


Dirk Fox
Thomas Püttmann

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

16 Meilensteine zum Nachbauen

edition **Make:**

 dpunkt.verlag



Inhaltsverzeichnis

1 Der Flaschenzug

Faktorenflaschenzug

Potenzflaschenzug

Differenzialflaschenzug

Differenzialwinde

Krane mit Wellrad

Tretradkrane

Literatur

2 Das Getriebe

Sakijen und Mühlen

Steinsägemühlen

Kraftverstärkung

Übersetzungen

Das Hodometer

Der Antikythera-Mechanismus

Literatur und Links

3 Das Differenzialgetriebe

Angetriebene Fahrzeuge

Das White'sche Dynamometer

Das White'sche Differenzialrad

Mathematische Beschreibung

Äquationsuhren

Kompasswagen

Literatur und Links

4 Die Uhr

Einleitung
Uhren und Zeiteinteilung
Spindel mit Waagbalken
Frühe Uhren mit Schlagwerk
Das Pendel
Die Ankerhemmung
Die Unruh
Ruhende Hemmungen
Das Turmuhr-Modell
 Aufbau und Funktion
 Die Antriebseinheit (Gehwerk)
 Die Spindelhemmung
 Stabpendel
 Gewichte und Seile
 Die Anzeigeeinheit
 Der Antrieb des Schlagwerks
 Die Auslösung des Schlagwerks
 Die Schlossscheibe
 Das Schlagrad
 Laufzeit und Genauigkeit
Literatur und Links

5 Das Planetarium

Armillarsphären
Astronomische Uhren
Mondphasen
Epizykel
Wechsel des Weltbilds
Tellurien

Planetarien

Merkur, Venus, Erde

Der Aufbau

Merkur- und Venusgetriebe

Sonne und Planeten

Bahngeschwindigkeiten

Konjunktionen und Transite

Sternbilder

Venus- und Merkurphasen

Motorisierung

Literatur und Links

6 Die Rechenmaschine

Einleitung

Geschichte

Der Abakus

Uhren und Zählwerke

Die Rechenuhr

Ein zweiter Anfang

Leibniz

Planetenge triebe

Das Rechenmaschinenmodell

Addierwerk

Eingaberegister

Koppeln mehrerer Maschinen

Bedienung

Literatur und Links

7 Der Sextant

Warnung

Geschichte

Der Quadrant

Geografische Breite

Mittagshöhe der Sonne

Geografische Länge

Standlinien

Der Sextant

Aufbau

Handhabung und Funktion

Nachbau

Anbringen der Skalen

Messungen

Literatur und Links

8 Die Dampfmaschine

Geschichte

Das Dampfmaschinenmodell

Das Getriebe

Das Schwungrad

Die Geradföhrung

Die Druckluftzuföhr

Literatur

9 Die Achsschenkelenkung

Die Entwicklung der Lenkung

Schwenkachslenkung

Knicklenkung

Einzelradlenkung

Die Achsschenkelenkung

Entwicklung

Konstruktion

Lenkfehler

Spurkreis

Varianten und Alternativen

Funktionsmodelle

Spezialteile für Lenkungen

Literatur

10 Der Elektromotor

Funktionsweise

Jakobi-Motor

fischertechnik-Elektromotor

Synchronmotor

Synchronuhr

Literatur

11 Der Telegraf

Optische Telegrafen

Erster elektrischer Telegraf

Nadeltelegrafen

Zeigertelegrafen

Morsetelegraf

Literatur

12 Die Normalzeit

Die gesetzliche Zeit

Das Zeitsignal

Funksignal

Referenzzeit

Vollständige Zeitinformation

DCF77-Zeitcode

DCF77-Empfänger

Die Hardware

Die Software

Weitere Funktionen

Literatur

13 Der Film

Lichtbilder

Bewegte Bilder

Fotografie

Projektoren

Literatur

14 Das Raupenfahrzeug

Geschichte

Raupenkette

Lenkung

Getrennter Antrieb

Kupplungen

Schaltung

Differenzial mit Bremse

Kontrollierte Differenzialsteuerung

Überlagerungsgetriebe

Gleichlaufgetriebe

Einsatz von Raupenantrieben

Einbau in Raupenfahrzeuge

Einbau in Wasserfahrzeuge

Einbau in autonome Fahrzeuge

Literatur

15 Das Radar

Geschichte

Echoortung

Ultraschallsensor

Funktionsmodelle

Fahrzeugradar

Radarfalle

Literatur

16 Der Hubschrauber

Dynamischer Auftrieb

Drehflügler

Entwicklung

Igor Sikorsky

Funktionsmodell

Der Heckrotor

Hauptrotor mit Taumelscheibe

Literatur

Zeitleiste

Bildnachweise

4 Die Uhr

Keine andere Erfindung hat die Entwicklung unserer Zivilisation andauernder und nachhaltiger beeinflusst als die der Uhr. Das Einteilen der Zeit in immer kleinere gleichmäßige Portionen und die immer weiter reichenden Techniken zur Synchronisation ermöglichen erst das feinverzahnte globale Ineinandergreifen menschlicher und maschineller Tätigkeiten, das wir heute kennen. Einige der entscheidenden Stationen in diesem Entwicklungsprozess werden wir mit fischertechnik-Modellen in diesem Kapitel nachvollziehen.

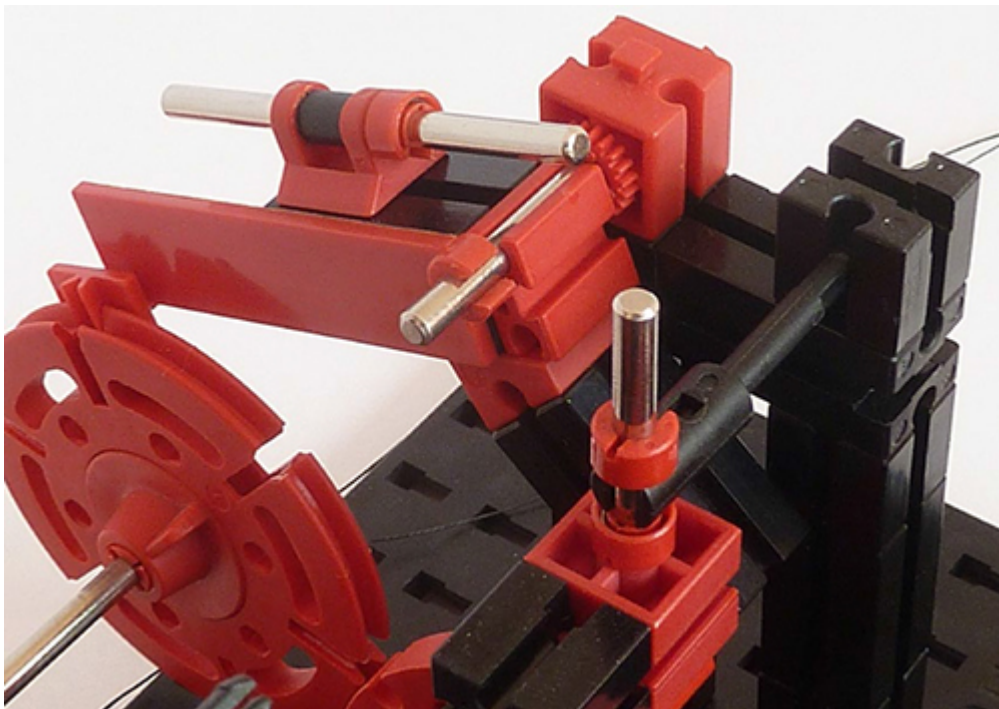




Abb. 4-1 Modell einer Turmuhr mit Spindelhemmung, Pendel und Schlagwerk

Einleitung

Das Hauptmodell dieses Kapitels ist das einer Turmuhr mit Spindelhemmung, Pendel und Viertelstundenschlagwerk (Abb. 4-1 und 4-2).

Die *Spindelhemmung* war der wesentliche Bestandteil der ersten mechanischen Uhren ab ca. 1300 und blieb über mehrere Jahrhunderte konkurrenzlos. Sie eignet sich optimal dazu, die Funktion einer Gangregelung sichtbar zu machen.

Anhand des *Pendels* wurde zum ersten Mal verstanden, dass man zur genauen Zeitmessung ein frei schwingendes System verwenden kann. Zum Aufrechterhalten der Schwingung sollte dieses nur so wenig angeregt werden, wie es zur Kompensation der Dämpfung nötig ist. Von 1656 bis ins 20. Jahrhundert hinein lieferten Pendel die Zeitbasis für fast alle standfesten Uhren. Ein Pendel ist ideal, um auch mit den eingeschränkten Möglichkeiten eines Konstruktionssystems wie Fischertechnik eine Uhr zu bauen, die einen Gangfehler von nur wenigen Sekunden pro Tag besitzt.

Das *Schlagwerk* schließlich ist der Inbegriff für die von den Uhren ausgehende Taktung menschlicher Tätigkeiten.

Das Modell verdeutlicht wesentliche Entwicklungsschritte, Komponenten und Funktionen mechanischer Uhren. Zwar hat es kein direktes historisches Vorbild, aber es versetzt einen atmosphärisch zurück in die Zeiten, in denen der Tagesablauf durch schlagende Turmuhren geregelt wurde.

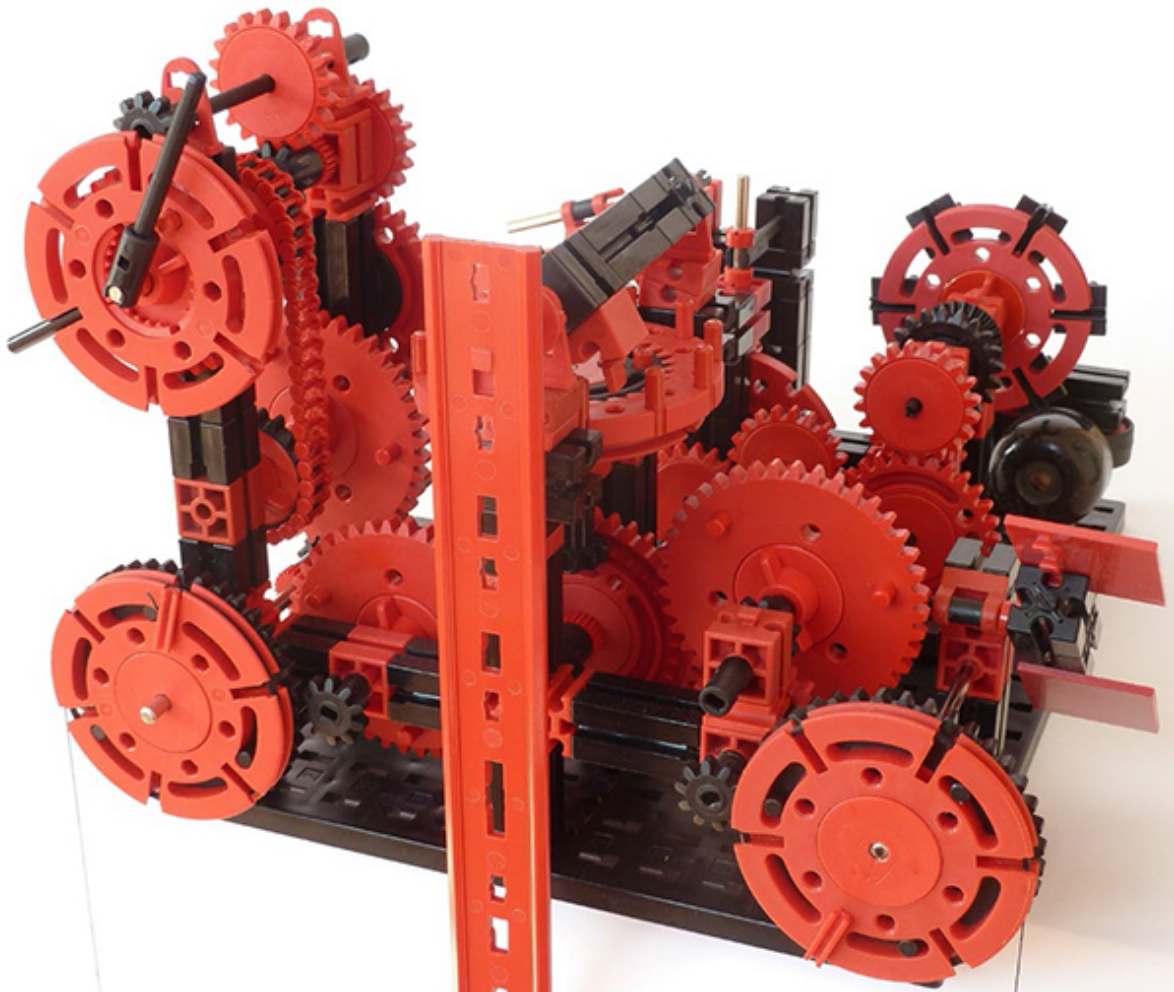


Abb. 4-2 Modell einer Turmuhr mit Spindelhemmung, Pendel und Schlagwerk

Natürlich wird auch eine Auswahl weiterer wichtiger Schritte in der Entwicklungsgeschichte der Uhren zwischen dem 14. und 18. Jahrhundert mit Modellen illustriert: der *Waagbalken*, der statt des Pendels in den ersten Uhren zum Einsatz kam; die *Ankerhemmung*, die einen flacheren Aufbau und Pendel mit kleinerer Auslenkung ermöglichte; die *Unruh*, die der wesentliche Durchbruch auf dem Weg zu genauen tragbaren Uhren war; und schließlich der *Stiftengang* als ein mit fischertechnik gut umsetzbares Beispiel für eine ruhende Hemmung.

In den Kapiteln 10 *Der Elektromotor* und 12 *Die Normalzeit* werden mit den Synchron- und Funkuhren spätere Entwicklungsschritte der Uhrengeschichte behandelt.

Uhren und Zeiteinteilung

Uhren sind Instrumente zur Zeiteinteilung. Wir Menschen haben keinen Sinn, mit dem wir Zeit direkt wahrnehmen können – was wir wahrnehmen, ist der Ablauf der Ereignisse mit seinen Veränderungen und Wiederholungen.

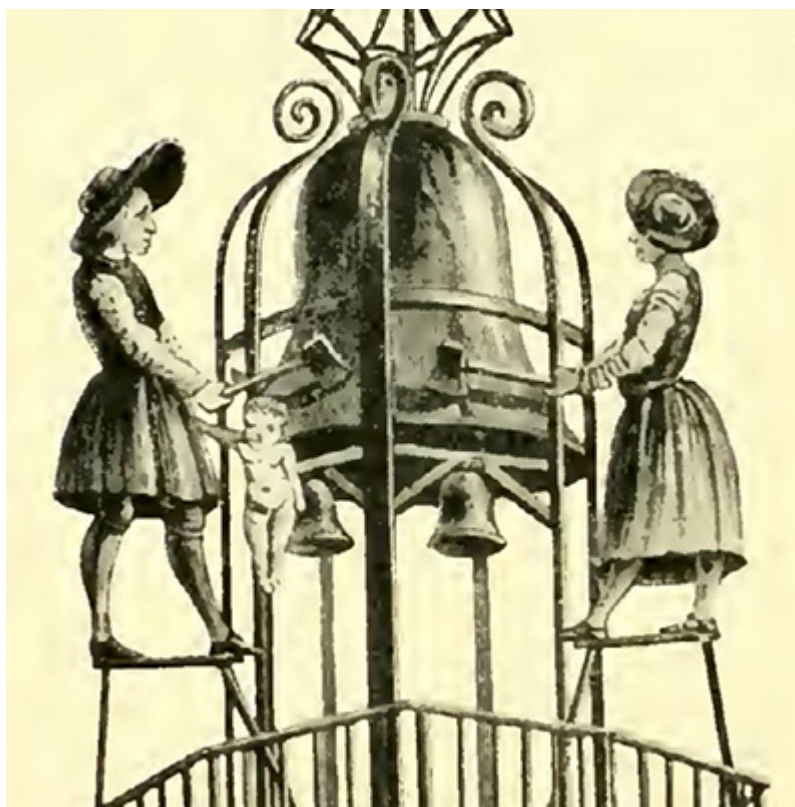


Abb. 4–3 Schlagende Jacquemarts an der Kirche Notre-Dame in Dijon: Der Mann links wurde angeblich zusammen mit der großen Glocke 1382 in Kortrijk

erbeutet, Frau und Kinder sind definitiv spätere Zutaten.

Ohne technische Hilfsmittel können wir in der Natur nur sich vergleichsweise langsam wiederholende Prozesse beobachten. Der für den Menschen wichtigste dieser Prozesse ist sicher der Wechsel zwischen Tag und Nacht. Er ist der Ausgangspunkt der gesamten Zeiteinteilung. Für die weitere Zeiteinteilung sind wir auf technische Hilfsmittel angewiesen.

Zwei Aspekte spielten und spielen bei der künstlichen Zeiteinteilung eine besondere Rolle: a) die Synchronisation innerhalb einer Gemeinschaft von Menschen (später auch innerhalb einer Maschine), insbesondere das Signalisieren von Zeitmarken zur Abstimmung von Tätigkeiten, b) die Einteilung der Zeit in möglichst gleich lange Abschnitte, also die genaue Zeitmessung.

Das möglichst auffällige Verkünden von Zeitmarken war besonders wichtig in Zeiten, in denen es nur wenige Uhren gab. Schon im antiken Rom wurde der Lichttag in vier Teile geteilt und die Übergangspunkte durch Blasinstrumente signalisiert. Im Mittelalter setzte sich ab dem 14. Jahrhundert das automatische Schlagen der Stunden durch Turmuhren durch. Die rasche Verbreitung dieser Uhren ging mit dem Aufstieg der Städte, des Handels und des Bürgertums einher.

Mit der zunehmenden Verbreitung standfester oder tragbarer Uhren in breiteren Teilen der Bevölkerung wurden diese vor Ort befindlichen Uhren genutzt, um menschliche Tätigkeiten aufeinander abzustimmen. Die Synchronisation verlagerte sich damit auf den regelmäßigen Abgleich eigener Uhren mit allgemein anerkannten Hauptuhren. Im Zuge der Erfindung der Eisenbahn und der Telegrafie rückte man nach 1850 mit der Einführung von Zeitzonen von der Anzeige der Zeit auf Sonnenuhren weit ab. Beispiele für Techniken zum Uhrenabgleich aus dem letzten Jahrhundert sind die Zeitanzeige per Telefon oder der 20-Uhr-Gong der Tagesschau.

Der letzte Schritt in der Entwicklung sind Synchron-, Funk- und Internetuhren, die gar keine eigentlichen Uhren mehr sind, sondern nur noch Zeitanzeigen. Sie beziehen die Zeitinformation nicht mehr aus einem eigenen Oszillator, sondern über das Stromnetz, über Funk oder das Internet. Die Gleichtaktung der Gesellschaft ist insgesamt gesehen immer umfassender, stiller und unauffälliger geworden.

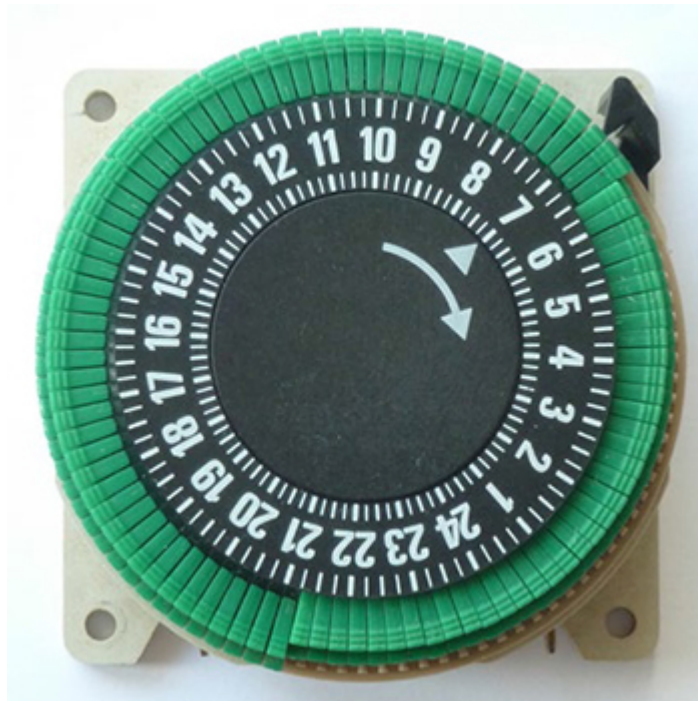


Abb. 4-4 Zeitschaltuhr mit Synchronmotor aus den 80er-Jahren

Die Zeiteinteilung der normalen Bevölkerung basierte bis ins späte Mittelalter auf dem Lichttag, der von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang in zwölf sogenannte temporale Stunden eingeteilt wurde, die man direkt an Sonnenuhren ablesen konnte. Die Länge der temporalen Stunden variiert zwangsläufig im Laufe eines Jahres: Im Sommer sind die Tage länger als die Nächte, im Winter ist es umgekehrt. Die Astronomen dagegen verwendeten schon seit der Antike auch Äquinoktialstunden – also die temporalen Stunden bei Tag- und Nachtgleiche.

Für astronomische und astrologische Vorhersagen war das Interesse an einer genauen Datierung von Himmelsereignissen groß. So ist es nicht verwunderlich, dass eine deutliche Genauigkeitssteigerung der mechanischen Uhren vom Schweizer Uhrmacher *Jost Bürgi* (1552–1632) erzielt wurde, der ab 1579 im Dienst des Landgrafen Wilhelm IV. von Kassel und ab 1604 in Prag Uhren und astronomische Instrumente baute.

Die großen Fortschritte (Pendel, Unruh, Hemmungen, Temperaturkompensation) auf dem Gebiet der Zeitmessung in den folgenden zwei Jahrhunderten wurden mehr oder weniger durch das sogenannte Längengradproblem befördert, das von immenser wirtschaftlicher Bedeutung war: Schiffe verspäteten sich oder verunglückten auf hoher See, weil ihre geografische Länge ohne die korrekte Zeit zu Hause bzw. später in Greenwich nicht genau bestimmt werden konnte.

Im 20. Jahrhundert kam es dann mit der Entwicklung von Quarzuhren ab dem Jahr 1927 und vor allem mit der Entwicklung von Atomuhren ab dem Jahr 1946 zu unvergleichlichen Genauigkeitssteigerungen.



Abb. 4-5 Die Berner Zytglogge aus dem Jahr 1405 zeigt die temporalen Stunden an den goldenen Linien an und die äquinoktialen auf dem römischen Ziffernblatt.

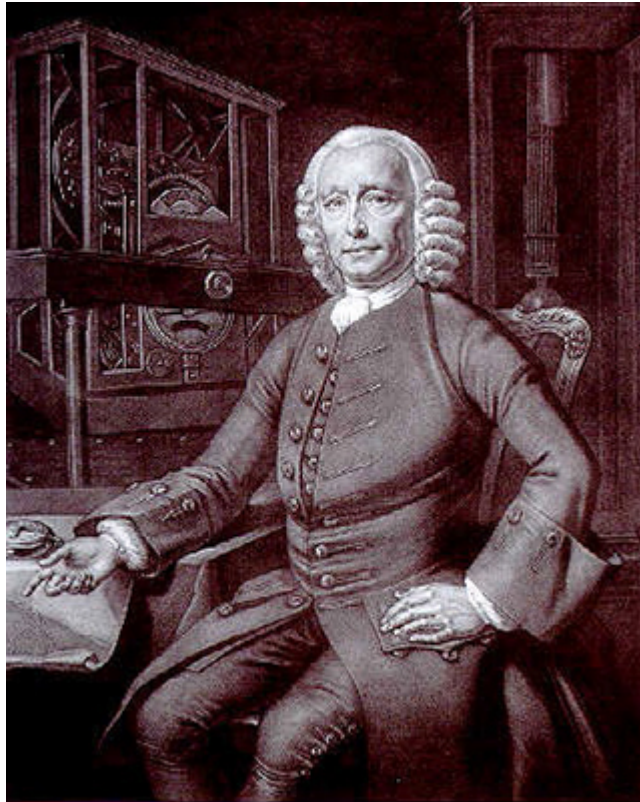


Abb. 4–6 John Harrison löste das Längengradproblem durch den Bau genauer Uhren.

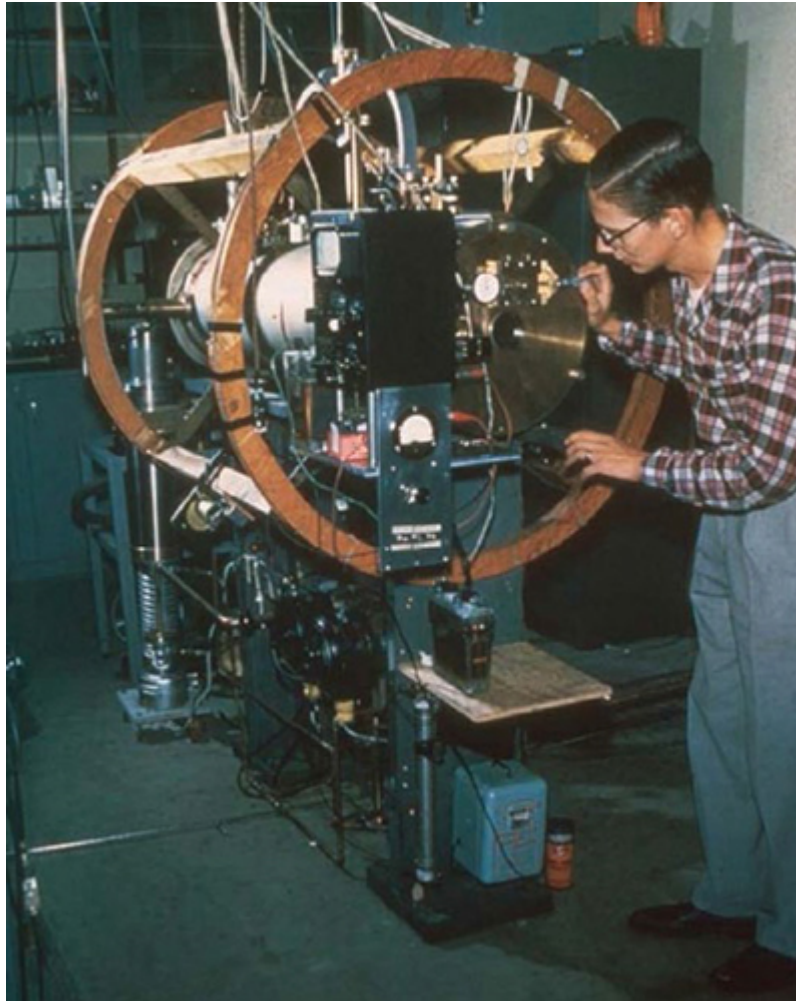


Abb. 4–7 Die NBS-1, die erste, noch ungenaue Atomuhr aus dem Jahr 1952

Spindel mit Waagbalken

Die ersten mechanischen Uhren funktionierten mit Gewichts Antrieb. Hängt man ein ausreichend schweres Gewicht an das Ende eines auf einer Trommel aufgerollten Seils, so wird sich das Gewicht beschleunigt nach unten bewegen und die Trommel sich entsprechend beschleunigt drehen. Die Drehbewegung der Trommel kann man durch Anbringen von Windflügeln verlangsamen und regulieren, allerdings nicht sehr stark und nur ungenau.

Zentraler Bestandteil der ersten mechanischen Uhren war dementsprechend ein neuer Mechanismus zur kontrollierten Verlangsamung einer Drehbewegung, eine sogenannte *Gangregulierung* oder *Hemmung*.

Diese Hemmung bestand aus einer vertikalen Spindel mit zwei Lappen, dem mit ihr fest verbundenen horizontalen Waagbalken und dem vertikalen

Hemmrاد (auch *Steigrاد* oder *Gangrad* genannt) (Abb. 4–8). Die Drehung des Hemmrads wird dadurch reguliert, dass es mit seinen Zähnen über die Lappen die Spindel mit dem Waagbalken abwechselnd hin und her schubst. Hat das Hemmrاد einen Lappen weggedrückt, so stellt sich ihm der zweite Lappen auf der anderen Seite in den Weg.

Damit das abwechselnde Eingreifen und Wegdrücken der Lappen funktioniert, muss das Hemmrاد eine ungerade Anzahl von Zähnen besitzen. Bei einer geraden Anzahl von Zähnen blockieren die beiden gegenüberliegenden Lappen gleichzeitig. So steht es zumindest in den meisten Büchern, und diese Aussage scheint eine Umsetzung der Spindelhemmung mit fischertechnik zu verhindern.

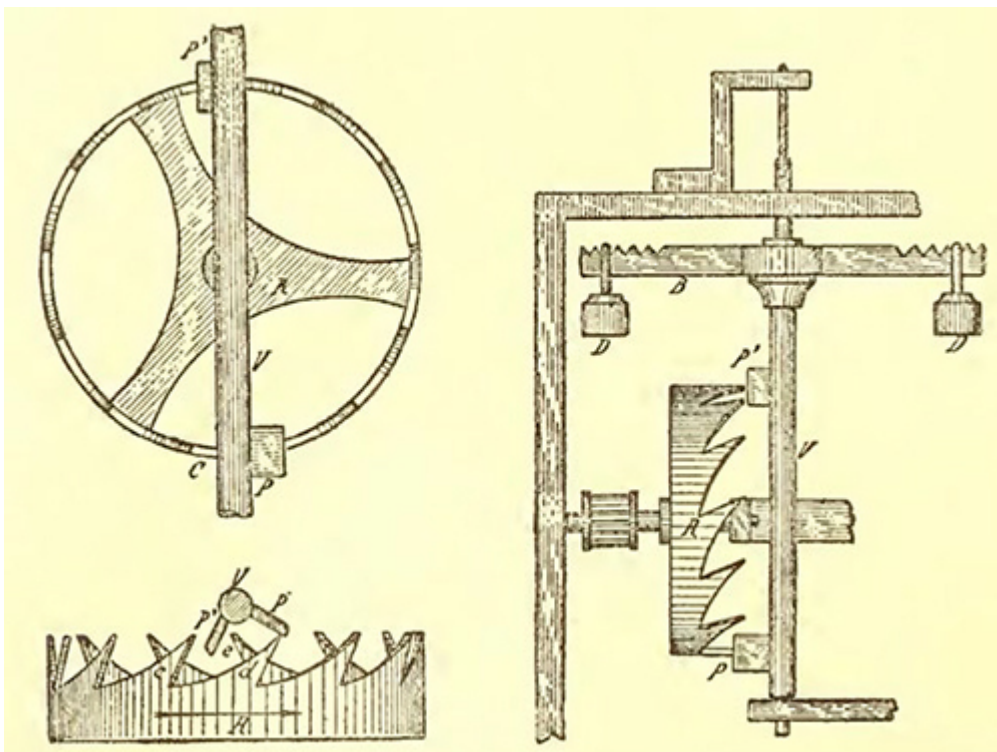


Abb. 4–8 Gangregulierung durch Spindel mit Waagbalken

Es gibt aber einen Trick, mit dem eine Umsetzung dennoch möglich wird: Wenn man die Spindel nicht genau durch den Mittelpunkt des Hemmrads gehen lässt, sondern etwas seitlich verschiebt, bedeutet das praktisch, dass auf dieser Seite ein kleinerer Teil des Kreisumfangs zwischen den beiden Lappen liegt. Damit verkleinert sich auch die Anzahl der Zähne zwischen den beiden Lappen.

In unserem Modell in Abb. 4–9 kommt das Innenzahnrad mit seinen zwölf äußeren Bohrungen als Hemmrاد zum Einsatz. In den Bohrungen stecken Seilklemmstifte, die die Funktion der Zähne übernehmen. Sie sind an den Enden

konisch gefast, was für diesen Zweck sehr hilfreich ist. Wird die Spindel um ein Viertel des Abstands zwischen zwei Stiften aus der Mitte gezogen, so liegen zwischen den beiden Lappen auf dem Umfang nur noch 5,5 statt sechs Stifte und das Modell funktioniert.

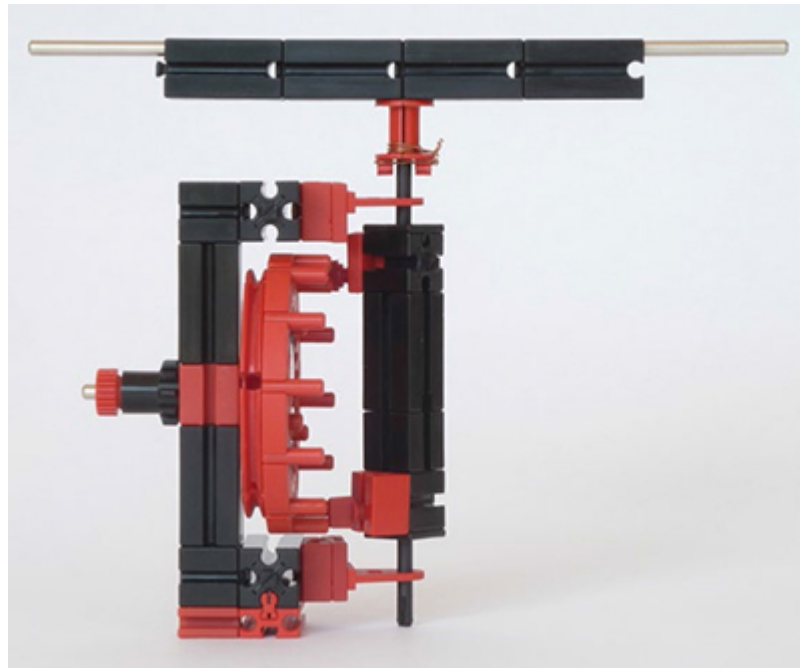


Abb. 4–9 fischertechnik-Modell einer Hemmung durch Spindel mit Waagbalken

Ist man erst einmal so weit, so probiert man natürlich auch, was passiert, wenn man die Spindel noch weiter aus der Mitte zieht. Erstaunlicherweise funktioniert die Hemmung sogar besser, wenn nur 4,5 Stifte zwischen den beiden Lappen liegen. Der eine Lappen wird dann nach oben, der andere zur Seite weggedrückt. Dadurch wird der Auslenkungswinkel der Spindel kleiner (wichtig für unser Hauptmodell mit Pendel) und die Lappen können tiefer eingreifen und stehen beim Blockieren und Wegdrücken anfänglich parallel zu den Stiften, was eine bessere Kraftübertragung ermöglicht. Detailliert wird der Aufbau der Spindelhemmung in der Beschreibung unseres Hauptmodells erläutert.

Bei den Recherchen zum Thema astronomische Uhren in Kapitel 5 *Das Planetarium* fanden wir schließlich heraus, dass schon eine der frühesten dokumentierten mechanischen Uhren, das Astrarium von *Giovanni Dondi* (1318–1389), ein Hemmrad mit 24 Zähnen besessen hat. Warum anschließend nahezu ausschließlich Hemmräder mit einer ungeraden Anzahl von Zähnen verwendet wurden und sich die Meinung durchsetzte, das könne gar nicht anders sein, ist uns nicht bekannt.

Die Ganggeschwindigkeit des Hemmrads ist vom Antriebsdrehmoment abhängig und vom Trägheitsmoment des Waagbalkens, das über die Position der Gewichte eingestellt werden kann. Im Modell erfolgt diese Einstellung durch das Ausziehen der zwei Metallachsen.

Das Modell aus Abb. 4–9 lässt sich mit ein paar Übersetzungsstufen sehr einfach zu einer Uhr vervollständigen. Damit lässt sich die Genauigkeit der ersten mechanischen Uhren sehr gut nachvollziehen. Es kam innerhalb eines Tages zu unregelmäßigen Abweichungen von zehn Minuten und mehr.

Die Spindelhemmung mit Waagbalken war trotzdem sehr erfolgreich und blieb über mehr als 300 Jahre nahezu unverändert im Einsatz, bis der Waagbalken nahezu vollständig durch das Pendel ersetzt wurde.

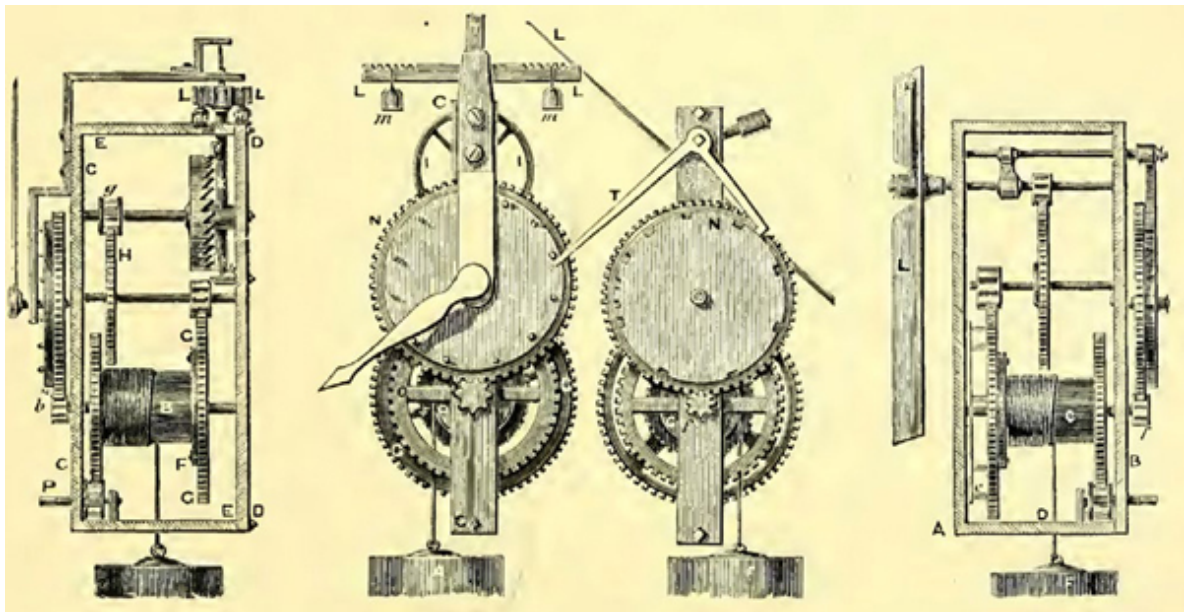


Abb. 4–10 Prinzipieller Aufbau einer frühen Uhr mit Schlagwerk

Frühe Uhren mit Schlagwerk

Auch wenn von einigen wenigen erhaltenen Uhrwerken behauptet wird, sie stammten aus dem 14. Jahrhundert, ist die Datierung in jedem dieser Fälle umstritten. Der vermutliche prinzipielle Aufbau früher Uhren mit Schlagwerk ist in Abb. 4–10 dargestellt.

In der linken Hälfte ist das *Gehwerk* abgebildet, in der rechten das *Schlagwerk*. Im Gehwerk übt das Gewicht ein Drehmoment auf die Seiltrommel aus, das – durch zwei Übersetzungen ins Schnelle verkleinert – an das Hemmrad weitergegeben wird. Die Hemmung sorgt für ein geregeltes ruckweises Drehen

des Hemmrads und damit der Seiltrommel. Die Drehbewegung der Seiltrommel wird außerdem noch – ins Langsame übersetzt – an den Stundenzeiger weitergegeben. Das mit dem Zeiger verbundene Rad hat zwölf Stifte, die über einen zweiarmigen Hebel das Schlagwerk auslösen.

Der rechte Arm des Hebels greift in eine frühe Version einer sogenannten Schlossscheibe, die die Laufzeit des Schlagwerks und damit die Anzahl der Schläge codiert. Das Schlagwerk selbst wird von einem eigenen Gewicht angetrieben. Die Geschwindigkeit der Drehbewegungen wird durch den Windflügelregler konstant gehalten. Am hinteren bzw. linken Ende der Seiltrommel erkennt man das *Hebnägelrad*, das während der Laufzeit des Schlagwerks regelmäßig einen Hammer hebt, der dann beim Abrutschen von einem Nagel gegen einen Klangkörper schlägt.

Der Nachbau einer solchen Uhr mit Schlagwerk wird am Ende des Kapitels mit leichten Veränderungen beschrieben.

Das Pendel

Die Ungenauigkeit der frühen mechanischen Uhren resultierte daher, dass Spindel und Waagbalken nur wegen des Antriebs durch das Hemmrad schwingen. In der Sprache der Physik ist der Waagbalken (anders als ein Pendel oder eine Masse, die an einer Feder hängt) kein freier Oszillator. Ein freier Oszillator schwingt nach einer einmaligen Anregung einige Zeit lang selbstständig weiter. Die Dauer einer vollständigen Schwingung nennt man dabei *Schwingungsdauer* oder *Periode*, die größte Auslenkung während der Schwingung heißt *Amplitude*.

Galileo Galilei (1564–1642) war der erste, der die Schwingungseigenschaften von Pendeln untersuchte und sie als Zeitmesser in die Wissenschaft einführte. Angewendet wurden sie zunächst von Hand – vor allem die sogenannten Sekundenpendel, deren Schwingungsdauer zwei Sekunden beträgt. Die Zeit zwischen zwei Durchgängen durch die vertikale Lage beträgt damit eine Sekunde.



Abb. 4–11 *Christiaan Huygens*

Die ersten dokumentierten Pendeluhrn entwarf *Christiaan Huygens* (1629–1695) ab dem Jahr 1656. Sie gingen bis auf wenige Sekunden pro Tag genau. Die Spindelhemmung kam dabei weiterhin zum Einsatz. Meist wurde sie um 90° gedreht, sodass das Hemmrad eine horizontale Lage einnahm (Abb. 4–12).

Amplitudenabnahmen auszugleichen, da die Pendelmasse angehoben werden muss. Bei kleinen Amplituden verläuft die Bewegung des Pendels dagegen nahezu horizontal.

Huygens ersann zwei Methoden, um diese Nachteile auszugleichen. Die mathematische Lösung für das erste Problem war die Verwendung von Backen, an die sich der obere flexible Teil des Pendels anschmiegte und die das Pendel eine isochrone Schwingung ausführen lassen – also eine Schwingung, deren Dauer nicht von der Amplitude abhängt. Ein praktischer Verbesserungsansatz für beide Probleme bestand darin, mit einem kurzen Pendel an der Spindel ein langes, eigentlich zeitbestimmendes, höher aufgehängtes schweres Pendel zu führen.

In unserem Hauptmodell werden wir dagegen nur ein Pendel verwenden, das direkt an der Spindel befestigt ist. Das ermöglicht der asymmetrische Aufbau unserer Spindelhemmung. Durch ihn ergeben sich Amplituden von nur ca. 5°.

Die Ankerhemmung

Die *Ankerhemmung* wurde vor 1671 vom britischen Physiker *Robert Hooke* (1635–1703) oder dem gelegentlich für ihn arbeitenden Uhrmacher *William Clement* erfunden. Sie brachte zwei wesentliche Vorteile gegenüber der klassischen Spindelhemmung und verdrängte diese weitgehend. Der erste Vorteil ist, dass die Ankerachse deutlich weniger ausgelenkt wird als die Spindel. Dadurch wurde es möglich, Uhren mit kleinen Pendelausschlägen zu bauen. Der zweite Vorteil ist der deutlich flachere Aufbau gegenüber der Spindel, was für die Entwicklung tragbarer Uhren wesentlich war.

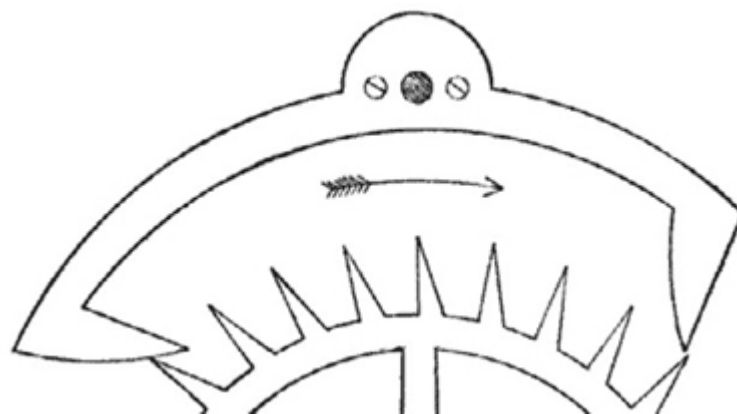


Abb. 4–13 Rückführende Ankerhemmung

Ankerhemmungen mit fischertechnik finden sich schon im fischertechnik-Buch hobby 1, Band 2 [9]. Sehr gut erklärt hat Heinz Jansen seine Ankerhemmung [10]. Die Geometrie des Z40-Zahnrads ist natürlich nicht optimal für den Bau von Ankerhemmungen geeignet, wie man mit einem vergleichenden Blick auf die Abb. 4-13 und 4-14 erkennen kann. Es erfordert Verständnis und eine genaue Einstellung, um sie zum Funktionieren zu bringen.

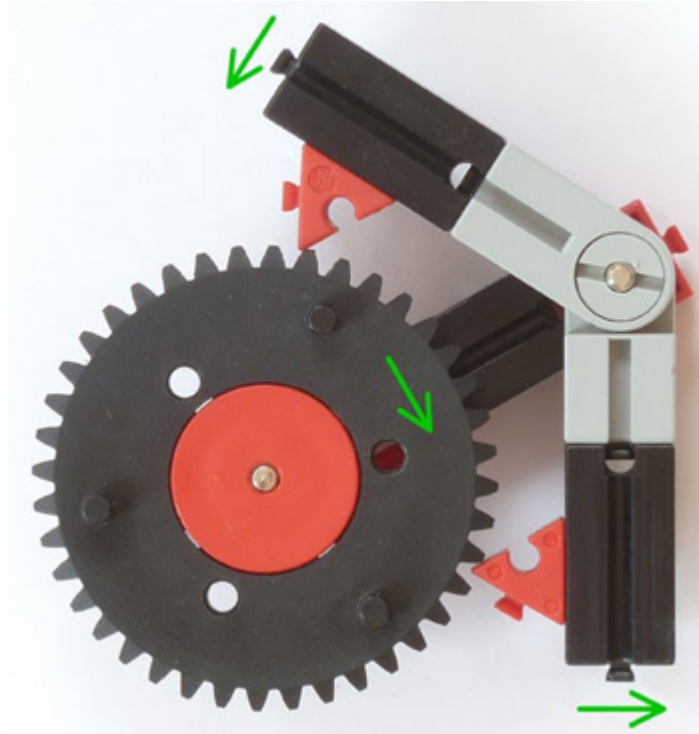


Abb. 4-14 Ankerhemmung von Heinz Jansen

Die Unruh

In Kombination mit der Ankerhemmung war die *Unruh* der Wegbereiter für kleine genaue, tragbare Uhren. Tragbare federgetriebene Uhren gab es schon ab dem ausgehenden 15. Jahrhundert. Diese verwendeten kleine Spindeln mit Waagbalken, wobei die Waagbalken durch Schweinsborsten in eine Gleichgewichtslage zurückgeführt wurden. Unter Transportbedingungen kam es zu größeren Gangabweichungen. Pendel eignen sich aufgrund ihrer Länge schlecht als Zeitbasis für mobile Uhren. In der Unruh wurde ein miniaturisierter Waagbalken mit einer Spiralfeder versehen. Dadurch entstand ein freier Oszillator, der eine genau definierte Eigenfrequenz besitzt. Über die Erfindung der Unruh gab es einen heftigen Prioritätsstreit zwischen Christiaan Huygens und Robert Hooke im Jahr 1675.

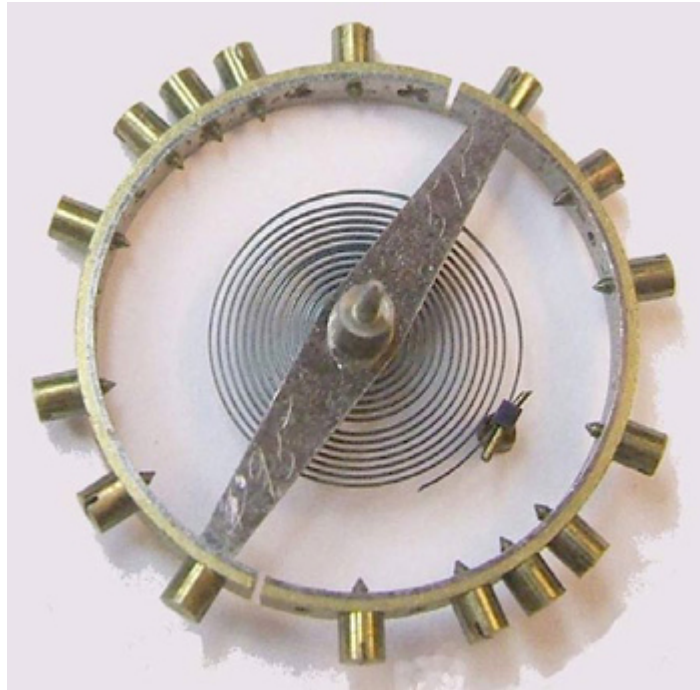


Abb. 4-15 Kompensationsunruh

Ein gut funktionierendes fischertechnik-Modell einer Unruh lässt sich bauen, wenn man als Spiralfeder eine Flexschiene verwendet und mit dieser einen festen Baustein 15 mit einem zweiten an einer drehbar gelagerten Drehscheibe 60 verbindet. Die Unruh in Abb. 4-16 schwingt mit einer Frequenz von ungefähr 15 Hz. Man sollte sie zunächst ohne Anker und Antrieb aufbauen, manuell auslenken und die nach dem Freigeben stattfindenden abklingenden Schwingungen beobachten. Befestigt man dann den Anker aus Abb. 4-14 mit einem Verbindungsstück an der Drehscheibe, so entsteht ein ausgezeichnete Gangregler. Die Drehzahl des Z40 wird über einen weiten Drehmomentbereich auf $15/40$ Umdrehungen pro Sekunde (also 22,5 Umdrehungen pro Minute) gehalten. Kombiniert man das Modell aus Abb. 4-16 mit dem Rückzugsmotor und einer genügend hohen Übersetzung ins Schnelle, so entsteht ein Funktionsmodell einer Taschen-, Armband- oder Eieruhr mit Handaufzug.

Ruhende Hemmungen

Die Spindelhemmung und die klassische Ankerhemmung sind Beispiele für *rückführende* Hemmungen. Die Lappen der Spindel bzw. die Kontaktflächen des Ankers schieben beim Blockieren das Hemmrad ein wenig gegen die eigentliche Laufrichtung. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn das Antriebsdrehmoment am Hemmrad deutlich größer ist, als es für das sichere

Laufen der Uhr erforderlich ist. Durch das Hin und Her kommt es zu unnötiger Reibung und zu einem theoretisch schlecht modellierbaren Wechselspiel zwischen dem Antrieb und dem schwingenden System.

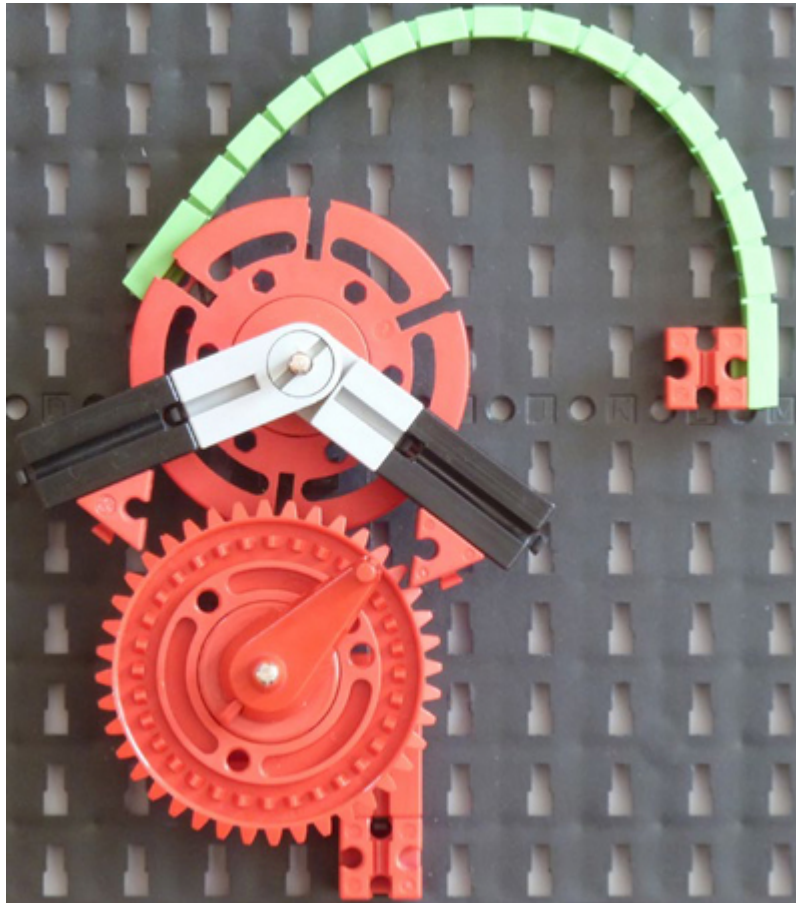


Abb. 4-16 Gangregulierung auf 22,5 Umdrehungen pro Minute durch Unruh mit Ankerhemmung; diese Kombination war der Durchbruch auf dem Weg zu genauen, tragbaren Taschen- und Armbanduhren.

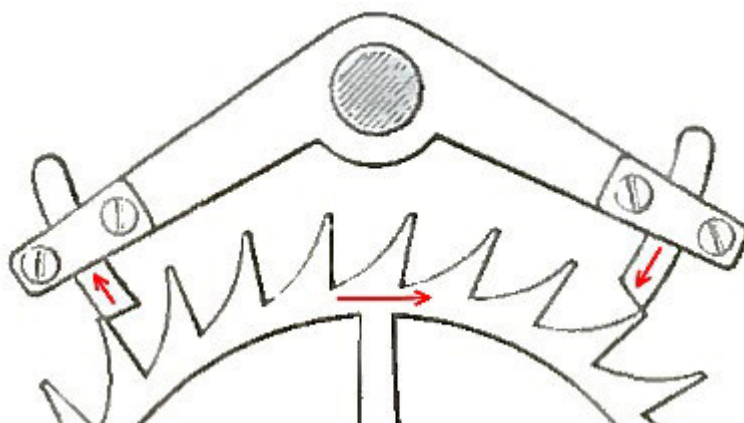


Abb. 4-17 Die ruhende Ankerhemmung

Der englische Astronom und Mathematiker *Richard Towneley* (1629–1707) veränderte um das Jahr 1675 die Form des Ankers, sodass das Hemmrad über weite Teile der Bewegung des Pendels stillsteht und sich nur während kurzer Zeitphasen in den Umkehrpunkten des Pendels weiterdreht. In diesen Zeitphasen wird dem Pendel durch die schrägen Hebflächen des Ankers Energie zugeführt. Diese *ruhende* Ankerhemmung wird häufig nach dem englischen Uhrmacher *George Graham* (1673–1751) benannt, der sie zum Standard bei Pendeluhren machte.

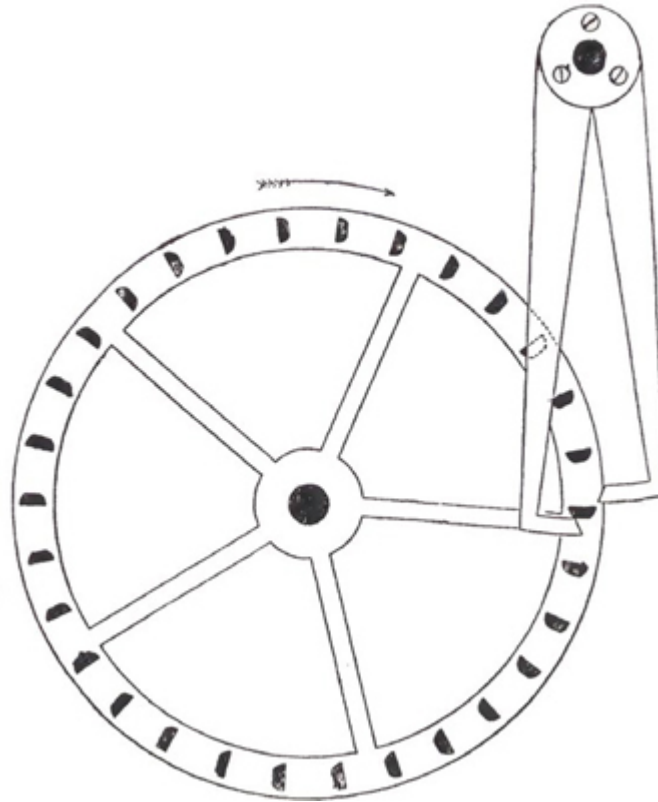


Abb. 4-18 Der Stiftengang

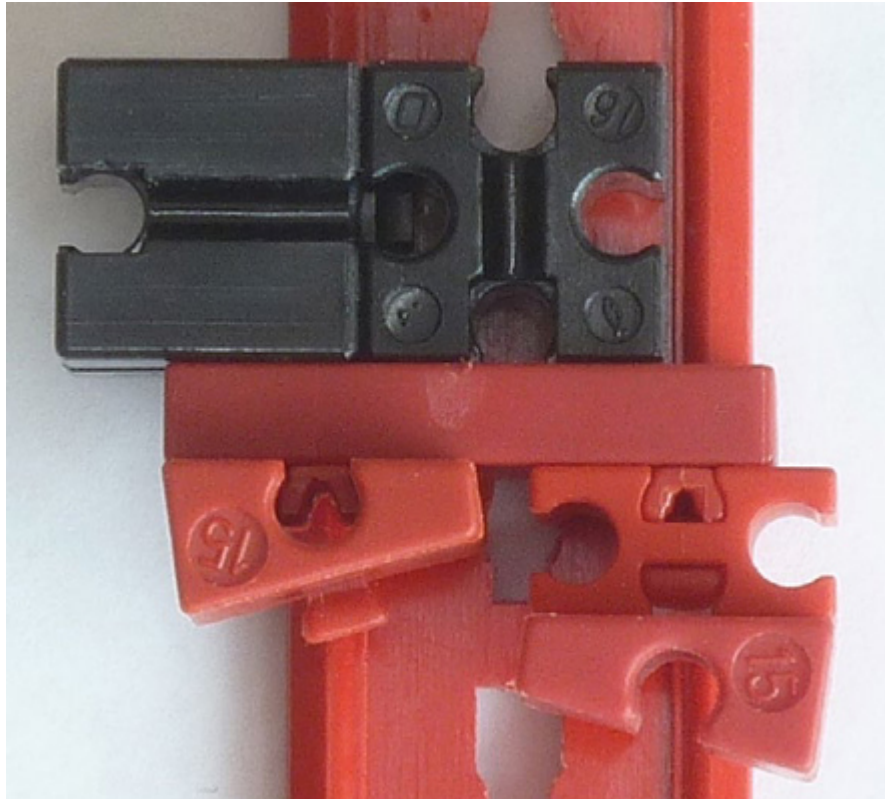


Abb. 4-19 Der Anker auf der Rückseite des Pendels: Die beiden 15°-Winkelsteine sind 5 mm herausgezogen.

Mit fischertechnik lässt sich eine später entwickelte ruhende Hemmung besser umsetzen: der *Stiftengang* (auch *Scherengang*, *Amant-Hemmung* oder *Mannhardt-Hemmung* genannt), der vor allem in Turmuhren Verwendung fand (Abb. 4-18). Bei ihm wird die Energie nicht in den Umkehrpunkten des Pendels, sondern bei dessen Durchgängen durch die Ruhelage zugeführt.

Durch die Befestigung der Ruhe- und Hebeflächen direkt am Pendel werden nur wenige Bauteile benötigt. Bei echten Turmuhren kann man große Räder mit vielen Stiften verwenden, wodurch man zusätzlich noch eine Übersetzungsstufe sparen kann.

Grundsätzlich sollte man bei freien Hemmungen schwerere Pendel verwenden als bei rückführenden Hemmungen. Dementsprechend sollte man das Pendel für den Stiftengang schwerer machen als das unseres Hauptmodells. Am einfachsten ist es, nur eine Laufschiene zu verwenden, an der eine oder mehrere Metallachsen aufgehängt sind. Es ist insgesamt gesehen einfach, den Stiftengang statt der Spindelhemmung in unser Hauptmodell zu integrieren. Man kann dann sogar das Antriebsgewicht auf weniger als 50 g plus Batteriefach verkleinern. Wegen der kleineren Pendelamplitude und der fehlenden

Rückführung benötigt der Stiftengang deutlich weniger Leistung als die Spindelhemmung.

Um einen möglichst kleinen Gangfehler und eine möglichst kleine Leistungsaufnahme zu erzielen, kann man ein deutlich schwereres, gut aufgehängtes Pendel verwenden. Die Entfernung des Ankers zum Aufhängepunkt des Pendels sollte man allerdings nicht zu groß machen.

Im weiteren Verlauf der Geschichte wurden noch viele weitere Hemmungen erfunden. Bei den verschiedenen Typen freier Hemmungen zum Beispiel ist das gemeinsame Ziel, dem Oszillator regelmäßig kurz Energie zuzuführen, um die Dämpfung zu kompensieren, ihn aber ohne irgendeinen Kontakt zum Antrieb schwingen zu lassen. Dies ermöglicht einen sehr genauen Gang.

Das Turmuhr-Modell

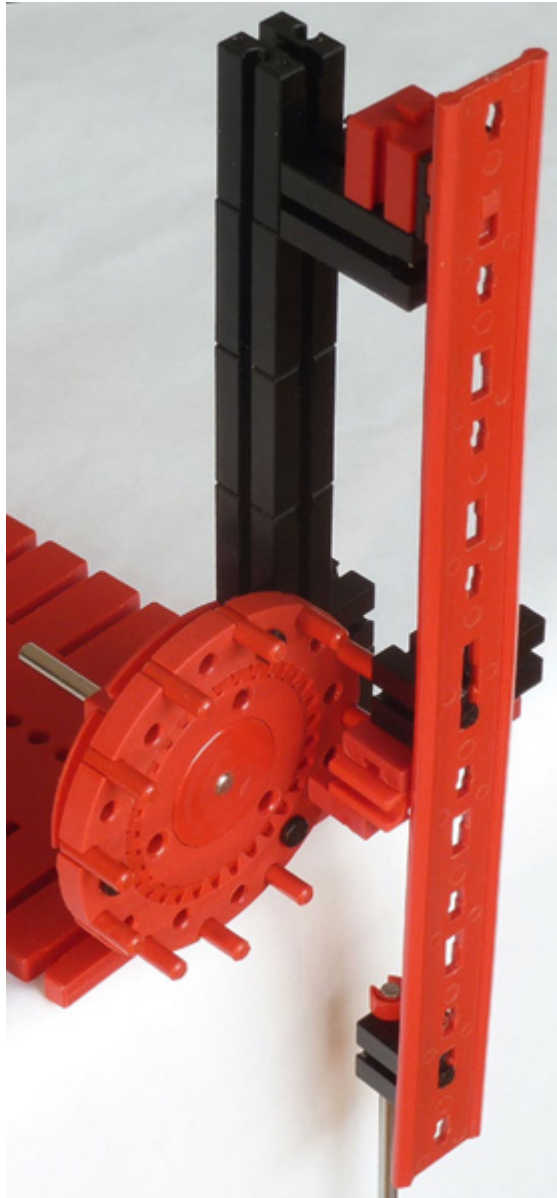


Abb. 4-20 fischertechnik-Stiftengang

Das Hauptmodell dieses Kapitels ist eine Turmuhr mit Viertelstunden-Schlagwerk. Zur vollen Stunde schlägt dieses Werk viermal, eine Viertelstunde später einmal, zur halben Stunde zweimal und zur Dreiviertelstunde dreimal. Wir beschreiben detailliert den Aufbau mit Spindelhemmung und Pendel. Alternativ kann die Uhr ohne großen Aufwand auf Spindel mit Waagbalken oder auf Stiftengang mit Pendel umgerüstet werden. Es lohnt sich, den Vergleich zwischen diesen Gangregulierungen selbst durchzuführen, um nachzuvollziehen, warum es im 18. Jahrhundert praktisch keine Uhren mit Waagbalken mehr gab.

Aufbau und Funktion

Der Aufbau der Uhr ist in Abb. 4–21 dargestellt. Das Antriebsgewicht übt auf das Antriebsrad unter der Anzeige ein Drehmoment aus. Die Drehbewegung des Antriebsrads wird in der Antriebseinheit mehrfach ins Schnelle übersetzt und durch die Hemmung mit dem Stabpendel nur ruckweise in sehr kleinen Portionen ermöglicht. Dadurch dreht sich das Antriebsrad in einer Viertelstunde genau einmal. Diese Drehbewegung wird in der Anzeigeeinheit so ins Langsame übersetzt, dass sich der Minutenzeiger einmal pro Stunde und der Stundenzeiger einmal in zwölf Stunden dreht.

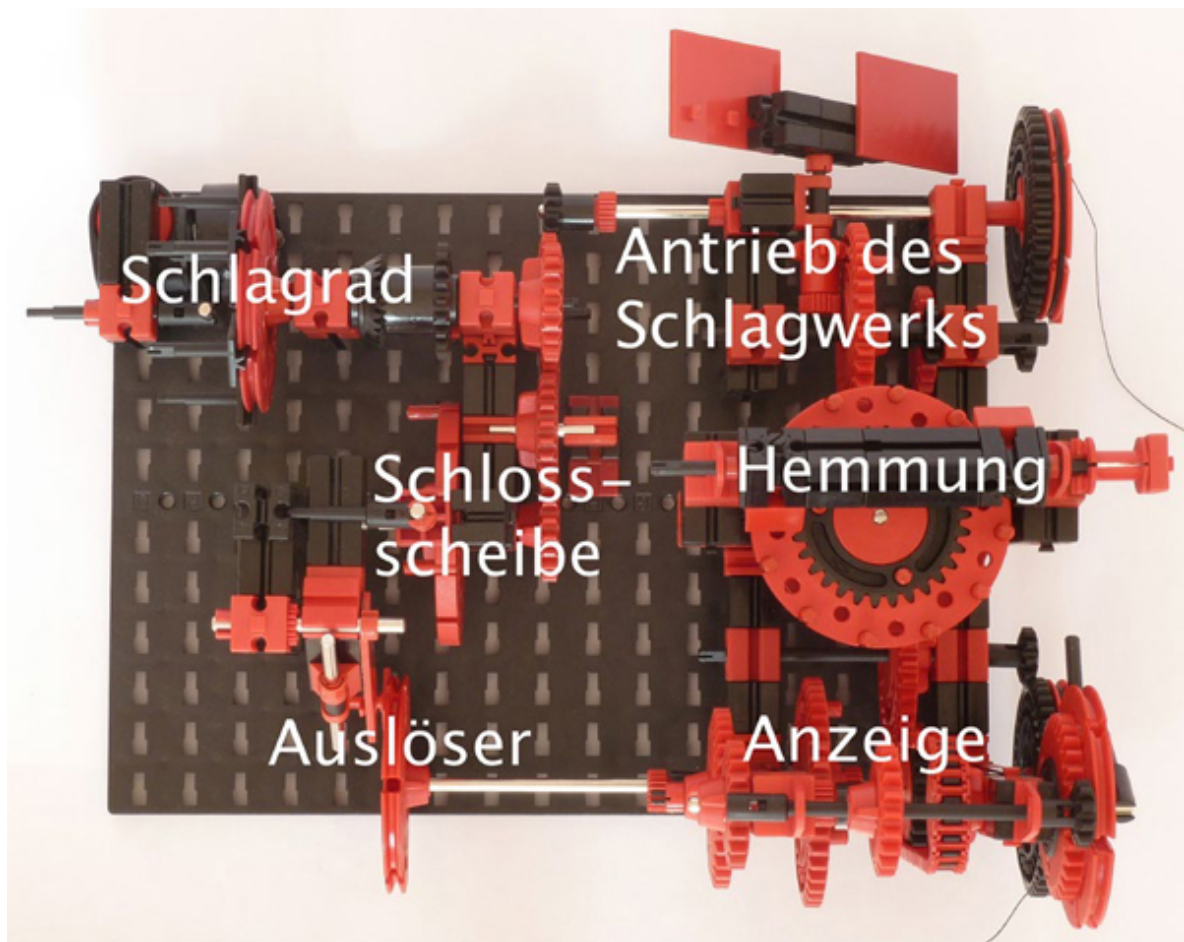


Abb. 4–21 Aufbau der Turmuhr: Der Antrieb des Uhrwerks befindet sich unter Hemmung und Anzeige.

Am Ende der Hauptantriebswelle befindet sich der Auslösungsstift für das Schlagwerk. Er hebt in den letzten fünf Minuten einer Viertelstunde den Auslösehebel an, der dann genau zu Viertelstunden-Zeiten schlagartig fällt und kurzzeitig die Drehbewegung der Schlossscheibe freigibt. Auf die Schlossscheibe wird durch das Antriebsgewicht des Schlagwerks permanent ein Drehmoment ausgeübt. Die Schlossscheibe dreht sich, bis der nächste auf ihr befindliche Stift die Bewegung blockiert. Die vier Stifte codieren die Laufzeit des Schlagrads

(Hebnägelrad), sodass bei aufeinanderfolgenden Auslösungen erst einmal, dann zweimal, dann dreimal und schließlich viermal geschlagen wird. Das Schlagrad hebt in regelmäßigen Abständen eine Metallachse, die dann schlagartig fällt und den Klangkörper einer Fahrradklingel anschlägt. Durch den Windfang in der Antriebseinheit des Schlagwerks finden alle Drehungen im Schlagwerk mit geregelter Drehzahl statt. Die mechanischen Details werden im Folgenden erläutert.

Die Antriebseinheit (Gehwerk)

Die Antriebseinheit des Uhrwerks ist in Abb. 4-22 dargestellt. Auf die Drehscheibe 60 wird das Seil für das Antriebsgewicht gegen den Uhrzeigersinn aufgewickelt. Die Drehbewegung der Drehscheibe wird durch das Getriebe zweimal 1:4 übersetzt. Das letzte große Zahnrad überträgt die Drehbewegung über das Kronenrad mit 32 Zähnen auf das Zahnrad Z10 der Hemmung. Zusammen mit den vorigen beiden Übersetzungen ergibt sich insgesamt eine Übersetzung von 1:51,2 ins Schnelle.

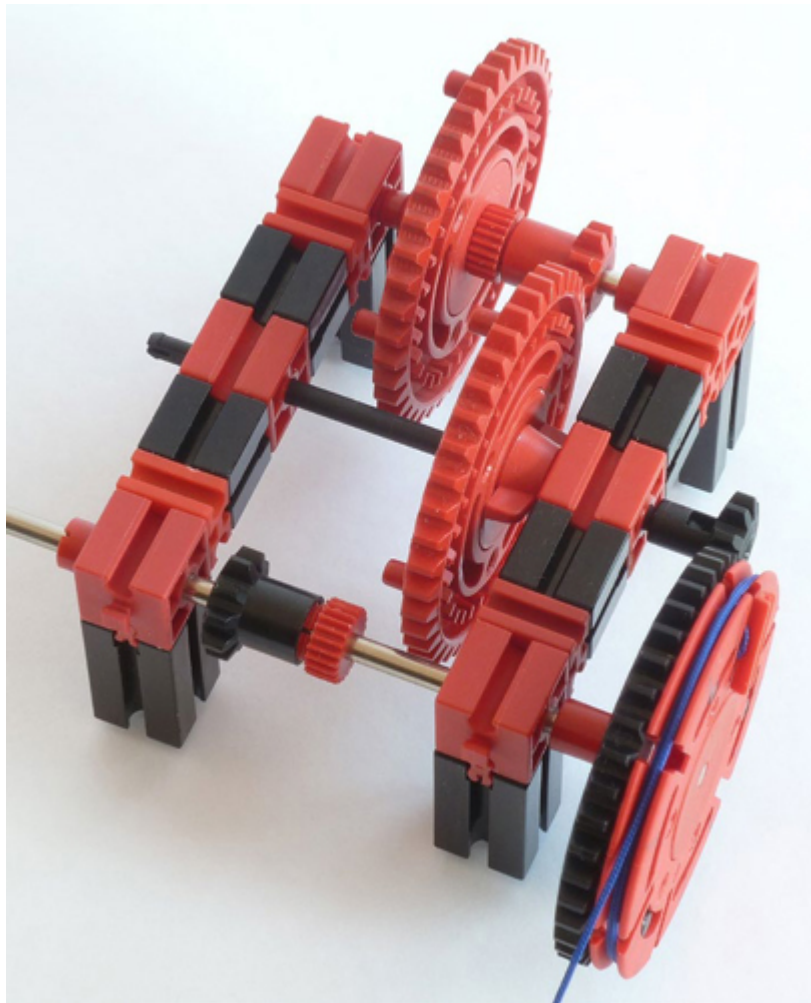


Abb. 4-22 Antriebseinheit der Pendeluhr

Beim Nachbau ist zu beachten, dass die Naben und Spannzangen fest angezogen werden. Man sollte leichtgängige Kombinationen aus Achsen und Bausteinen 15 mit Bohrung aus seinem Televorrat auswählen und die Antriebseinheit vor Anbau der Hemmung auf gleichmäßiges Laufverhalten überprüfen. Die Drehscheibe 60 und das Zahnrad Z40 werden durch wenigstens einen roten Klemmstift fest miteinander verbunden. Am Ende der langen Metallachse 200 befindet sich eine weitere Drehscheibe mit einer Aufnahmeachse zum Auslösen des Schlagwerks.

Die Spindelhemmung

Das zentrale Element der Uhr ist die Spindelhemmung. Das durch das Antriebsgewicht auf das Antriebsrad ausgeübte Drehmoment erreicht nach einer 1:51,2-Übersetzung das Hemmrad. Dieses Hemmrad wird durch die zwei eingreifenden Lappen der horizontalen Spindel im Takt des Pendels abwechselnd blockiert und wieder freigegeben. Durch den kleinen Anschwung,

den das Hemmrad dem Pendel über die Lappen bei der Aufhebung der Blockade jedes Mal gibt, wird das Pendel mit Energie versorgt und schwingt kontinuierlich.

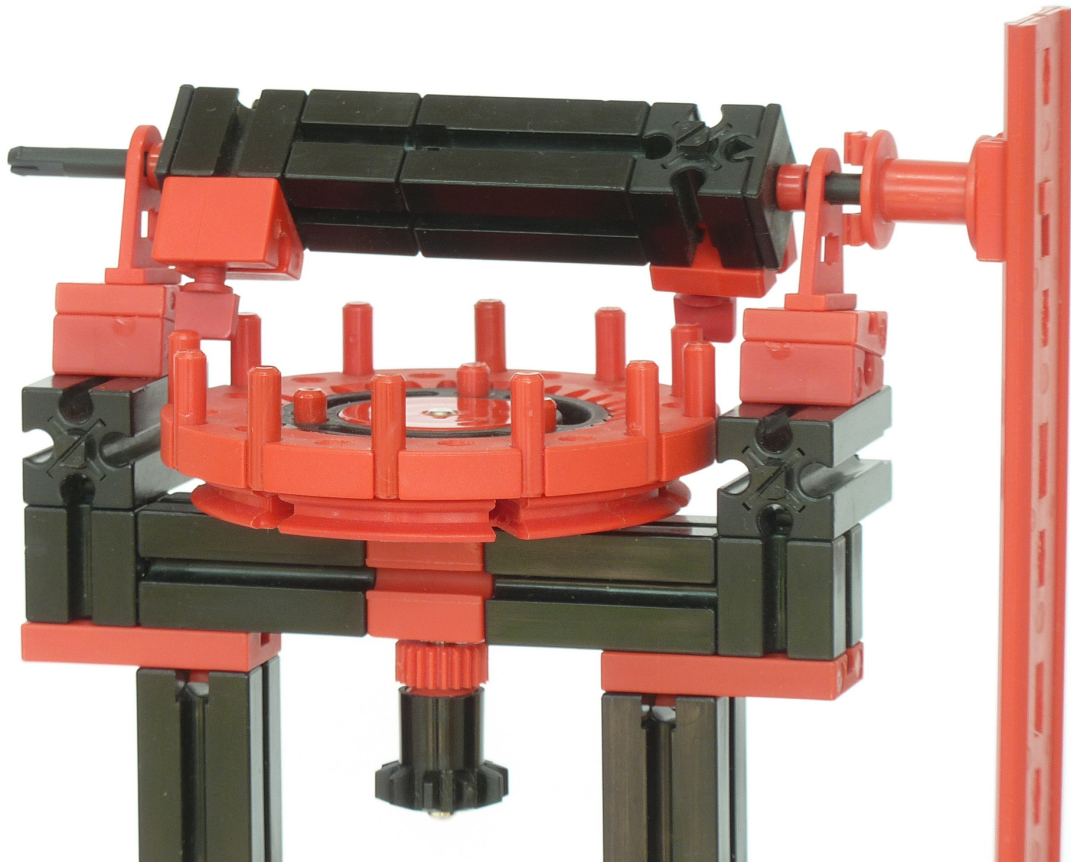


Abb. 4-23 Die Spindelhemmung

Die Hemmung erfordert beim Nachbau höchste Genauigkeit und eine sorgfältige Einstellung. Die roten Seilklemmstifte werden in die äußeren Bohrungen des Innenzahnrad von einer Seite aus so weit eingesteckt, dass sie mit der anderen Seite genau plan abschließen. Am besten drückt man sie erst etwas zu weit ein und dann mit einem ebenen Metallstück wieder zurück. Das Zahnrad Z30 und die Drehscheibe 60 sind durch Seilklemmstifte miteinander verbunden. Es ist wichtig, dass beide ohne Zwischenraum aneinander liegen.

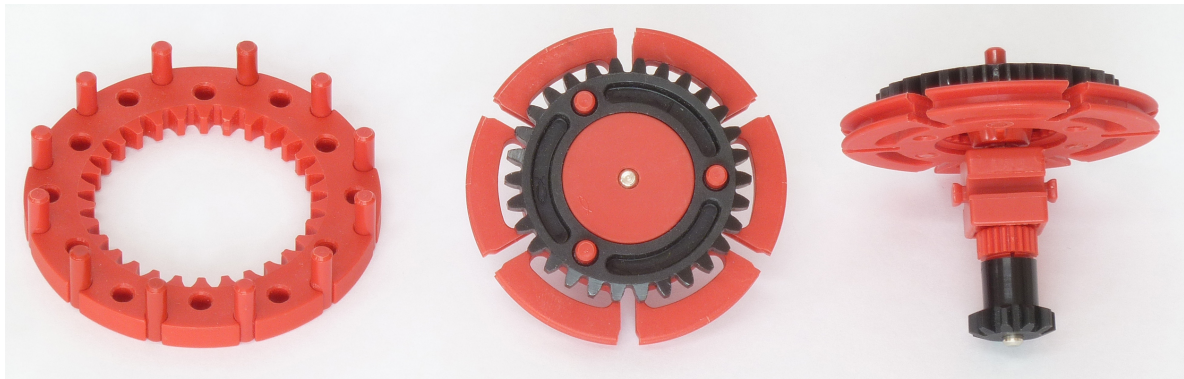


Abb. 4-24 Das Hemmrad

Die Position der Lager muss genau eingestellt werden. Die Ausgangskonfiguration ist in Abb. 4-25 dargestellt.

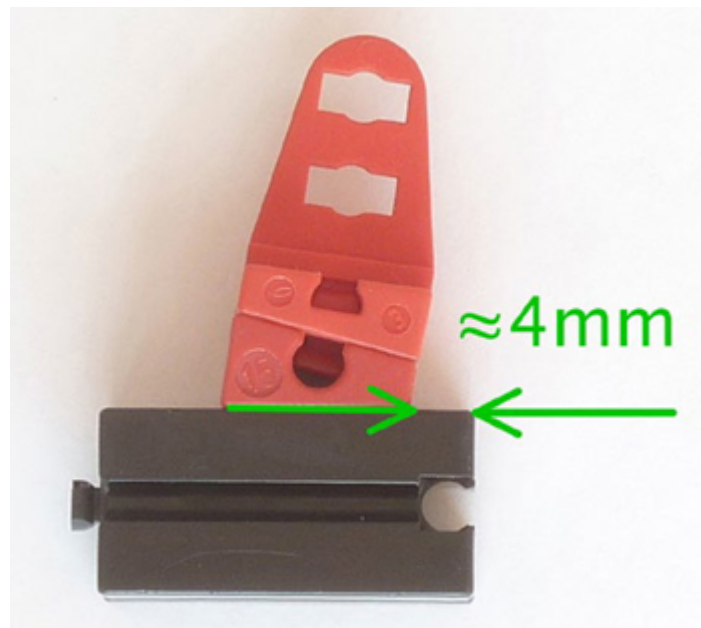


Abb. 4-25 Ausgangskonfiguration für die Positionierung der Spindel-lager

Neben der Position der Lager muss auch die Position der Lappen (S-Riegel) in den Nuten der Winkelsteine 30 eingestellt werden. Die Einstellung erfolgt zunächst ohne Pendel. Dazu dreht man das Zahnrad Z10 mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Das Hemmrad darf beim langsamen Drehen nicht total blockiert werden und beim schnelleren Drehen nicht Durchdrehen. Die Lappen müssen abwechselnd das Hemmrad blockieren und wieder freigeben. In Abb. 4-26 erkennt man, wie der vordere Lappen gerade den Stift blockiert, sobald der hintere Lappen vom Stift rutscht. Hinten schieben sich die Stifte mittig unter dem Lappen hindurch, während sie sich vorne seitwärts aus dem Lappen herausdrücken. Daher ist auch die Position des vorderen Lappens für einen

optimalen Gang wesentlich. Nach dem Anbau von Pendel und Antriebseinheit kann die Hemmung noch einmal nachjustiert werden.

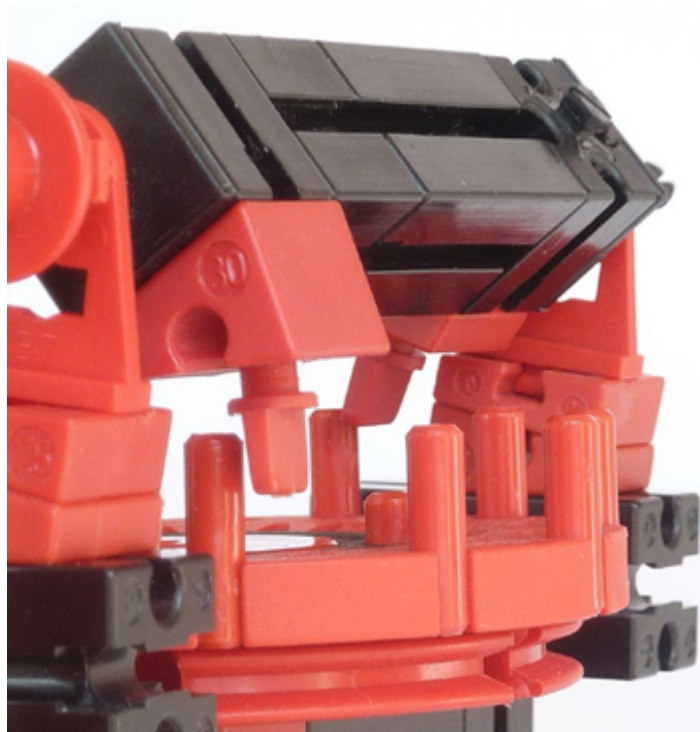


Abb. 4-26 Der vordere Lappen blockiert einen Stift, sobald der hintere vom Stift rutscht.

Stabpendel

Das Pendel besteht aus drei miteinander verbundenen Laufschiene. Die Verbindungen erfolgen wie üblich mit S-Laschen. Am unteren Ende des Pendels ist eine Metallachse 110 aufgehängt, die den Schwerpunkt des Pendels nach unten verlagert. Durch die Höhe der Aufhängung kann die Pendellänge und damit die Schwingungsdauer des Pendels eingestellt werden.

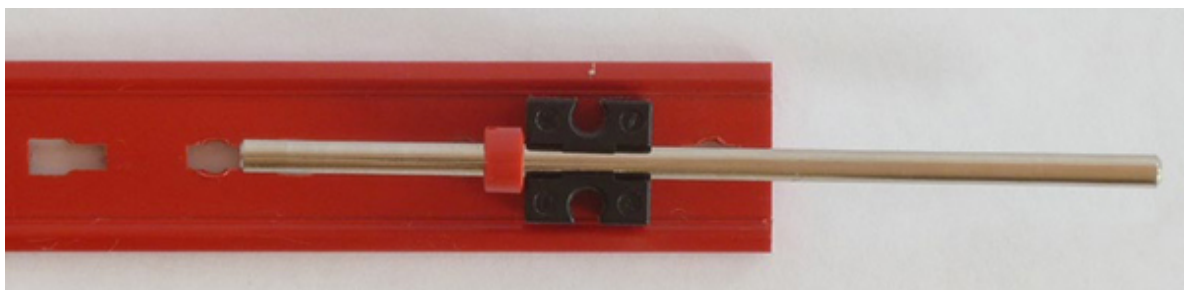


Abb. 4-27 Einstellung der Schwingungsdauer

Nach einer vollen Schwingung des Pendels hat sich das Hemmrad von einem Stift zum nächsten gedreht. Das Hemmrad dreht sich also genau einmal

während zwölf voller Schwingungen des Pendels. Wenn sich das Antriebsrad während einer Viertelstunde – also während 900 Sekunden – genau einmal drehen soll, muss wegen der 1:51,2-Übersetzung das Pendel eine Schwingungsdauer von $900 \text{ s} / (51,2 \cdot 12) \approx 1,46 \text{ s}$ besitzen.

Das Pendel wird mittels einer Seiltrommel auf die Spindelwelle geklemmt. Um eine ausreichend feste Verbindung zu bekommen, kann man einen Papierstreifen einklemmen (siehe Abb. 6–20 in Kapitel 6 *Die Rechenmaschine*) oder die Zapfen der Seiltrommel mit einem verdrehten Draht zusammenziehen.

Die Verbindung zwischen Pendel und Spindel muss durch Verdrehen sorgfältig eingestellt werden. Das entscheidende Kriterium ist, dass die Uhr mit möglichst wenig Antriebsgewicht dauerhaft läuft. Eine Fehleinstellung kann man daran erkennen, dass in der Hemmung die Blockade eines der beiden Lappen länger dauert als die des anderen. Eine erste Einstellung kann nach Gehör erfolgen: Tick und Tack müssen in gleichen Abständen aufeinander folgen.



Abb. 4–28 Antriebsgewicht

Gewichte und Seile

Als Gewichte dienen zwei Batteriegehäuse. Das Batteriegehäuse für das Uhrwerk wird mit ca. 150 g Masse gefüllt, das Gehäuse für das Schlagwerk mit 50 g. In

unserem Modell wurden Felgengewichte verwendet, es eignen sich aber ebenso gut Schrauben oder Abschnitte von Gewindestangen, z. B. aus dem Kasten *Super Cranes*. Das originale fischertechnik-Nylonseil ist für den Einsatz in unserem Modell etwas zu dick. Um viele Windungen auf die Drehscheibe 60 der Antriebseinheit wickeln zu können, verwendet man besser Leinenzwirn.

Bei der Einstellung von Hemmung und Pendel wählt man zunächst ein etwas größeres Gewicht, mit dem die Uhr sicher läuft, und verkleinert nach und nach, bis die Uhr gelegentlich stehenbleibt. Dann erhöht man das Gewicht wieder ein klein wenig.

Die Anzeigeeinheit

In der Anzeigeeinheit wird die Drehbewegung des Antriebsrads 4:1 auf den Minutenzeiger und 12:1 auf den Stundenzeiger übersetzt. In den beiden Zahnrädern Z30 kommen Freilaufnaben zum Einsatz.

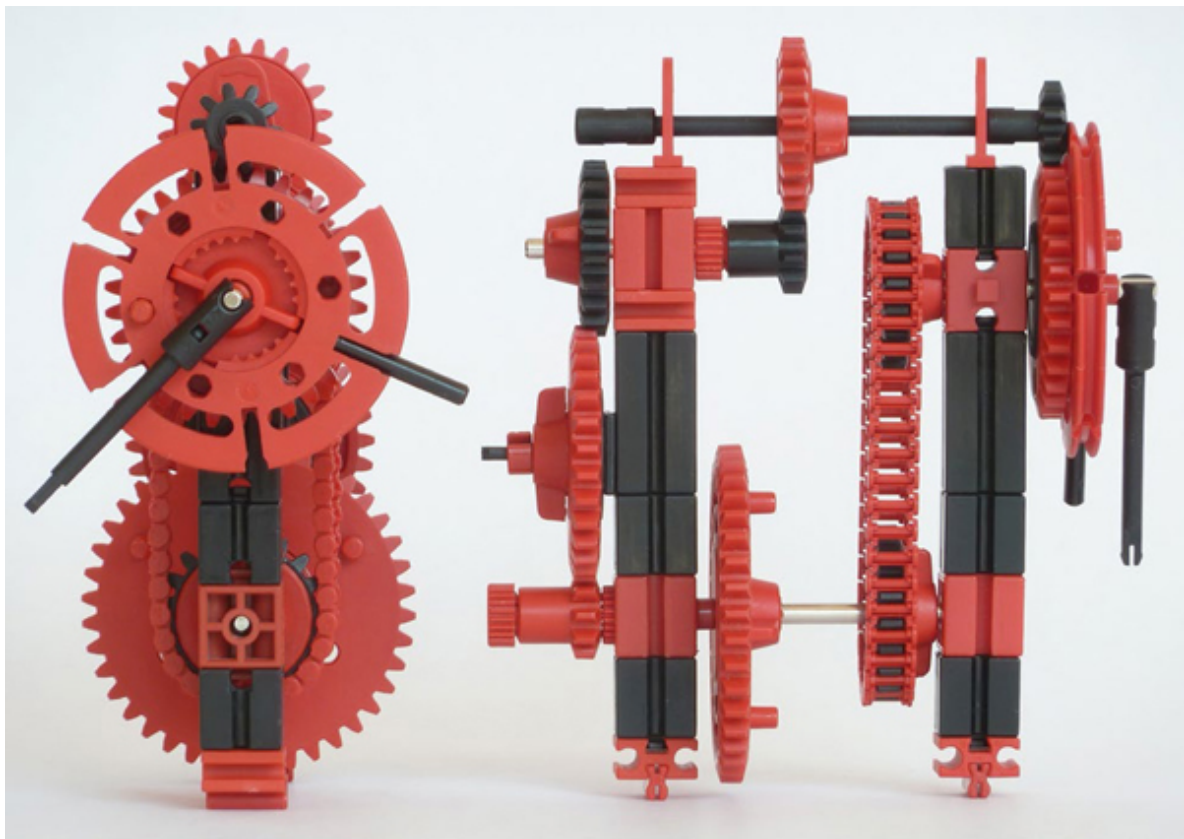


Abb. 4-29 Anzeigeeinheit

Die Ersteinstellung erfolgt, indem man den Stunden- und Minutenzeiger senkrecht nach oben stellt. Wichtig ist, dass 12 Uhr beim Vorwärtsdrehen der

Uhr korrekt angezeigt wird. Beim Rückwärtsdrehen gibt es durch das Spiel des Räderwerks etwas Versatz.

Die Zeiteinstellung im Normalbetrieb der Uhr erfolgt in der Regel zusammen mit dem Aufziehen der Uhr durch Herausziehen des Antriebsrads und der Antriebswelle. Die Uhrzeit kann dann durch Drehen des unteren Z40 der Anzeigeeinheit eingestellt werden. Am Antriebsrad kann man die Zeit bis auf wenige Sekunden genau ablesen.

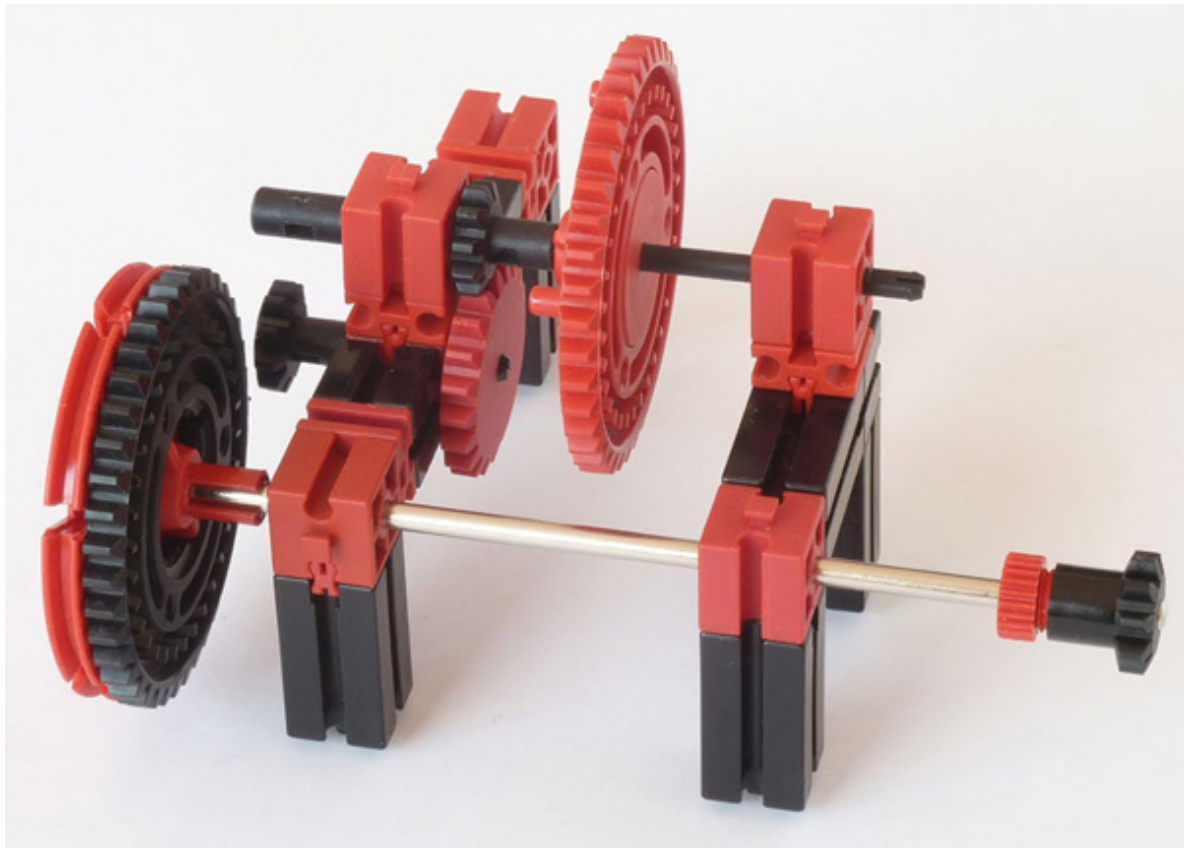


Abb. 4-30 Antrieb des Schlagwerks

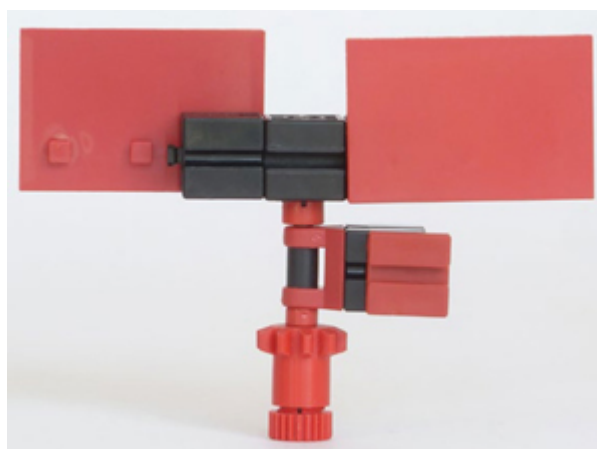


Abb. 4-31 Windflügelregler

Der Antrieb des Schlagwerks

Der Antrieb des Schlagwerks ist ähnlich aufgebaut wie das Gehwerk. Das Drehmoment des Antriebsrads wird zunächst in zwei Stufen 1:4 und 1:2 ins Schnelle übersetzt. Das große Zahnrad treibt dann als Kronenrad mit einer weiteren Übersetzung von 10:32 einen Windflügelregler an, der dem gesamten Getriebe schon nach einer kurzen Anlaufzeit Drehbewegungen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit aufzwingt. Dadurch erfolgen die Schläge in gleichmäßigen zeitlichen Abständen.

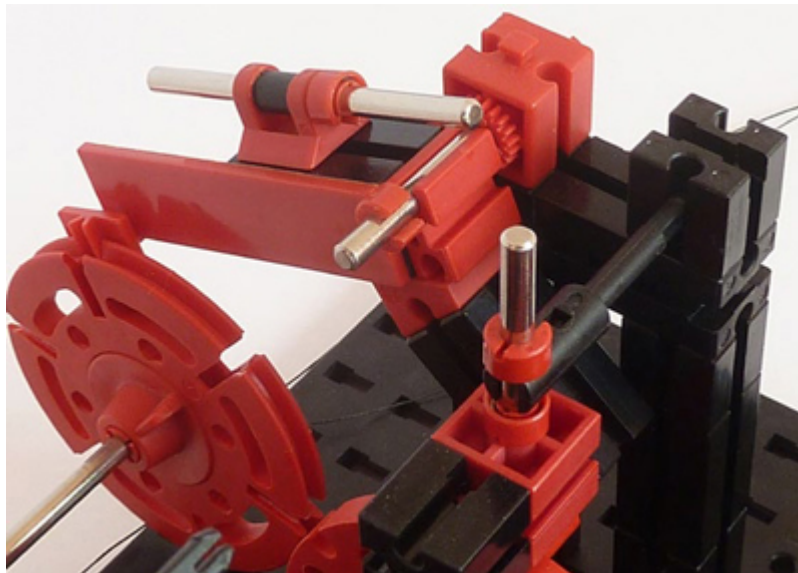


Abb. 4-32 Auslösung des Schlagwerks

Die Auslösung des Schlagwerks

Am Ende der Antriebswelle des Gehwerks befindet sich eine Drehscheibe 60 mit einem Auslösestift für das Schlagwerk. Dieser Stift hebt über fünf Minuten den Auslösehebel an, bevor dieser dann exakt zu Viertelstunden-Zeiten herunterfällt.

Der Auslösehebel ist zweiarmig. Nach dem Auslösen nutzt er die durch das langsame Anheben gewonnene Energie, um durch seine Gleichgewichtslage hindurch zu schwingen und so mit seinem zweiten Arm kurzfristig die Verriegelung der Schlossscheibe freizugeben. Das Schlagwerk läuft dadurch an, der Auslösehebel bewegt sich durch die Dämpfung der Schwingung wieder in seine Gleichgewichtslage und die Verriegelung senkt sich durch die Schwerkraft und blockiert die Schlossscheibe, sobald der nächste Klemmstift den Sperrbolzen erreicht.



Abb. 4-33 Verriegelung der Schlossscheibe

Die Schlossscheibe

Die Laufzeiten des Schlagwerks werden durch die vier Klemmstifte in den äußeren Bohrungen eines Innenzahnrad codiert. Das Prinzip ist wie folgt: In einer Stunde muss die Uhr insgesamt $1+2+3+4 = 10$ Mal schlagen. Die Schlossscheibe dreht sich während der kompletten Schlagfolge einmal, daher finden die Schläge alle 36° statt. Abb. 4-34 erklärt nun, wie die passenden Blockierungen mit dem Innenzahnrad erzielt werden können.

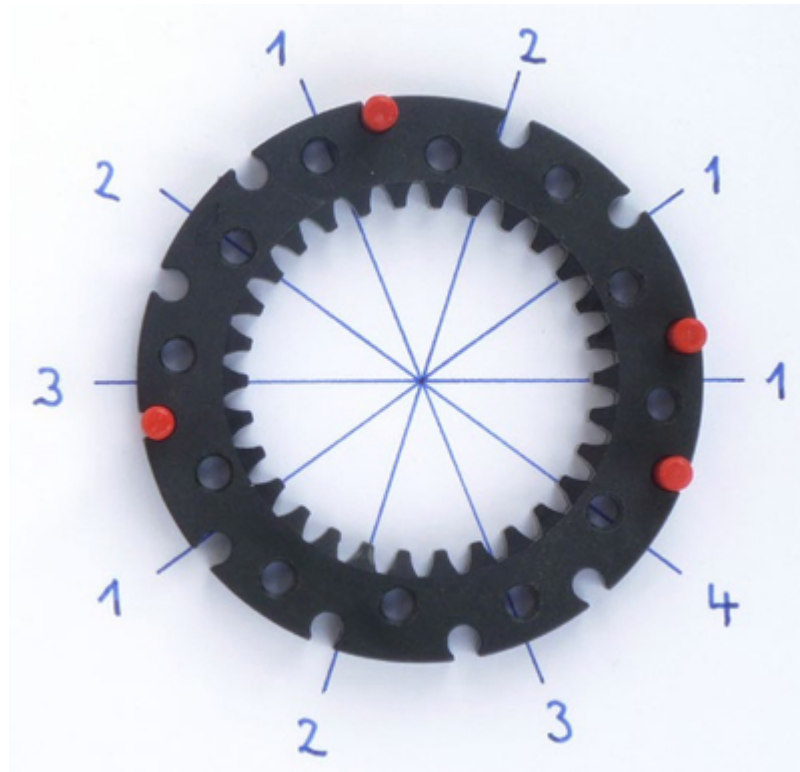


Abb. 4-34 Funktion der Schlossscheibe

Das Schlagrad

Die Stifte des Schlagrads unseres Modells – in der Uhrmachersprache auch *Hebnägelrad* genannt – lenken eine Metallachse 50 aus, die im weiteren Verlauf der Drehung schlagartig freigegeben wird, durch die vertikale Gleichgewichtslage schwingt und einmal gegen den Klangkörper (in unserem Modell eine Fahrradklingel) schlägt.

Das Schlagrad schlägt pro Umdrehung sechsmal. Diese sechsfache Teilung passt nicht direkt zur zehnfachen Teilung der Schlossscheibe. Daher bedarf es einer 6:10-Übersetzung, die in unserem Modell mit einem Differentialgetriebe realisiert wurde, da es keine Strinräder mit geeigneten Zahnzahlen im fischertechnik-System gibt.



Abb. 4-35 Kurz vor dem Schlag

Wenn sich also die Schlossscheibe einmal dreht, macht das Schlagrad eine $10/6$ -Drehung und schlägt somit zehnmal. Für eine korrekte Schlagfolge muss die Drehscheibe mit den Stiften bei gelöster Nabe passend zu Abb. 4-34 gegen die Schlossscheibe verdreht werden.

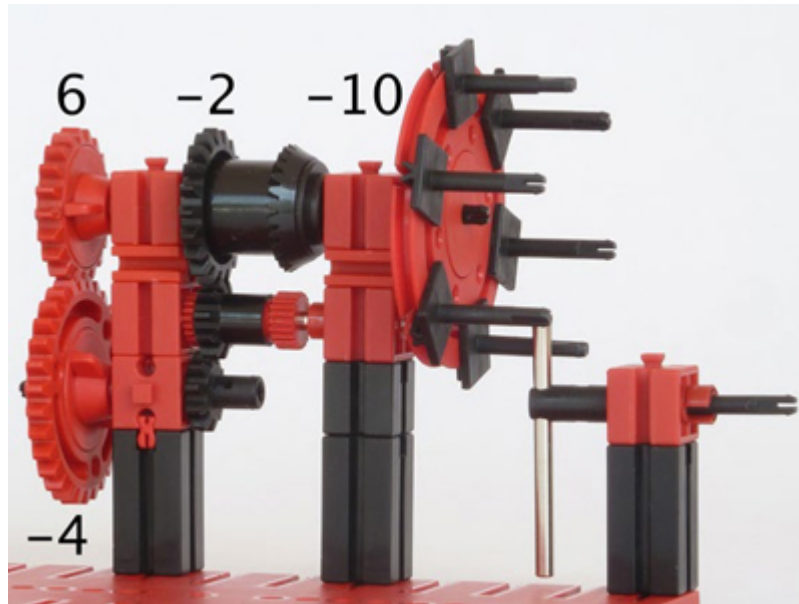


Abb. 4-36 Übersetzung zwischen Schlossscheibe und Schlagrad

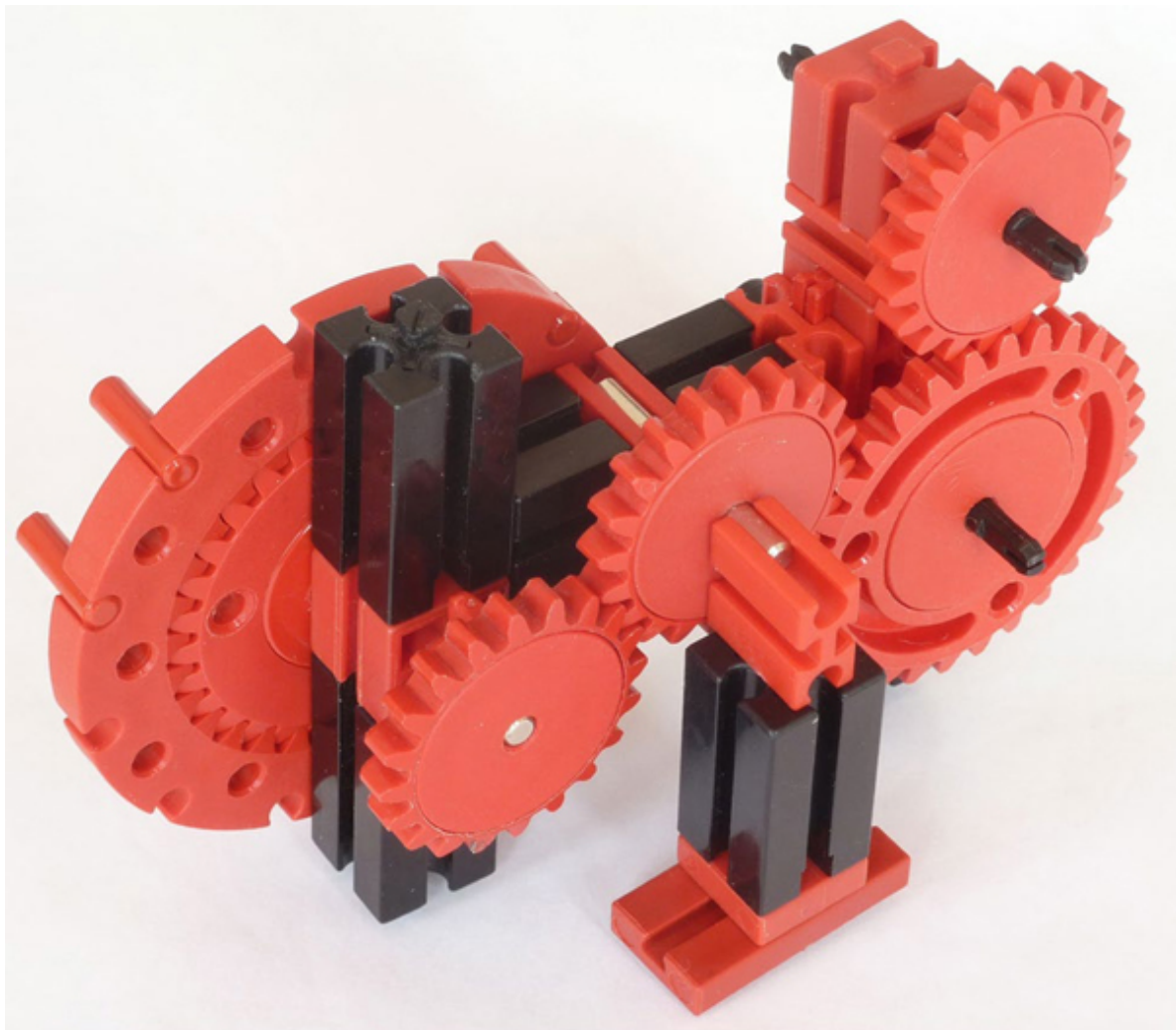


Abb. 4-37 Übergang von Schlossscheibe zur Übersetzung

Laufzeit und Genauigkeit

Das Antriebsgewicht der Uhr verliert in einer Stunde den vierfachen Umfang einer Drehscheibe 60 an Höhe, also ungefähr 72 cm. Man kann diese Laufzeit durch die Verwendung von Flaschenzügen erhöhen, ohne Platz für weitere Übersetzungsstufen zu benötigen. Bei einer Turmuhr ist es natürlich störend, die Gewichte durch ein Treppenhaus abzuseilen (Achtung: Brandschutzbestimmungen beachten!). Bei einer Kombination beider Methoden braucht man nur noch einmal am Tag aufzuziehen.

In der dargestellten Variante mit Spindelhemmung und Pendel geht die Uhr bei gleichmäßiger Temperierung bis auf wenige Sekunden am Tag genau. Kontrolliert wird das am besten anhand des Auslösens des Schlagwerks.

Literatur und Links

Die Bücher [1] und [3] sind für Uhrenliebhaber bestimmt. Sie enthalten je einen allgemeinen Teil und stellen eine umfassende Auswahl an Uhren detailliert vor. Die wirtschaftliche und kulturhistorische Geschichte der Uhren ist Gegenstand von [2], [4] und [7], die technische Geschichte wird in [8] ausführlich beleuchtet. Wertvolles Uhrmacherwissen findet sich in [5] und [6]. Sehr schöne Pendeluhren aus fischertechnik haben Heinz Jansen und Martin Romann gebaut [10, 11].

- [1] Ernst von Bassermann-Jordan, Hans von Bertele: *Uhren*. 9. Auflage, Klinkhardt & Biermann, München, 1982.
- [2] Gustav Bilfinger: *Die mittelalterlichen Horen und die modernen Stunden*. W. Kohlhammer, Stuttgart, 1894.
- [3] Frederick J. Britten: *Old Clocks and Watches & their Makers*. 2. Auflage, B. T. Batsford, London, 1904.
- [4] Carlo M. Cipolla: *Gezählte Zeit*. Wagenbach, Berlin, 1905.
- [5] Edmund B. Denison: *Rudimentary Treatise on Clock and Watch Making*. John Weale, London, 1850.
- [6] Conrad Dietzschold: *Die Hemmungen der Uhren*. C. Dietzschold Verlag, Krems a. Donau, 1905.
- [7] Gerhard Dorn-van Rossum: *Die Geschichte der Stunden*, Carl Hanser, München 1992.

- [8] Henry C. King: *Geared to the Stars. The Evolution of Planetariums, Orreries, and Astronomical Clocks*. University of Toronto Press, Toronto, Buffalo, 1978.
- [9] Thomas de Padova: *Leibniz, Newton und die Erfindung der Zeit*, Piper, 2013.
- [10] fischertechnik hobby 1, Band 2, Fischerwerke, Waldachtal, 1972.
- [11] Heinz Jansen: *Die Standuhr*, Clubblatt 2/2012, fischertechnikclub
Nederland und *Die Kuckucksuhr*, Clubblatt 2/2014, ergänzende Erklärungen
unter
http://www.fischertechnikclub.nl/images/ftcnl/modellen/2012/02/Staande_Klok/Slingerlok_bottlenecks.pdf.
- [12] Martin Romann: *Dokumentation zur Entwicklung einer Pendeluhr*.
http://ftcommunity.de/categories.php?cat_id=1886. Video unter
<http://www.youtube.com/watch?v=VJ2OkslQSzU>.