

Das Ticken der Uhr verstehen

Was verleiht einer mechanischen Uhr ihren regelmässigen Gang – oder was bringt sie zum Ticken? Die Lösung liegt im faszinierenden Mechanismus der sogenannten Hemmung. Dieser zentrale technische Kniff wird hier am Beispiel der auf Galileo Galilei zurückgehenden «Stifthemmung» verständlich gemacht. Das Aha-Erlebnis wird noch vertieft, wenn die Lernenden anhand der beigegeführten Anleitung aus Holz, Nägeln, Draht und Schnur eine funktionierende Hemmung – und damit eine elementare Uhr – selber herstellen.

Daniel Wagner, Urs Aeschbacher

Seit Jahrhunderten ist die Schweiz berühmt für ihre Uhren. Die vor allem in der Westschweiz beheimatete Uhrenindustrie stellt einen wichtigen Wirtschaftszweig unseres Landes dar. Unsere Uhrmacher schaffen komplizierte tickende Wunderwerke aus winzigen Zahnrädchen, Federn und sich geheimnisvoll hin und her bewegenden Metallteilchen.

Diese technische Meisterleistung hat ihren Ehrenplatz auf der neuen 10-Franken-Note erhalten. Hier soll es nun aber nicht um die Funktionsweise eines ganzen Uhrwerks gehen, das wäre zu kompliziert. Vielmehr steht in diesem Artikel nur das «Herz» der mechanischen Uhr im Zentrum. Es verleiht ihr den regelmässigen Gang und erzeugt das

charakteristische Tick-Tack-Geräusch. Die Uhrmacher sprechen von der «Hemmung».

Das Uhren-Grundproblem: Wie bringt man ein Rad zum regelmässigen Drehen?

Bei den alten Turmuhr und den Wand- und Standuhren wurde das Räderwerk je-



Abb. 1: Das auf der neuen Zehnernote dargestellte Uhrwerk

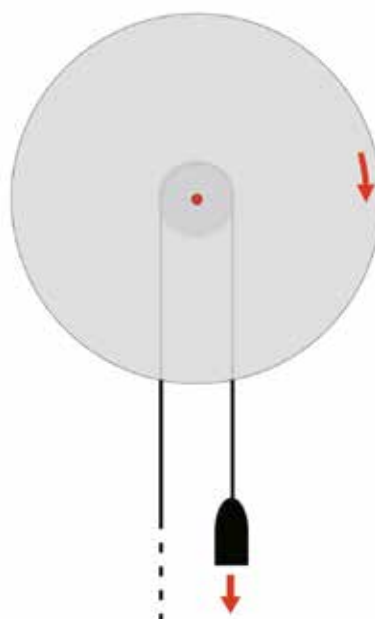


Abb. 2: Gleichbleibende Gewichtskraft beschleunigt Raddrehung

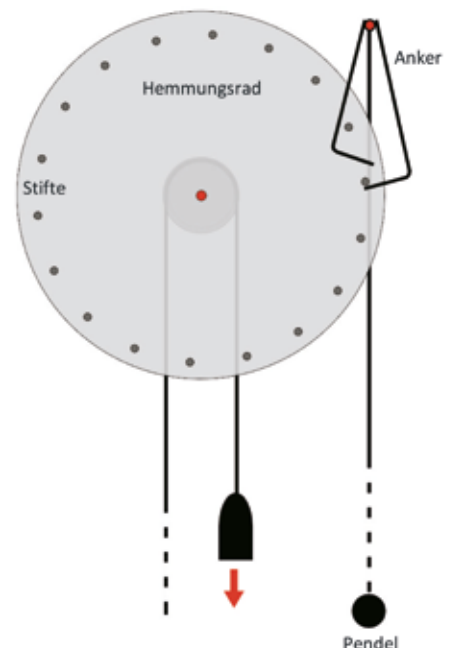


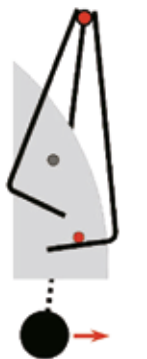
Abb. 3: Stifthemmung



a) Der linke Ankerarm stoppt den rot markierten Stift.



b) Der Anker schwingt mit der Pendelbewegung nach links.



c) Der linke Ankerarm gibt den Stift ganz frei. Das Hemmungsrad dreht sprunghaft weiter.



d) Nun stoppt der rechte Ankerarm den rot markierten Stift.



e) Der Anker schwingt mit der Pendelbewegung nach rechts.



f) Der rechte Ankerarm gibt den Stift ganz frei. Das Hemmungsrad dreht sprunghaft weiter, aber nur bis von oben her der nächste Stift auf den linken Ankerarm trifft. Die Phasen **a)** bis **f)** beginnen von Neuem.

Abb. 4: Die Stifthemmung in Aktion

Das gewichtsgetriebene Hemmungsrad will sich drehen. Aber seine Stifte verfangen sich einer nach dem anderen im hin und her pendelnden Anker. Dabei gibt es einen doppelten Stopp und das Hindernis erhält seinerseits jedes Mal einen kleinen Stoss (in den Phasen a–b und d–e), welcher das Pendel mitsamt dem Anker am Schwingen hält.

weils von einem Gewicht angetrieben. Aber: Die gleichbleibende Zugkraft eines Gewichts führt keineswegs zu einer gleichmässigen Drehbewegung des Rades (vgl. Abb. 2). Das Gewicht würde immer schneller sinken und schliesslich gleichsam «herunterrasseln», wobei das Rad sich immer schneller dreht. Um dies zu verhindern, braucht es also eine Art Bremse, eben das, was die Uhrmacher «Hemmung» nennen. Wie diese Hemmung beschaffen ist, d. h. durch welche schlaunen Mechanismus die Raddrehung trotz ständigem Zug des Gewichtes regelmässig gehalten wird, stellt das zentrale Geheimnis der Uhr und einen Triumph der Uhrmacherkunst dar.

Die Lösungsidee besteht in der Kombination der Raddrehung mit einer Pendelbewegung

Ein hin und her schwingendes Pendel benötigt für jede Schwingung immer genau gleich viel Zeit. Es handelt sich um ein physikalisches Naturgesetz: Die Schwingungsdauer eines Pendels hängt nur von dessen Länge ab; für ein gegebenes Pendel bleibt sie also immer gleich. Daher die Idee, ein schwingendes Pendel als eine Art Taktgeber für die Raddrehung einzusetzen. Die Beschleunigung des Rades würde periodisch immer wieder unterbrochen. Das Rad könnte nicht mehr «durchdrehen», sondern die Beschleunigung müsste nach jedem Stopp wieder neu beginnen. Das gewichtsgetriebene Rad könnte so nur ruckweise vorrücken, in einem regelmässigen Stop-and-Go. Dies konkret-mechanisch zu realisieren, bildet seit je den Kern der Uhrmacherkunst. Im Laufe der Jahrhunderte entwickelten kreative Uhrmacher viele verschiedene und immer bessere Mechanismen dafür. Als eine originelle und besonders anschauliche Lösung soll hier die von Galileo Galilei erfundene, dann vergessene und 1741 vom Franzosen Louis Amant wiedererfundene «Stifthemmung» (Scherenhemmung) dargestellt werden, die in grossen Turmuhren zum Einsatz kam (vgl. Abb. 3).

Die Stifthemmung als konkretes Lösungsbeispiel

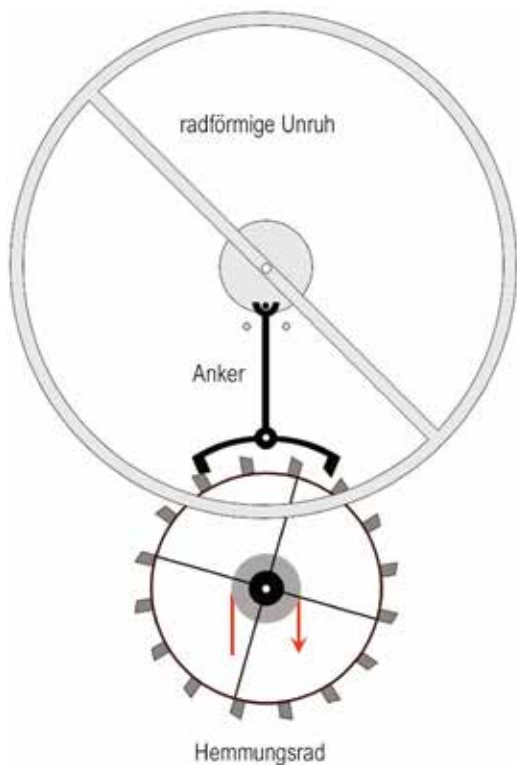
Bei der Stifthemmung wird der mechanische Kontakt zwischen Hemmungsrad und Pendel wie folgt hergestellt: Das Rad wird entlang seinem Rand mit einem Kranz von senkrecht herausragenden Stiften bestückt. Das Pendel erhält eine Art Greifwerkzeug, das man «Anker» nennt. Dank seiner schlaunen Form kann dieser Anker

beim Hin-und-Her-Schwingen einen Stift nach dem anderen vorübergehend stoppen. Dadurch steht jedes Mal das ganze Rad still. Anhand von Abbildung 4 lässt sich der Weg eines Stiftes verfolgen, der in die Fänge des schwingenden Ankers gerät. Im Verlauf einer vollen Pendelschwingung wird er vom Anker zweimal gestoppt und zweimal wieder freigelassen. Das in Abbildung 4 dargestellte Geschehen wiederholt sich bei jedem nachfolgenden Stift. Interessanterweise nennen die deutschsprachigen Uhrmacher diesen Vorgang «Hemmung» und betonen damit die Stopp-Phasen. Die französischen und englischen Uhrmacher betonen dagegen die Freilassungs-Phasen und nennen denselben Vorgang «échappement» bzw. «escapement».

«Unruh» statt Pendel: Der Hemmungsmechanismus wird komplizierter

In den laufend herumbewegten Armbanduhrn lassen sich natürlich weder Gewichte noch Pendel einsetzen. Der Antrieb für das Räderwerk wird hier durch eine gespannte Spiralfeder (auf dem 10er-Noten-Bild in der runden Kapsel oben links) geliefert. Als schwingender Taktgeber funktioniert eine sogenannte «Unruh»: Eine winzige runde Scheibe bzw. eine ringförmige Konstruktion, die um ihre Achse rotiert, und zwar immer abwechselnd in die eine und dann wieder in die andere Richtung. Statt einer Pendelschwingung also eine Drehschwingung. Sie wird von einer mit der Unruh verbundenen elastischen Spiralfeder (im 10er-Noten-Bild oben rechts) erzwungen, und wie eine Pendelschwingung dauert sie von jedem Umkehrpunkt zum nächsten immer gleich lang. Auch hierfür mussten die Uhrmacher einen Hemmungsmechanismus finden, d. h. eine mechanische Kopplung zwischen dem schwingenden Taktgeber und dem vorwärtsdrängenden Räderwerk. Als sehr gute Lösung hat sich die sogenannte «Schweizer Ankerhemmung» durchgesetzt. Wer sich für diese nicht ganz einfache Konstruktion interessiert, die übrigens auch zuunterst auf dem 10er-Noten-Uhrwerk zu erkennen ist, findet eine erklärende Darstellung in unserem Exkurs.

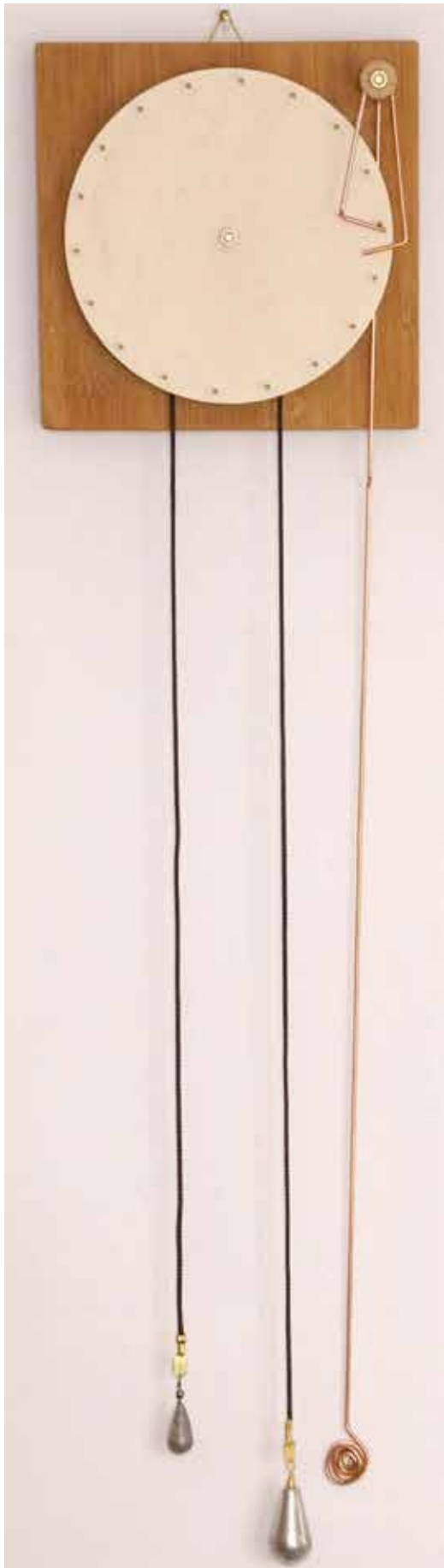
Exkurs: Prinzip der Schweizer Ankerhemmung



Das Hemmungsrad trägt keine Stifte, sondern Zähne. Der hin und her schwenkende Anker greift mit abwechselnden Armen zwischen diese Zähne, um das Rad jeweils vorübergehend zu stoppen. Weil die beiden Ankerarme gespreizt sind, blockieren sie jeweils unterschiedliche Zähne. Das erschwert die Beobachtung und das Verständnis des Ablaufs. Die grösste Verständnisschwierigkeit ergibt sich aber aus der Tatsache, dass der Anker von der hin und her schwingenden Unruh getrennt ist. Deshalb versuchen wir unten das Prinzip der Schweizer Ankerhemmung auf zwei Ebenen zu beschreiben, einerseits der Anker-Unruh-Interaktion und andererseits der Hemmrad-Anker-Interaktion.

Anker-Unruh-Interaktion	A	B	C	D	E	
	Beim Zurückschwingen der Unruh rastet ihr Stift in die Ankergabel ein und stösst diese nach links .	Die vom Hemmungsrad bewegte Ankergabel stösst den Stift der Unruh weiter nach links . Dadurch erhält die weiterdrehende Unruh neuen Schwung	Freie Drehschwingung der Unruh. Die Unruh dreht frei weiter, macht ca. eine halbe Umdrehung im Uhrzeigersinn und schwingt dann unter der Wirkung ihrer Spiralfeder wieder zurück.	Beim Zurückschwingen der Unruh rastet ihr Stift (wie bei A, aber in umgekehrter Richtung) in die Ankergabel ein und stösst diese nach rechts .	Die vom Hemmungsrad bewegte Ankergabel stösst den Stift der Unruh (wie bei B, aber in umgekehrter Richtung) weiter nach rechts . Dadurch erhält die weiterdrehende Unruh neuen Schwung.	
	Hemmrad-Anker-Interaktion	A	B	C	D	E
		Wegen des Stosses (siehe oben) wird der ganze Anker ein wenig gedreht. Weil dabei sein rechter Arm hochgezogen wird, löst sich die Blockierung des Hemmungsrades am Zahn 1.	Das Hemmungsrad rückt vor. Die schräge Fläche des Zahnes 1 stösst den rechten Arm nach oben. Durch die entsprechende Ankerdrehung wird der andere Ankerarm in Blockierstellung gesenkt und die Ankergabel nach links geschwenkt.	Das Hemmungsrad ist blockiert, diesmal vom linken Ankerarm an Zahn 4.	Wegen des Stosses (siehe oben) wird der ganze Anker (wie bei A) ein wenig gedreht. Weil dabei sein linker Arm hochgezogen wird, löst sich die Blockierung des Hemmungsrades am Zahn 4.	Das Hemmrad rückt vor. Die schräge Fläche des Zahnes 4 stösst den linken Ankerarm nach oben. Durch die entsprechende Ankerdrehung wird der andere Ankerarm in Blockierstellung gesenkt und die Ankergabel nach rechts geschwenkt.

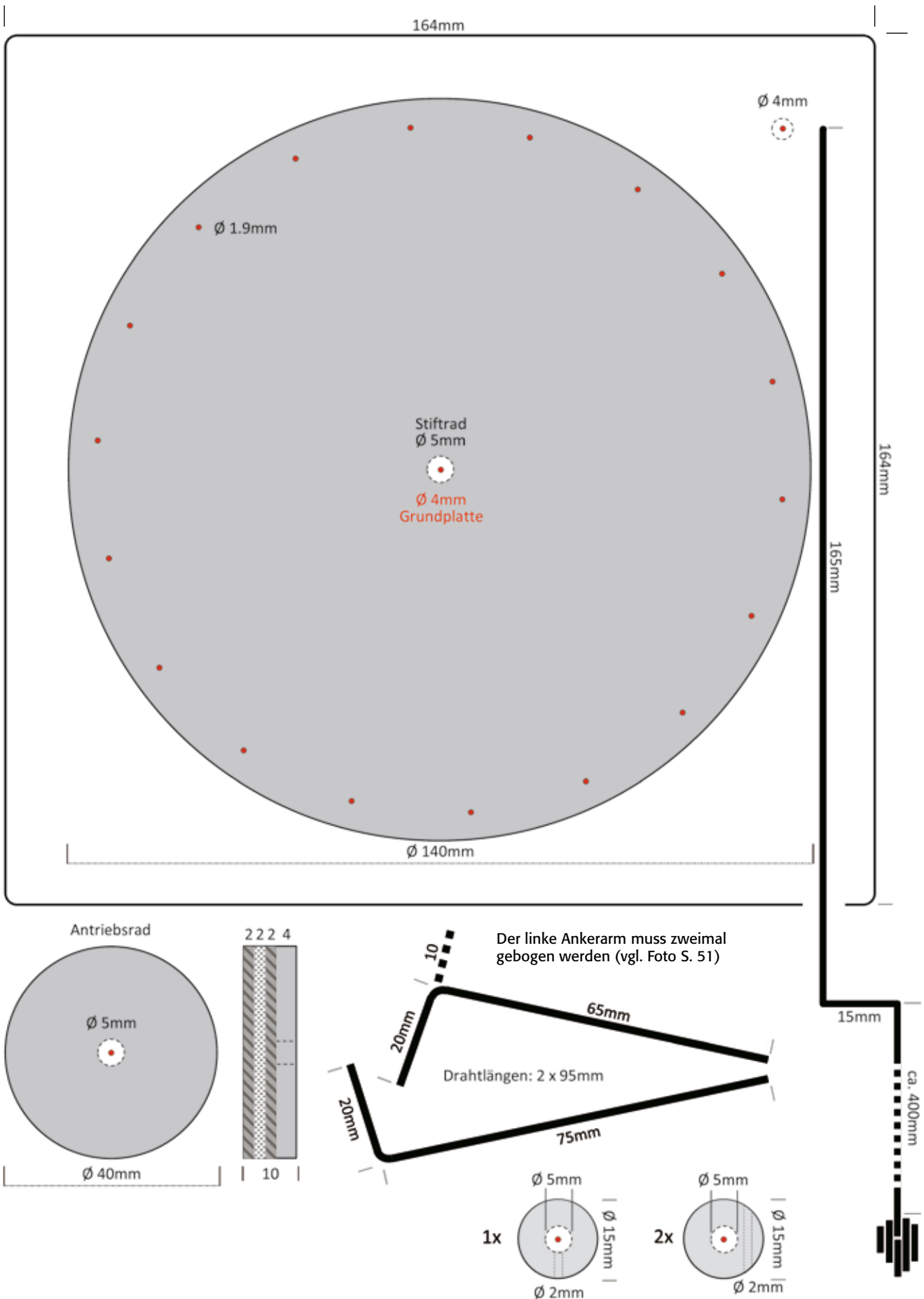
Elementare Wanduhr selber bauen



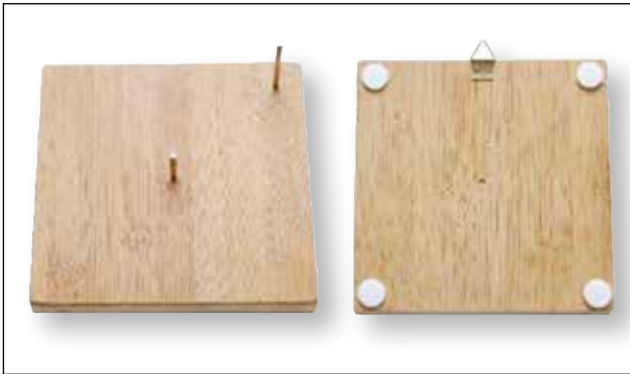
Materialliste (Angaben in mm)

- **Grundplatte Bambus** (164 × 164 × 18)
→ möglichst Hartholz
- **Stiftrad** (Pappelsperholz, Ø 140 × 8)
- **Dübelstab-Räder** (Buche)
1 × Ø 40 × 10
3 × Ø 15 × 8
- **Schweissdraht** (Stahl, Ø 2, Länge 1000)
- **Messingröhrchen** (aussen Ø 5, innen Ø 4)
1 × 36 (Länge)
1 × 19 (Länge)
- **Messing-Rundstab** (Ø 4)
1 × 42 (Länge)
1 × 59 (Länge)
- **Messing-Mutter** (2 × M4)
- **Messing-Unterlegscheibe** (2 × für M4)
- **Stahlnägel** (18 × Ø 2 × 20)
- **Polyester-Kordel** (Ø 2 × 1500)
2 × 125 (Führungen bei Antriebsrad)
1 × 1250
- **Kabelschuh** (2 × passend für Kordel)
- **Fischerblei**
1 × 60g (Birnenblei)
1 × 15g (Birnenblei)
- **Filzfüsschen** (selbstklebend, 4 × Ø 17)
- **Bilderöse** (1 × 15 × 15)
- **Schleifpapier** (Körnung 180)
1 × 125 × 2

Biege- und Bohrlehren (1:1)



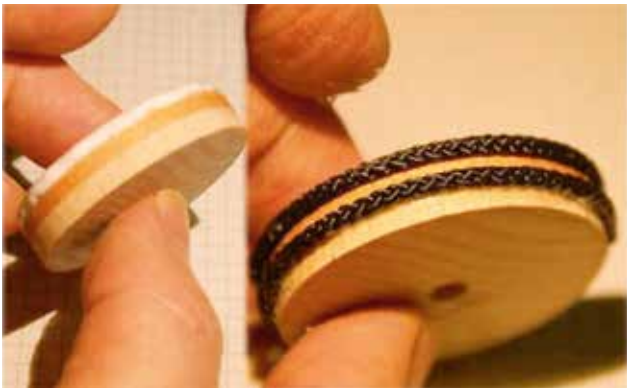
Grundplatte



(Angaben in mm)

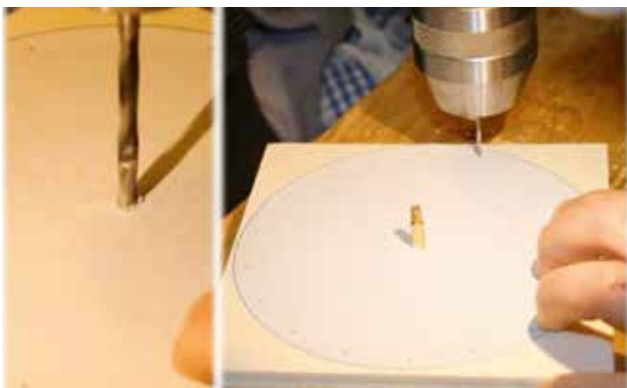
- Grundplatte zuschneiden
- mit Hilfe der Bohrlehre Löcher ($\varnothing 4$) für Messingachsen bohren
- 2 Messingachsen (alternativ M4-Gewindestange) zuschneiden ($\varnothing 4 \times 42/59$)
→ an einem Ende M4-Gewinde schneiden
- auf Rückseite Bilderöse und Filzfüsschen anbringen
- Achsen vorerst noch nicht in Bohrlöcher schlagen (siehe Herstellung Stiftrad)

Antriebsrad



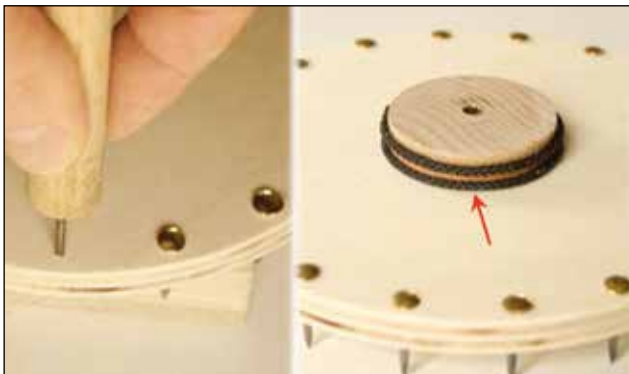
- mit Hilfe der Bohrlehre Mitte anzeichnen
- Loch ($\varnothing 5$) bohren
- Schleifpapierstreifen (125×2) mit Masstab und Japanmesser zuschneiden,
rückseitig mit Weissleim bestreichen, 2 mm vom einen Rand entfernt aufkleben
- Polyester-Kordel (2×125) zuschneiden und Enden mit Feuerzeug ansengen
- Weissleim seitlich der Schleifpapierbahn auftragen, Kordel sorgfältig ankleben

Stiftrad

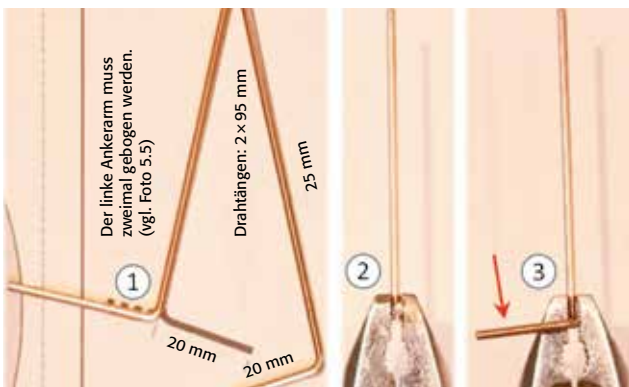


- Radschablone ausschneiden und auf Sperrholzbrett (142×142) kleben
→ wiederablösbarer Klebestift (Scotch up)
- Loch ($\varnothing 5$) für Radachse bohren
- Messingröhrchen ($\varnothing 5 \times 36$) zusägen
→ an den Enden entgraten
→ und als Lagerhülse ins Bohrloch stecken
- eine der Messingachsen ($\varnothing 4$) als Drehachse für die Bohrunterlage verwenden:
→ sie soll auch als Anschlag für die Tellerschleifmaschine dienen (siehe Bild unten),
→ deswegen Abstand der Drehachse zu einer Seite der Bohrunterlage maximal 6 cm (Radius Stiftrad 7 cm)
→ Bohrunterlage im richtigen Abstand zum Bohrer fixieren
- Stiftlöcher ($\varnothing 1.9$) bohren
- Ecken Sperrholzbrett (mit Dekupiersäge) grob absägen
- Sperrholzrad mit Hilfe der Bohrunterlage (Drehachse) und Tellerschleifmaschine aufs Mass rundschleifen

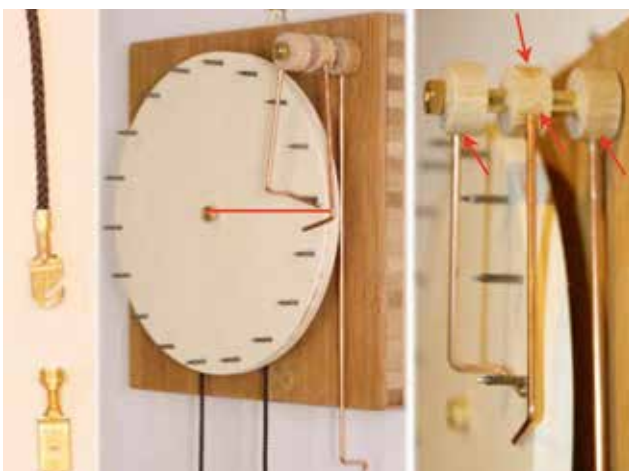




Anker und Pendel



Antriebskordel, Zusammenbau der Uhr



- Sperrholzrad auf Holzunterlage legen und Stahlnägel (Ø 2 × 20) von hinten mit Hilfe eines Rundholzes in Bohrlöcher drücken
- Messinghülse muss auf Rückseite des Stiftrades hinaussehen.
- Antriebsrad sorgfältig auf die Hülse stecken und mit dem Stiftrad verleimen
 - Lage der Kordel beachten! Die äussere Kordel muss zur Seite des Stiftrades hin liegen.
- vom Schweissdraht (Ø 2 × 1000) 2 Stücke zu 95 mm abschneiden (Reststück Pendel)
- rechter Ankerarm gemäss Biegelehre biegen
- linker Ankerarm:
 - 1. Biegung gemäss Biegelehre (Bild 1)
 - 2. Biegung mit Abstand von 10 mm zur 1. Biegung gemäss Bild 2+3 nach links
 - Winkel gemäss Biegelehre nachjustieren
- aus Rest des Schweissdrahtes anhand Biegelehre Pendel biegen
 - von unten her mit Rundzange Schnecke drehen, bis Abstand zum Knick des Pendels zirka 400 mm (vgl. Biege- und Bohrlehren)
- 3 Stellringe aus Dübelstab (Ø 15 × 8)
 - 8 cm langes Stück zirka 3 cm tief senkrecht und zentriert aufbohren (Ø 5)
 - 3 Ringe zu 8 mm absägen
 - 2 sekantial (Anker) durchbohren, 1 radial (Pendel) (vgl. Biege- und Bohrlehren)
- Messinghülse (Ø 5 × 59) zusägen, entgraten
 - Stellringe vorsichtig auf die Hülse drücken (von links: Pendel, rechter, linker Ankerarm)
 - Ankerarme gemäss Bild 4 ausrichten
- Polyester-Kordel (125 cm) zuschneiden und Enden mit Feuerzeug ansengen
- an den Enden Kabelschuh ankleben und als Haken anpassen (ausser bei Ring-Kabelschuhen)
- Stiftrachse vorsichtig ins Bohrloch der Grundplatte schlagen, bis die Stiftradhülse in der Länge genau darauf passt (Unterlegscheibe zwischen Hülse und Grundplatte)
 - analog mit Ankerachse und Anker/Pendel
- Testbetrieb an Wand: möglichst senkrecht, Ankerarme leicht über bzw. unter horizontaler Radialachse (rot) und 3–4 mm seitlich über Pendel ragend (vgl. oben Bild 4)
 - wenn Gang gleichmässig, Ankerarme/Pendel mit Sekundenkleber fixieren (Pfeile)