türmen stellten Telegrafisten Holzarme in vereinbarte Stellungen und lasen den nächsten Turm mit dem Fernrohr ab. Auf seinem Höhepunkt umfasste das französische Netz fast 5.000 km.

Elektrische Telegrafen wurden möglich, als Batterien einen gleichmäßigen Strom liefern und Elektromagnete ihn anzeigen konnten. In Großbritannien ließen William Fothergill Cooke und Charles Wheatstone im Juni 1837 einen Nadeltelegrafen patentieren, beschrieben mit fünf Nadeln, und erprobten im selben Jahr ein Nadelgerät zwischen den Londoner Bahnhöfen Euston und Camden Town. 1839 richtete die Great Western Railway einen ihrer Telegrafen auf rund 21 km Strecke ab Paddington ein. Spätere britische Geräte kamen mit einer oder zwei Nadeln aus.

In den Vereinigten Staaten arbeitete Samuel Morse, Maler und Professor in New York, mit Alfred Vail zusammen, der die Geräte baute. Am 6. Januar 1838 führten sie ihren Telegrafen im Eisenwerk der Familie Vail bei Morristown vor, über etwa drei Kilometer Draht. 1843 bewilligte der Kongress 30.000 Dollar für eine Leitung von Washington nach Baltimore, und am 24. Mai 1844 sandte Morse darüber die Worte „What hath God wrought“ („Was hat Gott gewirkt“). Bis 1850 erreichten die Leitungen jede wichtige Stadt östlich des Mississippi, und 1861 reichte eine bis Kalifornien.

1851 verband ein Seekabel Dover und Calais. Das erste Atlantikkabel, im August 1858 verlegt, fiel nach wenigen Wochen aus; ein dauerhaftes wurde im Juli 1866 angelandet. Ingenieure lernten, mehrere Nachrichten über einen Draht zu schicken: zuerst je eine in jede Richtung zugleich mit dem Duplexverfahren, das Joseph Stearns 1868 vervollkommnete, dann je zwei in jede Richtung mit Thomas Edisons Quadruplex. Der britische Telegrammverkehr erreichte um 1900 mit etwa 90 Millionen Nachrichten im Jahr seinen Höhepunkt. Danach übernahm das Telefon den Großteil, und um 1980 hatten Satelliten und neue Kabel die Seekabeltelegrafie überflüssig gemacht.



Das Tiefseekabel über den Atlantik von 1865/66 im Querschnitt: sieben Kupferdrähte in Guttapercha, eine Lage geteerte Jute und zehn mit Hanf umsponnene Eisendrähte.

Kennzahlen

Patent von Cooke und Wheatstone
Juni 1837, fünf Nadeln und sechs Drähte

Erste Vorführung von Morse und Vail
6. Januar 1838, Speedwell Iron Works (New Jersey), über etwa 3 km Draht

Leitung Washington–Baltimore
30.000 Dollar vom Kongress 1843 bewilligt; erste Nachricht am 24. Mai 1844

Dauerhaftes Transatlantikkabel
Juli 1866, nachdem ein Kabel von 1858 nach wenigen Wochen ausgefallen war

Chappes optisches Netz auf dem Höhepunkt
Fast 5.000 km Signaltürme, in den 1850er-Jahren durch elektrische Leitungen ersetzt

Quellen

1. Telegraph · Engineering and Technology History Wiki (IEEE) https://ethw.org/Telegraph
2. Milestones: Demonstration of Practical Telegraphy, 1838 · Engineering and Technology History Wiki (IEEE) https://ethw.org/Milestones:Demonstration_of_Practical_Telegraphy,_1838
3. Cooke and Wheatstone · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/Cooke_and_Wheatstone
4. Submarine cable section (Atlantic cable, 1865) · Royal Museums Greenwich https://rmg.co.uk/collections/objects/rmgc-object-6204
5. Sample of the 1865/66 Transatlantic Telegraph Cable · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co34219/sample-of-the-1865-66-transatlantic-telegraph-cab-cable
6. Modern Practice of the Electric Telegraph (appendix and notes) · Frank L. Pope, 1869 (insulators.info) https://www.insulators.info/books/mpet/chap10.htm
7. Insulator Tests, The Journal of the Telegraph, 16 December 1872 · Western Union (insulators.info) https://reference.insulators.info/publications/view/?id=11419
8. Resistivity and temperature coefficient at 20 C · HyperPhysics, Georgia State University https://hyperphysics.gsu.edu/hbase/Tables/rstiv.html
9. Copper Wire Tables (Handbook 100) · National Bureau of Standards https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/hb/nbshandbook100.pdf
10. Electromagnet · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnet

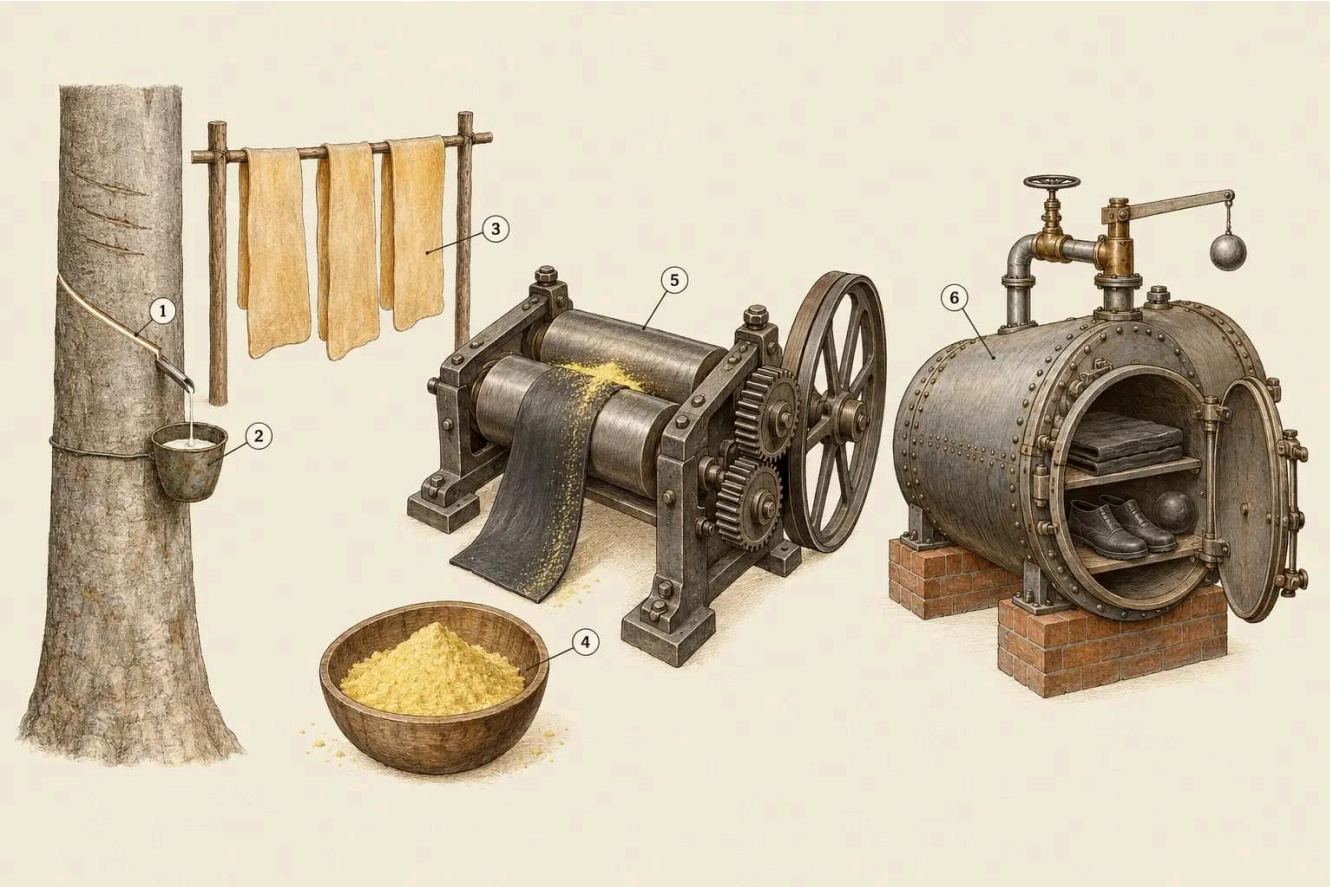
Fakten geprüft am 2026-10-12

Vulkanisierter Kautschuk

Pflanzensaft, durch Schwefel zäh gemacht

1839 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Beherrschung des Feuers (S. 9)



1 Zapfschnitt 2 Latexbecher 3 Rohkautschukfelle 4 Schwefel 5 Zweiwalzenmischer 6 Vulkanisierkessel

Vulkanisierter Kautschuk ist Kautschuk, dessen lange Moleküle miteinander verknüpft wurden, ursprünglich durch Erhitzen von Naturkautschuk mit Schwefel; so bleibt er bei Hitze und Kälte elastisch, statt klebrig oder spröde zu werden. Charles Goodyear in den Vereinigten Staaten und Thomas Hancock in Großbritannien entwickelten das Verfahren Anfang der 1840er-Jahre; erst damit wurde Gummi für Reifen, Schläuche, Dichtungen und Schuhe brauchbar.

Was es ist

Naturkautschuk stammt aus Latex, einer milchigen Flüssigkeit, die aus Schnitten in der Rinde bestimmter tropischer Bäume fließt, heute vor allem des Parakautschukbaums Hevea brasiliensis. Getrocknet und gepresst ist er wasserdicht und dehnbar, doch roher Kautschuk wird an heißen Tagen weich und klebrig, bei Frost steif und rissig, und unter Last verformt er sich allmählich.

Die Vulkanisation behebt diese Mängel. Der Kautschuk wird mit wenig Schwefel gemischt und erhitzt. Daraus entsteht das Material von Reifen, Schläuchen, Förderbändern, Dichtungen, Stiefeln und Gummibändern, das über einen weiten Temperaturbereich in seine Form zurückfedert.

Wie es funktioniert

In Mesoamerika entstand Gummi, indem man den Latex von Castilla elastica mit dem Saft einer Prunkwinde mischte.

Kautschuk besteht aus sehr langen Kettenmolekülen, jedes aus Tausenden kleiner Bausteine. Im Rohkautschuk liegen die Ketten verknäult wie gekochte Spaghetti. Zieht man daran, strecken sie sich; lässt man los, knäueln sie sich wieder, daher die Elastizität. Untereinander verbunden sind sie aber nicht: Unter anhaltendem Zug oder in der Wärme gleiten sie aneinander vorbei, und das Material fließt und klebt.

Bei der Vulkanisationstemperatur lagern sich Schwefelatome an bestimmten Stellen der Ketten an und bilden Brücken zwischen benachbarten Ketten, aus je einem oder mehreren Schwefelatomen. Wenige Brücken pro Kette verwandeln das Knäuel in ein einziges lockeres Netz. Es lässt sich weiterhin stark dehnen, weil die Kettenstücke zwischen den Brücken sich entrollen können, aber es fließt nicht mehr und kehrt beim Loslassen in seine Form zurück.

Die Zahl der Brücken bestimmt die Härte. Weichgummi braucht nur einen kleinen Anteil Schwefel. Mit sehr viel mehr wird das Netz so dicht, dass das Produkt, Ebonit oder Hartgummi, starr und spröde ist. Mit Schwefel allein vulkanisiert Kautschuk langsam; seit Anfang des 20. Jahrhunderts machen Beschleuniger, aktiviert durch Zinkoxid und Stearinsäure, die Reaktion schneller und gleichmäßiger.

Wie man ihn herstellt

Goodyear erzählte, er habe den Effekt entdeckt, als eine Mischung aus Kautschuk und Schwefel einen heißen Ofen berührte und verkohlte, ohne zu schmelzen.

Gummiwaren entstehen in Fabriken mit beheizten Pressen, belüfteten Mischräumen und Absaugung. Heißer Schwefel entzündet sich leicht und verbrennt zu giftigem Schwefeldioxid, beim Vulkanisieren entstehen reizende Dämpfe, und moderne Beschleuniger reizen Haut und Atemwege: Vulkanisieren ist nichts für den Haushalt. Die Herstellung umfasst folgende Schritte.

Zapfen. Etwa jeden zweiten Tag wird entlang eines schräg verlaufenden Schnitts ein dünner Rindenspan abgeschabt, tief genug, um die Milchröhren zu öffnen, ohne das Kambium zu erreichen, die dünne Wachstumsschicht unter der Rinde. Der Latex läuft den Schnitt entlang in einen Becher.

Koagulieren. Der Latex wird verdünnt und mit einer schwachen Säure wie Ameisen- oder Essigsäure zum Gerinnen gebracht; der Kautschuk scheidet sich als weicher Quark ab. Man presst ihn zu Fellen und trocknet sie, oft im Rauch, der auch Schimmel fernhält.

Mischen. Der Rohkautschuk wird zwischen schweren Walzen bearbeitet, bis er weich wird, dann werden Schwefel, Füllstoffe und Beschleuniger eingeknetet.

Formen und Vulkanisieren. Die Mischung wird gepresst, extrudiert oder auf Gewebe gestrichen und dann in einer Presse oder einem dampfbeheizten Vulkanisierkessel erhitzt, bis die Brücken entstanden sind.

Ein einfacher, qualitativer Vergleich zeigt die Veränderung. Ein Gummiband zu einem Streifen aufschneiden und aus rohem, unvulkanisiertem Kreppkautschuk aus dem Bastelbedarf einen Streifen gleicher Breite, Dicke und Länge schneiden (manche Kreppsohlen sind vulkanisiert, daher die Angaben prüfen). An beide über Nacht dasselbe kleine Gewicht hängen, es abnehmen und zehn Minuten warten: Das Gummiband geht meist fast auf seine Länge zurück, der rohe Streifen bleibt eher gedehnt. Danach beide eine Stunde ins Gefrierfach legen, in Wasser von etwa 40 °C erwärmen und vergleichen, wie steif und wie klebrig sie sich anfühlen. Die Produkte enthalten unterschiedliche Füllstoffe, das Ergebnis zeigt also nur eine Tendenz.

> **Sicherheit.** Keinen Schwefel erhitzen und nicht versuchen, zu Hause Kautschuk zu vulkanisieren: Die Dämpfe sind giftig, und geschmolzener Schwefel verbrennt die Haut und kann Feuer fangen. In der Fabrik können Mischwalzen Hände quetschen und einziehen, Pressen und Autoklaven sind heiß und stehen unter Druck: Sie brauchen geschützte Maschinen und geschultes Personal. Naturkautschuk und Latex lösen bei manchen Menschen Allergien aus: Wer gegen Latex allergisch ist, fasst die Proben nicht an, alle anderen tragen Nitrilhandschuhe. Die Wassertemperatur prüfen, bevor man die Hände hineinsteckt.

Geschichte und Entwicklung

In Mesoamerika wurde Kautschuk schon um 1600 v. Chr. verarbeitet. Man mischte den Latex von Castilla elastica mit dem ausgepressten Saft einer Prunkwinde, was ihn elastischer machte, und stellte daraus Bälle von bis zu 7 kg für ein rituelles Ballspiel her, außerdem Sandalensohlen und Bindungen. Spanische Beobachter beschrieben den Kautschuk im 16. Jahrhundert. In Europa und Nordamerika verbreitete sich sein Gebrauch Anfang des 19. Jahrhunderts, doch Waren aus Rohkautschuk wurden im Sommer weich und rissen im Winter.

1837 ließ Thomas Hancock eine Maschine zum Kneten von Rohkautschuk patentieren, und in den 1830er-Jahren stellten mehrere Leute fest, dass Schwefel ihn weniger klebrig machte. Charles Goodyear, ein verschuldeter Eisenwarenhändler, dessen Geldgeber in der Krise von 1837 erneut absprangen, probierte jahrelang Behandlungen aus. 1839 berührte nach seiner Darstellung ein Klumpen Kautschuk mit Schwefel einen heißen Ofen und verkohlte am Rand, ohne zu schmelzen. Er brauchte etwa fünf Jahre, um das Verfahren zuverlässig zu machen. In Großbritannien sah Hancock 1842 Proben des amerikanischen geschwefelten Kautschuks und entwickelte ein eigenes Verfahren; am 21. November 1843 meldete er ein Patent auf das Vulkanisieren an, Goodyears US-Patent Nr. 3.633 folgte am 15. Juni 1844. Der Name, nach Vulcanus, dem römischen Gott des Feuers, stammt von Hancocks Freund William Brockedon. Goodyear führte jahrelang Patentprozesse und starb 1860, ohne an seiner Entdeckung verdient zu haben.

Die Nachfrage nach Reifen, Riemen und Isolierungen löste einen Ansturm auf den Wildkautschuk des Amazonasbeckens aus. 1876 verschiffte Henry Wickham etwa 70.000 Hevea-Samen aus Brasilien in die Kew Gardens bei London, und die Sämlinge wurden in britische Kolonien in Asien weitergeschickt. 1900 erzeugten die asiatischen Plantagen etwa 4 Tonnen, gegenüber rund 27.000 Tonnen, die im Amazonasgebiet gesammelt wurden; 1916 lieferten sie bereits den größten Teil des Weltkautschuks. Viele Synthesekautschuke, die später aus Erdöl hergestellt wurden, vulkanisiert man auf ganz ähnliche Weise mit Schwefel; andere, etwa Neopren, werden mit Metalloxiden vernetzt.

Frucht, Samen und Blatt des Kautschukbaums: Jede Kapsel enthält drei Samen, wie sie Wickham 1876 nach Kew schickte.

Kennzahlen

Verarbeiteter Kautschuk in Mesoamerika
Um 1600 v. Chr.; Bälle für das rituelle Spiel wogen bis zu 7 kg

Kautschukgehalt frischen Latex
Etwa 30 bis 40 %, der Rest überwiegend Wasser

Hancocks britisches Patent
Angemeldet am 21. November 1843

Goodyears US-Patent
Nr. 3.633, 15. Juni 1844

Von Wickham verschiffte Hevea-Samen
Etwa 70.000, 1876 von Brasilien nach Kew

Quellen

1. Charles Goodyear (Scientist of the Day) · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/charles-goodyear/
2. Rubber processed in ancient Mesoamerica, MIT researchers find · MIT News https://news.mit.edu/1999/rubber-0714
3. Natural rubber · Transport Information Service (GDV) https://www.tis-gdv.de/tis_e/ware/kautschuk/naturkautschuk/naturkautschuk.htm
4. The seeds of discord · Revista Pesquisa FAPESP https://revistapesquisa.fapesp.br/en/the-seeds-of-discord/
5. Sulfur vulcanization · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_vulcanization
6. Thomas Hancock (inventor) · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Hancock_(inventor)
7. Hevea brasiliensis (rubber tree) fact sheet · EAFRINET, National Museums of Kenya and Lucidcentral https://keys.lucidcentral.org/keys/v3/eafrinet/weeds/key/weeds/Media/Html/Hevea_brasiliensis_%28Rubbertree%29.htm

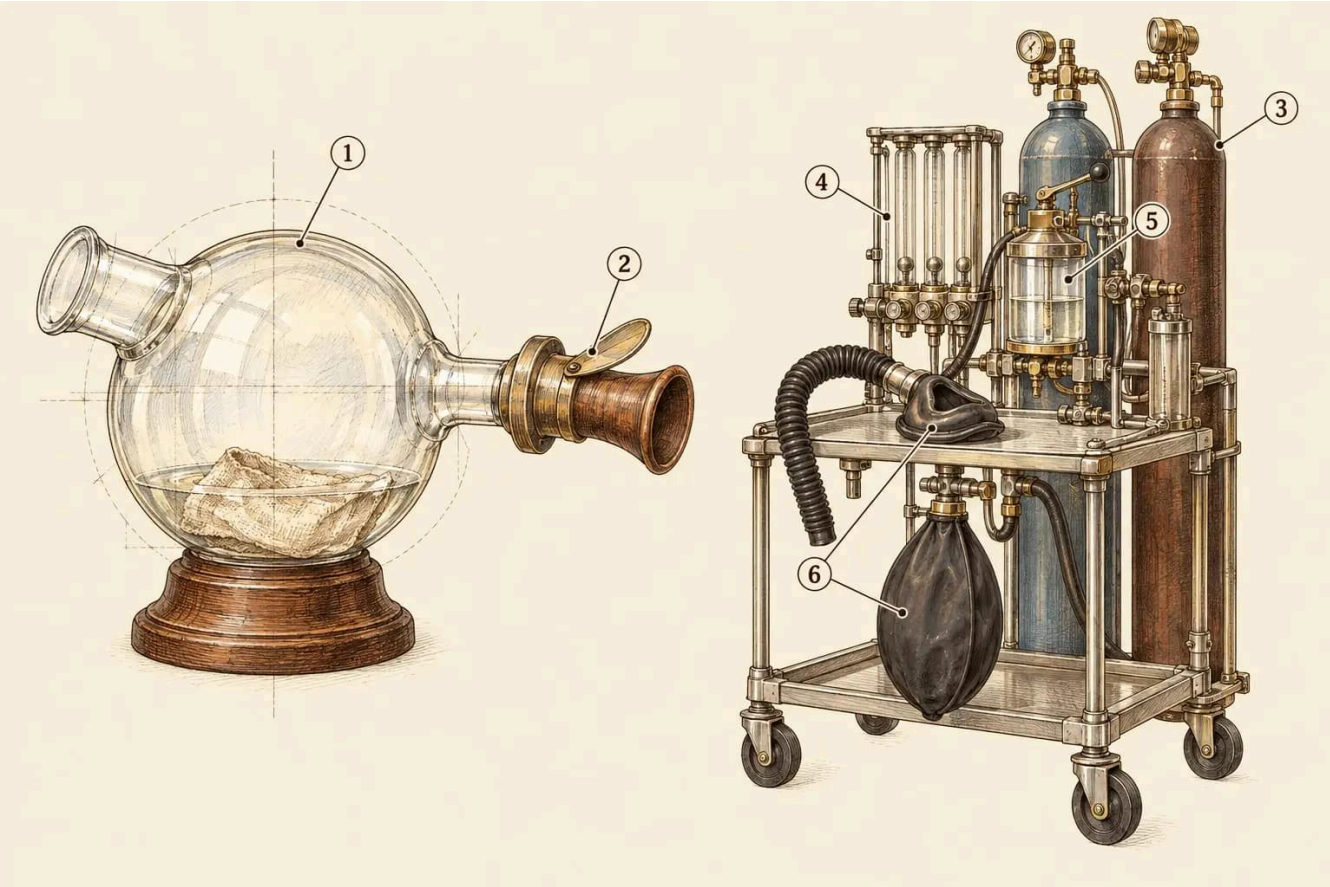
Fakten geprüft am 2026-10-12

Anästhesie

Operieren ohne Schmerz und Bewusstsein

1846 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Hygiene und Antisepsis (S. 302), Glas (S. 134)



1 Glaskugel von Mortons Äther-Inhalator 2 Mundstück mit Ventil 3 Gasflaschen 4 Durchflussmesser aus Glas 5 Verdampferflasche 6 Reservoirbeutel und Maske

Die Anästhesie ist die ärztliche Kunst, Schmerz und oft auch das Bewusstsein auszuschalten, damit operiert werden kann. Seit einer öffentlichen Vorführung mit Äther in Boston 1846 haben ausgebildete Anästhesisten, Überwachung und Sauerstoff sie zur Routine gemacht, und zusammen mit der Antisepsis verwandelte sie die Chirurgie von einem letzten Ausweg in eine gewöhnliche Behandlung.

Was es ist

Die Anästhesie nimmt den Schmerz und in ihrer allgemeinen Form auch das Bewusstsein, damit ein Chirurg operieren kann. Die Allgemeinanästhesie, die Narkose, ist eine kontrollierte, umkehrbare Bewusstlosigkeit. Die Regionalanästhesie macht einen großen Teil des Körpers gefühllos, etwa einen Arm oder alles unterhalb der Hüfte, während der Patient wach bleibt. Die örtliche Betäubung beschränkt sich auf eine kleine Stelle, etwa um eine Wunde zu nähen oder einen Zahn zu behandeln.

Die Tafel stellt zwei Geräte nebeneinander. Links der gläserne Inhalator, mit dem William Morton 1846 in Boston Äther gab. Rechts ein Narkosegerät aus dem frühen 20. Jahrhundert: Flaschen mit Druckgas, gläserne

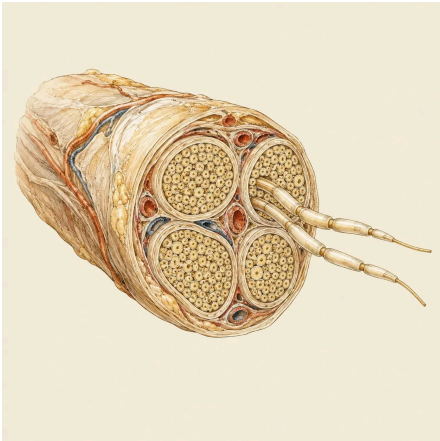
Durchflussmesser, eine Flasche, in der das Gas den Dampf eines flüchtigen Narkosemittels aufnimmt, sowie Beutel und Maske, über die der Patient atmet.

Wie es funktioniert

Narkosemittel gelangen mit dem Blut ins Gehirn, eingeatmet über die Lunge oder in eine Vene gespritzt. Viele verstärken die Wirkung von GABA, dem wichtigsten Bremssignal des Gehirns, sodass die Nervenzellen seltener feuern. Das Bewusstsein erlischt, und es bilden sich keine Erinnerungen. Die Einzelheiten sind bis heute umstritten.

Je nach Mittel und Patient erfasst die Dämpfung auch die Zentren, die den Körper am Laufen halten. Die Atmung kann flach werden oder aussetzen. Die Rachenmuskeln erschlaffen, die Zunge kann zurückfallen und die Atemwege verlegen. Husten- und Schluckreflexe werden schwächer, und Mageninhalt kann in die Lunge gelangen. Der Blutdruck fällt häufig. Deshalb hält der Anästhesist die Atemwege frei, gibt Sauerstoff, beatmet den Patienten oft über Tubus oder Maske und passt die Mittel Minute für Minute an.

Örtliche Betäubungsmittel wirken direkt am Nerv. Ein Nervensignal ist eine elektrische Welle, die an einer Faser entlangläuft. Getragen wird sie von Natrium-Ionen, die durch winzige Kanäle in der Membran einströmen. Das Mittel blockiert diese Kanäle: Die Welle erstirbt dort, wo es liegt, und vom Gebiet dahinter kommt im Gehirn nichts mehr an. Um einen Nerv gespritzt, betäubt es dessen ganzes Versorgungsgebiet; in der Flüssigkeit um die Nervenwurzeln im unteren Rücken die untere Körperhälfte. Herz- und Hirnzellen nutzen dieselbe Art von Kanal, deshalb kann zu viel Betäubungsmittel im Blut Krampfanfälle auslösen oder das Herz anhalten.



Ein Nerv ist ein Kabel aus Tausenden Fasern; das örtliche Betäubungsmittel bringt jede zum Schweigen, die es erreicht.

Wie man sie sicher macht

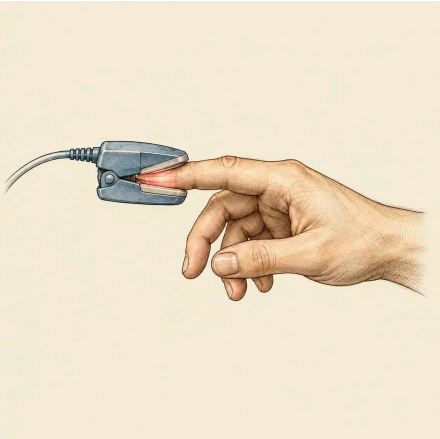
Dieser Abschnitt beschreibt, wie Krankenhäuser die Anästhesie organisieren. Er ist keine Anleitung für den Gebrauch außerhalb.

Ein ausgebildetes Team. Je nach Land führt eine über Jahre weitergebildete Ärztin oder ein Arzt die Narkose, anderswo spezialisierte Pflegekräfte. Sie bleiben beim Patienten vom ersten Medikament, bis Atmung und Bewusstsein sicher zurück sind.

Das Vorgespräch. Das Team fragt nach Krankheiten, Medikamenten, Allergien und früheren Narkosen, untersucht Mund, Hals, Herz und Lunge und wählt mit dem Patienten zwischen Narkose, Regional- und örtlicher Betäubung.

Ein leerer Magen. Vor einer geplanten Operation isst der Patient einige Stunden vorher nichts mehr, nach einer leichten Mahlzeit meist etwa sechs. Das senkt das Risiko, dass Mageninhalt in die Lunge gelangt. Die genauen Zeiten legt die Klinik für jeden Patienten fest.

Vor jedem Eingriff geprüfte Geräte. Sauerstoff mit Reserveflasche, Absaugung, Hilfsmittel zum Offenhalten der Atemwege, eine Möglichkeit, von Hand zu beatmen, falls das Gerät ausfällt, und Notfallmedikamente. Ein Feldlazarett arbeitet mit einfacherer Ausrüstung, kann aber auf nichts davon verzichten.



Der Sensor schickt rotes und infrarotes Licht durch den Finger und schätzt, welcher Anteil des Hämoglobins mit Sauerstoff beladen ist.

Ständige Überwachung. Das Pulsoxymeter zeigt die Sauerstoffsättigung des Blutes. Weitere Geräte verfolgen Herzrhythmus, Blutdruck und das Kohlendioxid in jedem Atemzug, das zeigt, dass die Luft wirklich in die Lunge gelangt. Keines ersetzt den Anästhesisten, der den Patienten im Blick behält.

Die Checkliste. 2008 führte die Weltgesundheitsorganisation eine Checkliste für sichere Chirurgie ein. Das Team hält vor der Narkoseeinleitung inne, um Patient, Eingriff, Allergien, einen schwierigen Atemweg und ein funktionierendes Pulsoxymeter zu bestätigen, dann erneut vor dem Schnitt und bevor der Patient den Saal verlässt. In einer Studie in acht Krankenhäusern sank die Sterblichkeit nach großen Operationen von 1,5 % auf 0,8 %.

Das Aufwachen. Der Patient erwacht im Aufwachraum, wo Pflegekräfte Atmung, Sauerstoff, Schmerz und Übelkeit überwachen. Nach einer Narkose muss ihn jemand nach Hause bringen, und er darf mindestens 24 Stunden nicht Auto fahren.

> **Sicherheit.** Narkosegase und -medikamente dürfen niemals außerhalb fachkundiger ärztlicher Betreuung verwendet werden. Bei vielen dieser Mittel liegt die Dosis, die das Bewusstsein ausschaltet, nicht weit von einer, die die Atmung oder die Schutzreflexe ausschaltet, und der Abstand schwankt von Mensch zu Mensch und von Minute zu Minute. Ohne jemanden, der gelernt hat, die Atemwege freizuhalten und Sauerstoff zu geben, und ohne Überwachung und Notfallausrüstung kann ein bewusstloser Mensch innerhalb von Minuten sterben. Das Einatmen von Gasen oder Lösungsmitteln zum Rausch hat viele Menschen getötet, und Äther ist leicht entzündlich. Wer starke Schmerzen hat oder operiert werden muss, gehört ins Krankenhaus.

Geschichte und Entwicklung

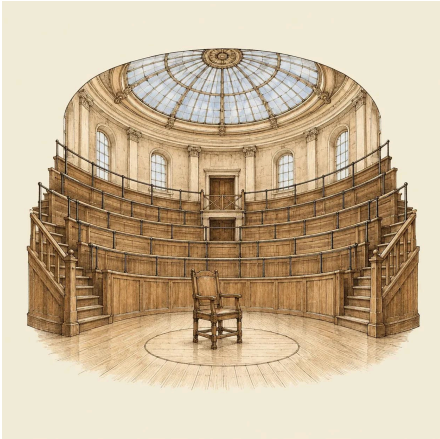
Vor der Anästhesie verließen sich Chirurgen auf Alkohol, Opium und Schnelligkeit. Am 13. Oktober 1804 entfernte Hanaoka Seishū in Japan einer Frau, die seine Kräutermischung geschluckt hatte, einen Brusttumor. Japan war damals von der Welt abgeschlossen, und seine Arbeit blieb im Ausland unbekannt.

1800 schlug Humphry Davy vor, Lachgas bei Operationen zu verwenden. Im Dezember 1844 ließ sich der Zahnarzt Horace Wells unter Lachgas einen Zahn ziehen, doch seine Vorführung in Boston im Januar 1845 scheiterte, als der Patient aufschrie. In Georgia hatte Crawford Long schon am 30. März 1842 unter Äther operiert, veröffentlichte aber erst 1849.

Die Tafel nimmt den 16. Oktober 1846 als Datum. Im Massachusetts General Hospital gab Morton dem Patienten Gilbert Abbott Äther, während der Chirurg John Collins Warren ihm einen Tumor am Hals entfernte. Die Nachricht verbreitete sich rasch, und binnen Monaten wurde Äther in Europa verwendet. In Edinburgh probierte James Young Simpson am 4. November 1847 Chloroform aus; es wirkte schneller und brannte nicht, doch die Spanne zwischen genug und zu viel war schmal. John Snow untersuchte seine Dosierung und gab es 1853 Königin Victoria bei der Geburt von Prinz Leopold. Die Narkose erlaubte längere Operationen, aber die Wunden eiterten weiter, bis Ende der 1860er-Jahre die Antisepsis kam.

1884 zeigte Carl Koller, dass Kokain das Auge betäubt, und 1898 führte August Bier in Kiel die erste Spinalanästhesie durch. Kokain war giftig und machte süchtig, also folgten sicherere synthetische Mittel: Procain 1905, Lidocain in den 1940er-Jahren. Im 20. Jahrhundert kamen intravenöse Narkosemittel und Muskelrelaxanzien

hinzu, die Intubation wurde zur Routine, und die Pulsoxymetrie, 1974 von Takuo Aoyagi beschrieben, setzte sich in den 1980er-Jahren in den Operationssälen durch.



Chirurgie wurde in Hörsälen mit steil ansteigenden Rängen gelehrt, wie dem in Boston, der heute Ether Dome heißt.

Kennzahlen

Äthertag
16. Oktober 1846, Massachusetts General Hospital, Boston

Kokain am Auge
Kollers Mitteilung, verlesen in Heidelberg am 15. September 1884

WHO-Checkliste für sichere Chirurgie
19 Punkte; in acht Pilotkliniken sank die Sterblichkeit von 1,5 % auf 0,8 % (2009)

Hanaokas Operation
13. Oktober 1804, Japan, mit einem geschluckten Betäubungsmittel

Pulsoxymetrie
Prinzip 1974 von Takuo Aoyagi beschrieben

Quellen

1. Ether & Ether Dome History · Massachusetts General Hospital, Treadwell Virtual Library https://libguides.massgeneral.org/mghhistory/ether
2. Crawford Long (Scientist of the Day) · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/crawford-long
3. The surprising and long story of the first use of ether in surgery · The Conversation https://theconversation.com/the-surprising-and-long-story-of-the-first-use-of-ether-in-surgery-113340
4. Horace Wells (1815–1848) and William TG Morton (1819–1868): pioneers in anaesthesiology · South African Dental Journal, vol. 75 no. 2 (2020) https://scielo.org.za/pdf/sadj/v75n2/11.pdf
5. Davy, Researches, chemical and philosophical, chiefly concerning nitrous oxide (1800) · Heirs of Hippocrates, University of Iowa Libraries https://heirs.lib.uiowa.edu/record.php?id=1338.5
6. History of the Japanese Society of Anesthesiologists · Japanese Society of Anesthesiologists https://anesth.or.jp/users/english/about_jsa/history
7. A great leap forward: James Young Simpson · Royal College of Surgeons of Edinburgh https://archiveandlibrary.rcsed.ac.uk/special-collections/the-battle-for-midwifery/a-great-leap-forward-james-young-simpson
8. John Snow: anesthesia · UCLA Fielding School of Public Health https://epi-snow.ph.ucla.edu/Stream4_Snowlife_d.html
9. Cocaine: what is the crack? A brief history of the use of cocaine as an anesthetic · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4335732/
10. Cocaine and self-experimentation · Association of Anaesthetists, Heritage Centre https://anaesthetists.org/Home/Heritage-centre/Learning/Heritage-Centre-blog-celebrating-75-years-of-Anaesthesia/Cocaine-and-Self-experimentation-a-blog-post-from-the-Heritage-Centre
11. Sodium channels and local anesthetics: old friends with new perspectives (Körner et al., 2022) · Frontiers in Pharmacology https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphar.2022.837088/full
12. How general anesthetics work (Hibbs lab, Nature 2020) · UT Southwestern Medical Center https://www.utsouthwestern.edu/ctplus/stories/2020/general-anesthetics-benzos.html
13. General anaesthesia · NHS https://www.nhs.uk/conditions/general-anaesthesia/
14. Local anaesthesia · NHS https://www.nhs.uk/conditions/local-anaesthesia/
15. Pulse oximetry, Takuo Aoyagi memorial issue (Journal of Anesthesia, 2021) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8327306/
16. Safe surgery: tools and resources · World Health Organization https://www.who.int/teams/integrated-health-services/patient-safety/research/safe-surgery/tool-and-resources
17. RCSI endorses the World Health Organisation's second Global Patient Safety Challenge (June 2008) · RCSI University of Medicine and Health Sciences https://www.rcsi.com/dublin/news-and-events/news/news-article/2008/06/rcsi-endorses-the-world-health-organisations-second-global-patient-safety-challenge
18. Implementation manual: WHO surgical safety checklist 2009 · World Health Organization https://www.who.int/publications/i/item/9789241598590
19. Simple surgical checklist cuts deaths 40 percent · Harvard Medical School https://hms.harvard.edu/news/simple-surgical-checklist-cuts-deaths-40-percent

Fakten geprüft am 2026-10-14

Hygiene und Antisepsis

Keimen den Weg abschneiden

1847 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Seife (S. 95), Mikroskop (S. 217), Trinkwasser (S. 35), Destillation (S. 176)

Führt zu: Anästhesie (S. 297), Penicillin (S. 361)

1 Waschschüssel und Krug 2 Kessel des Karbolsprays 3 Düse und Karbolnebel
4 Verschraubter Deckel, Manometer und Sicherheitsventil 5 Instrumentenkorb im Dampf 6 Brenner unter dem Autoklav

Hygiene und Antisepsis unterbrechen die Wege, auf denen Keime von Mensch zu Mensch gelangen: Hände, Instrumente, Verbände und Wasser. Händewaschen mit Seife, Trinkwasser getrennt vom Abwasser, Mittel, die Keime in Wunden abtöten, und Hitze, die Werkzeug sterilisiert, haben Geburt und Chirurgie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts weit sicherer gemacht.

Was es ist

Keime wandern auf Wegen, die niemand sieht, von einem Menschen zum nächsten: eine Hand, die erst einen Kranken und dann eine Wunde berührt, ein Messer, das an der Schürze abgewischt wird, Wasser, das unterhalb einer Latrine geschöpft wird. Hygiene und Antisepsis sind die Gewohnheiten und Werkzeuge, die diese Wege unterbrechen. Seife und Wasser entfernen Keime. Hitze und bestimmte Chemikalien töten sie ab. Asepsis im Sinne der Chirurgen hält sie von vornherein von der Wunde fern.

Die Tafel zeigt drei Stationen dieser Idee: die Waschschüssel am Eingang eines Wiener Gebärsaals von 1847, das Karbolspray, das Joseph Lister in den 1870er-Jahren einsetzte, und den Dampfautoklav, in dem ab den 1880er-Jahren Instrumente und Verbandstoffe mit Hitze statt mit Chemikalien sterilisiert wurden.

Wie es funktioniert

Bakterien sind Einzeller von wenigen tausendstel Millimetern Länge; Viren sind viel kleiner und vermehren sich nur in lebenden Zellen. Beide reisen auf der Haut, in Tröpfchen, Staub, Nahrung, Wasser oder an Werkzeugen, und Kot enthält sie in riesigen Mengen. Eine Infektion braucht eine Quelle, einen Überträger und eine Eintrittspforte, etwa den Mund oder eine verletzte Hautstelle. Wer sich zwischen zwei Kranken die Hände wäscht, nimmt dem Keim seinen Überträger, und er kommt nicht weiter.

Seife wirkt vor allem, indem sie Keime fortspült. Jedes Seifenmolekül hält mit einem Ende Wasser fest und mit dem anderen Fett. So löst es den Fettfilm der Haut samt den darin haftenden Mikroben und trägt ihn ins Spülwasser. Viren mit einer fetthaltigen Hülle, etwa das Grippevirus, bricht es außerdem auf.

Mit verschränkten Fingern erreicht man die Haut zwischen ihnen, eine der am häufigsten vergessenen Stellen.

Hitze tötet, indem sie die Eiweiße eines Keims dauerhaft entfaltet, so wie sie Eiklar stocken lässt. Sprudelndes Kochen tötet gewöhnliche Bakterien, Viren und Parasiten. Manche Bakterien, darunter die Erreger von Wundstarrkrampf und Botulismus, können sich in Sporen mit zäher Hülle zurückziehen, die das Kochen überstehen. Dampf unter Druck, der im Autoklav lange genug bei 121 °C oder mehr gehalten wird und jede Oberfläche des Guts erreicht, tötet auch sie ab: Das ist Sterilisation im strengen Sinn.

Antiseptika werden auf lebendem Gewebe angewandt, Desinfektionsmittel auf Gegenständen. Alkohol entfaltet Eiweiße, deshalb enthalten Händedesinfektionsmittel mindestens 60 % davon. Chlorverbindungen wie der in Wien verwendete Chlorkalk oder heutiges Haushaltsbleichmittel oxidieren alles, was sie in der Zelle berühren. Listers Karbolsäure tötete Keime, schädigte aber auch das Gewebe der Patienten und die Hände der Chirurgen und wurde aufgegeben. Schmutz und Blut schirmen Keime gegen all diese Mittel ab, darum wird immer zuerst gereinigt.

Wie man vorgeht

Es geht hier um alltägliche Gewohnheiten, die Gesundheitsbehörden empfehlen, nicht um ärztliche Eingriffe.

Richtig Hände waschen. Mit sauberem fließendem oder gegossenem Wasser anfeuchten und mit Seife einschäumen. Handfläche an Handfläche reiben, jede Handfläche über den Rücken der anderen Hand mit verschränkten Fingern, noch einmal Handfläche an Handfläche mit verschränkten Fingern, die Fingerrücken, jeden Daumen in der anderen Handfläche drehen und die Fingerkuppen in der Handfläche reiben. Der WHO-Ablauf dauert 40 bis 60 Sekunden, die US-Behörde CDC verlangt mindestens 20 Sekunden Reiben. Abspülen und mit einem sauberen Handtuch oder an der Luft trocknen.

Wissen, wann. Nach der Toilette oder dem Wickeln, vor dem Kochen und Essen, vor und nach der Pflege eines Kranken oder einer Wunde und nach dem Kontakt mit Tieren oder Abfall.

Wasser und Abfall trennen. Latrinen hangabwärts von jedem Brunnen und jeder Quelle und mindestens 30 m davon entfernt anlegen, in Kies oder klüftigem Fels weiter, mit der Grubensohle mindestens 1,5 m über dem

höchsten Grundwasserstand der Regenzeit. Diese Abstände sind nur ein Ausgangswert: Den Boden und die Fließrichtung des Grundwassers vom örtlichen Gesundheits- oder Wasserdienst prüfen lassen.

Die zwanzig Minuten ab dem sprudelnden Kochen zählen und danach nichts mehr hineinlegen.

Werkzeug und Tücher auskochen. Schere, Pinzette und Tücher zuerst mit Seife waschen, denn Hitze dringt schlecht durch eingetrocknetes Blut und Fett. In einem Topf mit Deckel mit Wasser bedecken, sprudelnd aufkochen und ab da 20 Minuten zählen, ohne etwas nachzulegen. Abkühlen lassen, die Gegenstände mit einer mitgekochten Zange herausnehmen und sofort in eine ebenfalls ausgekochte Dose mit Deckel legen. Sie taugen zum Entfernen eines Splitters oder zum Zuschneiden eines Verbands. Auskochen desinfiziert, sterilisiert aber nicht: Nadeln und alles, was in den Körper eindringt, müssen steril und versiegelt aus Apotheke oder Praxis kommen.

Eine kleine Schnittwunde reinigen. Hände waschen, dann die Wunde unter sauberem Leitungswasser oder abgekochtem, abgekühltem Wasser spülen, bis kein Schmutz mehr zu sehen ist, und die Haut drumherum mit Seife waschen. Trocken tupfen und mit einer sterilen Kompresse oder einem Pflaster aus der Apotheke abdecken.

> **Sicherheit.** Stellen Sie keine Antiseptika oder Desinfektionsmittel selbst her und mischen Sie nie Reinigungsmittel: Chlorbleiche mit Säuren oder Ammoniak setzt giftiges Gas frei. Nichts von dem hier Beschriebenen darf geschluckt oder gespritzt werden. Kochendes Wasser und Dampf verbrühen, Kinder also vom Topf fernhalten. Rufen Sie bei einer Blutung, die nicht aufhört, oder einem sehr tiefen Schnitt den Notruf. Suchen Sie rasch ärztliche Hilfe bei einem klaffenden oder langen Schnitt, einer Verbrennung, jedem Biss durch Tier oder Mensch, einer mit Erde verschmutzten Wunde und wenn eine Wunde rot, geschwollen oder schmerzhafter wird, eitert oder Fieber hinzukommt. Eine Tetanusimpfung kann nötig sein.

Geschichte und Entwicklung

Im Wiener Gebärhaus verlor die Klinik, in der Medizinstudenten ausgebildet wurden, etwa jede zehnte Mutter an Kindbettfieber, die Klinik der Hebammen etwa jede dreißigste. Im März 1847 starb Jakob Kolletschka, ein Kollege des jungen Arztes Ignaz Semmelweis, an einer Schnittverletzung aus einer Leichenöffnung, mit denselben Zeichen wie die Wöchnerinnen. Semmelweis schloss, dass die Studenten „Leichenteilchen“ aus dem Sektionssaal in den Kreißsaal trugen. Ab Mai 1847, dem Datum, das diese Tafel ansetzt, ließ er sie die Hände in Chlorkalklösung waschen, und 1848 sank die Sterblichkeit seiner Klinik auf 1,27 %. Viele Kollegen lehnten seine Erklärung ab.

1854 führte John Snow einen Cholera-Ausbruch in London auf eine einzige Straßenpumpe zurück. Im Militärspital von Scutari, wo Florence Nightingale pflegte, starben im Februar 1855 42 % der aufgenommenen Soldaten; die Zahl fiel, nachdem die Abwasserkanäle repariert und die Säle gelüftet worden waren.

Anfang der 1860er-Jahre zeigte Louis Pasteur, dass abgekochte Brühe in einem Kolben mit langem, gebogenem Hals klar blieb, während Brühe, auf die Staub fiel, verdarb: Lebende Keime verursachten die Fäulnis. In Glasgow folgerte Joseph Lister, dass Keime auch Wunden eitern ließen. Im August 1865 verband er den offenen Beinbruch eines Jungen mit Karbolsäure, und das Bein heilte ohne Infektion; 1867 veröffentlichte er das Verfahren. Bei seinen Amputationen sanken die Todesfälle von 16 bei 35 auf 6 bei 40, Zahlen, die er selbst klein nannte.

Charles Chamberland, ein Mitarbeiter Pasteurs, entwarf 1879 einen Dampfsterilisator, und 1886 stellte Ernst von Bergmann in Berlin auf dampfsterilisiertes Verbandmaterial um. Chirurgen hielten Keime nun mit sterilisierten

Instrumenten und Kitteln und ab den 1890er-Jahren mit Gummihandschuhen aus der Wunde fern. Die WHO-Leitlinien zur Händehygiene von 2009 nennen fünf Momente, in denen Pflegende ihre Hände reinigen müssen.

Pasteurs Schwanenhalskolben: Der Staub bleibt in der Biegung hängen, die Brühe bleibt klar.

Kennzahlen

Händewaschen in Wien

Ab Mai 1847; die Sterblichkeit in der Ärzteklinik sank von etwa 10 % (1840–1846) auf 1,27 % im Jahr 1848

Händehygiene (WHO)

40–60 s mit Wasser und Seife, 20–30 s mit alkoholischem Händedesinfektionsmittel

Auskochen von Werkzeug

20 min sprudelndes Kochen desinfiziert, tötet Bakteriensporen aber nicht sicher ab

Listers Amputationen

16 Todesfälle bei 35 Eingriffen vor der Antisepsis, 6 bei 40 danach

Dampfsterilisation (CDC)

Verpacktes Gut: 121 °C für mindestens 30 min im Gravitationsverfahren oder 132 °C für 4 min im Vakuumverfahren

Quellen

1. Ignaz Phillip Semmelweis' studies of death in childbirth (I. Loudon, Journal of the Royal Society of Medicine, 2013) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3807776
2. Pioneering Hand Hygiene: Ignaz Semmelweis and the Fight Against Puerperal Fever (Cureus, 2024) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11568873/
3. Joseph Lister (1827-1912): A Pioneer of Antiseptic Surgery (Cureus, 2022) · PubMed Central https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9854334/
4. Statistics and the British controversy about the effects of Joseph Lister's system of antisepsis for surgery, 1867-1890 (U. Tröhler) · James Lind Library https://www.jameslindlibrary.org/articles/statistics-and-the-british-controversy-about-the-effects-of-joseph-listers-system-of-antisepsis-for-surgery-1867-1890/
5. Charles Chamberland, l'inventeur d'outils de stérilisation · Institut Pasteur https://www.pasteur.fr/fr/institut-pasteur/notre-histoire/charles-chamberland-inventeur-outils-sterilisation
6. Bergmann, Ernst von · Deutsche Biographie https://www.deutsche-biographie.de/pnd118656104.html
7. Florence Nightingale: the Lady with the Lamp · National Army Museum https://www.nam.ac.uk/explore/florence-nightingale-lady-lamp
8. John Snow, cholera and the Broad Street pump · London Museum https://www.londonmuseum.org.uk/collections/london-stories/john-snow-cholera-broad-street-pump/
9. Hand Hygiene: Why, How & When? · World Health Organization https://www.afro.who.int/sites/default/files/2017-06/Hand_Hygiene_Why_How_and_When_Brochure.pdf
10. About handwashing · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/clean-hands/about/index.html
11. Handwashing facts · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/clean-hands/data-research/facts-stats
12. Steam sterilization · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/infection-control/hcp/disinfection-sterilization/steam-sterilization.html
13. Clostridium botulinum · AGES, Austrian Agency for Health and Food Safety https://www.ages.at/en/human/disease/pathogens-from-a-to-z/clostridium-botulinum
14. A Community Guide to Environmental Health: Disinfecting with heat · Hesperian Health Guides https://en.hesperian.org/hhg/A_Community_Guide_to_Environmental_Health:Disinfecting_with_Heat
15. Excreta, pit for stools and vomit · Médecins Sans Frontières https://medicalguidelines.msf.org/en/viewport/CHOL/english/appendix-14-excreta-pit-stools-and-vomit-32409860.html
16. Cuts and grazes · NHS https://www.nhs.uk/conditions/cuts-and-grazes/

Fakten geprüft am 2026-10-14

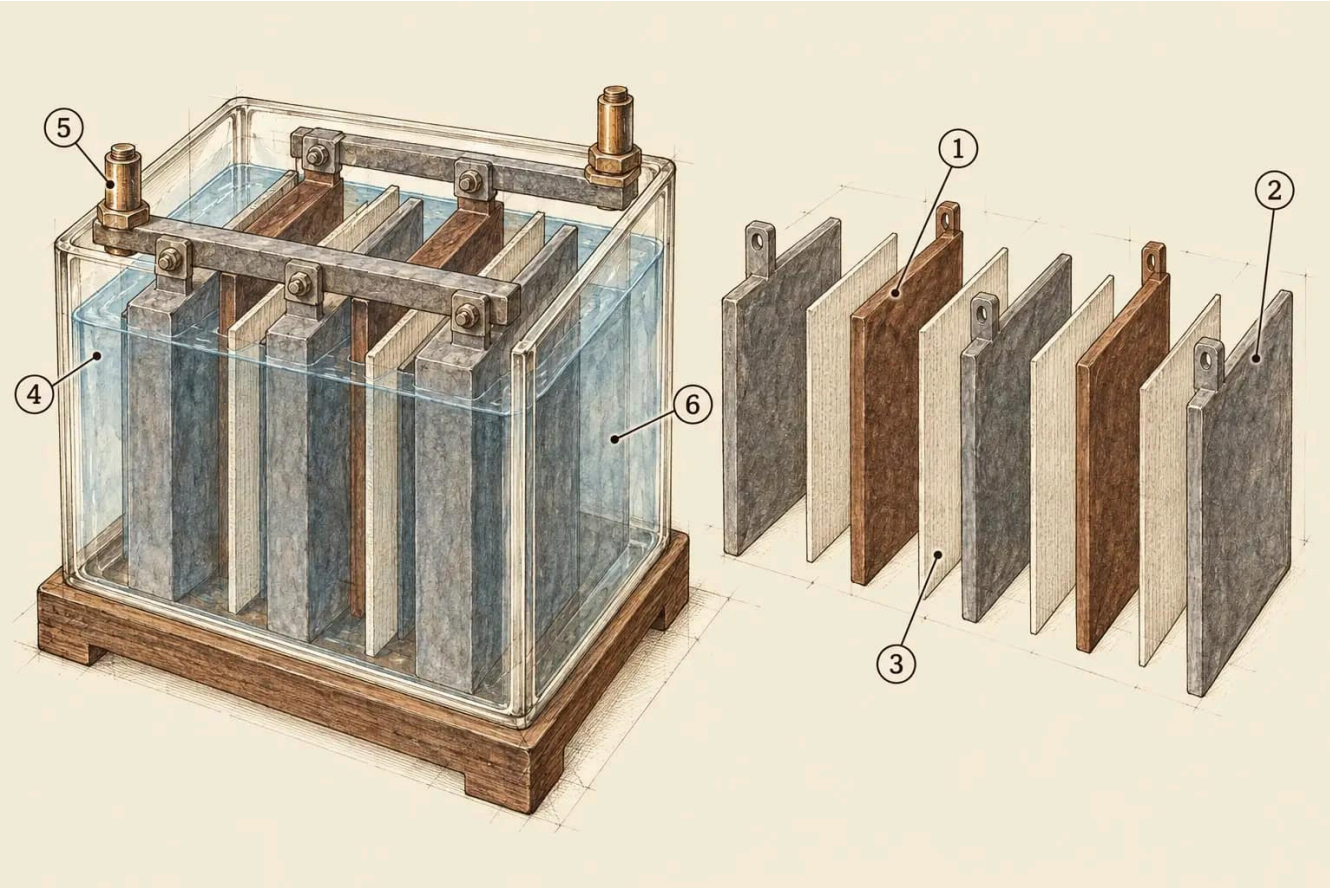
Bleiakkumulator

Strom auf Vorrat in Blei und Säure

1859 · Industriezeitalter · Wissenschaft & Industrie

Erfordert: Batterie (S. 243), Elektrischer Generator (S. 277)

Führt zu: Windkraftanlage (S. 344)



1 Positive Platte (Bleidioxid) 2 Negative Platte (Bleischwamm) 3 Separator 4 Elektrolyt (verdünnte Schwefelsäure) 5 Bleibrücke und Polbolzen 6 Glasgefäß

Ein Bleiakkumulator speichert elektrische Energie in Platten aus Blei und Bleidioxid, die in verdünnter Schwefelsäure stehen, gibt sie als Strom wieder ab und lässt sich hunderte Male neu laden. Gaston Planté baute 1859 die erste Zelle; mit den pastierten Platten von Camille Faure wurde sie 1881 zum Industrieprodukt, und sie startet bis heute die meisten Autos der Welt.

Was es ist

Ein Bleiakkumulator speichert elektrische Energie in chemischer Form und gibt sie als Strom zurück, hunderte Male hintereinander. Jede Zelle enthält Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure und liefert rund zwei Volt. Eine Autobatterie besteht aus sechs Zellen in einem Gehäuse, in Reihe geschaltet: zwölf Volt.

Der französische Physiker Gaston Planté baute 1859 die erste wiederaufladbare Zelle: Man lud sie, indem man Strom in Gegenrichtung hindurchschickte. 1881 änderte Camille Faure die Vorbereitung der Platten und bestrich

sie mit Bleioxid. Damit waren die Zellen schneller einsatzbereit und ließen sich in Fabriken herstellen. Die Reaktion im Inneren ist die von Planté.

Wie es funktioniert

Die positiven Platten (1) tragen Bleidioxid, ein dunkelbraunes Pulver. Die negativen Platten (2) tragen Blei in Schwammform, grau und voller Poren, damit die Säure möglichst viel Metall erreicht. Separatoren (3) halten sie auseinander, und der Elektrolyt (4), mit Wasser verdünnte Schwefelsäure, füllt jeden Zwischenraum.

Eine pastierte Platte: Bleioxidpaste wird in ein gegossenes Bleigitter gedrückt, das sie festhält.

Beim Entladen reagieren Blei und Bleidioxid auf den Platten mit der Säure und werden zu Bleisulfat, während die Bleigitter den Strom leiten. Elektronen verlassen die negative Platte und erreichen die positive über den äußeren Stromkreis, wo sie Lampe oder Motor antreiben. Die Reaktion verbraucht Säure und bildet Wasser, der Elektrolyt wird also dünner, je leerer die Zelle ist. In einer Starterbatterie sinkt seine relative Dichte (bezogen auf Wasser) von etwa 1,265 auf etwa 1,12.

Beim Laden läuft die Reaktion rückwärts. Strom aus einem Generator, einem Solarmodul oder einem Netzladegerät verwandelt das Sulfat zurück in Blei und Bleidioxid, und die Säure kehrt in die Flüssigkeit zurück. Gegen Ende ist kaum noch Sulfat übrig, und ein Teil des Stroms zerlegt stattdessen Wasser: Wasserstoff perlt an den negativen Platten auf, Sauerstoff an den positiven. Deshalb verlieren offene Batterien Wasser, und Laderäume brauchen frische Luft.

Die Kapazität wird in Amperestunden (Ah) angegeben. Eine 60-Ah-Batterie liefert etwa 20 Stunden lang 3 A, das ist die übliche Bezugsdauer, bei schnellerer Entladung weniger. Bleibt Sulfat wochenlang auf einer entladenen Platte, kann es zu harten Kristallen wachsen, die normales Laden nicht mehr sicher zurückbildet. Tiefentladungen verschleißen zudem die aktive Masse. In einem Vergleich von Battery University hielt eine Starterbatterie, die jedes Mal ganz entleert wurde, 12 bis 15 Zyklen, gegenüber 130 bis 150, wenn nur 30 % der Ladung entnommen wurden.

Wie man vorgeht

Wer Zellen selbst herstellt, hantiert mit flüssigem Blei und konzentrierter Säure. Dieser Abschnitt behandelt deshalb Auswahl, Laden und Pflege einer gekauften Batterie.

Nach dem Verbrauch auslegen. Eine Hütte betreibt täglich drei LED-Lampen zu 5 W fünf Stunden lang und ein Radio mit 10 W drei Stunden lang: 75 + 30 = 105 Wattstunden, bei 12 V etwa 9 Ah. Rechnen Sie mit zwei Tagen ohne Nachladen (18 Ah) und nutzen Sie höchstens die halbe Kapazität: nötig sind mindestens 36 Ah. Wählen Sie eine zyklenfeste Batterie mit 40 bis 50 Ah, denn Kälte senkt die Kapazität zusätzlich.

Mit der richtigen Spannung laden. Verwenden Sie ein Ladegerät, das zu Spannung und Bauart der Batterie passt (offen, AGM oder Gel), und halten Sie sich an die Ladekennlinie des Herstellers. Bei etwa 25 °C wird eine offene 12-V-Batterie je nach Modell meist bis 13,8 bis 14,7 V geladen und danach mit etwa 13,5 V gehalten; gute Ladegeräte passen die Ladespannung an die Temperatur der Batterie an. An einem Solarmodul gehört ein Laderegler zwischen Modul und Batterie. Unabhängig von der Ladequelle gehört nahe an den Pluspol eine auf das Kabel abgestimmte Sicherung, und jeder Verbraucherstromkreis wird eigens abgesichert. Laden Sie bald nach jeder Nutzung nach und laden Sie nie eine gefrorene Batterie.

Ball drücken, Säure aus einer Zelle ansaugen und ablesen, wie hoch der Schwimmer steht: je dichter die Säure, desto voller die Zelle.

Den Ladezustand prüfen. Lassen Sie die abgeklemmte Batterie mindestens vier Stunden ruhen, besser einen Tag, und messen Sie dann die Spannung an den Polen. Ein Beispiel: Eine Starterbatterie zeigt bei 26 °C nach einem Tag Ruhe etwa 12,65 V, wenn sie voll ist, und etwa 11,9 V, wenn sie leer ist; jedes Modell ist anders, maßgeblich ist die Tabelle des Herstellers. Bei offenen Batterien misst ein Säureheber jede Zelle einzeln: bei derselben Batterie etwa 1,265 voll und etwa 1,12 leer.

Nur mit destilliertem Wasser nachfüllen. Füllen Sie nach dem Laden, wenn die Batterie abgekühlt ist, destilliertes Wasser bis zur Marke nach. Liegen die Platten schon vor dem Laden frei, gießen Sie nur so viel nach, dass sie bedeckt sind. Nie Säure nachfüllen. Verschlossene AGM- und Gelbatterien brauchen kein Wasser.

Reinigen, lagern, zurückgeben. Bürsten Sie Belag an den Polen mit Natronwasser ab, ohne dass etwas in die Zellen gelangt, trocknen Sie die Pole und fetten Sie sie dünn ein. Lagern Sie eine Batterie geladen, kühl und trocken; prüfen Sie etwa monatlich die Spannung und laden Sie nach, bevor sie unter etwa 12,3 V oder die Schwelle des Herstellers fällt, spätestens aber alle sechs Monate. Eine verbrauchte Batterie geht an den Händler oder an eine Sammelstelle.

> **Sicherheit.** Batteriesäure verätzt Haut und Augen: Schutzbrille und säurefeste Handschuhe tragen. Nach einem Spritzer mindestens 30 Minuten mit fließendem Wasser spülen und ärztliche Hilfe holen. Beim Laden entsteht Wasserstoff, den ein Funke oder eine Flamme zünden kann: nur in belüfteten Räumen laden, in der Nähe nie rauchen und das Ladegerät ausschalten, bevor man die Klemmen anlegt oder abnimmt. Im Auto zuerst das Kabel abklemmen, das mit der Karosserie verbunden ist (fast immer das Minuskabel), und es zuletzt wieder anschließen. Ein Kurzschluss treibt Hunderte Ampere durch den Kreis und kann einen Schraubenschlüssel schmelzen: isoliertes Werkzeug benutzen, Ringe und Uhr ablegen. Eine Autobatterie kann 15 kg oder mehr wiegen: aufrecht halten und aus den Beinen heben. Blei ist giftig: nach dem Anfassen Hände waschen, eine Batterie nie verbrennen und nie ihr Gehäuse aufbrechen (bei offenen Batterien nur die Verschlussstopfen abnehmen) und von Kindern fernhalten.

Geschichte und Entwicklung

Planté stellte seine Zellen 1860 der Pariser Akademie der Wissenschaften vor: Bleibleche, durch Gummistreifen getrennt, in verdünnter Säure. Er „formierte“ sie, indem er den Strom immer wieder umpolte, bis ihre Oberfläche porös wurde.

Solange man zum Laden Primärelemente verbrauchen musste, blieben die Akkumulatoren im Labor; in den 1870er-Jahren änderte der Dynamo das. Faures Paste ersetzte monatelanges Formieren durch eine einzige Ladung von rund sechzig Stunden. Kraftwerke der 1880er- und 1890er-Jahre hielten Batterien parallel zu ihrem Netz, um die abendliche Spitzenlast abzufangen. Ab etwa 1893 versorgten Telefonämter die Leitungen ihrer Teilnehmer aus einer zentralen Batterie.

Um 1900 waren rund ein Drittel der Fahrzeuge auf amerikanischen Straßen Elektroautos, die meisten mit Bleibatterien. Der elektrische Anlasser von Charles Kettering, 1912 im Cadillac eingebaut, machte die Handkurbel überflüssig; als ihn andere Hersteller übernahmen, wurde die Starterbatterie zur Serienausstattung. In den USA werden etwa 99 % der Bleibatterien recycelt, und neue enthalten mehr als 80 % wiederverwertetes Material.

Reihen von Glaszellen hielten Lichtzentralen und Telefonämter über Lastspitzen und Ausfälle hinweg in Betrieb.

Kennzahlen

Spannung einer Zelle

Etwa 2,1 V in Ruhe, voll geladen; sechs Zellen in Reihe ergeben eine 12-V-Batterie

Ladespannung

2,30–2,45 V je Zelle, danach etwa 2,25 V je Zelle zur Erhaltung

Relative Säuredichte

Etwa 1,265 geladen, etwa 1,12 entladen (Starterbatterie, nach 24 Stunden Ruhe)

Recycling

99 % der Bleibatterien in den USA werden recycelt (Branchenstudie, Daten bis 2018)

Quellen

1. Accumulator (1911 Encyclopædia Britannica) · Encyclopædia Britannica, 11th edition, via Wikisource https://en.wikisource.org/wiki/1911_Encyclop%C3%A6dia_Britannica/Accumulator
2. One of the First Rechargeable Batteries, about 1860 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co36401/one-of-the-first-rechargeable-batteries-about-1860-lead-acid-rechargeable-batteries
3. Planté Battery – 1859 · National High Magnetic Field Laboratory https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/plante-battery-1859/
4. BU-201: How does the Lead Acid Battery Work? · Battery University (Cadex Electronics) https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work
5. BU-403: Charging Lead Acid · Battery University (Cadex Electronics) https://batteryuniversity.com/article/bu-403-charging-lead-acid
6. BU-903: How to Measure State-of-charge · Battery University (Cadex Electronics) https://batteryuniversity.com/article/bu-903-how-to-measure-state-of-charge
7. BU-804b: Sulfation and How to Prevent it · Battery University (Cadex Electronics) https://batteryuniversity.com/article/bu-804b-sulfation-and-how-to-prevent-it
8. Battery Charging – Industrial Lead-Acid Batteries · Canadian Centre for Occupational Health and Safety https://ccohs.ca/oshanswers/safety_haz/battery-charging.html
9. Charging safely · Safety+Health, National Safety Council (NIOSH advice) https://www.safetyandhealthmagazine.com/articles/charging-safely-2
10. Lead Battery Industry Issues New National Recycling Rate Study · Battery Council International https://batterycouncil.org/news/lead-battery-industry-issues-new-national-recycling-rate-study/
11. The History of the Electric Car · U.S. Department of Energy https://www.energy.gov/articles/history-electric-car
12. Switches, PBXs and Central Offices, chapter 12: power plants · TelephoneTribute.com https://www.telephonetribute.com/switches_survey_chapter_12.html
13. Lead poisoning and health · World Health Organization https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health
14. Lead–acid battery · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery

Fakten geprüft am 2026-10-14

V

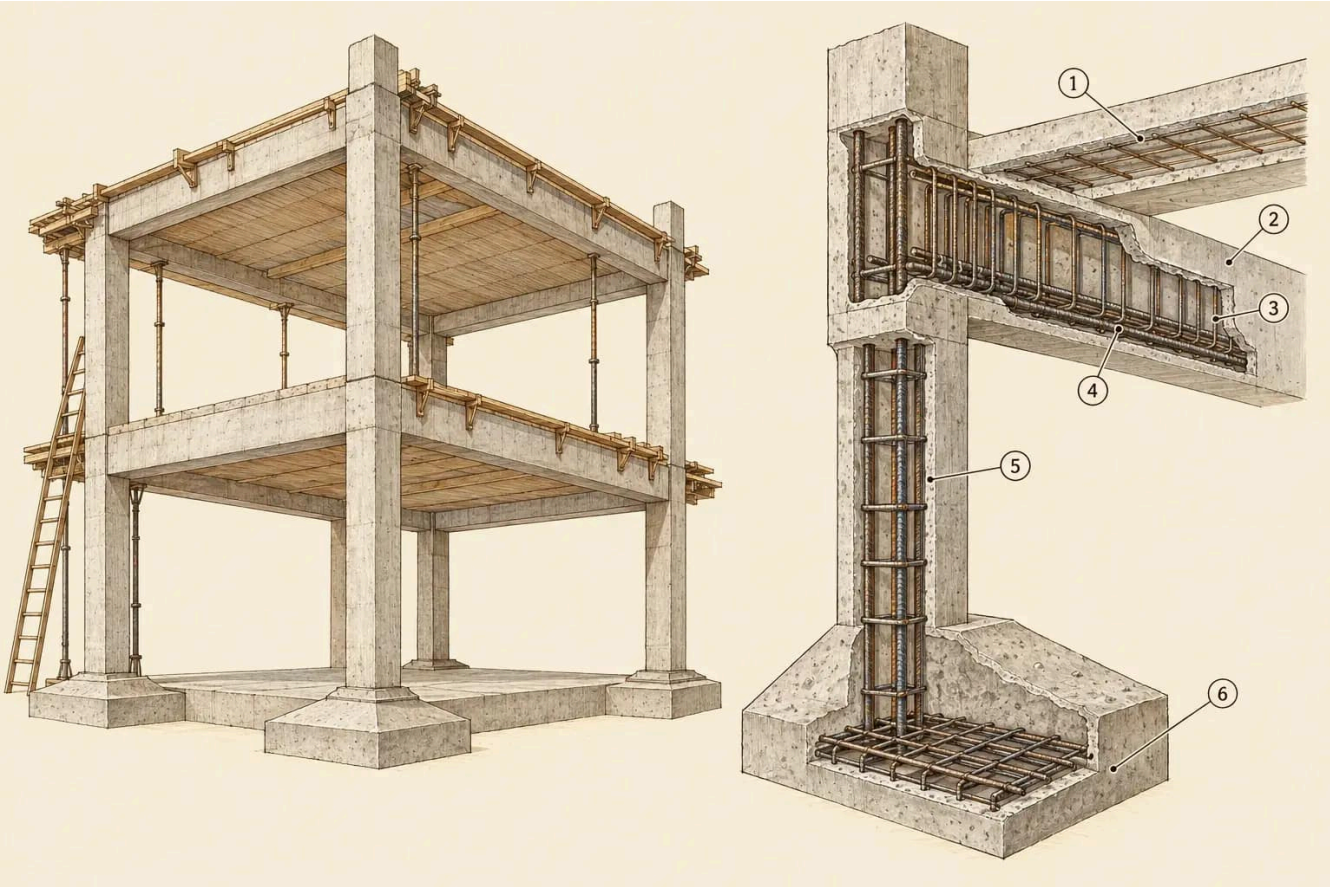
Elektrisches Zeitalter

Stahlbeton

Stahl nimmt den Zug, Beton den Druck

um 1848 · Industriezeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Portlandzement (S. 260), Stahl (S. 143)



1 Deckenplatte 2 Balken 3 Bügel 4 Hauptbewehrung auf der Zugseite 5 Stütze mit Bügeln 6 Fundament

Stahlbeton ist Beton mit einbetonierten Stahlstäben, die dort liegen, wo das Bauteil gezogen wird. Der Beton nimmt den Druck auf, der Stahl den Zug, und so überspannt ein flacher Balken oder eine Platte eine Öffnung, an der unbewehrter Beton oder Stein reißen würde.

Was es ist

Beton hält Druck sehr gut aus und Zug sehr schlecht: Seine Zugfestigkeit beträgt etwa ein Zehntel seiner Druckfestigkeit. Ein Balken aus unbewehrtem Beton reißt wie ein steinerner Sturz schon unter mäßiger Last an seiner gedehnten Unterseite. Deshalb überspannten die römischen Baumeister Räume mit Bögen, Gewölben und Kuppeln, Formen, die fast nur auf Druck beansprucht werden.

Stahlbeton legt Stahl dorthin, wo sich das Bauteil dehnt. Stäbe im unteren Teil eines Balkens nehmen den Zug auf, der Beton darüber den Druck. Zusammen lassen sie sich zu Platten, Balken, Stützen, Fundamenten, Wänden, Behältern und Brücken gießen.

Wie es funktioniert

Unter Last biegt sich ein Balken durch: Oben wird er kürzer, unten länger, die Unterseite reißt in haarfeinen Rissen, und von da an tragen die unteren Stäbe den Zug. Über den Innenstützen eines Durchlaufträgers und bei einem Kragarm liegt die gezogene Seite oben, also gehört die Hauptbewehrung dort nach oben. Eine allseitig gelagerte Platte biegt sich in zwei Richtungen und erhält ein Netz; eine einachsig gespannte bekommt quer dazu trotzdem leichtere Stäbe gegen Schwindrisse. In der Nähe der Auflager neigt der Balken außerdem zu schrägen Rissen; geschlossene Schlaufen aus dünnerem Stahl, die Bügel, kreuzen diese Risse und sitzen dort enger. Stützen werden vor allem gedrückt, und Bügel um ihre Längsstäbe verhindern, dass diese nach außen ausknicken.

Die Verbindung funktioniert aus drei Gründen. Stahl und Beton dehnen sich bei Wärme fast gleich stark aus, um 10 bis 12 Millionstel je Grad Celsius. Die aufgewalzten Rippen moderner Stäbe verzahnen sich mit dem Beton und übertragen die Kraft vom einen auf den anderen. Und das Porenwasser des Betons ist stark alkalisch, etwa pH 12,5 bis 13; darin bildet der Stahl einen dünnen Oxidfilm, der das Rosten stoppt.

Dieser Schutz hält so lange wie die Betondeckung, die Betonschicht außerhalb der Stäbe. Kohlendioxid aus der Luft neutralisiert sie langsam durch Karbonatisierung, Meersalz oder Streusalz trägt Chloride hinein. Erreicht genug davon den Stahl und sind Feuchtigkeit und Sauerstoff vorhanden, rostet der Stab. Rost nimmt ein Mehrfaches des Volumens des verbrauchten Stahls ein, sprengt die Deckung und lässt sie in Schollen abplatzen. Solche Abplatzungen beginnen dort, wo die Deckung dünn oder porös ist. Die amerikanische Norm ACI 318 verlangt etwa 38 mm Deckung über dünnen Stäben im Freien und 75 mm, wo Beton direkt gegen Erdreich betoniert wird.

Rost quillt beim Entstehen auf und sprengt den zu dünnen Beton über dem Stab ab.

Spannbeton geht einen Schritt weiter: Hochfeste Stahldrähte werden gespannt und im Beton verankert, sodass das Bauteil schon vorab zusammengedrückt ist. Unter Last erfährt seine Unterseite wenig oder keinen Zug, und längere, schlankere Träger werden möglich.

Wie man es baut

Beschrieben wird ein kleiner Fertigsturz für eine Öffnung von höchstens 0,9 m in einer niedrigen Gartenmauer, unter nur wenigen Steinlagen, ohne Decke und Dach. Jedes Bauteil, das Menschen oder einen Teil eines Gebäudes trägt, auch der Sturz eines Wohnhauses, und jeder Sturz, dessen Absturz jemanden verletzen könnte, muss von einem Tragwerksplaner nach den örtlichen Vorschriften bemessen oder als zugelassenes Produkt gekauft werden.

Die Form bauen. Auf ebenem Boden Bretter zu einem offenen Kasten verschrauben, 1,2 m lang, innen 150 × 150 mm, sodass der Sturz an jedem Ende 150 mm aufliegt. Die Innenseiten ölen und die Seiten mit Pflöcken abstützen, damit der frische Beton sie nicht wegdrückt.

Den Stahl einlegen. Zwei Rippenstäbe mit 10 mm Durchmesser auf 1,1 m ablängen; so bleiben an jedem Ende 50 mm Beton. Sie auf 40 mm hohe Abstandhalter aus Kunststoff stellen, 40 mm von den Seiten entfernt, und mit Bindedraht festbinden, damit sie sich beim Betonieren nicht verschieben. Ganze Stäbe verwenden. Bei größeren Bauteilen werden Stäbe gestoßen, indem man sie auf einer vom Tragwerksplaner festgelegten Länge überlappen lässt, in australischen Bodenplatten von Wohnhäusern mindestens 500 mm.

Füllen, verdichten, nachbehandeln. Den Beton wie beim Portlandzement mischen, mit Kies von höchstens 10 mm. In zwei Lagen einfüllen, jede rund um die Stäbe stochern und gegen die Bretter klopfen, damit die Luft

Die Stäbe stehen auf Abstandhaltern, damit der Beton sie auch von unten umhüllt.

entweicht. Einen Pfeil in die Oberseite ritzen: Verkehrt herum eingebaut, läge der Stahl auf der gedrückten Seite. Den Sturz mindestens 7 Tage unter Folie feucht halten, bei kühlem Wetter länger.

Einbauen. Der Sturz wiegt etwa 65 kg: zu zweit in Bodenhöhe bewegen, über Hüfthöhe mit einer Hebehilfe, und auf ein Mörtelbett legen, die Stahlseite nach unten. Erst nach etwa 28 Tagen darauf weitermauern, wenn der Beton nahezu seine vorgesehene Festigkeit hat.

Den Zug sichtbar machen. Drei Mörtelstäbe von 50 × 50 × 500 mm gießen, einen ohne Einlage und zwei mit einem 4-mm-Stahldraht 15 mm über einer Seite. Nach einer Woche jeden am Boden auf zwei Ziegel legen, 400 mm auseinander, ein kurzes Brett quer über die Mitte legen und darauf einen Ziegel nach dem anderen stapeln. Der unbewehrte Stab bricht schlagartig; der mit dem Draht unten reißt an der Unterseite, biegt sich durch und trägt deutlich mehr; mit dem Draht oben geprüft, bricht der dritte fast wie der unbewehrte.

> **Sicherheit.** Frischer Zement ist stark alkalisch und verätzt Haut, an der er eingeschlossen bleibt: wasserdichte Handschuhe, lange Ärmel und Schutzbrille tragen, Spritzer sofort abwaschen. Stahl nur mit Schutzbrille und Handschuhen mit dem Bolzenschneider oder dem Winkelschleifer trennen, fern von allem, was brennen kann. Jede Form abstützen; eine Schalung, die Beton in der Höhe hält, gehört in die Hände von Fachleuten, denn sie kann unter dem frischen Beton einstürzen. Beim Belastungsversuch Schutzbrille tragen, seitlich stehen und die Füße von der Last fernhalten.

Geschichte und Entwicklung

1848 ließ Joseph-Louis Lambot auf dem Teich seines Guts Miraval im Département Var ein Boot aus Zement über einem Eisengitter schwimmen. 1855 ließ er es patentieren und zeigte im selben Jahr in Paris ein zweites; das erste steht im Museum von Brignoles. Diese Tafel nimmt 1848, das Jahr dieses Boots, eines frühen erhaltenen Beispiels für das Zusammenwirken von Eisen und Zement. 1854 ließ sich William Boutland Wilkinson aus Newcastle in England eisenbewehrte Decken patentieren.

Lambots Boot: eine dünne Zementschale über einem Gitter aus Eisenstäben.

Joseph Monier, ein Pariser Gärtner, meldete am 16. Juli 1867 ein Patent auf bewehrte Kübel und Becken an, 1873 eines auf Brücken und 1878 eines auf Balken. In Deutschland kaufte Gustav Adolf Wayss seine Patente und baute zwischen 1887 und 1891 über 300 Bogenbrücken. 1892 ließ François Hennebique ein vollständiges Tragwerk aus Stützen, Balken und Platten patentieren, das konzessionierte Bauunternehmen ausführten. In den USA patentierte Ernest Ransome 1884 einen verdrillten Stab, und das Ingalls Building in Cincinnati erreichte 1903 sechzehn Geschosse.

Robert Maillarts Salginatobelbrücke (1930) überspannt eine Schweizer Schlucht mit einem hohlen Bogen von 90 m, im Scheitel nur 20 cm dick. Eugène Freyssinet ließ 1928 die Vorspannung patentieren und rettete damit 1934 den Seebahnhof von Le Havre, der im Ton versank.

Ein Bericht von Chatham House aus dem Jahr 2018 beziffert die Zementproduktion der Welt auf mehr als 4 Milliarden Tonnen im Jahr, das meiste für Beton, und ihren Anteil an den weltweiten CO_2-Emissionen auf etwa 8 %.

Kennzahlen

Zugfestigkeit von Beton

Etwa 10 % seiner Druckfestigkeit

Porenwasser um die Stäbe

pH 12,5 bis 13; es schützt den Stahl vor Rost

Frühe Meilensteine

Lambots Boot, 1848; Moniers erstes Patent, 16. Juli 1867

Wärmeausdehnung

Etwa 10 Millionstel je °C bei Beton, 11 bis 12 bei Stahl

Mindestdeckung (ACI 318)

Etwa 38 mm bei dünnen Stäben im Freien, 75 mm gegen Erdreich

Quellen

1. Joseph Monier et l'invention du béton armé (B. Lemoine, 2023) · Association française de génie civil (AFGC) https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2026/03/JosephMONIER_InventionBeton.pdf
2. The Construction Industry enters the 20th Century (R. Day, 1980) · Bristol Industrial Archaeological Society Journal 13 https://b-i-a-s.org.uk/wp-content/uploads/2021/01/BIAS_Journal_13_FERRO_CONCRETE.pdf
3. The Invention of Reinforced Concrete (1848–1906) (Moussard, Garibaldi & Curbach, 2018) · TU Dresden, in High Tech Concrete (Springer) https://fis.tu-dresden.de/portal/en/publications/the-invention-of-reinforced-concrete-1848--1906(8f5281e9-99eb-4cdd-9eff-3687b595367f).html
4. Maison de Joseph Lambot à Montfort-sur-Argens · Office de tourisme Provence Verte & Verdon https://www.la-provence-verte.net/ot_campslasource/patrimoine-montfort-sur-argens-maison-de-joseph-lambot_1679.html
5. Musée des Comtes de Provence, Brignoles · Office de tourisme Provence Verte & Verdon https://www.la-provence-verte.net/activites/patrimoine-brignoles-musee-des-comtes-de-provence_435.html
6. Why is reinforced concrete used? · American Concrete Institute https://www.concrete.org/frequentlyaskedquestions.aspx?faqid=666
7. Concrete cover for members cast against earth (ACI 318-19) · American Concrete Institute https://www.concrete.org/frequentlyaskedquestions.aspx?faqid=903
8. Beam reinforcement detailing per ACI 318-19 (cover table) · ideCAD documentation https://help.idecad.com/ideCAD/beam-reinforcement-detailing
9. What stops the reinforcing steel in damp, porous concrete from corroding (usually)? (J. Broomfield) · Institute of Corrosion https://www.icorr.org/?p=22054
10. Thermal expansion and contraction of concrete · Penn State College of Engineering https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/cracking/thermalexpansioncontraction/example.htm
11. Principles of reinforced concrete: objective of the steel-concrete combination (W. Pauchet, 2021) · Techniques de l'Ingénieur https://www.techniques-ingenieur.fr/en/resources/article/ti264/principles-of-reinforced-concrete-tba1024/objective-of-the-steel-concrete-combination-2
12. Properties of concrete · University of Memphis, Civil Engineering https://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/section_3_properties.html
13. Concrete slab reinforcement: lapping · RMIT University Learning Lab https://learninglab.rmit.edu.au/Toolbox/buildright/content/bcgbc4010a/10_floor_systems/03_concrete_slab_reinforcement/page_006.htm
14. Ingalls Building · American Society of Civil Engineers https://asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/historic-landmarks/ingalls-building
15. Alvord Lake Bridge · American Society of Civil Engineers https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/historic-landmarks/alvord-lake-bridge
16. Salginatobel Bridge · American Society of Civil Engineers https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/historic-landmarks/salginatobel-bridge
17. World Monument Salginatobel Bridge, technical profile · Schiers Tourism https://www.salginatobelbridge.com/s/English_Flyer.pdf
18. The Story of Eugène Freyssinet (K. Shushkewich, 2010) · ASPIRE, The Concrete Bridge Magazine https://www.aspirebridge.com/magazine/2010Fall/Perspective_Fall10.pdf
19. Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete (Lehne & Preston, 2018) · Chatham House https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston-final.pdf
20. Cement · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/construction/healthrisks/hazardous-substances/cement.htm

Fakten geprüft am 2026-10-14

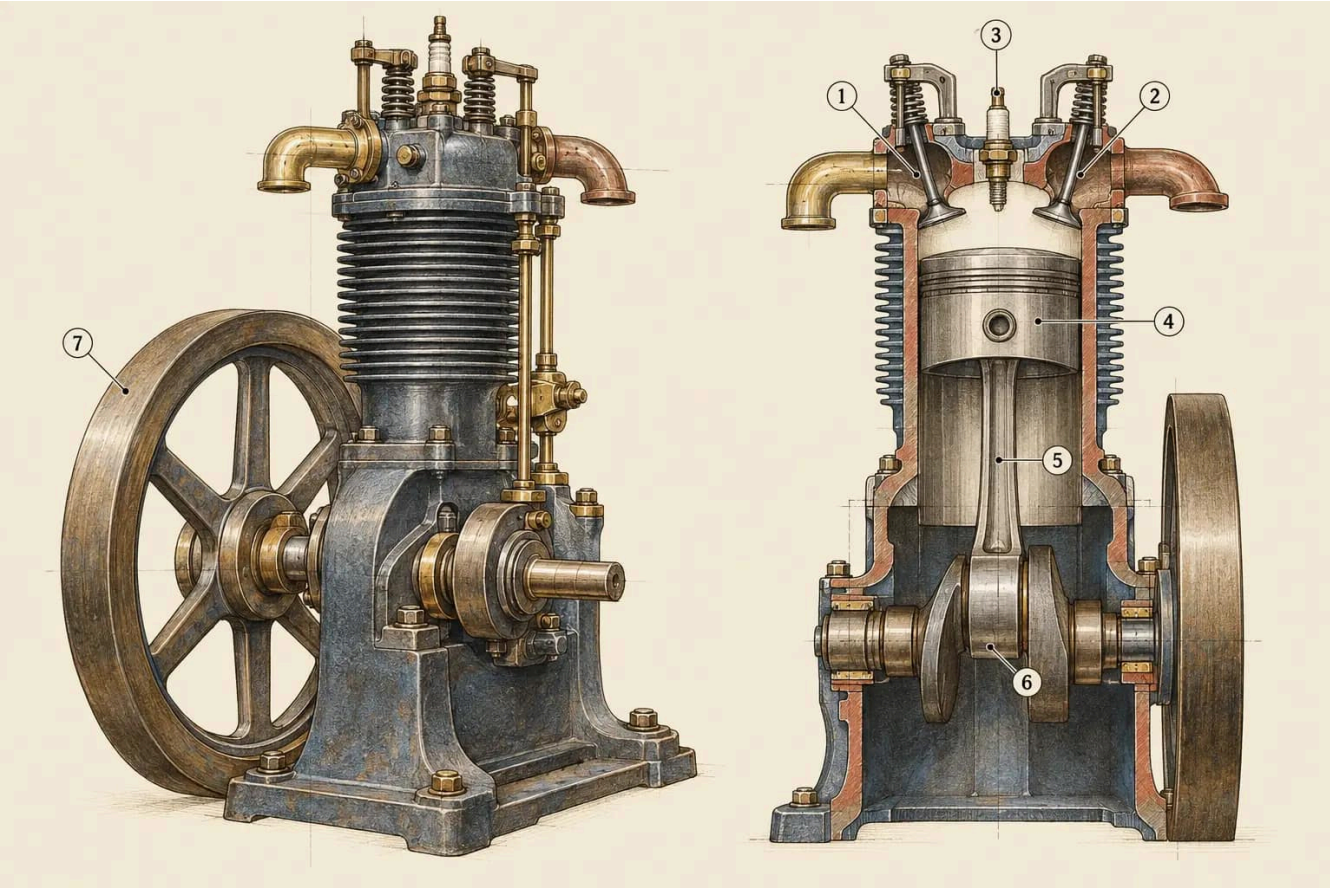
Verbrennungsmotor

Kleine Explosionen, gleichmäßige Leistung

1876 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Dampfmaschine (S. 230), Eisenverhüttung (S. 138), Stahl (S. 143), Destillation (S. 176)

Führt zu: Flugzeug (S. 357)



1 Einlassventil 2 Auslassventil 3 Zündkerze 4 Kolben 5 Pleuelstange 6 Kurbelwelle 7 Schwungrad

Ein Verbrennungsmotor verbrennt seinen Kraftstoff in einem geschlossenen Zylinder; das heiße Gas drückt einen Kolben, der eine Kurbelwelle dreht. Nicolaus Ottos Viertakt-Gasmotor von 1876 legte das Schema fest, nach dem die meisten Motoren in Autos, Booten und Stromaggregaten bis heute arbeiten.

Was es ist

Ein Verbrennungsmotor erzeugt seine Wärme im Inneren der Maschine selbst. Die Dampfmaschine verfeuert ihren Brennstoff unter einem getrennten Kessel und leitet den Dampf in den Zylinder. Hier verbrennt eine kleine Ladung aus Kraftstoff und Luft im Zylinder, und das entstehende Gas drückt unmittelbar auf einen Kolben.

Der Motor auf dieser Tafel ist ein stehender Einzylinder, wie man ihn in den 1880er- und 1890er-Jahren baute: ein gusseiserner Zylinder mit Kühlrippen, darin ein gleitender Kolben, darunter eine Kurbelwelle und ein schweres Schwungrad, das die Welle zwischen zwei Zündungen weiterdreht. Heutige Automotoren haben mehrere Zylinder und leichtere Legierungen, doch auch sie verwandeln den Druck auf einen Kolben über Pleuel und Kurbelwelle in eine Drehung.

Wie es funktioniert

Der Kolben ist ein genau eingepasster Stopfen, der im Zylinder auf und ab gleitet. Eine Pleuelstange verbindet ihn mit einem Kurbelzapfen der Kurbelwelle. So wird aus dem Hin und Her des Kolbens eine Drehung, ähnlich wie die Knie eines Radfahrers die Pedale drehen.

Federnde Ringe in Nuten rund um den Kolben dichten ihn gegen die Zylinderwand ab.

Die meisten Motoren folgen dem Viertaktverfahren, das Otto praxistauglich machte. In einem Motor mit Fremdzündung wie dem hier gezeichneten läuft es so ab. Im ersten Takt bewegt sich der Kolben bei offenem Einlassventil nach unten und saugt ein Gemisch aus Luft und Kraftstoff an. Im zweiten sind beide Ventile geschlossen; der Kolben steigt und presst das Gemisch in einen kleinen Raum oben im Zylinder. Kurz vor dem oberen Totpunkt entzündet es ein Funke (bei frühen Motoren eine Flamme oder ein glühendes Röhrchen). Das Gas erhitzt sich sehr schnell und treibt den Kolben nach unten: Nur dieser dritte Takt leistet Arbeit. Im vierten öffnet das Auslassventil, und der aufsteigende Kolben schiebt das verbrannte Gas hinaus.

Auf jeden Arbeitstakt kommen zwei Umdrehungen der Kurbelwelle. Das Schwungrad speichert genug Energie, um sie über die drei anderen Takte zu tragen. Eine Nockenwelle, die mit halber Kurbelwellendrehzahl läuft, öffnet jedes Ventil im richtigen Augenblick.

Die Verdichtung machte Ottos Motor den Konkurrenten überlegen. Ein Gemisch, das vor der Verbrennung zusammengepresst wird, gibt seine Wärme bei höherem Druck ab, und ein größerer Teil davon wird zu Arbeit. Rudolf Diesel trieb den Gedanken in den 1890er-Jahren weiter: Er verdichtete reine Luft so stark, dass sie heiß genug wurde, um eingespritzten Kraftstoff ohne jeden Funken zu entzünden.

Wie man es baut

Ein funktionierender Motor ist Präzisionsarbeit. Man braucht eine Gießerei, eine Drehbank und eine Bohrmaschine für Zylinder, Messzeug mit einer Genauigkeit von einem Hundertstelmillimeter und einen zuverlässigen Kraftstoff. Das Folgende beschreibt, wie die Teile früher hergestellt wurden. Es ist keine Bauanleitung.

Zylinder und Gestell gießen. Die ersten Hersteller gossen Zylinder und Sockel aus Grauguss, der sich gut bearbeiten lässt und verschleißfest ist. Anschließend wurde der Zylinder vollkommen rund und gerade ausgebohrt. Wassermantel oder Kühlrippen waren mit angegossen.

Kolben und Ringe herstellen. Der Kolben bestand aus Gusseisen, später aus Aluminium, und wurde etwas kleiner als die Bohrung gedreht. Geschlitzte Ringe aus federndem Eisen sitzen in Nuten und drücken nach außen gegen die Wand, damit kein Gas vorbeiströmt.

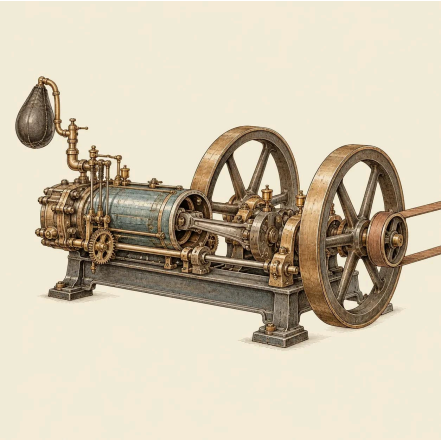
Kurbelwelle und Pleuel schmieden. Sie tragen die größten Kräfte. Man schmiedete sie aus Stahl, drehte sie nach und setzte sie in Lager aus Bronze oder Weißmetall.

Ventile und Zündung einstellen. Die Nocken und später der Magnetzünder oder die Zündspule müssen im richtigen Moment des Zyklus wirken. Ein Fehler lässt den Motor schlecht laufen oder zurückschlagen.

Kraftstoff zuführen und kühlen. Ottos Motoren liefen mit Stadtgas. Benzinmotoren brauchten einen Vergaser, der Kraftstoff und Luft im richtigen Verhältnis mischt. Jeder Motor muss mit Wasser oder Luft gekühlt und mit Öl geschmiert werden, damit die beweglichen Teile nicht festfressen.

Sicherheit. Kraftstoff und seine Dämpfe entzünden sich leicht und können in geschlossenen Räumen explodieren. Abgase enthalten Kohlenmonoxid, das geruchlos und ohne Vorwarnung tötet: Lassen Sie einen Motor nie in Innenräumen oder halb geschlossenen Räumen laufen, auch nicht bei offenen Türen und Fenstern. Schwungrad, Riemen und Andrehkurbel können Knochen brechen, und ein Rückschlag beim Ankurbeln kann schwere Verletzungen verursachen. Heiße Teile und unter Druck stehendes Kühlwasser verursachen Verbrennungen.

Geschichte und Entwicklung



Ortsfeste Gasmotoren wie dieser trieben Werkstattmaschinen an, bevor Kraftfahrzeuge verbreitet waren.

Schon zwei Jahrhunderte lang hatte man versucht, einen Kolben durch eine Explosion anzutreiben. Christiaan Huygens experimentierte in den 1670er-Jahren mit Schießpulver, und 1807 ließ sich der Schweizer François Isaac de Rivaz einen Wasserstoffmotor patentieren, den er später in einen kleinen Wagen einbaute. Der erste in größerer Zahl verkaufte Motor war der Gasmotor von Étienne Lenoir aus dem Jahr 1860. Er sah aus wie eine doppelt wirkende Dampfmaschine, verbrannte das Gemisch aber ohne Verdichtung und verschwendete den größten Teil seines Brennstoffs.

Nicolaus Otto, ein Handlungsreisender aus Köln, ließ sich 1861 von dem örtlichen Mechaniker Michael Zons einen Motor nach Lenoirs Vorbild bauen, um ihn zu untersuchen. Mit dem Ingenieur Eugen Langen baute er einen „atmosphärischen“ Motor, der auf der Pariser Weltausstellung 1867 eine Goldmedaille gewann; mehrere Tausend Stück wurden gebaut. 1876 baute Otto seinen Viertaktmotor mit Verdichtung. Der Franzose Alphonse Beau de Rochas hatte dasselbe Viertaktverfahren 1862 in einer Broschüre beschrieben. Deshalb wurde Ottos deutsches Patent 1886 für nichtig erklärt, und andere Firmen konnten die Bauart frei nutzen.

Gottlieb Daimler und Wilhelm Maybach, beide früher in Ottos Firma tätig, bauten 1885 einen kleinen schnell laufenden Motor mit mehreren hundert Umdrehungen pro Minute. Damit wurden Motoren leicht genug für Fahrzeuge. Im selben Jahr stellte Carl Benz seinen dreirädrigen Motorwagen fertig und meldete ihn im Januar 1886 zum Patent an.

Diesels Motor erreichte 1897 bei einem Versuch in Augsburg einen Wirkungsgrad von 26,2 %, mehr als doppelt so viel wie die Dampfmaschinen jener Zeit. Im 20. Jahrhundert eroberten Verbrennungsmotoren den Straßenverkehr, die Landwirtschaft, die Schifffahrt und die ersten Flugzeuge. Elektromotoren ersetzen sie heute in vielen Autos, doch die meisten neu gebauten Verbrennungsmotoren arbeiten noch nach dem Viertaktverfahren, das Otto 1876 in Gang setzte.

Der Wagen von Benz hatte einen Einzylinder-Viertaktmotor mit weniger als einem Liter Hubraum.

Kennzahlen

Ottos erster Viertakter
1876, etwa 3 PS bei 180 U/min

Diesels Versuchsmotor
26,2 % Wirkungsgrad, 17. Februar 1897

Arbeitstakte (Viertaktmotor)
Einer je Zylinder pro zwei Kurbelwellenumdrehungen

Quellen

1. Replica Otto four-stroke engine · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8405692/replica-otto-four-stroke-engine-internal-combustion-engine
2. Nikolaus August Otto · EBSCO Research Starters https://www.ebsco.com/research-starters/history/nikolaus-august-otto
3. Early history of the diesel engine · DieselNet https://www.dieselnet.com/tech/diesel_history.php
4. Otto engine · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Otto_engine

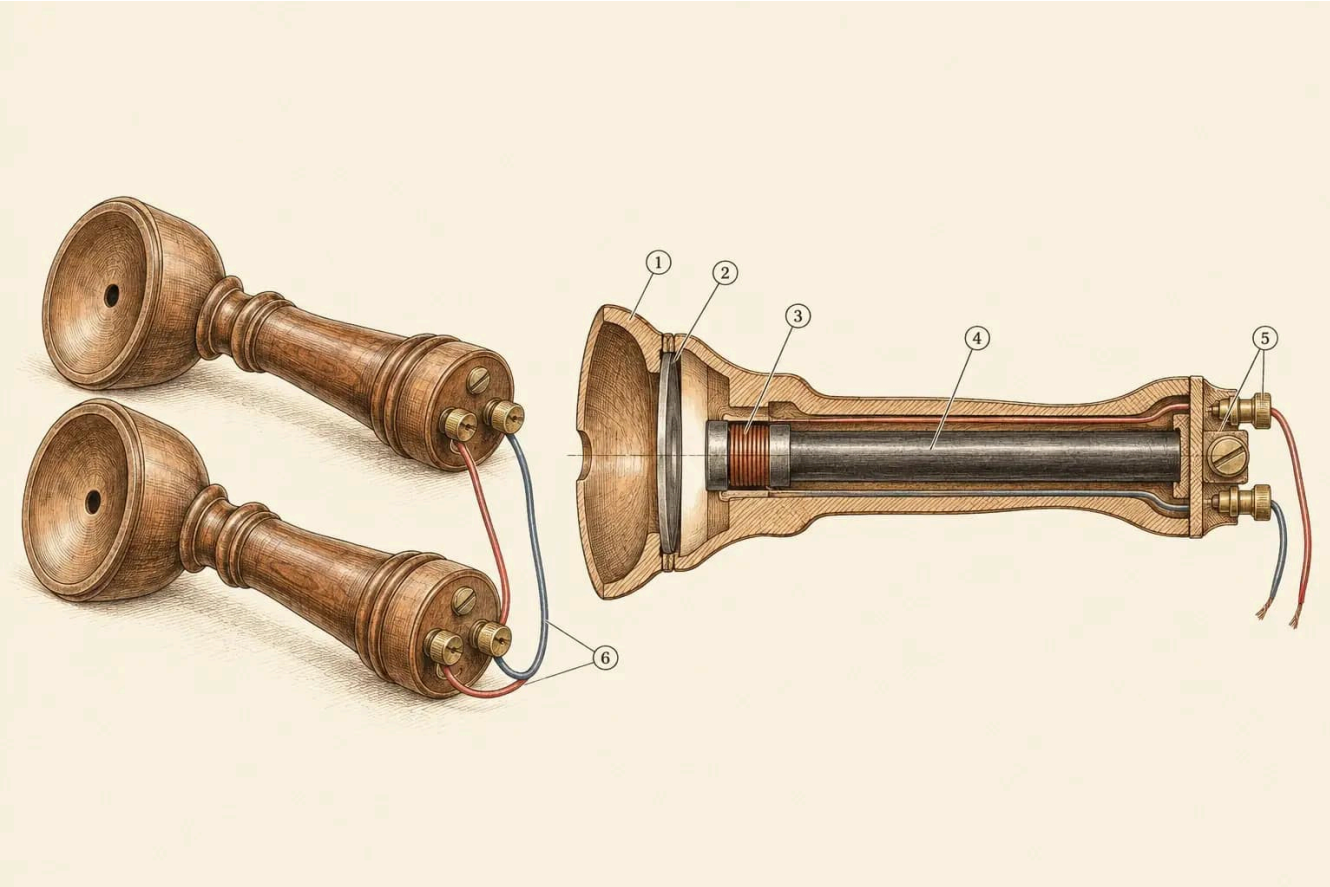
Fakten geprüft am 2026-10-11

Telefon

Eine Stimme durch einen Draht

1876 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Elektrischer Telegraf (S. 289)



1 Sprech- und Hörmuschel 2 Eisenmembran 3 Spule 4 Stabmagnet 5 Anschlussklemmen 6 Leitungsdraht

Ein Telefon verwandelt die Schwingungen der Stimme in einen schwankenden elektrischen Strom, schickt ihn durch einen Draht und macht am anderen Ende wieder Schall daraus. Alexander Graham Bell ließ es im März 1876 patentieren; zwei Jahre später waren seine Magnettelefone im kommerziellen Einsatz, und mit Kohlemikrofonen und Vermittlungsstellen entstand bald ein öffentlich zugängliches Telefonnetz.

Was es ist

Ein Telefon überträgt die Stimme selbst über ein Drahtpaar. Ein Sender verwandelt die Druckwellen der Stimme in einen elektrischen Strom, dessen Stärke den Schwankungen des Schalldrucks folgt; ein Empfänger am anderen Ende bewegt mit diesem Strom eine dünne Platte und erzeugt den Schall neu.

Die Tafel zeigt eines von Bells Handtelefonen von 1877 und 1878, ein gedrechseltes Holzgerät, das wegen seiner Form den Spitznamen Butterstamp, Butterstempel, erhielt. Dasselbe Gerät diente zum Sprechen und zum Hören, und es arbeitete ohne Batterie: Die Stimme selbst erzeugte den Strom.

Wie es funktioniert

Im Holzgehäuse des Butterstamp liegt ein Stabmagnet aus Stahl, der den ganzen Griff durchzieht. An seinem vorderen Ende sitzt ein kurzes Polstück aus Weicheisen, umwickelt mit einer Spule aus feinem isoliertem Kupferdraht. Direkt vor dem Pol, durch einen Spalt von Bruchteilen eines Millimeters getrennt, ist eine dünne Eisenscheibe, die Membran, an ihrem Rand hinter der Muschel eingespannt. Die beiden Spulenenden führen zu Klemmen an der Rückseite, und von dort läuft ein Drahtpaar zum anderen Telefon.

Das Schnurtelefon überträgt den Schall mechanisch: Die Stimme bringt den Boden einer Dose zum Schwingen, die gespannte Schnur den der anderen.

Spricht jemand in die Muschel, steigt und fällt der Luftdruck auf der Membran, und die Membran schwingt geringfügig hin und her. Jedes Mal, wenn sie dem Pol näher kommt, geht mehr vom Feld des Magneten durch das Eisen, entfernt sie sich, weniger. Ein sich änderndes Magnetfeld in einer Spule erzeugt darin eine Spannung, also schickt die Spule einen schwachen Wechselstrom auf die Leitung, der dem Verlauf der Schallwelle folgt.

Im Kohlemikrofon presst die Membran eine Kapsel mit Kohlekörnern zusammen, sodass der Strom einer Batterie mit der Stimme schwankt.

Am anderen Ende fließt derselbe Strom durch die Spule des zweiten Telefons. Er verstärkt oder schwächt den Zug des Dauermagneten auf dessen Membran, die sich deshalb im Takt der Membran des Sprechers bewegt und die Luft davor in Schwingung versetzt. Die gesamte Energie kommt aus der Stimme, daher ist der Ton leise und die Reichweite gering. Ab Ende der 1870er-Jahre erhielten Telefone ein Kohlemikrofon: Die Membran drückt auf Kohle, deren elektrischer Widerstand sinkt, wenn sie zusammengepresst wird. So verändert die Stimme den Strom einer Batterie, statt ihn selbst zu erzeugen, und das Signal wird viel lauter.

Wie man es baut

Zwei kleine Lautsprecher zeigen dasselbe Prinzip, die umkehrbare Verbindung von Schall, Bewegung und Strom. Gebaut sind sie anders als Bells Gerät: Im Lautsprecher sitzt die Spule an der Membran und bewegt sich mit ihr im Feld eines Magneten, während beim Butterstamp Spule und Magnet stillstehen und nur die Eisenmembran schwingt. Miteinander verbunden ergeben zwei Lautsprecher ein Telefon ohne Batterie.

Teile besorgen. Nötig sind zwei gleiche kleine Lautsprecher mit 8 Ohm und 5 bis 8 cm Durchmesser, einzeln gekauft oder aus batteriebetriebenem Spielzeug ausgebaut, nachdem die Batterien entfernt wurden (niemals aus Radios oder anderen netzbetriebenen Geräten, auch nicht ausgesteckt: manche Teile bleiben geladen), und einige Meter zweiadrige Klingelleitung oder Lautsprecherkabel.

Verdrahten. An jedem Kabelende einen Zentimeter abisolieren. Eine Ader mit der ersten Klemme beider Lautsprecher verbinden, die andere Ader mit der zweiten Klemme beider, über Schraubklemmen oder durch Verdrillen und Abkleben der Verbindungen.

Sprechen. Zuerst mit einem kurzen Kabel probieren, dann das Kabel zwischen zwei Zimmern bei geschlossener Tür verlegen, damit der Partner einen nicht direkt hört. Laut und dicht an eine Membran sprechen, während er den

anderen Lautsprecher ans Ohr hält; dann einen Draht lösen und es noch einmal versuchen, um zu prüfen, dass der Ton wirklich durch die Leitung kommt. Die Stimme ist leise, und das Ergebnis hängt von den Lautsprechern ab: Kommt nichts an, das Kabel kürzen oder Lautsprecher einer anderen Größe versuchen. Dann die Rollen tauschen: Jeder Lautsprecher dient als Sender und als Empfänger, wie der Butterstamp.

Vergleichen. Zusätzlich ein Schnurtelefon bauen, aus zwei Dosen oder Pappbechern und einigen Metern Schnur, die durch ein Loch in jedem Boden geknotet wird. Die Schnur straff und frei von Hindernissen halten und beide vergleichen.

> **Sicherheit.** Diese Schaltung braucht keine Batterie und darf niemals an das Stromnetz oder an eine Telefonleitung angeschlossen werden, die beide gefährliche Spannungen führen. Offene Dosen haben scharfe Kanten: entgraten oder abkleben. Niemandem durch eines der Telefone direkt ins Ohr schreien.

Geschichte und Entwicklung

Schon vor Bell versuchten mehrere Erfinder, Sprache elektrisch zu übertragen. 1861 führte Philipp Reis in Frankfurt ein Gerät vor, das er Telephon nannte, das aber eine Kuriosität blieb. Antonio Meucci reichte 1871 eine Patentvoranmeldung für einen „Sound Telegraph“ ein und ließ sie 1874 verfallen; sein Anspruch auf Vorrang ist bis heute umstritten.

Bell, der damals in Boston arbeitete, meldete sein Patent am 14. Februar 1876 an, am selben Tag, an dem Elisha Gray eine Voranmeldung mit einer ähnlichen Idee einreichte; welches Dokument zuerst eintraf, ist umstritten. Das Patent Nr. 174.465 wurde am 7. März erteilt. Drei Tage später sprach Bell mit einem Flüssigkeitssender seinen ersten klar verständlichen Satz zu seinem Assistenten Thomas Watson. Bald gab er den Flüssigkeitssender zugunsten des Magnettelefons auf, das am 30. Januar 1877 patentiert wurde. Am 12. Februar 1877 hörte ein Publikum in Salem einen Sprecher in Boston, etwa 26 km entfernt.

Bells Flüssigkeitssender vom März 1876: Die Stimme lässt die Membran schwingen, der Draht taucht mehr oder weniger tief in angesäuertes Wasser, und der Strom schwankt.

Thomas Edison entwickelte 1877 einen Kohlesender, und Henry Hunnings verwendete in England lose Kohlekörner. Die erste kommerzielle Vermittlungsstelle eröffnete am 28. Januar 1878 in New Haven, Connecticut, mit 21 Teilnehmern, die von Hand an einem Klappenschrank verbunden wurden. Mit Almon Strowgers automatischen Vermittlungen konnten die Teilnehmer ihre Verbindungen später selbst herstellen, ab 1896 bequemer mit einer Wählscheibe. In den 1950er-Jahren standen in den Vereinigten Staaten mehr als die Hälfte aller Telefone der Welt.

Kennzahlen

Bells Patent
Nr. 174.465, angemeldet am 14. Februar 1876, erteilt am 7. März 1876

Magnettelefon ohne Batterie
US-Patent Nr. 186.787, 30. Januar 1877

Bells erster verständlicher Satz
10. März 1876, Boston: „Mr. Watson, come here, I want to see you“ (Bells Notizbuch)

Erste kommerzielle Vermittlungsstelle
New Haven, 28. Januar 1878: 21 Teilnehmer zu 1,50 Dollar im Monat

Quellen

1. Telephone · Engineering and Technology History Wiki (IEEE) https://ethw.org/Telephone
2. Early telephone by Alexander Graham Bell, 1877 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co32960/early-telephone-by-alexander-graham-bell-1877
3. US186787A: Improvement in electric telegraphy (A. G. Bell, 1877) · Google Patents https://patents.google.com/patent/US186787A/en
4. First Commercial Telephone Exchange – Today in History: January 28 · Connecticut Humanities https://connecticuthistory.org/the-first-commercial-telephone-exchange-today-in-history
5. Telephone · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Telephone
6. Replica of Bell's liquid transmitter of March 1876 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co33314/replica-of-bells-liquid-transmitter-of-march-1876-1880-1958-telephone
7. The Telephone: a lecture entitled Researches in Electric Telephony (A. G. Bell, Society of Telegraph Engineers, 1877) · Project Gutenberg https://www.gutenberg.org/ebooks/55787
8. Some experiments with the telephone (Lord Rayleigh, Scientific Papers) · Cambridge University Press https://www.cambridge.org/core/books/abs/scientific-papers/some-experiments-with-the-telephone/3FE1242F3DA62548052EB38CDF24909D
9. Vibration of Plates (A. W. Leissa, NASA SP-160, 1969) · NASA https://ntrs.nasa.gov/citations/19700009156
10. Early receivers · Telephone Collecting https://telephonecollecting.org/Bobs%20phones/Pages/Essays/Early%20Receivers/Early%20Receivers.htm
11. Copper Wire Tables (NBS Handbook 100, 1966) · National Bureau of Standards https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/hb/nbshandbook100.pdf
12. US7760869B2: Method and apparatus for controlling the transmit volume level of a speakerphone (mouth reference point and TIA-810-B test level) · Google Patents https://patents.google.com/patent/US7760869B2/en

Fakten geprüft am 2026-10-12

Glühlampe

Ein glühender Faden im Vakuum

1879 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Elektrischer Generator (S. 277), Glas (S. 134)

1 Glaskolben 2 Kohlefaden 3 Platindrähte als Zuleitung 4 Eingeschmolzener Glasfuß 5 Abschmelzspitze 6 Schraubsockel

Eine Glühlampe erzeugt Licht, indem sie Strom durch einen dünnen Faden schickt, bis er weiß glüht, in einem luftleeren Glaskolben, damit der Faden nicht verbrennt. Joseph Swan und Thomas Edison machten sie 1879 alltagstauglich, und über ein Jahrhundert lang beleuchtete sie Wohnungen und Straßen.

Was es ist

Die Glühlampe ist ein Glaskolben mit einem feinen Faden im Inneren, dem Glühfaden, der leuchtet, wenn elektrischer Strom hindurchfließt. Vor ihr wurden Wohnungen mit Flammen beleuchtet: Kerzen, Öllampen und Gasbrenner, die rußten und oft Brände verursachten. Elektrische Bogenlampen gab es zwar, doch sie waren für einen Wohnraum viel zu hell.

Die Lampe auf der Tafel entspricht dem Typ, den Edisons Fabrik Anfang der 1880er-Jahre herstellte. Ihre Nachfolger waren fast das ganze 20. Jahrhundert hindurch die übliche Haushaltslampe, bis Kompaktleuchtstofflampen und danach LED-Lampen ihren Platz einnahmen.

Wie es funktioniert

Jeder Stoff gibt Licht ab, wenn man ihn stark genug erhitzt. Der elektrische Widerstand wandelt die Energie des Stroms in Wärme um, und ein dünner Faden wird erst dunkelrot, dann orange, dann weißglühend. Je heißer er brennt, desto weißer und wirtschaftlicher ist das Licht, aber desto schneller verdampft der Faden.

An der Luft verbrennt ein weißglühender Faden aus Kohle oder Metall in wenigen Augenblicken. Deshalb wird der Kolben leergepumpt oder später mit einem Gas gefüllt, das nicht reagiert. Die Pumpe wird oben über ein enges Glasröhrchen angeschlossen, das man danach zuschmilzt; daher stammt die kleine Abschmelzspitze an alten Lampen.

Die Drähte, die den Strom zum Faden führen, müssen durch das Glas hindurch. Glas und Metall dehnen sich beim Erwärmen unterschiedlich stark aus, und eine schlecht abgestimmte Einschmelzung springt, sobald die Lampe warm wird. Platin dehnt sich fast genauso stark aus wie das Glas der frühen Kolben. Diese Lampen hatten deshalb kurze Platindrähte, die durch einen Glasfuß geführt und im Sockel mit billigerem Kupfer verbunden waren.

Edison entwarf die Lampe zusammen mit dem Versorgungsnetz. Ein Faden mit hohem elektrischem Widerstand nimmt bei rund 100 Volt wenig Strom auf. So lassen sich die Lampen parallel schalten, jede mit eigenem Schalter, an Kupferleitungen von vertretbarem Querschnitt.

Nur etwa 5 bis 10 % der elektrischen Energie in einer Glühlampe werden zu sichtbarem Licht; der Rest geht als Wärme ab.

In einer Sprengel-Pumpe schließt jeder fallende Quecksilbertropfen etwas Luft ein und trägt sie durch das Rohr nach unten.

Wie man sie baut

Eine haltbare Lampe erfordert einen Glasbläser, eine Vakuumpumpe, die einen sehr niedrigen Druck erreicht, und einen Faden, der zur Versorgungsspannung passt. Nur der erste Schritt ist ein sicherer Versuch für zu Hause; die übrigen beschreiben, wie die ersten Lampen in der Werkstatt entstanden.

Das Prinzip zeigen. Ein kurzes Stück dünne Bleistiftmine zwischen zwei Metallklemmen auf einer Keramikfliese festklemmen und ein umgedrehtes Glasgefäß darüberstülpen. Die Mine an ein Labornetzteil anschließen, auf etwa 12 Volt eingestellt und mit heruntergedrehter Strombegrenzung, dann die Begrenzung langsam erhöhen. Die Mine glüht orange und brennt schließlich im Sauerstoff unter dem Glas durch. Das zeigt, warum der Kolben luftleer sein muss.

Den Faden verkohlen. Die Werkstätten betteten Schlaufen aus Bambus oder Baumwollfaden in Holzkohlepulver, in einem Tiegel mit Deckel und Abzugsöffnung, und erhitzten ihn stundenlang rotglühend in einem Ofen. Ohne Luftzutritt wurde die Faser zu Kohle statt zu Asche; die entweichenden Gase sind brennbar und enthalten Kohlenmonoxid.

Die Zuleitungen einschmelzen. Zwei kurze Platindrähte oder ein anderes, an das Glas angepasstes Metall wurden in einen Glasfuß eingeschmolzen, der Faden mit Kohlepaste an ihren Spitzen befestigt und der Fuß in den Hals eines geblasenen Kolbens mit dünnem Pumpstängel eingeschmolzen. Ein Faden für niedrige Spannung muss kürzer und dicker sein als einer für 100 Volt.

Pumpen und ausheizen. Während der Kolben an der Pumpe hing, trieb ein schwacher Strom durch den Faden Gase aus der Kohle und dem Glas. Fiel der Druck nicht weiter, wurde der Pumpstängel mit einer

Flamme zugeschmolzen.

Den Sockel aufsetzen. Ein Schraubsockel aus Messing wurde mit Gips auf den Hals gekittet, ein Draht an die Hülse und der andere an den Mittelkontakt gelötet.

> **Sicherheit.** Netzspannung kann tödlich sein: Versuche nur an einem strombegrenzten Labornetzteil unter 24 Volt durchführen, nie an einer Steckdose, und nie eine Auto- oder Lithiumbatterie direkt über einen Faden kurzschließen. Fäden, Glas und Klemmen werden so heiß, dass sie die Haut verbrennen und Papier entzünden; deshalb auf einer Fliese arbeiten, fern von allem Brennbaren. Ein luftleerer Kolben kann implodieren und Glassplitter schleudern: Schutzbrille tragen und hinter einer durchsichtigen Schutzscheibe arbeiten. Quecksilberdampf ist giftig: zu Hause keine Quecksilberpumpe bauen oder benutzen. Nie einen verschlossenen Behälter erhitzen: Beim Verkohlen entstehen brennbare Gase und Kohlenmonoxid, das gehört in einen belüfteten Ofen im Freien und nicht in eine Wohnung.

Geschichte und Entwicklung

Fasern aus verkohltem Bambus hielten weit länger als das Papier und die Fäden der ersten Lampen.

Humphry Davy brachte 1802 einen Platinstreifen mit dem Strom einer großen Batterie zum Glühen, und 1840 setzte Warren de la Rue eine Platinspirale in eine Vakuumröhre. Platin war zu teuer; Kohle war billig, verbrannte aber in der Luft, die die Pumpen jener Zeit zurückließen.

In England arbeitete Joseph Swan ab etwa 1850 an Fäden aus verkohltem Papier. Ein Versuch von 1860 in einem schlecht evakuierten Kolben scheiterte. Ab 1875 nutzte er die neue Sprengel-Quecksilberpumpe, und zwischen Dezember 1878 und Februar 1879 führte er in Newcastle upon Tyne funktionierende Kohlefadenlampen vor. Im Dezember 1880 stattete er Cragside mit Lampen aus, das Anwesen des Industriellen William Armstrong.

In Menlo Park in New Jersey entschied sich Thomas Edisons Labor für einen Kohlefaden mit hohem Widerstand. Am 22. Oktober 1879 brannte eine Lampe mit verkohltem Baumwollfaden 13,5 Stunden; dann erhöhte das Team den Strom, und etwa eine Stunde später überhitzte der Kolben und sprang. Am Abend des 31. Dezember 1879 beleuchtete Edison sein Labor und die Straße davor für Besucher, mit hufeisenförmigen Fäden aus verkohltem Karton. 1880 entschied er sich für Bambus, mit berichteten Lebensdauern um 1.200 Stunden, und 1882 begann die Pearl Street Station, Lampen in Lower Manhattan zu versorgen. Nach einem Patentstreit in Großbritannien schlossen sich die Firmen von Swan und Edison 1883 zu „Ediswan“ zusammen.

Um 1910 ersetzte gezogener Wolframdraht die Kohle und gab ein weißeres, wirtschaftlicheres Licht.

Um 1910 fand William Coolidge bei General Electric heraus, wie man sprödes Wolfram zu feinem Draht zieht. Bei Weißglut verdampft Wolfram viel langsamer als Kohle, sodass die Lampen heißer brennen konnten. Irving Langmuir füllte die Kolben dann mit einem inerten Gas, zunächst Stickstoff, das die Verdampfung weiter bremst, und wendelte den Faden. Ab 2009 begann die Europäische Union, gefolgt von vielen anderen Ländern, herkömmliche Glühlampen schrittweise vom Markt zu nehmen; an ihre Stelle traten Kompaktleuchtstofflampen und später LEDs.

Kennzahlen

Edisons erster langer Test
13,5 Stunden, dann etwa eine weitere bei höherer Leistung (22. Oktober 1879)

Faden aus verkohltem Bambus
Berichtete Lebensdauer um 1.200 Stunden (ab 1880)

Swans Vorführungen in Newcastle
Dezember 1878 bis Februar 1879

Anteil der Leistung, der zu Licht wird
Etwa 5 bis 10 %; der Rest ist Wärme

Quellen

1. Edison's Incandescent Lamp · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Edison%27s_Incandescent_Lamp
2. Lighting: From Research to Development · Thomas A. Edison Papers, Rutgers University https://edison.rutgers.edu/life-of-edison/biographical-essays/lighting/from-research-to-development
3. Lighting: The Carbon-Filament Lamp · Thomas A. Edison Papers, Rutgers University https://edison.rutgers.edu/life-of-edison/biographical-essays/lighting/the-carbon-filament-lamp
4. Joseph Swan · The Institution of Engineering and Technology (IET) Archives https://www.theiet.org/membership/library-archives/the-iet-archives/biographies/joseph-swan/
5. Joseph Swan · Newcastle University, Northern Innovation https://research.ncl.ac.uk/northerninnovation/exhibits/josephswan/
6. Milestones: Pearl Street Station, 1882 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Pearl_Street_Station

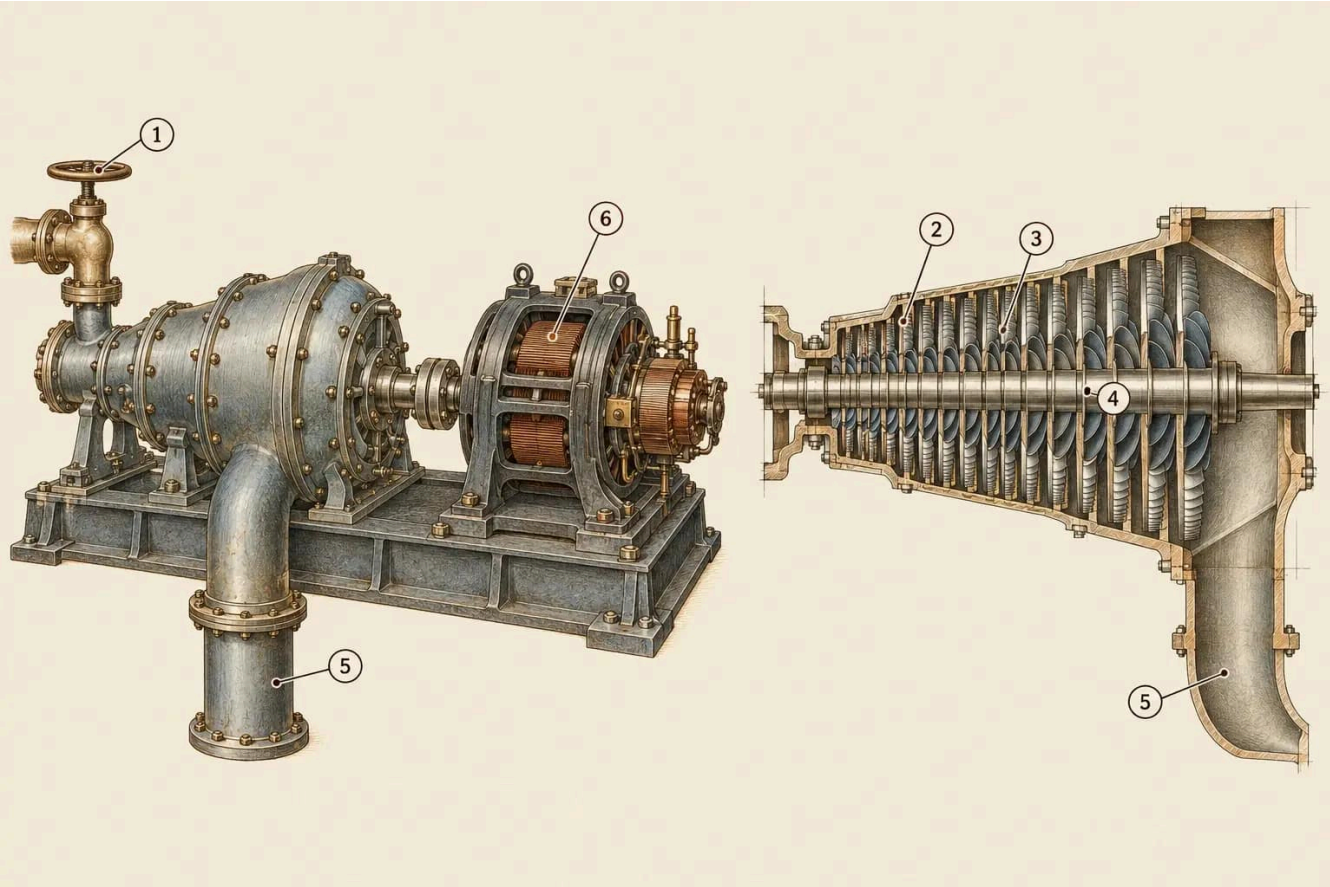
Fakten geprüft am 2026-10-11

Dampfturbine

Dampf, der die Generatoren antreibt

1884 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Dampfmaschine (S. 230), Stahl (S. 143), Elektrischer Generator (S. 277)



1 Dampfeinlass mit Absperrventil 2 Leitschaufeln am Gehäuse 3 Laufschaufeln am Läufer 4 Läuferwelle 5 Abdampf zum Kondensator 6 Dynamo

In einer Dampfturbine entspannt sich Dampf durch Reihen fester und bewegter Schaufeln: Aus seinem Druck wird Geschwindigkeit, und diese Geschwindigkeit dreht eine Welle. Charles Parsons kuppelte 1884 eine solche Turbine mit einem Dynamo; ihre Nachfolger treiben heute die Generatoren an, die den größten Teil des Stroms der Welt erzeugen.

Was es ist

Eine Dampfturbine ist ein Rad, das von Dampf angetrieben wird, ohne Kolben und ohne Kurbel. Der Dampf strömt durch Schaufelreihen rund um eine Welle und verlässt die Maschine mit viel geringerem Druck; die Energie, die er unterwegs abgibt, dreht die Welle. Die Bewegung ist gleichmäßig und schnell, genau richtig für einen elektrischen Generator.

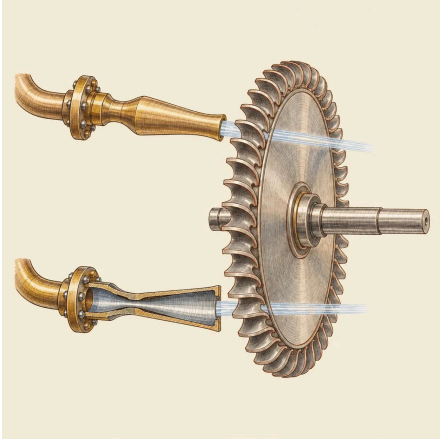
Kohle- und Kernkraftwerke kochen Wasser, um diese Maschinen anzutreiben. Gas-und-Dampf-Kraftwerke erzeugen Dampf mit dem heißen Abgas einer Gasturbine, und Solarthermie- sowie die meisten

Geothermiekraftwerke tun dasselbe mit Wärme aus Sonne oder Erdreich. Zusammen machen sie die Dampfturbine zur Quelle des größten Teils des Stroms der Welt.

Wie es funktioniert

Dampf gibt seine Energie ab, indem er sich entspannt. In einer Düse, einem sich verengenden Kanal, sinkt sein Druck und er wird schneller. An der engsten Stelle, dem Hals, kann er Schallgeschwindigkeit erreichen; um noch schneller zu werden, braucht er hinter dem Hals einen Kanal, der sich erweitert. Das ist die Trichterform der Düsen von de Laval. In jeder Stufe wirkt ein Kranz fester Leitschaufeln am Gehäuse wie eine Reihe von Düsen und lenkt den Dampf auf einen Kranz gekrümmter Laufschaufeln am Läufer. Sie lenken den Strahl um und werden dabei mitgenommen.

In einer Gleichdruck- oder Aktionsstufe fällt fast der ganze Druck in den festen Düsen ab, und die Laufschaufeln fangen nur den Strahl auf. In einer Überdruck- oder Reaktionsstufe, wie Parsons sie wählte, verengen sich auch die Kanäle zwischen den Laufschaufeln. Der Dampf entspannt sich beim Durchströmen weiter und stößt sie beim Austritt zurück. In einer Parsons-Stufe verteilt sich die Entspannung etwa zu gleichen Teilen auf die feste und die bewegte Reihe.



Das Gleichdruckrad von de Laval: sich erweiternde Düsen schicken ihre Strahlen durch einen einzigen Schaufelkranz.

Lässt man ein großes Druckgefälle durch eine einzige Düse ab, schießt der Strahl mit über 1.000 Metern pro Sekunde heraus, und Schaufeln arbeiten am besten bei etwa halber Strahlgeschwindigkeit. Ein einzelnes Rad muss dann gefährlich schnell laufen und braucht ein Getriebe. Parsons zerlegte das Gefälle in viele kleine Schritte, sodass die Welle mit einer Drehzahl läuft, die ein Dynamo verwerten kann.

Mit sinkendem Druck braucht der Dampf mehr Raum, deshalb werden die Schaufeln zum Austritt hin länger: In der letzten Reihe der für Hinkley Point C in England gebauten Turbinen messen sie 1,9 Meter.

Dampf, der ins Freie entweicht, hört beim Luftdruck auf, sich zu entspannen. Ein Kondensator, ein Behälter voller Rohre, die mit Fluss-, Meer- oder Kühlturmwasser gekühlt werden, verflüssigt den Abdampf und hält am Ende der Turbine ein fast vollständiges Vakuum. So kann sich der Dampf in der Turbine weiter entspannen und mehr Arbeit leisten, bevor er kondensiert. Parsons' erste Kondensationsturbinen in Cambridge waren 1892 so sparsam wie die besten Kolbenmaschinen gleicher Leistung.

Dieser Kreislauf heißt Rankine-Prozess: Eine Pumpe drückt Wasser in den Kessel, der es verdampft; der Dampf entspannt sich in der Turbine, und der Kondensator macht ihn wieder zu Wasser für die Pumpe. Eine Flüssigkeit zu pumpen kostet wenig im Vergleich zu dem, was der Dampf hergibt, daher bleibt Nutzarbeit übrig. Die Pumpe stammt von der Kolbenpumpe ab, Kessel und Kondensator von der Dampfmaschine; ein Kühlschrank betreibt einen verwandten Kreislauf in umgekehrter Richtung.

Im 50-Hertz-Netz dreht sich ein zweipoliger Generator auf der Welle mit 3.000 Umdrehungen pro Minute, im 60-Hertz-Netz mit 3.600. Transformatoren heben danach die Spannung für die Leitungen an.

Wie man sie baut

Eine Kraftwerksturbine wird von einem Kessel gespeist, also einem Druckbehälter: Bauen Sie keinen. Dieses Modell läuft mit Luft. Sie brauchen eine Einweg-Kuchenform aus Aluminium, zwei Korken, eine Stricknadel, Trinkhalme, einen Pappkarton, Kleber und einen Föhn mit Kaltstufe oder eine Fahrradpumpe.

Ein Schaufelrad schneiden. Eine Scheibe von 10 cm ausschneiden. Vom Rand aus 12 bis 16 Schnitte machen, 2 cm vor der Mitte aufhören, und alle Flügel in dieselbe Richtung um etwa 30 Grad verdrehen.

Lagern. Das Rad auf einen Korken kleben, der auf der Nadel steckt; die Nadel dreht sich in zwei Halmstücken, die quer am Karton befestigt sind.

Rohr und Düse vergleichen. Mit derselben Pumpe, im selben Abstand und Winkel erst durch ein weites Rohr auf die Flügel blasen, dann durch einen gekürzten, schräg gehaltenen Trinkhalm, und beobachten, womit sich das Rad schneller dreht.

Eine Stufe hinzufügen. Ein zweites Rad mit gleichsinnig verdrehten Flügeln auf einen zweiten Korken auf derselben Nadel kleben, 3 cm hinter dem ersten. Dazwischen einen Pappring mit gegensinnig verdrehten Flügeln am Karton befestigen; sein Mittelloch muss so weit sein, dass er weder Nadel noch Räder berührt. Entlang der Nadel durch das vordere Rad blasen, dann den Ring herausnehmen und vergleichen: Die festen Flügel sollten die Luft, die das erste Rad verlässt, auf das zweite lenken.

Die Spannung messen. Einen kleinen Gleichstrom-Modellbaumotor mit einem Schlauchstück an die Nadel kuppeln und ein Multimeter im Gleichspannungsbereich an seine Klemmen anschließen. Kann das Rad den Motor drehen, steigt die Anzeige mit der Drehzahl.

Das Modell nicht mit Dampf betreiben. Kochendes Wasser wird zu mehr als dem Tausendfachen seines Volumens an Dampf, und ein beheiztes Gefäß, das verschlossen oder verstopft ist, baut Druck auf, bis es platzt. Echte Kessel folgen zugelassenen Konstruktionen, haben Sicherheitsventile und werden regelmäßig von einer befähigten Person geprüft; ein selbst gebauter Kessel bietet keine dieser Sicherheiten.

> **Sicherheit.** Dampf verbrüht in Sekundenbruchteilen, auch an der Tülle eines Wasserkochers, wo er unsichtbar ist: Hände und Gesichter fernhalten. Niemals ein beheiztes Gefäß verschließen, zustopfen oder verstopfen. Ein laufendes Alurad hat scharfe Kanten und kann einen Flügel wegschleudern, also Schutzbrille tragen und Haare zusammenbinden. Nur einen kleinen Modellbaumotor und ein Messgerät verwenden, nie das Stromnetz, und den Föhn von Wasser fernhalten.

Geschichte und Entwicklung

Herons Aeolipile: Zwei Dampfstrahlen drehen die Kugel auf ihren Zapfen.

Im 1. Jahrhundert n. Chr. beschrieb Heron von Alexandria die Aeolipile, eine hohle Kugel, die von Dampf aus gebogenen Röhrchen gedreht wird. Sie ist das erste bekannte Gerät, das Dampf in Drehung verwandelt. 1629 veröffentlichte Giovanni Branca die Zeichnung einer Maschine, bei der ein Dampfstrahl auf ein Schaufelrad bläst; gebaut wurde sie wohl nie. In Schweden patentierte Gustaf de Laval 1883 ein kleines Reaktionsrad für seine Milchzentrifugen, 1889 dann eine einstufige Gleichdruckturbine mit Getriebe.

1884 kuppelte Charles Parsons, Teilhaber bei Clarke, Chapman in Gateshead, eine Turbine mit vielen Reaktionsstufen direkt mit einem Dynamo. Sie leistete 7,5 Kilowatt bei 18.000 Umdrehungen pro Minute, und 1888 beleuchteten rund 200 solcher Turbodynamos Schiffe. 1890 setzte das Kraftwerk Forth Banks in Newcastle als erstes Turbinen ein.

Um zu zeigen, was die Turbine als Schiffsantrieb leistet, baute Parsons die Turbinia, ein 31 Meter langes Boot, das 34,5 Knoten erreichte. Am 26. Juni 1897 ließ er sie unangemeldet an den Reihen der Kriegsschiffe

bei der Flottenparade von Spithead vorbeifahren. 1905 empfahl ein Ausschuss der Admiralität Turbinen für alle Kriegsschiffklassen.

In den Vereinigten Staaten verkaufte Charles Curtis seine Rechte 1896 an General Electric. Sein Turbogenerator von 5.000 Kilowatt aus dem Jahr 1903, damals der stärkste der Welt, war 7,6 Meter hoch, gegenüber 18 Metern bei einer Kolbenmaschine ähnlicher Leistung. Die Turbosätze wuchsen auf 660 Megawatt in Drax in den 1970er-Jahren; die beiden für Hinkley Point C gebauten Turbinen sind für je 1.770 Megawatt ausgelegt.

Turbinia in voller Fahrt: Drei Turbinen auf drei Wellen trieben neun Schrauben.

Kennzahlen

Erster Turbodynamo von Parsons
1884: 7,5 kW bei 18.000 U/min

Turbinia
34,5 Knoten; vorgeführt in Spithead am 26. Juni 1897

Anteil am Strom der USA, 2022
Rund 53 %: 42,5 % aus Dampfkraftwerken, 10,7 % aus dem Dampfteil von GuD-Kraftwerken

Erste Kondensationsturbinen
Cambridge, 1892: drei Turbosätze zu 100 kW bei 4.800 U/min

Drehzahl einer Netzturbine
3.000 U/min im 50-Hz-Netz, 3.600 im 60-Hz-Netz; halb so viel bei den Turbosätzen großer Kernkraftwerke

Quellen

1. Parsons' steam turbine generator, 1884 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co51109
2. Charles Algernon Parsons 1854–1931 · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/people/ap26725/parsons-charles-algernon
3. 100 K.W. Parsons' Radial Flow Steam Turbine alternator with Generator, partly sectioned · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8625819/100-k-w-parsons-radial-flow-steam-turbine-alternator-with-generator-partly-sectioned
4. Forward thinkers: Sir Charles Parsons, inventor of the steam turbine · Institution of Mechanical Engineers https://www.imeche.org/news/news-article/forward-thinkers-sir-charles-parsons-inventor-of-the-steam-turbine
5. Turbinia (1894) · Tyne Built Ships https://www.tynebuiltships.co.uk/T-Ships/turbinia1894.html
6. Curtis 5000-kW Vertical Turbine (ASME Landmark) · Engineering and Technology History Wiki, ASME https://ethw.org/ASME-Landmark:Curtis_5000-kW_Vertical_Turbine
7. Charles Gordon Curtis · ASME https://www.asme.org/topics-resources/content/charles-gordon-curtis
8. Carl Gustaf Patrik De Laval · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/Carl_Gustaf_Patrik_De_Laval
9. C. A. Parsons and Co: Electricity Generation and Transmission · Grace's Guide to British Industrial History https://www.gracesguide.co.uk/C._A._Parsons_and_Co:_Electricity_Generation_and_Transmission
10. Heron of Alexandria · MacTutor, University of St Andrews https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Heron/
11. Giovanni Branca · EBSCO Research Starters https://www.ebsco.com/research-starters/literature-and-writing/giovanni-branca
12. Fluid Machinery, Lecture 24: steam turbines · NPTEL, Indian Institutes of Technology https://archive.nptel.ac.in/content/storage2/courses/112104117/chapter_6/6_9.html
13. Nozzle Design · NASA Glenn Research Center https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/nozzle-design/
14. The Rankine cycle · MIT, Unified Engineering thermodynamics notes https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node65.html
15. How electricity is generated · U.S. Energy Information Administration https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/how-electricity-is-generated.php
16. Arabelle goes to new lengths · Nuclear Engineering International https://www.neimagazine.com/analysis/arabelle-goes-to-new-lengths/
17. Introduction to pressure equipment · Health and Safety Executive https://www.hse.gov.uk/pressure-systems/about.htm
18. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97) · International Association for the Properties of Water and Steam https://www.iapws.org/relif/IF97-Rev.html
19. TRANSFORM.Fluid.Machines.SteamTurbine: Stodola ellipse law and Baumann wetness correction (after D. H. Cooke, J. Eng. Gas Turbines Power 107, 1985) · OpenModelica, Oak Ridge National Laboratory TRANSFORM library https://build.openmodelica.org/Documentation/TRANSFORM.Fluid.Machines.SteamTurbine.html

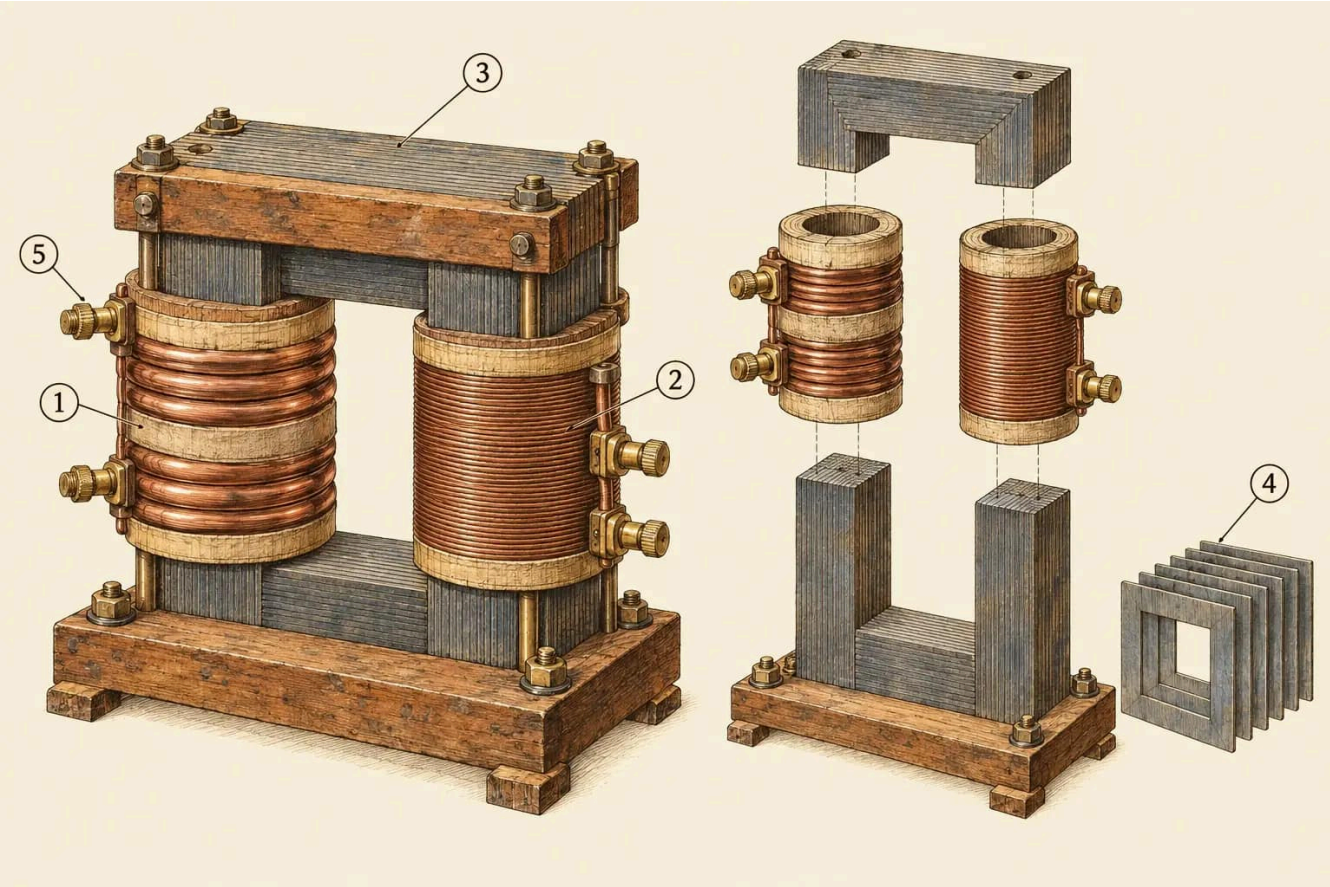
Fakten geprüft am 2026-10-14

Transformator

Spannung hinauf und wieder hinunter

1885 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Elektrischer Generator (S. 277), Eisenverhüttung (S. 138)



1 Primärspule: wenige Windungen aus dickem Draht 2 Sekundärspule: viele Windungen aus dünnem Draht 3 Geblechter Eisenkern 4 Dünne Eisenbleche des Kerns 5 Anschlussklemme

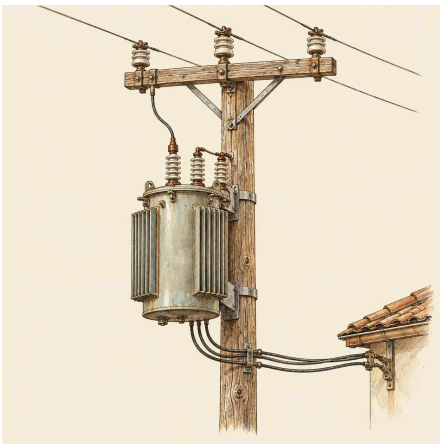
Ein Transformator besteht aus zwei Drahtspulen auf einem gemeinsamen Eisenkern: Wechselstrom in der ersten Spule erzeugt in der zweiten eine Spannung, die je nach Verhältnis der Windungszahlen höher oder niedriger ist. So lässt sich Strom mit hoher Spannung über weite Strecken schicken und mit der Spannung abgeben, die Geräte brauchen; vor allem deshalb hat sich in den Stromnetzen der Welt der Wechselstrom durchgesetzt.

Was es ist

Ein Transformator ändert die Spannung eines Wechselstroms. Er hat keine beweglichen Teile: zwei Spulen aus isoliertem Kupferdraht, die Primär- und die Sekundärspule, auf einem geschlossenen Eisenkern. Die Leistung fließt in die eine Spule hinein und aus der anderen mit höherer oder niedrigerer Spannung heraus; der Strom ändert sich umgekehrt.

Kraftwerke setzen die Spannung für die Fernleitungen herauf. Umspannwerke senken sie stufenweise, und ein letzter Transformator auf einem Mast oder in einer kleinen Station bringt sie auf die 230 oder 120 Volt der

Steckdose. Auch Ladegeräte und Türklingeln enthalten kleine Transformatoren.



Ein Masttransformator setzt die Spannung der Ortsleitung auf die Spannung im Haus herab.

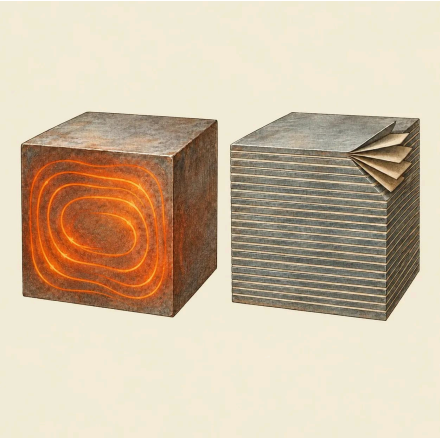
Wie es funktioniert

Der Strom in der Primärspule macht den Eisenkern zum Magneten. Weil der Strom wechselt, baut sich diese Magnetisierung auf, bricht zusammen und kehrt sich um, in fünfzig oder sechzig vollen Perioden pro Sekunde. Der veränderliche Fluss durchsetzt die Sekundärspule und erzeugt in jeder ihrer Windungen eine Spannung: Faradays Induktion, die nur wirkt, solange sich der Fluss ändert.

Jede Windung beider Spulen umschließt denselben Fluss, also verhalten sich die Spannungen wie die Windungszahlen. Mit 1000 Windungen primär und 50 sekundär werden aus 4600 Volt am Eingang 230 Volt am Ausgang. Im idealen, verlustfreien Transformator führt die Niederspannungsseite den zwanzigfachen Strom und ist deshalb mit dickerem Draht gewickelt.

Mit Gleichstrom funktioniert das alles nicht. Ein gleichbleibender Fluss induziert nichts, und die Primärspule ist dann nur ein Stück Draht an der Quelle, das heiß wird. Transformatoren brauchen Wechselstrom, und deshalb wurde er zum Standard der Netze; heutige Hochspannungs-Gleichstromverbindungen richten den Wechselstrom am Anfang gleich und wandeln ihn am Ende wieder in Wechselstrom um.

Hohe Spannung lohnt sich, weil die Wärmeverluste in einem Draht mit dem Quadrat des Stroms wachsen. Man schicke 100 Kilowatt in eine Leitung, deren Drähte zusammen 2 Ohm haben. Bei 1000 Volt fließen 100 Ampere, und die Drähte verheizen 20 Kilowatt, ein Fünftel der Leistung. Bei 10.000 Volt sind es 10 Ampere, und der Verlust sinkt auf 200 Watt, also 0,2 Prozent.



Ein massiver Kern erhitzt sich durch die Ströme, die in ihm kreisen; dünne, gegeneinander isolierte Bleche drängen sie stark zurück.

Der Fluss treibt auch im Eisen selbst kreisende Ströme an, die Wirbelströme, und ein massiver Kern würde heiß wie eine Herdplatte. Deshalb besteht der Kern aus einem Stapel von Blechen, wenige Zehntelmillimeter dick und durch Lack oder eine Oxidschicht gegeneinander isoliert. Die Wirbelstromverluste sinken mit dem Quadrat der Blechdicke. Die ersten Erbauer nahmen aus demselben Grund Bündel aus Eisendraht; heutige Kerne bestehen aus Siliziumstahl.

Die Netze verwenden Drehstrom: drei Wechselströme, um ein Drittel einer Periode gegeneinander verschoben, auf drei Leitern und in drei Spulensätzen auf einem gemeinsamen Kern umgespannt.

Wie man ihn baut

Ein Versuch auf dem Tisch mit wenigen Volt, niemals ein Projekt am Stromnetz. Man braucht eine Stahlschraube von etwa 10 cm Länge, eine zweite blanke Schraube und zwei flache Stahlstreifen, 20 bis 30 m Kupferlackdraht von 0,3 bis 0,5 mm, Isolierband, feines Schleifpapier, ein Multimeter, das Wechselspannung misst, und für den letzten Versuch ein Galvanometer mit Nullpunkt in der Mitte.

Spulen wickeln. Über eine Lage Isolierband eine Primärspule mit 100 Windungen auf die Schraube wickeln. Mit Band abdecken, darüber eine Sekundärspule mit 100 Windungen wickeln, wieder abkleben und obenauf eine zweite mit 50 Windungen wickeln. Den Lack an jedem Drahtende abschleifen.

Sichere Quelle wählen. Ein gekauftes Steckernetzteil nehmen, auf dessen Schild „AC output“ mit höchstens 12 Volt steht, oder einen Funktionsgenerator, der einen Sinus von wenigen Volt bei etwa 1 kHz ohne Gleichanteil liefert. Die meisten Netzteile liefern Gleichstrom und eignen sich nicht. Eine 12-Volt-Glühlampe fürs Auto von etwa 5 Watt in Reihe mit der Primärspule begrenzt den Strom.

Messen. Die Wechselspannung an der Primärspule und an jeder Sekundärspule ablesen, dann abklemmen: Die massive Schraube wird warm. Mit dem Netzteil zeigt das Messgerät einige Zehntel Volt, weil der größte Teil der Spannung an der Lampe abfällt. Die Spule mit 50 Windungen liefert etwa die halbe Spannung der Spule mit 100, und beide bleiben unter der Primärspannung, weil sich der Fluss einer einzelnen Schraube durch die Luft schließt. Die blanke Schraube neben die bewickelte legen und Köpfe wie Enden mit den Stahlstreifen verbinden, sodass das Eisen einen geschlossenen Rahmen um die Spulen bildet: Die Werte steigen.

Mit einer Batterie versuchen. Mit einer 4,5-Volt-Batterie statt des Netzteils, die Lampe weiter in Reihe, ein Galvanometer mit Mittelnullpunkt an die Sekundärspule legen, im unempfindlichsten Messbereich oder über einen Widerstand von einigen Kiloohm. Der Zeiger schlägt beim Schließen des Stromkreises nach der einen Seite aus, beim Öffnen nach der anderen, und dazwischen steht er auf null.

Ein Typenschild lesen. Auf einem Klingeltransformator Eingangs- und Ausgangsspannung suchen, etwa 230 V / 12 V, und die Leistung in Voltampere (VA). Große Geräte nennen zusätzlich Frequenz, Kühlart und Kurzschlussspannung; diese Schilder liest man von außerhalb des Zauns.

> **Sicherheit.** Keine Sekundärspule mit mehr Windungen als die Primärspule wickeln und bedenken, dass ein Netzteil im Leerlauf ein Fünftel über dem Aufdruck liegen kann. Wird ein Stromkreis durch eine Spule geöffnet, entsteht eine kurze Spannungsspitze: mit einem Schalter oder einem am Isolierteil gehaltenen Draht schalten, nie mit den Fingern an blanken Enden. Nie Spulen für das Stromnetz wickeln und nie netzbetriebene Geräte öffnen, verändern oder neu verdrahten, auch nicht ausgesteckt: Transformatoren aus Mikrowellenherden und Leuchtreklamen liefern tödliche Ströme. Ein rückwärts gespeister Abwärtstransformator erhöht die Spannung, und Kondensatoren in einem Gerät können nach dem Ausstecken geladen bleiben. Spulen bleiben nach dem Betrieb heiß. Nie auf Masten klettern, Umspannanlagen betreten oder heruntergefallene Leitungen berühren. Arbeiten am Netz gehören in die Hand einer Elektrofachkraft.

Geschichte und Entwicklung

Michael Faraday wies die Induktion im August 1831 mit seinem Eisenring mit zwei Spulen nach, Joseph Henry fand sie unabhängig davon in Amerika, und um 1850 machte Heinrich Ruhmkorff in Paris den Funkeninduktor zum gängigen Laborgerät.

1884 ließen Lucien Gaulard und John Dixon Gibbs entlang einer 40 km langen Leitung von Turin nach Lanzo Lampen leuchten, mit ihren „Sekundärgeneratoren“, in Reihe geschaltet und mit offenen Eisenkernen; wer eine

Lampe einschaltete, störte die übrigen.

In den Ganz-Werken in Budapest erkannten Károly Zipernowsky, Miksa Déri und Ottó Bláthy, dass ein geschlossener Eisenkern und parallel geschaltete Transformatoren die Spannung stabil halten. Sie meldeten zwischen Januar und März 1885 Patente an, nannten das Gerät „Transformator“ und beleuchteten mit ihrem System im Mai die Landesausstellung in Budapest.

Ein früher Budapester Transformator: Der Eisendraht umhüllt den Kupferring und schließt den magnetischen Kreis.

George Westinghouse kaufte die Rechte von Gaulard und Gibbs, und sein Ingenieur William Stanley baute Transformatoren mit geschlossenem Kern, die im März 1886 die Hauptstraße von Great Barrington in Massachusetts beleuchteten. Edisons Gleichstrom mit rund 110 Volt reichte nur wenige Straßen weit um jedes Kraftwerk, und seine Firmen warnten öffentlich vor den Gefahren des Wechselstroms. Westinghouse beleuchtete 1893 die Weltausstellung in Chicago mit Wechselstrom, und 1896 erreichte Strom von den Niagarafällen Buffalo.

Bis 1888 hatten Galileo Ferraris und Nikola Tesla mit phasenverschobenen Strömen ein Drehfeld für Motoren erzeugt; 1891 übertrug eine Drehstromleitung 300 PS über 175 km von Lauffen nach Frankfurt. Heutige Hauptleitungen arbeiten mit Hunderttausenden Volt.

Kennzahlen

Prinzip entdeckt
29. August 1831, Faradays Eisenring an der Royal Institution

Transformator mit geschlossenem Kern
Patentanmeldungen von Januar bis März 1885 durch Zipernowsky, Déri und Bláthy von den Ganz-Werken, Budapest

Erste Wechselstromverteilung mit Transformatoren in den USA
Great Barrington (Massachusetts), März 1886 (William Stanley)

Leitung Lauffen–Frankfurt, 1891
175 km mit 15.000 Volt, Drehstrom, über 75 % der Leistung kamen an

Leitungsverluste
Gleiche Leistung, gleiche Leitung: zehnfache Spannung, ein Hundertstel des Verlusts

Quellen

1. Michael Faraday's ring-coil apparatus · The Royal Institution https://rigb.org/node/143
2. History of the Transformer (F. Uppenborn, 1889) · Project Gutenberg https://gutenberg.org/files/56365/56365-h/56365-h.htm
3. Centenary of the transformer (P. Asztalos, 1986) · Periodica Polytechnica Electrical Engineering, Budapest University of Technology and Economics https://pp.bme.hu/ee/article/view/4637
4. Gaulard and Gibbs secondary generator · Museo Galileo, Florence https://catalogue.museogalileo.it/object/GaulardGibbsSecondaryGenerator.html
5. Milestones: Alternating Current Electrification, 1886 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Alternating_Current_Electrification,_1886
6. Milestones: Long Distance Electric Power Transmission Using Three-Phase Alternating Current, 1891 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Long_Distance_Electric_Power_Transmission_Using_Three-Phase_Alternating_Current,_1891
7. Milestones: Rotating Fields and Early Induction Motors, 1885-1888 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Rotating_Fields_and_Early_Induction_Motors,_1885-1888
8. Milestones: Pearl Street Station, 1882 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Pearl_Street_Station,_1882
9. History of Transformers · Edison Tech Center https://edisontechcenter.org/Transformers.html
10. The War of the Currents: AC vs. DC Power · U.S. Department of Energy https://www.energy.gov/articles/war-currents-ac-vs-dc-power
11. Eddy currents · schoolphysics https://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Electricity%20and%20magnetism/Electromagnetic%20induction/text/Eddy_currents/index.html
12. Transformer · HyperPhysics, Georgia State University https://hyperphysics.gsu.edu/hbase/magnetic/transf.html
13. Introduction to Electric Power Systems (J. L. Kirtley), 3.4 Transformers · LibreTexts https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Electro-Optics/Introduction_to_Electric_Power_Systems_(Kirtley)/03%3A_Polyphase_Networks/3.04%3A_Transformers
14. Commission Regulation (EU) No 548/2014, Annex I: ecodesign requirements for transformers · legislation.gov.uk https://www.legislation.gov.uk/eur/2014/548/annex/I/division/1/adopted

Fakten geprüft am 2026-10-14

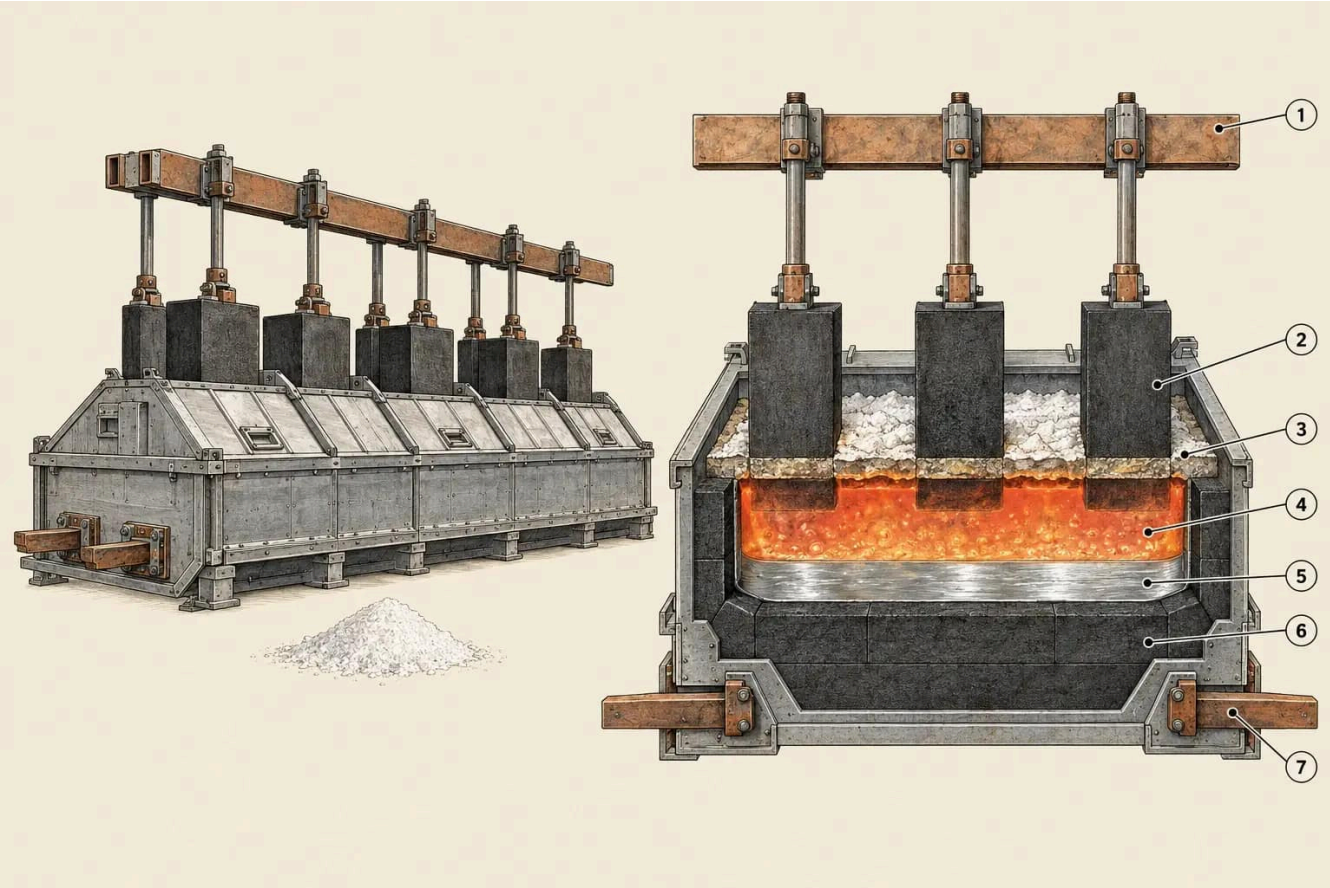
Aluminium

Tonerde, durch Strom zu Metall

1886 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Elektrischer Generator (S. 277), Wasserturbine (S. 268)

Führt zu: Flugzeug (S. 357)



1 Stromschiene und Anodenstangen 2 Kohlenstoffanoden 3 Kruste aus erstarrter Schmelze und Tonerde 4 Kryolithschmelze mit gelöster Tonerde 5 Flüssiges Aluminium 6 Kathodenauskleidung aus Kohlenstoff 7 Stahlwanne und Kathodenbarren

Aluminium ist das häufigste Metall der Erdkruste, steckt dort aber in Oxiden, die weder Feuer noch Holzkohle aufbrechen. Seit 1886 gewinnt man es, indem man Bauxit zu Tonerde raffiniert, die Tonerde in geschmolzenem Kryolith löst und mit starkem Gleichstrom zerlegt.

Was es ist

Aluminium ist ein leichtes, silbriges Metall mit etwa einem Drittel der Dichte von Stahl. Es macht rund 8 % der Masse der Erdkruste aus, mehr als jedes andere Metall, kommt aber fast nie gediegen vor. In Tonen, Feldspäten und den meisten gewöhnlichen Gesteinen ist es an Sauerstoff gebunden, und diese Bindung hält dem Holzkohlefeuer stand, das Eisen oder Kupfer freisetzt.

Das Erz ist Bauxit, ein rötliches Gestein aus tropischer Verwitterung. Eine Raffinerie macht daraus Tonerde, ein weißes Oxidpulver, und eine Hütte zerlegt die Tonerde mit Strom in der Hall-Héroult-Zelle der Tafel. Sie ist bis

heute der einzige industrielle Weg zu neuem Aluminium.

Wie es funktioniert

Vom Bauxit zur Tonerde. Im Bayer-Verfahren wird gemahlener Bauxit unter Druck in heißer Natronlauge aufgeschlossen, je nach Erz bei 140 bis 280 °C. Die Aluminiumminerale lösen sich, Eisenoxide und Sand setzen sich als roter Rückstand ab. Abgekühlt und mit Kristallen aus einem früheren Durchgang geimpft, scheidet die Lauge Aluminiumhydroxid aus, das bei bis zu etwa 1100 °C zu Tonerde gebrannt wird.

Vom Erz zum Metall: Zwei bis drei Tonnen Bauxit ergeben eine Tonne Tonerde, zwei Tonnen Tonerde eine Tonne Aluminium.

Von der Tonerde zum Metall. Tonerde schmilzt erst über 2000 °C, doch eine Schmelze aus Kryolith, einem Fluorid von Natrium und Aluminium, mit Zusatz von Aluminiumfluorid löst sie bei etwa 950 bis 980 °C. Die Zelle ist eine mit Kohlenstoffblöcken ausgekleidete Stahlwanne; die Auskleidung bildet die negative Elektrode. Kohlenstoffanoden hängen an Stangen, die an einer schweren Stromschiene festgeklemmt sind, in die Schmelze.

Der Gleichstrom fließt von den Anoden durch die Schmelze zur Auskleidung und zerlegt die gelöste Tonerde. Das Aluminium ist dichter als die Schmelze und sammelt sich flüssig am Boden. Der Sauerstoff wandert zu den Anoden und verbrennt deren Kohlenstoff zu Kohlendioxid, etwa 0,4 bis 0,5 kg Kohlenstoff je Kilogramm Metall; abgenutzte Anoden werden deshalb nacheinander ersetzt. Eine Kruste aus erstarrter Schmelze und Tonerde hält die Wärme. Durch sie wird Tonerde nachgefüllt, und das Metall wird in Abständen abgesaugt.

Der Strom hält die Schmelze auch flüssig. Die Zellen sind in Reihe geschaltet, jede führt weit über hunderttausend Ampere bei nur vier bis fünf Volt. Jedes Aluminiumatom braucht drei Elektronen; so verbraucht die Zelle etwa 13 bis 15 Kilowattstunden je Kilogramm, und weniger als die Hälfte davon geht in die Reaktion selbst. Strom ist der größte Kostenposten, deshalb stehen Hütten dort, wo er billig ist: an den Staudämmen Kanadas, Norwegens oder Islands oder bei großen Kraftwerken, mit Transformatoren und Gleichrichtern für den Gleichstrom.

An der Luft bildet sich auf dem Metall sofort eine wenige Nanometer dicke Oxidschicht, die die Korrosion stoppt und sich nach einem Kratzer neu bildet. Wenige Prozent Kupfer, Magnesium, Silizium oder Zink machen es fest genug für den Flugzeugbau. Recycling muss nur Schrott umschmelzen: 8,3 Gigajoule je Tonne gegenüber 186 für neues Metall im Jahr 2019, eine Ersparnis von etwa 95 %.

Bauanleitung

Aluminium zu Hause herzustellen oder zu schmelzen, kommt nicht infrage. Die Schmelze gibt giftige fluoridhaltige Abgase ab und ist fast 1000 °C heiß, und ein Tropfen Wasser unter flüssigem Metall verdampft schlagartig und schleudert das Metall heraus; geschmolzene Dosen setzen zudem Dämpfe aus Lack und Beschichtung frei. Eine Werkstatt kann das Metall sortieren, kalt bearbeiten und die Elektrolyse mit wenigen Volt zeigen.

Sortieren. Ein Magnet zieht Stahl an, Aluminium nicht. Um es von anderen unmagnetischen Metallen zu unterscheiden, wiegt man ein Stück und misst das verdrängte Wasser: Aluminium kommt auf etwa 2,7 Gramm je Kubikzentimeter, Kupfer und Messing auf über 8. Speisereste abspülen, lackierte oder beschichtete Teile getrennt halten.

Der Magnet haftet an der Stahldose und lässt die Aluminiumdose unbeachtet.

Biegen und bohren. Weiche Sorten lassen sich kalt im Schraubstock zwischen Hartholzbacken biegen; harte Legierungen reißen an einer scharfen Kante und werden um einen gerundeten Klotz gebogen. Zum Bohren ankörnen, das Blech auf eine Holzunterlage spannen und einen scharfen Bohrer mit einem Tropfen Öl nehmen: Von Hand gehaltenes Blech kann sich verhaken und mitdrehen.

Kalt verbinden. Aluminium ist schwer zu schweißen: Sein Oxid schmilzt über 2000 °C, das Metall bei 660 °C, und es glüht nicht, bevor es zusammensackt. Man verbindet es mit Nieten, Schrauben oder Strukturklebstoff, möglichst mit Befestigungen aus Aluminium. In feuchter Umgebung, vor allem am Meer, korrodiert es im Kontakt mit Kupfer, Stahl und selbst Edelstahl; Kunststoffscheiben oder ein Anstrich trennen die Metalle.

Das Prinzip zeigen. Zwei Bleistiftminen in ein Glas Wasser mit einem Teelöffel Waschsoda stellen und an eine 9-Volt-Batterie anschließen. An der negativen Mine perlt Wasserstoff, an der positiven Sauerstoff: Der Strom zerlegt Wasser, wie die Zelle Tonerde zerlegt.

> **Sicherheit.** Kein flüssiges Metall und keine Schmelzflusselektrolyse außerhalb eines Werks. Geschnittenes Blech ist scharf: beim Hantieren Handschuhe tragen und jede Kante entgraten, die Handschuhe vor dem Bohren aber ausziehen und die Augen schützen. Waschsoda reizt Haut und Augen, also eine Schutzbrille tragen. In der Vorführung nie Kochsalz verwenden, weil dabei Chlor entsteht; den Wasserstoff von Flammen fernhalten und nur eine kleine Batterie benutzen, nie das Stromnetz.

Geschichte und Entwicklung

Hans Christian Ørsted gewann 1825 aus Aluminiumchlorid eine winzige, unreine Probe. Friedrich Wöhler stellte 1827 ein Pulver her und 1845 kleine Kügelchen.

In Frankreich reduzierte Henri Sainte-Claire Deville das Chlorid mit Natrium und zeigte auf der Pariser Weltausstellung 1855 einen Barren. Napoleon III. förderte ihn und soll Aluminiumbesteck seinen vornehmsten Gästen vorbehalten haben. Im Dezember 1884 wurde eine 100 Unzen schwere Aluminiumpyramide auf das Washington Monument gesetzt, bei 1,10 Dollar je Unze, etwa dem Preis von Silber.

Aluminiumbesteck aus dem Zweiten Kaiserreich, als das Metall so viel wert war wie Silber.

1886 fanden zwei 22-Jährige dieselbe Lösung. Am 23. Februar gewann Charles Martin Hall in Oberlin, Ohio, mit selbst gebauten Batterien Aluminiumkügelchen aus Tonerde, die in Kryolith gelöst war. Paul Héroult, der sein Erbe für einen Dynamo ausgegeben hatte, meldete am 23. April ein französisches Patent an. Halls Firma in Pittsburgh, die spätere Alcoa, produzierte ab 1888; Héroults Verfahren lief in Neuhausen am Rheinfall an. Karl Josef Bayer meldete 1887 das Ausrühren der Tonerde mit Impfkristallen an und 1892 den Druckaufschluss des Bauxits; zusammen machten sie reine Tonerde billig.

Ein Pfund kostete 1888 etwa 4,86 Dollar und Anfang der 1890er-Jahre weniger als einen Dollar. Der Motor der Brüder Wright hatte 1903 ein Kurbelgehäuse aus Aluminium; aushärtbare Legierungen wie Duralumin, ab etwa

1909 im Handel, kamen in Luftschiffe und dann in Flugzeuge. 2025 erzeugten die Hütten etwa 74 Millionen Tonnen neues Metall.

Kennzahlen

Temperatur der Zelle
Etwa 950–980 °C

Vom Erz zum Metall
2–3 t Bauxit je Tonne Tonerde; etwa 2 t Tonerde je Tonne Metall

Primärproduktion
Etwa 74 Millionen Tonnen 2025 (Schätzung des USGS), davon 45 Millionen in China

Strombedarf
Etwa 13–15 kWh je Kilogramm Aluminium

Recycling
Etwa 5 % der Energie für neues Metall (8,3 gegenüber 186 GJ je Tonne, 2019)

Quellen

1. Aluminum: Common Metal, Uncommon Past · Science History Institute, Distillations https://www.sciencehistory.org/stories/magazine/aluminum-common-metal-uncommon-past/
2. The Washington Monument's aluminum capstone · National Park Service https://www.nps.gov/articles/000/wamocap.htm
3. Production process: Refining · International Aluminium Institute https://alustory.international-aluminium.org/?p=374
4. Production process: Reduction · International Aluminium Institute https://alustory.international-aluminium.org/?p=1905
5. Aluminium recycling saves 95% of the energy needed for primary aluminium production · International Aluminium Institute https://international-aluminium.org/landing/aluminium-recycling-saves-95-of-the-energy-needed-for-primary-aluminium-production/
6. Alumina refining · Australian Aluminium Council https://aluminium.org.au/?p=227
7. Aluminium smelting · Australian Aluminium Council https://aluminium.org.au/how-aluminium-is-made/aluminium-smelting-chart/
8. Ionic liquids as electrolytes in aluminum electrolysis (Wu et al., 2022) · Frontiers in Chemistry https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2022.1014893/full
9. Aluminum (Mineral Commodity Summaries 2026) · U.S. Geological Survey https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-aluminum.pdf
10. Aluminum (Al) · U.S. Geological Survey https://pubs.usgs.gov/sir/2017/5118/elements/Aluminum/Al_txt.html
11. Aluminium : historique · Encyclopædia Universalis https://www.universalis.fr/encyclopedie/aluminium/2-historique/
12. Hall, Charles · Encyclopedia.com https://www.encyclopedia.com/science/news-wires-white-papers-and-books/hall-charles
13. K. J. Bayer, Process of obtaining alumina, US 382,505 (filed 1887) · Google Patents https://patents.google.com/patent/US382505A/en
14. K. J. Bayer, Process of making alumina, US 515,895 (filed 1892) · Google Patents https://patents.google.com/patent/US515895A/en
15. Aluminium · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium

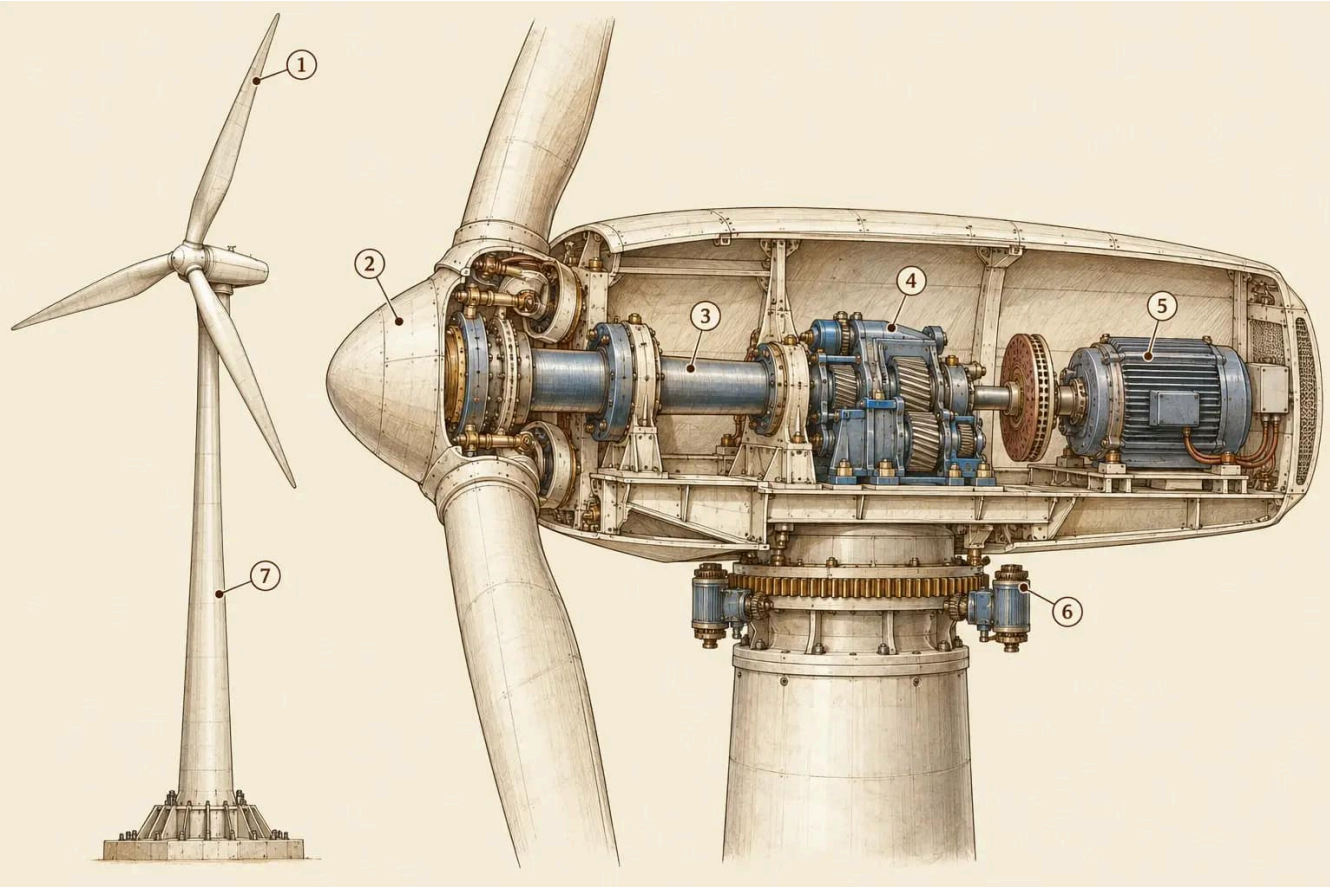
Fakten geprüft am 2026-10-14

Windkraftanlage

Aus Wind wird Strom

1887 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Windmühle (S. 188), Elektrischer Generator (S. 277), Bleiakkumulator (S. 307), Stahl (S. 143)



1 Rotorblatt 2 Nabe mit Blattlagern 3 Hauptwelle (langsam) 4 Getriebe 5 Generator 6 Azimutkranz und -motoren 7 Turm

Eine Windkraftanlage ist ein Rotor aus langen, wie Tragflächen geformten Blättern, den der Wind dreht und der oben auf einem Turm einen elektrischen Generator antreibt. Kleine Anlagen laden Batterien; große, deren Rotor über hundert Meter misst, speisen über einen Transformator ins Netz ein.

Was es ist

Eine Windkraftanlage ist eine Windmühle, die Strom erzeugt: Der Rotor dreht eine Welle, und die Welle treibt einen Generator an. Die hier gezeichnete Maschine hat den Aufbau fast aller großen Anlagen von heute. Drei schlanke Rotorblätter (1) stehen vor einem Stahlturm (7) im Wind, und die Gondel obendrauf enthält den Triebstrang und dreht sich mit dem Wind.

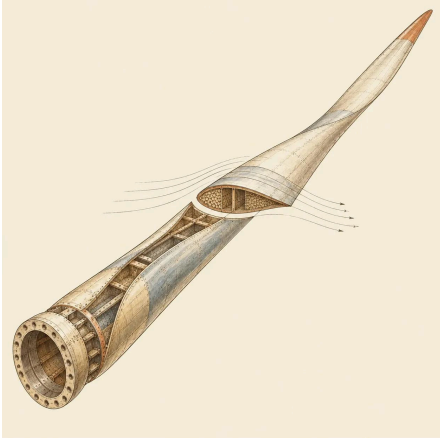
Wie es funktioniert

Die Leistung des Windes beträgt $P = ½·ρ·A·v^3$. Dabei ist ρ die Dichte der Luft, etwa 1,2 kg/m³, A die vom Rotor überstrichene Fläche und v die Windgeschwindigkeit. Ein Rotor von 3 Metern Durchmesser überstreicht rund 7,1

m^2. Bei 6 m/s trägt der Wind, der hindurchströmt, $\frac{1}{2} \times 1{,}2 \times 7{,}1 \times 6^3 \approx 920$ Watt; bei 12 m/s das Achtfache, etwa 7,4 kW. Deshalb stehen Windkraftanlagen auf hohen Türmen, wo der Wind kräftiger weht.

Ganz ausschöpfen kann ein Rotor diese Leistung nicht. Er gewinnt Energie, indem er die Luft abbremst, doch die gebremste Luft muss hinter ihm noch abfließen, sonst käme keine neue nach. Um 1920 zeigte der deutsche Physiker Albert Betz, dass höchstens 16/27, also 59,3 %, zu gewinnen sind. Reale Anlagen nutzen über ihren Betriebsbereich meist etwa 35 bis 45 %; ein großer moderner Rotor kommt im günstigsten Betriebspunkt auf fast 48 %, und Getriebe und Generator verlieren noch etwas.

Moderne Rotorblätter sind Profile wie ein Flugzeugflügel und arbeiten mit Auftrieb. Weil sich das Blatt schnell quer zum Wind bewegt, trifft die Luft es überwiegend von der Seite, und der Auftrieb an seinem Profil zieht es herum. Die Schnelllaufzahl, also die Geschwindigkeit der Blattspitze geteilt durch die Windgeschwindigkeit, liegt bei dreiblättrigen Netzanlagen um 7: Bei 10 m/s Wind bewegen sich die Spitzen mit etwa 70 m/s.



Der Blattquerschnitt ist eine Tragfläche. Das Blatt ist verwunden, weil die Spitze viel schneller läuft als die Wurzel.

In der Nabe (2) sitzt jedes Blatt in einem großen Lager und lässt sich um seine eigene Achse drehen. Mit dieser Blattverstellung holt der Rotor unterhalb der Nennwindgeschwindigkeit so viel heraus wie möglich und begrenzt die Leistung darüber. Sie läuft bei der Einschaltgeschwindigkeit an, etwa 3 bis 5 m/s, und erreicht bei ihrer Nennwindgeschwindigkeit die volle Leistung. Oberhalb der Abschaltgeschwindigkeit, etwa 25 bis 29 m/s, stellt sie die Blätter in Fahnenstellung, der Rotor wird langsamer, und eine Bremse hält ihn fest. Eine Windfahne auf der Gondel meldet die Windrichtung, und Azimutmotoren (6) drehen die Gondel auf einem Zahnkranz, so wie die Windrose bei der Windmühle die Kappe.

Bei großen Anlagen dreht sich die Hauptwelle (3) mit etwa 8 bis 20 Umdrehungen pro Minute. Im klassischen Triebstrang übersetzt ein Getriebe (4) diese Drehzahl etwa hundertfach für den Generator (5), der mit über tausend Umdrehungen pro Minute läuft. Andere Bauarten nutzen einen mittelschnellen Generator mit weniger Übersetzung oder kommen ganz ohne Getriebe aus, mit einem großen, langsamen Generator mit vielen Magnetpolen. Leistungselektronik passt den Strom an die Netzfrequenz an, und ein Transformator erhöht die Spannung.

Bauanleitung

Eine kleine Anlage kann eine 12-Volt-Bleibatterie laden. Bauen Sie sie nach einem veröffentlichten, erprobten Plan, der Blätter, Mast und Überdrehzahlschutz festlegt; die Schritte unten zeigen, was ein solcher Plan abdecken muss. Klären Sie zuerst die örtlichen Bauvorschriften und sprechen Sie mit den Nachbarn.

Den Standort wählen. In Bodennähe ist der Wind schwach und böig. Eine gängige Regel setzt die Unterkante des Rotors mindestens 9 Meter über jedes Hindernis im Umkreis von 90 Metern. Ein Anemometer in der geplanten Höhe gibt nach einigen Wochen einen ersten Eindruck; erst ein ganzes Jahr zeigt die Jahreszeiten.

Den Generator wählen. Ein Gleichstrommotor mit Permanentmagneten, etwa aus einem Laufband, arbeitet gut als Generator. Treiben Sie ihn mit einer Bohrmaschine bei bekannten Drehzahlen an, mit angeschlossener 12-Volt-Last, und messen Sie Spannung und Strom: Bei einigen hundert Umdrehungen pro Minute, die der Rotor erreichen kann, muss er oberhalb von etwa 14 Volt einen brauchbaren Strom liefern.

Blätter aus Kunststoffrohr, ein Laufbandmotor und eine Fahne aus Blech.

Den Rotor bauen. Pläne für kleine Anlagen schneiden die Blätter oft aus Kunststoffrohr oder schnitzen sie aus leichtem, geradfaserigem Holz. Halten Sie sich an Rohrqualität, Wandstärke und Blattform des Plans: Rohrblätter ermüden und können an der Wurzel reißen. Klemmen Sie jede Blattwurzel zwischen zwei Metallplatten an der Nabe, wuchten Sie den Rotor aus, bis er in jeder Stellung stehen bleibt, und tauschen Sie ein Blatt beim ersten Riss aus. Ein Rotor von 1,1 Metern Durchmesser erhält bei 5 m/s etwa 70 Watt Windleistung; 10 bis 20 Watt an der Batterie sind eine grobe Schätzung, die nur eine Messung bestätigen kann.

Mast und Fahne. Eine flache Windfahne an einem Ausleger hält den Rotor im Wind. Setzen Sie den Motor auf ein Drehlager oben auf einem Stahlrohr mit Gelenkfuß und verankern Sie die Abspannseile in einem Abstand vom Fuß, der der Hälfte bis drei Vierteln der Masthöhe entspricht, damit sich der Mast umlegen lässt. Verwenden Sie den Mast des Plans, für die Last ausgelegte Anker und eine Handwinde zum Aufrichten.

Vor Überdrehzahl schützen. Bei einer Böe oder ohne elektrische Last kann ein Rotor so schnell werden, dass er bricht. Eine Anlage im Freien braucht einen selbsttätigen Schutz: Viele Kleinanlagen haben eine klappbare Fahne, die den Rotor bei starkem Wind aus dem Wind dreht; andere setzen auf Strömungsabriss oder verstellbare Blätter. Ohne einen solchen Schutz darf eine Anlage nicht im Freien laufen, und auch mit ihm wird eine Kleinanlage vor einem Sturm angehalten und umgelegt.

Die Verkabelung. Verbinden Sie den Generator über eine Sicherung und eine Sperrdiode, die verhindert, dass die Batterie den Motor antreibt, mit der Batterie. Ein Ballastregler, ausgelegt für den Strom des Generators und nach seinem eigenen Schaltplan angeschlossen, überwacht die Batteriespannung und leitet die Leistung in eine Ballastlast, sobald die Batterie voll ist: Widerstände, die die volle Leistung bei Batteriespannung aufnehmen können, denn ein Netzheizgerät nimmt bei 12 Volt viel zu wenig auf. Ein Schalter, der den Generator kurzschließt, bremst den Rotor bei schwachem Wind, hält ihn aber nicht fest; binden Sie ein Blatt am Mast an, bevor Sie den Rotor anfassen.

Für ein Tischmodell stellen Sie einen kleinen Motor mit Pappflügeln vor einen Ventilator und messen die Spannung bei jeder Stufe.

> **Sicherheit.** Blattspitzen sind viel schneller, als es aussieht: Stellen Sie sich nie in die Rotorebene. Steigen Sie nie auf einen Mast, solange sich die Anlage drehen kann; halten Sie sie an und legen Sie den Mast um. Beim Aufrichten und Umlegen müssen alle weiter entfernt stehen, als der Mast hoch ist, und Mast samt Fallbereich müssen weit von Freileitungen entfernt sein. Bleibatterien enthalten Schwefelsäure und geben beim Laden explosiven Wasserstoff ab: Stellen Sie sie in einen belüfteten Kasten, fern von Funken und Wohnräumen. Ein Kurzschluss an einer Batterie kann Kabel schmelzen lassen und einen Brand auslösen. Schließen Sie eine Windkraftanlage nie selbst an die Hausinstallation oder das Netz an; dafür braucht es einen zugelassenen Wechselrichter und eine Elektrofachkraft.

Geschichte und Entwicklung

Im Juli 1887 stellte James Blyth, Professor in Glasgow, an seinem Ferienhaus in Marykirk in Schottland eine Windmühle mit vier Tuchsegeln auf. Ihr Dynamo lud Akkumulatoren, die das Haus beleuchteten. Schon 1883 war in Wien ein windgetriebener Dynamo gezeigt worden, doch Blyths Anlage ist die erste gut belegte im Alltagsbetrieb.

Im Winter 1887/88 baute Charles F. Brush in Cleveland, Ohio, einen Winddynamo mit 144 Blättern aus Zedernholz auf einem 18 Meter hohen Turm. Er lud 12 Batterien. Sein Dynamo wird meist mit 12 kW angegeben, ein späterer Zeitungsbericht nennt allerdings 1,2 kW. Ab 1891 erprobte Poul la Cour in Askov in Dänemark Windkraftanlagen; später bildete er auch Landelektriker aus, die solche Anlagen bauten.

Brushs Anlage in Cleveland: 144 Zedernholzblätter auf einem Rotor von 17 Metern.

Amerikanische Farmen kauften Ladewindräder in großer Zahl; allein die Brüder Jacobs bauten rund 20.000 Stück, bis sie 1956 schlossen, als das Stromnetz die Höfe erreicht hatte. Am 19. Oktober 1941 ging in Vermont die zweiblättrige Smith-Putnam-Anlage mit 1,25 MW ans Netz; 1945 verlor sie ein Blatt. 1957 baute Johannes Juul in Gedser in Dänemark eine 200-kW-Anlage mit drei Blättern, Stallregelung und Asynchrongenerator. Dieses „dänische Konzept“ prägte die Anlagen, die ab Ende der 1970er-Jahre gebaut wurden.

2025 wurde in China ein Prototyp mit 26 MW und 310 Meter Rotordurchmesser zur Erprobung errichtet. Im selben Jahr lieferte der Wind 8,5 % des weltweiten Stroms.

Kennzahlen

Erste regelmäßige Nutzung von Windstrom
James Blyth, Marykirk (Schottland), Juli 1887

Betz-Grenze
Höchstens 59,3 % (16/27) der Windleistung; große Rotoren erreichen in der Spitze knapp 48 %

Anteil am Weltstrom
8,5 % im Jahr 2025

Leistung des Windes
$P = ½·ρ·A·v^3$: doppelte Windgeschwindigkeit, achtfache Leistung

Betriebsbereich
Anlauf bei etwa 3–5 m/s; Abschaltung oberhalb von etwa 25–29 m/s

Quellen

1. July 1887: James Blyth harnesses the wind · American Physical Society, APS News https://www.aps.org/apsnews/2022/07/james-blyth-harnesses-wind
2. James Blyth (1839-1906) · The Mills Archive Trust https://millsarchive.org//biography/james-blyth-1839-1906
3. Charles Brush Used Wind Power 120 Years Ago · Teaching Cleveland https://teachingcleveland.org/charles-brush-used-wind-power-120-years-ago/
4. Charles Brush and Some Notes on Early Wind Turbine Development (P. Gipe) · Wind-Works https://wind-works.org/charles-brush-and-some-notes-on-early-wind-turbine-development/
5. Charles F. Brush · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_F._Brush
6. Old Wind and Electricity (Engines of Our Ingenuity, episode 552, J. H. Lienhard) · University of Houston https://engines.egr.uh.edu/episode/552
7. Poul la Cour · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Poul_la_Cour
8. The inventor who turned a folk high school into a laboratory · Carlsberg Foundation https://carlsbergfondet.dk/en/anniversary-stories/the-inventor-who-turned-a-folk-high-school-into-a-laboratory/
9. Flashbacks: The First Wind Power Boom · NRECA, RE Magazine https://www.cooperative.com/remagazine/articles/Pages/Flashbacks-The-First-Wind-Power-Boom.aspx
10. Original Company · Jacobs Wind https://jacobswind.net/history/original-company/
11. 79th anniversary of first wind turbine interconnection with the grid in North America (P. Gipe) · Wind-Works https://wind-works.org/79th-anniversary-of-first-wind-turbine-interconnection-with-the-grid-in-north-america/
12. Gedser wind turbine · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Gedser_wind_turbine
13. How a Wind Turbine Works (text version) · U.S. Department of Energy, Wind Energy Technologies Office https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version
14. Betz limit · Energy Education, University of Calgary https://energyeducation.ca/encyclopedia/Betz_limit
15. Simulation of Variable Speed Wind Turbines based on Open-Source Solutions (2021) · International Journal of Electrical Engineering & Education, via arXiv https://arxiv.org/pdf/2103.01759
16. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development (NREL/TP-500-38060, 2009) · National Renewable Energy Laboratory https://docs.nlr.gov/docs/fy09osti/38060.pdf
17. Small Wind Electric Systems: A U.S. Consumer's Guide (DOE/GO-102007-2465, August 2007) · U.S. Department of Energy / National Renewable Energy Laboratory https://docs.nlr.gov/docs/fy07osti/42005.pdf
18. World electricity data · Ember https://ember-energy.org/countries-and-regions/world/
19. Dongfang installs world's largest single-capacity offshore wind turbine for testing · offshoreWIND.biz https://www.offshorewind.biz/2025/09/03/dongfang-installs-worlds-largest-single-capacity-offshore-wind-turbine-for-testing

Fakten geprüft am 2026-10-14

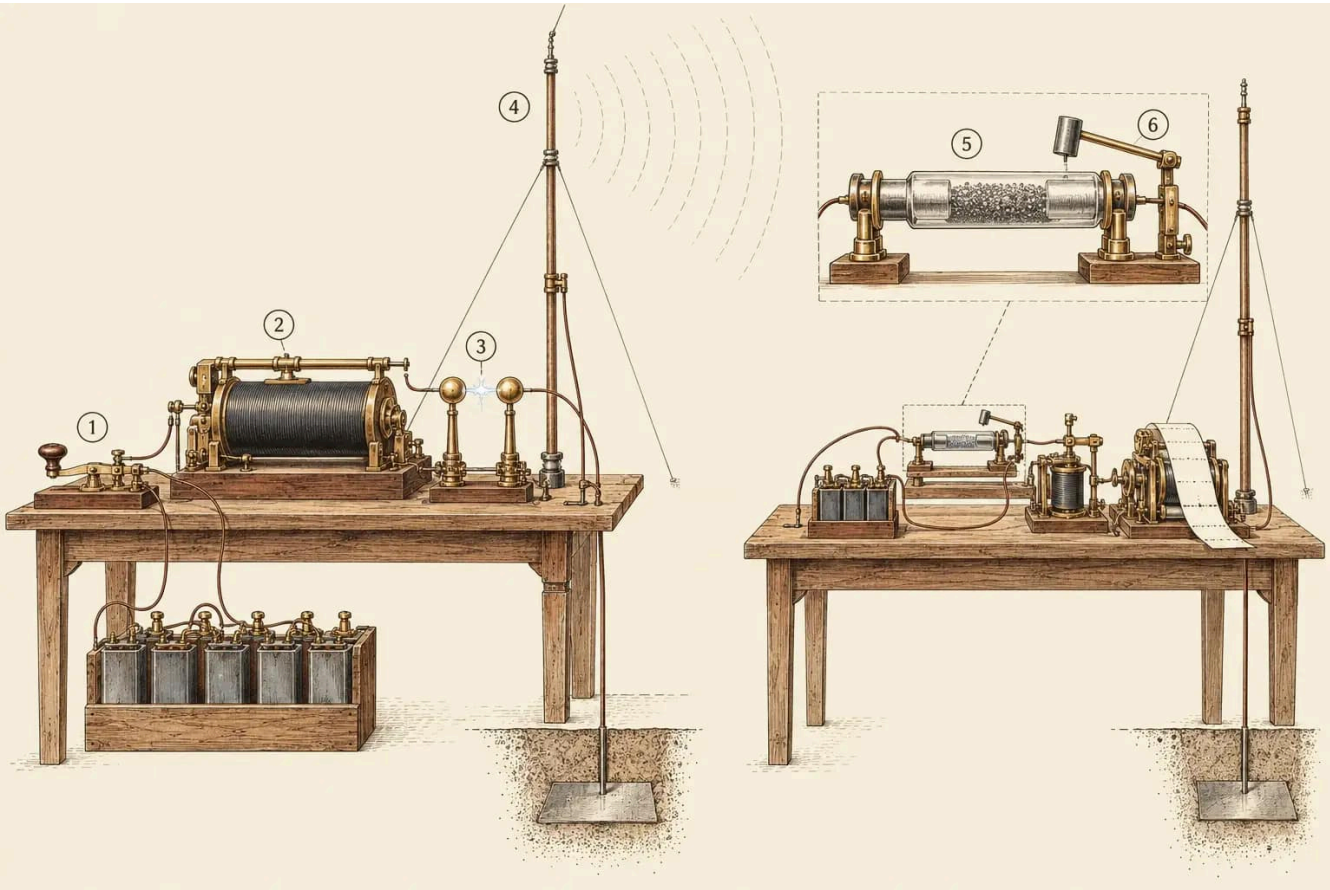
Radio

Nachrichten ohne Draht

um 1895 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Elektrischer Telegraf (S. 289), Elektrischer Generator (S. 277)

Führt zu: Transistor (S. 366)



1 Morsetaste 2 Funkeninduktor 3 Funkenstrecke 4 Antenne 5 Kohärer 6 Klopfer

Funk überträgt Signale als elektromagnetische Wellen durch den Raum: Ein schnell schwingender Strom in einem Draht erzeugt sie, ein weit entfernter zweiter Draht fängt sie auf. Guglielmo Marconi machte 1895 aus Laborversuchen eine funktionierende drahtlose Telegrafie, und im frühen 20. Jahrhundert folgte der Rundfunk mit Sprache und Musik.

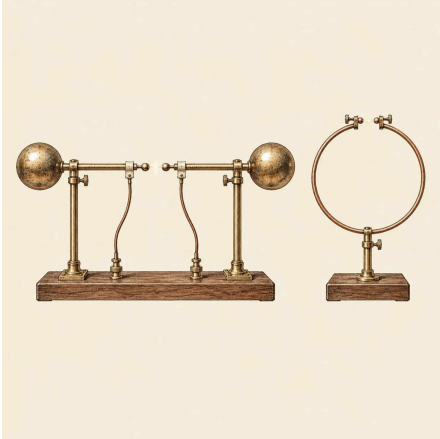
Was es ist

Ein Funksender lässt einen Strom sehr schnell in einem Draht hin und her schwingen, der Antenne, die dabei elektromagnetische Wellen aussendet; sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Wo die Wellen auf einen anderen Draht treffen, erzeugen sie dort ein winziges Abbild des ursprünglichen Stroms, und ein Empfänger macht daraus Töne oder Zeichen auf Papier.

Die Tafel zeigt das erste brauchbare System, Marconis Funkentelegrafen von 1896, der nur die Punkte und Striche des Morsealphabets übertragen konnte. Anfang der 1920er-Jahre sendeten Stationen bereits Sprache und Musik an Empfänger in den Wohnungen.

Wie es funktioniert

Im Sender speist eine Batterie über die Morsetaste einen Funkeninduktor. Der Induktor transformiert die Spannung auf viele tausend Volt und lädt zwei Messingkugeln auf, die durch einen kleinen Spalt getrennt sind. Ist die Spannung hoch genug, springt ein Funke über, und solange er besteht, schwingt die Ladung mit sehr hoher Frequenz durch die Antenne hin und her. Jeder Funke sendet einen kurzen Wellenzug aus. Ein kurzer Druck auf die Taste ergibt beim Empfänger einen Punkt, ein längerer einen Strich.



Sprang ein Funke über Hertz' Oszillator, zuckte auf der anderen Seite des Raums ein winziger Funke über die Lücke im Ring.

Marconi spannte einen langen senkrechten Draht an einem Mast auf und verband die andere Seite der Funkenstrecke mit einer im Boden vergrabenen Metallplatte. Mit dieser geerdeten Antenne wuchs die Reichweite von einigen hundert Metern auf mehrere Kilometer.

Beim Katzenschnurrbart-Detektor lässt ein feiner Draht auf einem Bleiglanzkristall den Strom nur in einer Richtung durch.

Auch der Empfänger hatte eine Antenne und eine Erdung, dazwischen einen Kohärer, auch Fritter genannt: ein kleines Glasröhrchen mit losen Metallspänen zwischen zwei Silberstopfen. Normalerweise leiten die Späne schlecht. Ankommende Wellen lassen sie aneinanderhaften und leitend werden, sodass eine örtliche Batterie Strom hindurchschicken und ein Relais betätigen kann, das eine Klingel oder einen Morseschreiber antreibt. Ein kleiner Hammer, der Klopfer, schlägt danach gegen das Röhrchen und lockert die Späne für das nächste Signal.

Funkensender verteilten ihre Energie über ein breites Frequenzband und störten sich gegenseitig. Abgestimmte Schwingkreise aus einer Spule und einem Kondensator erlaubten es jeder Station, auf ihrer eigenen Frequenz zu bleiben. Spätere Sender strahlten eine ungedämpfte Welle ab und veränderten ihre Stärke im Takt einer Stimme. Das ist die Amplitudenmodulation, kurz AM. Im Empfänger entfernt ein Detektor, zuerst ein Kristall und später eine Elektronenröhre, die Hochfrequenzwelle und lässt den Ton übrig.

Wie man es baut

Das einfachste funktionierende Radio ist der Detektorempfänger. Er braucht keine Batterie, denn seine gesamte Energie stammt aus den Wellen des Senders. Spule und Kondensator, wie unten beschrieben, decken je nach Antenne einen großen Teil des Mittelwellenbands ab, und am besten funktioniert das Gerät in Reichweite eines starken Senders.

Eine Antenne aufhängen. 15 bis 30 Meter Kupferdraht so hoch und gerade wie möglich zwischen zwei Bäumen oder Pfosten spannen, mit Isolatoren an beiden Enden, und einen Zuleitungsdraht zum Gerät herunterführen.

Eine Erdung anlegen. Einen Stab aus Kupfer oder verzinktem Stahl einen Meter tief in feuchten Boden treiben und mit einem kurzen, dicken Draht anschließen. Niemals eine Gasleitung verwenden.

Die Spule wickeln. Auf ein Rohr aus Pappe oder Kunststoff von etwa 8 cm Durchmesser 60 bis 90 Windungen Kupferlackdraht von 0,3 bis 0,5 mm Stärke dicht nebeneinander wickeln. Alle zehn Windungen eine Anzapfung anlegen und dort, wo angeschlossen wird, den Lack abkratzen.

Einen Drehkondensator einbauen. Ein Drehkondensator mit einem Höchstwert von etwa 350 bis 500 Pikofarad, gekauft oder aus einem alten Batterieradio ausgebaut, wird parallel zur Spule geschaltet und dient zur Senderwahl. Alte Radios mit Netzanschluss nicht öffnen: Ihre Kondensatoren können noch lange nach dem Ausstecken eine gefährliche Ladung halten. Ohne Drehkondensator lässt sich grob abstimmen, indem man die Antenne von Anzapfung zu Anzapfung umsteckt.

Einen Detektor anbringen. Am einfachsten ist eine Germaniumdiode. Ein Stück Bleiglanz, das ein feiner Draht leicht berührt, funktioniert mit Geduld ebenfalls.

Verdrahten und hören. Die Erdung an das untere Ende der Spule anschließen und die Antenne an eine der Anzapfungen: Weniger Windungen stimmen auf höhere Frequenzen ab, mehr Windungen auf tiefere, und eine lange Antenne arbeitet oft an einer mittleren Anzapfung am besten. Detektor und Ohrhörer in Reihe schalten und dieses Paar ebenfalls parallel zur Spule legen. Einen hochohmigen Kristallohrhörer mit einem Widerstand von etwa 50 bis 100 Kiloohm parallel dazu verwenden, oder alte hochohmige Kopfhörer; moderne niederohmige Ohrhörer belasten den Kreis zu stark. Den Kondensator langsam drehen.

> **Sicherheit.** Eine Außenantenne zieht Blitze an: sie abklemmen und mit der Erdung verbinden, bevor ein Gewitter aufzieht, und während eines Gewitters nie berühren. Der Erdungsstab des Geräts ist kein Blitzschutz; eine dauerhafte Außenantenne braucht einen ordnungsgemäßen Blitzableiter und eine Erdung nach den örtlichen Vorschriften. Alle Drähte weit von Stromleitungen fernhalten, denn eine Berührung kann tödlich sein, und nicht ohne sichere Leiter und eine zweite Person auf Dächer steigen. Keinen Sender bauen: Die meisten Sender brauchen eine Genehmigung, und Funkensender sind überall verboten, weil sie andere Funkdienste stören. Funkeninduktoren erzeugen Tausende Volt und verursachen schmerzhafte, gefährliche Stromschläge.

Geschichte und Entwicklung

1865 sagte James Clerk Maxwell voraus, dass sich elektrische und magnetische Felder gemeinsam als Wellen ausbreiten können. Zwischen 1886 und 1888 erzeugte Heinrich Hertz in Karlsruhe solche Wellen mit Funken, wies sie mit einem Drahtring quer durch sein Labor nach und zeigte, dass sie sich wie Licht verhalten. Édouard Branly (1890) und Oliver Lodge (1894) entwickelten den Kohärer, ein Röhrchen mit Metallspänen, das leitend wird, wenn die Wellen eintreffen. Am 7. Mai 1895 führte Alexander Popow in Sankt Petersburg einen Empfänger mit selbstklopfendem Kohärer vor, gebaut, um entfernte Blitze aufzuzeichnen.

Guglielmo Marconi, der in der Villa Griffone seiner Familie bei Bologna arbeitete, hatte von Anfang an die Telegrafie im Blick. Im Sommer 1895 schickte er mit einer geerdeten senkrechten Antenne Signale etwa zwei Kilometer weit hinter den Celestini-Hügel, und ein Helfer auf der anderen Seite gab zur Bestätigung einen Schuss ab. 1896 ging er nach England und meldete sein Patent an. Am 12. Dezember 1901 hörten er und George Kemp am Signal Hill in Neufundland über einen von einem Drachen gehaltenen Draht die drei Punkte des Buchstabens S, gesendet aus Poldhu in Cornwall. Manche Historiker halten es für möglich, dass sie nur atmosphärisches Rauschen hörten, doch 1907 begann ein regelmäßiger Funkdienst über den Atlantik.

Die Triode verstärkte schwache Signale, verbesserte so den Empfang und half dem Rundfunk, sich auszubreiten.

Am 21. Dezember 1906 übertrug Reginald Fessenden vor geladenen Zeugen Sprache und Musik per Funk von Brant Rock in Massachusetts aus. Später schrieb er, er habe an Heiligabend ein Programm an Schiffe auf See gesendet; dieser Bericht stammt von 1932, und eine Aufzeichnung darüber aus dem Jahr 1906 ist bis heute nicht gefunden worden. Am 2.

November 1920 übertrug der Westinghouse-Sender KDKA in Pittsburgh die Ergebnisse der Präsidentschaftswahl, und in den 1950er-Jahren machten Transistoren Radios taschengroß.

Kennzahlen

Nachweis der Funkwellen
Heinrich Hertz, 1886 bis 1888

Marconis Signale überwinden einen Hügel
Etwa 2 km, Sommer 1895

Marconis gemeldeter Empfang über den Atlantik
12. Dezember 1901, der Morsebuchstabe S

Sprache und Musik per Funk
21. Dezember 1906, Fessendens Vorführung in Brant Rock

Quellen

1. Milestones: Marconi's Early Experiments in Wireless Telegraphy, 1895 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Marconi%27s_Early_Experiments_in_Wireless_Telegraphy,_1895
2. Milestones: Reception of Transatlantic Radio Signals, 1901 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Reception_of_Transatlantic_Radio_Signals,_1901
3. Milestones: Popov's Contribution to the Development of Wireless Communication, 1895 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Popov%27s_Contribution_to_the_Development_of_Wireless_Communication,_1895
4. Experiments and Results in Wireless Telephony (John Grant, 1907) · The American Telephone Journal, via earlyradiohistory.us https://earlyradiohistory.us/1907fes.htm
5. Results by Radio: Election Day 1920 · The Henry Ford https://www.thehenryford.org/collections/explore/articles/detail/articles/2020/10/15/results-by-radio-election-day-1920
6. Fessenden: World's First Broadcaster? · Radio World (James O'Neal) https://www.radioworld.com/news-and-business/fessenden-worlds-first-broadcaster
7. Circular 120: Construction and Operation of a Simple Homemade Radio Receiving Outfit (1922) · US Bureau of Standards, via NIST https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/circ/nbscircular120.pdf
8. Simple Inductance Formulas for Radio Coils (H. A. Wheeler, 1928) · Proceedings of the IRE https://doi.org/10.1109/JRPROC.1928.221309
9. Amateur Radio After World War One (1919-1925): 360 and 485 metres set aside for broadcasting, 1921 · Thomas H. White, United States Early Radio History https://earlyradiohistory.us/sec015.htm
10. Government Agricultural Broadcasting: 485 metres for crop reports and weather forecasts · Thomas H. White, United States Early Radio History https://earlyradiohistory.us/agric.htm

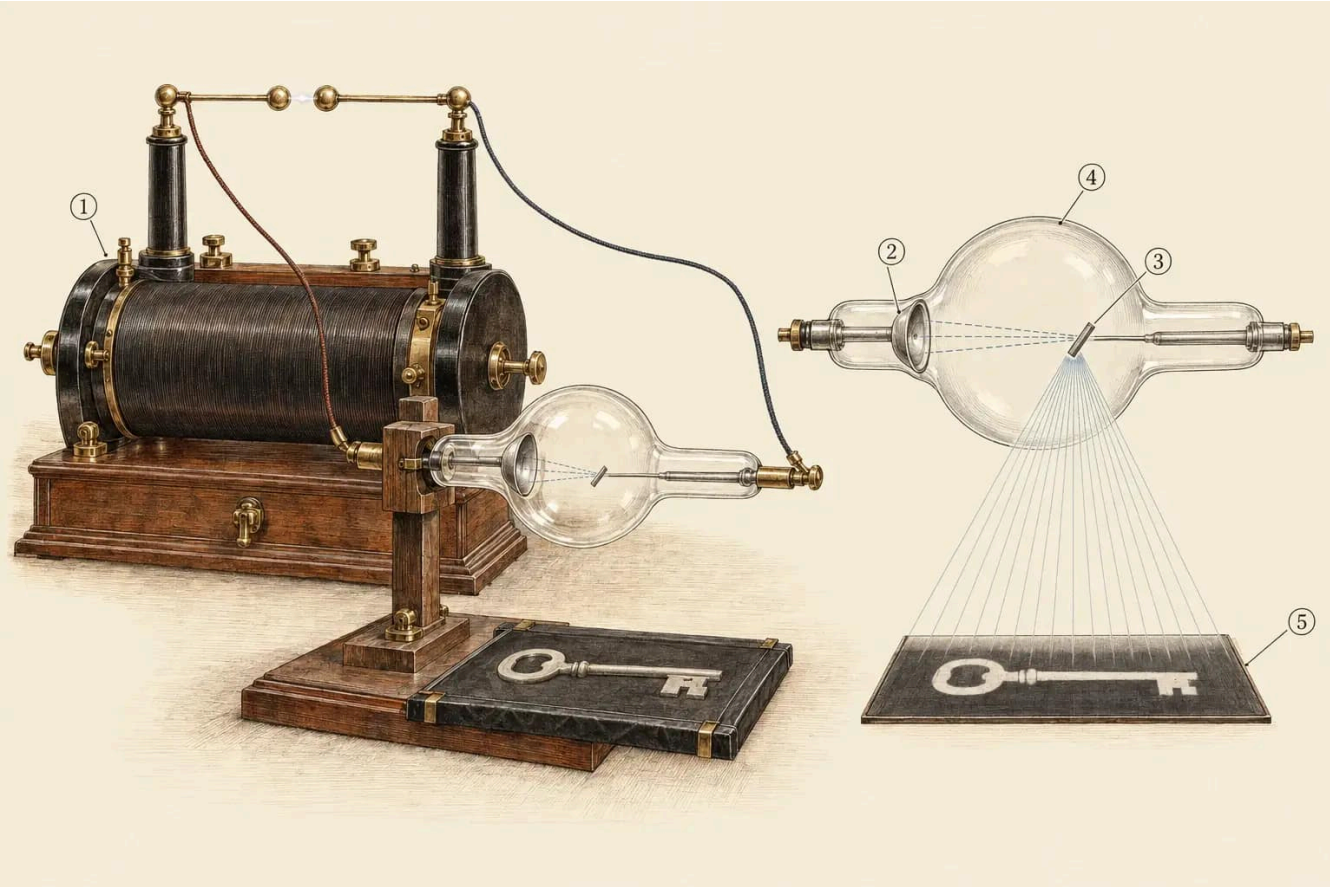
Fakten geprüft am 2026-10-11

Röntgenaufnahme

Durch den Körper sehen

1895 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Elektrischer Generator (S. 277), Fotografie (S. 264)



1 Funkeninduktor 2 Hohlkathode 3 Schräge Platin-Antikathode 4 Glaskolben 5 Fotoplatte

Beim Röntgen durchdringen unsichtbare Strahlen den Körper und treffen auf eine Platte oder einen Detektor, sodass Knochen und dichtes Gewebe Schatten werfen. Wilhelm Conrad Röntgen entdeckte die Strahlen am 8. November 1895 in Würzburg, und Anfang 1896, wenige Wochen nach seiner Mitteilung, suchten Ärzte in Europa und Amerika damit nach Brüchen und Kugeln.

Was es ist

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen wie das Licht, aber mit viel kürzerer Wellenlänge, etwa 0,01 bis 10 Nanometer gegenüber 400 bis 700 beim sichtbaren Licht; deshalb durchdringen sie Stoffe, die Licht aufhalten. Dichte Materie schluckt mehr davon als leichte, und so hinterlässt ein Gegenstand zwischen einer Röntgenquelle und einer empfindlichen Platte ein Schattenbild seines Inneren: Knochen, der Calcium enthält, hebt sich deutlich vom umgebenden Fleisch ab.

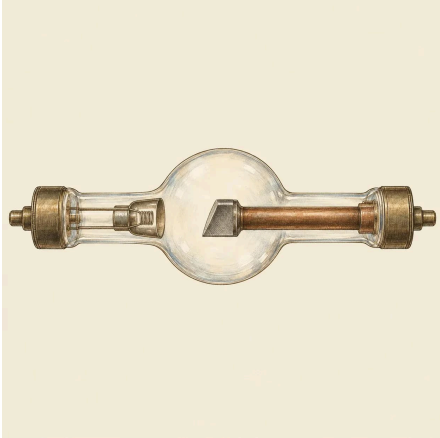
Das Gerät auf der Tafel ist von der Art, wie man es 1896 und in den folgenden Jahren benutzte. Ein Funkeninduktor macht aus der niedrigen Spannung einer Batterie Zehntausende Volt. Zwei Drähte führen diese Spannung zu einer „Fokusröhre“, einem fast luftleer gepumpten Glaskolben mit einer hohlen Aluminiumkathode an einem Ende und

in der Mitte einem kleinen, um 45 Grad geneigten Platinblech, der Antikathode. Unter der Röhre liegt eine in schwarzes Papier gewickelte Fotoplatte, darauf der abzubildende Gegenstand.

Wie es funktioniert

Die Röhre enthält noch eine Spur Gas. Die Hochspannung ionisiert es, und die positiven Ionen schlagen beim Aufprall auf die Kathode Elektronen heraus, die die Spannung dann durch die Röhre treibt. Diese Kathodenstrahlen, wie man sie damals nannte, sind unsichtbare Elektronenströme, und die Menge des Restgases bestimmt, wie sie sich verhalten. Die Hohlkathode bündelt sie auf einen kleinen Fleck der Platin-Antikathode. Werden die schnellen Elektronen im Metall abgebremst, tritt ein kleiner Teil ihrer Energie als Röntgenstrahlung aus; fast alles andere wird zu Wärme. Die Röntgenstrahlen verlassen das Ziel in viele Richtungen; weil es schräg steht, tritt ein nutzbares Bündel seitlich durch das Glas zur Fotoplatte aus, während sich der Rest ohne Abschirmung im Raum verteilt.

Die Strahlen gehen geradlinig von diesem kleinen Fleck aus, und darauf kommt es an: Je kleiner der Fleck, desto schärfer die Schatten. Wo die Strahlen leicht durchkommen, durch Luft oder Fleisch, schwärzen sie die Fotoschicht; wo Knochen oder Metall sie schlucken, bleibt die Platte heller. Als Abzug oder direkt betrachtet zeigt sie das Skelett einer Hand, eine Münze im Geldbeutel oder eine Kugel in einem Glied.



Die Coolidge-Röhre von 1913: Ein geheizter Wolframfaden liefert die Elektronen, sodass sich die Leistung genau einstellen lässt.

Die frühen Gasröhren waren launisch: Ihr Verhalten änderte sich, wenn sich das restliche Gas verbrauchte. 1913 baute William Coolidge bei General Electric eine Röhre mit Hochvakuum und einem geheizten Wolframfaden als Kathode. Der Strom und damit die Menge der Strahlung ließ sich nun über die Fadentemperatur einstellen, ihre Durchdringungskraft über die Spannung, und die Dosen wurden wiederholbar. Moderne Röhren folgen noch diesem Prinzip.

Wie man es baut

Ein Röntgengerät lässt sich zu Hause nicht sicher bauen, und in den meisten Ländern braucht sein Betrieb eine Genehmigung. Röntgenstrahlen schädigen lebende Zellen, ohne dass man es spürt; die frühen Anwender erfuhren das durch Verbrennungen, Amputationen und tödliche Krebserkrankungen. Dieser Abschnitt beschreibt, wie die ersten Geräte in Laboren entstanden, und schlägt dann zwei einfache Versuche vor, die dieselben Prinzipien zeigen.

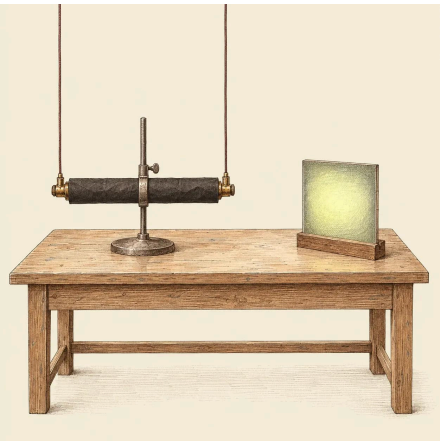
Wie man es 1896 machte. Instrumentenbauer wickelten kilometerlangen, seidenumsponnenen Feindraht auf einen Eisenkern, speisten die Spulen aus Batterien über einen schwingenden Unterbrecher und verbanden sie mit Röhren, die Glasbläser gefertigt hatten. Die Röhren wurden stundenlang mit Quecksilberpumpen evakuiert, zugeschmolzen und eingefahren, bis sie gleichmäßige Strahlen gaben. Unter der Röhre lag eine in schwarzes Papier gehüllte Kassette; eine Hand brauchte anfangs mehrere Minuten Belichtung, manchmal weit mehr, mit besseren Röhren weniger.

Schatten mit Licht sehen. In einem dunklen Raum eine helle Taschenlampe etwa 2 m vor einer Wand fest aufstellen und einen Bleistift auf halbem Weg halten. Einen Karton mit einem 5-mm-Loch vor die Lampe kleben, dann abnehmen, sodass die ganze Linse leuchtet: Die kleine Quelle gibt einen scharfen Schatten, die große verschwommene Ränder, genau wie ein kleiner Brennfleck in einer Röntgenröhre. Dann die Lampe gegen eine Fingerkuppe drücken: Die Kuppe leuchtet rot, weil rotes Licht einen Zentimeter Fleisch durchdringt.

Fluoreszenz sehen. Röntgen bemerkte die Strahlen, weil ein mit Bariumplatincyanür beschichteter Schirm aufleuchtete. Unter Aufsicht eines Erwachsenen und nach den Sicherheitshinweisen der Lampe im Dunkeln ein Glas Tonic Water mit einer schwachen UV-Taschenlampe der Art „UV-A, 365 nm“ anstrahlen: Das darin enthaltene Chinin schluckt das unsichtbare Licht und leuchtet blau. Textmarkertinte und manche Waschmittel tun dasselbe.

> **Sicherheit.** Nie alte Elektronenröhren oder Bildröhren an Hochspannung legen: Treffen darin Elektronen auf Glas oder Metall, können sie Röntgenstrahlen aussenden. Funkeninduktoren und andere Hochspannungsquellen können gefährliche oder tödliche Schläge austeilen. Ultraviolett schadet Augen und Haut: nie in die Lampe blicken, den Strahl von Augen und Haut fernhalten, eine UV-Schutzbrille tragen und eine schwache, nur für UV-A verkaufte Lampe wählen. Medizinische Röntgenaufnahmen macht geschultes Personal, mit der kleinsten Dosis, die die Untersuchung zulässt.

Geschichte und Entwicklung



Röntgens Entdeckung: eine in schwarzen Karton gehüllte Röhre und daneben ein Leuchtschirm, der trotzdem aufleuchtet.

Am Abend des 8. November 1895 untersuchte Wilhelm Conrad Röntgen, Professor für Physik in Würzburg, eine elektrische Entladung in einer mit schwarzem Karton umhüllten Röhre. Ein mit Bariumplatincyanür beschichteter Papierschirm, der in einiger Entfernung lag, leuchtete bei jedem Einschalten auf, obwohl kein Licht den Karton verlassen konnte. In den folgenden Wochen arbeitete er allein und zeigte, dass die unbekannten Strahlen Papier, Holz und Fleisch durchdrangen, von Knochen und von Metallen wie Blei aber viel stärker geschluckt wurden. Am 22. Dezember fotografierte er die Hand seiner Frau Anna Bertha mit den Knochen und ihrem Ring. Seine Mitteilung „Über eine neue Art von Strahlen“ erschien Ende des Monats.

Ab Anfang 1896 zeigte die Platte dem Chirurgen, wo eine Nadel oder eine Kugel steckte, bevor er schnitt.

Die Nachricht verbreitete sich mit außerordentlicher Geschwindigkeit, und binnen eines Jahres erschienen rund tausend Arbeiten über Röntgenstrahlen. Anfang 1896 bauten Herbert Jackson in London und andere Fokusröhren mit Hohlkathode und schrägem Metallziel, die viel schärfere Bilder lieferten. Chirurgen suchten damit Kugeln und Nadeln; Krankenhäuser richteten Röntgenräume ein. Röntgen erhielt 1901 den ersten Nobelpreis für Physik.

Die Gefahr wurde zunächst nicht erkannt. Verbrennungen und Haarausfall wurden schon 1896 gemeldet, und viele frühe Anwender trugen entstellende Verletzungen davon; Clarence Dally, Thomas Edisons Assistent, starb 1904 nach jahrelanger Strahlenbelastung. Bleischirme, Dosisgrenzen und Ausbildung folgten. 1912 zeigte Max von Laues Arbeitsgruppe durch Beugung an Kristallen, dass Röntgenstrahlen Wellen sind, und eröffnete damit die Erforschung von Kristallstrukturen. Die Computertomografie, die aus vielen Röntgenmessungen Schnittbilder errechnet, brachte Godfrey Hounsfield und Allan Cormack 1979 den Nobelpreis.

Kennzahlen

Entdeckung
8. November 1895, Universität Würzburg

Erstes Röntgenbild einer Hand
Die Hand von Anna Bertha Röntgen, 22. Dezember 1895

Veröffentlichung
„Über eine neue Art von Strahlen“, Ende Dezember 1895; rund 1000 Arbeiten über Röntgenstrahlen in einem Jahr

Glühkathodenröhre
William Coolidge, 1913

Erster Nobelpreis für Physik
Röntgen, 1901

Quellen

1. Wilhelm Conrad Röntgen: biographical · Nobel Prize Outreach https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/rontgen/biographical/
2. Röntgen discovers X-rays · HistoryofInformation.com https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=550
3. Jackson X-ray tube (ca. 1896) · ORAU Health Physics Historical Instrumentation Museum https://www.orau.org/health-physics-museum/collection/x-ray-discharge/after-roentgen-tubes/jackson-x-ray-tube.html
4. Original Coolidge x-ray tube · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co32668/original-coolidge-x-ray-tube
5. The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1979 · Nobel Prize Outreach https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1979/summary/
6. History of radiation protection · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_radiation_protection
7. John Francis Hall-Edwards: a radiology pioneer · Hektoen International https://hekint.org/2020/06/23/john-francis-hall-edwards-a-radiology-pioneer/
8. Blue plaque: Major Dr John Francis Hall-Edwards · Birmingham Civic Society https://birminghamcivicsociety.org.uk/blue-plaque-major-dr-john-francis-hall-edwards/
9. X-Ray Mass Attenuation Coefficients (NIST Standard Reference Database 126) · National Institute of Standards and Technology https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/
10. Diagnostic Radiology Physics: A Handbook for Teachers and Students, chapter 5 · International Atomic Energy Agency https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1564webNew-74666420.pdf
11. Characteristics of a first-generation x-ray system · Radiology (Radiological Society of North America) https://pubs.rsna.org/doi/10.1148/radiol.11101899
12. X-ray (the Duane–Hunt law) · Encyclopaedia Britannica https://www.britannica.com/science/X-ray

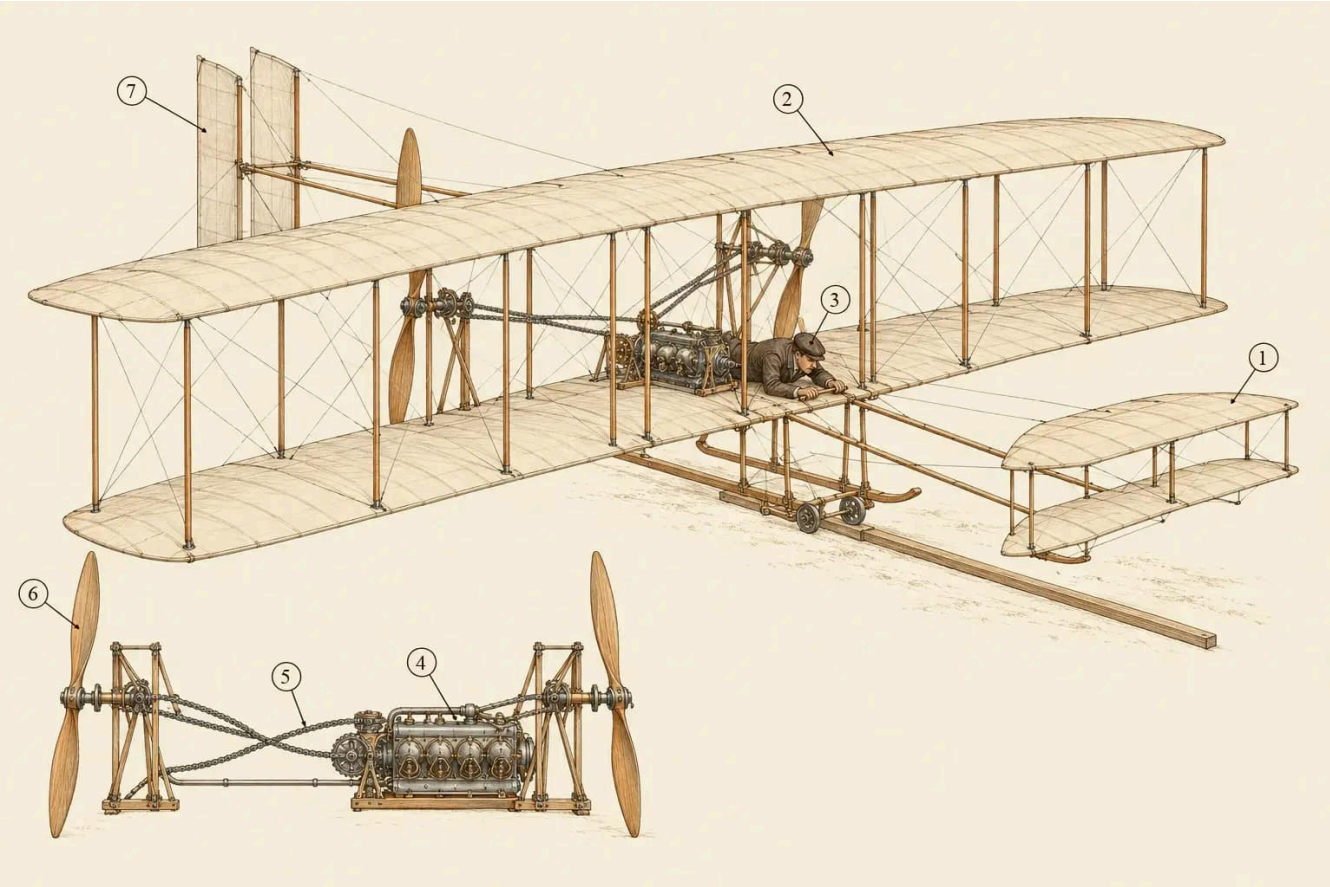
Fakten geprüft am 2026-10-12

Flugzeug

Auftrieb, Schub und Steuerung

1903 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Verbrennungsmotor (S. 318), Aluminium (S. 340)



1 Höhenruder vorn 2 Obere Tragfläche 3 Hüftschlitten des Piloten 4 Motor 5 Antriebskette 6 Propeller 7 Doppelseitenruder

Ein Flugzeug ist eine motorgetriebene Maschine, schwerer als Luft, die mit festen Tragflächen fliegt; ein Motor treibt sie voran, bewegliche Flächen steuern sie. Wilbur und Orville Wright gelangen am 17. Dezember 1903 in Kitty Hawk die ersten gesteuerten, anhaltenden Motorflüge.

Was es ist

Ein Flugzeug fliegt, weil die Luft, die um seine Tragflächen strömt, es trägt. Anders als ein Ballon ist es schwerer als die Luft, durch die es sich bewegt, und muss deshalb ständig in Bewegung bleiben, um oben zu bleiben. Drei Dinge braucht es gleichzeitig: Flügel, die Auftrieb erzeugen, einen Motor mit Propeller (oder ein Strahltriebwerk), der die Maschine gegen den Luftwiderstand vorwärtsschiebt, und eine Steuerung, mit der der Pilot sie im Gleichgewicht hält und auf Kurs bringt.

Die Maschine auf dieser Tafel ist der Wright Flyer von 1903, ein Doppeldecker aus Fichten- und Eschenholz, bespannt mit ungebleichtem Musselin. Der Pilot lag bäuchlings auf der unteren Tragfläche. Ein kleiner Benzinmotor neben ihm trieb über Ketten nach Art von Fahrradketten zwei Holzpropeller hinter den Flügeln an.

Das Höhenruder saß vorn, ein Paar Seitenruder hinten. Räder hatte die Maschine nicht; sie startete von einer Holzschiene, die auf dem Sand lag.

Wie es funktioniert

Ein Flügel ist oben gewölbt und leicht schräg gegen die anströmende Luft gestellt. Er lenkt Luft nach unten, und die Luft drückt den Flügel nach oben. Über dem Flügel sinkt der Druck, darunter steigt er; dieser Unterschied, verteilt auf die ganze Flügelfläche, ist der Auftrieb. Bei gegebenem Flügel und Anstellwinkel wächst der Auftrieb mit dem Quadrat der Fluggeschwindigkeit, deshalb braucht ein Flugzeug eine Mindestgeschwindigkeit. Ein steilerer Anstellwinkel erhöht den Auftrieb nur bis zu einer Grenze: Darüber reißt die Strömung an der Oberseite ab, und der Flügel kommt in den Strömungsabriss.

Der Motor muss den Luftwiderstand überwinden. Die Wrights betrachteten ihre Propeller als drehende Flügel und entwarfen sie nach eigenen Windkanalmessungen. Die beiden Propeller drehten gegenläufig, damit sich ihre Drehmomente aufhoben.

Die Steuerung war der wichtigste Beitrag der Wrights. Ein Flugzeug kann sich um drei Achsen drehen. Das Nicken (Nase hoch oder runter) regelte das vordere Höhenruder, das der Pilot mit einem Hebel in der linken Hand bewegte. Das Rollen (Schräglage) kam von der Flügelverwindung: Verschob der Pilot die Hüften im Schlitten, verwanden Seile die Flügelenden gegensinnig, sodass ein Flügel mehr Auftrieb bekam als der andere. Derselbe Schlitten bewegte die Seitenruder, damit die Nase in der Kurve nicht zur falschen Seite ausscherte. Später ersetzten Querruder, also Klappen an den Flügeln, die Verwindung, doch das Prinzip der drei Achsen ist geblieben.

Die Luft, die einen gewölbten Flügel umströmt, wird nach unten gelenkt, und der Flügel wird dafür nach oben gedrückt.

Wie man es baut

Die ersten Flugzeuge entstanden in kleinen Werkstätten, die Holzbearbeitung und Fahrradbau beherrschten. Das Folgende erklärt die nötigen Entscheidungen und die Arbeitsweise der Pioniere. Es ist kein Bauplan, und niemand sollte ein selbst gebautes Luftfahrzeug ohne Ausbildung, Prüfung und die im eigenen Land vorgeschriebenen Zulassungen fliegen.

Erst testen, dann bauen. Die Wrights flogen 1900, 1901 und 1902 mit Gleitern und bauten 1901 einen kleinen Windkanal, um Auftrieb und Widerstand von Modellflügeln zu messen. Ihre eigenen Tabellen ersetzten ältere veröffentlichte Werte, die sie als falsch erkannt hatten.

Ein Gerüst aus leichtem, geradfaserigem Holz. Holme und Streben waren aus Fichte, die gebogenen Rippen aus Esche. Das Ganze war ein verspanntes Kastengerüst: Streben hielten die beiden Flügel auseinander, und dazwischen kreuzten sich Stahldrähte. Die mittleren Felder waren starr verspannt, während sich die äußeren Flügelteile für die Verwindung leicht verdrehen ließen.

Die Flügel bespannen. Der Musselin wurde schräg zum Fadenlauf zugeschnitten und über die Rippen gezogen, sodass die Fäden diagonal liefen; das machte die Bespannung fester.

Einen leichten Motor finden. Die Wrights fanden keinen Hersteller, der ihnen einen ausreichend leichten und starken Motor liefern wollte. Ihr Mechaniker Charlie Taylor baute deshalb in etwa sechs Wochen einen wassergekühlten Vierzylinder, dessen Kurbelgehäuse aus Aluminium gegossen war, um Gewicht zu sparen.

Ausbalancieren. In Längsrichtung muss der Schwerpunkt an der richtigen Stelle im Verhältnis zum Auftrieb liegen, sonst bäumt sich die Maschine auf oder geht in den Sturzflug. Auch seitlich müssen sich die Gewichte ausgleichen: Der Motor saß neben dem Piloten, deshalb verlängerten die Wrights den rechten Flügel ein wenig.

> **Sicherheit.** Ein drehender Propeller ist unsichtbar und kann töten: Stellen Sie sich nie in seinen Drehkreis und werfen Sie nie ohne Ausbildung einen Motor von Hand an. Benzin und seine Dämpfe entzünden sich leicht. Holz- und Stoffkonstruktionen versagen ohne Vorwarnung, wenn eine Verbindung oder ein Draht beschädigt ist. Fliegen erfordert Ausbildung, ein intaktes und geprüftes Luftfahrzeug und geeignetes Wetter.

Geschichte und Entwicklung

Lilienthal steuerte seine Gleiter, indem er seinen Körper unter den Flügeln verlagerte.

Der moderne Ansatz zum Fliegen begann mit dem Engländer George Cayley, der um 1799 die drei Probleme Auftrieb, Antrieb und Steuerung voneinander trennte und später Gleiter fliegen ließ. In Deutschland unternahm Otto Lilienthal in den 1890er-Jahren rund zweitausend Gleitflüge von Hügeln und veröffentlichte seine Messungen. Er starb 1896 nach einem Absturz.

Wilbur und Orville Wright betrieben ein Fahrradgeschäft in Dayton, Ohio. Sie studierten die bisherige Flugforschung, auch die Lilienthals, und erprobten ihre Ideen dann mit Drachen und Gleitern in Kitty Hawk, North Carolina, das sie wegen seiner gleichmäßigen Winde und des weichen Sandes ausgewählt hatten.

Am 17. Dezember 1903 flog Orville den Flyer 12 Sekunden lang über etwa 37 Meter (120 Fuß). Die Brüder machten an diesem Tag drei weitere Flüge; der letzte, mit Wilbur am Steuer, dauerte 59 Sekunden und reichte etwa 260 Meter weit. Danach warf eine Bö die Maschine um, und sie flog nie wieder. Seit 1948 befindet sie sich in der Smithsonian Institution in Washington.

In ihrem Windkanal von 1901 maßen die Wrights Auftrieb und Widerstand vieler kleiner Modellflügel.

Andere folgten bald. Alberto Santos-Dumont flog 1906 in Paris, und Louis Blériot überquerte 1909 den Ärmelkanal. Der Erste Weltkrieg machte den Flugzeugbau zur Industrie. In den 1930er-Jahren verdrängten Ganzmetall-Eindecker die hölzernen Doppeldecker, und am Ende des Jahrzehnts kamen Strahltriebwerke auf. Heute tragen Verkehrsflugzeuge mehrere hundert Menschen über die Ozeane, und ihre Steuerung wirkt noch immer um dieselben drei Achsen, um die die Wrights als Erste eine brauchbare Steuerung erreichten.

Kennzahlen

Erster Flug
17. Dezember 1903, 12 Sekunden, etwa 37 m

Spannweite des Flyers von 1903
12,3 m

Masse
274 kg leer, 341 kg mit Pilot

Längster Flug des Tages
59 Sekunden, etwa 260 m (Wilbur Wright)

Motor
4 Zylinder, etwa 12 PS, Kurbelgehäuse aus Aluminium

Quellen

1. 1903 Wright Flyer · Smithsonian National Air and Space Museum https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm_A19610048000
2. The Wright Flyer · US National Park Service https://www.nps.gov/articles/wrightflyer.htm
3. 1903 Engine · Wright Brothers Aeroplane Company https://wright-brothers.org/Information_Desk/Just_the_Facts/Engines_&_Props/1903_Engine.htm
4. Otto Lilienthal · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Otto_Lilienthal
5. 1903 Wright Flyer Specifications · Wright Brothers Aeroplane Company https://wright-brothers.org/Information_Desk/Help_with_Homework/Wright_Plans/Wright_Plans_images/1903_Wright_Flyer_Specifications_Isometric_11x17.pdf
6. 1903 Wright Propellers · Wright Brothers Aeroplane Company https://wright-brothers.org/Information_Desk/Just_the_Facts/Engines_&_Props/1903_Props.htm
7. Wright 1903 Aircraft Engine Parts · NASA Glenn Research Center https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/engparts.html

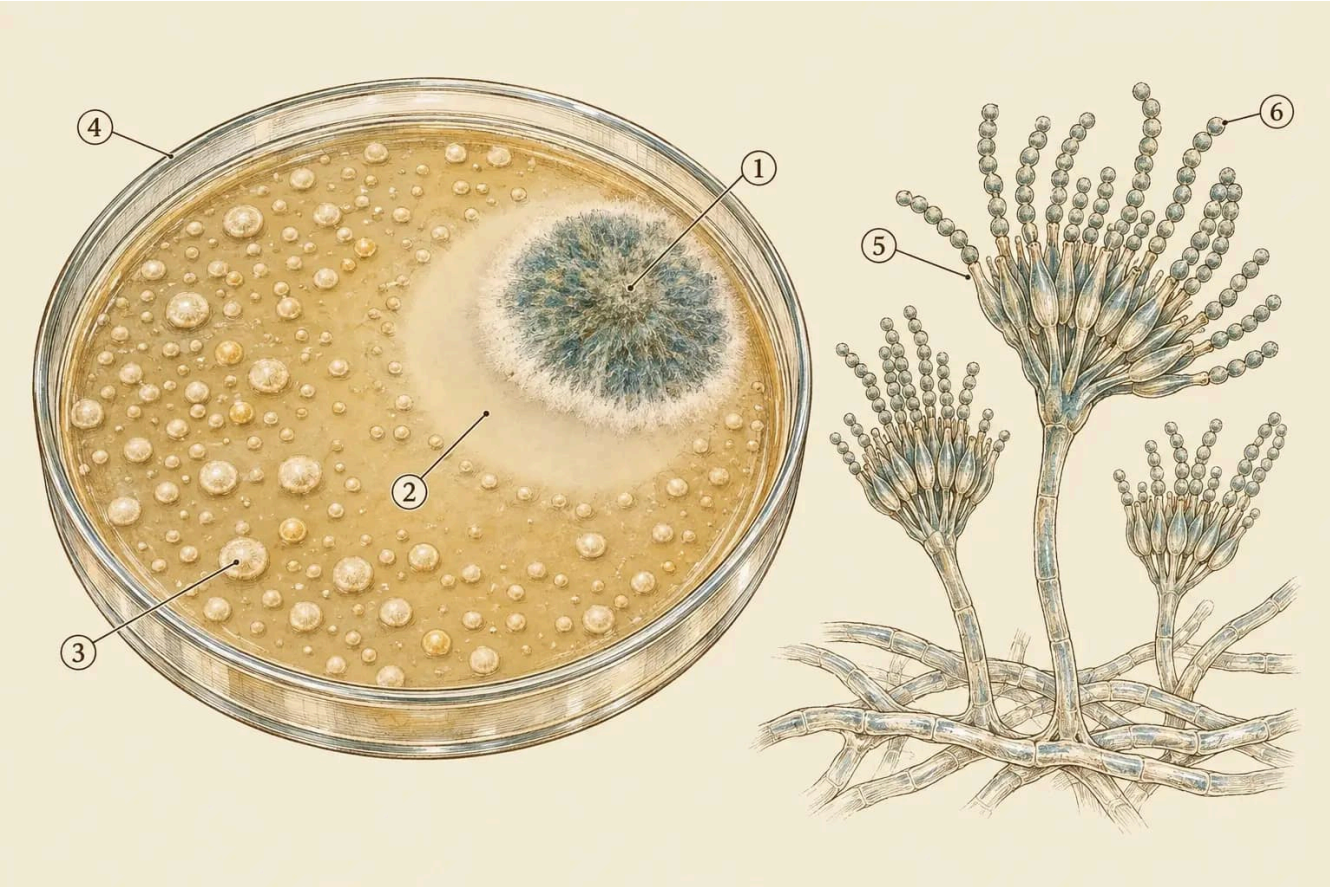
Fakten geprüft am 2026-10-11

Penicillin

Ein Antibiotikum aus Schimmelpilzen

1928 · Elektrisches Zeitalter · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Glas (S. 134), Impfung (S. 238), Hygiene und Antisepsis (S. 302)



1 Penicillium-Kolonie 2 Klarer Hof um den Schimmel 3 Bakterienkolonien 4 Petrischale aus Glas 5 Pinselförmiger Sporenträger 6 Sporenkette

Penicillin ist ein Stoff, den Schimmelpilze der Gattung Penicillium bilden; es tötet viele Bakterienarten, indem es sie am Aufbau ihrer Zellwand hindert. Alexander Fleming bemerkte es 1928, und ein Team in Oxford machte daraus im Zweiten Weltkrieg das erste aus Schimmel gewonnene Antibiotikum, das breit eingesetzt wurde.

Was es ist

Penicillin ist ein Antibiotikum, also ein Arzneimittel, das Bakterien abtötet oder ihr Wachstum hemmt. Anders als die Sulfonamide der 1930er-Jahre, die Chemiker aus Farbstoffen entwickelten, wird es von einem Lebewesen gebildet. Bestimmte Stämme von *Penicillium*, einer Gattung, zu der auch die blaugrünen Schimmel auf altem Brot und Obst gehören, produzieren es. Gereinigt wurde Penicillin zum ersten Antibiotikum aus einem Schimmelpilz, das Ärzte in großem Umfang einsetzen konnten, und es veränderte die Aussichten bei Infektionen, die oft tödlich verlaufen waren, etwa Blutvergiftung, Lungenentzündung und infizierte Wunden. Schimmel auf Lebensmitteln dagegen ist kein Heilmittel und kann selbst schaden.

Links zeigt die Tafel Flemings berühmte Beobachtung: eine Glasschale mit Bakterienkolonien, auf die zufällig eine Schimmelspore gefallen und zu einer Kolonie herangewachsen ist, umgeben von einem klaren Ring, in dem die Bakterien abgestorben sind. Rechts ist der Schimmelpilz selbst unter dem Mikroskop zu sehen. Seine Sporen wachsen in Ketten an kleinen pinselartigen Köpfen, die der Gattung ihren Namen gaben, vom lateinischen *penicillus*, kleiner Pinsel.

Wie es funktioniert

Die meisten Bakterien sind Einzeller, umhüllt von einer festen Wand, die sie gegen den Druck des Wassers in ihrem Inneren in Form hält. Diese Wand ist ein Geflecht aus Zuckerketten, die durch kurze Peptidbrücken verbunden sind. Während die Zelle wächst und sich teilt, schneidet sie dieses Geflecht ständig auf und baut es neu.

Penicillin blockiert die bakteriellen Enzyme, die diese Brücken knüpfen. Die Zelle wächst weiter, doch ihre neue Wand ist schwach. Wasser drängt hinein, und die Zelle platzt. Menschliche und tierische Zellen haben keine solche Wand; deshalb kann Penicillin Bakterien abtöten und die Zellen des Patienten weitgehend verschonen. Im Kern des Moleküls sitzt ein gespannter Ring aus vier Atomen, der Beta-Lactam-Ring, der mit diesen Enzymen reagiert und sie außer Gefecht setzt.

Am besten wirkt Penicillin gegen Bakterien mit dicker, frei liegender Wand, etwa Streptokokken und Pneumokokken. Der Syphiliserreger hat eine dünne Wand zwischen zwei Membranen, ist aber ebenfalls sehr empfindlich gegen Penicillin. Gegen Viren, die gar keine Zellwand haben, ist Penicillin wirkungslos.

Bakterien können resistent werden. Manche bilden ein Enzym, die Penicillinase, das den Beta-Lactam-Ring spaltet, bevor er wirken kann. Jeder Einsatz eines Antibiotikums begünstigt die Bakterien, die ihn überleben; deshalb breitet sich Resistenz dort aus, wo Antibiotika leichtfertig verwendet werden. Fleming warnte schon 1945 in seinem Nobelvortrag davor. Manche Menschen sind zudem allergisch gegen Penicillin, gelegentlich schwer. Antibiotika sind Arzneimittel, die nur auf ärztliche Verschreibung eingenommen werden dürfen.

Wie es hergestellt wird

Wie man den Schimmel züchtete, den Wirkstoff aus der Brühe gewann und seine Menge bestimmte, änderte sich zwischen 1940 und 1945 mehrmals.

Oberflächenkultur in Oxford. Floreys Team züchtete Flemings Stamm von *Penicillium notatum* als Pilzdecke, die auf einer flachen Schicht Nährbrühe schwamm. Norman Heatley nahm zunächst alles, was einen breiten, flachen Boden hatte, darunter Bettpfannen, Keksdosen und Pastetenformen, und entwarf dann ein rechteckiges Keramikgefäß, das sich zum Bebrüten liegend stapeln ließ. Eine Töpferei in Staffordshire, James Macintyre & Co., stellte mehrere Hundert davon her, und die ersten wurden zu Weihnachten 1940 beimpft. Ein kleines Team junger Frauen, die man die „Penicillin Girls“ nannte, säte die Sporen aus, zapfte die Brühe ab, sobald der wachsende Schimmel Penicillin an sie abgegeben hatte, und hielt die Gefäße rund um die Uhr in Betrieb.

Norman Heatley entwarf solche Keramikgefäße, um den Schimmel in Oxford in großer Menge zu züchten.

Extraktion. Die Brühe enthielt nur eine Spur Penicillin, und der Wirkstoff zerfiel in Wärme oder saurer Lösung binnen Stunden. Heatley machte sich zunutze, dass Penicillin eine Säure ist. Angesäuert und kalt gehalten, geht es aus der Brühe in ein Lösungsmittel über, das sich nicht mit Wasser mischt, zuerst Ether, später das weniger entzündliche Amylacetat.

Schüttelt man es mit leicht alkalisch gemachtem Wasser, wandert es als Salz ins Wasser zurück, in einem weit kleineren Volumen und von einem großen Teil der Verunreinigungen befreit. Aus Glasröhren, Flaschen und Pumpen baute Heatley eine Apparatur, die das fortlaufend erledigte. Die konzentrierte Lösung wurde anschließend zu einem braunen Pulver gefriergetrocknet, das sich monatelang hielt, auch wenn frühe Chargen großenteils aus Verunreinigungen bestanden.

Heatleys Zylinderplattentest: Je wirksamer die Probe in einem Zylinder, desto breiter der klare Ring um ihn.

Messung. Solange seine Struktur unbekannt war, ließ sich Penicillin nur an seiner Wirkung auf Bakterien messen. Bei Heatleys Zylinderplattentest stehen kleine offene Zylinder auf einer Schale mit Agar, der mit Staphylokokken beimpft ist, und jeder Zylinder wird mit einer Probe gefüllt. Das Penicillin breitet sich im Agar aus, und nach der Bebrütung ergibt die Breite des klaren Rings um jeden Zylinder, verglichen mit dem Ring einer Standardprobe, die Wirkstärke. Das Oxforder Team legte auf diese Weise eine eigene Einheit fest und schickte Proben an andere Labore. 1944 und 1945 einigten sich britische und amerikanische Wissenschaftler auf eine internationale Einheit, die 0,6 Mikrogramm reinem Natrium-Benzylpenicillin entspricht und der Oxforder Einheit nahekommt, und stellten Standardproben her.

Tiefentanks in den Vereinigten Staaten. Am Northern Regional Research Laboratory in Peoria steigerte Andrew Moyer zusammen mit Heatley die Ausbeute bis Ende 1941 etwa auf das Zehnfache, indem er der Brühe Maisquellwasser zusetzte, ein Nebenprodukt der Stärkegewinnung aus Mais. Das Labor prüfte Schimmelpilze, die aus aller Welt eingeschickt wurden, und am besten erwies sich ein Stamm von *Penicillium chrysogenum* (heute als *P. rubens* eingeordnet) von einer verschimmelten Cantaloupe-Melone, die in Peoria gekauft worden war. Daraus gezüchtete Stämme, darunter mit Röntgen- und UV-Strahlung erzeugte Mutanten, lieferten noch mehr. Der größere Schritt war jedoch, den Schimmel in der ganzen Flüssigkeit statt an ihrer Oberfläche wachsen zu lassen, in geschlossenen Stahltanks, die gerührt und mit steriler Luft versorgt wurden. Pfizer stellte auf diese Weise bereits Gluconsäure her und eröffnete am 1. März 1944 (nach einer Darstellung 1943) in Brooklyn die erste große Penicillinanlage, eine umgebaute Eisfabrik mit vierzehn Tanks zu je 7.500 US-Gallonen (etwa 28.000 Litern). Ein einziger eingeschleppter Keim konnte einen ganzen Tank verderben, deshalb wurden Brühe und Tanks sterilisiert, bevor der Schimmel hineinkam, und Luft und Leitungen hielten während des Wachstums fremde Keime fern.

Die Fermentation in großen Tanks machte Penicillin in den Vereinigten Staaten zu einem Industrieprodukt.

Halbsynthetische Penicilline. Die Fermentation liefert vor allem Benzylpenicillin, auch Penicillin G genannt, besonders wenn man der Brühe Phenylessigsäure zusetzt, die der Schimmel in das Molekül einbaut. 1957 isolierten Chemiker der Beecham Research Laboratories in Surrey den bloßen Kern des Moleküls, die 6-Aminopenicillansäure, und veröffentlichten die Arbeit 1959. Indem sie an diesen Kern neue Seitenketten anfügten, schufen Chemiker Penicilline, die die Magensäure überstehen, dem bakteriellen Enzym Penicillinase widerstehen oder gegen mehr Bakterienarten wirken, etwa Cloxacillin und Amoxicillin. Heute wird der Kern meist mit einem Enzym aus fermentiertem Penicillin abgespalten, und die Werke prüfen jede Charge vor der Freigabe auf Identität, Reinheit und Wirksamkeit, Injektionspräparate zusätzlich auf Sterilität.

> **Sicherheit.** Dieser Abschnitt beschreibt, wie Labore und Fabriken das Arzneimittel herstellten. Zu Hause lässt sich Penicillin nicht gefahrlos herstellen: Schimmel auf Brot oder Obst enthält wenig oder gar keines und kann zu Arten gehören, die Giftstoffe bilden, und ein unreines Präparat kann schwere Infektionen oder einen Schock auslösen. Penicillin kann außerdem schwere allergische Reaktionen hervorrufen und wird nur auf ärztliche Verschreibung angewendet.

Geschichte und Entwicklung

Seit Jahrhunderten war aufgefallen, dass manche Schimmelpilze bei Wunden zu helfen schienen, und in den 1890er-Jahren berichteten mehrere Forscher, dass Schimmel Bakterien hemmen kann. Keine dieser Beobachtungen führte zu einer Behandlung.

Alexander Fleming, Bakteriologe am St Mary’s Hospital in London, fuhr im Sommer 1928 in die Ferien. Als er Anfang September zurückkam, fand er eine Schale mit Staphylokokken, die von einem Schimmel verunreinigt war; die Kolonien in seiner Nähe waren verblasst. Er züchtete den Schimmel, zeigte, dass seine Nährbrühe viele Bakterienarten abtötete, nannte den Wirkstoff Penicillin und veröffentlichte seine Ergebnisse 1929. Doch Penicillin war instabil und schwer zu gewinnen, und Fleming gelang es nicht, genug davon in reiner Form herzustellen, um Kranke zu behandeln.

Zehn Jahre später nahmen sich in Oxford Howard Florey und Ernst Chain des Problems an. Norman Heatley fand heraus, wie man Penicillin gewinnt und anreichert, und das Team züchtete den Schimmel in Hunderten von Gefäßen. Am 25. Mai 1940 infizierten sie acht Mäuse mit Streptokokken und behandelten vier davon. Am nächsten Morgen waren die vier unbehandelten Mäuse tot, die behandelten lebten noch. Im Februar 1941 wurde der Polizist Albert Alexander einer der ersten Patienten. Zunächst ging es ihm besser, doch der Vorrat ging zu Ende, und er starb.

Das Großbritannien der Kriegszeit konnte Penicillin nicht in großem Maßstab herstellen; deshalb reisten Florey und Heatley 1941 in die Vereinigten Staaten, wo ein staatliches Labor in Peoria, Illinois, und mehrere Arzneimittelfirmen die Arbeit aufnahmen. Im März 1942 reichte der amerikanische Vorrat für einen einzigen Patienten. 1944 produzierten die Fabriken genug für die alliierten Armeen, und ab dem 15. März 1945 gelangte Penicillin über den normalen Handel in die amerikanischen Apotheken.

Fleming, Florey und Chain teilten sich 1945 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Im selben Jahr klärte Dorothy Hodgkin die Struktur des Penicillins mit Röntgenkristallographie auf. Die Suche nach weiteren Antibiotika hatte inzwischen zum Streptomycin geführt, das 1943 entdeckt wurde; Tetracycline und viele andere folgten, und Chemiker schufen später neue Penicilline, indem sie das Molekül abwandelten.

Kennzahlen

Flemings Beobachtung
September 1928, St Mary's Hospital, London

Mäuseversuch in Oxford
25. Mai 1940

Erste große Tiefentankanlage
Pfizer, Brooklyn, 1. März 1944, vierzehn Tanks zu je 7.500 US-Gallonen (rund 28.000 Liter)

Erste Veröffentlichung
Juni 1929, British Journal of Experimental Pathology

Nobelpreis für Physiologie oder Medizin
1945, Fleming, Florey und Chain

Quellen

1. Alexander Fleming · Science History Institute https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/alexander-fleming/
2. Howard Walter Florey · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/people/cp38732/howard-walter-florey
3. The real story behind the world's first antibiotic · PBS NewsHour https://www.pbs.org/newshour/health/the-real-story-behind-the-worlds-first-antibiotic
4. History of penicillin · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_penicillin
5. “It looks like a miracle”: penicillin production in Oxford · History of Science Museum, University of Oxford https://www.mhs.ox.ac.uk/backfromthedead/exhibition/production/
6. Pfizer's penicillin pioneers: Jasper Kane and John McKeen · The Chemical Engineer (IChemE) https://www.thechemicalengineer.com/features/cewctw-pfizers-penicillin-pioneers-jasper-kane-and-john-mckeen/
7. How a moldy cantaloupe took Fleming's penicillin from discovery to mass production · The Scientist https://the-scientist.com/how-a-moldy-cantaloupe-took-fleming-s-penicillin-from-discovery-to-mass-production-72304
8. Standardizing the 'magic bullet' · Inventing Europe https://www.inventingeurope.eu/story/standardizing-the-magic-bullet
9. The Discovery of Penicillin · Sir William Dunn School of Pathology, University of Oxford https://www.path.ox.ac.uk/centenary/the-discovery-of-penicillin/
10. Biochromatograms showing the first ever acylation of 6-APA · Science Museum Group https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8997116/biochromatograms-showing-the-first-ever-acylation-of-6-apa
11. Penicillin culture vessel, 1940–41 (National Museum of American History, M-06669) · Cooper Hewitt, Smithsonian Design Museum https://collection.cooperhewitt.org/objects/35457197/
12. Further observations on penicillin (The Lancet, 16 August 1941) · University of Oxford, NDORMS https://www.ndorms.ox.ac.uk/files/news/19410816_florey_furtherobservationsonpenicillin_lancet.pdf
13. Alexander Fleming, On the antibacterial action of cultures of a penicillium (1929), reprinted 2001 · Bulletin of the World Health Organization https://scielosp.org/article/bwho/2001.v79n8/780-790
14. Making penicillin in milk bottles: a tale of wartime antibiotic manufacture · The Pharmaceutical Journal https://pharmaceutical-journal.com/article/opinion/making-penicillin-in-milk-bottles-a-tale-of-wartime-antibiotic-manufacture

Fakten geprüft am 2026-10-12

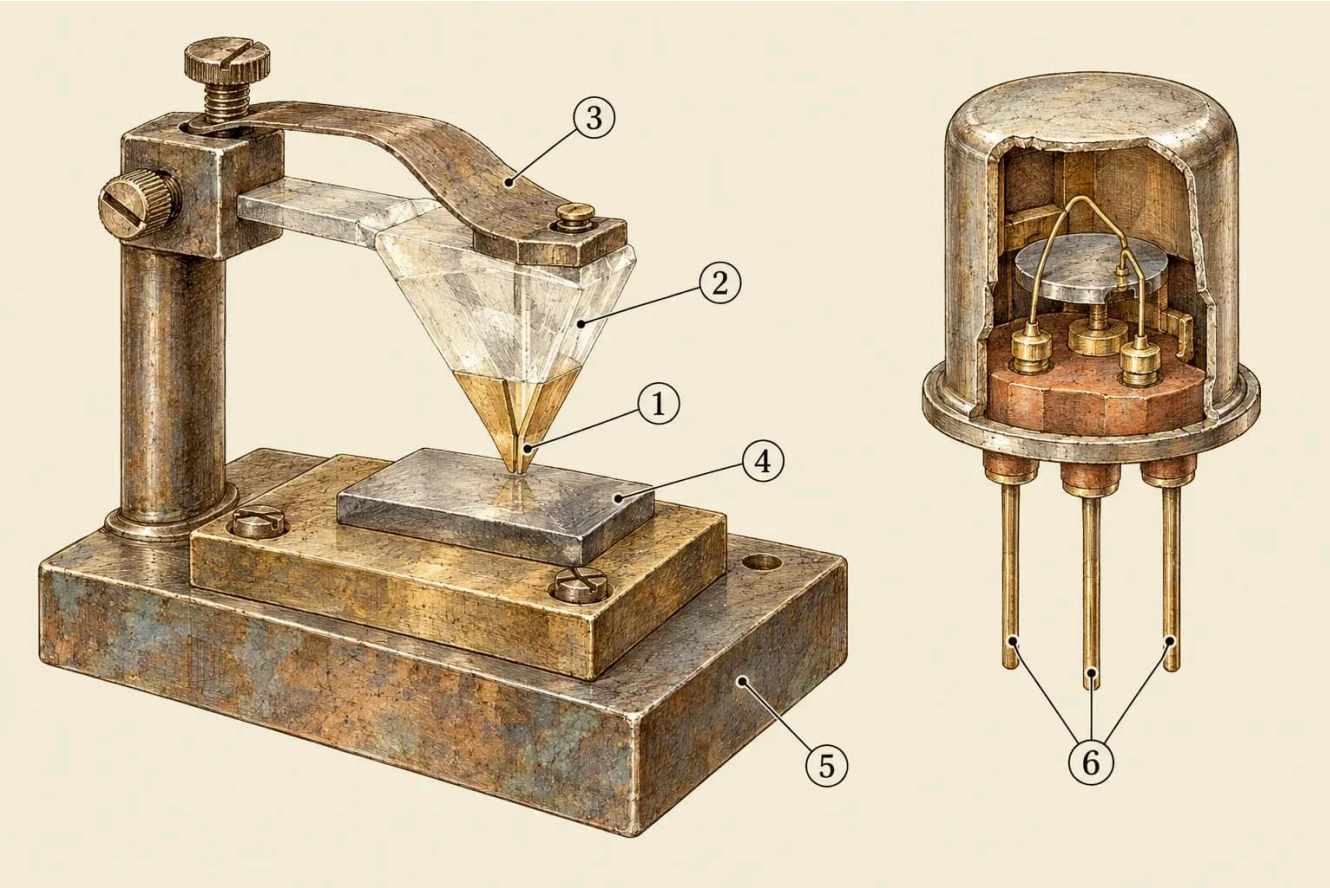
Transistor

Ein Schalter ohne bewegliche Teile

1947 · Moderne · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Radio (S. 349)

Führt zu: Computer (S. 370), Solarzelle (S. 375)



1 Kontakte aus Goldfolie 2 Kunststoffkeil 3 Feder 4 Germaniumplättchen 5 Metallsockel 6 Anschlussdrähte eines Flächentransistors

Ein Transistor ist ein kleines Stück Halbleiter, in dem ein schwacher Strom oder eine schwache Spannung einen viel stärkeren Strom steuert; so kann er ein Signal verstärken oder als Schalter dienen. John Bardeen und Walter Brattain bauten den ersten im Dezember 1947 in den Bell Labs, und heutige Chips enthalten Milliarden davon.

Was es ist

Ein Transistor ist ein Ventil für elektrischen Strom ohne bewegliche Teile. Ein kleiner Strom oder eine kleine Spannung an einem Anschluss steuert einen viel größeren Strom zwischen den beiden anderen. Mit einem passenden Ruhestrom oder einer passenden Vorspannung betrieben, gibt er ein schwaches Signal vergrößert wieder: Das ist Verstärkung, seine Aufgabe in einem Radio oder einem Hörgerät. Zwischen voll leitend und gesperrt umgeschaltet, arbeitet er als Schalter, und ein Computer besteht aus Milliarden solcher Schalter.

Links zeigt die Tafel den ersten Transistor, das Spitzenbauteil, das Bardeen und Brattain 1947 bauten: ein Germaniumplättchen auf einem Metallsockel, auf das eine Feder einen Kunststoffkeil drückt. Über die Spitze des Keils läuft ein Streifen Goldfolie, der mit einer Rasierklinge geschlitzt ist, sodass zwei Goldkontakte das Germanium in einem Abstand von Bruchteilen eines Millimeters berühren. Rechts ist ein Flächentransistor der 1950er-Jahre in seinem kleinen Metallgehäuse mit drei Anschlussdrähten zu sehen.

Wie es funktioniert

Transistoren bestehen aus Halbleitern wie Germanium oder Silizium. Ein reiner Kristall dieser Elemente leitet schlecht. Eine winzige Spur eines anderen Elements, die man beim Dotieren zusetzt, erhöht seine Leitfähigkeit stark. Phosphor oder Arsen liefern dem Kristall überschüssige Elektronen, so entsteht n-leitendes Material. Bor oder Gallium hinterlassen Lücken, sogenannte Löcher, die sich wie positive Ladungen verhalten: Das ergibt p-leitendes Material.

Wo p- und n-leitendes Material aufeinandertreffen, bildet sich ein Übergang, der Strom nur in einer Richtung leicht durchlässt. Ein Flächentransistor schichtet drei Lagen, n-p-n oder p-n-p, die Emitter, Basis und Kollektor heißen. Die Basis ist sehr dünn. Bei einem npn-Transistor lässt ein kleiner Strom in die Basis einen viel größeren Strom vom Kollektor zum Emitter fließen, oft hundertmal so stark oder mehr. Bei einem pnp-Transistor sind alle Richtungen umgekehrt.

Vor 1950 erledigte die Elektronenröhre dieselbe Aufgabe, brauchte aber einen heißen Glühfaden, einen Glaskolben und weit mehr Energie.

Die meisten heute hergestellten Transistoren sind Feldeffekttransistoren (MOSFETs). Dort erzeugt oder schließt eine Spannung an einem Gate, das durch eine dünne Oxidschicht vom Silizium isoliert ist, einen schmalen leitenden Kanal darunter. Solange das Gate seinen Zustand hält, fließt fast kein Strom hinein. In den CMOS-Schaltungen der Chips verbraucht ein Transistor vor allem beim Umschalten Energie; das ist ein Grund, warum Milliarden von ihnen auf einem einzigen Chip Platz finden.

Wie man es baut

Moderne Transistoren entstehen in Fabriken, die hochreines Silizium, Reinräume und Maschinen im Wert von Milliarden brauchen. Das Folgende ist ein historischer Überblick, wie die ersten hergestellt wurden, in der Reihenfolge, die eine Wiederaufbau-Werkstatt einhalten würde: zuerst ein Spitzendetektor, dann ein Spitzentransistor, erst später Übergänge. Es ist keine Anleitung; wer einen Transistor arbeiten sehen will, sollte einen gekauften in einer Schaltung mit niedriger Spannung verwenden.

Einen geeigneten Kristall beschaffen. Spitzenbauteile brauchen ein Stück n-leitendes Germanium von guter Reinheit. In den 1940er-Jahren stammte es aus der Kriegsforschung an Radardetektoren. Bleiglanz (Bleisulfid), der Kristall der frühen Detektorempfänger mit ihrer „Katzenschnurrhaar“-Spitze, ergibt nur eine grobe Detektordiode.

Die Oberfläche vorbereiten. Sie wird plan geschliffen und dann sauber geätzt, denn das Verhalten der Kontakte hängt davon ab. Dieser Schritt arbeitet mit starken Säuren und gehört in ein richtig ausgestattetes Labor.

Die Kontakte herstellen. Zwei feine Metallspitzen oder eine über einem Kunststoffkeil geschlitzte Goldfolie wie 1947 müssen den Kristall sehr dicht nebeneinander berühren. Eine Feder hält sie unter leichtem, gleichmäßigem Druck. Die Unterseite des Kristalls wird auf einen Metallblock gelötet, der den dritten Anschluss bildet.

Formieren und prüfen. Die frühen Hersteller „formierten“ den Kollektorkontakt mit kurzen Stromstößen, was die Verstärkung verbesserte, und maßen dann jeden Transistor. Viele versagten, und nur die Exemplare, die die Prüfung bestanden, wurden behalten.

Flächentransistoren herstellen. Gezogene Flächentransistoren brauchen Kristalle, die mit kontrollierter Dotierung aus einer Schmelze gezogen werden, also einen Ofen mit feiner Temperaturregelung und Schutzgas. Legierungstransistoren, ab Anfang der 1950er-Jahre gefertigt, entstanden anders: Man schmolz kleine Indiumkügelchen auf beide Seiten eines dünnen Germaniumplättchens. Beides sind industrielle Verfahren.

> **Sicherheit.** Ätzsäuren verätzen Haut und Augen; Flusssäure, mit der Silizium geätzt wird, kann den Körper schon nach einem kleinen Spritzer über die Haut vergiften, mit verzögerten Beschwerden, und gehört ausschließlich in die Hände von Fachleuten. Germanium- und Siliziumstaub darf nicht eingeatmet werden. Lötkolben verursachen Verbrennungen, und altes Lötzinn enthält Blei. Testen Sie Schaltungen mit Kleinspannung; Netzspannung kann tödlich sein.

Geschichte und Entwicklung

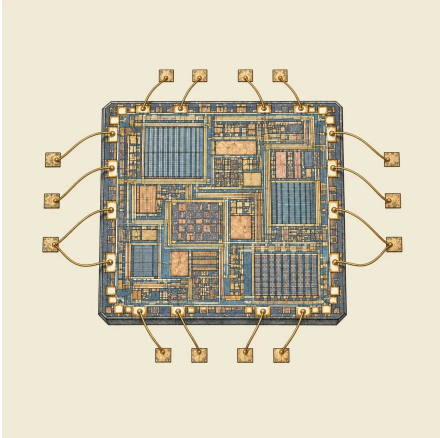
Das Regency TR-1 von 1954 kam mit nur vier Transistoren aus.

Seit den 1920er-Jahren suchten Ingenieure einen festen Ersatz für die Elektronenröhre. Julius Lilienfeld meldete 1925 ein Patent für ein Feldeffektbauteil an, doch ein funktionierender Prototyp ist nicht belegt. Nach dem Zweiten Weltkrieg gründeten die Bell Labs eine Festkörperphysik-Gruppe unter William Shockley, die einen Verstärker für das Telefonnetz finden sollte. Shockleys Feldeffektentwurf funktionierte nicht. John Bardeen führte das auf Elektronen zurück, die an der Kristalloberfläche festsaßen, und er und Walter Brattain versuchten daraufhin, den Strom über Spitzenkontakte zu leiten.

Am 16. Dezember 1947 verstärkte ihr Aufbau ein Signal. Eine Woche später führten sie ihn der Leitung der Bell Labs vor. Das Unternehmen stellte die Erfindung am 30. Juni 1948 in New York vor, und der Ingenieur John Pierce prägte den Namen „Transistor“. Im selben Jahr bauten Herbert Mataré und Heinrich Welker in Paris unabhängig davon ein ähnliches Bauteil, das sie „Transistron“ nannten.

Spitzentransistoren waren empfindlich. Im Januar 1948 ersann Shockley den Flächentransistor, den die Bell Labs ab 1951 herstellen konnten. Das Taschenradio Regency TR-1 von 1954 nutzte vier Germaniumtransistoren von Texas Instruments und verkaufte sich mehr als 100.000-mal. Danach verdrängte Silizium, das Wärme besser verträgt, das Germanium.

1958 baute Jack Kilby bei Texas Instruments den ersten integrierten Schaltkreis auf einem kleinen Germaniumstäbchen. Mohamed Atalla und Dawon Kahng führten 1960 in den Bell Labs den MOS-Transistor vor. Bardeen, Brattain und Shockley teilten sich 1956 den Nobelpreis für Physik. Seitdem sind Transistoren immer kleiner geworden, und der MOS-Transistor ist heute das in größter Zahl hergestellte Erzeugnis überhaupt.



Ein integrierter Schaltkreis vereint viele Transistoren und ihre Verbindungen auf einem einzigen Stück Silizium.

Kennzahlen

Erstes funktionierendes Bauteil
16. Dezember 1947, Bell Labs, New Jersey

Öffentliche Vorstellung
30. Juni 1948, New York

Bisher hergestellte Transistoren
Etwa 13×10^{21}, davon 99,9 % MOS (Schätzung des Analysten Jim Handy)

Patentanmeldung von Bardeen und Brattain
17. Juni 1948 (US 2,524,035)

Nobelpreis für Physik
1956, Bardeen, Brattain und Shockley

Quellen

1. 1947: Invention of the point-contact transistor · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/siliconengine/invention-of-the-point-contact-transistor/
2. 1948: Conception of the junction transistor · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/siliconengine/conception-of-the-junction-transistor/
3. Milestones: First semiconductor integrated circuit (IC), 1958 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:First_Semiconductor_Integrated_Circuit_(IC),_1958
4. 13 sextillion and counting: the long and winding road to the most frequently manufactured human artifact in history · Computer History Museum https://computerhistory.org/blog/13-sextillion-counting-the-long-winding-road-to-the-most-frequently-manufactured-human-artifact-in-history/
5. Regency TR-1 · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Regency_TR-1
6. Transistor · Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor
7. The Transistor, A Semi-Conductor Triode (Bardeen and Brattain, Physical Review 74, 230) · American Physical Society https://doi.org/10.1103/PhysRev.74.230
8. Some Circuit Aspects of the Transistor (Ryder and Kircher, Bell System Technical Journal 28, 367) · Bell Telephone Laboratories https://archive.org/details/bstj28-3-367
9. The Surface State Job · Computer History Museum https://computerhistory.org/blog/the-surface-state-job/

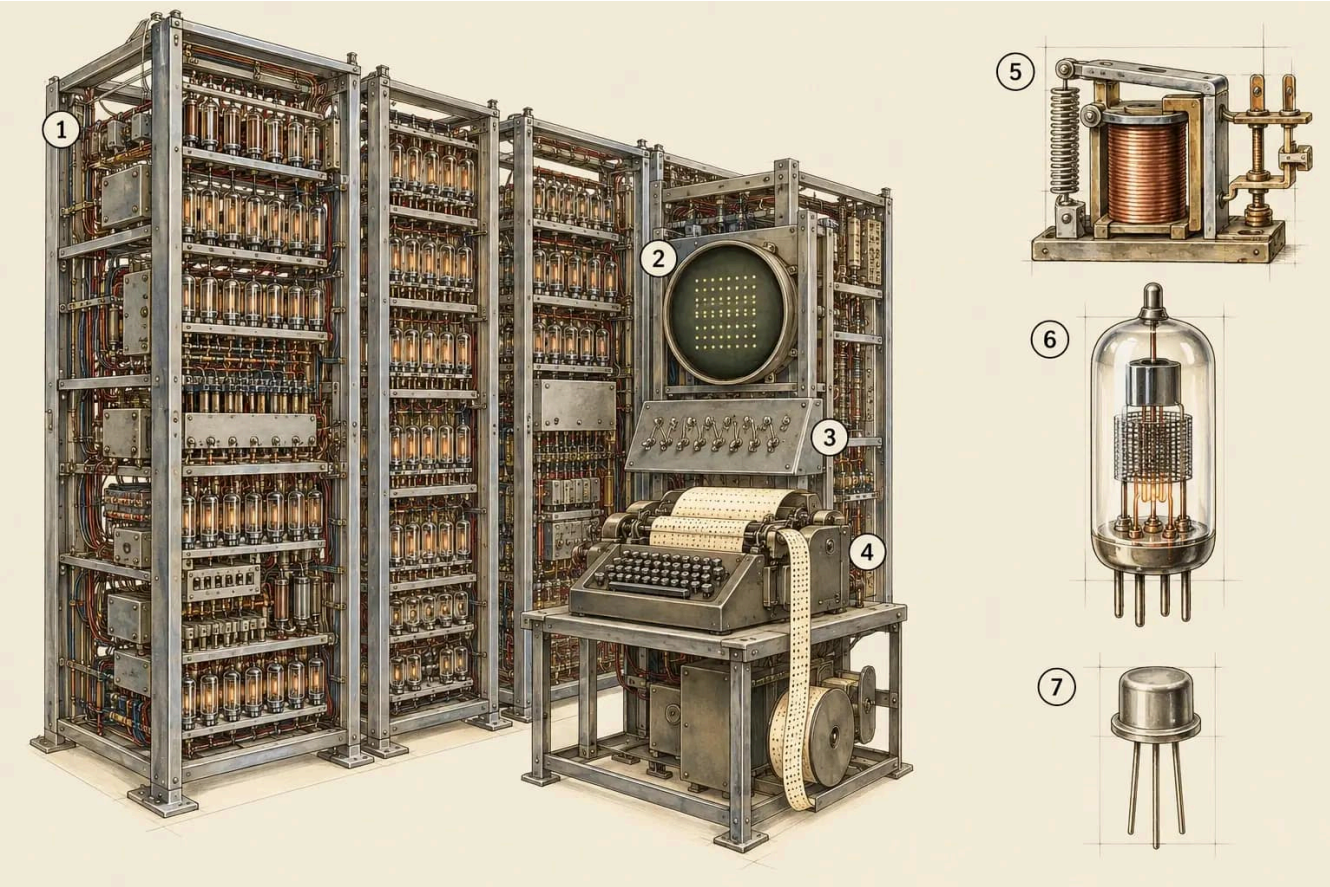
Fakten geprüft am 2026-10-11

Computer

Eine Maschine mit gespeichertem Programm

1948 · Moderne · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Transistor (S. 366), Stellenwertsystem (S. 99)



1 Gestelle voller Elektronenröhren 2 Speicherröhre: ein Punkt pro Bit 3 Schalttafel zur Dateneingabe 4 Fernschreiber und Lochstreifen 5 Relais: ein Schalter, den ein Elektromagnet bewegt 6 Elektronenröhre: ihr Gitter steuert den Strom 7 Transistor: der Halbleiterschalter

Ein Computer ist eine programmierbare Rechenmaschine; die heutige Bauart hält ihr Programm im eigenen Speicher und rechnet im Binärsystem, mit Schaltern, die nur an oder aus kennen. Als erster führte das Manchester „Baby“ am 21. Juni 1948 ein Programm aus einem elektronischen Speicher aus, und Handys wie Laptops folgen bis heute diesem Bauplan.

Was es ist

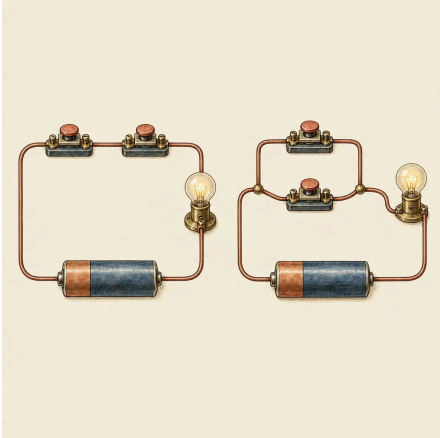
Ein Computer führt ein Programm, also eine Liste von Befehlen, auf Daten aus. In der hier beschriebenen Bauweise mit gespeichertem Programm liegt das Programm im selben Speicher wie die Zahlen, die es bearbeitet. Die Maschine kann deshalb ein neues laden, es ändern oder ein anderes schreiben, ohne umgebaut zu werden. Diese Idee unterscheidet den Computer mit gespeichertem Programm von früheren programmierbaren Maschinen, die ihre Befehle von Streifen, Karten, Steckern oder Schaltern bezogen.

Heutige Computer arbeiten binär, nur mit den Ziffern 0 und 1, denn zwei Zustände lassen sich zuverlässig herstellen: Ein Schalter ist offen oder geschlossen. Der ENIAC und einige andere frühe Maschinen rechneten noch dezimal. Für eine Gesellschaft im Wiederaufbau rechnet er, steuert Maschinen wie Pumpen und Stromnetze und vermittelt Nachrichten.

Wie es funktioniert

Binärzahlen. Das Binärsystem ist ein Stellenwertsystem wie unsere Dezimalziffern, nur ist jede Stelle doppelt so viel wert wie die rechts daneben: 1, 2, 4, 8, 16. Dreizehn ist 8 + 4 + 1 und wird 1101 geschrieben. Acht Binärziffern, Bits genannt, reichen für alle ganzen Zahlen von 0 bis 255.

Gatter. Zwei Schalter in Reihe lassen eine Lampe nur leuchten, wenn beide geschlossen sind: ein UND-Gatter. Parallel genügt einer von beiden: ein ODER-Gatter. Ein Relais, dessen Kontakt sich öffnet, sobald seine Spule Strom bekommt, bildet ein NICHT-Gatter, das aus 1 eine 0 macht. Beim Relais bewegt ein Elektromagnet den Kontakt; in der Elektronenröhre steuert die Spannung am Gitter den Strom, im Transistor das Signal an Basis oder Gate. Mit UND, ODER und NICHT lässt sich jede Regel ausdrücken, die Eingangsbits auf Ausgangsbits abbildet.



In Reihe leuchtet die Birne nur, wenn beide Taster gedrückt sind; parallel genügt einer.

Addieren mit Gattern. Binär ergibt 1 + 1 die Zahl 10: Summe 0, Übertrag 1. Das Summenbit ist 1, wenn genau ein Eingang 1 ist, eine Regel namens exklusives ODER (XOR); der Übertrag ist nur 1, wenn beide es sind, also ein UND. Zusammen bilden sie einen Halbaddierer. Ein Volladdierer nimmt zusätzlich den Übertrag der Spalte rechts auf, und acht hintereinander addieren zwei 8-Bit-Zahlen Spalte für Spalte, wie ein Schulkind auf Papier.

Speicher. Zwei NOR-Gatter (ein ODER mit nachfolgendem NICHT), deren Ausgang jeweils einen Eingang des anderen speist, bilden ein Flipflop: Ein Impuls an einem freien Eingang setzt es auf 1, ein Impuls am anderen zurück auf 0, und es hält dieses Bit, solange Strom fließt. Manchester speicherte Bits als geladene Punkte auf einer Kathodenstrahlröhre, der EDSAC als Schallimpulse in Quecksilberröhren. Jedes Wort, eine Gruppe von Bits, trägt eine Nummer, seine Adresse.

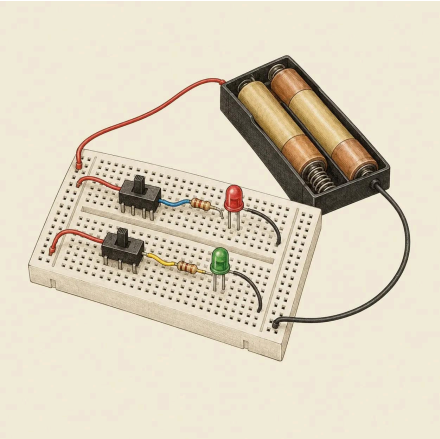
Der Zyklus. Ein Register, der Befehlszähler, enthält die Adresse des nächsten Befehls. Der Prozessor holt diesen Befehl, dekodiert ihn, führt ihn aus und beginnt von vorn. Ein Befehl kann eine Zahl aus dem Speicher zum Akkumulator addieren, ein Ergebnis ablegen oder anderswohin springen, wenn ein Wert negativ ist; dieser bedingte Sprung erlaubt Schleifen und Entscheidungen. Tastaturen und Sensoren bringen Daten herein, Bildschirme, Drucker und Motoren geben Ergebnisse aus.

Wie man es baut

Ein moderner Prozessor braucht eine Chipfabrik, seine Logik lässt sich aber auf dem Tisch lernen.

Material. Ein Steckbrett, zwei oder drei AA-Zellen im Halter (3 bis 4,5 V) oder ein 5-V-USB-Netzteil, zwei zweipolige Umschalter, zwei LEDs, zwei Widerstände von 330 bis 470 Ohm und Draht. Jede LED kommt mit dem langen Bein (Anode) zum Schalter und dem kurzen Bein (Kathode) an 0 V. Zuerst die Wahrheitstabelle aufschreiben: Für die Eingänge A B = 00, 01, 10, 11 ist die Summe 0, 1, 1, 0 und der Übertrag 0, 0, 0, 1.

Den Übertrag verdrahten. Die Versorgung an den Mittelkontakt des ersten Pols von A, dessen „Ein“-Kontakt an den Mittelkontakt des ersten Pols von B und dessen „Ein“-Kontakt über einen Widerstand an eine LED führen; ihr



Erst jeden Schalter mit seiner LED einzeln prüfen; eine LED braucht immer einen Vorwiderstand.

anderes Bein geht zurück an 0 V. Sie leuchtet nur bei 11: Das ist UND.

Die Summe verdrahten. An den zweiten Polen den „Ein“-Kontakt von A mit dem „Aus“-Kontakt von B verbinden und den „Aus“-Kontakt von A mit dem „Ein“-Kontakt von B. Den Mittelkontakt von A an die Versorgung legen und den Mittelkontakt von B über einen Widerstand an die zweite LED, Kathode an 0 V. Sie leuchtet, wenn die Schalter verschieden stehen: XOR. Alle vier Fälle mit der Tabelle vergleichen.

Einen größeren Addierer verketten. Ein Volladdierer besteht aus zwei Halbaddierern und einem ODER-Gatter, das ihre Überträge zusammenführt. Ab hier sind Logik-ICs bequemer: Ein 4-Bit-Addierer braucht zwei 74HC86 (XOR), zwei 74HC08 (UND) und einen 74HC32 (ODER). Die Versorgung nach Datenblatt anschließen (Pin 14 an Plus, Pin 7 an 0 V, ein 100-nF-Kondensator dazwischen). Jeder Übertrag geht in die nächste Spalte, der erste Übertragseingang an 0 V; jeder Schaltereingang bekommt einen 10-Kiloohm-Widerstand nach 0 V und jede LED an einem Ausgang einen 1-Kiloohm-Widerstand.

Einen Computer auf Papier laufen lassen. Acht nummerierte Speicherfelder, einen Akkumulator und einen Befehlszähler auf 0 zeichnen. LADE 5 in Feld 0 schreiben, ADDIERE 6 in Feld 1, SPEICHERE 7 in Feld 2, STOPP in Feld 3, dann 3 in Feld 5 und 4 in Feld 6. Nun selbst Prozessor spielen: das Feld lesen, auf das der Zähler zeigt, den Befehl ausführen, den Zähler um eins erhöhen. Am Ende steht in Feld 7 die 7. Kodiert man nun jeden Befehl mit zwei Ziffern, erst die Operation, dann die Adresse, mit LADE 1, ADDIERE 2, SPEICHERE 3 und STOPP 0, wird das Programm zu 15, 26, 37, 00: Zahlen zwischen den Daten.

> **Sicherheit.** Nur Batterien oder ein 5-V-USB-Netzteil verwenden, nie Netzspannung. Jede LED braucht ihren Widerstand. Eine kurzgeschlossene Batterie oder Powerbank kann ihre Drähte so stark erhitzen, dass man sich verbrennt. Vor dem Umstecken die Versorgung trennen. Ein IC-Ausgang kann keine Relaisspule speisen: Die Spule über einen für ihren Strom ausgelegten Transistor schalten, mit einer Diode parallel, Ring (Kathode) zur Plusseite, die den Spannungsstoß beim Abschalten aufnimmt.

Geschichte und Entwicklung

Charles Babbages Analytische Maschine, 1834 erdacht, hatte einen Speicher, ein Rechenwerk, die „Mühle“, und ein Programm auf Lochkarten; gebaut wurde sie nie. Ada Lovelace veröffentlichte 1843 eine Befehlsfolge für sie. Herman Holleriths elektrische Lochkarten-Tabelliermaschinen werteten die US-Volkszählung von 1890 aus.

Vereinfachte Skizze des Teils seiner ersten Differenzmaschine, eines Siebtels, das Babbage 1832 zusammenbauen ließ; es funktioniert noch heute.

1936 beschrieb Alan Turing eine universelle Maschine, die ihre Befehle vom selben Band liest wie ihre Daten. Konrad Zuse führte seine Relaismaschine Z3 am 12. Mai 1941 in Berlin vor. Ab Februar 1944 half Tommy Flowers’ elektronischer Colossus in Bletchley Park, die deutsche Lorenz-Verschlüsselung zu brechen; er blieb bis in die 1970er-Jahre geheim. Der ENIAC von J. Presper Eckert und John Mauchly aus Philadelphia, 1946 vorgestellt, war universell einsetzbar, wurde aber durch Umstecken von Kabeln programmiert. Jede dieser Maschinen

kann als erste gelten, je nachdem, ob man Elektronik, Universalität oder ein gespeichertes Programm verlangt.

John von Neumanns Bericht über den EDVAC von 1945, hervorgegangen aus der Arbeit mit Eckert, Mauchly und anderen, beschrieb eine Maschine, die Programm und Daten in einem Speicher hält. Als erste lief das Manchester „Baby“ von Frederic Williams, Tom Kilburn und Geoff Tootill, am 21. Juni 1948. Maurice Wilkes’ EDSAC in Cambridge folgte am 6. Mai 1949 und stand bald Nutzern zur Verfügung.

Manchester betrieb im November 1953 einen Transistorrechner. Integrierte Schaltungen, erstmals 1958 gebaut, zogen in den 1960er-Jahren in die Computer ein, und 1971 brachte Intels 4004 einen ganzen Prozessor auf einen Chip.

Kennzahlen

Zuse Z3, mit Relais, Programm auf Lochfilm
Am 12. Mai 1941 in Berlin vorgeführt

ENIAC
Im Februar 1946 vorgestellt; rund 18.000 Elektronenröhren, 30 US-Tonnen (etwa 27 t), 150 kW

Intel 4004, erster kommerzieller Mikroprozessor
1971, rund 2300 Transistoren auf einem Chip

Colossus, elektronisch, mit Steckern und Schaltern eingerichtet
Ab Februar 1944 in Bletchley Park in Betrieb; rund 1600 Röhren, bei späteren Modellen 2400 bis 2500

Erstes gespeichertes Programm ausgeführt
21. Juni 1948, Manchester: 17 Befehle, Speicher aus 32 Wörtern zu 32 Bit

Quellen

1. Timeline of Computer History: Computers · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/timeline/computers/
2. The Modern History of Computing (B. Jack Copeland) · Stanford Encyclopedia of Philosophy https://plato.stanford.edu/entries/computing-history/
3. Mark 1 Story: The Baby · University of Manchester, Department of Computer Science https://www.curation.cs.manchester.ac.uk/computer50/www.computer50.org/mark1/new.baby.html
4. Milestones: Manchester University "Baby" Computer and its Derivatives, 1948–1951 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:Manchester_University_%22Baby%22_Computer_and_its_Derivatives,_1948-1951
5. Colossus · The National Museum of Computing https://www.tnmoc.org/colossus
6. ENIAC · Penn Engineering, University of Pennsylvania https://www.engineering.upenn.edu/about/history-heritage/eniac/
7. A brief informal history of the Computer Laboratory · University of Cambridge Computer Laboratory https://www.cl.cam.ac.uk/events/EDSAC99/history.html
8. The Engines · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/babbage/engines/
9. Ada Lovelace · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/babbage/adalovelace/
10. Tabulation and Processing · U.S. Census Bureau https://www.census.gov/about/history/bureau-history/census-innovations/technology/tabulation-and-processing.html
11. Milestones: First Semiconductor Integrated Circuit (IC), 1958 · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:First_Semiconductor_Integrated_Circuit_(IC),_1958
12. 1971: Microprocessor integrates CPU function onto a single chip · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/siliconengine/microprocessor-integrates-cpu-function-onto-a-single-chip/
13. 74HC86; 74HCT86 Quad 2-input EXCLUSIVE-OR gate (data sheet) · Nexperia https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT86.pdf
14. 74HC08; 74HCT08 Quad 2-input AND gate (data sheet) · Nexperia https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT08.pdf
15. 74HC32; 74HCT32 Quad 2-input OR gate (data sheet) · Nexperia https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT32.pdf
16. SN74HC86 Quadruple 2-Input Exclusive-OR Gates (data sheet) · Texas Instruments https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc86.pdf
17. Full Adder · HyperPhysics, Georgia State University https://hyperphysics.gsu.edu/hbase/Electronic/fulladd.html
18. Binary Adder and Binary Addition · Electronics Tutorials https://www.electronics-tutorials.ws/combination/comb_7.html

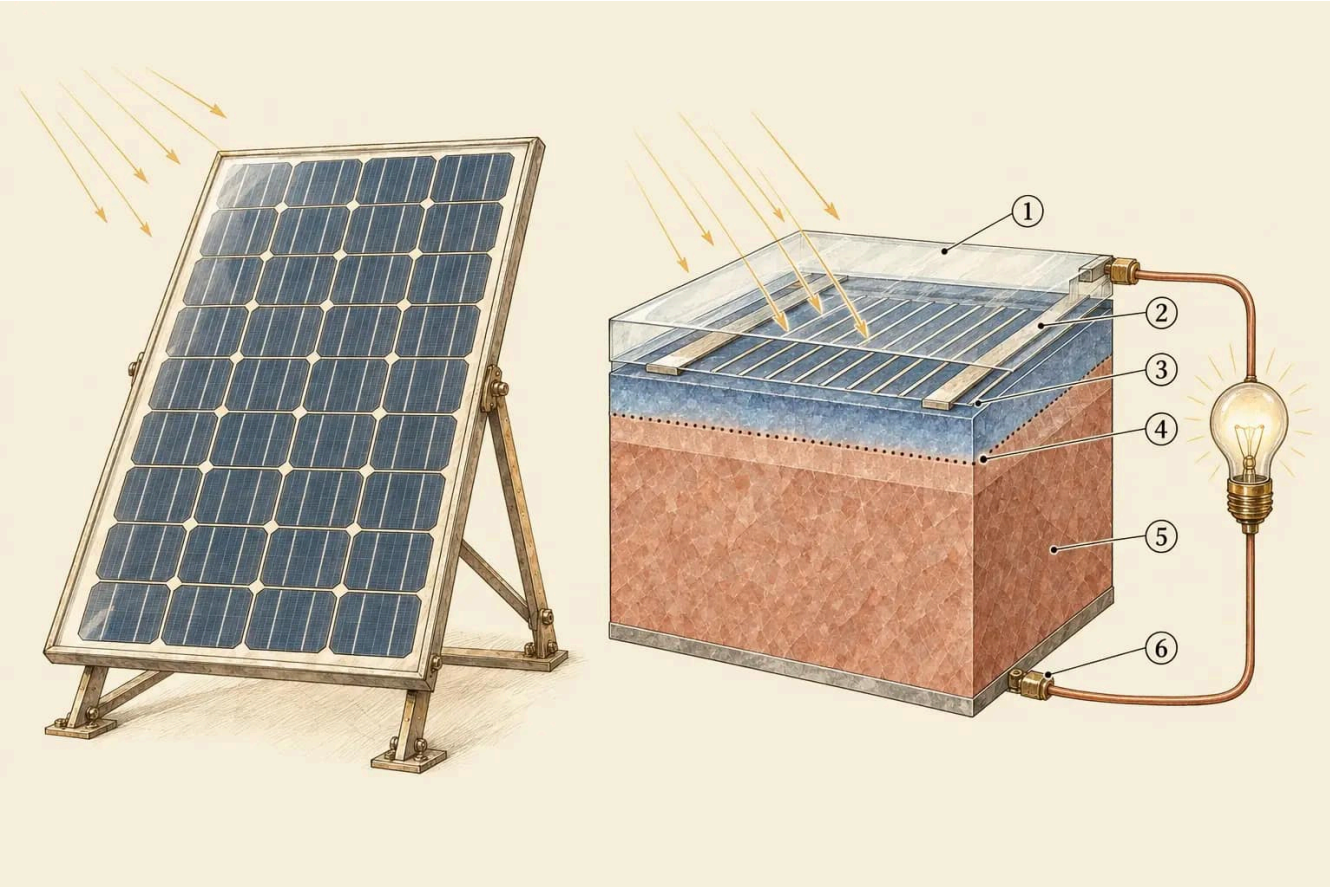
Fakten geprüft am 2026-10-14

Solarzelle

Sonnenlicht wird zu Strom

1954 · Moderne · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Transistor (S. 366), Batterie (S. 243), Glas (S. 134)



1 Glasabdeckung 2 Vorderes Kontaktgitter 3 Dünne n-Schicht (Phosphor) 4 pn-Übergang 5 p-Basis (Bor) 6 Rückkontakt

Eine Solarzelle ist eine dünne Halbleiterscheibe, in der Licht Elektronen freisetzt, die ein eingebautes elektrisches Feld als Strom zu den Kontakten treibt, ganz ohne bewegliche Teile und Brennstoff. Die Bell Labs stellten 1954 die erste brauchbare Siliziumzelle vor; Solarenergie lieferte 2025 8,7 % des weltweiten Stroms.

Was es ist

Eine Solarzelle wandelt Licht unmittelbar in elektrischen Strom um, ohne bewegliche Teile und ohne Brennstoff. Die meisten Zellen sind quadratische Siliziumscheiben, etwas breiter als eine Hand. Jede liefert in der Sonne rund ein halbes Volt, deshalb verschaltet man Dutzende davon hinter Glas zu einem Modul, wie dem mit 36 Zellen auf der Tafel.

Als Datum gilt hier der April 1954: Damals stellten die Bell Labs eine Siliziumzelle vor, die etwa 6 % des Sonnenlichts in Strom umsetzte, genug für echte Geräte. Becquerel hatte schon 1839 beobachtet, wie Licht einen Strom erzeugt, doch die ab 1883 gebauten Selenzellen blieben unter 1 %.

Wie es funktioniert

Reines Silizium leitet schlecht. Die Dotierung mit einer Spur Phosphor liefert überschüssige Elektronen (n-Typ); eine Spur Bor hinterlässt Lücken, sogenannte Löcher, die sich wie positive Ladungen verhalten (p-Typ). Eine klassische Zelle ist eine mit Bor dotierte Scheibe, deren Vorderseite weniger als einen tausendstel Millimeter tief mit Phosphor durchtränkt wird. Wo beide Bereiche aufeinandertreffen, heben sich Elektronen und Löcher in einer schmalen Zone gegenseitig auf. Zurück bleiben feste Ladungen, die über diesen pn-Übergang ein dauerhaftes elektrisches Feld aufrechterhalten.

Die Zellen werden aus einem Silizium-Einkristall gesägt, der aus der Schmelze gezogen wird; eine Scheibe ist heute etwa 0,14 mm dick.

Ein Photon mit genug Energie schlägt ein Elektron aus seiner Bindung im Kristall und lässt ein Loch zurück. In der Nähe des Übergangs schiebt das Feld das Elektron zur n-Seite und das Loch zur p-Seite. Die Elektronen sammeln sich in den vorderen Fingern, fließen durch den äußeren Stromkreis, wo sie eine Lampe leuchten lassen oder einen Akku laden, und kehren über den Rückkontakt zurück.

Im Leerlauf zeigt eine Zelle etwa 0,6 bis 0,7 V, unter Last etwa 0,5 V. Die Spannung ändert sich mit der Helligkeit kaum, der Strom dagegen folgt dem Licht: halb so viel Licht, ungefähr halb so viel Strom. In Reihe addieren sich die Spannungen, 36 Zellen arbeiten so bei etwa 17 V, genug, um eine 12-V-Batterie zu laden. Parallel geschaltete Module addieren ihre Ströme. Eine einzige verschattete Zelle bremst ihren ganzen Strang, deshalb sitzen Bypassdioden im Modul.

Infrarotes Licht jenseits von etwa 1,1 Mikrometern geht ungenutzt durch das Silizium, und Photonen mit zu viel Energie verlieren den Überschuss als Wärme. 1961 zeigten William Shockley und Hans-Joachim Queisser, dass diese Verluste eine Zelle mit nur einem Übergang auf etwa ein Drittel des Sonnenlichts begrenzen. Im Silizium kommen Verluste im Kristall selbst hinzu, die seine Grenze auf etwa 29 % senken; die beste Laborzelle erreichte 2026 28,1 %. Auch Wärme senkt den Ertrag: Eine herkömmliche Siliziumzelle verliert je Grad Celsius rund 0,4 bis 0,5 % ihrer Leistung, vor allem durch sinkende Spannung.

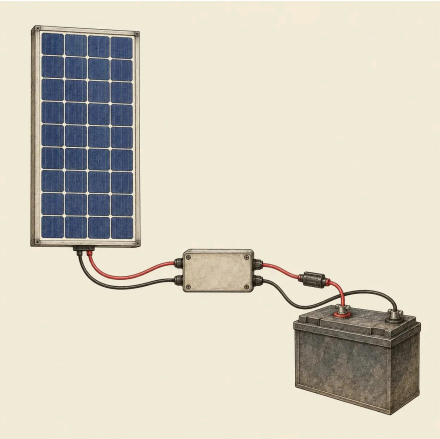
Bauanleitung

Zellen herzustellen ist Sache der Fabrik. Eine kleine 12-V-Anlage aus gekauften Modulen, mit zueinander passenden Teilen und nach den Anleitungen der Hersteller aufgebaut, schafft dagegen ein sorgfältiger Laie.

Das Modul bemessen. Vier LED-Lampen zu 5 W für 4 Stunden und ein Radio mit 10 W für 2 Stunden brauchen 100 Wattstunden (Wh) am Tag. Ein Modul liefert etwa seine Nennleistung × Spitzensonnenstunden (die Sonnenenergie eines Tages, umgerechnet in Stunden mit voller Einstrahlung von 1000 W/m², im dunkelsten Monat) × 0,7 für Wärme, Staub und Leitungsverluste. Ein 100-W-Modul mit 3 Spitzensonnenstunden ergibt so etwa 210 Wh, ein guter Spielraum.

Die Batterie wählen. Rechnen Sie mit einem bis drei trüben Tagen. Bleiakkus halten länger, wenn man sie selten unter die Hälfte entlädt. Lithium-Eisenphosphat-Akkus lassen sich fast ganz nutzen, aber nur mit ihrer eigenen Überwachungselektronik und einem auf Lithium eingestellten Regler; die meisten dürfen unter 0 °C nicht geladen werden. Zwei Tage zu 100 Wh aus einer 12-V-Bleibatterie, die zur Hälfte genutzt wird, verlangen mindestens 33 Ah: Nehmen Sie 40 Ah.

Einen Laderegler einbauen. Schließen Sie ein Modul nie direkt an eine Batterie an. Der Regler drosselt das Laden, damit die Batterie nie überladen wird, hält sie dann voll, und Verbraucher an seinem Lastausgang werden



Modul, Laderegler und Batterie, mit der Sicherung im Pluskabel direkt an der Batterie.

abgeschaltet, bevor sie leer ist. Ein einfacher PWM-Regler sollte für mindestens das 1,25-Fache des Kurzschlussstroms des Moduls ausgelegt sein. Bei einem MPPT-Regler vergleichen Sie seine Grenzwerte für Spannung, Strom und Leistung mit dem Datenblatt des Moduls; die Leerlaufspannung steigt bei Kälte.

Sicherung und Kabel. Setzen Sie eine für Gleichstrom zugelassene Sicherung ins Pluskabel, unmittelbar an der Batterie. Sie muss kleiner bemessen sein als die Belastbarkeit des Kabels, größer als der höchste normale Strom und den sehr hohen Kurzschlussstrom einer Batterie sicher trennen können. Bei 10 A verliert ein 5 m entferntes Modul (10 m Kupfer) in einem 6-mm^2-Außenkabel etwa 0,3 V; dünnerer Draht verliert mehr.

Montieren und reinigen. Richten Sie das Modul zum Äquator aus, über die Mittagsstunden schattenfrei, für ganzjährige Nutzung etwa um den Breitengrad geneigt. Spülen Sie Staub mit Wasser und einer weichen Bürste ab. Ein Wechselrichter kann die 12 V in Netzspannung umwandeln, die genauso gefährlich ist wie das Stromnetz.

Eine Zelle messen. Messen Sie in der Sonne die Spannung einer kleinen Zelle in der Gleichspannungsstellung eines Multimeters. Stellen Sie dann auf Gleichstrom, stecken Sie das rote Kabel in die 10-A-Buchse und berühren Sie die Anschlüsse der Zelle: Das ist ihr Kurzschlussstrom. Prüfen Sie vorher, dass der auf der Zelle angegebene Strom weit unter der 10-A-Grenze des Messgeräts liegt, und halten Sie die Spitzen nur wenige Sekunden an. Im Schatten bewegt sich die Spannung kaum, der Strom fällt. Stecken Sie das rote Kabel danach zurück in die Spannungsbuchse, und messen Sie so nie den Strom einer Batterie.

> **Sicherheit.** Ein Modul erzeugt Spannung, sobald Licht darauf fällt: Decken Sie es beim Verkabeln ab. Gleichstrom kann einen Lichtbogen halten, wenn ein Stecker unter Last gezogen wird. Für Arbeiten an der Anlage das Modul abdecken, zuerst das Modul trennen, zuletzt die Batterie, und in umgekehrter Reihenfolge wieder anschließen. Ein Kurzschluss an den Batteriepolen bringt Werkzeug zum Schmelzen und löst Brände aus, und gegen einen Schraubenschlüssel quer über beiden Polen hilft keine Sicherung: isoliertes Werkzeug und Polkappen verwenden. Bleiakkus geben beim Laden Wasserstoff ab: lüften, keine Funken, Schutzbrille tragen. Auf dem Dach nur mit Gurt und Anschlagpunkt arbeiten oder Fachleute holen. Alles, was am Stromnetz hängt, auch Wechselrichter, gehört in die Hände einer Elektrofachkraft.

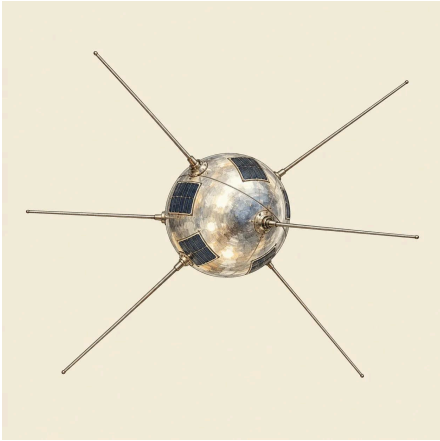
Geschichte und Entwicklung

1839 beleuchtete der 19-jährige Edmond Becquerel mit Silberchlorid beschichtete Elektroden in einer Säure und maß einen schwachen Strom. 1873 bemerkte der englische Ingenieur Willoughby Smith beim Prüfen von Unterseekabeln für den Telegrafen, dass Selen im Licht besser leitet; 1883 baute der Amerikaner Charles Fritts Selenzellen unter einem lichtdurchlässig dünnen Goldblatt. 1905 erklärte Albert Einstein, dass Licht in Paketen kommt, deren Energie von seiner Farbe abhängt.

1940 stellte Russell Ohl in den Bell Labs fest, dass eine Siliziumprobe mit Phosphor auf der einen und Bor auf der anderen Seite im Licht Strom lieferte: der erste pn-Übergang, mit rund 1 % Wirkungsgrad. 1953 suchte sein Kollege Daryl Chapin eine Stromquelle für abgelegene Telefonanlagen und kam mit Selen nur auf 0,5 %. Das dotierte Silizium von Calvin Fuller und Gerald Pearson war weit besser, und die am 25. April 1954 vorgeführte Zelle trieb ein Spielzeug-Riesenrad an.

Die ersten Siliziumzellen waren für den Alltag viel zu teuer, und ihr erster fester Kunde war die Raumfahrt. Vanguard 1, im März 1958 gestartet, trug sechs kleine Felder mit je 18 Zellen: Sein batteriebetriebener Sender

verstummte im Juni 1958, der solarbetriebene sendete bis Mai 1964. Mit dem Wachstum der Fabriken fielen die Modulpreise von etwa 132 Dollar je Watt im Jahr 1975 auf 0,27 Dollar im Jahr 2024 (in Dollar von 2025). Die meisten Zellen entstehen heute aus phosphordotierten Scheiben mit Bor an der Vorderseite. 2025 erzeugten Solarmodule laut Ember (April 2026) 8,7 % des Stroms der Welt.



Vanguard 1, 1958: sechs kleine Solarzellenfelder auf einer Kugel von etwa 16 cm Durchmesser.

Kennzahlen

Erste brauchbare Zelle
Am 25. April 1954 von den Bell Labs vorgestellt, Wirkungsgrad etwa 6 %

Wirkungsgrad heute
28,1 % für die beste Silizium-Laborzelle; knapp unter 25 % für die besten handelsüblichen Module (Fraunhofer ISE, Juli 2026)

Anteil am Weltstrom
8,7 % im Jahr 2025, gegenüber 1,1 % im Jahr 2015 (Ember, April 2026)

Spannung einer Siliziumzelle
Etwa 0,6–0,7 V im Leerlauf, etwa 0,5 V unter Last

Einfluss der Wärme
Etwa 0,4–0,5 % weniger Leistung je °C bei einer herkömmlichen Siliziumzelle; das Datenblatt jedes Moduls nennt seinen eigenen Wert

Quellen

1. April 25, 1954: Bell Labs demonstrates the first practical silicon solar cell · American Physical Society, APS News https://aps.org/apsnews/2009/04/bell-labs-silicon-solar-cell
2. Milestones: First practical photovoltaic solar cell · IEEE Engineering and Technology History Wiki https://ethw.org/Milestones:First_Practical_Photovoltaic_Solar_Cell
3. 1940: Discovery of the p-n junction · Computer History Museum https://www.computerhistory.org/siliconengine/discovery-of-the-p-n-junction/
4. First photovoltaic devices · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://pveducation.org/es/fotovoltaica/first-photovoltaic-devices
5. Open-circuit voltage · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/open-circuit-voltage
6. Effect of light intensity · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-light-intensity
7. Effect of temperature · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature
8. Limiting efficiency of crystalline silicon solar cells due to Coulomb-enhanced Auger recombination (Kerr, Cuevas, Campbell, 2003) · Australian National University https://researchportalplus.anu.edu.au/en/publications/limiting-efficiency-of-crystalline-silicon-solar-cells-due-to-cou/
9. Einstein and the photoelectric effect · American Physical Society, APS News https://www.aps.org/apsnews/2005/01/einstein-photoelectric-effect
10. Vanguard 1 · Linda Hall Library https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/vanguard-1/
11. Vanguard 1 celebrates 50 years in Earth's orbit (Spaceport News, 21 March 2008, p. 7) · NASA Kennedy Space Center https://www3.nasa.gov/centers/kennedy/pdf/218158main_mar21color.pdf
12. Solar cell array design handbook, vol. 1 (JPL SP 43-38, 1976) · NASA / Jet Propulsion Laboratory https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19770007250/downloads/19770007250.pdf
13. Photovoltaics Report (14 July 2026) · Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE https://ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html
14. Solar PV module prices, 1975–2024 · Our World in Data https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices
15. Global Electricity Review 2026: electricity demand and supply trends · Ember https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2026/electricity-demand-and-supply-trends/
16. Solar electric system design, operation and installation (C. Roos, 2009) · Washington State University Extension Energy Program https://digitalarchives.wa.gov/do/046161B1997D0FFD8FA86C78CAFFAB5C.pdf
17. SmartSolar MPPT 100/30 and 100/50 manual: operation · Victron Energy https://www.victronenergy.com/media/pg/Manual_SmartSolar_MPPT_100-30__100-50/en/operation.html
18. Series resistance · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/series-resistance
19. Shunt resistance · PVEducation (C. Honsberg and S. Bowden) https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance
20. Single diode equivalent circuit models · Sandia National Laboratories, PV Performance Modeling Collaborative https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/single-diode-equivalent-circuit-models/
21. Production of upgraded metallurgical grade (UMG) silicon for a low-cost high-efficiency and reliable PV technology (Míguez Novoa et al., Frontiers in Photonics, 2024) · arXiv https://arxiv.org/abs/2604.04095

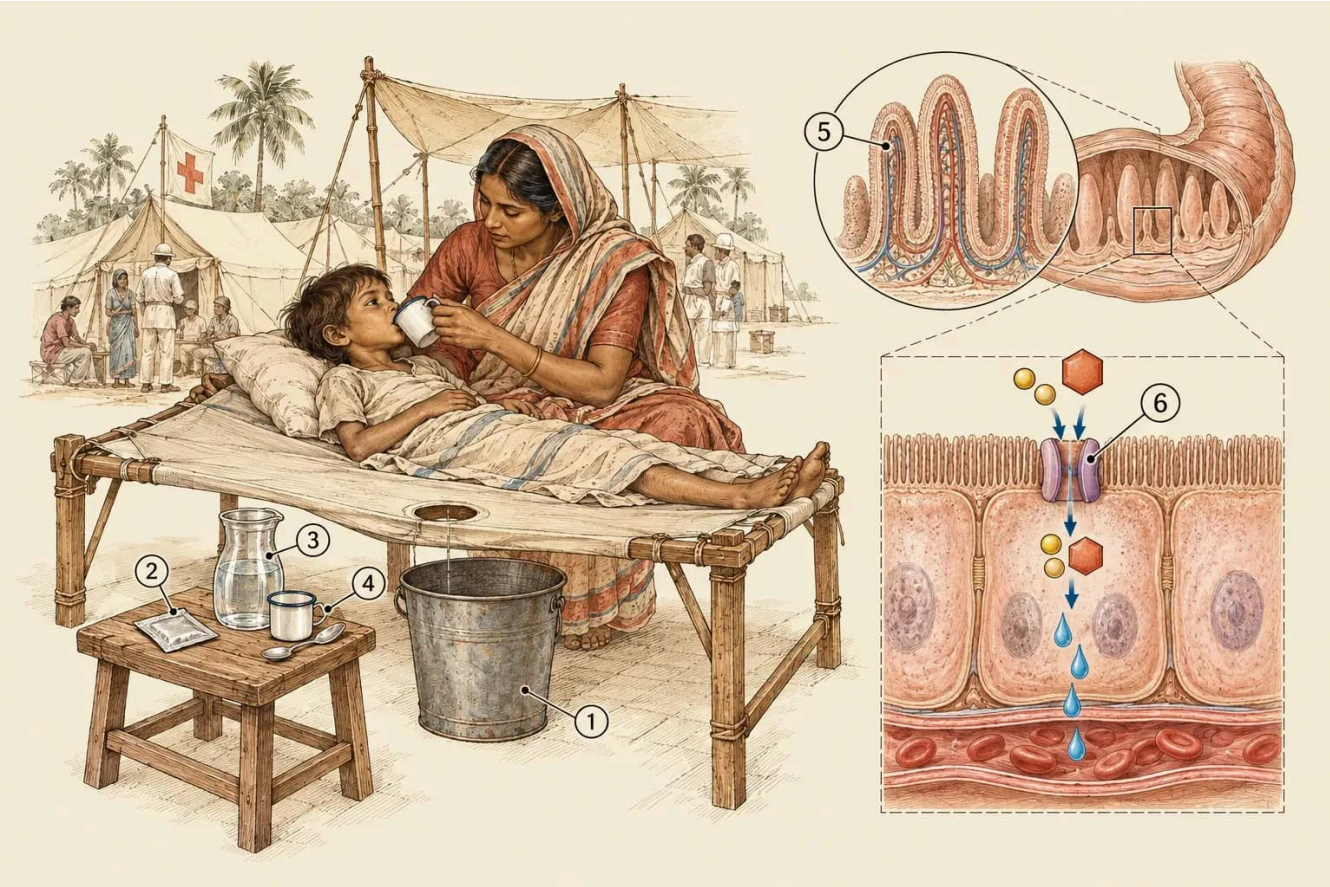
Fakten geprüft am 2026-10-14

Orale Rehydratation

Salz, Zucker und Wasser gegen Cholera

1968 · Moderne · Elektrisches Zeitalter

Erfordert: Trinkwasser (S. 35), Maße und Gewichte (S. 129)



1 Cholerabett mit Eimer 2 Beutel mit oralen Rehydratationssalzen 3 Krug mit sauberem Trinkwasser 4 Becher und Löffel 5 Zotten des Dünndarms 6 Natrium-Glukose-Transporter in einer Darmzelle

Die orale Rehydratation ersetzt das bei Durchfall verlorene Wasser und Salz durch ein Getränk aus sauberem Wasser, Salzen und Glukose in festem Verhältnis, das der Darm selbst bei Cholera weiter aufnimmt. Seit Studien in Dhaka und Kalkutta 1968 erprobt und seit den 1970er-Jahren in Standardbeuteln verteilt, hat sie nach Schätzungen Dutzende Millionen Kinder gerettet.

Was es ist

Durchfall tötet, indem er den Körper austrocknet. Bei Cholera bringt ein Gift die Schleimhaut des Dünndarms dazu, Wasser und Salze in den Darm abzugeben, und ein Erwachsener kann binnen Stunden literweise wässrigen Stuhl verlieren. Das Blutvolumen sinkt, die Nieren versagen, und ohne Behandlung kann der Tod noch am selben Tag eintreten. Die meisten Durchfälle bei Kindern verlaufen milder und gehen auf Viren oder andere Bakterien zurück, töten aber immer noch Hunderttausende von ihnen im Jahr.

Die orale Rehydratation ersetzt diese Verluste über den Mund. Der Kranke trinkt eine Lösung aus sauberem Wasser, Kochsalz, Glukose, Kalium und Citrat, angerührt aus einem Beutel oraler Rehydratationssalze (ORS). Sie stoppt

den Durchfall nicht; sie hält den Kranken am Leben, bis der Körper die Infektion überwunden hat.

Die Tafel zeigt ein Cholera-Behandlungslager in Bengalen Anfang der 1970er-Jahre. Ein Kind liegt auf einem Cholerabett, dessen Loch und Eimer es den Pflegekräften erlauben, jeden Verlust zu messen, während seine Mutter ihm aus einem Becher zu trinken gibt. Rechts zeigt ein Schnitt durch die Darmwand, warum die Behandlung wirkt.

Wie es funktioniert

Der Dünndarm ist mit Zotten ausgekleidet, winzigen fingerförmigen Falten, die eine einzige Zellschicht überzieht. Jede dieser Zellen trägt in ihrer äußeren Membran ein Protein, das Natrium und Glukose gemeinsam einschleust: zwei Natrium-Ionen je Glukosemolekül. Robert Crane schlug diese Kopplung 1960 in Prag vor, und Versuche am Kaninchendarm bestätigten 1964, dass Zucker die Natriumaufnahme antreibt. Chlorid folgt dem Natrium, und Wasser folgt den gelösten Salzen und dem Zucker.

Das Choleragift treibt die Sekretion an, lässt diesen Transporter aber arbeiten. Ein Getränk mit Natrium und Glukose wird deshalb aufgenommen, auch während der Darm Flüssigkeit verliert, und in ausreichender Menge hält es mit den Verlusten Schritt.

Reines Wasser bringt kein Salz mit und kann die Verluste deshalb allein nicht ersetzen; in großen Mengen verdünnt es das Natrium, das noch im Blut ist. Süße Getränke wie Limonade oder Fruchtsaft enthalten zu viel Zucker und zu wenig Salz. Der überschüssige Zucker bleibt im Darm und zieht Wasser hinein, was den Durchfall verschlimmert. Die Lösung mit reduzierter Osmolarität, die die WHO Anfang der 2000er-Jahre empfahl, enthält weniger Natrium und Glukose als die erste. Bei Kindern mit Durchfall, der nicht von Cholera kommt, verringerte sie die Stuhlmenge je nach Studie um ein Fünftel bis ein Viertel und ungeplante Infusionen um etwa ein Drittel.

Wie sie hergestellt und angewendet wird

Dieser Abschnitt beschreibt, wie Gesundheitssysteme ORS bereitstellen und ihre Anwendung lehren. Er ist kein Rezept für zu Hause.

Industriell gefüllte Beutel. Pharmawerke mischen gereinigte Glukose, Natriumchlorid, Kaliumchlorid und Trinatriumcitrat nach der WHO-Formel und schweißen das trockene Pulver in feuchtigkeitsdichte Folie ein; jeder Beutel ist für eine angegebene Wassermenge bemessen. 2024 lieferte allein UNICEF 29,2 Millionen Beutel in 56 Länder, oft zusammen mit Zinktabletten verpackt, für deutlich weniger als einen US-Dollar pro Behandlung.

Familien anleiten. In der Ambulanz oder bei einem Hausbesuch zeigt eine Gesundheitsfachkraft den Eltern, wie sie einen Beutel in genau der aufgedruckten Menge sauberen Wassers auflösen, abgekocht und abgekühlt, wenn die Quelle zweifelhaft ist. Die Lösung wird in kleinen, häufigen Schlucken aus Becher oder Löffel gegeben, langsamer, wenn das Kind erbricht, und was nach einem Tag übrig ist, wird weggeschüttet. Stillen und normale Mahlzeiten gehen weiter. Die WHO empfiehlt außerdem für Kinder mit Durchfall eine Zinkgabe über 10 bis 14 Tage, die die Episode verkürzt und einen baldigen Rückfall seltener macht.

Eine Gesundheitshelferin zeigt einer Mutter, wie sie den ganzen Beutel in die aufgedruckte Menge sauberen Wassers gibt.

Austrocknung erkennen. Fachkräfte achten auf Unruhe, eingesunkene Augen und gierigen Durst, Zeichen einer mäßigen Austrocknung. Ein Kind mit mindestens zwei der folgenden Zeichen ist schwer

Eine Hautfalte, die zwei Sekunden oder länger stehen bleibt, ist ein Zeichen schwerer Austrocknung.

ausgetrocknet: Teilnahmslosigkeit oder Bewusstlosigkeit, eingesunkene Augen, Unfähigkeit zu trinken oder schlechtes Trinken, eine Hautfalte, die sehr langsam zurückgeht. Solche Kranke und alle Menschen im Schock erhalten in einer Gesundheitseinrichtung zuerst Infusionen und danach ORS.

Wann sofort Hilfe nötig ist. Eltern lernen, sofort wiederzukommen, wenn das Kind schläfrig wird, nicht mehr trinken kann, ständig erbricht, Blut im Stuhl hat, seit vielen Stunden keinen Urin mehr lässt oder sich nicht bessert. Sehr junge Säuglinge und mangelernährte Kinder gehören von Anfang an in fachkundige Hände.

> **Sicherheit.** Verwenden Sie fertige ORS-Beutel, aufgelöst in genau der aufgedruckten Menge sauberen Wassers. Zu viel Pulver macht die Lösung gefährlich, zu viel Wasser macht sie weniger wirksam. Ist kein Beutel zur Hand, geben Sie weiter sauberes Wasser, Brühe oder Muttermilch, meiden Sie sehr süße Getränke und suchen Sie Hilfe. ORS ersetzt keine ärztliche Versorgung: Austrocknung kann ein kleines Kind binnen Stunden töten, und wer Warnzeichen zeigt, muss ohne Verzögerung in eine Gesundheitseinrichtung gebracht werden.

Geschichte und Entwicklung

1832 griff Thomas Latta in Leith bei Edinburgh einen Vorschlag von William O'Shaughnessy auf und spritzte Sterbenden Salzwasser in die Venen. Einige kamen wieder zu sich, doch Latta starb im folgenden Jahr, und die Methode geriet für ein halbes Jahrhundert in Vergessenheit.

In den 1960er-Jahren senkte die Kochsalzinfusion, verfeinert vom Arzt der US-Marine Robert Phillips, die Cholera-Sterblichkeit unter 1 %, doch sie brauchte sterile Flüssigkeit, Nadeln und geschultes Personal. In Dhaka, damals Ostpakistan, und an einem Zentrum der Johns-Hopkins-Universität in Kalkutta erprobten Forscher Glukose und Salz zum Trinken. 1968 zeigte Norbert Hirschhorn, dass Glukose den Netto-Stuhlverlust senkt, und David Nalin und Richard Cash berichteten, dass Kranke mit der Trinklösung 80 % weniger Infusionsflüssigkeit brauchten. Die Tafel nimmt 1968 als Datum.

Lattas Injektionen verlangten eine Spritze, eine Vene und einen Arzt am Bett.

Im Krieg von 1971 brach unter Flüchtlingen aus Ostpakistan bei Bongaon in Indien die Cholera aus. Da Infusionen knapp waren, behielt das Team von Dilip Mahalanabis sie den schwersten Fällen vor und behandelte die übrigen über den Mund. Von 3.703 aufgenommenen Kranken starben 3,6 %, während die Cholera zu Beginn des Ausbruchs fast 30 % ihrer Opfer getötet hatte. Der Bericht erschien erst 1973.

WHO und UNICEF einigten sich 1975 auf eine einheitliche Formel, und 1978 nannte The Lancet die Entdeckung den möglicherweise wichtigsten medizinischen Fortschritt des Jahrhunderts. Von 1980 bis 1990 schickte die bangladeschische Organisation BRAC Mitarbeiterinnen von Tür zu Tür und zeigte mehr als 12 Millionen Müttern, wie sie zu Hause ein Getränk aus Salz und Rohzucker zubereiten. Anfang der 2000er-Jahre empfahl die WHO eine Lösung mit reduzierter Osmolarität, und 2004 warb eine gemeinsame Erklärung mit UNICEF für sie und für Zink.

Schätzungen der geretteten Kinder reichen von mehr als 50 Millionen zwischen 1982 und 2007 bis zu über 70 Millionen bis 2019, wobei auch sauberes Wasser, Abwasserentsorgung und Impfungen beitrugen.

Kennzahlen

Studie von Nalin und Cash
The Lancet, August 1968: 80 % weniger Infusionsflüssigkeit nötig

WHO-Lösung mit reduzierter Osmolarität
245 mOsm/l, gegenüber 311 bei der ursprünglichen Lösung

Gerettete Kinder, 1982–2007
Mehr als 50 Millionen (Schätzung von Fontaine, Garner und Bhan)

Behandlungszentrum Bongaon, 1971
3,6 % von 3.703 Cholerakranken starben, gegenüber fast 30 % zu Beginn des Ausbruchs

Durchfalltote unter fünf Jahren
Etwa 444.000 pro Jahr (WHO, 2024)

Quellen

1. Diarrhoeal disease (fact sheet, 7 March 2024) · World Health Organization https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/diarrhoeal-disease
2. Cholera (fact sheet) · World Health Organization https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cholera
3. Clinical management of acute diarrhoea: WHO/UNICEF joint statement (2004) · World Health Organization https://www.who.int/publications/i/item/WHO_FCH_CAH_04.7
4. Oral rehydration salts (ORS) and zinc · UNICEF Supply Division https://www.unicef.org/supply/oral-rehydration-salts-ors-and-zinc
5. Zinc and ORS (S. Singh, 2007) · Pediatric Oncall Journal, vol. 4 no. 1 https://www.pediatriconcall.com/pediatric-journal/view/fulltext-articles/165/J/0/0/251/0
6. Robert K. Crane: Na+-glucose cotransporter to cure? (K. L. Hamilton, 2013) · Frontiers in Physiology https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2013.00053/full
7. Oral rehydration therapy: a low-tech solution that has saved millions of lives · Our World in Data https://ourworldindata.org/oral-rehydration-therapy
8. Magic bullet: the history of oral rehydration therapy (J. N. Ruxin, 1994) · Medical History, vol. 38 no. 4 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1036912/
9. Leith in the time of cholera: the story of Thomas Latta (G. A. Venters) · Hektoen International https://hekint.org/2017/02/01/leith-in-the-time-of-cholera-the-story-of-thomas-latta/
10. Treatment of cholera: Robert Allan Phillips (1967 Clinical Medical Research Award) · Lasker Foundation https://laskerfoundation.org/winners/treatment-of-cholera/
11. A simple solution: the history of ORS in Bangladesh · The World (PRX) https://theworld.org/stories/2013/06/25/simple-solution-history-ors-bangladesh
12. Oral fluid therapy of cholera among Bangladesh refugees (Mahalanabis et al., 1973) · Johns Hopkins Medical Journal, vol. 132 no. 4 https://pure.johnshopkins.edu/en/publications/oral-fluid-therapy-of-cholera-among-bangladesh-refugees-5/
13. Treating cholera · Centers for Disease Control and Prevention https://www.cdc.gov/cholera/treatment/

Fakten geprüft am 2026-10-14

Register

Aluminium . . . 340
Anästhesie . . . 297
Aquädukt . . . 148
Astronavigation . . . 213
Batterie . . . 243
Beherrschung des Feuers . . . 9
Bewässerung . . . 52
Bier . . . 79
Bleiakkumulator . . . 307
Bogen und Gewölbe . . . 74
Brille . . . 200
Bronze . . . 125
Brot . . . 27
Computer . . . 370
Dampflokomotive . . . 247
Dampfmaschine . . . 230
Dampfturbine . . . 330
Destillation . . . 176
Druckerpresse . . . 208
Eisenverhüttung . . . 138
Elektrischer Generator . . . 277
Elektrischer Telegraf . . . 289
Elektromotor . . . 281
Fahrrad . . . 256
Färben . . . 70
Fernrohr . . . 221
Flugzeug . . . 357
Fotografie . . . 264
Fruchtfolge . . . 111
Glas . . . 134
Glühlampe . . . 326
Heißluftballon . . . 234
Holzkohle . . . 65
Hygiene und Antisepsis . . . 302
Impfung . . . 238
Kalk und Kalkmörtel . . . 31
Kältetechnik . . . 285
Käse . . . 57
Kolbenpumpe . . . 164
Konserven & Pasteurisierung . . . 251
Kran & Flaschenzug . . . 152
Kummet . . . 180
Ledergerbung . . . 103
Magnetkompass . . . 196
Maße und Gewichte . . . 129
Mikroskop . . . 217
Nähmaschine . . . 273
Orale Rehydratation . . . 380
Papier . . . 172
Penicillin . . . 361
Pfeil & Bogen . . . 18
Pflug . . . 61
Pökeln & Einsalzen . . . 48
Portlandzement . . . 260
Rad & Achse . . . 83
Räderuhr . . . 204
Radio . . . 349
Römischer Beton . . . 168
Röntgenaufnahme . . . 353
Schloss & Schlüssel . . . 116
Schrift . . . 87
Schwarzpulver . . . 184
Segel . . . 91
Seife . . . 95
Seil & Schnur . . . 13
Solarzelle . . . 375
Sonnenuhr . . . 107
Spinnrad . . . 192
Stahl . . . 143
Stahlbeton . . . 313
Steinwerkzeuge . . . 5
Stellenwertsystem . . . 99
Telefon . . . 322
Thermometer und Barometer . . . 225
Töpferei . . . 23
Töpferscheibe . . . 121
Transformator . . . 335
Transistor . . . 366
Trinkwasser . . . 35
Verbrennungsmotor . . . 318
Vulkanisierter Kautschuk . . . 293
Wasserrad . . . 160
Wasserturbine . . . 268
Weben . . . 44
Windkraftanlage . . . 344
Windmühle . . . 188
Zahnräder . . . 156
Ziegel . . . 40

Wie der Kodex entsteht

Jede Tafel wird aus Quellen geschrieben: Museen, Enzyklopädien, wissenschaftliche und technische Literatur. Daten und Zahlen werden an mindestens zwei unabhängigen Quellen geprüft, die unter jeder Tafel stehen, und jede Tafel wird vor der Veröffentlichung gegengelesen. Wo sich die Quellen widersprechen, sagt der Text das.

Die Abbildungen der Tafeln entstehen mit einem Bildgenerator und werden danach von Hand geprüft: Jeder Mechanismus, jede Anzahl von Teilen und jede Verbindung wird mit den Quellen verglichen. Die interaktiven Figuren werden aus einem Modell der Maschine in Code gezeichnet.

Fachwörter erklärt das Glossar.

Urheberrecht

Texte, Tafeln und Figuren von The Last Codex sind eigene Werke von Etienne Debost und stehen unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de). Sie dürfen sie kopieren und weitergeben, auch die ganze Website zum Lesen ohne Internet, wenn Sie The Last Codex und seine Adresse nennen, nichts verändern und sie nicht kommerziell nutzen. Jede andere Nutzung braucht eine schriftliche Genehmigung. Gestaltung und Code der Website fallen nicht unter diese Lizenz: alle Rechte vorbehalten.

Icons: game-icons.net (CC BY 3.0) und Phosphor (MIT). Schriften: EB Garamond, Source Sans 3 und IBM Plex Mono (SIL Open Font License).