

DIE TECHNISCHE UMWELT DER FRÜHEN RÄDERUHR

Lambertus Okken

Einleitung

Den Mönchen des Abendlandes hatte ihr Vater Benedikt zur Regel gesetzt, daß sie im Winterhalbjahr ein wenig länger als die halbe Nacht ruhen und sodann "zur wohlüberlegt berechneten achten Stunde der Nacht" aufstehen sollten.¹ Mit dieser Regel, welche sowohl dem menschlichen Schlafbedürfnis als auch den Anforderungen des klösterlichen Gottesdienstes gerecht werden sollte, war den Söhnen Benedikts die Aufgabe gestellt, irgendwie die achte Stunde der Nacht richtig zu bestimmen. Irgendwie! Mit gutem Willen mußte der Zeitpunkt zu berechnen sein.

Gerechnet wurde nach einer römischen Tradition mit ungleichen Stunden:² Die ganze Zeitspanne, welche vom Sonnenaufgang bis zum Sonnenuntergang reicht, galt als der Tag und war in zwölf gleichlange Stunden verteilt; desgleichen in zwölf gleichlange Stunden unterteilt war die Nacht, d.h. die ganze Zeitspanne vom Sonnenuntergang bis zum Sonnenaufgang. Je nach der Dauer der Nacht oder des Tages waren mithin die dunklen Stunden einerseits und die hellen Stunden andererseits unterschiedlich lang. Zur Sommersonnenwende hin wuchsen die Tagesstunden und verkürzten sich die Nachtstunden, und umgekehrt: die Nachtstunden wuchsen und die Tagesstunden verkürzten sich zur Wintersonnenwende hin; doch zweimal jährlich, zur Zeit der Tagundnachtgleiche im Frühling und im Herbst, mußten die Stunden des Tages ebenso lang wie die der Nacht ausfallen.

Wie war nun im Fluß der ungleichen Stunden die achte Stunde der Nacht zu erkennen? Es ließ sich machen, indem man den Gang der Sterne beobachtete. Der Sternenhimmel war allerdings in Westeuropa an so vielen Orten so oft durch Wolken dem Blick entzogen, daß mit der Himmelsbeobachtung die Aufgabe kaum als gelöst gelten durfte; und durfte einem Bruder überhaupt zugemutet werden, daß er auf seinen Schlaf verzichtete, um den Sternen zu folgen, bis sie die rechte Stunde anzeigten? Dieser Einwand mag den Söhnen Benedikts auch die antiken Wasseruhren verleidet haben, welche die Zeit nur für den Gesichtssinn anzeigten.

Was man im Kloster brauchte, war eine Weckmaschine, die womöglich außer zur ersten nächtlichen Hore auch zu den übrigen Horen des Klosterdienstes die

¹ R. Hanslik ed., *Benedicti Regula* (Corpus Scriptorum Ecclesiasticorum Latinorum, vol. LXXV, Wien, 1960), S. 52-53; caput VIII, 1-2. P. Schmitz ed., *Saint Benoît. La Règle des Moines*. Textes Latin et Français. Traduction, Introduction, Notes (Ohne Ort, ohne Jahr), S. 60.

² E. Martène, *Commentarius in Regulam S.P. Benedicti* (Paris, 1690). Nachdruck in *Patrologia Latina* 66, Paris, 1866, S. 215-952, insbes. S. 411C-412A; und P. Delatte, *Commentaire sur la Règle de Saint Benoît*. Nouvelle édition revue et augmentée (Paris, 1948), S. 158-159.

Glocke zu läuten hätte und dabei dem Wechsel der ungleichen Stunden folgen müßte.

Gegen 1100 ist der Wecker endlich da. Er wird seither in einer langen und dichten Belegreihe als Regler des Klosterdienstes nachweisbar. Freilich leisten die Belege in ihrer Wortkargheit nur eben dies – sie zeigen meistens den Wecker nur als solchen an, ohne durchblicken zu lassen, wie das Gerät beschaffen war. Sie verschweigen denn auch, wann der Wecker zur Räderuhr wurde.

Die soeben vorgetragenen Aussagen zur Vor- und Frühgeschichte der Räderuhr sind bereits dokumentiert worden; es geschah in einem Aufsatz, auf den nurmehr verwiesen sei.³ Die These jenes Aufsatzes lautete, daß ein Uhrwerk im Kloster nur als Wecker einen klösterlichen Sinn hatte, und daß die Räderuhr als klösterlicher Wecker aus einer klösterlichen wasser- und gewichtgetriebenen Uhr entwickelt worden ist, und daß der typisch klösterliche Wunsch, einen Wecker mit den typischen Möglichkeiten der frühen Räderuhr zu besitzen, die wunderbare Erfindung der Räderuhr begreiflich macht.

Der Beweis für die soeben wiederholte These ruht auf den im genannten Aufsatz vorgelegten klösterlichen Urkunden und auf technikgeschichtlichen Gegebenheiten, welche jetzt erörtert seien.

Die Darstellung entstand *mit helfe unde rât* von H.A.M. Snelders und A. Wegener Sleswyk. Ihnen dankt der Verfasser gern und gebührend.

Frühe Klosterwecker

Santa María de Ripoll

Die früheste aus dem mittelalterlichen Europa überlieferte Beschreibung eines wasser- und gewichtgetriebenen Wecker-horologium steht in einer Handschrift, die im ausgehenden 10. oder – wahrscheinlicher – im 11. Jahrhundert geschrieben wurde. Die Handschrift stammt aus dem Kloster Santa María de Ripoll am Fuße der Pyrenäen.⁴

Es handelt sich um eine Anleitung zum Bau und Betrieb eines horologium. Von der Handschrift hat sich nur der Schluß erhalten, wo hauptsächlich Bau und Betrieb des "Schlagwerks" beschrieben sind. Vereinzelt Rückverweise geben immerhin zu erkennen, daß zum "Gehwerk" ein Wasserantrieb gehörte.

Die noch erhaltene Anleitung zum "Schlagwerk" gestattet dessen Rekonstruktion:⁵

Eine senkrecht aufgestellte Säule war von oben her ein Stück weit ausgebohrt, wie ein geräumiges Rohr; eine Stange passierte diesen Hohlraum waagrecht durch zwei Löcher, die weit genug waren, um die Stange drehbar zu machen; an beiden

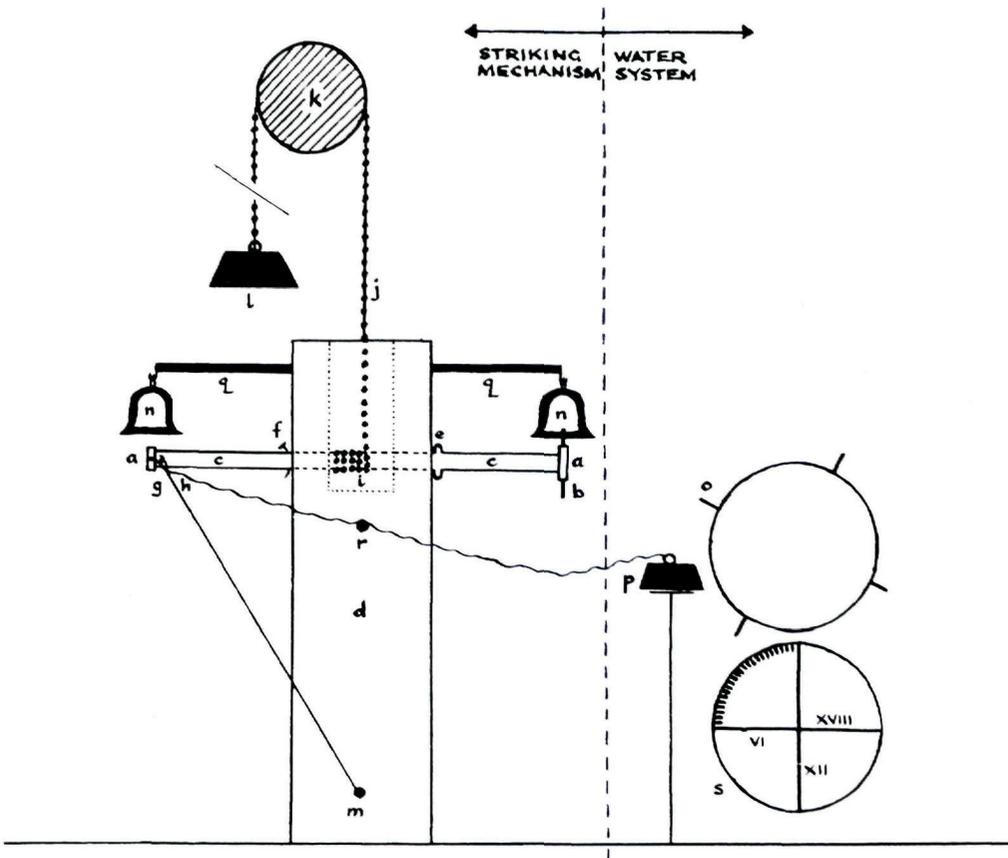
³ Lambertus Okken, "Wurde die Räderuhr für das abendländische Kloster erdacht?," *Rheinisch-westfälische Zeitschrift für Volkskunde* 32/33, 1987/1988, S. 117-138.

⁴ F. Maddison, B. Scott and A. Kent, "An Early Medieval Water-Clock," *Antiquarian Horology* 3, 1962, S. 348-353, insbes. S. 348 mit Anmerkungen auf S. 352; Quellennachweis: Barcelona, Archivo de la Corona de Aragón, MS Ripoll 225, Fol. 87^v-93^r; Datierung usw.

⁵ Maddison, Scott and Kent [Anm. 4], S. 350: Fig. 2: "a tentative reconstruction of the striking mechanism."

Enden ragte die Stange aus der Säule hervor, und an beiden herausragenden Enden war der Stange mindestens eine Scheibe aufgesetzt; und die Scheiben trugen diametral je zwei Stifte. Über den Scheiben waren Glocken aufgehängt. Die Stifte der Scheiben konnten die Glocken anschlagen, wenn die Scheiben in Drehung versetzt wurden, was sich durch einen Seilzug machen ließ: Über einen Balken hoch oberhalb der Säule war ein Seil geführt worden, dessen eines Ende in den Säulen-Hohlraum hinabreichte und hier mehrfach um die waagrechte Stange gewickelt war, und dessen anderes Ende einen tüchtigen Bleiklotz trug. Wenn nun das "Gehwerk" eine Sperre an der waagrechten Stange des "Schlagwerks" auslöste, drehte das schwere Gewicht die Stange und mit ihr die Scheiben, deren Stifte die Glocken anschlugen, wieder und wieder, bis das Gewicht abgelaufen war.

Das beschriebene horologium muß in einer Kirche gestanden haben, denn jenes Zugseil sollte über einen Balken hoch oben in der Kirche geführt werden.⁶



Figur 1 – Klosterwecker von Ripoll, Rekonstruktion (Bildquelle: Maddison-Scott-Kent, Anm. 5).

⁶ *Ibid.*, S. 349.

Bury St. Edmunds

Die zweite überlieferte Nachricht vom wasser- und gewichtgetriebenen Wecker-horologium gehört schon dem ausgehenden 12. Jahrhundert an. Sie zeigt das Gerät diesmal in England, in einer Kirche, und zwar wiederum in einer Klosterkirche. Zum Urheber der Nachricht und zu ihrer Überlieferung seien knappe Daten vorausgeschickt: Jocelin, der Autor einer Chronik des St. Edmund-Klosters zu Bury St. Edmunds (West-Suffolk), war Zeitgenosse der von ihm beschriebenen Geschehnisse. 1173 war er ins Kloster eingetreten; seine Berichterstattung reicht bis 1202. Überliefert ist sein Werk vornehmlich durch eine in der zweiten Hälfte des 13. Jahrhunderts hergestellte Abschrift, die als treuer Textzeuge gilt.⁷

Jocelin erzählt zum 23. Juni 1198, wie ein Feuer in der Klosterkirche ausbrach und man es mit Wasser von der Uhr löschen wollte. Das Feuer war am Schrein des Heiligen ausgebrochen und drohte schon auf das Gebälk der Kirche überzugreifen, als der Himmel gnädig eingriff:⁸

Eadem enim hora cecidit horologium ante horas matutinas, surgensque magister uestiarii, hec percipiens et intuens, cucurrit quamtocius et, percussa tabula tanquam pro mortuo, sublimi uoce clamauit dicens feretrum esse combustum. Nos autem omnes accurrentes flammam inuenimus incredibiliter seuientem, et totum feretrum amplectentem, et non longe a trabibus ecclesie ascendentem. Juuenes ergo nostri propter aquam currentes, quidam ad puteum, quidam ad horologium, quidam cucullis suis impetum ignis cum magna difficultate extinxerunt, et sanctuaria quedam prius diripuerunt.

Übersetzung: "Nun ist zu ebendieser Stunde das horologium vor der Matutin 'gefallen'; und der Verwalter der Kleiderkammer (= ein Gehilfe des Sakristans) stand auf und bemerkte das Feuer und sah es sich an, und da ist er schnellstens gelaufen und hat, nachdem er das Läutbrett wie zu einem Todesfall angeschlagen hatte, mit lauter Stimme gerufen, der Schrein sei verbrannt. Wir aber kamen alle herbeigelaufen und haben gesehen, wie das Feuer unglaublich wütete und den ganzen Schrein umfaßte und bis knapp an die Balken der Kirche hinaufreichte. Da liefen denn die jungen Männer unseres Klosters teils zum Brunnen und teils zum horologium, um Wasser zu holen, und andere haben indessen mit ihren Röcken das angreifende Feuer mühsam gelöscht; vorher haben sie gewisse Heiltumsbüchsen (= Hostienbehälter?) gerettet."⁹

Bei der Uhr gab es also Wasser, und zwar reichlich; sonst hätten die Jungmönche diese Löschwasserquelle kaum so selbstverständlich wie den Brunnen aufgesucht. Sie mögen zu den Tanks eines großen Wecker-horologium gerannt sein. Dessen Gewicht war kurz zuvor "gefallen" und hatte so – man kann's sich vorstellen – die Klöppel

⁷ H.E. Butler ed., *The Chronicle of Jocelin of Brakelond, concerning the acts of Samson, Abbot of the Monastery of St. Edmund*. Translated from the Latin with Introduction, Notes and Appendices (Cronica Jocelini de Brakelonda de rebus gestis Samsonis Abbatis Monasterii Sancti Edmundi.) (Medieval Classics. London [u.a.], 1949. Nachdruck 1951), S. XIII-XV: Die Lebensdaten des Autors; und S. XI-XII: Die Manuskripttradition.

⁸ *Ibid.*, S. 107: Das Zitat, im Zusammenhang eines Kapitels auf S. 106-107, mit englischer Übersetzung. Hinweis auf das *horologium*-Zeugnis in Jocelins Chronik: C.B. Drower, "A Medieval Monastic Water-Clock," *Antiquarian Horology* 1, 1954, S. 54-58 und 63, insbes. S.55-56. Wiederholt: *Antiquarian Horology* 12, 1980-1981, S. 165-170, insbes. S. 166.

⁹ Wiedergabe nach der englischen Übersetzung in der zitierten Ausgabe.

oder Hämmer eines Schlagwerks in Gang gesetzt.¹⁰ Und jener pflichtbewußte Untersakristan stand da gleich auf und ging ins Oratorium, um für den bevorstehenden Nachtgottesdienst die Lampen nachzusehen, und entdeckte rechtzeitig den Ausbruch des Feuers beim Heiligenschrein.

Villers-la-Ville

Eine dritte Nachricht vom wasser- und gewichtgetriebenen horologium in einer Klosterkirche führt nach Belgien. Hiermit ist das späte 13. Jahrhundert erreicht. Von einem Zeitmesser ist die Rede, und ein Wecker dürfte gemeint sein, obwohl von einer Weckfunktion dieser Maschine nichts verlautet. – Einzelheiten:¹¹

Für das horologium der Cistercienserabtei Villers zu Villers-la-Ville (Arrondissement Nivelles, Brabant) wurde in der Zeit um die Jahreswende 1267/1268 auf Schiefertafeln eine Betriebsanleitung niedergeschrieben, der sich entnehmen läßt, wie das Gerät aussah und arbeitete.

Das Herzstück der Uhr ist ein wassergefüllter Tontopf, der unten einen Abfluß hat. Ein Schwimmer ist mit einer Kette verbunden, die über eine waagrechte Stange gehängt ist und an ihrem anderen Ende ein Gegengewicht trägt; dieses ist etwas leichter als der Schwimmer. Die Stange kann sich um ihre Längsachse drehen, und an einem Ende ragt sie frei durch den Mittelpunkt einer senkrecht aufgestellten Scheibe; an diesem Ende ist der Stange rechtwinklig ein Zeiger angesteckt. Der Zeiger ist so lang wie der Radius eines Kreises, welcher auf die Scheibe gemalt und für die Zeiteinteilung graduiert ist. Während das Wasser aus dem Topf abfließt, sinkt der Schwimmer und zieht er an der Kette, so daß sich oben die Stange dreht, und mit der Stange dreht sich der Zeiger, dessen Spitze über den graduierten Kreis wandert. So wird der Zeitverlauf sichtbar und meßbar.

Ein Schlagwerk zum Wecken dürfte vorhanden gewesen sein. Freilich ist die Überlieferung in diesem Punkte stumm.¹²

König Hiskias Wasseruhr

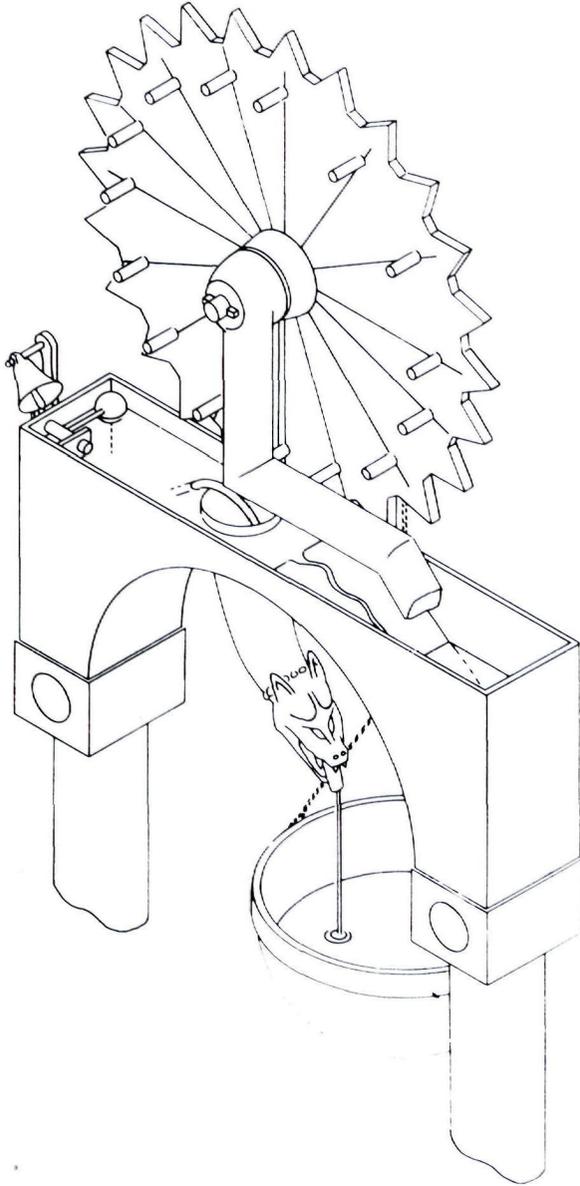
Das folgende Wecker-horologium ist vielleicht ebenso alt wie die soeben vorgestellte belgische Klosteruhr und war in der Nachbarschaft Belgiens zumindest bekannt; daß es einer Klostergemeinde gedient hat, ist eine plausible Vermutung.

Überliefert ist es durch eine nordfranzösische Miniatur des späten 13. Jahrhunderts. Die Miniatur illustriert in einer Historienbibel ein Ereignis der Geschichte des

¹⁰ *horologium cadit*, "das horologium fällt" = "es läutet": Das horologium löst ein Schlagwerk aus; dieses wird angetrieben durch ein Gewicht, das seinen Dienst tut, indem es fällt. Siehe P. Sheridan, "Les inscriptions sur ardoise de l'abbaye de Villers," *Annales de la Société d'Archéologie de Bruxelles* 9, 1895, S. 359-362 und 454-459 und 10, 1896, S. 203-215 und 404-451, insbes. S. 207-208 und 433-434. Im gleichen Sinne: E.L. Edwardes, *Weight-driven Chamber Clocks of the Middle Ages and Renaissance*. With some observations concerning certain Larger Clocks of Mediaeval Times (Altrincham, 1965. Reprinted 1976), S. 9-11 und 19.

¹¹ Sheridan [Anm. 10], S. 212-213: Datierung; S. 214-215 und 404-408: Textabdruck; S. 422-423: Die Uhr. (Zusätzliche Daten für die Rekonstruktion sind über die folgenden Seiten bis S. 451 verstreut.)

¹² *Ibid.*, S. 434.



Figur 2 – König Hiskias Wasseruhr, Rekonstruktion (Bildquelle: Wegener Sleeswyk, Anm. 14).

alttestamentlichen Königs Hiskia, dem in seiner tödlichen Krankheit verheißen wird, er solle genesen. Die Verheißung wird mit einem Wunder beglaubigt: Auf der Sonnenuhr geht der Schatten um zehn Stufen zurück (IV Regum 20, 8-11 und Isaias 38, 7-8).¹³

Als der Miniaturenmalers gegen die biblische Autorität anstelle der Sonnenuhr eine Wasseruhr abbildete, dürfte er schwerlich ohne Anlaß das falsche Muster gewählt haben. Vermutlich gab er eine Uhr wieder, die er gesehen hat.

Die Miniatur zeigt ein turmartiges Gestell mit fünf Glöckchen, die in einem oberen Stockwerk an einer Leiste hängen; und mit einem Rad unterhalb der Glöckchen im gleichen Stockwerk; und mit einem halbkugelförmigen Kessel, der sich auf einen Untersatz hinabzusenken scheint. Der Kessel hängt an einer Kette und fängt das Wasser auf, das einem als Wolfskopf gestalteten Abflußrohr-Ende entströmt.

Das abgebildete horologium wird mit dem Rad die kleinen Glocken zum Klingeln gebracht haben, um gewisse Zeitpunkte zu bezeichnen.¹⁴

Uhrengehäuse und die Tradition antiker und muslimischer Stundenzähler

Das zuletzt erwähnte Wecker-horologium war in einem turmartigen Gestell untergebracht, dessen oberes Stockwerk ein Glockenspiel barg. In einem solchen Gestell waren die Elemente des Uhrwerks gewiß zweckmäßig angeordnet. Aber nicht nur für dieses eine horologium schien sich der turmartige Aufbau empfohlen zu haben.

Das turmartige Gestell abendländischer Fertigung wird erstmals vom nordfranzösischen Baumeister Villard de Honnecourt in seinem Skizzenbuch abgebildet. Der Meister legte sein Buch etwa zwischen 1225 und 1235 an. Er erläutert die Skizze mit diesen Worten:¹⁵

c'est li masons d'on orologe

Ki velt faire le maizo(n) d'une ierloge ves ent ci une q(ue) io vi une fois. Li p(re)mierz estages de desos est quares a .iiij. peignonciaus. Li estages deseure est a .viiij. peniaus, (et) puis covertic, (et) puis .iiij. peignonciaus; entre .ij. peignons .i. espasse wit. Li estages tos deseure s'est q(u)ares a .iiij. peignonciaus, (et) li co(n)bles a .viiij. costes. Ves aluce le portrait.

Übersetzung: "Das ist das Gehäuse einer Uhr. Wer das Gehäuse einer Uhr machen will, sieht hier eines, das ich einmal gesehen habe. Das erste Geschoß unten ist quadratisch mit 4 Giebelchen. Das Geschoß darüber hat 8 Felder und alsdann kommt (ein) Dach. Und dann (kommen) 4 Giebelchen (und) zwischen (je) 2 Giebeln (ist) ein leeres Feld. Das Geschoß ganz zu oberst ist quadratisch, mit 4 Giebelchen. Und der Helm hat 8 Seiten. Sieh hier die Zeichnung."

¹³ Drover [Anm. 8], Fig. 1 (auf S. 54 bzw. S. 164:) Die Miniatur. Die Quelle: Oxford, Bodleian Library, 270b, Fol. 183^v; Fig. 2 (auf S. 55 bzw. S. 167:) Eine Vergrößerung des *horologium*-Details der Miniatur. Eine Farbproduktion der Miniatur: C.B. Drover, "The 13th Century 'King Hezekiah' Water Clock," *Antiquarian Horology* 12, 1980-1981, S. 160-164, insbes. S. 160: Fig. 1.

¹⁴ A. Wegener Sleeswyk, "The 13th Century 'King Hezekiah' Water-Clock," *Antiquarian Horology* 11, 1979, S. 488-494; Fig. 2 auf S. 490: Rekonstruktion.

¹⁵ H.R. Hahnloser ed., *Villard de Honnecourt*. Kritische Gesamtausgabe des Bauhüttenbuches ms. fr 19093 der Pariser Nationalbibliothek. Zweite, revidierte und erweiterte Auflage (Graz, 1972), S. 226: Datentafel; S. 226-232: Zur Datentafel; S. 225: Zusammenfassende Datierung. Die Skizze: Tafel 12a. Transkription und Übersetzung auf S. 29-30; Kommentar auf S. 29-32, mit Nachtrag auf S. 349.



Figur 3 – Uhrgehäuse ca. 1225-1235 (Bildquelle: Hahnloser, Anm. 15).

Wie der Herausgeber meint, handelt es sich um ein in Holz ausgeführtes Häuschen.¹⁶

Zutage tritt hier der typische Aufbau der mit Automatenbeiwerk ausgestatteten Wasseruhr, deren spätantike und frühmittelalterliche Überlieferung noch zu erforschen wäre. Wenigstens die frühen Nachrichten seien zitiert, um anzudeuten, daß die Überlieferung weder im Orient noch im Abendland je abzureißen brauchte.

Eusebius von Caesarea spielte u.a. auf eine mit Automaten reich geschmückte Wasseruhr und zugleich auf ein mechanisch angetriebenes Himmelsmodell an, als er um 333 die "schöpferischen" Fähigkeiten des Menschen erörterte.¹⁷ Zu Beginn des 6. Jahrhunderts hat es in Gaza (Palästina) eine turmartig aufgebaute Wasseruhr mit reichem Automatenbeiwerk gegeben.¹⁸ Unter dem Islam ist die Tradition solcher Wasseruhren wohl ununterbrochen fortgesetzt worden. Wie die Annalen des Frankenreichs bezeugen, kam nämlich im Jahre 807 eine derartige Uhr aus dem Orient nach Aachen:¹⁹

legatus regis Persarum nomine Abdella cum monachis de Hierusalem, qui legatione Thomae patriarchae fungebantur, ... ad imperatorem pervenerunt munera deferentes, quae praedictus rex imperatori miserat, id est ... et horologium ex auricalco arte mechanica mirifice compositum, in quo duodecim horarum cursus ad clepsidram vertebatur, cum totidem aereis pilulis, quae ad completionem horarum decidebant et casu suo subiectum sibi cimbalum tinnire faciebant, additis in eodem eiusdem numeri equitibus, qui per duodecim fenestras completis horis exiebant et impulsu egressionis suae totidem fenestras, quae prius erant apertae, claudabant; necnon et alia multa erant in ipso horologio, quae nunc enumerare longum est. ... Quae omnia Aquis palatio ad imperatorem delata sunt. Imperator legatum et monachos per aliquantum tempus secum retinens in Italiam direxit atque ibi eos tempus navigationis expectare iussit.

Übersetzung: "Ein Gesandter des Königs der Perser namens Abdella und mit ihm Mönche aus Jerusalem, die als Gesandte des Patriarchen Thomas handelten, ... sind vor dem Kaiser erschienen, indem sie Geschenke überbrachten, die der genannte König dem Kaiser gesandt hatte, und zwar (unter anderem) ein mit handwerklicher Kunst wunderbar zusammengesetztes Messing-horologium, worin der Lauf der zwölf Stunden zur clepsidra abließ, mit ebensoviele Bronzekügelchen, die zu den vollen Stunden herabfielen und durch ihren Fall ein unter sie gestelltes Schallbecken hell erklingen ließen, und dazu mit ebensoviele Reitern, die aus zwölf Fenstern zu den vollen Stunden herauskamen und durch den Schub ihres Herauskommens ebensoviele Fenster, die vorher offen waren, schlossen; und noch viele andere Dinge waren in jenem horologium; sie lassen sich jetzt nicht in Kürze aufzählen. ... Und alle Geschenke sind in der Aachener Pfalz dem Kaiser überbracht worden. Der Kaiser hat den Gesandten und die Mönche eine Zeitlang bei sich behalten und dann nach Italien ziehen lassen, mit der Anweisung, dort die Schiffsaison abzuwarten."

¹⁶ *Ibid.*, S. 30.

¹⁷ Hinweis von A. Lehr, *De Geschiedenis van het Astronomisch Kunstuurwerk* (Den Haag, 1981), S. 1. H. Gressmann ed., *Eusebius, Werke*, III. Band 2. Hälfte: *Die Theophanie*. Die griechischen Bruchstücke und Übersetzung der syrischen Überlieferungen (Die griechischen christlichen Schriftsteller der ersten drei Jahrhunderte, 11, 2, Leipzig, 1904), S. V: Das griechische Original ist bis auf einige Bruchstücke verlorengegangen; vollständig erhalten ist nur die syrische Übersetzung, (S. XX-XXIII:) die nach einer guten Vorlage slavisch-wortwörtlich das Original wiedergibt. S. XIII-XX: Chronologie; S. XX: Ergebnis: Die *Theophanie* wird um 333 verfaßt sein. Der *horologium*-Passus steht auf S. 68: Abschnitt LXII.

¹⁸ D.R. Hill, *Arabic Water-Clocks* (Sources and Studies in the History of Arabic-Islamic Science. History of Technology Series 4, Aleppo, 1981), S. 13.

¹⁹ *Ibid.*, S. 14. Der Text: F. Kurze ed., *Annales Regni Francorum inde ab a. 741. usque ad a. 829*. Qui dicuntur Annales Laurissenses Maiores et Einhardi. Post editionem G.H. Pertzii (Monumenta Germaniae Historica. Scriptores rerum germanicarum in usum scholarum 6, Hannover, 1895), S. 123-124: Zum Jahre 807.

Die Umwelt des beschenkten Kaisers aber wußte offenbar nichts Rechtes mit dem orientalischen Uhrenwunder anzufangen, da es niemanden zum Nachbau angeregt zu haben scheint.

Unter den Muslims blieb mittlerweile zumindest bekannt, wie solche Apparate zu bauen seien: Diese Kunst wurde von einem muslimischen Techniker des 11. Jahrhunderts christlicher Zeitrechnung im muslimisch beherrschten Spanien schriftlich dargestellt.²⁰ Der Bau monumentaler Wasseruhren ist weiter in der muslimischen Welt seit der zweiten Hälfte des 12. Jahrhunderts mehrfach nachweisbar.²¹ Es müßte schon ein Wunder sein, wenn von solchen Kunstwerken des Orients keine Nachrichten ins Abendland gelangt wären!

Die abendländischen Optionen bis 1300

Hier wäre bei der Erkundung des mittelalterlichen Uhrenwesens innezuhalten, um zurückzublicken und zu bestimmen, welche Lösungen für das klösterliche Weckerproblem angestrebt wurden oder gefunden waren, als das 13. Jahrhundert seinem Ende zuneigte.

Bei der Durchsicht der gesammelten Nachrichten springt zunächst ins Auge, daß eine Wasseruhr mit hörbar stundenzählender Automatik wohl dauernd zu haben war und dem Abendland förmlich angetragen worden ist, und daß sie abgelehnt wurde. Verwarf die Klosterwelt jenen Stundenmelder, weil er nur die gleichen Stunden abzählte? Diesem Mangel hätte man abhelfen können; das war schon zu Vitruvs Zeiten machbar. Ein von Vitruv (*De Architectura*, IX, 8, 4-6) vorgesehener Wasseruhrenregler sollte 1. die Wassersäule über dem Auslauf auf konstanter Höhe halten, durch Rückkopplung, mit einem Ventil, dessen Stöpsel auf dem Wasser des Reglergefäßes schwamm und immerfort soviel Wasser ins Reglergefäß einlaufen ließ, wie gleichzeitig aus dem Gefäß auslief; und 2. sollte Vitruvs Regler die Höhe des Auslaufs relativ zum Wasserspiegel im Reglergefäß variabel machen, mit einem exzentrisch durchbohrten und um seine Längsachse drehbaren Zapfen vorn in der Wand des Gefäßes.²² Das Reglerprinzip ist in arabischer Überlieferung 1204 oder 1206 nach Chr. bei al-Jazarī vorhanden; es wurde von Ridwāns Vater zwischen 1154 und 1174 nach Chr. verwirklicht; und mit guten Gründen läßt das Prinzip sich auf Archimedes oder Philon zurückführen.²³

Sollte der abendländischen Klosterwelt die hellenistisch-arabische Horenmelde-maschine entgangen sein? Wer die Söhne Benedikts nicht für taube und blinde Leute halten möchte und sich deshalb sträubt, die Frage zu bejahen, wird den Befund wahrhaben müssen: Die Klosterwelt wollte die horenmeldende Wasseruhr nicht

²⁰ Hill [Anm. 18], S. 36-46, insbes. S. 36: Der Autor, al-Murādī, lebte in Andalusien im 5. Jahrhundert Hedschra / 11. Jahrhundert nach Chr.

²¹ *Ibid.*, S. 69-70: Ridwāns Vater baute zwischen 1154 und 1174 die Uhr in Damaskus; und Ridwān beschrieb seine Reparaturarbeit in einem 1203 vollendeten Werk. Für die späteren Zeugnisse des Baues monumentaler Wasseruhren sei pauschal auf Hill [Anm. 18] verwiesen.

²² So interpretiert A. Wegener Sleeswyk in einer privaten Mitteilung den Text Vitruvs.

²³ Hill [Anm. 18], S. 91: Datierung des von al-Jazarī geschriebenen Buches; S. 97-99: Zum Regler; S. 69: Datierung der von Ridwāns Vater gebauten Uhr; S. 82: Zum Regler in dieser Uhr. D.R. Hill ed., *On the Construction of Water-Clocks*. Kitāb Arshimidas fī 'amal al-binkamāt (Occasional Paper 4, London, 1976), S. 8-9.

annehmen. Vielleicht war den Klosterleuten das Gerät zu empfindlich für den Dauerbetrieb, oder man traute der verfügbaren Klostertechnik gar nicht erst den Bau des feinen Apparates zu. Aus der Erfahrung, die durch jahrhundertelangen Umgang mit Wasseruhren erworben war, mag der entscheidende Einwand gekommen sein: Mit einem genauestens ausgeklügelten und aufs sorgfältigste ausgeführten Regler würde man trotzdem keinen Wecker erhalten, der in jeder Nacht die achte Hore zur rechten Zeit läuten könnte. Man konnte sich die Mühe sparen, weil sich das Wasser nicht meistern ließ.

Denn gewöhnlich läuft das Wasser unter Bedingungen aus, welche die temperaturabhängige Zähigkeit des Wassers, seine mit der Temperatur wechselnde Viskosität, zu einem die Abflußmenge beeinflussenden Faktor machen. Und die Viskosität verändert sich erheblich mit der Temperatur: in der Größenordnung von 2,5% pro Grad bei Temperaturen um 20°C. Schon ein paar Grad mehr oder weniger bewirken da Schwankungen der Abflußmenge um $\pm 5\%$ im Zeitverlauf, was beispielsweise bedeutet: Im Lauf einer 60-Minuten-Stunde geht die Uhr drei Minuten vor oder nach.²⁴

Die Schwankungen im Gang der Wasseruhr dürften manchmal aufgefallen sein. Unbeherrschbar waren sie, weil der Zusammenhang von Viskosität und Temperatur undurchschaubar gewesen ist, da ja ein scharf konturierter Temperaturbegriff fehlte: Die Temperaturwahrnehmung des menschlichen Körpers wird von der Luftfeuchtigkeit beeinträchtigt. (Die Temperaturmessung gibt es erst seit dem 18. Jahrhundert; vorher war die Temperatur ein Störfaktor bei Beobachtungen mit dem sogenannten Wetterglas, von dem eigentlich eine Kombination von Temperatur und Luftdruck abgelesen wurde.)²⁵

Man blieb den Wasseruhren treu, weil es keine Alternative gab. Man bastelte; und ohne daß man sich darüber im klaren war, bahnte man eine Alternative an. Man erkannte sie erst, als man sie erbastelt hatte.

Ein neues Lätgerät war gebaut worden. (Siehe die Abbildung Ib auf der Bildseite.) Gesteuert wurde das Ungetüm mittels einer Wasseruhr, die – hoffentlich! – zur rechten Zeit eine Sperre aufhob, so daß die Welle des Geräts unter der Einwirkung eines ihr angehängten Gewichts rotieren konnte und mit ihren Zapfenrädern die Glocken streifte und diese zum Klingen brachte. Das Muster des neuen Lätgeräts war die altvertraute Winde vom Schöpfbrunnen:²⁶ eine waagrechte Welle mit angehängtem Schöpfeimer, der nun zum Gewicht wurde, und mit radial angeordneten Handspeichen, die nun als Lätstäbe dienten. (Vergleiche die Abbildungen Ia und Ib auf der Bildseite.)

Wenn die rotierenden Stäbe ordentlich funktionieren sollten, durften sie die Glocken aber nur streifen. Die Glocken nun hingen frei, an Lederriemen, und gerieten unter den Schlägen der sie streifenden Stäbe ins Schwingen. Mit der Schwingungsfrequenz der Glocken hatte die Rotationsfrequenz der Lätstäbe dergestalt übereinzustimmen, daß die Stäbe stets in der richtigen Position auf die Glocken trafen. Es war ein schwieriges Problem; doch es war durch Hemmvorrich-

²⁴ A.A. Mills, "Newton's Water Clocks and the Fluid Mechanics of Clepsydrae," *Notes and Records of the Royal Society of London* 37, 1982, 1, S. 35-61, mit dem Beispiel auf S. 51. A. Wegener Sleeswyk gab den Hinweis auf den Aufsatz und erörterte in einer privaten Mitteilung das Problem.

²⁵ Private Mitteilung von A. Wegener Sleeswyk.

²⁶ Hinweis von A. Wegener Sleeswyk in einer privaten Mitteilung.

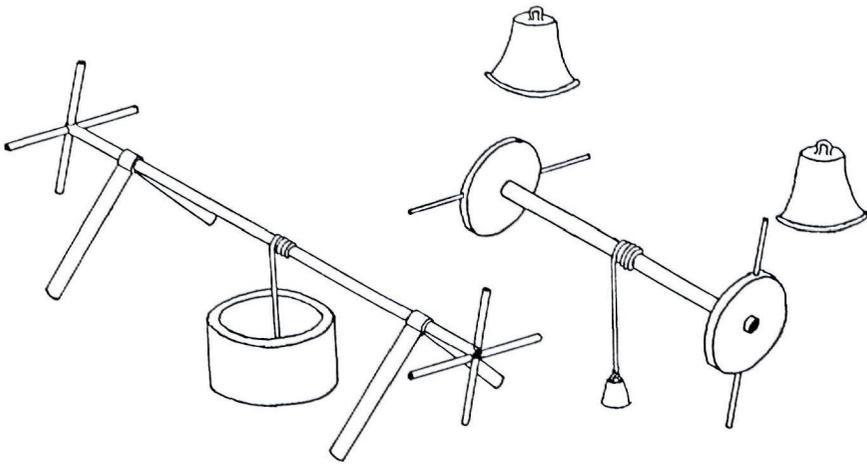


Abbildung Ia

Abbildung Ib

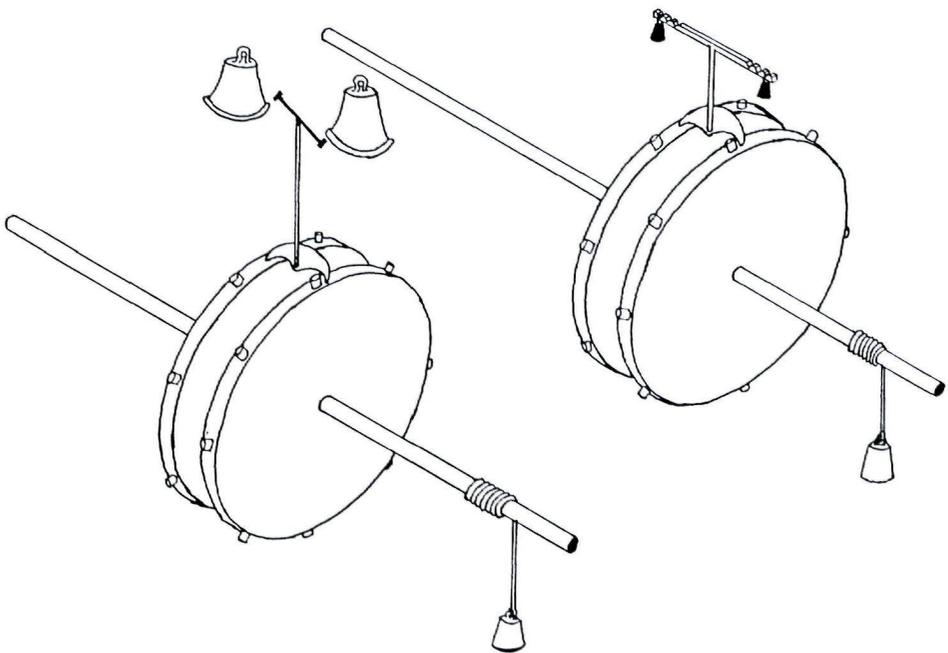


Abbildung IIa

Abbildung IIb

tungen an der Schlagwerkswelle lösbar.²⁷

Die Tüftler fanden indes eine neuartige Lösung, als sie die kreisenden Stäbe durch Hämmer ersetzten, welche in einer hin- und herschwingenden Bewegung die Glocken anschlügen; das taten die Hämmer fast so, wie wenn sie von Menschenhänden betätigt würden. (Siehe die Abbildung IIa auf der Bildseite.) Die Oszillation des Hammerpaars wurde über einen waagrecht angeordneten Balken erzeugt, der sich um seine lotrechte Querachse bewegte, während er sich an seinen beiden Enden von den Zapfen eines der Schlagwerkswelle starr aufgesetzten Doppelrades abwechselnd hin- und herschieben ließ. Der Balken trug auf einer in seiner lotrechten Querachse stehenden Stange das Hammerpaar. Federn bewirkten, daß die Hämmer nach jedem Anschlag von der Glocke abprallten: So klang der Glockenton aus, und drehten sich die Enden des Balkens unten ein wenig zurück und konnten diese mithin von den Zapfen des Doppelrades ergriffen werden.

Jedes der beiden Räder, die zum Doppelrad zusammengerückt waren, sah wie ein kleines Mühlrad aus. Solche zapfengeränderten Räder trieben seit der Römerzeit die Mahlwerke in den wasserradgetriebenen Kornmühlen an. Solche Räder konnten den klösterlichen Tüftlern zum Muster dienen.

Das neuartige Läutgerät funktionierte gewiß nicht von vornherein wunschgemäß, wenn ein allzu leicht gebauter Oszillator mit überhöhter Frequenz auf die Glocke einhämmerte. Man könnte Abhilfe geschaffen haben, indem man der oszillierenden Achse eine Massenträgheit hinzufügte, die sich verkörpern mochte in einem Schwungrad, oder in einem Stab, oder in einem Stab mit Gewichten an beiden Enden. Solche Gewichte könnte man bei der empirischen Ermittlung der richtigen Trägheit verschiebbar gemacht haben.²⁸

Wer so am Läutgerät gebastelt hätte, wäre – ohne sich dessen versehen zu haben – bereits mit der Anfertigung eines Zeitreglers beschäftigt gewesen. Und was er letztlich noch zu tun gehabt hätte, um den Zeitregler als solchen verfügbar zu machen, wäre nurmehr die Beseitigung der Glocke gewesen.

Eines Tages war es soweit. Dem nachdenklichen Betreuer des Uhrwerks im Kloster war seit langem zuwider, daß er seine Wasseruhr nur durch Mogeleyen regeln konnte. Das Wasser floß, wie es selber wollte, mal schneller und mal langsamer, in rätselhaftem und unbeherrschbarem Wechsel. Mit Wasser konnte man die Zeit nicht abmessen. Hingegen der Läuthammer: Der konnte ja immergleiche Zeiteinheiten abzählen, und die Dauer der Zeiteinheit bestimmte man selbst als Meister des Werks.

Führte der Gedankengang den Meister eines Tages zu der Erkenntnis, der Läuthammer wäre als Zeiteinheiten-Abzähler verwendbar? – Freilich: Läuthammer und Zeiteinheiten-Abzähler in einem, das gab's nicht. Die Funktionen des Läutens und des Zeiteinheiten-Abzählens müßten auf zwei Exemplare des Läutsystems verteilt werden, und die beiden Exemplare wären dann zu koppeln. Eines der beiden Systeme hätte zu läuten, nachdem das andere die richtige Menge Zeiteinheiten abgemessen hatte, indem es die entsprechende Anzahl hin- und herschwingender Bewegungen vollbrachte. Dann müßte der Zeiteinheiten-Abzähler eine Sperre im anderen System lösen und dieses System so zum Läuten veranlassen. – Gedacht,

²⁷ Darstellung nach A. Wegener Sleswyk, private Mitteilung.

²⁸ Darstellung nach A. Wegener Sleswyk, private Mitteilung.

getan. Beide Systeme zusammen stellten einen Prototyp des Räderuhrwerks dar. (Siehe die Abbildungen IIa und IIb auf der Bildseite.)

Wie lange der Lät-Oszillator als solcher bereits gedient hatte, bevor er zur Waag (zum *foliot*) umfunktioniert wurde und somit den Bau der ersten frühen Räderuhr ermöglichte – wer wüßte die Frage zu beantworten, wie lange dieser Dornröschenschlaf der Technik gedauert hat?

Mit der Räderuhr aber war der Klosterwelt ihr jahrhundertlang gehegter Wunsch, einen praktikablen Horenmelder zu besitzen, vollends erfüllt worden. Man konnte ja die Periode der oszillierenden Waag im Handumdrehen variieren, indem man einfach die beiderseits am Waagbalken hängenden Gewichte verschob. Wenn der Sakristan der Klostersgemeinde nur beim Aufgang und beim Untergang der Sonne die Gewichte regelmäßig nach einem empirisch ermittelten Schema verhängte, folgte das Steuergerät also dem Wechsel der ungleich langen Tag- und Nachtstunden im Jahreslauf, und schlug das Schlagwerk stets zur rechten Zeit die Weckglocke an.²⁹ Und von der Räderuhr bekam man nicht bloß das eine Weckzeichen für die Matutin; mit geringem Aufwand waren ihr die sämtlichen Geläute für alle Horen eines Klostertages einzuprogrammieren.

Der soeben rekonstruierte Verlauf eines Erfindungsgeschehens läßt sich teilweise dokumentieren. Belegt ist erstens das Lätgerät mit den kreisenden Stäben. Die Nachrichten aus dem Kloster Santa María de Ripoll bürgen dafür, daß es ein solches Gerät gegeben hat. Belegt ist zweitens das oszillierende Läutsystem und das entsprechende Zeiteinheiten-Abzählsystem, mit Doppelrädern, und zwar beide in einem Uhrwerk beisammen, nach dem Zeugnis der um 1330 datierten Konstruktionsunterlagen Richards von Wallingford.³⁰

Das Mühlrad als Muster des Uhrenrades

Auf den vorausgegangenen Seiten ist das Mühlrad als Muster des Uhrenrades in die Vor- und Frühgeschichte der Räderuhr eingeführt worden. Dieser Vorschlag wäre plausibel zu machen.

Nur von Wassermühlen wird im folgenden die Rede sein. Was die Windmühlen betrifft, sei vorausgeschickt: Die frühesten bisher bekanntgewordenen Windmühlen wurden in England errichtet. Die erste dort nachgewiesene Windmühle scheint vor 1137 entstanden zu sein; bis 1200 sind dort 56 Windmühlen bezeugt; an der wachsenden Häufigkeit der Belege ist abzulesen, daß die Windmühlen seit etwa 1180 allgemein üblich wurden.³¹

²⁹ H.G. Hammond, "The Foliot and the Natural Day," *Antiquarian Horology* 12, 1980-1981, S. 154-157.

³⁰ J.D. North ed., *Richard of Wallingford*. An edition of his writings with introductions, English translation and commentary, 3 Bände (Oxford, 1976), 2, S. 330-334, und 3, Addendum, S. 275-276; 3, S. 64: Abbildungen II.1(b) und (c), insbes. Abbildung II.1(b): Leonardo da Vinci, Codex Atlanticus, Fol. 348^v. C. Pedretti, *Studi vinciani*. Documenti, Analisi e Inediti leonardeschi. In appendice: Saggio di una cronologia dei fogli del 'Codice Atlantico' (Travaux d'Humanisme et Renaissance XXVII, Genf, 1957), S. 103: Fig. 43 = Mailand, Biblioteca Ambrosiana, Codex Atlanticus, Fol. 348 verso-d; Datierung auf S. 104: Annäherungsweise um 1495. Siehe auch E.L. Edwardes, *The Story of the Pendulum Clock* (Altrincham, 1977), S. 5-6; mit Plate 1: Rekonstruktion.

³¹ E.J. Kealey, *Harvesting the Air: Windmill Pioneers in Twelfth-Century England* (Woodbridge, Suffolk, 1987), S. 197-198: Zusammenfassung.

Eine Wassermühle ist in der überlieferten antiken Technikliteratur erstmals um 25 vor Chr. von Vitruv (*De Architectura*, X, 5, 2) beschrieben worden.³² Seine Mühle hat ein vertikales Schaufelrad an dem einen Ende einer horizontalen Welle; an dem anderen Ende trägt diese Welle ein vertikales Zapfenrad, welches in ein horizontales Zapfenrad am unteren Ende einer vertikalen Welle eingreift; deren oberes Ende ragt durch ein Loch im Mittelpunkt des festliegenden unteren Mühlsteins (des Bodensteins) hindurch und ist im Mittelpunkt des oberen Mühlsteins (des Läufersteins) befestigt, den sie dreht.

Nach Vitruvs Beschreibung wirkt das fließende Wasser auf die Radschaufeln unten, hat die vitruvianische Mühle also ein unterschlächtiges Rad; ein von oben her angetriebenes, überschlächtiges Wasserrad gab es im Altertum freilich auch schon; letzteres mag das jüngerere gewesen sein.³³

Die vitruvianische Mühle ist vielleicht im 2. Jahrhundert vor Chr. erfunden worden. Damals wäre als ihr Schöpfer ein alexandrinischer Ingenieur vorstellbar. Aber vielleicht wurde sie erst zu Vitruvs Zeiten konstruiert.³⁴

Ein anderer Typ der Wassermühle, die sogenannte norwegische Mühle, weist ein horizontales Schaufelrad am unteren Ende einer vertikalen Welle auf; am oberen Ende der Welle dreht sich das obere Mühlrad, wenn unten ein Wasserstrahl das turbinenähnlich gestaltete Schaufelrad in Drehung versetzt.³⁵

Ob die norwegische Mühle jünger oder älter als die vitruvianische ist, läßt sich nicht entscheiden.³⁶ Beide Typen fanden im römischen Reich Verwendung; die norwegische Mühle wird in Europa jedoch erst nach dem Zerfall des Reichs archäologisch greifbar,³⁷ und zwar in Irland seit dem 7., in England seit dem 9. Jahrhundert.³⁸ Norwegische Mühlen und solche mit vertikalen Wasserrädern kamen im mittelalterlichen Europa also beide vor; gebiets- und zeitweise mag dieser oder jener Typ vorherrschend gewesen sein, bis schließlich im ausgehenden Mittelalter das vertikale Wasserrad für die Mechanisierung gewerblicher Werkstätten wohl durchaus bevorzugt wurde.³⁹

Seit etwa 100 nach Chr. verbreitet sich die vitruvianische Mühle als Kornmühle im ganzen Reich; sonstige Nutzungen ihres rotierenden Triebwerks sind anscheinend kaum nachweisbar. Die Mühle ist zum Antrieb eines Teigrührers vorgeschlagen

³² K. Sallmann, "Vitruvius," *Der Kleine Pauly* 5, München, 1975, S. 1309-1313, insbes. S. 1310: Abgefaßt vor 31 vor Chr., ediert wohl Mitte der 20er Jahre. J.P. Oleson, *Greek and Roman Mechanical Water-Lifting Devices: The History of a Technology* (Phoenix. Journal of the Classical Association of Canada, Supplementary Volume XVI, Dordrecht [u.a.], 1984), S. 118-120: Text, Übersetzung, Kommentar, Bibliographie. Ö. Wikander, *Vattenmöllor och möllare i det romerska riket* (Dissertation Lund, 1980), S. 137-144: Englische Zusammenfassung. Weiterführend: Ö. Wikander, "Archaeological Evidence for Early Water-Mills - an Interim Report," *History of Technology* 10, 1985, S. 151-179.

³³ Wikander 1980 [Anm. 32], S. 139.

³⁴ Oleson [Anm. 32], S. 375-378: Vermutung des alexandrinischen Ursprungs; insbes. S. 378: Wohl 2. Jh. vor Chr. Wikander 1980 [Anm. 32], S. 140-141: Behutsame Datierung, vielleicht späte Erfindung.

³⁵ Oleson [Anm. 32], S. 373-374.

³⁶ *Ibid.*, S. 374.

³⁷ Wikander 1980 [Anm. 32], S. 139.

³⁸ Wikander 1985 [Anm. 32], S. 154-155: Irland: seit dem 7. Jh.; und S. 156: England: 9. Jh.

³⁹ T.S. Reynolds, *Stronger Than a Hundred Men. A History of the Vertical Water Wheel* (Johns Hopkins Studies in the History of Technology, New Series No. 7, Baltimore, Md./London, 1983), S. 103-108.

worden, und sie trieb eine endlos umlaufende Bandsäge zum Steinsägen an. Ob die Antriebswelle als Nockenwelle ein Stampfwerk betrieb, ist ungewiß.⁴⁰

Die Wasserräder dürften um 500 relativ häufig in Italien und Südfrankreich gearbeitet haben. Von dieser Basis aus scheint ihre Verbreitung nord-, west- und ostwärts vor allem während des 8. und 9. Jahrhunderts stattgefunden zu haben; im 12. Jahrhundert wurden sie noch auf der skandinavischen Halbinsel und in Osteuropa eingeführt. Bis 1200 war ganz Europa mit Wasserrädern ausgestattet.⁴¹

Sie wurden im Mittelalter, zumal in der Spanne von 1150 bis 1250, sehr viel häufiger gebaut als wohl je im Altertum. Und anders als im Altertum, kamen sie einer vielfältigen handwerklichen Produktion zugute: Wassergetriebene Hammerwerke für Schmiedewerkstätten gibt es vielleicht seit dem 11. Jahrhundert in England und Deutschland und anderswo, und gewiß seit dem 13. und 14. Jahrhundert überall in Europa. Für die Blasebälge der Schmiede gelangte das Wasserrad allgemein erst nach 1300 zum Einsatz. Kurz nach 1300 wird das wasserradgetriebene Hammerwerk auch bei der Erzzerkleinerung üblich. Bei Hochofen-Gebläsen begegnet das Wasserrad erstmals 1384 und allgemein im 15. Jahrhundert.⁴²

Spindel und Waag

Das klassische Hemmungssystem der Räderuhr ist das Spindel-Waag-System. Es ist unstrittig ein Erzeugnis der Feinmechanik.

Zum Spindel-Waag-System⁴³ gehört im wesentlichen ein senkrecht aufgehängter Stab ("Spindel") mit zwei in der Längsachse angesetzten Plättchen ("Lappen") sowie einem waagrecht aufgesetzten Balken ("Waag"), an dessen beiden gleichlangen Armen je ein Gewicht verschiebbar angebracht ist, und ein sich in senkrechter Ebene drehendes Kronrad. Die beiden Lappen stehen in einem Winkel von ungefähr 45° zueinander und sind einen Kronrad-Durchmesser weit voneinander entfernt, also können sie abwechselnd ins Kronrad greifen. Das Kronrad dreht sich, weil es über ein Getriebe mit einer waagrecht gelagerten Welle verbunden ist, die sich drehen muß, da ein an ihr befestigtes und um sie aufgespultes Seil ein Gewicht trägt, welches unter der Einwirkung der Schwerkraft abwärts geht – und immer schneller fallen müßte, wenn nicht jenes Spindel-Waag-System den ungehemmten Ablauf des

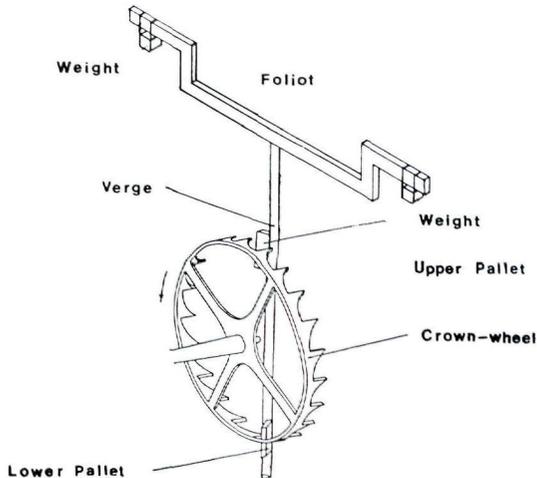
⁴⁰ Ö. Wikander, "The Use of Water-Power in Classical Antiquity," *Opuscula Romana* (Skrifter utgivna av Svenska Institutet i Rom, 4^o, XXXVII. Acta Instituti Romani Regni Sueciae, Series in 4^o, XXXVII) 13, 1981, S. 91-104, insbes. S. 95: Vitruv, *De Architectura* X, 5, 2: Teigknetter. Hierzu einschränkend Oleson [Anm. 32], S. 119. Wikander 1981 [wie oben], S. 96-97: Nockenwelle eines römischen Stampfwerks? Bandsäge: D.L. Simms, "Water-Driven Saws in Late Antiquity," *Technology and Culture* 26, 1985, S. 275-276. Zur Quelle: Ausonius, *Mosella*, 2. Hälfte 4. Jh.: K.-H. Ludwig, "Die technikgeschichtlichen Zweifel an der 'Mosella' des Ausonius sind unbegründet," *Technikgeschichte* 48, 1981, S. 131-134. Einen älteren Stand der Interpretation referiert Oleson [Anm. 32], S. 32-33.

⁴¹ Reynolds [Anm. 39], S. 357: Zum Thema "Diffusion and Industrial Diversification" diene als Datenquelle: B. Blaine, *The Application of Water-Power to Industry during the Middle Ages* (Dissertation University of California, Los Angeles, 1966). Reynolds [Anm. 39], S. 48-51: Geographische Verbreitung; S. 51-54: Zahlenmäßige Zunahme. Wikander 1985 [Anm. 32], S. 171, Anm. 74: Vermutung, daß die (vertikale) Wassermühle im römischen Reich weit verbreitet war; nicht nur gebietsweise in Italien und Südfrankreich.

⁴² Reynolds [Anm. 39], S. 85-91: Wasserradnutzung in gewerblichen Werkstätten.

⁴³ D. Hill, *A History of Engineering in Classical and Medieval Times* (London/Sydney, 1984), S. 242-245; Figure 12.6 auf S. 243.

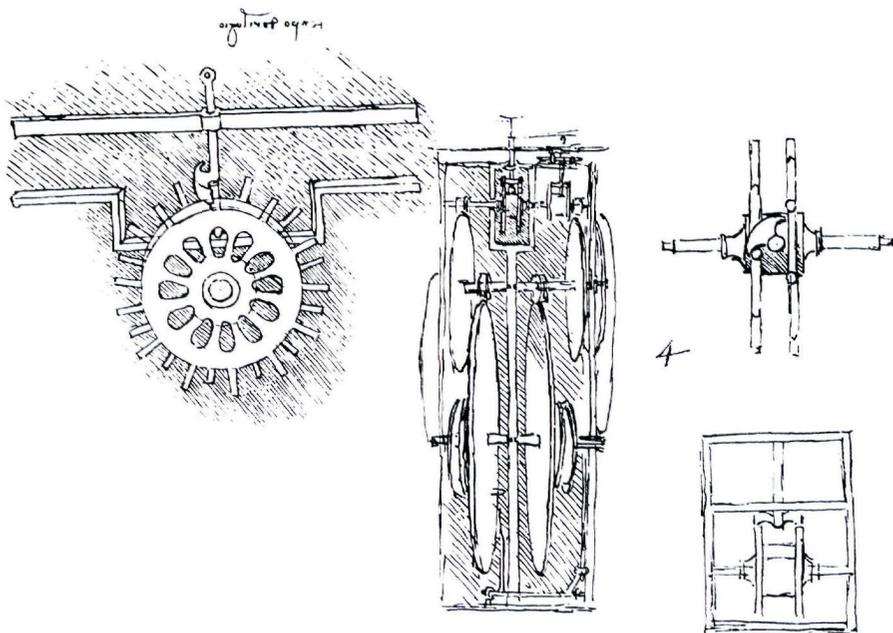
Gewichts in eine gleichmäßige Drehung des Kronrads verwandelte: Indem das Kronrad sich dreht, schiebt einer der Zähne den einen der beiden Lappen, welcher diesen Zahn aufhält, beiseite; an der diametral gegenüberliegenden Stelle des Zahnkranzes stellt sich nun der andere der beiden Lappen einem Zahn entgegen, um von ihm beiseite geschoben zu werden; mithin greift ersterer Lappen wieder hemmend in den Zahnkranz ein, und wieder schiebt ein Zahn ihn zur Seite; usw. An den beiden einander diametral gegenüberliegenden Stellen drückt der sich drehende Zahnkranz die beiden Lappen in einander entgegengesetzten Richtungen beiseite: einer muß nach "rechts," der andere dann nach "links," ersterer wieder nach "rechts" und letzterer daraufhin nach "links" weichen; usw. Mit den Lappen bewegt sich die Spindel nach "rechts," nach "links," nach "rechts," nach "links," usw.; und die aufgesetzte Waag schwingt mit. Die träge Waagmasse bewirkt, daß sich die Richtung des Schwungs mit einer gewissen Verzögerung umkehrt. Durch die Gewichte kann die Verzögerung dosiert werden: Sie nimmt ab, wenn der Abstand der Gewichte zur Spindel verkürzt wird; und wenn dieser Abstand vergrößert wird, nimmt die Verzögerung zu.



Figur 4 - Spindel-Waag-System (Bildquelle: Hill, Anm. 43).

Die Gangregelung mit dem Spindel-Waag-System sollte jahrhundertlang im wesentlichen unverändert bleiben, und zwar bis zum 25.12.1656, als Christiaan Huygens das Pendel erfolgreich zum Gangregler machte. (Die englischen Uhrmacher Ahasverus und John Fromanteel mögen gleichzeitig und selbständig an der Entwicklung der

Pendeluhr beteiligt gewesen sein, die von Galileo Galilei theoretisch vorbereitet worden war.)⁴⁴



Figur 5 – Leonardo da Vinci, Skizze (Bildquelle: Pedretti, Anm. 30).

⁴⁴ R. Plomp, *Spring-driven Dutch pendulum clocks 1657-1710* (Schiedam, 1979), S. 11. R.D. Dobson, "Huygens, the Secret in the Coster-Fromanteel 'Contract', The Thirty-Hour Clock," *Antiquarian Horology* 12, 1980-1981, S. 192-196. E.H. Glasius, "Huygens, Coster and Fromanteel, Some Secrets Remain," *Antiquarian Horology* 12, 1980-1981, S. 442-443. E.L. Edwardes, "The Suspended Foliot and New Light on Early Pendulum Clocks," *Antiquarian Horology* 12, 1980-1981, S. 614-626 und 634. R.D. Dobson, "The Development of the Pendulum Clock 1656-1659," *Antiquarian Horology* 13, 1981-1982, S. 270-281. E.L. Edwardes, "New Light on Early Pendulum Clocks. Addendum," *Antiquarian Horology* 13, 1981-1982, S. 381-382; dazu: E.H. Glasius, "Addendum: Early Pendulum Clocks," *Antiquarian Horology* 13, 1981-1982, S. 564. R.D. Dobson, "Galileo Galilei and Christiaan Huygens," *Antiquarian Horology* 15, 1985, S. 261-270. M.F. Ball, "Galileo Galilei, and Christiaan Huygens. Addendum," *Antiquarian Horology* 15, 1985, S. 373-374.

Statt des Waagbalkens kommt eine radförmige Unruhe vor, die wie der Balken in einer waagrechten Ebene schwingt. Das Rad erscheint zum erstenmal im Astrarium des Giovanni de' Dondi; mit diesem astronomischen Uhrwerk ist das erste Zeugnis der Rad-Unruhe in die Zeitspanne 1348-1364 zu datieren.⁴⁵

Die Frage, ob der Balken früher als das Rad zur Gangregelung angewendet worden ist oder ob dem Rad die Priorität vor dem Balken zukommt, dürfte an sich kaum entscheidbar sein,⁴⁶ es sei denn, man erblickt im Gangregler einen umfunktionierten Läuthammer.⁴⁷ Dann müßte die Unruhe zunächst balkenförmig gewesen sein und wäre sie zur Radform umgestaltet worden.

Ein mit dem klassischen System einst konkurrierendes System sei vorgestellt, anhand der von Leonardo da Vinci um 1495 gezeichneten Skizze:⁴⁸

Es hatte anstelle des Kronrads zwei gleichgroße, in parallelen Ebenen fest auf eine Welle montierte Räder mit radialen Zapfen; beide Räder trugen gleichviele Zapfen, und diese folgten einander auf der Peripherie des Rades in gleichen Abständen; die beiden Zapfenkränze waren untereinander versetzt angeordnet, und zwar so, daß die Zapfen-Nachbarn hüben und drüben gleich weit voneinander entfernt standen. Die Spindel ragte zwischen den beiden Rädern senkrecht hinab, zur Welle weisend, ohne diese zu erreichen. (Das untere Spindel-Ende nahm ein zwischen den Rädern oberhalb der Welle angebrachter Balken auf.) Statt zweier Lappen trug die Spindel einen schweren Anker, welcher mit den Spitzen beiderseits in die Zapfenkränze eingriff: Indem das Doppelrad sich drehte, schoben die Zapfen beiderseits abwechselnd den Anker an dessen Spitzen hin und her, hin und her, im waaggesteuerten Schwingungsrhythmus.

Doppelrad und Kronrad

Die klassische Hemmung der Räderuhr, das Kronrad-Spindel-Waag-System, verblüfft jeden Betrachter, der zu begreifen sucht, wie je ein Mensch dieses System für diese Funktion erfinden konnte. Nun hat jedoch ein Mensch ebendieses System erfunden; wenn er es denn nicht zu ebendiesem Zweck ersann, wozu mag er es sonst erdacht haben? Zum Zwecke des Läutens, so ist oben vorgeschlagen worden, wo ferner ein Gedankengang entwickelt worden ist, der vorzeiten 1. zur Erkenntnis führte, daß beim Anschlagen der Glocke zugleich ein Abzählen immergleicher Zeiteinheiten stattfand, und 2. zu dem Entschluß weiterführte, die beiden Funktionen des Läutens und des Zeiteinheiten-Abzählens voneinander zu trennen und auf zwei Exemplare

⁴⁵ A. Bedini and F.R. Maddison, "Mechanical Universe. The Astrarium of Giovanni de' Dondi," *Transactions of the American Philosophical Society Held at Philadelphia for Promoting Useful Knowledge*, New Series 56, 1966, Part 5, S. 14: Zur radförmigen Unruhe.

⁴⁶ Edwardes [Anm. 30], S. 7.

⁴⁷ J.D. North, "Opus quorundam rotarum mirabilium," *Physis* 8, 1966, S. 337-372, insbes. S. 363: Zur Hemmung: "My feeling is that it was evolved from the striking part of the monastic alarum during the last years of the Thirteenth Century, and in Italy ..."

⁴⁸ North [Anm. 30], 2, S. 330-334, und 3, Addendum, S. 275-276; 3, S. 64: Abbildungen II, 1(b) und (c); insbes. Abbildung II, 1(b): Leonardo da Vinci, Codex Atlanticus, Fol. 348^v. Pedretti [Anm. 30], S. 103: Fig. 43 = Mailand, Biblioteca Ambrosiana, Codex Atlanticus, Fol. 348 verso-d; S. 104: Datierung: Annäherungsweise um 1495. Leonardos Beischrift: *tempo d'orologio*. Siehe auch Edwardes [Anm. 30], S. 5-6, mit Plate 1: Rekonstruktion.

des Systems zu verteilen und beide Exemplare zu koppeln, wodurch ein Prototyp der Räderuhr zustandekam.

Kronräder gab es in dem mutmaßlichen Prototyp nicht, sondern Doppelräder – Doppelräder mit Zapfen, nicht mit Zähnen.

Die Kombination der beiden mit Doppelrädern ausgerüsteten Teile des Prototyps ist freilich spät bezeugt, um 1330, durch die Konstruktionsdaten Richards von Wallingford, nach der Interpretation von J.D. North. Die späte Bezeugung bedeutet indessen nicht eine späte Geburt; man erwäge:

In zwei bemerkenswerten Punkten unterscheiden sich die beiden Systeme: Das Doppelrad ist dem Kronrad zwar mechanisch überlegen, aber dieses war billiger als jenes herzustellen. Solche Unterschiede sprechen für die Annahme, das Kronrad-System sei das jüngere der beiden Systeme, und das ältere Doppelrad-System sei vom jüngeren verdrängt worden. "... we must at least admit the possibility that the double wheel, rather than the single crown-wheel, was the first successful mechanical escape-wheel for use with a verge and foliot," meint North.⁴⁹

Feinmechanische Voraussetzungen der frühen Räderuhr

Für die Räder des mutmaßlichen Prototyps ist oben das Mühlrad als Muster vorgeschlagen worden. Überhaupt ist die Herkunft aus der technischen Welt des Schwermaschinenbaus noch dem Räderuhren-Prototyp anzusehen. Die weitere Entwicklung zu den überlieferten Räderuhren ist aber nicht Sache des Mühlenbauers gewesen, sondern zur Angelegenheit des Grobschmieds oder des Schlossers geworden. Vom Grobschmied, dem ein "astrologus" oder sonst ein mathematisch gebildeter Herr beigestanden haben mag, wurden Systeme mit großen Zahnrädern für die Aufstellung in Kirchen- und Rathaustürmen gebaut, während feine Zahnradsysteme für den Zimmergebrauch aus der Hand des Schlossers oder überhaupt des Feinmechanikers hervorgingen.

So verbesserte die vom Armbrustmacher geübte Kunst das zwischen Läuthammer oder Waag und Doppelrad vermittelnde Glied erheblich: In die Zapfen des Doppelrades griff zur Zeit Richards von Wallingford nicht mehr ein schlichter Balken ein, sondern ein kunstvoll ausgebildeter Anker, welcher einen doppelten Armbrustriegel darstellt, wobei die beiden Riegel in spiegelbildlicher Anordnung zu denken sind.⁵⁰

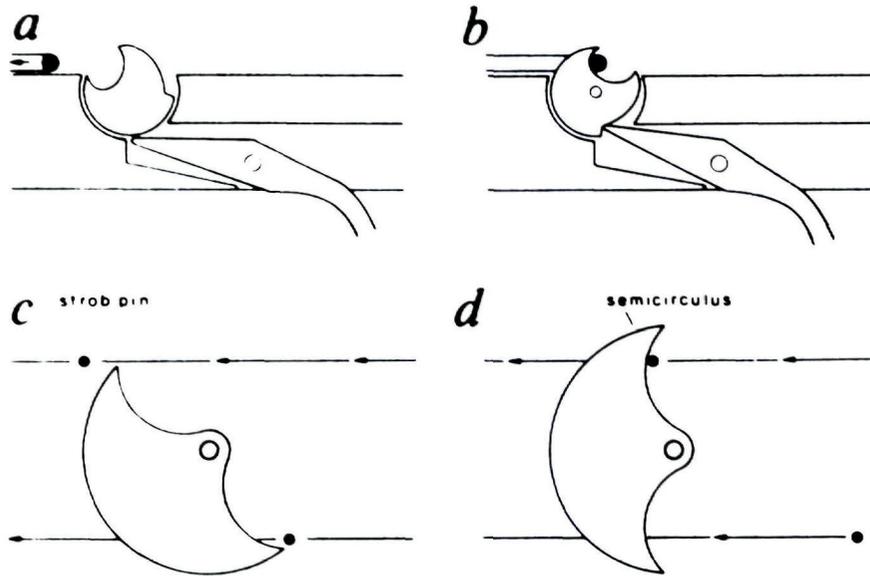
Doch es drehte sich in der Welt des Räderuhrenbaus ja bald alles um Zahnräder. – Die Zahnradherstellung ruhte auf einer sehr alten Tradition, die immerfort irgendwo ihre vereinzelt Praktiker gefunden haben wird.

Die Geschichte der Zahnradtriebetechnik liegt weithin im dunkeln. Als Urheber gelten Ktesibios und Archimedes, deren Nachlaß von wenigen Feinmechanikern weitergebildet worden sein mag, bevor er im frühen 1. Jahrhundert vor Chr. unter den Astronomen der Insel Rhodos durch das Antikythera-Gerät wieder

⁴⁹ J.D. North, "Monasticism and the First Mechanical Clocks," in *The Study of Time. II. Proceedings of the Second Conference of the International Society for the Study of Time. Lake Yamanaka - Japan*, ed. J.T. Fraser and N. Lawrence (Berlin [u.a.], 1975), S. 381-398, insbes. S. 392, mit Anmerkungen auf S. 398. Zitat: North [Anm. 30], 2, S. 333.

⁵⁰ A. Lantink-Ferguson, "The origin of the clockwork-escapement," *Nature* 330, 1987, S. 615.

zutagetritt. Im Instrumentenbau ist die Zahnradtriebetechnik wohl durch eine freilich unbezeugte Tradition fortgesetzt und an die islamische Welt überliefert worden. Hier ist sie um 1000 nach Chr. durch den von al-Bîrûnî konstruierten Sonnen- und Mond-Kalenderrechner und 1221/1222 durch einen vergleichbaren Rechner in dem von Abî Bakr zu Isfahan gebauten Astrolab dokumentiert; dieses Rechengerät wird von Hand betrieben.⁵¹



Figur 6 – Armbrustschloß und Anker (Bildquelle: Lantink-Ferguson, Anm. 50).

⁵¹ D.J. de Solla Price, "Gears from the Greeks. The Antikythera Mechanism - A Calendar Computer from ca. 80 B.C.," *Transactions of the American Philosophical Society Held at Philadelphia for Promoting Useful Knowledge*, New Series 64, 1974, Part 7, S. 52-53; Allgemeines zur frühen Feinmechanik; S. 54-55: Insbes. zum Zahnradgetriebe im Instrumentenbau, mit Spuren der Tradition bis in den Islam (und weiter bis nach Westeuropa, 14. Jh.); S. 62: Rhodos, 1. Jh. vor Chr. Zusammenfassend: D.J. de Solla Price, "Clockwork Before the Clock and Timekeepers Before Timekeeping," in Fraser and Lawrence [Anm. 49], S. 367-380, insbes. S. 374-378. Dieser zusammenfassende Bericht ist wiederholt worden in: *Bulletin of the National Association of Watch and Clock Collectors* 18, 1976, S. 398-409, insbes. S. 405-408. Das Antikythera-Gerät wurde nicht durch eine *clepsydra* gesteuert sondern von Hand betrieben; siehe A.G. Drachmann, Rezensent, *Technology and Culture* 17, 1976, S. 112-116, insbes. S. 116. E. Wiedemann, "Ein Instrument, das die Bewegung von Sonne und Mond darstellt, nach al Bîrûnî, *Der Islam, Zeitschrift für Geschichte und Kultur des islamischen Orients* 4, 1913, S. 5-13. D.J. de Solla Price, "On the Origin of Clockwork, Perpetual Motion Devices and the Compass," *Smithsonian Institution, United States National Museum, Bulletin* 218, *Contributions from the Museum of History and Technology* (Washington D.C., 1959), Paper 6, S. 82-112, insbes. S. 83-84: Zur Geschichte der Zahnradtriebetechnik; S. 97-98, mit Fig. 10 auf S. 97: al-Bîrûnî und sein Kalender-Räderwerk; S. 98-100: Abî Bakr und sein Astrolab mit Kalenderrechner; mit Fig. 11 auf S. 98 und Fig. 12 auf S. 99; Rechner für den Handbetrieb: S. 100. Sinngemäß wiederholt von Bedini and Maddison [Anm. 45], S. 9-10, mit den Bildern: Fig. 4 auf S. 8: al-Bîrûnî, Kalendergetriebe; Figures 5 und 6 auf S. 9, und Fig. 7 auf S. 10: Abî Bakr, Astrolab mit Kalendergetriebe, ausführlich und detailliert erläutert in den Beischriften zu Figures 5, 6 und 7. H.C. King in collaboration with J.R. Millburn, *Geared to the Stars. The Evolution of Planetariums, Orreries, and Astronomical Clocks* (Bristol [u.a.], 1978), S. 15-16: al-Bîrûnî und sein Rechner, mit Fig. 2.2 auf S. 16; S. 16: Abî Bakr und sein Gerät, mit Fig. 2.2 A-B-C-D auf S. 17. Hill [Anm. 43], S. 188-190: al-Bîrûnî und sein Rechner, mit Fig. 10.3 a-b-c-d auf S. 189.

Zu den Einzelheiten: Im griechisch-römischen Altertum wurde durch Zahnräder Kraft auf vier verschiedene Weisen übertragen: 1. Zahnräder in gemeinsamer Ebene griffen ineinander; 2. Zahnräder in rechtwinklig zueinander stehenden Ebenen griffen ineinander; 3. ein Zahnrad griff in eine Zahnstange ein; und 4. eine endlose Schraube griff in ein Zahnrad ein.⁵²

Zuerst erscheint das Zahnrad in Verbindung mit der Zahnstange, und zwar um 280 vor Chr. in der von Ktesibios konstruierten Wasseruhr.⁵³ Wohl im Jahr 264 vor Chr. oder um diese Zeit baut Archimedes seinen Meilenzähler-Wagen mit den beiden ineinandergreifenden Zahnrädern, deren Ebenen rechtwinklig zueinander stehen,⁵⁴ und um 250 vor Chr. verbindet derselbe Ingenieur die endlose Schraube mit dem Zahnrad zu dem aus Schnecke und Schneckenrad bestehenden Getriebe, das er in seinen Kriegsmaschinen eingesetzt haben soll.⁵⁵ Die in gemeinsamer Ebene ineinandergreifenden Zahnräder werden erstmals durch das sogenannte Antikythera-Gerät, den im Jahre 87 vor Chr. gebauten Kalender-Analogrechner, überliefert.⁵⁶

Der Ursprung⁵⁷ des Zahnrads und des Zahnradgetriebes wird in Ägypten vermutet, wo fruchtbare Böden unter wolkenlosem Himmel seit alters zur künstlichen Bewässerung einzuladen schienen und diese früher als sonstwo mit Schöpfwerken besorgt worden sein mag. Könnte für den Schöpfbetrieb nicht auch das ohne Beginn und ohne Ende umlaufende Förderband entwickelt worden sein? Nun denke man es sich als Plattenband: als ein endloses Band, das aus kurzen Holzbrettern besteht, welche gelenkig miteinander verbunden sind. Solche Platten eignen sich ja bestens zu Trägern für Schöpfgefäße! Ein Plattenband läuft allerdings nicht über Rollen um, sondern über Prismen.

Das Fördersystem mit Plattenband und Treib- bzw. Umlenkprismen gab es in einem Pfeilgeschütz, das von einem Zeitgenossen des Archimedes oder gar des Ktesibios konstruiert worden sein soll und ungefähr zwischen 300 und 250 vor Chr. zu datieren ist.⁵⁸ In derartigen Systemen wäre also die kantige Gestalt des Prisma zum Zahnrad ausgebildet worden: zum frühen Zahnrad mit Dreieckszähnen.

Mit gleichseitig dreieckigen Zähnen hat wohl schon Ktesibios um 280 und sicherlich dann Archimedes um 260 vor Chr. gearbeitet.⁵⁹ In der Feinmechanik haben die Dreieckszähne lange den Bedürfnissen genügt. Sie dürften zum Beispiel im

⁵² A.G. Drachmann, *The Mechanical Technology of Greek and Roman Antiquity. A Study of the Literary Sources* (Acta Historica Scientiarum Naturalium et Medicinalium, vol. 17, Kopenhagen, 1963), S. 200-203, insbes. S. 200.

⁵³ Drachmann [Anm. 52], S. 201-202.

⁵⁴ A. Wegener Sleswyk, "Vitruvius' Waywiser," *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 29, 1979, S. 11-22, insbes. Fig. 1 auf S. 18 und Fig. 2 auf S. 19. A. Wegener Sleswyk, "Vitruvius' Odometer," *Scientific American* 245 (October 1981), Number 4, S. 158-171, insbes. S. 162, 164 und 166: Abbildungen. Datierung: Sleswyk 1979, S. 14 und Sleswyk 1981, S. 171. V. Foley, W. Soedel, J. Turner and B. Wilhoite, "The Origin of Gearing," *History of Technology* 7, 1982, S. 101-129, insbes. S. 123-126: Sleswyks Datierung wird bestätigt.

⁵⁵ Drachmann [Anm. 52], S. 202. Hierzu: I. Schneider, *Archimedes. Ingenieur, Naturwissenschaftler und Mathematiker* (Erträge der Forschung, Band 102, Darmstadt, 1979), S. 79-80.

⁵⁶ Drachmann [Anm. 52], S. 200-201. Wegen der Datierung siehe die Anmerkung 51: Price 1975, S. 374 und Price 1976, S. 405: in identischen Zusammenfassungen von Price 1974.

⁵⁷ Foley, Soedel, Turner und Wilhoite [Anm. 54].

⁵⁸ *Ibid.*, S. 109.

⁵⁹ *Ibid.*, S. 122.

Antikythera-Gerät ordentlich funktioniert haben, weil sie hier kaum belastet wurden und somit an den Spitzen nur geringe Reibungen erfuhren.⁶⁰

Eine Ausnahme sei zitiert, um die Regel zu bestätigen: Als Teil einer Maschine, die vielleicht zum Lenzwasserschöpfen diente, wurde in einem Schiffswrack des frühen 1. Jahrhunderts vor Chr. ein schweres bronzenes Zahnradgetriebe entdeckt. Sofern der Befund richtig gedeutet worden ist, hatte das Getriebe mit seinen Dreieckszähnen eine nicht unerhebliche Kraft von einem hin- und herbewegten Hebel auf ein entsprechend in Schwung versetztes Schöpfgefäß zu übertragen.⁶¹

Andererseits gibt es ein um 1300 in Frankreich gebautes Astrolab mit einem Räderwerk, dessen Zähne keine gleichseitigen Dreiecke mehr darstellen: Die Zahnspitzen sind abgerundet, und die Einschnitte zwischen den Zähnen sind nach unten hin beiderseits erweitert, so daß die Zahnräder fast modern anmuten.⁶²

Eine "schwere" Feinmechanik mit Dreieckszähnen gibt es bei al-Murâdî, einem Konstrukteur, der wohl im arabisch beherrschten Spanien im 11. Jahrhundert der christlichen Zeitrechnung tätig war und dessen Kunst durch eine 1266 geschriebene, verstümmelte Handschrift überliefert ist. Mit seinen Getriebekonstruktionen setzt al-Murâdî die im Antikythera-Gerät früh greifbare Tradition fort. Der Andalusier wendet die üblichen Getriebetypen allesamt an; epizyklische Anordnungen scheint er auch zu kennen. Seine Maschinen fallen durch ihre Schwere und Größe jedoch besonders auf: Die Zahnräder können einen Umfang von gut 70 cm erreichen. Entsprechend leistungsfähig müssen die Triebwerke sein. Für das Spielzeugwerk, welches mit einem Zahnradgetriebe nacheinander einige Türchen öffnet, hat al-Murâdî ein durch fließendes Wasser gedrehtes Rad vorgesehen!⁶³

Wohl schon vor den Zähnen gab es die Zapfen. So scheint das aus Zapfenstange und Zapfenrad gebildete System älter als das entsprechende Zahngetriebe zu sein. Und falls einem Getriebe echte Schwerarbeit zugemutet wurde, setzte man Zapfen anstelle der Zähne ein, im Mühlenbetrieb etwa,⁶⁴ wo das in Holz ausgeführte Zapfen- und Zahnradgetriebe bis etwa 1850 gang und gäbe war und auch in Europa bis zum zweiten Weltkrieg noch hier und da gebräuchlich blieb.⁶⁵ Die hölzernen Zapfen und Zähne wurden nach einfachen Regeln und nach der Erfahrung geformt.

⁶⁰ Price 1974 [Anm. 51], S. 54. Sleeswyk 1979 [Anm. 54], S. 16-17. Sleeswyk 1981 [Anm. 54], S.162 und 165.

⁶¹ G. Kapitän, "A toothed gear and water-drawing pendulum from the Mahdia wreck," *International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration* 12, 1983, S. 145-153.

⁶² Price 1959 [Anm. 51], S. 103, mit Fig. 18 auf S. 105.

⁶³ D.R. Hill, "A Treatise on Machines by Ibn Mu'âdh Abû 'Abd Allâh al-Jayyânî," *Journal for the History of Arabic Science* 1, 1977, S. 33-44. Hill 1981 [Anm. 18], S. 36-46; hier auf S. 36 die berichtigte Zuschreibung: Der Autor ist al-Murâdî. Im übrigen wiederholt Hill 1981 seinen Artikel vom Jahre 1977; eine Konkordanz:

1977, S. 33 = 1981, S. 36: Überlieferung;

1977, S. 37 = 1981, S. 39: Schwere, starke Maschinen, alle Getriebetypen, und dreieckige Zähne;

1977, S. 38-39 = 1981, S. 41-42: Die zitierte Maschine mit Wasserrad;

1977, S. 40 = 1981, S. 42: Epizyklische Getriebe wahrscheinlich;

1977, S. 40 = 1981, S. 43: Die Antikythera-Tradition.

⁶⁴ Foley, Soedel, Turner und Wilhoite [Anm. 54], S. 105-107 und 122-123.

⁶⁵ C. Matschoß, *Geschichte des Zahnrades, Nebst Bemerkungen zur Entwicklung der Verzahnung* von K. Kutzbach (Berlin, 1940), S. 36-42.

Danach richtete sich bis etwa 1850 normalerweise auch die Formgebung der eisernen Zahnräder: Erst seither kam hier die mathematische Theorie praktisch zum Zuge.⁶⁶

In der Theorie hatte Ole Rømer 1674 vorgeschlagen, die Zähne zu Epizykloiden zu runden. So hatte er die wissenschaftliche Zahnradgestaltung in der Feinmechanik, namentlich im Uhrenbau, eröffnet. Seine Erkenntnisse konnten jedoch erst seit 1730 richtig wirken, als der "Traité des épicycloïdes" von Philippe de la Hire im Druck erschien.⁶⁷

Der alte chinesische Uhrenbau

In China wurden die Armillarsphäre und der Himmelsglobus früh mechanisiert, wobei das Weltmodell zum Antrieb ein Wasserrad bekam, dessen gleichmäßigen Gang eine Auslauf-clepsydra gewährleistete: Das ihr entströmende Wasser füllte nacheinander die Becher an der Peripherie des Rades, von der Seite her, auf der Höhe der Radachse; und die vollaufenden Becher drehten das Rad, in leisen Schüben, die sich zu Umläufen annähernd gleicher Zeitdauer summierten.⁶⁸

Den Bau solcher Werke dürfte der Astronom und Mathematiker Chan Hêng um 125 nach Chr. eingeleitet haben.⁶⁹ Sie sind dann im 3., 5., 6. und 7. Jahrhundert nachweisbar.⁷⁰ Epochemachend in dieser Tradition war das 725 von I-Hsing und Liang Ling-Tsan vollendete neue Werk:⁷¹

Es ließ eine Weltkugel einmal täglich eine Umdrehung vollbringen; um die Kugel drehte es zwei sie umfassende Ringe, deren einer die Sonne und deren anderer den Mond trug; mit je eigener Geschwindigkeit drehten sich die Ringe: In bezug auf die Himmelsrotation, die von der rotierenden Weltkugel dargestellt wurde, bewegten sich die Sonne pro Tag um 1° und der Mond um 13 7/19° ostwärts, so daß sie nach gut 29 Himmelsrotationen einander begegneten. Das Räderwerk wurde von einem Wasserrad angetrieben, dessen schubweiser Gang durch einen Zeiteiler mitgesteuert wurde.

Als nächster hat Chang Ssu-Hsün 979 mit einem Neubau die Tradition fortgesetzt; sie wurde von Su Sung mit der Hilfe von Han Kung-Lien durch den Umbau 1088-1090 vollendet.⁷²

Man stelle sich das fertige Wunderwerk vor: Ein etwa 10-12 m hohes Gehäuse barg hinter seinen Wänden im Erdgeschoß das Triebwerk und die Getriebe und eine

⁶⁶ Matschoß [Anm. 65], S. 70-75.

⁶⁷ Kutzbach, bei Matschoß [Anm. 65], S. 114-118.

⁶⁸ J. Needham with the collaboration of Wang Ling, *Science and Civilisation in China*, vol. 4: *Physics and Physical Technology*, Part II: *Mechanical Engineering* (Cambridge, 1965), S. 435-532. Ergänzend: J.H. Combridge, "The Astronomical Clocktowers of Chang Ssu-Hsun and His Successors, A.D. 976 to 1126," *Antiquarian Horology* 9, 1974, S. 288-301, und J.H. Combridge, "Clocktower Millenary Reflections," *Antiquarian Horology* 11, 1979, S. 604-608.

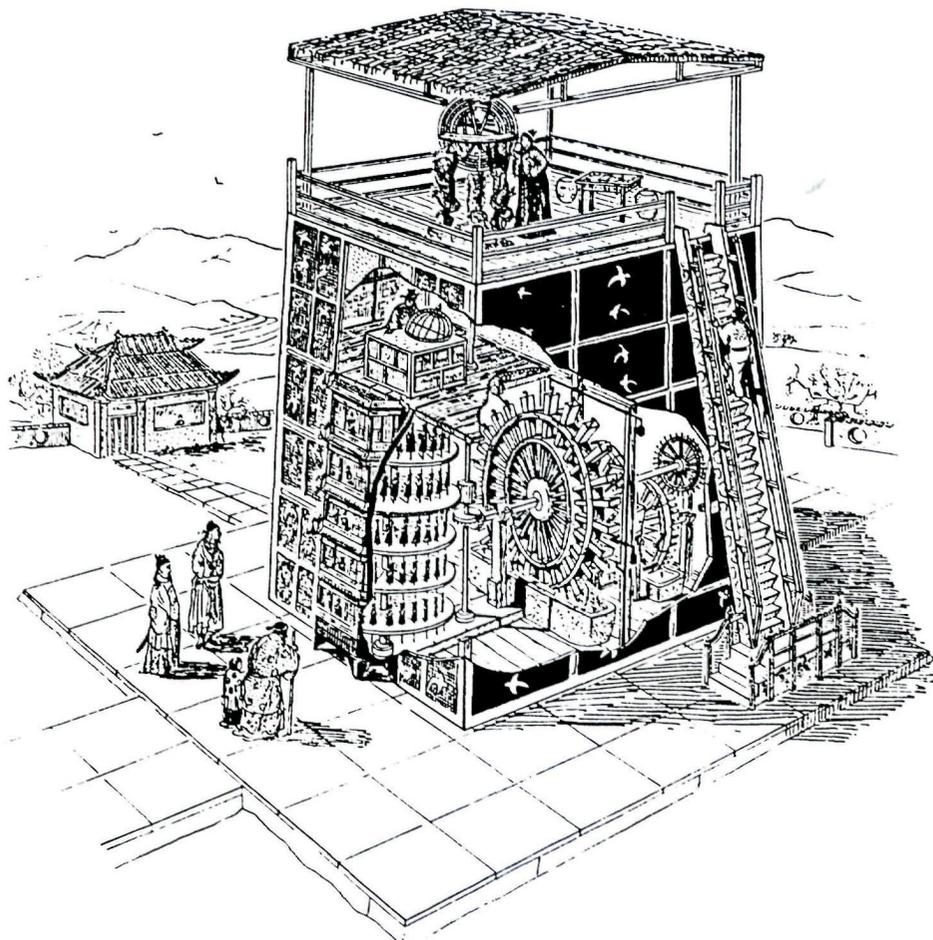
⁶⁹ Needham [Anm. 68], S. 483-487 und 532.

⁷⁰ *Ibid.*, S. 481-484.

⁷¹ *Ibid.*, S. 472-474.

⁷² *Ibid.*, S. 469-471, mit Ergänzungen und Berichtigungen: Combridge 1974 [Anm. 68]. Weiter nur nach Needham [Anm. 68], S. 446-465: Geschichte und Konstruktion des Werkes; S. 448: Datierung; S. 449: Fig. 650 mit Erläuterung; S. 452-453: Fig. 652a und 652b: Schema der Getriebe, mit Erläuterungen.

vertikale Welle mit den horizontal montierten Scheiben für die fünf Figurenumzüge, welche sich an Öffnungen in einer der Wände vorüberdrehten, um die Zeit augen- und ohrenfällig anzuzeigen. Im ersten Stock befand sich die mechanisierte Himmelskugel, vom Horizont-Tisch umschlossen; auf der Bühne oben im Freien drehte sich unter einem Schutzdach die Armillarsphäre.



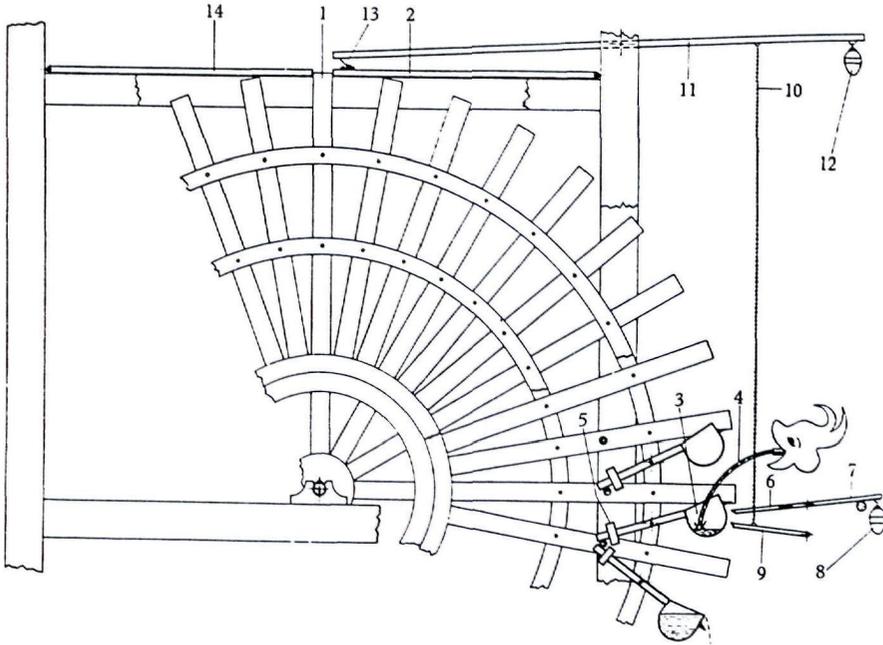
Figur 7 - Chinesischer Uhrwerkurm, 10. - 12. Jahrhundert (Bildquelle: Needham, Anm. 72).

Die Zeit wurde von Figuren mit hochgehaltenen Tafeln und durch den (mit Bambusfedern erzeugten?) Schall von Gong, Glocke und Trommel angegeben, und zwar für die gleichen wie für die ungleichen Stunden.⁷³ Im Räderwerk muß ein entsprechender Zeitumwandlungsmechanismus gesteckt haben. Desgleichen haben die Getriebe der beiden Weltmodelle die Sonnenzeit in Sternzeit umgesetzt.⁷⁴

⁷³ Needham [Anm. 68], S. 455-456; S. 462-463: Bambusfedern.

⁷⁴ Combridge 1974 [Anm. 68], S. 298-300.

Bemerkenswert ist der Zeiteiler des Antriebs:⁷⁵ Sobald das einlaufende Wasser (4) ein kritisches Gewicht erreicht hat, kippt der Becher (3) ein wenig und lastet er kurz auf dem vorderen Arm des Hebels (7), um sodann ruckartig den Hebel (9) zu betätigen, der an einer die Gabel (6) passierenden Kette (10) den Hebel (11) herabzieht; dieser reißt am Kettchen (13) die Sperre (2) vor der Radspeiche (1) hoch; nun bewegt sich das Rad unter dem Gewicht des Becherinhalts im Uhrzeigersinn fort; die nachrückende Speiche hebt zugleich die Sperre (14) an und läßt sie hinter sich herabfallen, und kann nicht mehr zurück, während sie vorn durch die Sperre (2) aufgehalten wird: Das ganze Hebelwerk hat die Ausgangslage schon wieder eingenommen und ist für den nächsten Freigabezyklus bereit. (Die Funktionen der Gewichte (5), (8) und (12) im Apparat leuchten ein.)



Figur 8 - Chinesischer Zeiteiler, 8.-12. Jahrhundert (Bildquelle: Needham, Anm. 75).

Wenn dieser Mechanismus ein Gangregler⁷⁶ sein soll, ist's ein Gangregler besonderer Art: Zwar teilt er den Zeitfluß in scharf unterscheidbare (diskrete) Einheiten ab, doch regelt er die Dauer der abgeteilten Einheiten nicht. Das besorgt die clepsydra, indem sie den Wasserfluß reguliert.

Das Werk der Jahre 979 und 1088-1090 ist 1126 zugrundegegangen.⁷⁷ Seither trennte sich die Astronomie von dem zeitanzeigenden Figuren-Beiwerk, wie Kuo Shou-Ching mit seiner Tätigkeit bezeugt: Er errichtete gegen 1276 einen vermutlich wassergetriebenen mechanisierten Globus im restaurierten Observatorium zu

⁷⁵ Needham [Anm. 68], S. 458-463, insbes. S. 460: Fig. 658 mit Erläuterung.

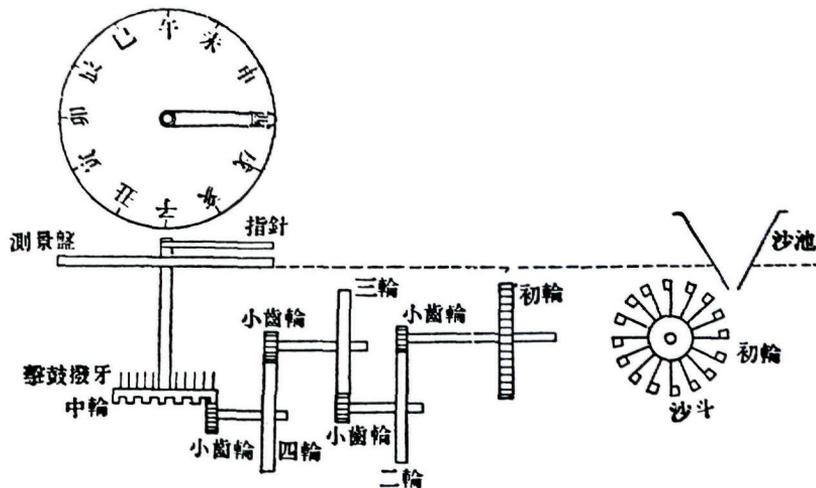
⁷⁶ Needham [Anm. 68] nennt auf S. 458-463 den Mechanismus stets ein *escapement*.

⁷⁷ Cambridge 1974 [Anm. 68], S. 291.

Peking,⁷⁸ und wohl zur gleichen Zeit schuf er ein anderes Werk, nach alter Tradition mit läutenden und trommelnden Figuren und mit Figurenumzügen für die Zeitanzeige.⁷⁹ Drachenfiguren kamen hier hinzu; mit aufgerissenem Rachen und rollenden Augen hatten sie die steigenden und sinkenden "Wolkenperlen" zu verfolgen.⁸⁰

Die Trennung vom wuchernden Beiwerk geschah wohl zu Recht. Steuern solche Zeitanzeigespiele doch nichts zum Zweck der kaiserlich chinesischen Hofastronomie bei, zu dem Zweck, dem auch die mechanisierten Himmelsmodelle seit alters gedient hatten: zur Erstellung des Kalenders für Kaiser und Reich.⁸¹

Schließlich trat um 1370 Chan Hsi-Yuan mit einem traditionellen und dennoch revolutionären Werk auf, das wohl auch im heutigen Sinne als eine Uhr benannt werden darf.⁸² Dieses Werk kam ohne Zeiteiler oder Gangregler aus, weil das Antriebsrad gleichmäßig rotierte, unter dem Gewicht des ebenmäßig in die Becher einlaufenden Sandes, das einer großen Sanduhr entströmte. Vom Sandrad wurde über ein Reduktionsgetriebe ein Zeiger vor einem Zifferblatt gedreht. Auch für diese Uhr war Figuren-Beiwerk vorgesehen, obwohl die zeitanzeigenden Funktionen doch von Zifferblatt und Zeiger übernommen worden waren.⁸³



Figur 9 – Chinesische Sanduhr ca. 1370 (Bildquelle: Needham, Anm. 83).

⁷⁸ Needham [Anm. 68], S. 505-506.

⁷⁹ *Ibid.*, S. 504-505 und 512.

⁸⁰ *Ibid.*, S. 505.

⁸¹ *Ibid.*, S. 477-479 und 487-504. J. Needham with the collaboration of Wang Ling, *Science and Civilisation in China*, vol. 3: *Mathematics and the Sciences of the Heavens and the Earth* (Cambridge, 1959), S. 361-362.

⁸² Needham [Anm. 68], S. 510-512.

⁸³ *Ibid.*, S. 511: Fig. 668, mit Erläuterung.

Mit der sandgetriebenen Uhr des späteren 14. Jahrhunderts lief die chinesische Tradition aus. Fruchtbare Neuansätze sind dann anscheinend nicht mehr aufgekommen. So konnten in China die Jesuitenmissionare des 16. und 17. Jahrhunderts mit europäischen Uhrwerken glänzen, denen auf chinesischer Seite nichts Vergleichbares gegenüberstand.⁸⁴

Abendländisch-chinesische Uhrwerk-Beziehungen

Zwischen der chinesischen Tradition einerseits und den Traditionen des abendländischen und muslimischen Uhrenbaus andererseits gab es auffällige Gemeinsamkeiten. Was bedeutet nun dieser gemeinsame westöstliche Besitz technischen Wissens für die Frage der Kontakte zwischen den Uhrenbauern und überhaupt den Technikern hüben und drüben?

Technologische Hauptsachen waren schon den alexandrinischen Mechanikern und Theoretikern und dem großen Archimedes geläufig; was ihnen bekannt war, mag nach Fernost überliefert worden sein, sofern es dort neu war und Aufnahme fand. Altes Wissen und Können dürfte hier wie dort weitergebildet und dann weitergereicht worden sein; was irgendwo vergessen wurde, konnte anderswo im Gedächtnis bewahrt bleiben, um später abgerufen zu werden.⁸⁵ Doch es geht jetzt nicht um derlei allgemeine Erwägungen. Über Details sei spekuliert:

Das Figuren-Beiwerk alexandrinischer Spielautomaten und Wasseruhren mag den chinesischen Mechanikern neu vorgekommen sein, falls sie davon Kunde erhielten, etwa durch byzantinische Gesandte, die 643 ins Reich der Mitte kamen.⁸⁶ Was die Chinesen dann aus einer byzantinischen Anregung gemacht haben könnten, mag Jahrhunderte später den Abendländern nachahmenswert erschienen sein: der Figurenumzug.⁸⁷ Ein Umzug zeitanzeigender Figuren auf einer horizontal montierten Scheibe wurde erstmals im frühen 8. Jahrhundert beschrieben und soll 692 der Kaiserin vorgeführt worden sein. Wie sich dem Bericht entnehmen läßt, vollbrachte die von einem Gehäuse umfaßte Scheibe in 24 Stunden eine Umdrehung, wobei sich zum rechten Zeitpunkt an der richtigen Stelle eine Tür öffnete und in der Öffnung eine Figur erschien. Vermutlich wurde dieser Zeitanzeiger durch eine clepsydra in Gang gehalten und gesteuert.⁸⁸

I-Hsing und Liang Ling-Tsan schmückten 725 ihr Werk mit zwei Figuren, die, allerdings ohne sich dabei vom Fleck zu rühren, zu den einzelnen Stunden und Viertelstunden ihren Schall zuwege brachten.⁸⁹ Ebensolche Figuren gab es dann auch in dem von Chan Ssu-Hsün 979 gebauten Werk, das mehr zu bieten hatte: Figuren

⁸⁴ *Ibid.*, S. 508-509 und 512-532.

⁸⁵ Wikander 1981 [Anm. 40], S. 102-103: Plädoyer für die Annahme eines lebhaften Technologietransfers zwischen dem Mittelmeerraum und China im Altertum.

⁸⁶ Needham [Anm. 68], S. 476.

⁸⁷ Combridge 1979 [Anm. 68], S. 606-607.

⁸⁸ Needham [Anm. 68], S. 469.

⁸⁹ *Ibid.*, S. 474.

zogen um und zeigten so die Zeit an.⁹⁰ Daß Su Sung 1090 und Kuo Shou-Ching um 1276 mit Figurenumzügen aufwarteten, ist bereits vermerkt worden.

Das chinesische Figuren-Beiwerk fand im Abendland seine Entsprechungen: Die Schauseite der großen Kirchenraum- oder Turmuhr wurde gern mit einem automatischen Figurenumzug belebt, und statt des Stundenschlägers aus Fleisch und Blut gab es bald eine Kunstfigur zu sehen, die mit ihrem Hammer die Stundenglocke der Uhr pünktlich anzuschlagen hatte. Solch Beiwerk ist erstmals für die Uhr der Domkirche zu Norwich dokumentiert: Wie der zuständige Sakristan in den Rechnungen der Jahre 1322, 1323 und 1325 durchblicken läßt, zog dort seinerzeit eine puppenhafte Klosterbrüderschar im Kreise um die Uhr und markierten 24 buntbemalte Figuren die Stunden des Tages und der Nacht, während 30 andere Figuren wohl die Monatstage bedeuteten. In der ersten Hälfte des 14. Jahrhunderts wurden auch die automatischen Stundenschläger gebräuchlich; sie werden dann in hellen Scharen nachweisbar.⁹¹

Chinesisch mutet auch die Schwere der von al-Murâdî im 11. Jahrhundert beschriebenen Konstruktion eines Spielwerks an: Türchen öffnen sich, dahinter werden Figuren sichtbar, im Verborgenen dreht sich ein Getriebe mit mächtigen Zahnrädern; und angetrieben wird das Räderwerk von einem großen Wasserrad.⁹²

Daß andererseits westliche Anregungen damals im chinesischen Uhrenbau wirksam wurden, ist der von Chan Hsi-Yuan um 1370 gebauten Sanduhr anzusehen, deren Zifferblatt und Zeiger doch wohl einer von europäischen Klosterbrüdern gestifteten Tradition entstammen.⁹³

Aber für den Gangregler der frühen europäischen Räderuhr gibt es in der chinesischen Uhrenbau-Tradition kein rechtes Gegenstück. Auch jener chinesische Zeiteiler war kein Gangregler. Doch falls unklare Kunde vom chinesischen Zeiteiler nach Europa gelangt-ist, zusammen mit der Nachricht, daß in China die Uhrenräder ebenmäßig umlaufen, könnte immerhin solch ein Gerüchteknäuel irgendeinen Mechaniker im Abendland auf die Idee gebracht haben, es lohne sich, über das Problem der Gangregelung nachzudenken. Sollte der Räderuhr-Gangregler wirklich am Ende eines von China her angeregten Gedankenganges gefunden oder erfunden worden sein, so dürfte hier einmal mit Recht eine *stimulus diffusion* behauptet werden.⁹⁴

⁹⁰ *Ibid.*, S. 469-470.

⁹¹ King [Anm. 51], S. 42. Lehr [Anm. 17], S. 394-395. K. Maurice, *Die deutsche Räderuhr. Zur Kunst und Technik des mechanischen Zeitmessers im deutschen Sprachraum*, 2 Bände (München, 1976), Bd. 1, S. 37-39: Über Figurenumzüge.

⁹² Hill 1981 [Anm. 18], S. 39-43. Freilich meint Hill auf S. 41-42, daß derartige Maschinen aus der arabischen in die chinesische Technik übernommen sein können.

⁹³ Needham [Anm. 68], S. 510-511 und 534. Needham denkt an selbständige Entwicklungen aus dem Zifferblatt der anaphorischen Uhr, in Europa sowie in China. Er übersieht, daß die anaphorische Uhr keinen Zeiger hatte, und überhaupt: daß das Astrolabzifferblatt nicht mit einem Zeiger die Zeit anzeigte, sondern durch das Zusammenwirken von Spinne und Tympanum.

⁹⁴ *Ibid.*, S. 476 und 534.

Summary

The author proposes to state a case for a tentative early history of the mechanical clock, along the following lines of reasoning: As the first monastic service was scheduled to begin within a specified time span before daybreak, all monastic communities stood in need of a chiming mechanism that was to be triggered by a timing device. A clepsydra was virtually the one available means to trigger the chimer at a preset time which, however, was apt to be missed as the viscosity of water fluctuates with the temperature. Therefore, an alternative timer was looked for, and was eventually found in a new chimer with an oscillatory chiming-beam: The beam was visualized as indexing time units whilst it was chiming the bell, and the two functions were then separated, and recombined in a tandem arrangement comprising the chimer itself and a duplicate. The oscillatory beam in the duplicate system was made to serve as a foliot. The author relates his proposal to a survey of documented efforts leading up to the creation of foliot-controlled clockwork, and considers some of the engineering traditions that may have been employed in the creative process.

*Valkenierlaan 34
3721 BM Bilthoven
The Netherlands*