

## Panta Rhei : Entwicklung in der Konstruktion von Getrieben

**Citation for published version (APA):**

Schlösser, W. M. J. (1965). Panta Rhei : Entwicklung in der Konstruktion von Getrieben. *Antriebstechnik*, 4(1), 14-18.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1965

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# Panta Rhei\*

## Entwicklung in der Konstruktion von Getrieben

Panta Rhei – Development in Gear Design

Panta Rhei – Développement dans la construction d'engrenages

Prof. Dr. ir. W. M. J. Schlösser, Eindhoven

Das Wasser eines Gießbaches fesselt unsere Aufmerksamkeit durch das ungestüme Dahinrauschen und die Unaufmerksamkeit, mit der es immer neue Wege findet, Wege, nach einem unbekanntem Ziel. Unten im Tal verlieren die Ströme, wenn sie in einem See zur Ruhe gekommen sind, ihre Selbständigkeit, das Wasser fließt dann als stattlicher Fluß weiter.

Die historische Entwicklung der verschiedenen Methoden, nach denen in Maschinen die Energie umgewandelt und übertragen wird, hat große Ähnlichkeit mit dem vorher geschilderten Naturphänomen. Nach grundverschiedenen Verfahren wird in Maschinen Energie umgeformt und übertragen; neue Verfahren entstehen und werden manchmal mit anderen Möglichkeiten kombiniert.

In einem Sammelbecken der Einsicht hebt sich dann dasjenige hervor, was die verschiedenen Verfahren gemeinsam haben, und in ein Bett geleitet, werden sie weitergetragen – in die Zukunft hinein.

Ich möchte den Inhalt der Lehre vom Antrieb vergleichen mit dem vorher in bildhafter Formulierung dargestellten Gang der Entwicklung und dabei einigen Strömen dem Wandel der Zeit entsprechend folgen, indem wir auf Übereinstimmungen und Unterschiede achten und auf auffällige Punkte am Ufer, um die Orientierung zu behalten. Schließlich hoffe ich, die Aussicht auf das Gebiet zu zeigen, wo alle Ströme sich vereinigt haben. Sollten dabei noch Nebel hängen bleiben, so werde ich mich schuldig fühlen, aber doch einigermaßen entschuldigt wegen der gebotenen Kürze der verfügbaren Zeit.

Die Lehre vom Antrieb ist das Resultat eines Studiums des Energiestroms in Maschinen. Diese Energie entspringt einer Energiequelle, z. B. einem Verbrennungsmotor; strömt darauf durch das Getriebe und erreicht schließlich beispielsweise eine Trommel mit der damit verbundenen Last einer Winde. Der Antrieb besteht also aus Energiequelle und Getriebe.

Zweck solcher Überlegungen ist es, genügende Voraussetzungen für eine sinnvolle Wahl geeigneter Antriebe und optimale Auslegung von Getrieben zu schaffen. Getriebe mit Zahnrädern, Riemen,

Ketten, Reibrädern, Pleuelstangen und Hebeln übertragen den Energiestrom mittels fester Stoffe. Derartige Getriebe bezeichnet man mit dem Sammelnamen: Mechanische Übertragung. Um den Anfang unserer Zeitrechnung herum waren diese Formen der mechanischen Übertragung schon bekannt [1].

Maschinen aus dieser Zeit besaßen nach unseren heutigen Vorstellungen nur eine geringe Krafftichte. Schwierigkeiten boten die reichlichen Spiele in den Verbindungselementen. Dadurch traten heftige Stöße auf, wenn die Drehrichtung umgekehrt wurde, oder wenn die Last während kurzer Zeit dem Antrieb vorauseilte. Holz erwies sich aber als besonders geeignet für den Bau solch primitiver Maschinen. Es ist elastisch und behebt große Spannungen stoßartiger Belastung. Außerdem stand Holz meist in genügender Menge zur Verfügung und es konnte mit einfachen metallenen Werkzeugen bearbeitet werden. Während Dutzender von Jahrhunderten wurde dann auch Holz für den Bau von Maschinen verwendet.

Zur Zeit der griechischen und römischen Kultur war der Mensch oder das Tier die am meisten gebrauchte, aber schwache Energiequelle. Ein Aufstand der Sklaven konnte die Energieversorgung ernstlich gefährden. Trotz in dieser Hinsicht wichtiger Ereignisse, wie des Sklavenkrieges unter der Führung des Spartakus, strebte man kaum danach, andere Naturkräfte mobil zu machen, um Menschen und Tiere zu entlasten. Die Naturkräfte gehörten nach Meinung vieler in den Bereich des Übersinnlichen. Anders war die Sachlage im 11. Jahrhundert, als die Sklaverei in Europa abgeschafft wurde. In großem Umfang machte man sich Wind- und Wasserenergie nutzbar.

Als Wilhelm der Eroberer die wirtschaftlichen Werte der von ihm eroberten Insel inventarisieren ließ, zählten die Verfasser des Domesday Book im Jahre 1086 in Großbritannien nicht weniger als 5624 Wassermühlen. In dem Jahrhundert davor gab es weniger als 100. Im XI. Jahrhundert mußte also, schon allein im Reiche der letzten Fürsten des Hauses Wessex, die durchschnittliche Bauzeit für eine neue Wassermühle eine Woche betragen haben. Aber der Konstrukteur dieser neuen Energiequellen verfügte nur über wenig mehr Einsichten als seine Vorgänger im Alter-

tum. Er hatte keine Ahnung von der Größe der Verluste in Getrieben. So wird Bruder John The Carpenter 1295 durch die Tatsache überrascht, daß seine neue Pferdewühle bei Dunstable vier Pferde zum Antrieb benötigt, während nach seiner Voraussage ein Pferd dafür genügt hätte [2]. In seinem Werk „De re metallica“ beschreibt Georg Bauer, besser bekannt als Georgius Agricola (1494–1555), viele aus Holz konstruierte Maschinen. Es zeigt sich, daß eine Vergrößerung des Energiestromes durch Vergrößerung der Krafftichte oder durch Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit verwirklicht wurde. Die Maschinen wurden daher immer größer.

Meisterwerke aus dieser Konstruktionschule sind die holländischen Windmühlen. Trotzdem erreicht der nutzbar gemachte Energiestrom der am meisten vorkommenden Polderwindmühlen durchschnittlich nur einen Wert von 15 Kilowatt, eine Leistung, die jetzt der kleine Volkswagenmotor ganz leicht liefert [3].

Simon Stevin († 1620) hat u. a. auch an der Verbesserung von Windmühlen gearbeitet. Seine Arbeiten als Mathematiker werden allgemein anerkannt, und seine Abhandlungen über Mechanik gelten als wissenschaftlich bedeutend. Der von ihm entwickelte, vom Wind getriebene Wagen erreichte die damals sensationelle Durchschnittsgeschwindigkeit von 40 Kilometer in der Stunde. Weniger bekannt sind seine Studien über die Verbesserung von Getrieben in Windmühlen. In diesem Werk sucht er nach dem Zusammenhang zwischen Windkräften auf die Mühlenflügel und den Wasserkräften auf die Schaufeln. Die Gedanken Stevins umfassen schon einen wichtigen Teil der Fragestellung in der Lehre der Antriebe. Das Getriebe stellt er zentral als Verbindungsglied zwischen Energiequelle und Last dar. Er strebte nach Verbesserung der Getriebe durch andere Gestaltung der Teile, ob schon er dabei nicht auf Holz als Konstruktionsmaterial verzichtete. Und so war es auch noch nach einem Jahrhundert. Jakob Leupold gab 1726 eine Übersicht über die mögliche Anwendung der verschiedenen Holzarten im Maschinenbau. Der Konstrukteur aus dem Anfang des XVIII. Jahrhunderts traf die Wahl des Materials an Hand einer Jahrhunderte alten Erfahrung.

So empfahl Leupold für die Herstellung von Spindeln und Zahnrädern eine besondere Art Eichenholz, und die metallenen Beschläge an den Enden hölzerner Stäbe, dort, wo die Verteilung der Belastung meistens sehr ungünstig ist, hält er für eine wichtige Erfindung. Die Warnung, die er dem Konstrukteur zukommen läßt, die Maschinen nicht unter dem eigenen Gewicht zusammenbrechen zu lassen (!), sagt viel über die Situation, in die das Holz als Baumaterial geraten ist.

Am Ende des XVII. Jahrhunderts glaubt Ludwig XIV. aus den Springbrunnen in den Gärten des Palastes in Versailles etwas Besonderes machen zu müssen. Er

\* Der vorliegende Beitrag ist ein Auszug aus einer Ansprache, die der Autor anlässlich seines Amtsantrittes an der Technischen Hochschule in Eindhoven (Holland) gehalten hat.

wollte mehr Wasser höher aufspritzen lassen als in irgendeinem anderen Garten. In technischer Sprache: Er wünschte, eine Pumpmaschine mit sehr großem Energiestrom zu bauen. Die Wahl fiel auf einen Plan von *Arnold de Ville*, und von 1681 bis 1688 wurde dieser Plan ausgeführt. Vergrößerung des Energiestromes durch die Vergrößerung der Kraftdichte war ausgeschlossen, da Holz als Konstruktionsmaterial verwendet wurde. Vergrößerung der Pumpmaschine war ebenfalls unmöglich, da sie dann vielleicht unter dem eigenen Gewicht zusammengebrochen wäre. Als einzig übrig bleibende Möglichkeit wählte der Konstrukteur eine Ausführungsform, bei der 221 durch 14 Wasserräder angetriebene Pumpen parallel arbeiteten, um das Wasser in ein Sammelbecken hinaufzuführen. Als die fertiggestellte Anlage in Betrieb gesetzt wurde, bewegten sich 2108 hölzerne Stäbe hin und her; sie hatten eine Gesamtlänge von 20 Kilometern. Die Nutzleistung betrug anfänglich 88 Kilowatt, verringerte sich aber durch Verschleiß bis auf 45 Kilowatt; der Wirkungsgrad der gesamten Anlage fiel dadurch von 10 auf 5%. Die Wasserkünste haben seinerzeit viel Kritik herausgefordert.

*Clement* nennt sie in seiner „*Historie de Colbert et de son administration*“ eine „*triste et dernière caprice d'une volonté trop absolue*“.

In seiner „*Course complet d'économie*“ schreibt *Say* 1829: „*un document de l'ignorance de cette époque*“.

Vielleicht kann man diese Konstruktion auch als das Resultat einer letzten Kraftanstrengung einer konstruktiven Schule ansehen, die in einer neuen Flutwelle von Energie versinkt. Das war am Anfang des XVIII. Jahrhunderts.

Das Aufkommen von Eisen als Konstruktionswerkstoff bahnt den Weg zur Vergrößerung der Kraftdichte. Dieser Weg wurde zuerst zögernd verfolgt. Die atmosphärische Dampfmaschine von *Thomas Newcomen* aus dem Jahre 1712 war noch in gemischter Bauweise aus Holz und Eisen konstruiert und hatte eine geringe Kraftdichte bei großen Abmessungen. Die doppelwirkende Dampfmaschine von *James Watt* aus dem Jahre 1782 bestand teilweise aus Eisen und besaß schon eine größere Kraftdichte bei kleineren Abmessungen. Wenn auch die hölzernen Maschinen mit zunehmendem Energiestrom immer größer wurden, so stellen wir hier doch eine merkwürdige Umkehr der Entwicklung fest.

Die Größe des von der Maschine beanspruchten Raumes nimmt pro Energieeinheit ab. Immer mehr Energie strömt durch eine verhältnismäßig immer geringere Menge Material. Es wird möglich, für den Antrieb von Schiffen und Fahrzeugen leichte Energiequellen mit genügender Leistung zu konstruieren. Bald fährt *Trevithick* denn auch 1804 mit seinem Dampfpostwagen und *Fulton* 1807 mit einem Dampfschiff auf dem Hudson.

Die Getriebe werden in derselben Zeit bedeutend verbessert. *Euler* schreibt 1760

seine mathematische Abhandlung über die Gestaltung von Zahnrädern. Im Jahre 1772 entwirft *Charles Varlo* das Kugellager, eine Erfindung, die den Wirkungsgrad von Getrieben durch Verringerung der Reibung zwischen untereinander beweglichen Teilen bedeutend verbessern sollte. *Brunel* verbessert 1800 die Riemenscheibe durch Verwendung der konvexen Lauffläche. Hierdurch verhindert man, daß der Riemen unerwünscht von der Riemenscheibe läuft. Über eine bedeutende Verbesserung des Kettenantriebes verfügt man im Jahre 1864 durch das Rollenkettenpatent *Slaters*, das 1880 noch von *Renold* ergänzt wird.

Die Achse mit quadratischem Querschnitt, ein Überbleibsel aus der Zeit der hölzernen Maschinen, wird durch die Achse mit rundem Querschnitt ersetzt. Am Ende des XIX. Jahrhunderts müssen *De Laval* und *Parsons* das Zahnradgetriebe verbessern, um das Anwendungsgebiet der von ihnen entwickelten Dampfturbinen zu erweitern. Die Energiequellen wie Dampfturbinen, Kolbendampfmaschinen und Kolbenmotoren bieten einen immer größeren Energiestrom an, und die Getriebe müssen diesem Energiestrom angepaßt werden.

Wird die Kraftdichte des Energiestromes in einem Getriebe vergrößert, so wird die gegenseitige Berührung der Maschinenteile ein Engpaß der Konstruktion. In ungünstigen Situationen tritt bei der Energieübertragung zwischen zwei Maschinenteilen Wärmeentwicklung auf, die Schweißvorgänge zwischen den Materialien zur Folge haben kann. Schwere Getriebeschäden sind meistens die unmittelbare Folge. Die Zahl der Maßnahmen, die bezüglich der Konstruktion getroffen werden, um diesen Schwierigkeiten aus dem Wege zu gehen, ist denn auch Legion: Selbsteinstellung in der Nähe des gefährlichen Kontaktpunktes, genaue Herstellung der vorgeschriebenen Abmessungen und Form der Teile, richtige Werkstoffkombinationen im Kontaktpunkt oder sogar die schnelle Auswechsellmöglichkeit beschädigter Teile gegen neue.

Unbemerkt sind während dieser Betrachtung die historischen Zeiten immer schneller verstrichen, und wir sind schon mitten in der Problematik des modernen konstruktiven Denkens angelangt.

Eine sprunghafte Vergrößerung der Kraftdichte bei bestimmten Lösungen mechanischer Kraftumsetzung erfolgt meistens durch einen fundamentalen Materialwechsel. Wir sahen schon die Folgen des Überganges von Holz zum Eisen als Konstruktionsmaterial.

Kürzlich noch erfuhr der Riemenantrieb eine bedeutende Vergrößerung der Kraftdichte. Die Kombination dünner Stahldrähte mit Kunststoffen zu einem Riemen geringer Abmessungen bahnte den Weg zu Möglichkeiten, die dem Lederriemen nicht gegeben waren.

Wie paßt nun die Entwicklung der Schmier-technik in diese Darlegung? Anfänglich fehlte bei hölzernen Werkzeugen die

Schmierung völlig. Wenn die Spiele allzu groß wurden, besserte ein Zimmermann die Abnutzung aus. Die Wärmeströme aus den Verlusten waren ja gering, weil der totale Energiestrom durch die Maschine nur klein war; Schmierung war deshalb noch nicht notwendig. Als man in späteren Jahrhunderten in hölzernen Maschinen pflanzliches Öl und tierisches Fett verwendete, geschah das nicht so sehr zur Erhöhung des Wirkungsgrades, als vielmehr um den Verschleiß zu reduzieren.

Für Getriebe mit metallenen Teilen wurde dagegen die Schmierung von größter Wichtigkeit. Seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts verfügte man dazu über Schmiermittel mineralischen Ursprungs. Mit Hilfe dieser Schmiermittel kann der Konstrukteur in den metallischen Berührungspunkten seiner Maschinenteile einen Flüssigkeitsfilm aufbauen. In diesem herrscht über ein Feld von größerer Ausdehnung ein hoher Druck (**Bild 1**).

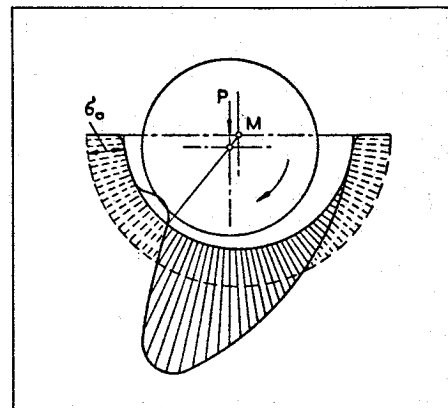
Durch dieses Druckfeld wird der wechselseitige Kontakt der Maschinenteile verhindert. Infolge der Verteilung der Kontaktkraft verhindert der Flüssigkeitsfilm extrem hohe Werte der Kraftdichte zwischen den Teilen, die beim Fehlen des Flüssigkeitsfilms stellenweise zu plastischer Verformung und zu Schweißvorgängen führen würden. Die mechanische Übertragung wird dadurch beim Streben nach größeren Energiedichten der Konstruktion in erfolgreicher Weise durch eine mikro-hydraulische Übertragung unterstützt und geschützt.

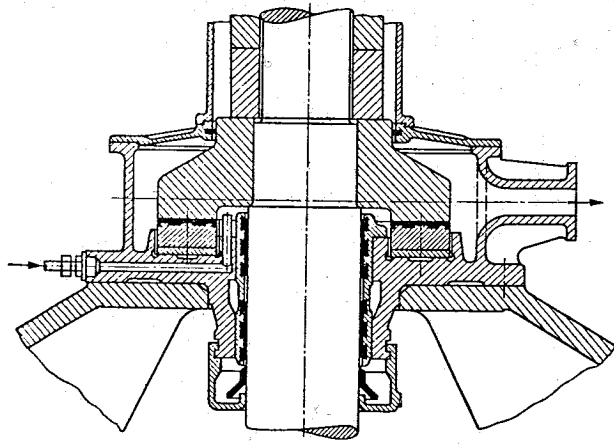
In dieser Weise betrachtet, wird die Art und Weise, wie der Druck in dem Flüssigkeitsfilm zustande kommt, weniger wichtig. Bei Gleitlagern macht man sich für die Erregung dieses Druckes die Viskosität einer Flüssigkeit nutzbar.

*Reynolds* schrieb 1886 darüber seine Theorie, und im Jahre 1905 entwarf *Michell* sein Axiallager, bei dem er auf klassische Weise diese Grundlage verwendete (**Bild 2**).

Zwischen Teilen mit einer rhythmisch wechselnden Belastung kann man die Dichte der Flüssigkeit und die daraus hervorgehenden Trägheitsvorgänge ausnutzen, um in Augenblicken von geringer Be-

**1: Druckverteilung im Flüssigkeitsfilm eines Gleitlagers** - Pressure intensity within liquid film of a slide bearing - Distribution de pression dans le film de liquide d'un palier lisse





2: Schnittbild von einem Michell-Lager – Sectional view of a Michell bearing – Coupe d'un roulement Michell

3: Druckverteilung an kämmenden Zahnflanken – Pressure intensity at contacting tooth profiles – Distribution de pression sur flancs des dents

lastung einen Flüssigkeitsfilm zu bilden. Bei Zunahme der Belastung wird dieser Flüssigkeitsfilm teilweise wieder weggepreßt, aber nicht, ohne daß hohe Drücke im Film entstehen. Die Schmierung beruht dann auf der Pufferwirkung der Flüssigkeit. Kurbelgetriebe können dank dieser Schmierungsweise mit großen Kraftdichten belastet werden. Die geringe Zusammenrückbarkeit einer Flüssigkeit ermöglicht es schließlich, das Druckfeld mittels einer Verdrängerpumpe in einfacher Weise zu bilden.

Bei Zahnradgetrieben kann man ebenfalls mikrohydraulische Kraftübertragung zwischen zwei zusammenarbeitenden Zahnflanken, wie **Bild 3** zeigt, feststellen. Dies ist auch der Fall zwischen den Reibrädern von Reibgetrieben. Trockene Reibung hat bei diesem Getriebe eine sehr kurze Lebensdauer zur Folge. Reichliche Schmierung erniedrigt aber drastisch den Reibungskoeffizienten und somit auch die Kraftdichte. Trotz aller Anstrengungen vieler Konstrukteure sind diese Getriebe deshalb bis jetzt nur für kleine Energieströme geeignet. Sogar eine Erhöhung des zulässigen Reibungskoeffizienten in der Größenordnung von  $10^3$  wird kaum imstande sein, den Rückstand der Reibgetriebe auszugleichen. Die Erreichung von Geschwindigkeitsgradienten und hohen Reibungskoeffizienten in nichtnewtonischen Flüssigkeiten von besonderer molekularer Konstruktion eröffnet der Forschung ein interessantes Gebiet. Der Schwerpunkt verschiebt sich dann aber merklich von der mechanischen Kräfteübertragung in der Richtung der mikrohydraulischen.

An diesem Punkt angelangt, möchte ich den Strom der mechanischen Übertragungen verlassen. Die Rolle, die die Flüssigkeiten von nun an spielen, hat einige Erfolgsaussicht. Suchen wir deshalb nach dem Ursprung und dem Wesen von Getrieben, bei denen Gase und Flüssigkeiten als Energieträger benutzt werden.

Schon 50 v. Chr. beschreibt *Hero aus Alexandrien* die pneumatische Übertragung. Es dauert aber bis zur ersten Hälfte des XIX. Jahrhunderts, bevor größere Ener-

gieströme in dieser Weise übertragen werden. Bei dieser Übertragung strömt die Energie buchstäblich durch Leitungen von der Energiequelle nach der Last. Soll der Energiestrom um eine Ecke geleitet werden, so kann dies in einfacher Weise geschehen, indem man die Leitung entsprechend gebogen verlegt.

Diese elegante Lösung hat viele Vorzüge im Vergleich zu Konstruktionen mit Zugstangen und Winkelhebeln oder mit Ketten und Seilen um Leiträder. Überdies bietet sich die Möglichkeit an, bei Maschinen, die nicht fortwährend in Betrieb sind, die Energie in einem Druckbehälter aufzuspeichern. Daneben erweist es sich auch als sehr einfach, den Energiestrom von der Quelle aus aufzuteilen und auf viele Stellen zu verteilen. Durch die große Elastizität der Leitungen pneumatischer Getriebe erfahren diese keine störenden Einflüsse mehr aus Formänderungen jener Maschinenteile, die sich zwischen Energiequelle und Last befinden. Bis dahin ungekannte Möglichkeiten sind nun dem Konstrukteur durch diese Vorzüge gegeben. Weiter ist verständlich, daß die große Sicherheit pneumatischer Getriebe in betreff Gasexplosionen deren Einführung in den Bergbau gefördert hat.

Der ökonomischste Arbeitsdruck für pneumatische Getriebe beträgt etwa  $6-8 \text{ kp/cm}^2$ . Diese Kraftdichte ist gering, und der Wirkungsgrad der Getriebe ist niedrig. Aus diesen Gründen kann das pneumatische Getriebe sich auf die Dauer für die Übertragung größerer Energieströme nicht behaupten. Das pneumatische System eignet sich besser für Regelkreise mit niedrigem Energieniveau oder für Automatisierung mit geringen Investitionskosten.

Erwähnenswert ist, daß Paris ein Verteilungsnetz für pneumatische Energie in Betrieb hat und erweitert. Die Anwendung sogenannter „lowcost automation“ wird dadurch sehr einladend. Die meisten Anschlüsse dienen jetzt noch zum Hinaufführen des Bieres nach den Büfetten der Bistros. Man darf hierin gleichfalls wohl ein Beispiel billiger Automatisierung sehen. Wahrscheinlich lag der größte Reiz der

pneumatischen Übertragung in der Möglichkeit der Fernübertragung von Energie und in der Einfachheit des Verteilungssystems. In dieser Hinsicht war aber der elektrische Energiestrom ein furchtbarer Mitbewerber.

Am Ende des XIX. Jahrhunderts kam die elektrische Energieverteilung zu großer Entfaltung. Im Jahre 1877 hielt *Siemens* einen Vortrag über die Übertragungsmöglichkeiten von Gleichstrom und Wechselstrom. Um 1882 herum dringt die elektrische Energieversorgung sogar in Kohlengruben durch.

Durch den mächtigen Aufschwung, den die elektrische Energieversorgung genommen hat, sieht man den Elektromotor immer mehr als eine Energiequelle denn als den motorischen Teil eines Getriebes. Nachdem die pneumatische Übertragung den Kampf schon verloren hatte, waren ihr niedriger Wirkungsgrad und ihre geringe Kraftdichte weitere Hindernisse, die ein „come back“ in großem Umfang vereitelten. Die mechanische Übertragung mit großer Kraftdichte bekam ihren Platz zwischen dem jetzt zur Energiequelle gewordenen Elektromotor und der Last. Dieser Platz bleibt der Pneumatik auch bis jetzt noch vorenthalten, wenn es sich um die Übertragung größerer Leistungen handelt. Bei den bisher besprochenen Übertragungen wurden feste Stoffe und Gase als Träger des Energiestromes benutzt. Bei den hydraulischen Übertragungen wird dazu eine Flüssigkeit verwendet.

Mit der pneumatischen Energieübertragung wurde in der Mitte des XIX. Jahrhunderts gleichzeitig auch die hydraulische Übertragung angewendet. Die geringe Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten gab der Hydraulik einen viel höheren Wirkungsgrad, während die Kraftdichte ein Mehrfaches der Kraftdichte der pneumatischen Übertragung betrug. Für die Übertragung der Verteilung von Energie war das hydraulische System sehr geeignet. Um 1875 herum ging man deshalb in Städten wie Hull und London zur Anlage hydraulischer Leitungsnetze über. Die Vorteile der buchstäblich strömenden Energie war unverkennbar. Es zeigte sich aber, daß am Ende des XIX. Jahrhunderts keine andere Form von Energie dem Sturm der elektrischen Energie gewachsen war. Ebenso wie die pneumatischen verschwanden auch die hydraulischen Energiezentralen bald wieder von der Bildfläche.

Zwischen dem mittlerweile zur Energiequelle promovierten Elektromotor und der Last war aber auf die Dauer nicht nur ausschließlich Platz für mechanische Kraftübertragungen. Die hydraulische Übertragung, die in Mikroausführung der mechanischen ausgezeichnete Dienste leistete, erschien in den Jahren zwischen 1930 und 1940 wieder auf der Bildfläche (**Bild 4**).

In den vorhergehenden Jahren hatte *Föttinger* die Dichte der Flüssigkeit benutzt, um ein Getriebe zu konstruieren, in dem Änderungen in der kinetischen Energie die wichtigste Rolle spielten. In den dreißiger

Jahren vervollkommnete Thoma das Getriebe, bei dem Änderungen im Flüssigkeitsdruck vorherrschen. Er benutzt die Druckfelder in Flüssigkeitsfilmen dermaßen wohlwiegend, daß die Teile des Getriebes nicht mehr durch mechanische Kräfte untereinander in der richtigen Stellung gehalten zu werden brauchen. Der Zeitpunkt ist erreicht, an dem die Maschinenteile durch hydraulische Druckfelder im Raum fixiert werden. Die Kraftdichte der hydraulischen Übertragung nimmt darauf in starkem Maße zu.

Wenn die Leckströme durch Spalte zwischen den Teilen bei Zunahme des Flüssigkeitsdruckes in unzulässiger Weise wachsen, ist es wieder ein Druckfeld, das den Durchfluß verringern kann. Die Gegenkopplung des Flüssigkeitsdruckes hilft nun bei der Erhaltung der hohen Wirkungsgrade solcher Getriebe.

Diese letzte Idee wurde 1902 schon Colbourne patentiert. Thoma wandte sie bei Kolbenpumpen an und Roth und Lauck bei Zahnrumpen. Molly wendet dieses Prinzip vollendet an bei der Konstruktion seiner Zahnrumpen mit radialer und axialer Druckkompensation.

Wie die Verwendung von Energieströmen mit großer Kraftdichte die Gestaltung von Maschinen beeinflußt, ist in diesem Rahmen schwer zu beschreiben. Eine kurze Erklärung erscheint aber angebracht. Wer mit einiger konstruktiver Phantasie begabt ist, wird gepackt, wenn er die Versuche Parrys studiert [4]. Dieser Forscher zergliederte die hydraulische Übertragung in dem Fortbewegungsmechanismus von Würmern und Springspinnen. Er zeigt uns, wie bei diesen Lebewesen durch Muskeln Druck in einer Flüssigkeit erzeugt wird, und diese Flüssigkeit die Energie zu den Fortbewegungsorganen leitet. Bei Insekten wurden dabei Drücke von 8 kp/cm<sup>2</sup> gemessen. Durch die allseitige Fortpflanzung des Druckes in einer Flüssigkeit können von der Natur beim Bau der Glieder von Insekten sehr verwickelte Formen verwendet werden. Hierdurch kann das Insekt in seiner Art optimal den Anforderungen, welche die Fortbewegung in einem „unwegsamem“ Gebiet stellt, angepaßt werden.

Dieser Antrieb bietet Möglichkeiten für die Konstruktion von Fahrzeugen, für die keine Wege notwendig sind. Auch der Konstrukteur alltäglicher Maschinen weiß aber, die größere Gestaltungsfreiheit zu schätzen. Im Jahre 1959 hatte ein Vortrag über das Wesen des hydraulischen Getriebes zugleich die Form einer Verteidigung der Daseinsberechtigung [5]. Damals wurde noch an einem Haus gebaut, über das die Meinungen ziemlich geteilt waren. Jetzt zweifelt, vielleicht einige historisch allzu belastete Personen nicht mitgerechnet, niemand mehr an der Daseinsberechtigung dieses Gedankengebäudes. Die Fundamente sind gelegt, die ersten Stockwerke sind bewohnt, und es steht wohl fest, daß diesem Gebäude noch viele neue folgen werden.

Die Umwandlung mechanischer Energie in hydraulische findet in mechanischen Pumpen statt. Der Arbeitsdruck dieser Pumpen liegt jetzt zwischen 100 und 200 kp/cm<sup>2</sup>. Die heutige Entwicklung ist aber auf Arbeitsdrücke zwischen 200 und 400 kp/cm<sup>2</sup> gerichtet. Um derartige Arbeitsdrücke zu ermöglichen, wird man die jetzt noch oft verwendeten Wälzlager durch hydraulische Druckfelder ersetzen müssen.

Die Verwendung von Gasturbinen als Energiequellen wird das Bedürfnis nach mechanischen Pumpen, die sich für sehr hohe Drehzahlen eignen, hervorrufen. Bis jetzt hat die Schneckenpumpe noch die besten Aussichten, den dann zu stellenden Anforderungen zu genügen.

Das immer größere Angebot elektrischer Energie macht für hydraulische Übertragungen die unmittelbare Umwandlung elektrischer Energie in hydraulische zur aktuellen Frage. Die dabei zu verwendenden elektrischen Pumpen werden vielleicht flüssige Metalle wie Rubidium, Natrium, Quecksilber, Lithium oder Kalium verpumpen. Einige von diesen flüssigen Metallen werden schon mit gutem Erfolg zur Erzeugung hydraulischer Druckfelder in Gleitlagern verwendet. Die Verstärkung schwacher elektrischer Regelsignale in hydraulischen Energieströmen von großer Leistung wird dann gleichfalls fundamental anders als jetzt geschehen.

Die Entwicklung des Verbrennungsmotors kann einer Beeinflussung durch die Hydraulik nicht entgehen. Der rotierende Verbrennungsmotor, von dem der Wankelmotor ein Beispiel ist, bietet die Möglichkeit zu einer sinnvollen Kombination mit einer mechanischen Pumpe. In der Schlußphase dieser Entwicklung wird ein rotierender Verbrennungsmotor ohne rotierende Welle zur Abgabe mechanischer Energie – aber mit zwei Flüssigkeitskanälen zum Ansaugen und Abführen von Flüssigkeit eines hydraulischen Energiestromes – zur Verfügung stehen (Bild 5). Dieses Projekt hat schon die Papierphase hinter sich.

Dem Vorteil der in hydraulischen Übertragungen in einfacher Weise zu erreichenden Vergrößerung der Kraftdichte steht die zunehmende Geräuschbelastung als Nachteil gegenüber. Darum erfährt das Studium der Druckveränderungen in der Flüssigkeit großes Interesse. Die Beseitigung dieser Druckveränderungen liefert dann ein geräuscharmes hydraulisches Getriebe vom Gleichstromtypus.

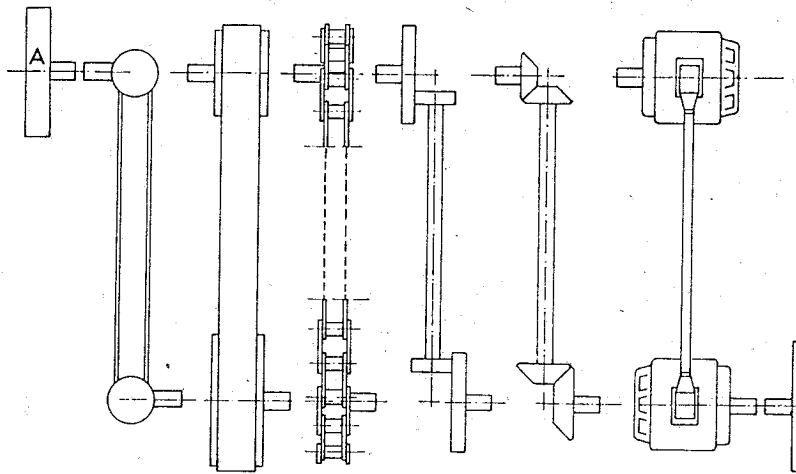
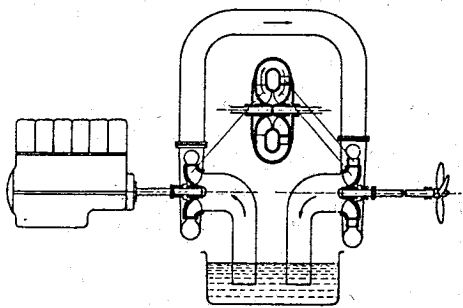
Auch hydraulische Wechselstromübertragung hat man mit Erfolg angewandt. Mit Hilfe dieser Übertragung können metallene oszillierende Stangensysteme bis zu Frequenzen von z. B. 30 Hertz ersetzt werden. Wichtig dabei ist, daß für die Beschleunigung einer Flüssigkeitssäule eine viel geringere Kraftdichte notwendig ist als für die Beschleunigung eines Stahlstabes, der dieselben Abmessungen hat. Die Flüssigkeitssäule kann dabei durch einen einfachen konstruktiven Kunstgriff an Steife dem Stahlstab gleich sein.

Durch Erhöhung der Frequenz der aufgedrückten Pulsation ist es schließlich möglich, hydraulische Energie mit Hilfe von Druckwellen durch eine stillstehende Flüssigkeitssäule zu übertragen. Das für die Steuerung benötigte Signal könnte man dann mit einer anderen Frequenz durch dieselbe Flüssigkeitssäule leiten. Hiermit haben wir aber im symbolischen Gebäude ein Stockwerk erreicht, welches noch voll auf im Bau ist.

Ich hoffe, daß es gelungen ist, die Folgen des Strebens nach größerer Kraftdichte in

5: Energieübertragungsmöglichkeiten – hydraulisch, mechanisch, elektrisch – Transmission of energy – hydraulic, mechanic, electric – Possibilités du transport d'énergie – hydraulique, mécanique, électrique

4: Anwendungsbeispiel hydraulischer Kraftübertragung – Application of hydraulic power transmission – Exemple d'application du transport de force motrice hydraulique



der Konstruktion von Getrieben zu zeigen. Die wichtige Rolle, die Flüssigkeiten dabei in mikro- und makro-hydraulischen Getrieben spielen, ist unverkennbar. Vielleicht stehen gerade diese Getriebe in der Betrachtung der Entwicklung sehr zentral. Ist es aber bei der Betrachtung eines Problems nicht oft so, daß durch einen geringen Standpunktwechsel des Betrachters die auffälligen Kriterien sich in bezug aufeinander verschieben und dadurch ein einfacher rhythmischer Zusammenhang hervortritt? Gerade die Entdeckung solcher Zusammenhänge führt häufig zu neuen Einsichten. Wenn die Einsicht wächst, werden viele Erfahrungen integrierbar, viele Mißerfolge verständlich, und das Wesentliche wird durch seine Einfachheit überraschend [6].

Die verschiedenen Ströme von Formen der Getriebe fangen an, Berührungspunkte

aufzuweisen. Die Analogie der in den Vordergrund tretenden Begriffe wird treffend [7]. Manchmal weiß man nicht mehr genau, in welchem Strombett eine bestimmte Entwicklung sich abspielt. Manchmal gibt eine Kombination verschiedener Arten von Übertragungssystemen die optimale Lösung eines Antriebsproblems. Sind dies die Vorzeichen der Tatsache, daß wir uns einem Sammelbecken nähern, aus dem der Strom der Lehre vom Antrieb als ein statlicher Fluß hervorgehoben wird?

Wie dem auch sei, welche Erkenntnisse man auch gewinnt, es wird doch der Augenblick kommen, wo man wieder das Gefühl hat, ein zu weitmaschiges Netz zu ziehen. Dies ist dann der immer wiederkehrende Moment, wo entweder die Ahnung der richtigen konstruktiven Lösung Rettung bringen soll, oder die demütige Erkenntnis seiner Unkenntnis zu neuer Untersuchung anregt.

#### Literatur

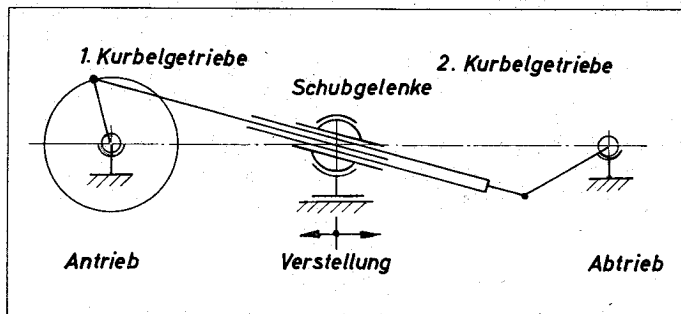
- [1] WESTCOTT, and H. P. SPRATT: Synopsis of historical events in mechanical and electrical engineering including energy conversion, transmission and storage, atomic energy, pumping, blowing, and compressing machinery, explosives and ordnance. Published for the Science Museum by Her Majesty's Stationery Office, 1960.
- [2] FORBES, R. J. and E. J. DIJKSTERHUIS: A history of science and technology, Pelican Book A 498 and A 499, 1963.
- [3] WESTENDORP, F.: Inleiding tot de Werktuigbouwkunde, Servire, Den Haag, 1949.
- [4] PARRY, D. A.: Spider Hydraulics, Endeavour, July 1960, No. 75, p. 156.
- [5] SCHLOSSER, W. M. J.: Hydraulische Werktuigen in de Techniek, Openbare Les, 23 oktober 1959, T. H. Delft, Uitgeverij Waltman, Delft.
- [6] WHYTE, L. L.: The next development in man, Mentor Book MD 327, The New American Library of World Literature Inc., New York, 1961.
- [7] SCHLOSSER, W. M. J. en W. F. T. C. OLDERAAN: Een analogontheorie van de aandrijvingen van de roterende beweging. Schip en Werf, 28 (1961), No. 13, blz. 389-395. De Ingenieur, 73 (1961), No. 26, blz. W 99-105; Hydraulic Power Transmission, 1962, No. 8; Oelhydrauliek und Pneumatik, 1961, No. 12; Antriebstechnik, 1963, Nr. 1.

## Stufenlos verstellbare Schaltwerksgetriebe

### Infinitely Variable Mechanisms

### Variateurs de vitesse réglables progressivement

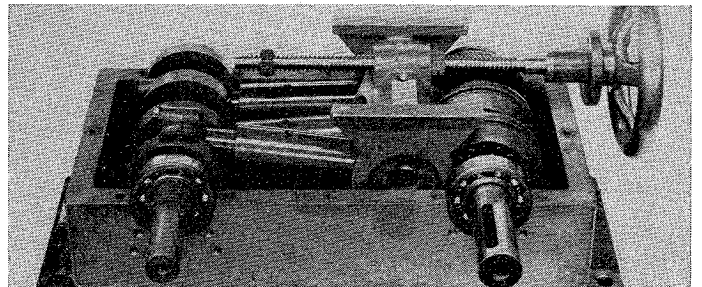
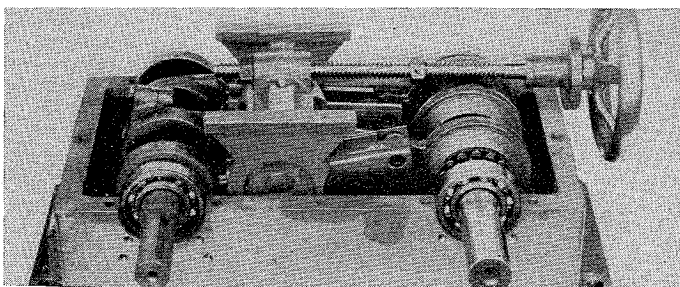
Dr.-Ing. K.-D. Schlums



1: Schematische Darstellung, die das Prinzip eines Gusa-Schaltwerksgetriebes zeigt - Simple diagram showing the principle for operating the Gusa change-over mechanism system - Représentation schématique qui montre clairement le principe de fonctionnement des variateurs de vitesse système Gusa

2a: Gusa-Schaltwerksgetriebe, Einstellung maximale Abtriebsdrehzahl - Gusa change-over gearing set to maximum output speed - Variateur de vitesse Gusa, réglage à la vitesse maxi à l'arbre secondaire

2b: (Rechts) Gusa-Schaltwerksgetriebe, Einstellung Abtriebsdrehzahl Null - Right: Gusa change-over gearing set to zero output speed - A droit: Variateur de vitesse Gusa, réglage à la vitesse zéro de l'arbre secondaire



In den Schaltwerksgetrieben werden zwischen An- und Abtrieb ungleichförmig übersetzende Übertragungsglieder verwendet. Dabei werden hauptsächlich erweiterte Kurbelgetriebe eingesetzt. Den Zwischengliedern ist ein Richtgesperre auf der Abtriebsseite nachgeschaltet, so daß die Drehbewegung nur in einer Richtung weitergeleitet wird. Mehrere Einzelgetriebe sind parallel jedoch in der Bewegungsphase versetzt geschaltet und übertragen auf eine gemeinsame Abtriebswelle. Das Einzelgetriebe überträgt die Drehbewegung nur in dem Bereich weitgehend gleichbleibender Abtriebswinkelgeschwindigkeit. Bei Geschwindigkeitsabfall bzw. Übergang zur Gegendrehung übernimmt das parallel und versetzt angeordnete Einzelgetriebe die Weiterdrehung der Abtriebswelle nach dem Überholprinzip.

Das Gusa-Schaltwerksgetriebe besteht aus zwei hintereinandergeschalteten Kurbelgetrieben. Das erste Kurbelgetriebe ist in der Bauform als schwingende, mittige Kurbelschleife ausgeführt (Bezeichnung vgl. AWF-VDMA-VDI-Getriebeheft 2) (Bild 1). Die umlaufende Kurbel der Antriebswelle bewegt die Koppel (Schubstange), die über das Schubgelenk die Schwingbewegung des Abtriebsgliedes des vorgeschalteten