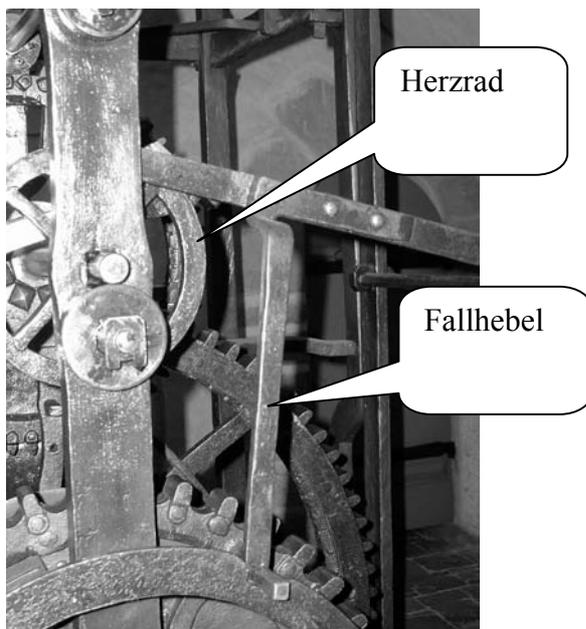
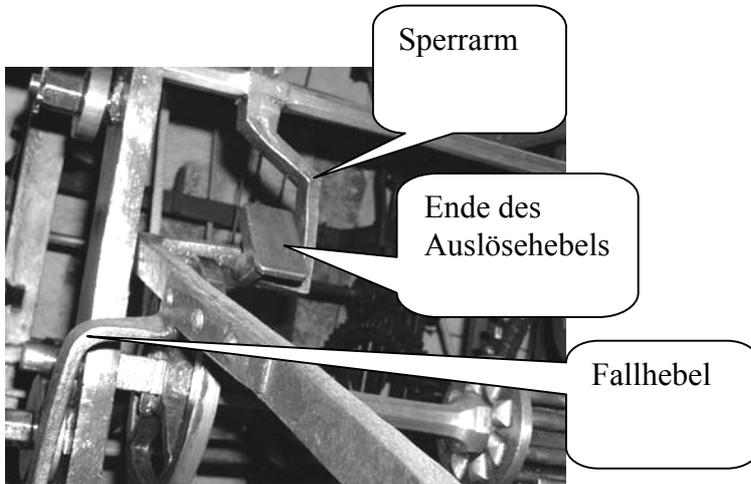


Anhang

A1: Die Nebenwerke / das mechanische Prinzip

Das Viertelstundenschlagwerk



Das Viertelstundenschlagwerk besteht aus verschiedenen ineinandergreifenden Zahnrädern und aus zwei Achsen. Die untere Achse ist mit einer Seiltrommel ausgestattet und mündet im so genannten Schlussrad, einem das Werk abschliessenden Rad am äusseren Rand des Uhrgehäuses. Die andere Seite dieser Achse wird mit einem grossen Rad, dem grössten dieses Werkes, abgeschlossen, welches fast im

Zentrum des Uhrgehäuses liegt. Sobald das Werk in Bewegung ist, gibt dieses Rad den Impuls für das Schlagen der Viertelstundenglocke im Turm ab. Dabei wird eine gegenüber dem Rad nordwärts liegende Einzelstange je nach Anzahl Glockenschläge ein bis viermal nach oben gedrückt und löst via einen Drahtzug, der nach oben in den Turmschaft verläuft, das Schlagen der Glocke aus.

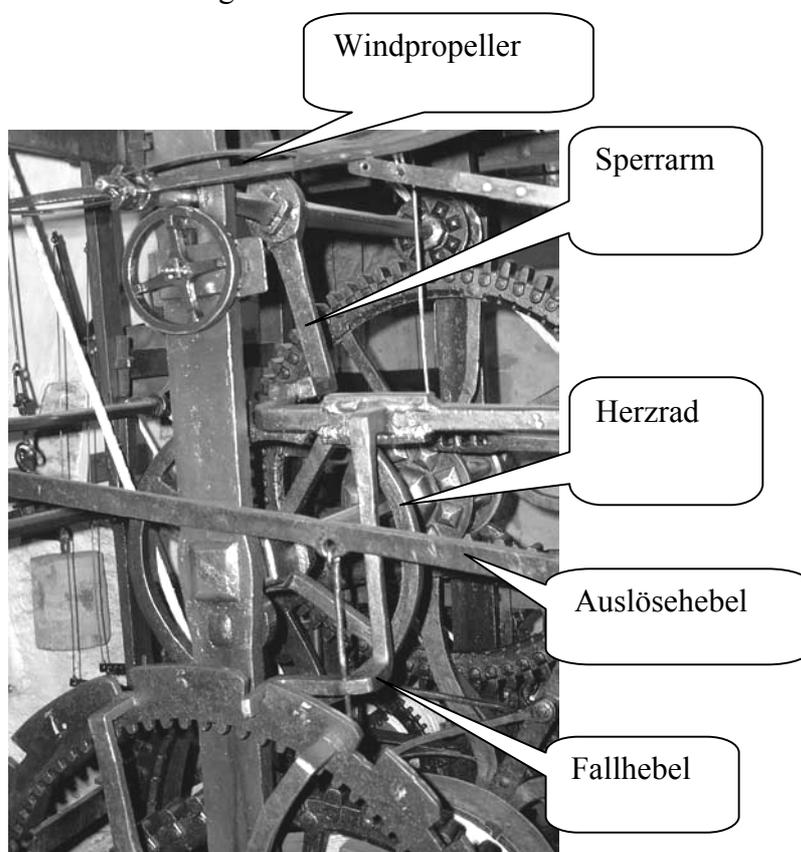
Die obere Achse des Viertelstundenschlagwerks, die durch eine Zahnradübertragung mit der unteren verbunden ist, enthält ein mit einer grösseren Kerbe versehenes kleineres Rad, das so genannte Herzrad, und mündet, an der äusseren Seite des Uhrgehäuses, in ein optisch auffälliges Propellerrad. Fix mit dieser Achse

verbunden ist der Sperrarm, der vom Fallhebel aufgehalten wird. Letzterer ruht, wenn das Werk nicht in Bewegung ist, oben in der Kerbe des Herzrades und unten in der Kerbe des Schlussrades. An der alle Viertelstunden stattfindenden Auslösung des Werks sind drei physisch voneinander getrennte Elemente verantwortlich: der Auslöshebel, der Sperrarm und der Fallhebel. Dabei wird der Auslöshebel an seinem unteren Ende von einer der vier Noppen an der Rückseite des Stundenrades nach oben gedrückt, bis er den Fallhebel aus

den Kerben des Herzrades und des Schlussrades hebt. Zuerst dreht sich, nur ganz kurz, die

obere Achse des Sperrarms, was ein rasches Schnurren des Propellers verursacht. Man nennt diesen Vorgang, der dem Auslösen des Werkes vorausgeht, die „Warnung“. Die Sperrarm-Achse kann sich aber nicht weiterdrehen, weil der Sperrarm vom oberen Ende des Auslösehebels aufgehoben wird. Man merkt aber, dass das Werk in Lauerstellung ist und jeden Moment in Bewegung geraten kann. Dies geschieht, wenn das untere Ende des Auslösehebels die Stundenradnuppe passiert und der ganze Hebel, brüsk und laut knackend, nach unten fällt. Als bald ist der Sperrarm freigegeben, er dreht sich, und mit ihm auch der Propeller, der durch die Erzeugung von Luftwiderstand eine bremsende Funktion hat. Vom Zugseil angetrieben, setzt sich das ganze Viertelstundenschlagwerk in Bewegung, und zwar für die Dauer, die der Fallhebel benötigt, um in die nächste Kerbe des Schlussrades zu fallen. Automatisch ist auch das Herzrad blockiert, nämlich durch den oberen Teil des in die Kerbe fallenden Fallhebels. Die Schlagwerkapparatur steht erneut still. Wir sind nun wieder in der Ausgangslage, und es dauert eine Viertelstunde, bis sich das Werk wieder bewegen wird.

Das Stundenschlagwerk



Das Stundenschlagwerk ist ähnlich aufgebaut wie das Viertelstundenschlagwerk: Radachse mit Seiltrommel und Gewichtsstein, in Schlussrad (unten) und Herzrad (oben) verkeilte Arretierstange (Fallhebel), Sperrarm an der oberen Achse, Auslösehebel, Windpropeller als Bremsinstrument. Natürlich finden sich am Schlussrad dieses Werkes zwischen den einzelnen Verankerungen für den Fallhebel nicht vier, sondern zwölf Abstände¹, über welche dieser jeweils gleiten kann. Wie beim Viertelstundenapparat vergrößern sich auch da die Abstände, so dass sich das Werk für die ersten

Glockenschläge kurz, für die letzten lange dreht. An einem halben Tag (12 Stunden) hat das Stundenwerk also 78 Schläge auszuführen.

Interessant am Stundenschlagwerk ist die Tatsache, dass dieses nicht durch das Hauptrad (Stundenrad) des Gehwerks, sondern durch das Viertelstundenschlagwerk ausgelöst wird. Letzteres dreht sich ja, bei seinen kurzen viertelstündlichen Einsätzen einmal in der Stunde um die eigene Achse, so dass eine am Viertelstunden-Schlussrad befestigte Noppe den Stundenschlag-Apparat kurz deblockieren kann. Dabei läuft, analog zum Viertelstundenschlagwerk, ein Auslösehebel über die Noppe und wird dabei nach oben

¹ Genau genommen sind es deren elf! – Erst durch die Beobachtung eines Schülers (Christoph Ischi, Durchgang von September 2003) sind wir darauf gestossen, dass es keinen Radabstand für den Ein-Uhr-Schlag gibt. Der Quartaner fragte sich, ob es denn im Zytglogge nie Ein-Uhr schlage... – Erklärung: Beim Ein-Uhr-Schlag wird der Fallhebel nur kurz angehoben, was bereits einen einzelnen Glockenschlag auszulösen vermag.

gedrückt. Damit hebt der Auslösehebel den Fallhebel aus den Kerben von Schluss- und Herzrad, was den Sperrarm befreit.² Dies ermöglicht das In-Bewegung-Kommen des ganzen Stundenschlagwerkes. - Da alle Nebenwerke, also auch das Stundenwerk, durch einen Gewichtstein in Bewegung gesetzt werden, muss der Turmwart beim täglichen Aufziehen der Uhr nicht nur den Hauptgewichtstein für das Gehwerk, sondern auch alle Gewichtsteine der einzelnen Schlagwerke (Viertelstunden-, Stundenwerk) und Spielwerke (Hahnkrähen, Bärenparade) aufziehen.

Wie das Viertelstundenschlagwerk für die Auslösung des Stundenschlagwerks verantwortlich ist, setzt letzteres nun auch seinerseits andere Mechanismen in Bewegung. Der nach oben gedrückte Auslösehebel stösst eine über ihm liegende Stange hoch, an der ein Zugdraht hängt, der, unter der Kammerdecke verlaufend, zum Figurespiel in der nordöstlichen Ecke der Uhrkammer führt. Wenn man überlegt, welche Bewegung sich im Spielerker beim Stundenwechsel nur einmal vollzieht, so muss dieser von den Auf- und Ab-Bewegung der Querstange gezogene Draht für die Sanduhr-Umdrehung von Chronos verantwortlich sein. Gleichzeitig löst das Stundenwerk das Schlagen der Glocken im Turmdach und die Hammerbewegungen des Glockenschlägers Hans von Tann aus.

Das erfolgt durch einen Hebel, der am Hinterrad des Werks angebracht ist. Dieser Hebel bewegt sich während der Drehbewegung des Hinterrades auf und ab und zieht dabei an einem Draht, welcher die effektiven Glockenschläge wie auch die fingierten Hammerschläge von Tanns auslöst.

Schliesslich verlaufen vom Stundenrad aus zwei weitere Drähte zum Spielerker. Der eine ist für die Kopfdrehungen des Löwen verantwortlich. Der andere erfüllt eine Doppelfunktion: Er löst sowohl die Mundbewegungen des Chronos beim Zählen wie auch dessen jeweiliges Anheben des Zepters aus.

Die Beobachtung des Viertelstunden-, des Stundenschlagwerks und der anderen Werke (Spielwerke)³ zeigt, dass der Uhrmacher Kaspar Brunner das immer gleiche mechanische Prinzip angewendet hat: Das sich langsam drehende Rad eines Werks hebt durch Noppen einen Auslösehebel hoch, was die Verriegelungsapparatur eines von einer Kordel gezogenen Nebenwerkes auslöst. Sobald der Sperrarm freigegeben ist, dreht sich das Werk. Es betreibt und steuert nun für die Dauer seines In-Bewegung-Seins irgend einen weiteren Mechanismus (Stundenschlag, Drehparade, Hahnschrei etc.). Während dieser Zeitspanne schleift der Fallhebel über den äussersten Metallring des Schlussrades, und zwar bis zur nächsten Einkerbung, in welche der Hebel einrastet. Weil oben beim Herzrad das Gleiche passiert, ist das Werk sofort wieder verriegelt. – So lange, bis die nächste Auslösung ansteht und die nächste Noppe des sich immerzu weiter drehenden Hauptrades den Auslösehebel erneut in die Höhe drückt. Die Lücke von der einen zur anderen Einkerbung ist für die Dauer eines Mechanismus ausschlaggebend. Ist die Lücke kurz, so dreht sich das Rad bzw. das ganze Werk nur kurz, bis es wieder blockiert ist. Ist die Lücke grösser, macht das Rad eine längere Drehbewegung: Der vom Werk angetriebene Mechanismus läuft entsprechend länger.⁴

² Im Gegensatz zum Viertelstundenschlagwerk und zur Bärenparade erfolgt die Auslösung des Stundenschlagwerks sofort, d.h. ohne vorangegangene „Warnung“.

³ Die Spielwerke sind analog zum Viertelstundenschlagwerk konstruiert. So kann man etwa das Prinzip der Warnung auch bei der Bärenparade beobachten.

⁴ Es ist auch wieder Christoph Ischi gewesen, der entdeckt hat, dass die Werke nach dem immer gleichen Prinzip funktionieren. „Alle haben sie Zugseile, die über der Trommel eines Steuerrades gewickelt sind. Also müssen sie alle ähnlich funktionieren“ (mündliche Aussage September 2003).

A2 Weitere Erklärungen zum

Durch genaues Hinblicken erkennt man, dass das Pendel vom Kronrad stets einen kleinen Stoss erhält und so seine Schwingung aufrechterhalten kann. Das letztlich vom Gehwerk und dessen grossem Gewichtstein angetriebene Kronrad übt also durch die Metallflügel nicht nur eine hemmende, sondern auch eine anstossende Kraft auf das Pendel aus. Dabei geben die Metallflügelchen durch ihr absolut regelmässiges Hin- und Herwippen das Zahnrad immer um einen kleinen Weg zur Drehung frei. – Das ist wohl auch der Grund, weshalb die Franzosen in der Fachliteratur nicht von „Hemmung“, sondern von „échappement“ sprechen. – Mit anderen Worten: Dem einen Kronrad-Zahn stellt sich auf seinem Weg zuerst der eine Metallflügel entgegen. Durch die Zugkraft des Kronrades wird der Metallflügel weggedrängt, bis das Rad um eine ganz kleine Drehung vorbeikann; es wird auf der Gegenseite sofort vom anderen Metallflügel aufgehalten, bis dieser zweite Flügel auch wieder weggeschoben wird, worauf das Rad wieder vom ersten Metallflügel aufgehalten wird. Und so weiter.

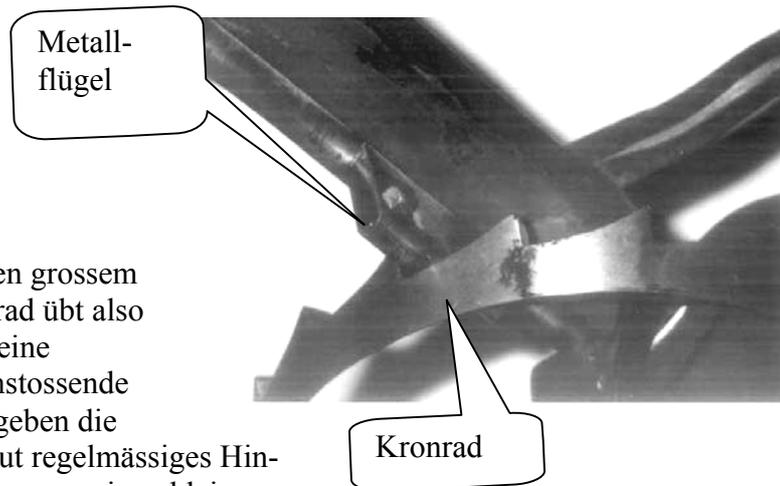
Die oben erwähnte Zugkraft des Kronrades ist der Grund, weshalb das Pendel nicht zum Stillstand kommt. Auf der einen Seite ersetzt sie dasjenige an Energie, was das Pendel durch Reibung und Luftwiderstand bei jeder Schwingung einbüsst. Auf der anderen Seite, und das ist weit wichtiger, muss die Zugkraft des Kronrades die zum Stillstand neigende Schwerkraft des Pendelgewichts kompensieren.⁵

Da das Hin und Her der das Kronrad aufhaltenden und loslassenden Metallflügel durch die Pendelbewegung verursacht wird, reguliert diese, wie bereits erwähnt, die stossweise Drehbewegung des Kronrades in absoluter Regelmässigkeit.

A3: Kulturgeschichtliches zum Pendel

Entscheidend für die Erfindung der mechanischen Räderuhr ist die Erfindung der Hemmung. Früher behalf man sich mit dem Waagbalken oder mit dem Foliot. Ursprünglich wurde das Zytglogge-Uhrwerk mittels eines solchen Foliots⁶ in konstanter Umdrehung gehalten. Kaspar Brunners Werk von 1530 dürfte eine Spindelhemmung mit Waagbalken aufgewiesen haben.⁷ Ein Blick in die Kulturgeschichte zeigt, dass man das Pendel im Zytglogge-Turm später eingebaut haben muss, denn Galilei entdeckte das Pendelgesetz erst 1571, also vierzig Jahre nach der Fertigstellung der Uhr Brunners. Und es sollten noch einmal hundert Jahre verstreichen, bis dieser präzise Zeitschritt die genaue Regulierung der Räderuhr ermöglichte.

Pendel



⁵ Würde das Pendel durch die Zugkraft des Kronrades nicht immer wieder etwas angetrieben, so zöge die Schwerkraft das Pendelgewicht unweigerlich in die Senkrechte, was, zusammen mit der Reibung, einen Stillstand der Uhr bewirken würde.

⁶ Siehe Kindler, 1905, Seiten 28 f

⁷ Marti 1983: S. 57

1650 kam nämlich der holländische Horlogier Christian Huygens auf die Idee, das von Galilei entdeckte Prinzip des Pendels auf die Uhren zu übertragen.⁸

In der Geschichte der Uhrmacherkunst stellt das Pendel ganz allgemein einen entscheidenden Fortschritt dar, erlaubte es doch den seit Jahrhunderten durch eine Vielzahl von Forschungen und Experimenten ersehnten Schritt zur absoluten Präzision.⁹ – So auch beim Zytglogge. Die früheren Hemmungssysteme waren nie ganz genau. Schon die immer grösser werdende Seillänge, die sich durch das Absinken des Gewichtsteines ergab, bewirkte wegen des zunehmenden Zuges auf das Gehwerk eine schnellere Drehung desselben. Und der Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit führte zu einer zusätzlichen Ungenauigkeit.

Weil das Pendel Huygens' viel genauer war als die anderen Regelungssysteme, wurden alle grossen mechanischen Uhren dieser Zeit umgerüstet. Markus Marti nimmt an, dass dies beim Zytglogge im Jahr 1712 erfolgte, anlässlich der grossen Renovation von Mathys Blaser.¹⁰ Die Uhr war damals über Jahre stillgestanden. Dank des justierenden Pendels wurde sie nicht nur wieder funktionsfähig gemacht, sondern machte einen Qualitätssprung in Sachen Präzision.

Das alte¹¹ und das neue System¹² zur Zeitmessung am Zytglogge liegen in zwei verschiedenen naturwissenschaftlichen Welten!

Somit kann auch am Beispiel des Zytglogge demonstriert werden, dass die kulturgeschichtliche Entwicklung des Uhrenbaus ein Kampf um Präzision gewesen ist, der mit der Erfindung des Pendels durch Galilei und dessen Integration in die Uhrmechanik durch Christian Huygens sein Ende findet. Die Hemmung ist, wie u.a. Kindler¹³ bemerkt, der wichtigste Bestandteil der Räderuhr überhaupt!

A4: Zahnradübersetzungen (Theorie)

Treffen zwei ungleiche Zahnräder zusammen, so dreht sich jenes mit weniger Zähnen in kürzerer Zeit um seine Achse als jenes mit mehr Zähnen, und zwar nach Proportion des Zahnverhältnisses beider Räder. Denn nach der Umdrehung eines grösseren Zahnrades (sagen wir ihm G) haben sich beide Zahnräder um die Zähnezahl (G) weitergedreht. Ein kleineres Zahnrad (sagen wir ihm K) dreht sich im Verhältnis „Zähnezahl G / Zähnezahl K“ mal um seine Achse.

$$\text{D.h. } \frac{\text{Umdrehungszeit}_K}{\text{Zähnezahl}_K} = \frac{\text{Umdrehungszeit}_G}{\text{Zähnezahl}_G} = \text{Umdrehungszeit}_G \cdot \frac{\text{Zähnezahl}_K}{\text{Zähnezahl}_G}$$

Übertragen auf die 12-Stundenachse des oberen Zeigers des Zytglogge:

⁸ Fintan Kindler geht davon aus, dass bereits Galilei die Idee hatte, das Pendelprinzip für die mechanische Uhr fruchtbar zu machen, dass aber seine Pläne in Vergessenheit gerieten, so dass Huygens die Erfindung der Pendeluhr hundert Jahre später ein zweites Mal machen konnte. (Kindler 1905: 95 ff)

⁹ Cipolla 1981: 68

¹⁰ Marti 1983: 57

¹¹ ab 1205, dem ersten Nachweis, dass im Zytglogge eine Uhr eingebaut wurde (siehe Marti 1983: S56). Die ersten Foliot-Uhren entstanden bereits ab 1300.

¹² kulturhistorisch ca. ab 1650; im Zytglogge ab 1712

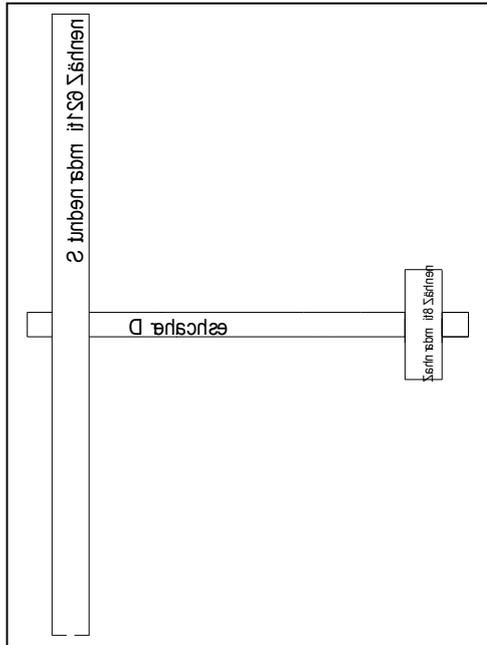
¹³ Kindler 1905: S. 29

$$\text{Umdrehungszeit}_K = 12 \text{ Stunden} \cdot \frac{8}{96} = 1 \text{ Stunde}$$

Übertragen auf die 24-Stundenachse des unteren Zeigers des Zytglogge:

$$\text{Umdrehungszeit}_K = 24 \text{ Stunden} \cdot \frac{8}{192} = 1 \text{ Stunde}$$

A5: Vom Stundenrad zu den Uhrzeigern: das Zeigerwerk



Wir sind bei unserem bisherigen Erkenntnisgang, von den Zeigern der Ostfassade ausgehend, rückwärts zum Hauptrad gegangen. Beginnen wir einmal mit dem Hauptrad:

Dieses dreht sich in der Stunde einmal. Seine Achse ist fix mit einem 8-er-Zahnrad verbunden, das sich also auch einmal in der Stunde umdreht. Dieses 8-er-Rädchen treibt ein riesiges, genauer gesagt ein 192 Zähne zählendes Rad an, das sich im Verhältnis $192 / 8$, d.h. 24 X langsamer dreht. Während sich also das 8-er-Rad in der Stunde einmal dreht, so dreht sich das 192-er-Rad mit seiner Achse, der Achse des unteren Uhrzeigers, einmal in 24 Stunden.

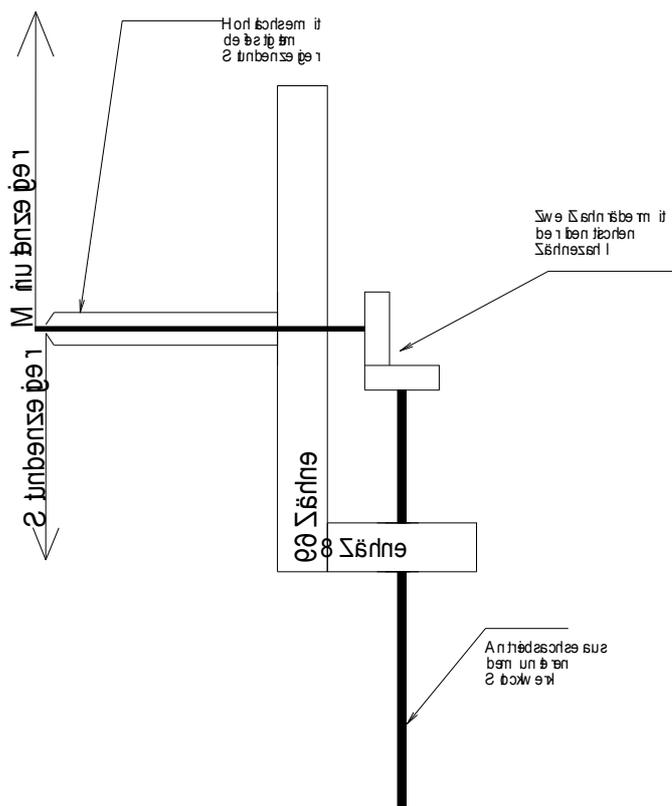
Das gleiche Prinzip lässt sich auf die obere Uhr mit dem 12-Stunden-Zifferblatt anwenden:

Da an dessen Zeiger-Achse ein 96 Zähne zählendes Rad angebracht ist, welches ebenfalls von einem 8-er-Stundenrad angetrieben wird, ergibt sich das Verhältnis $96 / 8 = 12$ Stunden.

Genau gleich sieht die Übersetzung für die Zeiger des dritten Zifferblattes, jenes an der Westfassade, aus. Die Achse des Hauptrades weist eine Verlängerung auf, die sich auf der Höhe der Pendelkugel bis an die Innenseite der Westwand hinzieht, wo sie, um der Wand entlang nach oben verlaufen zu können, zuerst in eine Vertikale, bei den Uhrzeigern oben wieder in die Horizontale umgebrochen wird.¹⁴

Komplizierend kommt bei den Zeigern der beiden oberen Zifferblätter, jenes der Ostfassade und jenes der Westfassade, hinzu, dass dort sowohl ein 12-Stundenzeiger wie auch ein Minutenzeiger angebracht ist. Im Detail funktioniert das Zeigerwerk folgendermassen:

¹⁴ Das wiederum unübersetzt, also anhand paarweise angeordneter 30-er-Rädchen.



Die Stundenachse mündet, nachdem sie durch eine hohle Achse nach Aussen geführt wurde, in die Achse des Minutenzeigers. Dieser dreht sich also in der Stunde ebenfalls einmal. Die hohle Achse ihrerseits bedient den Stundenzeiger. An der Innenwand des Turmes ist sie fest mit einem 96-er-Zahnrad verbunden, das bei der zweiten Brechung der Stundenachse, jene in die Horizontale, durch ein 8-er-Zahnrad angetrieben wird, so dass sie sich im Verhältnis $96/8$ langsamer dreht: in 12-Stunden also bloss einmal.

Diese raffinierte Konstruktion ist sowohl an der Ost- wie an der Westseite anzutreffen.

A6: Auflösung der Zahlenverhältnisse 1

Die Berechnung der Übersetzung vom Hauptrad/Stundenrad zum Zeigerwerk, das System A¹⁵, ist einfacher als die Analyse der Übersetzungen vom Hauptrad zum Pendel (unser System B¹⁶). Auch wenn sich Lernende, wegen des Knackgeräusches und wegen der Pendelbewegung meistens zuerst mit dem System B) beschäftigen, wäre eigentlich eine anfängliche Auflösung von System A) für den Erkenntnisfortschritt günstiger.

Ideal wäre demnach ein Verstehensprozess, der, wie im Folgenden gezeigt, vom Verständnis des Systems A zum allmählichen Enträtseln des Systems B (siehe A7) führen würde.

Modellhaftes Durchführen des ersten Schrittes: die Auflösung der Zahlenverhältnisse im System A vom Stundenrad zum Zeigerwerk:

Die Achse des Stundenrads (Zahnrad 11)¹⁷ wird durch eine dreifache Übertragung von 30-er-Zahnradern in eine Vertikale gedreht, die das Antreiben der Stundenzeiger der oberen wie der unteren Uhr möglich macht. Da sich die Achse trotz dieser Dreifach-Übertragung nach wie vor immer noch gleich, nämlich in einer Stunde einmal, dreht, fallen die drei 30-er-Zahnradpaare nicht ins Gewicht und können bei den weiteren Berechnungen vernachlässigt werden. Die vertikal verlaufende Stundenachse mündet in ein 8-er-Zahnrad (Zahnrad 15), das seinerseits ein 192-er-Zahnrad (Zahnrad 16) antreibt, dessen Achse den 24-Stunden-Zeiger der unteren Uhr bildet. Bei diesem 192-er-Zahnrad handelt es sich also um das Tagesrad, wie es auch die Berechnung des Zahlenverhältnisses der Zähne beweist:

¹⁵ Siehe Seite 20.

¹⁶ ebenda

¹⁷ Für die ab hier verwendete Nummerierung der Zahnräder: siehe Grundskizze im Fliesstext, Seite 23.

8 Zähne (des Zahnrads 15) X 24 Stunden ergibt die 192 Zähne des Tagesrades (Zahnrad 16):
 $8 \times 24 = 192$.

Das gleiche Prinzip lässt sich auf die obere Uhr mit dem 12-Stunden-Zifferblatt anwenden:

8 Zähne (Zahnrad 18) X 12 Stunden ergibt die 96 Zähne des Halbtagesrades (Zahnrad 19):
 $8 \times 12 = 96$.

In Zeiteinheiten (=Umdrehzeit der Achsen!) berechnet heisst das:

Das Stundenrad (Zahnrad 11, 126 Zähne) dreht sich in einer Stunde einmal.

Zahnrad 15 bzw. 18 (8 Zähne) dreht sich ebenfalls in einer Stunde einmal.

Das Tagesrad (Zahnrad 16, 192 Zähne) dreht sich, wie wir von unseren Beobachtungen der Ostfassade wissen, in 24 Stunden einmal. Der Vorgang vom Stundenrad zum Tagesrad (Zahnrad 16) kann nach folgender Formel nachvollzogen werden:

Stundenrad (Zahnrad 11) / Zahnrad 15 (8 Zähne) X Zahnrad 16 (192 Zähne) bzw. Zahnrad 19 (96 Zähne), das heisst:

- 1 Stunde des Stundenrades / $8 \times 192 = 24$ Stunden

- 1 Stunde des Stundenrades / $8 \times 96 = 12$ Stunden

In Sekunden berechnet:

- 3600 Sek. des Stundenrades / $8 \times 192 = 86\ 400$ Sek. = 24 Stunden

- 3600 Sek. des Stundenrades / $8 \times 96 = 43\ 200$ Sek. = 12 Stunden