

Uhrwerktechnik und Feinwerktechnik

(Chronométrophilia N° 66, Winter 2009)

Einleitung

Die *Räderuhr* ist der Urtyp der *Maschine* [1, Seite 14], des Dings, das den Menschen ersetzt. Nachdem er sie gebaut und in Gang gesetzt hat, läuft sie oft Monate lang. Dass sie hin und wieder aufgezogen werden muss, ist nur ein verbliebener Schönheitsfehler. Die Räderuhr erlangte bald nach ihrer Erfindung weite Verbreitung, so dass bereits mit ihr die Fertigung immer gleicher Produkte in grösseren Stückzahlen begann, was schliesslich zur heute üblichen Massenproduktion aller Gebrauchsgegenstände führte.

Die Uhrwerktechnik wurde lange Zeit "pragmatisch" betrieben. Ihre theoretische Behandlung begann erst gemeinsam mit der anderer Zweige des Maschinenbaus. Seit der wissenschaftlichen und industriellen Untergliederung des Maschinenbaus in Fachrichtungen und Sparten zählt die Uhrwerktechnik zur Feinwerktechnik [2]. Im folgenden Text soll dieser Bezug beleuchtet werden. Die Kenntnis der Uhrwerktechnik wird vorausgesetzt.

Es wird sich zeigen, dass viele technische Prinzipien, die erstmals in den Räderuhren angewendet wurden, allgemeine Gültigkeit haben und in anderen feinwerktechnischen Produkten oder gar in grösseren Maschinen ebenfalls vorkommen. In die Feinwerktechnik mündete auch der Bau von wissenschaftlichen - am Anfang astronomischen - Instrumenten. Diese in kleinen Stückzahlen angefertigten Instrumente stehen für feinwerktechnische Präzision, während die Produktion von mechanischem Spielzeug den Aspekt der massenhaften Fertigung einfacher Erzeugnisse schon früh in die Feinwerktechnik einbrachte. Die Räderuhr für den allgemeinen Gebrauch nimmt eine Mittelstellung ein, sie wurde in grossen Stückzahlen, also nicht zu teuer, gefertigt und ist dennoch relativ genau.

Die elektronische Technik verdrängt inzwischen mehr und mehr den mechanischen Anteil feinwerktechnischer Produkte, so auch in den Uhren. Das fördert die Faszination sowohl der stillen Liebhaber als auch der materiellen Sammler alter Uhren. Die einen bewundern und lieben diese Ur-Maschine, die anderen geniessen den Besitz eines immer rarer werdenden Gegenstandes. Im Unterschied zu den Uhrensammlern, die sich bei der Beschreibung ihrer Schätze dem Sprachgebrauch der Uhrenbranche stark verbunden fühlen, werden hier allgemeine oder allgemeine technische Begriffe vorgezogen. Insbesondere wird auf Begriffe verzichtet, die zum Verständnis der Funktion nicht nötig sind. Das betrifft vor allem Begriffe, die sich auf Fertigung und Montage (Arbeitsteilung) beziehen.

Zahnräder und deren Verzahnungsgeometrie

Zahnräder sind die kennzeichnenden, namensgebenden Teile der mechanischen Uhren beziehungsweise der Räderuhren. Es gab sie vorher schon, aber wahrscheinlich wurden Zahnräder aus Metall erstmals für Uhrwerke verwendet [3, Seite 319]. Sie gehören auch zu den meist verwendeten Maschinenelementen. Dennoch wird unter einem (Zahn-)Räderwerk oft einschränkend eine mechanische Uhr oder gar der von ihr symbolisierte Weltenlauf verstanden.

Die Zahnräder einer Uhr unterscheiden sich nur in der Zahn-Form ihrer Zähne von den im Maschinenbau überwiegend angewendeten Zahnrädern mit *Evolventenverzahnung*. Die Uhrwerksverzahnung ist eine Sonderform der *Zykloidenverzahnung*. In Uhrwerken überwiegt die Übersetzung ins Schnelle, d.h. dass jeweils das Ritzel getrieben (Trieb) ist. Die Zykloidenverzahnung hat bekanntlich den Vorteil, dass ein Trieb sehr wenig Zähne haben darf (≥ 6 , bei Evolventenverzahnung ≥ 13) bevor der Wirkungsgrad durch Reibung zwischen den Flanken zu klein wird. Der Mangel, dass Abstandsänderungen zwischen den beiden Rädern im bei industrieller Fertigung nicht vermeidbarem Mass zu erhöhter Reibung und gar Zerstörung der Flanken durch Schaben führen können, wurde durch Verbesserung der Zykloidenverzahnung zur Uhrwerksverzahnung beseitigt. Am meisten wird die *Schweizer Uhrwerksverzahnung NHS* [3, S. 319/20] angewendet. Erstaunlich ist, dass das fast von Anfang an gebrauchte *Spitzbogenprofil* dem heute verwendeten Zahnprofil stark ähnelt (Abb.1).

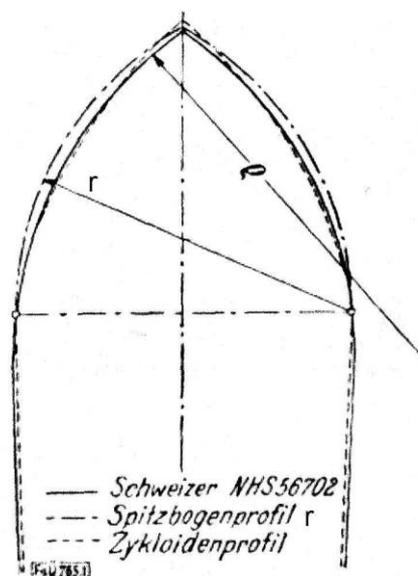


Abb.1 Zahnrad-Profile [3, Seite 319]
Spitzbogen, Zykloiden, NHS-56702

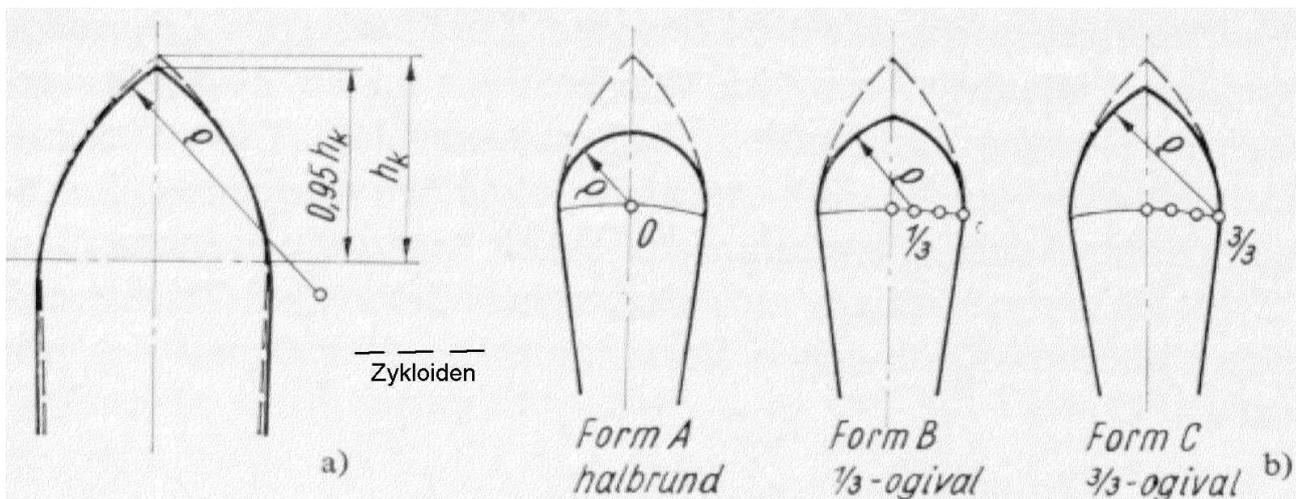


Abb.2 Schweizer Uhrwerkverzahnung [2, Seite 506]
a) am Zahnrad (NHS-56702), b) am Trieb ($z=6$ NHS-56703)

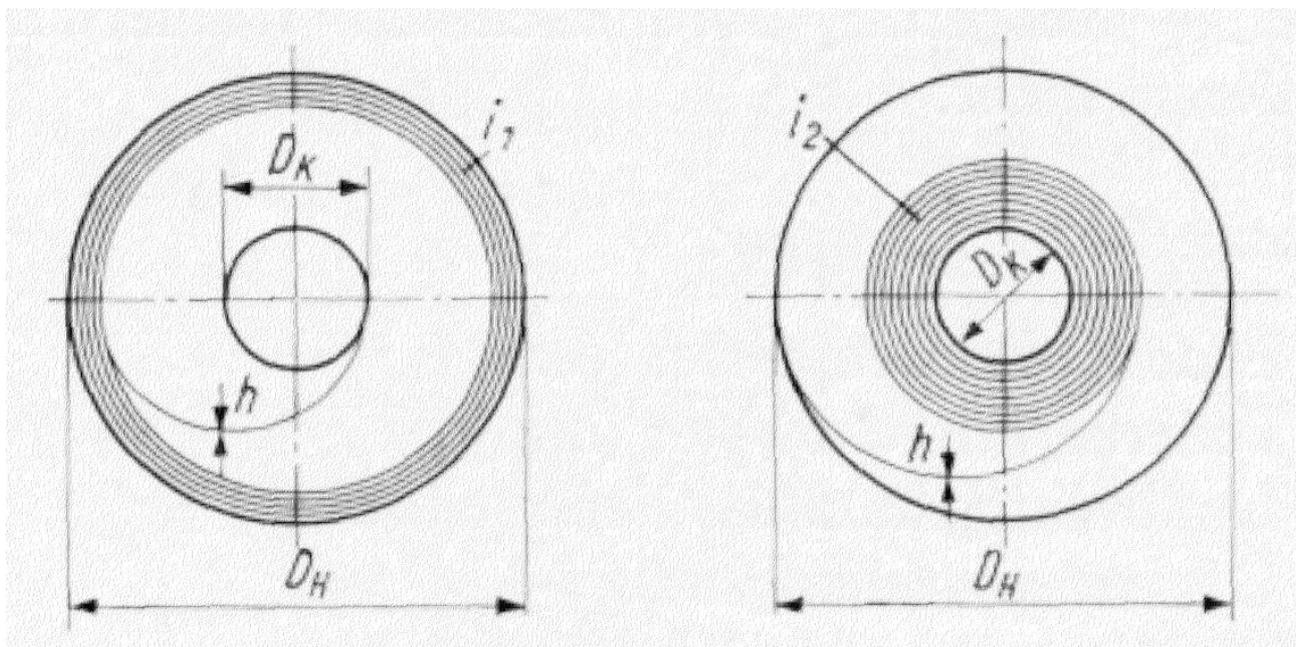


Abb.3 Feder-Antrieb [2, Seite 301]
links: abgelaufen; rechts: aufgezogen; D_H = Innendurchmesser des Federhauses

Bei NHS sind die Hypozykloiden am Zahnunterteil zu Geraden geworden (Gerade als Sonderform einer Hypozykloide), und die Epizykloiden oben wurden durch Kreise angenähert. Die Zahnspitzen wurden besonders bei den Trieben gekürzt, um den Wirkungsgrad zu verbessern (Abb.2). Da Uhrwerke infolge der *Hemmung* ohnehin nicht stetig drehen, ist die bei NHS-Rädern ungleichmässige Übersetzung im Kleinen (von Zahneingriff zu Zahneingriff) nicht störend.

Räder mit Uhrwerksverzahnung können nicht aus einem Satz vorrätiger Zahnräder beliebig gepaart werden. Das ist bei der Fertigung von grossen Mengen zueinander passender Räder für Uhren kein Nachteil, wird aber sonst in der Feinwerktechnik (ausser z.B. in den Uhrwerk-ähnlichen Zeitlaufwerken, in Anzeigemechanismen u.ä) und im allgemeinen Maschinenbau nicht hingegenommen.

Die im Begriff *Übersetzung* (und *Untersetzung*) enthaltene Logik ist bei Uhrwerken evident: Die Drehzahl des Triebes ist gegenüber der des Rades *überhöht*. (Beim Antrieb der Stundenwelle durch die Minutenwelle wird die Drehzahl *heruntergesetzt*.) Diese Logik ist im heute gebrauchten Norm-Begriff, der für beides angewendet wird, leider nicht mehr enthalten: Übersetzung = Drehzahl des treibenden Rades geteilt durch Drehzahl des getriebenen Rades.

Federn

Die Räderuhr braucht einen Antrieb. Dem anfänglichen Gewichts-Antrieb folgte später - zumindest in tragbaren Uhren - der Feder-Antrieb. Die häufige Mühe, die unten angekommenen Gewichte wieder hinaufziehen zu müssen, ist im Tätigkeits-Wort *aufziehen* einer Uhr noch enthalten, auch für das erneute Spannen der Antriebs-Feder.

Die Antriebsfeder ist eine Spirale (Abb.3). Weil sie der Uhr Zug gibt, an ihr zieht wie ein Antriebs-Gewicht, spricht man von der *Zugfeder*, das auch, um sie von der Unruh-Feder zu unterscheiden, die ebenfalls eine Spiral-Feder ist. Allgemein versteht man in der Feinwerktechnik und im Maschinenbau unter einer Zugfeder eine *Schraubenfeder*, die beim Spannen auseinander gezogen und deren Volumen dabei vergrößert wird. Die Uhren-Zugfeder hat nach dem Spannen ein kleineres Volumen als vorher. Ihr spiralig gewundenes Flachprofil wird beim Spannen gebogen, während der schraubenförmig gewickelte Draht einer üblichen Zugfeder auch leicht gebogen, aber federwirksam vorwiegend tordiert wird.

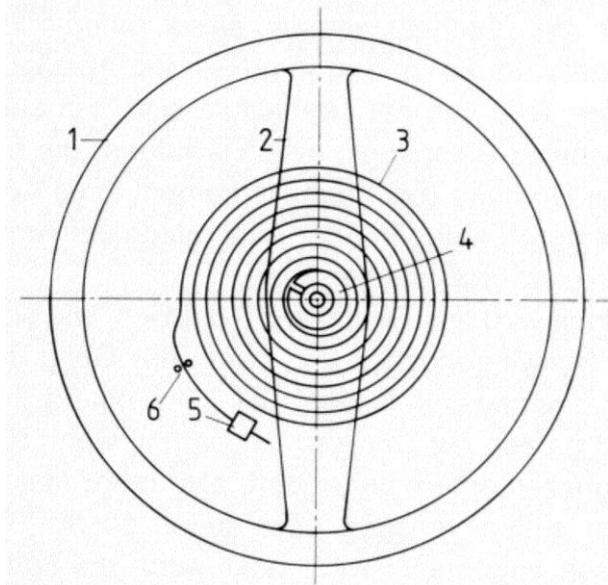


Abb.4 Unruh 1, 2 mit Spiralfeder 3 [5, Seite 33]
Justierung der wirksamen Federlänge mit Anschlag 6
(Spiralschlüssel)

Die Unruh ist zusammen mit ihrer Spiralfeder ein mechanischer Schwinger (Abb.4). Die *dynamische* Anwendung einer Feder, speziell einer Spiralfeder, ist weitestgehend auf mechanische Uhren beschränkt. Schwinger mit Federn kommen gelegentlich noch in springenden oder schaukelnden Spielzeugen vor. Stossfänger haben oft eine Feder. Es soll aber möglichst nur eine einzige Hin- und Herbewegung stattfinden.

Drehzahlregelung und Ablaufhemmung

Eine brauchbare Uhr ist entstanden, wenn es gelungen ist, die Zeiger in gleichförmige Drehung zu versetzen. Die nötige Energie liefert der langsam drehende Antrieb. Seine Geschwindigkeit wird mit mehreren Räderpaaren übersetzt, damit die Zeiger ausreichend schnell drehen. Es hat sich seit Beginn des Uhrenbaus erwiesen, dass es nicht einfach ist, eine Uhr zu bauen, die gleichmässig läuft. Der Anspruch an ihren Lauf ist hoch, den Massstab setzen die natürlichen "Zeitmacher", die Sonne und die anderen Himmelskörper, die extrem gleichmässig "laufen".

In der Feinwerktechnik werden *Fliehkraftbremsregler* zur Drehzahlregelung verwendet (z.B. im alten Telefon mit Wählscheibe, in Filmkameras mit Federantrieb u.ä., Abb.5). Man braucht einen überdimensionierten Antrieb, um eine Welle nicht nur anzutreiben, sondern zusätzlich über lange Zeit auf die Soll-drehzahl abzubremsen. Entscheidend ist aber, dass bei nachlassendem Antriebsmoment prinzipiell auch ein Drehzahlabfall stattfindet (Proportionalregelung). Versuche mit solchen Reglern in Uhren wurden schon frühzeitig ohne befriedigenden Erfolg unternommen. Man nannte solche Uhren *Drehpendeluhren* [4, Seite 160]. Das verwendete "Pendel" schlug unter der Fliehkraft aus, während es bei einer Pendeluhr hin- und herschwingt.

Schon bei der aller ersten Räderuhr mit *Waag* (Abb.6) wurde ein ganz anderes Prinzip angewendet, das offensichtlich nicht mehr zu übertreffen ist. Seit der Räderuhr mit *Waag* werden kleine periodische Bewegungen mit möglichst "naturgegebener", unveränderlicher Dauer gezählt. Bei den modernsten Uhren sind es die Schwingungen in einer atomaren Strahlung. Die Dauer zwischen einem Hin-, Zurück- und wieder Hinschlagen der *Waag* war noch nicht sehr konstant. Naturgegeben konstant ist die Eigenschwingung eines *Pendels* oder eines anderen mechanischen Schwingers, was etwa 300 Jahre später von *Galilei* und *Huygens* erkannt wurde und zum Ersatz der *Waag* durch das Pendel führte. Zusätzlich ist wichtig, dass die Ausschlagweite dieser neuen *Gangregler* keinen Einfluss auf die Schwingungsdauer hat, wofür der Begriff *Isochronismus* geprägt wurde.

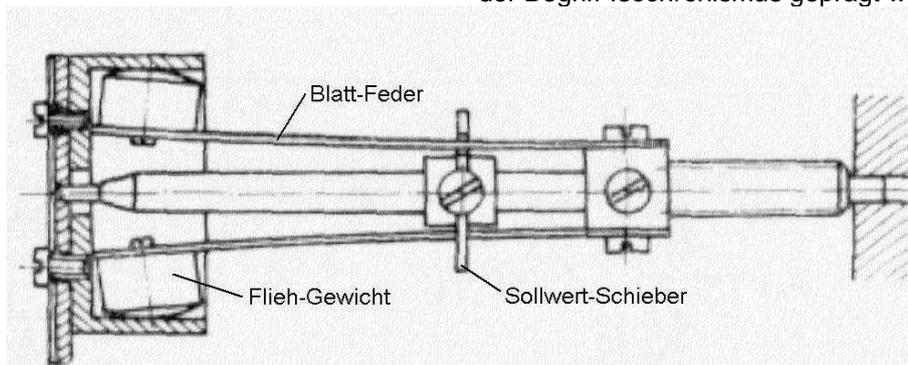


Abb.5 Fliehkraftbremsregler [2, Seite 777]
für Filmkameras mit Schieber für Sollwert-Verstellung, ohne Schieber für Telefonwählscheiben

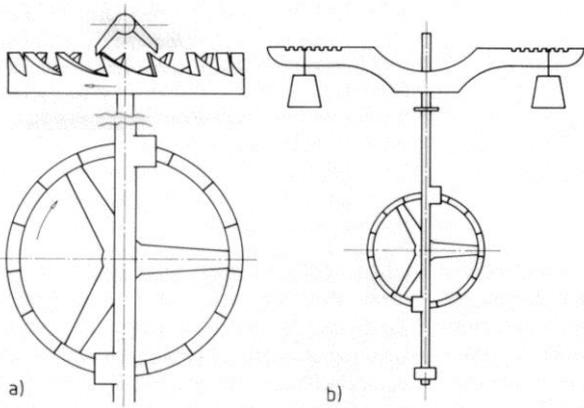


Abb.6 Hemmung mit Waag [5, Seite 38]

a) Hemmrad und Spindel mit 2 Lappen (Ansicht und Untersicht, oben); b) Gesamt-Ansicht mit Waag, oben

Der Begriff *Regler/Regelung* wird in der Umgangssprache sehr allgemein für einen zielgerichteten Eingriff in ein System benutzt. Vor bald einem Jahrhundert hat sich die Disziplin *Regelungstechnik* etabliert, dem eine Einschränkung im Gebrauch dieses Begriffes einherging. *Regeln* mit eingeschränkter Bedeutung ist nur ein Eingriff, der auf einer durch Messung festgestellten Abweichung zwischen Soll- und Istwert einer Größe erfolgt, in der Regel automatisch. Das ist bei einem Fliehkraftbremsregler (Abb.5) der Fall: Die Fliehkraft ist ein Mass für die Drehgeschwindigkeit; ist die Geschwindigkeit zu hoch, wird mit grösserer Kraft gebremst. Bei der Hemmung einer Räderuhr fehlt eine solche Rückkopplung.

Es kommt nur darauf an, das isochrone Verhalten von Pendel oder Federschwinger (*Unruh mit Feder*) möglichst wenig zu stören. Diese Gang-"Regler" müssen aber das Uhrwerk andauernd anhalten und wieder frei geben, ihnen muss wegen Verlust durch Reibung andauernd Energie zugeführt werden (Abb.7). Es bleibt somit eine minimale Störung. Die Stör-Vorgänge sind prinzipiell über längere

Betriebszeit verschieden, eine (Räder-)Uhr hat immer einen Fehler, wenn er auch noch so klein ist. Er ist aber deutlich kleiner als beim Versuch mit "echter" Regelung in Form einer Drehpendeluhr (s.o.).

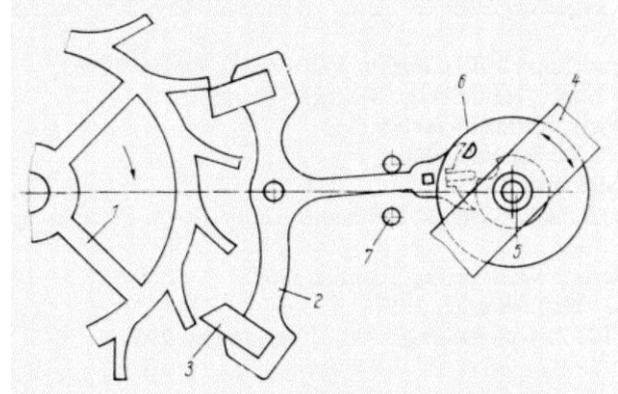


Abb.7 Schweizer Anker-Hemmung [2, Seite 789]

Der Anker 2 ist ein selbständiges Teil und nur zeitweise im Eingriff mit der Unruh (Speichen 4)

Im zusätzlichem *Schlagwerk* einer Räderuhr wird eine "echte" Regelung angewendet. Der jeweils kurze Lauf dieses Werkes wird mittels eines *Windfangs* (Abb.8) beeinflusst. Die Regelung ist mit Hilfe dieser durch die Luft gebremsten Windflügel nicht besonders gut. Das stört aber nicht, denn es ist vorwiegend wichtig, dass das Schlagwerk nicht zu schnell läuft.

Hemmungen ohne Eigenschwingungen (Waag) und mit Eigenschwingungen und Windfänge sind mit den Räderuhren entstanden und werden sonst kaum angewendet. In einem Standardwerk über feinwerktechnische Bauelemente sind nur Beispiele aus Uhren angeführt [2]. Spiralfedern und vor allem Zahnräder (aber nicht mit Uhrwerksverzahnung) sind hingegen verbreitet genutzte Maschinenelemente.

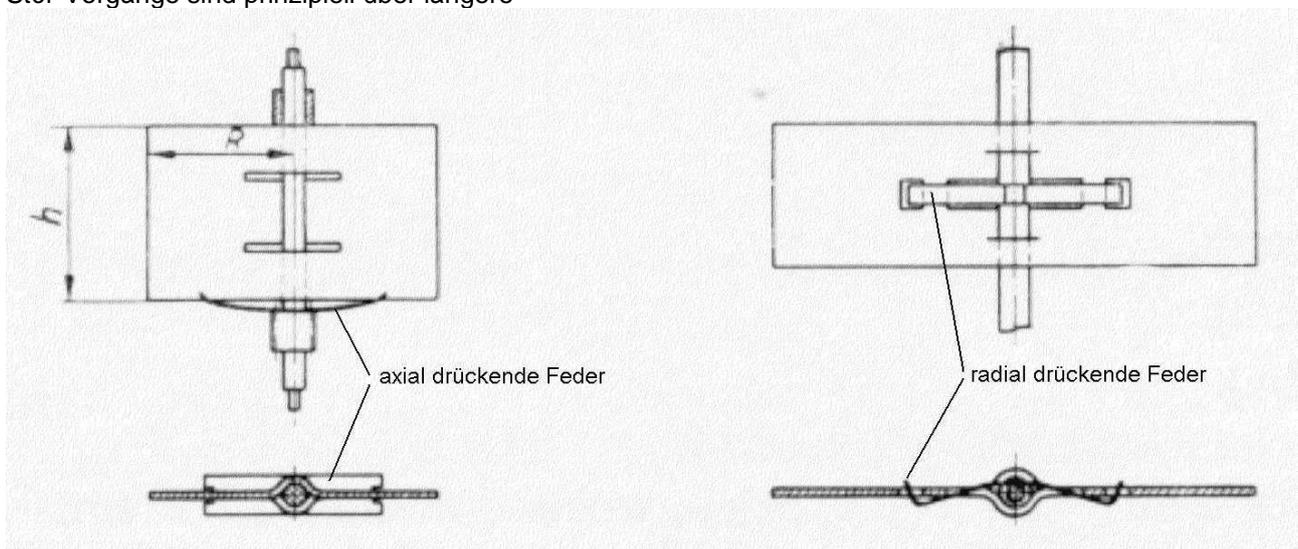


Abb.8 Windfang [2, Seite 779]

zwei Varianten; Reibungskupplung zwischen Flügel und Welle, die nach dem Uhrs Schlag abrupt angehalten wird

Literatur (Inklusive Bildnachweise)

- [1] E.M.Fürböck: *Gedanken über das Wesen der Räderuhr*, Schriften der "Freunde alter Uhren", 1977
[2] S.Hildebrand: *Feinmechanische Bauelemente*, Hanser 1965
[3] W.Trylinski: *Uhrwerkverzahnungen*, Feingerätetechnik, Juli 1954
[4] Bassermann-Jordan / Bertele: *Uhren*, Klinkhardt & Biermann 1961
[5] K.Menny: *Die Funktion der Uhr*, Callwey 1994

August 09
S.Wetzel, 3400 Burgdorf, Falkenweg 14,
s.wet@gmx.net, sWetzel.ch