



Dirk Fox
Thomas Püttmann

Bauen, erleben, begreifen:
**Technik-
geschichte
mit fischertechnik**

16 Meilensteine zum Nachbauen

edition **Make:**



dpunkt.verlag





Dirk Fox ist Informatiker, Gründer und Geschäftsführer eines Beratungsunternehmens für IT-Sicherheit, Herausgeber einer Fachzeitschrift für Datenschutz und Datensicherheit, Vorstand eines großen IT-Netzwerks – und begeisterter »fischertechniker«. Er gibt die fischertechnik-Zeitschrift »ft:pedia« heraus und setzt sich für den Ausbau des Technikunterrichts an deutschen Schulen ein – mit fischertechnik.



Thomas Püttmann ist außerplanmäßiger Professor für Mathematik an der Ruhr-Universität Bochum. Zur Vermittlung von Themen aus den Bereichen Mathematik, Technik und Naturwissenschaften entwickelt er gezielt lehrreiche Modelle, wenn möglich aus fischertechnik. Als echter Mathematiker optimiert er seine Konstruktionen so lange, bis man keinen Stein mehr weglassen oder verschieben kann. Regelmäßig schreibt er Beiträge für die ft:pedia.

Dirk Fox
Thomas Püttmann

Bauen, erleben, begreifen: Technikgeschichte mit fischertechnik

16 Meilensteine zum Nachbauen



dpunkt.verlag

Dirk Fox E-Mail: dirk.fox@secorvo.de
Thomas Püttmann E-Mail: Thomas.Puettmann@rub.de

Lektorat: Dr. Michael Barabas
Copy-Editing: Sandra Gottmann, Münster-Nienberge
Herstellung: Susanne Bröckelmann, Heidelberg
Satz: Ulrich Borstelmann, Dortmund
Umschlaggestaltung: Helmut Kraus, www.exclam.de
Druck und Bindung: M. P. Media-Print Informationstechnologie GmbH, 33100 Paderborn

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN:
Buch 978-3-86490-296-3
PDF 978-3-86491-791-2
ePub 978-3-86491-792-9
mobi 978-3-86491-793-6

1. Auflage 2015
1., korrigierter Nachdruck 2016
Copyright © 2015 dpunkt.verlag GmbH
Wieblinger Weg 17
69123 Heidelberg

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung der Texte und Abbildungen, auch auszugsweise, ist ohne die schriftliche Zustimmung des Verlags urheberrechtswidrig und daher strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen.

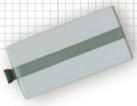
Es wird darauf hingewiesen, dass die im Buch verwendeten Soft- und Hardware-Bezeichnungen sowie Markennamen und Produktbezeichnungen der jeweiligen Firmen im Allgemeinen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz unterliegen.

Alle Angaben und Programme in diesem Buch wurden mit größter Sorgfalt kontrolliert. Weder Autor noch Verlag können jedoch für Schäden haftbar gemacht werden, die in Zusammenhang mit der Verwendung dieses Buches stehen.

5 4 3 2 1



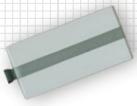
1	Der Flaschenzug	1
	Faktorenflaschenzug	3
	Potenzflaschenzug	7
	Differenzialflaschenzug	8
	Differenzialwinde	9
	Krane mit Wellrad	10
	Tretradkrane	11
	Literatur	14
2	Das Getriebe	15
	Sakijen und Mühlen	17
	Steinsägemühlen	19
	Kraftverstärkung	21
	Übersetzungen	22
	Das Hodometer	25
	Der Antikythera-Mechanismus	26
	Literatur und Links	29
3	Das Differenzialgetriebe	31
	Angetriebene Fahrzeuge	32
	Das White'sche Dynamometer	33
	Das White'sche Differenzialrad	36
	Mathematische Beschreibung	37
	Äquationsuhren	40
	Kompasswagen	43
	Literatur und Links	49



4	Die Uhr	51
	Einleitung	52
	Uhren und Zeiteinteilung	53
	Spindel mit Waagbalken	56
	Frühe Uhren mit Schlagwerk	59
	Das Pendel	59
	Die Ankerhemmung	61
	Die Unruh	62
	Ruhende Hemmungen	63
	Das Turmuhr-Modell	65
	Aufbau und Funktion	66
	Die Antriebseinheit (Gehwerk)	67
	Die Spindelhemmung	68
	Stabpendel	70
	Gewichte und Seile	71
	Die Anzeigeeinheit	71
	Der Antrieb des Schlagwerks	73
	Die Auslösung des Schlagwerks	74
	Die Schlossscheibe	74
	Das Schlagrad	75
	Laufzeit und Genauigkeit	77
	Literatur und Links	77
5	Das Planetarium	79
	Armillarsphären	80
	Astronomische Uhren	85
	Mondphasen	89
	Epizykel	91
	Wechsel des Weltbilds	94
	Tellurien	96
	Planetarien	98
	Merkur, Venus, Erde	101
	Der Aufbau	103
	Merkur- und Venusgetriebe	106
	Sonne und Planeten	107
	Bahngeschwindigkeiten	107
	Konjunktionen und Transite	108



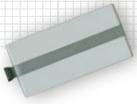
	Sternbilder	110
	Venus- und Merkurphasen	111
	Motorisierung	113
	Literatur und Links	114
6	Die Rechenmaschine	115
	Einleitung	116
	Geschichte	116
	Der Abakus	118
	Uhren und Zählwerke	120
	Die Rechenuhr	121
	Ein zweiter Anfang	123
	Leibniz	124
	Planetenge triebe	127
	Das Rechenmaschinenmodell	131
	Addierwerk	131
	Eingaberegister	135
	Koppeln mehrerer Maschinen	137
	Bedienung	138
	Literatur und Links	139
7	Der Sextant	141
	Warnung	142
	Geschichte	142
	Der Quadrant	145
	Geografische Breite	146
	Mittagshöhe der Sonne	148
	Geografische Länge	149
	Standlinien	151
	Der Sextant	153
	Aufbau	153
	Handhabung und Funktion	153
	Nachbau	155
	Anbringen der Skalen	155
	Messungen	156
	Literatur und Links	156



8	Die Dampfmaschine	159
	Geschichte	160
	Das Dampfmaschinenmodell	169
	Das Getriebe.	171
	Das Schwungrad	174
	Die Geradführung	176
	Die Druckluftzufuhr	178
	Literatur	182
9	Die Achsschenkelenkung	183
	Die Entwicklung der Lenkung	184
	Schwenkachslenkung	184
	Knicklenkung.	188
	Einzelradlenkung.	189
	Die Achsschenkelenkung	191
	Entwicklung.	193
	Konstruktion	195
	Lenkfehler	196
	Spurkreis	200
	Varianten und Alternativen.	201
	Funktionsmodelle.	201
	Spezialteile für Lenkungen	205
	Literatur	208
10	Der Elektromotor	209
	Funktionsweise.	212
	Jakobi-Motor	213
	fischertechnik-Elektromotor	215
	Synchronmotor.	218
	Synchronuhr	219
	Literatur	224



11	Der Telegraf	225
	Optische Telegrafen	226
	Erster elektrischer Telegraf	228
	Nadeltaelegrafen	229
	Zeigertelegrafen	231
	Morsetelegraf	238
	Literatur	245
12	Die Normalzeit	247
	Die gesetzliche Zeit	248
	Das Zeitsignal	250
	Funksignal	250
	Referenzzeit	252
	Vollständige Zeitinformation	252
	DCF77-Zeitcode	253
	DCF77-Empfänger	255
	Die Hardware	255
	Die Software	256
	Weitere Funktionen	260
	Literatur	261
13	Der Film	263
	Lichtbilder	264
	Bewegte Bilder	265
	Fotografie	269
	Projektoren	272
	Literatur	279
14	Das Raupenfahrzeug	281
	Geschichte	282
	Raupenkette	284
	Lenkung	286
	Getrennter Antrieb	287
	Kupplungen	288
	Schaltung	289



	Differenzial mit Bremse	289
	Kontrollierte Differenzialsteuerung	290
	Überlagerungsgetriebe	291
	Gleichlaufgetriebe	293
	Einsatz von Raupenantrieben	295
	Einbau in Raupenfahrzeuge	295
	Einbau in Wasserfahrzeuge	296
	Einbau in autonome Fahrzeuge	298
	Literatur	299
15	Das Radar	301
	Geschichte	302
	Echoortung	304
	Ultraschallsensor	305
	Funktionsmodelle	306
	Fahrzeugradar	306
	Radarfalle	311
	Literatur	312
16	Der Hubschrauber	313
	Dynamischer Auftrieb	315
	Drehflügler	316
	Entwicklung	316
	Igor Sikorsky	318
	Funktionsmodell	320
	Der Heckrotor	320
	Hauptrotor mit Taumelscheibe	321
	Literatur	328
	Zeitleiste	329
	Bildnachweise	343



Zur Einführung

Die Geschichte der Entwicklung der Menschheit ist vor allem eine Geschichte der Entwicklung der Technik.

Denn dass ein biologisch wenig spezialisiertes und angepasstes Lebewesen wie der Mensch bis heute überlebt hat, verdankt er in erster Linie seiner (technischen) Erfindungsgabe. Technische Errungenschaften erlauben es dem Menschen, Arbeiten zu verrichten, die weit über seine physischen Kräfte hinausgehen, sich Energien dienstbar zu machen, Distanzen zu überwinden, sich von Temperatur und Wetter weitgehend unabhängig zu machen und über große Entfernungen mit anderen Menschen in Kontakt zu treten.

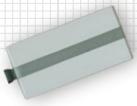
In den vergangenen 2000 Jahren haben technische Entwicklungen das Leben der Menschheit grundlegender und umfassender verändert als Millionen von Jahren davor.

Dennoch ist die Geschichte der jüngsten 2000 Jahre, die heute in der Schule gelehrt wird, in erster Linie eine Geschichte von Macht und Krieg, von Herrschaft und sozialen Verhältnissen. Bis auf die Phase der industriellen Revolution, in der sich der Einfluss von Technik nicht ignorieren lässt, spielt die Geschichte der Technik darin keine Rolle.

Wer aber hat – auf lange Sicht – die Entwicklung der Welt wohl nachhaltiger beeinflusst: Ludwig XIV. oder Christiaan Huygens' Pendeluhr? Napoleon Bonaparte oder die Erfindung der Dampflokomotive durch seinen Zeitgenossen Richard Trevithick? Karl Marx oder die von Samuel Morse entwickelte Telegrafie?

Dieses Buch erzählt daher eine andere Geschichte. Es ist die Geschichte einiger großer Erkenntnisse und Innovationen, die unser heutiges Leben geprägt haben. Es ist eine Geschichte, die nicht werten, aber würdigen will. Sie erzählt von Erfindern und Machern, die sich nicht mit dem theoretischen Verständnis von Zusammenhängen zufrieden gegeben haben, sondern so lange an ihrer praktischen Umsetzung und Nutzbarmachung getüftelt haben, bis sie eine funktionierende Lösung vor sich hatten.

Unsere Auswahl von 16 Meilensteinen ist subjektiv, und zweifellos lassen sich mit guten Argumenten weitere nennen, die in einer Geschichte der Technik eigentlich nicht fehlen dürfen. Unstrittig dürfte aber sein, dass den von uns ausgewählten Innovationen der Ehrentitel »Meilenstein« gebührt.



Wir erzählen unsere Geschichte mit der Unterstützung von prototypischen Modellen. Sie sollen zum Nach- und Weiterbauen anregen, denn erst durch die eigene Konstruktion wird die Genialität vieler Innovationen nachvollziehbar, manchmal geradezu haptisch erlebbar. Wir haben die Modelle mit einem Baukastensystem nachkonstruiert, das eine äußerst schnelle Entwicklung von Prototypen erlaubt und zugleich realen Verhältnissen sehr nahe kommt: mit fischertechnik.

In diesem Jahr feiert das fischertechnik-Baukastensystem, das nach unserer festen Überzeugung in keinem Kinderzimmer der Welt fehlen sollte, seinen 50sten Geburtstag. Wie kein zweites technisches Spielzeug vermittelt es technisches Grundverständnis und begeistert zugleich für technische Zusammenhänge.

Entwickelt wurde es von dem genialen Erfinder Artur Fischer, mit weit über 1000 Patenten ein zweiter Thomas Alva Edison.

Ihm widmen wir dieses Buch – zum Dank für die ungezählten wunderbaren, faszinierenden und erkenntnisreichen Stunden, die seine Erfindung uns und unseren Kindern beschert hat.

Dirk Fox und Thomas Püttmann



Hinweise

- Im Anhang haben wir eine Zeitleiste mit den in diesem Buch genannten technischen Innovationen beigefügt – eingebettet in den historischen Kontext. Sie gibt einen Eindruck davon, mit welcher Macht und Geschwindigkeit technische Entwicklungen vor allem die jüngsten 200 Jahre unserer Zeitrechnung geprägt haben.
- Ein Buch ist in der heutigen Zeit schon fast ein Anachronismus. Tatsächlich lassen sich viele Informationen (wie z.B. Onlinequellen, Bauanleitungen oder Programmdateien) viel leichter über ein Onlinemedium vermitteln. Daher gibt es eine Webseite zu diesem Buch mit weiterführenden Materialien: <http://www.technikgeschichte-mit-fischertechnik.de>
- Die Modelle in diesem Buch können alle mit heute noch käuflich zu erwerbenden fischertechnik-Bauteilen nachgebaut werden. Wem einzelne Bauteilbezeichnungen, die wir verwenden, nicht geläufig sind, kann sie in der offiziellen Bauteilliste von fischertechnik nachschlagen, die wir auf der Webseite zum Buch verlinkt haben. Dort finden sich auch Bezugsquellen für fischertechnik-Baukästen und Einzelteile.
- Zu allen Modellen, die sich nicht so leicht anhand der Fotos in diesem Buch nachbauen lassen, haben wir eine 3D-Bauanleitung mit Bauteilliste erstellt und zum Download auf der oben angegebenen Webseite bereitgestellt. Die 3D-Bauanleitungen wurden mit dem Programm *fischertechnik designer* von Michael Samek entworfen. Auf der Webseite <http://3dprofi.de> gibt es ein kostenloses Demo-Programm für Windows und einen Apple-Reader zum Download, mit dem die Anleitungen genutzt werden können.
- Einige wenige Modelle verwenden einen fischertechnik-Controller (ROBO TX oder ROBOTICS TXT). Die Programme in der Programmiersprache ROBO Pro können ebenfalls von der Webseite zum Buch heruntergeladen werden.
- Alle Literaturhinweise, die über eine Internetquelle erreichbar sind, finden sich ebenfalls auf der Webseite zum Buch und können dort direkt angeklickt werden.

1

Der Flaschenzug

Schon in der Frühzeit der Menschheitsgeschichte war die Überwindung der Begrenztheit menschlicher Kraft eine der großen Herausforderungen. Vor über 2000 Jahren entdeckten die Menschen eine technische Lösung, um selbst tonnenschwere Gegenstände, wie z. B. große Steinblöcke, mit Menschenkraft anzuheben.



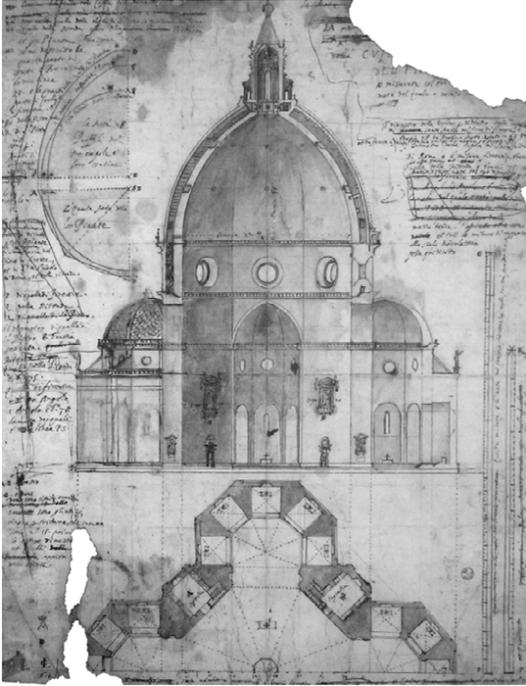


Abb. 1–1 Kuppel des Doms von Florenz, Zeichnung von Filippo Brunelleschi (um 1419)



Abb. 1–2 Flaschenzug

In einer Zeit, in der als Kraftquelle nur die Muskelkraft von Mensch und Tier zur Verfügung stand, war die Entdeckung einer Mechanik, mit der es gelang, die Kraftwirkung zu vergrößern, von größter Bedeutung. Neben dem Hebelgesetz, das bereits in der Antike von dem griechischen Mathematiker und Physiker *Archimedes von Syrakus* (287–212 v. Chr.) aufgestellt wurde und die Grundlage der Mechanik bildet, revolutionierte die Erfindung des Flaschenzugs die Bautechnik. Mit Flaschenzügen gelangen in der Antike und Renaissance architektonische Leistungen wie das Colosseum in Rom oder die Kuppel des Florenzer Doms von *Filippo Brunelleschi* (1377–1446), bis heute beeindruckende Meisterwerke.

Die Funktion eines Flaschenzugs – dessen Bezeichnung übrigens nichts mit Gefäßen für Flüssigkeiten zu tun hat, sondern von den Rollenhalterungen stammt, die dieselbe Bezeichnung trugen – ist schnell erklärt. Die für eine bestimmte *Hubarbeit*

– das Anheben eines bestimmten Gewichts um eine definierte Höhe – erforderliche Kraft lässt sich über die Länge des zu überwindenden *Hubwegs* steuern, da die *Hubarbeit* als Produkt aus Kraft und Weg berechnet wird: Mit einem längeren Hubweg benötigt man weniger Kraft für dieselbe *Hubarbeit*.

Ein Flaschenzug verlängert nun künstlich den Hubweg, genauer: die Länge des für die Leistung der *Hubarbeit* aufzuwickelnden Zugschleifs. Damit ist weniger Kraft für die *Hubarbeit* erforderlich. Der Preis, den man für diese »Kraftverstärkung« zahlt: Man muss länger ziehen oder kurbeln.



Faktorenflaschenzug

Wenn wir heute von einem Flaschenzug sprechen, meinen wir in der Regel einen *Faktorenflaschenzug*, der die Seillänge durch »Schlingen« und Seilrollen künstlich verlängert.

Schon ein einfacher Flaschenzug mit einer Schlinge verdoppelt die Länge des Zugseils und halbiert damit die benötigte Kraft: Ein Mensch, der maximal 50 kg bewegen kann, kann mit einem solchen Flaschenzug bis zu 100 kg Last anheben.

In der Antike wurden Flaschenzüge von Griechen und Römern in einfachen Kränen eingesetzt. Der römische Ingenieur *Marcus Vitruvius Pollo* (ca. 80–15 v. Chr.) beschrieb den zu seiner Zeit verbreiteten *Trispastos*, einen einfachen Kran mit Drei-Rollen-Flaschenzug, der die Kraft des Bedieners mit einem zusätzlichen Hebel an der Winde insgesamt etwa verzehnfachte (Abb. 1–3).

Solche Flaschenzüge waren wahrscheinlich schon seit etwa 750 v. Chr. bekannt und kamen auf Baustellen und im Theater zum Einsatz. Dabei sorgte der Flaschenzug für eine Verdreifachung der Kraftwirkung; der Hebel an der Winde (Hassel) bewirkte eine zusätzliche Vervielfachung der Kraft des Bedieners.

Die beeindruckende Wirkung eines solchen »Kraftverstärkers« lässt sich durch einen Nachbau des *Trispastos* in fischertechnik demonstrieren. Abb. 1–4 zeigt ein Modell, das einen Ver-

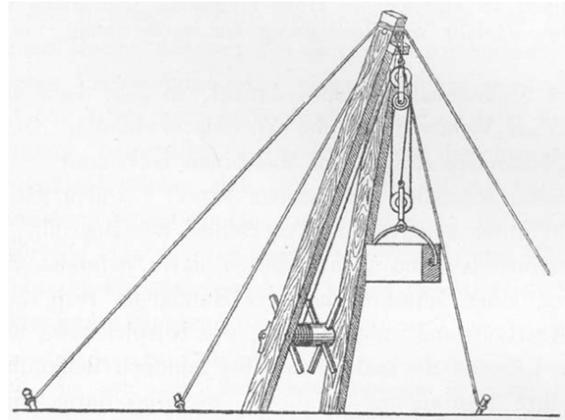


Abb. 1–3 Römischer *Trispastos* nach Vitruv



Abb. 1–4 fischertechnik-Modell eines *Trispastos*

stärkungsfaktor von etwa 18 besitzt. Problemlos kann man mit dieser einfachen Konstruktion eine mit Gewindestangen gefüllte Kiste (450 g) hochziehen.

Die Kräfteinsparung (oder -verstärkung) lässt sich mit weiteren »Schlingen« vergrößern: Die für die Hubarbeit benötigte Kraft F_Z sinkt bei n Seilwegen (= Seilrollen) auf ein n -tel der Gewichtskraft der Last F_L :

$$F_Z = \frac{F_L}{n}$$

Daher liegt es nahe, die von einem Kran oder einer Seilwinde leistbare Hubarbeit zu vergrößern, indem man den Flaschenzug um weitere Rollen ergänzt.

Dafür gibt es im Wesentlichen zwei Ansätze: die Anordnung der Rollen nebeneinander (horizontal) und die Anordnung übereinander (vertikal). Mit letzterer lässt sich der Flaschenzug schlanker realisieren; dafür reduziert sich konstruktionsbedingt die maximale Hubhöhe, da ein Teil für die vertikale Anordnung der Rollen benötigt wird.

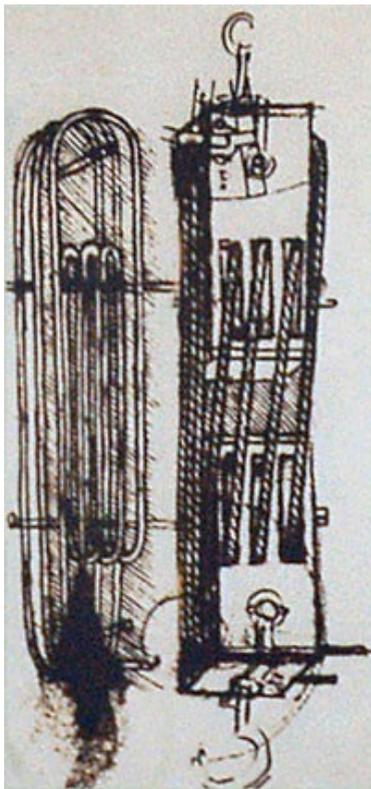


Abb. 1–5 Flaschenzug von Leonardo da Vinci

Eine kompakte Konstruktion eines sowohl horizontalen als auch vertikalen Flaschenzugs mit 12 Rollen, bei der die Rollen sowohl nebeneinander als auch übereinander angeordnet sind, ist vom Universalgenie der Renaissance, *Leonardo Da Vinci* (1452–1519), überliefert (Abb. 1–5).

Flaschenzüge aus fischertechnik finden sich schon in der Anleitung zum *Grundkasten* aus dem Jahr 1966 (S. 20, Abb. 1–6).

In hobby 1, Band 1 [4] wurde dem Flaschenzug 1972 ein eigenes Kapitel gewidmet. Wirken die frühen fischertechnik-Flaschenzüge noch etwas plump und eher wie grobe Funktionsmodelle, gelingt unter Verwendung von Statikkomponenten wie z.B. den S-Laschen (oder den heutigen Laschen 21,2) eine deutlich elegantere Konstruktion (linke Variante in Abb. 1–7) – zu finden z.B. in der Anleitung zum *Aufbau-Statikkasten 50S/3* aus dem Jahr 1975. Auch die Kreuzknotenplatten aus den frühen Statikkästen von 1970 erlauben eine ansprechende Konstruktion wie die zweite Variante von rechts in Abb. 1–7, zu finden z.B. in hobby 2 Band 4 [5], (S. 18, 20, 49).

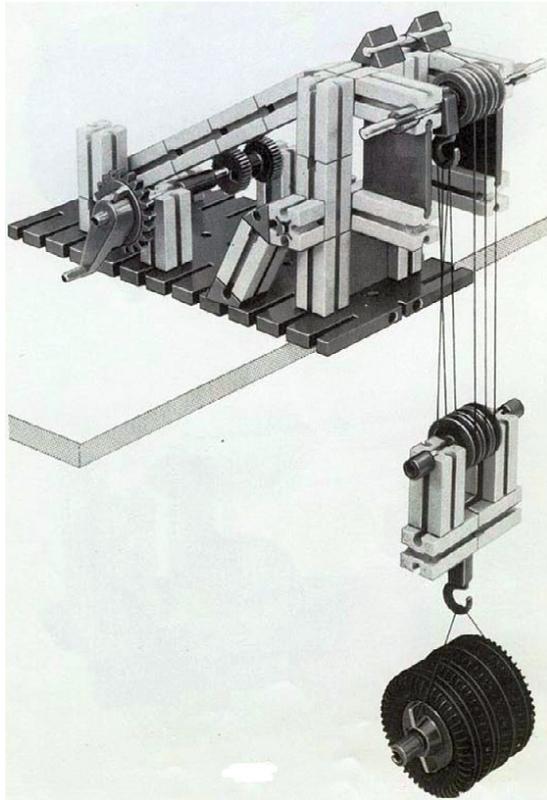


Abb. 1-6 fischertechnik-Flaschenzug von 1966 (aus: Bauanleitung Grundkasten)

Das Rollenlager, 1990 eingeführt mit dem Modellkasten *Starlifters*, eignet sich ebenfalls zur Konstruktion eines Flaschenzugs (rechte Variante in Abb. 1-7).

Auch mit den Kupplungsstücken aus dem *Universal*-Baukasten von 1997, verwendet in der zweiten Variante von links in Abb. 1-7, lässt sich ein Flaschenzug konstruieren, siehe die zugehörige Bauanleitung (Abb. 1-8).

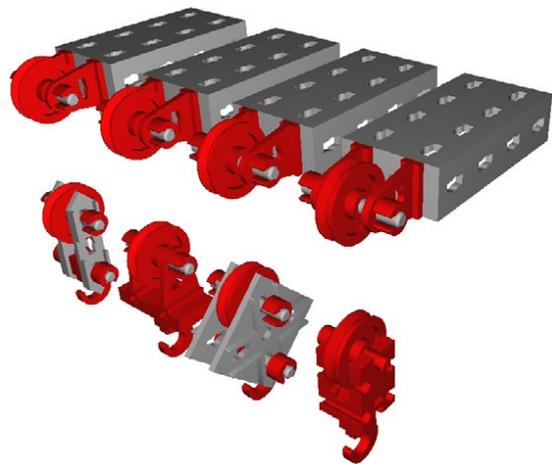


Abb. 1-7 Konstruktionsvarianten einfacher fischertechnik-Flaschenzüge

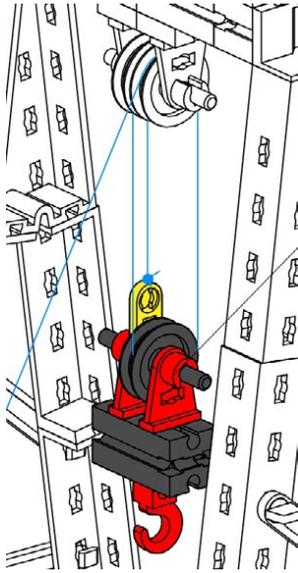


Abb. 1–8 Flaschenzug im
Baukasten
Universal

Bei der Montage der Seilrollen muss man darauf achten, dass die Rollen nicht eingeklemmt werden, sondern möglichst widerstandsarm frei rotieren.

Bei allen gezeigten Varianten wird das Seilende jeweils mit einer der Klemmbuchsen an der oberen Achse befestigt, über die untere Rolle und von dort über die obere Umlenkrolle zu einer Seilwinde geführt.

Will man mehr als eine Verdoppelung der Kraftwirkung erreichen, benötigt man einen Flaschenzug mit weiteren Seilrollen. Auch mit fischertechnik lassen sich die zusätzlichen Rollen sowohl vertikal als auch horizontal anordnen. Abb. 1–9 zeigt vier Realisierungsalternativen für n -fache Flaschenzüge.

Die drei linken Varianten sind auf jeweils vier Rollen beschränkt; damit lässt sich die Kraftwirkung vervierfachen. In der Anleitung zum Teleskop-Mobilkran von 1983 (S. 45) findet sich eine kompakte vertikale Konstruktion.

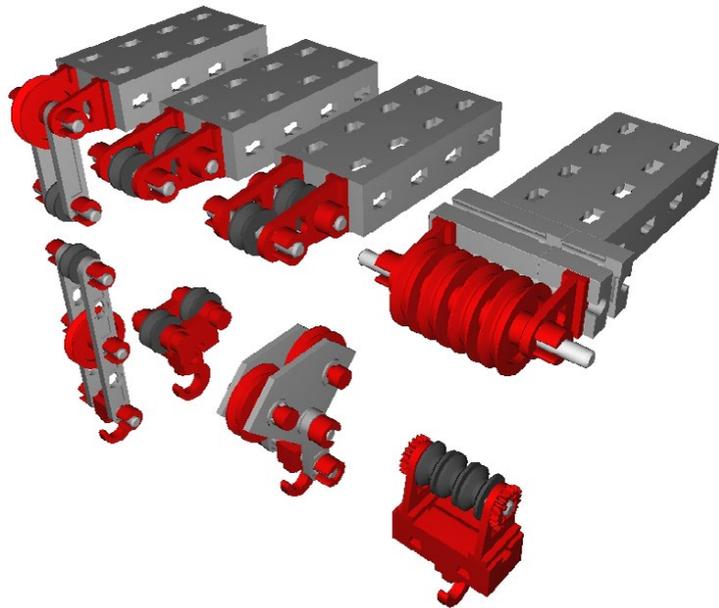


Abb. 1–9 Realisierungsalternativen für n -fache Flaschenzüge



Ein Flaschenzug mit horizontal angeordneten Rollen wird im hobby 2, Band 4 [5], (S. 10) vorgestellt. Er verwendet I-Streben, um Haken und Rollenachse miteinander zu verbinden. Die rechte Variante in Abb. 1–9 erreicht eine Verachtfachung der Kraftwirkung; sie kann zudem leicht um weitere Führungsrollen erweitert werden.

Eine ähnliche Konstruktion findet sich im Abenteuer-Bau-Buch [6], (S. 50 ff.) aus dem Jahr 1985 (Abb. 1–10).

Zu weit sollte man es aber nicht treiben, denn auch mit einem fischertechnik-Flaschenzug lassen sich nicht beliebig große Gewichte anheben – die Hubarbeit geht irgendwann nicht mehr spurlos am Material vorüber.

Spätestens wenn am Antrieb (Schnecke, Zahnrad) Abrieb entsteht, sollte man das Gewicht reduzieren.



Abb. 1–10 7-facher Flaschenzug

Potenzflaschenzug

Der Faktorenflaschenzug ist zwar der einfachste, aber keineswegs der einzige Flaschenzugtyp.

Eine andere Konstruktion liegt dem *Potenzflaschenzug* (Abb. 1–11) zugrunde. Man kann sich ihn als eine Art »Hintereinanderschaltung« mehrerer einfacher Faktorenflaschenzüge vorstellen. Dabei wird mit jeder zusätzlichen Rolle ein weiteres Zugseil eingeführt und damit die erforderliche Kraft halbiert.

Die für die Hubarbeit erforderliche Zugkraft liegt bei n »losen« Rollen also bei einem 2^n -tel der Gewichtskraft der Last:

$$F_Z = \frac{F_L}{2^n}$$

Die Wirkung ist größer als bei einem Faktorenflaschenzug, denn mit nur fünf losen Rollen erreicht man eine Verstärkung von 32. Dennoch findet man diesen Flaschenzugtyp eher selten.

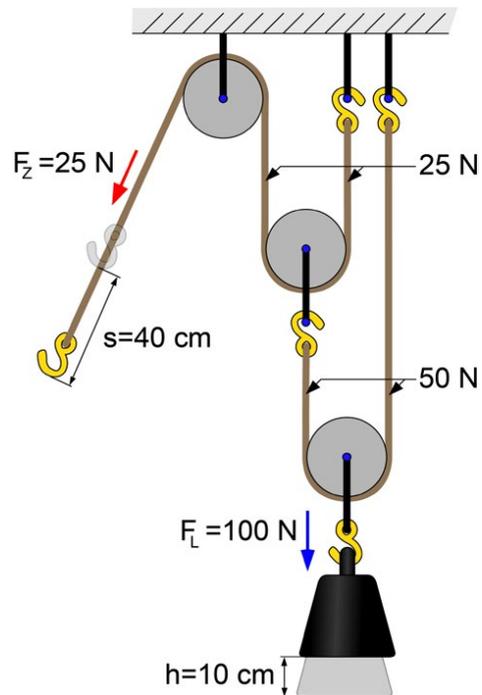


Abb. 1–11 Potenzflaschenzug

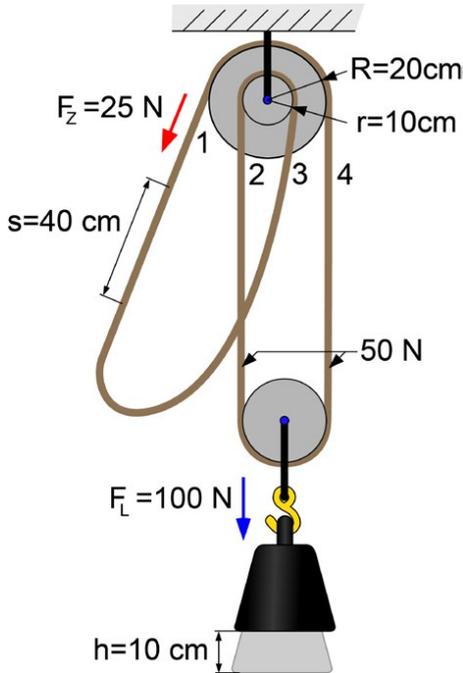


Abb. 1–12 Differenzialflaschenzug

Differenzialflaschenzug

Ein dritter Flaschenzugtyp ist der *Differenzialflaschenzug*. Er besteht aus zwei auf einer Achse fest miteinander verbundenen Rollen mit unterschiedlichem Radius und einer dritten, losen Rolle.

Die Seilführung erfolgt wie bei einem Faktorenflaschenzug, allerdings werden die Seilenden miteinander zu einer großen »Schleife« verbunden (Abb. 1–12). Die Kraftverstärkung berechnet sich hier aus der Differenz der Radien der beiden Rollen.

Denn während über die kleinere Rolle mit Radius r je Umdrehung eine Seillänge von $2\pi \cdot r$ abrollt, verkürzt sich die Seilschleife zugleich um die an der großen Rolle mit Radius R aufgerollte Seillänge $2\pi \cdot R$. Die erforderliche Zugkraft berechnet sich daher aus der Last mit:

$$F_z = \frac{F_L \cdot (R - r)}{2 \cdot R}$$

Ist der Radius R wie in Abb. 1–12 doppelt so groß wie r , genügt ein Viertel der Kraft für die nötige Hubarbeit. Da der Seilzug auf den Rollen nicht durchrutschen darf, werden meist statt eines Seils eine Kette und statt der Rollen Zahnräder verwendet.

Ein fischertechnik-Modell eines Differenzialflaschenzugs mit Kette findet sich in hobby 2, Band 4 [5] auf S. 19 (Nachbau in Abb. 1–13). Das Z20 hat einen Innenradius von $R = 1,5$ cm, beim Z10 ist $r = 0,75$ cm. Statt der Radien können wir auch mit der Anzahl der Zähne rechnen und kommen zu demselben Ergebnis: Die Kraftverstärkung liegt in unserem Modell bei vier. Wir sehen: Je enger die Radien der beiden Zahnräder zusammenliegen, desto größer ist die Kraftverstärkung des Differenzialflaschenzugs. Ersetzen wir das Z10 durch ein Z15, bewirkt der Flaschenzug eine Kraftverstärkung von acht.



Abb. 1–13 Differenzialflaschenzug



Differenzialwinde

Nach demselben Prinzip arbeitet die Differenzialwinde. Sie kommt allerdings ohne Rollen (bzw. Zahnräder) aus. Stattdessen verwendet sie zwei Winden mit unterschiedlichem Durchmesser auf derselben Achse. Die beiden Enden des Zugseils werden auf den Winden in entgegengesetzter Richtung aufgewickelt. Damit wird beim Drehen der Achse das eine Ende des Zugseils auf einer der Winden ab- und das andere auf der anderen Winde aufgewickelt – wegen des unterschiedlichen Durchmessers mit unterschiedlichen Seillängen (Abb. 1–14).

Das Verhältnis der Zugkraft zur Gewichtskraft der Last berechnet sich nach derselben Formel wie beim Differenzialflaschenzug.

Ein Konstruktionsbeispiel für eine solche Differenzialwinde findet sich im hobby 2, Band 4 [5], (S. 18). Das eine Seilende wird dabei auf einer Seiltrommel ($R = 3,75 \text{ mm}$), das andere direkt auf der Achse ($r = 2 \text{ mm}$) aufgewickelt (Abb. 1–15).

Diese Differenzialwinde verstärkt also um den Faktor 4,3 – beim Faktorenflaschenzug benötigen wir dafür mindestens vier Rollen.

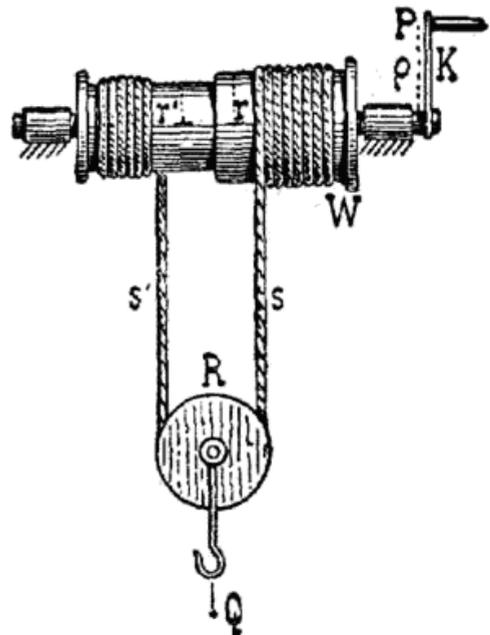


Abb. 1–14 Prinzip der Differenzialwinde

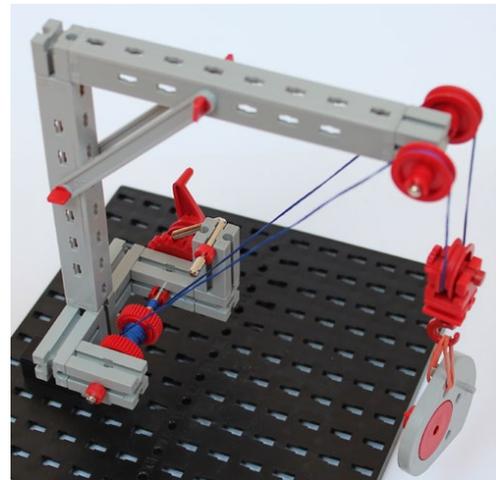


Abb. 1–15 Differenzialwinde

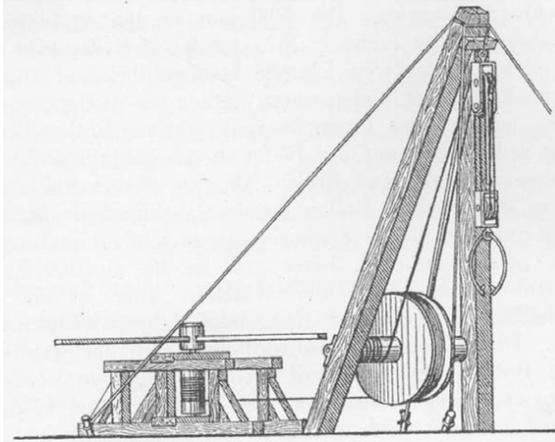


Abb. 1–16 Römischer Kran mit Wellrad



Abb. 1–17 Trispastos mit Wellrad

Krane mit Wellrad

Waren größere Gewichte zu heben, wurde bereits in antiken Kranen neben der Haspel ein *Wellrad* (meist ein Speichenrad) mit großem Durchmesser montiert. Um das Wellrad wurde ein langes Zugseil gewickelt und mit einer Winde verbunden.

Diese Konstruktion bewirkte eine weitere Zugkraftverstärkung. Sie berechnet sich unmittelbar aus dem Verhältnis der beiden Radien von Haspel (r) und Wellrad (R):

$$F_z = \frac{F_L \cdot r}{R}$$

Bereits bei Vitruv findet sich eine Beschreibung eines solchen römischen Baukrans (Abb. 1–16).

Ersetzt man in unserem Trispastos-Modell die Winde durch ein Speichenrad, so werden das Funktionsprinzip und die Wirkung dadurch veranschaulicht (Abb. 1–17).

Die Kraftverstärkung des Trispastos vergrößert sich durch das Wellrad ($R = 4,5$) um den Faktor 12 auf 216. Bei der Konstruktion muss man darauf achten, dass das Zugseil am Wellrad die 12fache Länge des Seils an der vorderen Seiltrommel haben muss.



Tretadkrane

In großen römischen (und später mittelalterlichen) Kranen wurde statt eines Speichenrads ein *Tretad* verwendet, in dem Sklaven oder Arbeiter (Kranknechte) die Hubarbeit nicht mehr nur mit Armkraft, sondern durch Einsatz ihres Körpergewichts verrichteten, was eine weitere Leistungssteigerung bewirkte.

Krane mit Tretad wurden bereits im 1. Jahrhundert von Vitruv beschrieben (Abb. 1–18).

Die älteste bekannte Darstellung eines solchen Tretadkrans findet sich in einem Grabrelief des römischen Bauunternehmers *Quintus Haterius Tychicus* (Haterier-Grab) aus dem 2. Jahrhundert (Abb. 1–19).

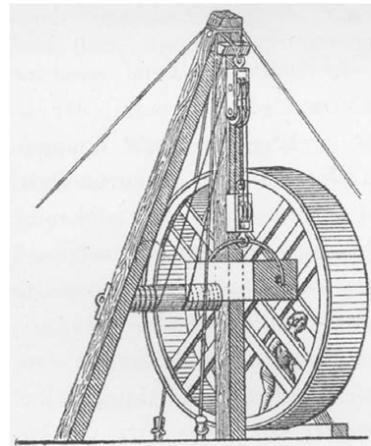


Abb. 1–18 Römischer Kran mit Tretad nach Vitruv



Abb. 1–19 Tretadkran auf dem Grabrelief von Quintus Haterius Tychicus (Haterier-Grab)

Auf dem Relief ist nur ein Ausschnitt des Baukrans abgebildet; dennoch erkennt man deutlich, dass der Kran bereits mit mehreren Flaschenzügen und einem Tretadantrieb arbeitete.



Abb. 1–20 Alter Moselkran in Trier (von 1413)



Abb. 1–21 Treträder des Alten Moselkrans

Nach dem Ende des römischen Reichs ging das Wissen der Römer zunächst verloren. Tretradkrane tauchten erst im späten Mittelalter wieder auf und wurden auf Baustellen und in Häfen eingesetzt. Einer der ältesten Hafenkranne mit Tretrad stand in Brügge (gebaut 1287/88).

Die Tretradkrane des Mittelalters wurden überwiegend drehbar konstruiert, sodass der Kranausleger mit seiner Last geschwenkt werden konnte. Bei vielen Konstruktionen schwenkte das gesamte Tretrad mit, da es zugleich als Gegengewicht für die Kranlast diente. So auch in den Turmhebekränen, von denen es allein in deutschen Binnenhäfen über 60 gab. Europaweit sind nur noch 15 erhalten; einer der ältesten ist der Moselkran in Trier aus dem Jahr 1413, der für eine höhere Entladegeschwindigkeit mit zwei Treträdern ausgestattet und bis 1910 im Einsatz war (Abb. 1–20/1–21). Hier wurde der gesamte Turm mit Ausleger, Last und den beiden Treträdern geschwenkt.

Eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrads der Gewichtskraft brachte die 1615 von *Fausto Veranzio* (1551–1617) vorgeschlagene Verwendung von Sprossenrädern als »Außentrad« (Abb. 1–22).

Von Baukranen mit Tretrad gibt es zahlreiche Nachbauten in Originalgröße, z. B. im Limesmuseum bei Aalen und in der Burg Fleckenstein (Elsass). Mit dem Tretradkran im Technoseum in Mannheim darf man sogar – unter Aufsicht – größere Steinblöcke anheben.



Ein Kranmodell mit Tretrad findet sich auch im hobby 2, Band 4 [5], (S. 10). Abb. 1–22 zeigt ein etwas größeres Modell: Das Tretrad (Sprossenrad) hat einen Radius von 11,5 cm, die Seilrolle ca. 0,375 cm – das ergibt einen Faktor 30 für den Hebel. Der Flaschenzug sorgt zusätzlich für einen Faktor drei.

Ein Mensch kann mit einem solchen Tretradkran theoretisch – wenn wir Reibungsverluste vernachlässigen – etwa das 90fache seines Körpergewichts anheben. Damit könnte ein 30 kg leichtes Kind einen etwa 2,5 Tonnen schweren Stein bewegen. Tatsächlich konnten Tretradkrane der Antike mit einem Fünf-Rollen-Flaschenzug mit zwei Personen Lasten von sechs Tonnen anheben.



Abb. 1–22 fischertechnik-Tretradkran mit dreifachem Flaschenzug

Flaschenzüge, Differenzialwinden und Wellräder sind einfache mechanische Maschinen, mit denen eine Zugkraft verstärkt oder auch abgeschwächt werden kann. Bei Winden mit Motorantrieb sind sie eine Alternative zu Über- oder Untersetzungen durch Getriebe.

Flaschenzüge haben zudem einen positiven Nebeneffekt: Sie stabilisieren das Zugseil, indem sie Verdrillungen erschweren. Ein Objekt lässt sich damit sehr gerade nach oben ziehen. Je mehr Seilstränge, desto widerstandsfähiger ist ein Flaschenzug gegen Torsion.

Schließlich wird das Zugseil entlastet, da auf jeden einzelnen Seilstrang nur ein Bruchteil der Gewichtskraft des zu hebenden Gegenstands wirkt. So kann man mit einem Flaschenzug auch sehr schwere Gegenstände mit einem relativ dünnen Seil anheben.

Literatur

- [1] Theodor Beck: *Beiträge zur Geschichte des Maschinenbaus*. Springer-Verlag, 1899.
- [2] Brian Bolt: *Was hat der Bagger mit Mathematik zu tun?* Klett Verlag, 1995.
- [3] Hans-Liudger Dienel, Wolfgang Meighörner: *Der Tretradkran*. Technikgeschichte und Rekonstruktion, Deutsches Museum, 1995.
- [4] Artur Fischer: *Der Flaschenzug*. In: fischertechnik hobby, Experimente und Modelle, *hobby 1, Band 1*, Fischerwerke, 1972, S. 40–43.
- [5] Artur Fischer: *Krane*. fischertechnik hobby, Experimente und Modelle, *hobby 2, Band 4*, Fischerwerke, 1975.
- [6] Artur Fischer: *Das Abenteuer-Bau-Buch*. Fischerwerke, 1985.
- [7] Heribert Keh: *Der Flaschenzug*. Unterrichtshilfe Technik (u-t). Fischerwerke, 1980.

2

Das Getriebe

Nachdem der Mensch einfache technische Hilfsmittel wie das Rad und den Hebel zu nutzen gelernt hatte, war ein nächster wesentlicher Schritt das gezielte Umformen und Anpassen von Bewegungen durch Getriebe. Das beinhaltet die Änderung von Bewegungsformen, die Nutzbarmachung von Wind-, Wasser- oder tierischer Kraft und die Auslösung oder Simulation von sich wiederholenden Vorgängen.

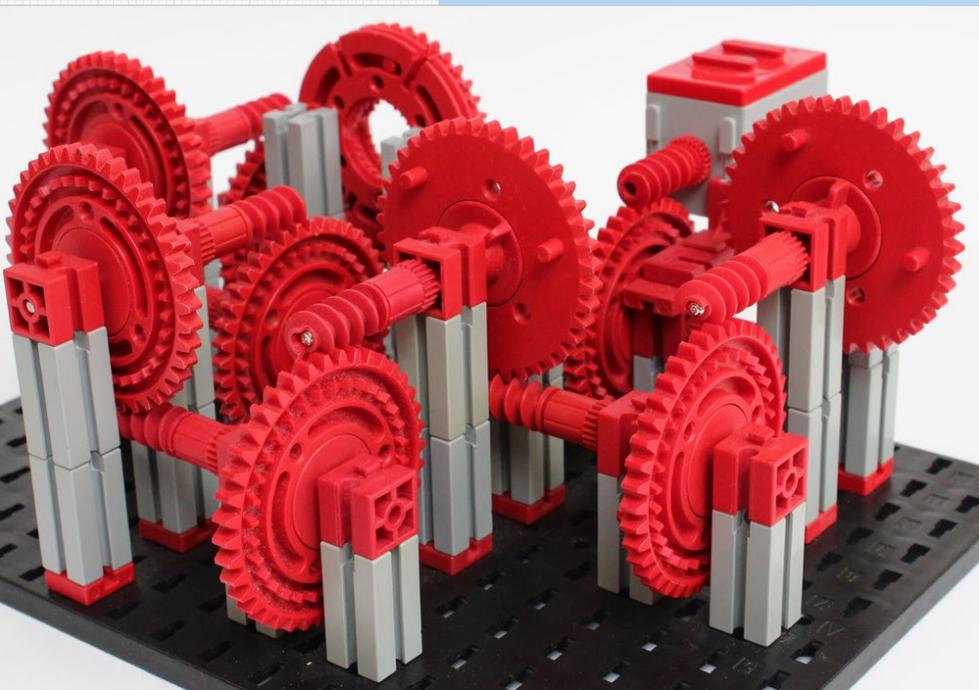




Abb. 2-1 Untersuchung des Schiffswracks vor der Insel Antikythera im Winter 1900/1901

Im Oktober 1900 stießen Schwammtaucher vor der griechischen Insel Antikythera auf ein Schiffswrack. Viele Artefakte (Statuen, Münzen) konnten in den folgenden Monaten aus dem Wrack geborgen werden, anhand derer der Zeitpunkt des Untergangs ins 1. Jahrhundert v. Chr. datiert wurde.

Eines der Fundstücke war ein unscheinbarer Klumpen aus stark korrodierten Bronzeteilen, der bei oder nach der Bergung in mehrere Bruchstücke zerfiel, die sich jetzt im Archäologischen Nationalmuseum in Athen befinden. Die drei größten Fragmente sind ausgestellt, weitere 79 archiviert.

Die große wissenschafts- und technologiegeschichtliche Bedeutung dieses Fundes wurde erst viel später bekannt. Es handelt sich um einen erstaunlich komplexen, feinmechanischen Mechanismus mit mehr als 30 Zahnrädern zur Simulation des Sonnen-, Mond- und möglicherweise auch des Planetenlaufs. Er besaß kalendarische Fähigkeiten und konnte Sonnen- und Mondfinsternisse vorhersagen.

Unser Wissen über antike mechanische Apparate und Maschinen stammt zum großen Teil aus wenigen schriftlichen Hauptquellen wie den *Zehn Büchern über Architektur* von Vitruv (1. Jahrhundert v. Chr.) oder den Werken des Heron von

Alexandria (wahrscheinlich 1. Jahrhundert n. Chr.) und einzelnen Erwähnungen oder Beschreibungen nicht immer technisch versierter Autoren. Artefakte oder bildliche Darstellungen sind selten, und neue Funde bringen bisweilen größere Veränderungen unserer bruchstückhaften Vorstellung von antiker Technologie mit sich. So deutet in den Hauptquellen nichts darauf hin, dass ein Instrument wie der Mechanismus von Antikythera existiert haben könnte. An zwei Stellen seiner Werke erwähnt Cicero (106–43 v. Chr.) Planetarien, aber erst durch den Mechanismus von Antikythera wurde klar, wie solche Geräte konkret funktioniert haben und welche komplexen Getriebe sie enthalten konnten.



Abb. 2-2 Fragment A des Antikythera-Mechanismus. Das große Speichenrad hatte 224 Zähne.