

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 41 (1950)
Heft: 6

Artikel: Die hydraulische Energie und die Entwicklung der hydraulischen Maschinen
Autor: Dubs, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061240>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Die hydraulische Energie und die Entwicklung der hydraulischen Maschinen

Von Prof. R. Dubs, Zollikon

Abschiedsvorlesung, gehalten an der Eidgenössischen Technischen Hochschule am 23. Februar 1950

621.2

Der Verfasser beginnt mit einer Übersicht über die von der Sonne, der Quelle aller irdischen Energie, ausgestrahlte Leistung und Jahresarbeit, von der nur ein kleiner Teil technisch ausgenutzt wird. Im bewegten Wasser steht ein sich ständig erneuernder Energieträger zur Verfügung, von dem schon im Altertum Gebrauch gemacht wurde. Die Schweiz, als rohstoffarmes Land, schritt erst zur rationellen Verwertung der hydraulischen Energie, als die Industrialisierung einsetzte und grosse Energiemengen benötigt wurden.

Nach einem Überblick über die Entwicklung der Wasserräder und über die Entstehung der Wasserturbinen beschreibt der Verfasser durch Schilderung der markantesten Etappen den Anteil der Schweiz an deren Weiterentwicklung und Vervollkommen. Ein Ausblick in die künftigen Möglichkeiten und eine allgemeine Betrachtung über die Ausbildung des Maschineningenieurs beschliessen die Ausführungen des von seinem Amte zurücktretenden Hochschullehrers.

L'auteur donne tout d'abord un aperçu de la puissance rayonnée par le soleil, source de toute énergie terrestre, et du travail annuel, dont une très faible partie est techniquement utilisée. L'eau en mouvement est une source d'énergie sans cesse renouvelée, qui a été mise à profit depuis l'antiquité. La Suisse, pays pauvre en matières premières, n'a commencé à utiliser rationnellement l'énergie hydraulique que depuis son industrialisation, qui exigeait de grandes quantités d'énergie.

Après un bref rappel du développement des roues hydrauliques et des turbines, l'auteur passe en revue les étapes les plus marquantes de cette évolution en Suisse. Il termine son exposé en envisageant les possibilités futures et en considérant d'une manière générale l'éducation des ingénieurs-mécaniciens.

Einleitung

Als Urquelle der hydraulischen Energie muss die uns von der Sonne zugestrahlte Wärmeenergie betrachtet werden. Bei einer Oberflächentemperatur der Sonne von rund 6000 °C verliert die Sonne in der Sekunde etwa 4 Millionen Tonnen an Masse, was einer Leistung von rund $0,4 \cdot 10^{24}$ kW entspricht. Da ja Wärme und Arbeit sowie Masse und Energie gleichwertig sind, entspricht der Massenabnahme der Sonne eine Arbeit von $3,5 \cdot 10^{27}$ kWh oder $3,0 \cdot 10^{30}$ kcal, welche Wärmemenge die Sonne im Jahre in den Weltenraum hinaussendet. Von dieser gewaltigen Energiemenge trifft nur ein sehr kleiner Teil, nämlich $0,2 \cdot 10^{15}$ kW unseren Planetenraum, wobei bis zur Erdoberfläche wieder ein grosser Teil verloren geht. Man kann für die Erdoberfläche mit einer uns von der Sonne zukommenden Leistung von rund $60 \cdot 10^{12}$ kW rechnen, was einer Jahresarbeit von etwa $500 \cdot 10^{15}$ kWh oder einer Wärmemenge von rund $400 \cdot 10^{18}$ kcal entspricht. Dieser Energie verdanken wir das Leben auf unserer Erde. Die technische Verwertung der uns zugeflossenen Energie ist, wie man sich leicht überzeugen kann, verhältnismässig gering.

Entsprechend meinem speziellen Fachgebiet will ich hier nur über die von der Sonne auf der Erde erzeugten Wasserkräfte sprechen. Im Gegensatz zu den sich nicht stetig erneuernden Energieträgern, z. B. Kohle und Öl, stehen uns die Wasserkräfte im ewigen Kreislauf zur Verfügung, und sie dürfen deshalb wohl zu den wertvollsten Energieträgern gerechnet werden, solange es noch nicht möglich ist,

die durch die Kernspaltung erhaltene Nuklearenergie rationell in eine Form überzuführen, welche zum Segen der Menschheit Verwendung finden kann.

Die Leistung der gesamten Flusswasserkräfte auf der Erde bei Niederwasser, d. h. bei kleinster Wasserführung, kann auf rund $400 \cdot 10^6$ kW geschätzt werden, wobei ihre Verteilung über die Erde etwa die folgende ist:

Afrika rund $160 \cdot 10^6$ kW, wobei allein auf den Kongo rund $100 \cdot 10^6$ kW entfallen
 Amerika rund $100 \cdot 10^6$ kW
 Europa rund $45 \cdot 10^6$ kW
 Asien rund $90 \cdot 10^6$ kW
 Australien rund $5 \cdot 10^6$ kW

Von dieser totalen Leistung von rund $400 \cdot 10^6$ kW sind bis 1946 nur rund $60 \cdot 10^6$ kW ausgenutzt worden. Dies entspricht einer Jahresarbeit von rund $200 \cdot 10^9$ kWh bei einer Ausnutzungsdauer von rund 3500 Stunden im Jahr (total hat das Jahr 8760 Stunden), d. h. rund 9,6 Stunden im Tag. Wenn alle Wasserkräfte der Erde ausgenutzt wären, so könnte bei einer Betriebszeit von 3500 h im Jahr (9,6 h im Tag) eine Jahresarbeit von $1400 \cdot 10^9$ kWh gewonnen werden. Die Wasserkräfte der Erde sind somit bis 1946 nur zu rund 15 % ausgenutzt worden. Ende 1948 betrug die Ausnutzung rund $285 \cdot 10^9$ kWh.

Als weitere hydraulische Energiequellen, die in den genannten Zahlen nicht enthalten sind, können die Gezeiten (Ebbe und Flut), sowie der Wellenschlag an den Küsten betrachtet werden. Es bieten sich jedoch noch andere Möglichkeiten für die Gewinnung, d. h. Ausnutzung von hydraulischer Ener-

gie, wobei vorläufig mehr des wissenschaftlichen Interesses wegen folgendes fast phantastisch anmutende Projekt des Kraftwerkes Gibraltar erwähnt werden soll. Im Mittelmeer verdunsten jährlich etwa 4000 km^3 Wasser, von denen nur rund 1000 km^3 durch die ins Mittelmeer fliessenden Ströme ersetzt werden. Das Manko von rund 3000 km^3 wird durch den Zufluss aus dem atlantischen Ozean durch die Meerenge von Gibraltar ersetzt. Würde man diesen Zufluss sperren, so würde der Wasserspiegel im Mittelmeer jährlich um etwa 1,6 m fallen. Wenn es möglich wäre, die Höhendifferenz zwischen dem atlantischen Ozean und dem Mittelmeer auf 200 m fallen zu lassen, so erhielte man bei einem Zufluss von $90\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ im Kraftwerk Gibraltar eine Leistung von rund $150 \cdot 10^6 \text{ kW}$ (Zahlen aus «Betrachtungen über die Weltenergieerzeugung» von Robert Durrer, Heft 51 der Kultur- und Staatswissenschaftlichen Schriften der ETH).

Wenn man den Kreis der Wasserkräfte enger zieht und nur die Schweiz betrachtet, so ist zu sagen, dass die Sonne beim höchsten Stand in 15 Minuten soviel Energie auf unser Land strahlen lässt, als heute die Jahresproduktion aller unserer Kraftwerke, die etwas über 10 Milliarden kWh beträgt, ausmacht. Durch einen weiteren Ausbau unserer Wasserkräfte liesse sich, mit guter Wirtschaftlichkeit, eine Jahresarbeit von 27 Milliarden kWh erzeugen. Es dürfte zweifellos sein, dass gerade für die Schweiz, welche als Energieträger nur diese «weisse Kohle» besitzt, die rationelle Ausnützung ihrer Wasserkräfte von grösster politischer und wirtschaftlicher Bedeutung ist. Von politischer Bedeutung, weil dadurch unsere Abhängigkeit vom Auslande wesentlich vermindert werden kann (man denke z. B. nur an den Bahnbetrieb) und von wirtschaftlicher Bedeutung, weil die elektrische Energie für uns ein wichtiger Exportartikel sein könnte, der vom Auslande begehrt ist.

Ich will nun auf die Ausnützung der hydraulischen Energie übergehen.

In Form von Wasserrädern und Schöpfrädern waren hydraulische Maschinen schon mehr als 200 Jahre vor Christi Geburt in Asien bekannt. Nach Afrika (Ägypten) und Europa (Balkan, Italien und Spanien) gelangten diese Maschinen etwas später. Das Bedürfnis nach Bewässerung und damit Fruchtbarmachung von ebenen Gebieten war der Grund zur Schaffung von Einrichtungen (Zisternen mit Kübeln, Schöpfrädern, Wasserschnellen usw.), mit deren Hilfe es möglich war, das Grundwasser auf die Erdoberfläche zu heben. Der Antrieb dieser Einrichtungen erfolgte vorerst durch menschliche Kraft (Seilzug, Treträder), die später durch die tierische Kraft (Ochse, Esel oder Pferd am Göppel) abgelöst wurde. Auch der Antrieb von Mühlen erfolgte zu jener Zeit grundsätzlich in gleicher Weise, wobei sich jedoch im Laufe der Generationen und mit der Entwicklung der Menschheit immer mehr das Bedürfnis ergab, die menschliche und tierische Kraft durch eine stärkere zu ersetzen. Ein solcher Ersatz scheint, in Form der Ausnützung der Wasserkraft, in Europa zur Zeit Julius Cäsars (100...44

v. Chr.) zuerst gefunden worden zu sein, denn der folgende poetische Erguss eines gewissen Antipater (Zeitgenosse des Cicero, 106...43 v. Chr.) kann doch wohl in diesem Sinne gedeutet werden:

«Höret auf, euch zu bemühen, ihr Mädchen, die ihr in den Mühlen arbeitet, jetzt schlaft und lasst die Vögel der Morgenröte entgegen singen; denn Ceres hat den Najaden befohlen, eure Arbeit zu verrichten; diese gehorchen, werfen sich auf die Räder, treiben mächtig die Wellen und durch diese die schwere Mühle.»

Sicher ist, dass zur Zeit von Augustus (65 v. Chr. bis 14 nach Chr.) schon Wasserräder zum Antrieb von Wasserhebeeinrichtungen benützt wurden, wie sich aus Beschreibungen von Titruv (unterschlächtiges Wasserrad) und Belisar (Schiffsmühle) ergibt. Um 380 n. Chr. findet man unter- und ober-schlächtige Wasserräder in Frankreich, Deutschland und Böhmen, und zu jener Zeit dürften auch in der Schweiz die ersten Wasserräder zur Verwendung gekommen sein. Interessant ist, nachdem das Problem der Ausnützung der Gezeiten in unserer Zeit wieder aktuell geworden ist, dass schon um das Jahr 1044 in Venedig Wasserräder zur Ausnützung von Ebbe und Flut zur Anwendung kamen. Die Konstruktion der ersten Wasserräder geschah rein handwerksmässig und oft auf Grund sehr primitiver Vorstellungen über die Wirkungsweise der dem Wasser innewohnenden Kräfte. Als wohl erste versuchten *Leonardo da Vinci* (1452...1519) sowie *Galileo Galilei* (1564 bis 1642) und der französische Mathematiker *Descartes* (1569...1650) konstruktive Verbesserungen zu finden, sowie eine Theorie für die Berechnung und Konstruktion der Wasserräder aufzustellen und Regeln für die Dimensionierung dieser Maschinen abzuleiten, ohne dass jedoch diese Bemühungen in der ausübenden Praxis irgendwelche Früchte trugen. Von dem französischen Mathematiker *Parent* erschien 1704 eine Abhandlung über die günstigste Umfangsgeschwindigkeit eines Wasserrades, die jedoch auf unrichtigen Voraussetzungen beruhte, während *Deparcieux* im Jahre 1753 nachwies, dass — unter sonst gleichen Verhältnissen — ein ober-schlächtiges Wasserrad besser sei als ein unterschlächtiges. Zu jener Zeit begann man auch schon mit der Durchführung von experimentellen Untersuchungen an ausgeführten Wasserrädern, wie die im Jahre 1759 von *Smeaton* und *Bossut* veröffentlichten Ergebnisse beweisen. Eine richtige Theorie über die günstigste Umfangsgeschwindigkeit des Wasserrades wurde 1766 von *Borda* bekanntgegeben, während es bis 1825 dauerte, bis vom französischen Artilleriekapitän *Jean Victor Poncelet* (1788...1867) die Konsequenzen aus der Theorie gezogen und ein Wasserrad mit stetig gekrümmten Schaufeln vorgeschlagen und ausgeführt wurde. Das Poncelet-Wasserrad, welches die erste vollständig richtige Konstruktion war, wurde dann in der Folge sehr viel, hauptsächlich in England, ausgeführt, und in den Jahren 1828...1829 wurden von *Morin* umfangreiche Versuche mit diesem Wasserrad durchgeführt. Im Jahre 1846 erschien dann von *Redtenbacher* das erste zusammenfassende Werk «Über Theorie und

Bau der Wasserräder», und es begann damit eine fruchtbare Periode der Entwicklung der Wasserräder, die auch durch die Veröffentlichungen von *Weisbach* eine Förderung erfuhren. Das neunzehnte Jahrhundert kann als das Jahrhundert der Entwicklung des Wasserrades zur Wasserturbine bezeichnet werden, wobei die Schweiz auf diese Entwicklung sehr starken Einfluss ausgeübt hat, der nun besprochen werden soll.

Die Wasserräder und Turbinen in der Schweiz

Wie bereits erwähnt, dürften die Wasserräder in der Schweiz zur gleichen Zeit wie in Deutschland (380 n. Chr.) und Frankreich bekannt geworden sein, wobei ihre Herstellung rein handwerksmässig erfolgte und die Räder zur Hauptsache zum Antrieb von Getreidemühlen und später auch von Walkmühlen (zum Walken von Stoffen) dienten. Das Bedürfnis zur Hebung von Wasser nur für Bewässerungszwecke war in der Schweiz infolge der Oberflächengestalt und des Klimas, wie infolge der hydrologischen Verhältnisse kaum vorhanden, so dass die Wasserräder auf diesem Gebiet keine Anwendung fanden. Je nach den örtlichen Verhältnissen und den vorliegenden Bedürfnissen kamen unterschlächtige Wasserräder (sehr kleine Gefälle), mittelschlächtige (mittlere Gefälle) oder overschlächtige (höhere Gefälle) zur Verwendung, wobei jedoch das höchste ausgenützte Gefälle 15 Meter nicht überschritten haben dürfte. Für die Ausnützung von höheren Gefällen und grösseren Wassermengen, als dies mit einem Wasserrad möglich ist, war wohl das Bedürfnis kaum vorhanden, denn die Bevölkerungsdichte der damaligen Schweiz war noch so klein, dass die primitiven Einrichtungen zur Existenzsicherung der Bevölkerung vollständig genügten.

Der Anstoss zum Bau einer Wasserkraftmaschine, in welcher die dem Wasser innewohnende Energie in anderer Weise ausgenutzt wird als mit einem Wasserrad, dürfte wohl der bekannte Basler Mathematiker *Daniel Bernoulli* (1700...1782) gegeben haben, der im Jahre 1738 die erste richtige Theorie der Reaktionswirkung des aus einer Öffnung fliesenden Wasserstrahles bekanntgab (siehe «Hydrodynamica» von Daniel Bernoulli, erschienen bei «Johannis Reinholdi Dulseckeri, 1738, Basilea»). Die praktische Verwertung der von Bernoulli aufgestellten Theorie erfolgte wohl zuerst durch *Segner* in Göttingen, der im Jahre 1750 ein Wasserrad konstruierte, in welchem die von Bernoulli formulierte Reaktionswirkung ausgenutzt wurde. Das Segnersche Wasserrad veranlasste dann den grossen Basler Mathematiker *Leonhard Euler* (1707...1783) zu drei grundlegenden Abhandlungen über die Theorie der hydraulischen Maschinen (erschienen 1750, 1751 und 1754, herausgegeben von der Berliner Akademie der Wissenschaften), von denen sich eine mit dem Titel «Recherches sur l'effet d'une machine hydraulique, proposée par Mr. Segner» insbesondere mit dem Segnerschen Wasserrad beschäftigt. L. Euler schlägt dabei eine Verbesserung der Konstruktion von Segner durch eine spezielle Lage und Richtung der Zuleitung des Betriebswassers zum Rade

vor und ist damit zum Schöpfer des Leitapparates der heutigen Turbine geworden, ohne den die heutige gute Wirkungsweise der Wasserturbine undenkbar wäre. Die auf L. Euler zurückzuführende Turbinentheorie ist auch heute noch, in den weitaus meisten Fällen, die Grundlage der Berechnung der hydraulischen Maschinen. Trotz der von Bernoulli und Euler schon um die Mitte des 18. Jahrhunderts für die Berechnung der hydraulischen Maschinen geschaffenen theoretischen Grundlagen fanden diese zunächst keine praktische Anwendung, und die Berechnung und Konstruktion der Wasserräder geschah weiter rein handwerksmässig. Im Jahre 1824 schlug der Franzose *Burdin* als erster ein Wasserrad mit einem Leitapparat vor, und der Name «Turbine» tauchte damals für diese hydraulische Maschine zum ersten Male auf. Während jedoch Burdin mit seiner Konstruktion noch keine besondere Anerkennung fand, gelang es einem seiner Schüler, dem französischen Ingenieur *Fourneyron*, im Jahre 1827 eine Lösung des Problems zu finden, für die er 1833 den von der französischen Akademie der Wissenschaften ausgesetzten Preis von Fr. 6000.— zuerkannt erhielt. Die Fourneyron-Turbine war eine reine Radialturbine mit zentrifugaler Wasserströmung und kann als die erste rationelle Turbine bezeichnet werden. Obwohl sie in der Folge mit sehr gutem Erfolg für die verschiedensten Konstruktionsdaten zur Ausführung kam, gelang es ihr doch während langer Zeit nicht, das Wasserrad, das inzwischen auch wesentlich verbessert worden war, zu verdrängen. Als weitere Stufe in der Entwicklung der Wasserturbine kann die im Jahre 1837 von *Henschel und Sohn* in Cassel vorgeschlagene, später unter dem Namen Henschel-Jonval-Turbine bekanntgewordene Wasserkraftmaschine mit rein axialem Durchfluss bezeichnet werden. Es folgten dann später weitere Konstruktionen des französischen Ingenieurs *Girard* (um 1850) und der Amerikaner *Howd* und *Swain*, die von Francis in seinem klassischen Werk beschrieben worden sind. Die schweizerischen Maschinenfabriken begannen sich nun für die neue hydraulische Maschine zu interessieren, und damit setzte die Mitarbeit der Schweiz an der konstruktiven Entwicklung der Wasserräder und Turbinen ein. Es sei jedoch vorweggenommen, dass die Forschung und Entwicklung der hydraulischen Maschinen in der Schweiz fast ausnahmslos nicht das Werk Einzelner war und ist, sondern dass die erzielten Fortschritte zum weitaus grössten Teil auf harmonische Zusammenarbeit zurückzuführen sind. Das bereits erwähnte Wasserrad von Poncelet wurde in seiner guten Wirkungsweise durch das Zuppinger-Wasserrad (*W. Zuppinger*, ehemaliger Direktor der Mühlenbauabteilung der Firma Escher Wyss in Zürich) nicht nur erreicht, sondern z. T. übertroffen. Da jedoch die Wasserräder in ihrer Leistungsfähigkeit begrenzt waren und sich immer mehr das Bedürfnis nach grösseren Leistungen einstellte, wurde die Entwicklung der Jonval- und der Girardturbine gefördert, und es gelang, ihre Leistungsfähigkeit ganz wesentlich zu vergrössern (Mehrkranturbinen usw.). Einen weiteren wesent-

lichen Fortschritt brachte dann allerdings erst die bereits erwähnte Turbine von Howd (reine Radialturbine), mit welcher nach dem Vorschlag von Swain, später durch meridionale Umlenkung im Laufrad, bei gleicher Leistung eine wesentliche Steigerung der Drehzahl ermöglicht wurde. Diese Konstruktion ist im Jahre 1865 von *J. Francis* zum ersten Male systematisch experimentell untersucht worden und die Veröffentlichung der Ergebnisse, verbunden mit Verbesserungsvorschlägen, hat bewirkt, dass die Turbine später als Francisturbine bezeichnet wurde. Es ist hier ähnlich gegangen, wie bei der Entdeckung von Amerika durch Christoph Columbus. Das entdeckte Land wurde auch nicht nach ihm bezeichnet (mit Ausnahme eines Staates Columbien), sondern nach dem genuesischen Forscher Amerigo Vespucci, der es später bereiste und beschrieb. Sowohl die Fourneyron- als auch die Jonval- und die Girard-, sowie die Francisturbine hatten einen dem Laufrad vorgeschalteten Leitapparat mit festen Schaufeln. Da nun die Wasserführung der ausgenützten Gewässer und auch der Leistungsbedarf mit der Zeit veränderlich ist, so muss die dem Laufrade zufließende Wassermenge den jeweiligen Verhältnissen angepasst werden. Die Berechnung des Leit- und Laufrades erfolgt für die grösste zur Ausnützung kommende Wassermenge, und bei festen Leitschaufeln konnte eine Regulierung der Wassermenge nur unter grossem Wirkungsgradverlust durchgeführt werden. Eine grundlegende Verbesserung der Regulierung der Wasserturbine brachte im Jahre 1877 der Vorschlag der *drehbaren Leitschaufel* von *Fink*, welche heute noch bei allen Überdruckturbinen die beste Regulierung ist.

Das Bedürfnis nach der Ausnützung höherer Gefälle führte im Jahre 1880 zu der von *J. Pelton* vorgeschlagenen Pelton-turbine, die heute oft als Freistrahlturbine bezeichnet wird, da bei ihr ein freier Wasserstrahl auf die Schaufeln des Laufrades auftrifft. Da der Druck beim Ein- und Austritt aus den Laufradschaufeln der gleiche ist, so wird diese Turbine «Gleichdruckturbine» genannt. Die Regulierung dieser Turbine erfolgte früher durch sogenannte Zungeneinläufe, aber aus den gleichen Gründen wie bei der Überdruckturbine suchte man nach einer besseren Lösung und fand sie auch im Jahre 1905 in der Form der «Nadeldüsenregulierung», mit welcher heute ausnahmslos alle Freistrahlturbinen ausgeführt werden.

Die Zentrifugalturbine von Fourneyron, sowie die Axialturbinen von Jonval und Girard und auch der grösste Teil der Wasserräder waren zu Anfang dieses Jahrhunderts durch die Zentripetalturbine von Francis mit der Umlenkung nach Swain sowie durch die Pelton-turbine verdrängt worden. Da an der Ausstellung in Frankfurt a. M. 1891 experimentell nachgewiesen worden war, dass es auf rationelle und sichere Weise möglich ist, grosse Leistungen auf elektrischem Wege über grosse Entfernungen zu übertragen, so war nun die Erzeugung von Energie nicht mehr an ihre Verbrauchsstelle gebunden; damit wurde dem Ausbau der Wasserkräfte ein weites Feld eröffnet. Es handelte sich nun in

erster Linie darum, die hydraulische Energie in wirtschaftlichster Art in elektrische Energie umzuwandeln und diese dann an die Verbrauchsstelle zu übertragen. Für den Konstrukteur der Wasserturbinen ergeben sich nun neue Probleme, und zwar sowohl hinsichtlich Steigerung der Leistung und der Drehzahl der Wasserturbinen, als auch Verbesserung ihrer Regulierfähigkeit. Durch eine Weiterentwicklung der Francisturbine gelang es vorerst, den Bedürfnissen zu entsprechen, und es wurden in der Folge eine grosse Zahl verschiedener «Francisturbinen» geschaffen, so dass eine Klassifikation notwendig wurde. Diese erfolgte durch Einführung des Kennzeichens der «spezifischen Drehzahl». Unter spezifischer Drehzahl versteht man die Drehzahl der Turbine, die bei einem Meter Gefälle eine Pferdestärke leistet. Während die ersten Francisturbinen nur eine spezifische Drehzahl von 60...70 hatten, gelang es im Laufe der Jahre, diese Zahl auf 300...320 zu steigern. Ich erinnere mich, dass im Jahre 1912 und 1913 pseudowissenschaftliche Abhandlungen erschienen, in denen versucht wurde zu beweisen, dass es aus physikalischen Gründen nicht möglich sei, eine höhere spezifische Drehzahl als 350 zu erreichen. Diese Behauptungen wurden allerdings später ad absurdum geführt.

Da in der Folge auch eine spezifische Drehzahl von 300...320 nicht genügte, um eine gewünschte Drehzahl bei gegebenem Gefälle und vorgeschriebener Leistung zu erreichen, war man gezwungen, die Leistung auf mehrere Laufräder zu verteilen; so entstand die Mehrfach-Turbine, die mit vertikaler und horizontaler Welle sehr oft zur Ausführung gelangte, die aber nicht als eine befriedigende Lösung der Aufgabe betrachtet werden durfte. Nach der damaligen Vorstellung über die Arbeitsweise des Wassers in der Turbine wäre es sehr schädlich gewesen, wenn man den Schaufelspalt zwischen dem Austritt des Wassers aus dem Leitapparat und dem Eintritt in das Laufrad gross gemacht hätte. Diese irrtümliche Vorstellung verhinderte zu jener Zeit eine weitere Steigerung der spezifischen Drehzahl, bis es dem Sprechenden im Jahre 1914 gelang, den experimentellen Beweis zu erbringen, dass durch eine wesentliche Vergrösserung des Schaufelspaltes und eine Verkürzung der Schaufellängen im Laufrad eine Steigerung der spezifischen Drehzahl auf 500 bei guten Wirkungsgraden möglich war. Die horizontalachsige Mehrfachturbine konnte dann durch die vertikalachsige Einfachturbine ersetzt werden. Infolge der festen Laufradschaufeln waren auch bei der neuen Konstruktion die Wirkungsgrade bei Teilbelastungen unbefriedigend; einen entscheidenden Fortschritt sowohl bezüglich spezifischer Drehzahl, als auch guter Wirkungsgrade brachte erst die in den Jahren 1914...1916 von *Kaplan* in Brünn vorgeschlagene Wasserturbine mit zentripetalem Zufluss zum Leitapparat und axialem Durchfluss durch das Laufrad mit drehbaren Laufradschaufeln und sehr grossem Schaufelspalt, mit wenig Laufradschaufeln und ohne Aussenkranz. Diese Turbine gestattete das Erreichen einer spezifischen Drehzahl bis 900 bei guten

Wirkungsgraden und dies auch bei Teilbelastungen. Im Jahre 1919 wurde die Fabrikation der Kaplan turbine in der Schweiz und in Deutschland aufgenommen, und heute wird diese Turbine von den meisten Wasserturbinenfabriken gebaut.

Bei der Entwicklung der Wasserturbine zu immer grösserer Schnellläufigkeit trat nun eine Erscheinung auf, die den Konstrukteuren grosse Schwierigkeiten bereitete, da im Anfang ihre Ursache nicht erkannt wurde. Die auf Grund aller Erfahrungsregeln berechneten und gebauten Wasserturbinen zeigten nämlich besonders bei grossen Leitschaufelöffnungen starke Vibrationen, die einen geordneten Betrieb auf die Dauer ausserordentlich erschwerten. Bei der Untersuchung von Laufrädern, die schon einige Zeit in Betrieb gewesen waren, konnten an den Laufradschaufeln eigenartige Zerstörungsercheinungen beobachtet werden. Man konnte auch feststellen, dass beim Auftreten der Vibrationen die Turbinenleistung und der Wirkungsgrad stark abfielen, so dass auch aus diesem Grunde eine Abklärung und Beseitigung dieser Erscheinung von grösster Bedeutung wurde. Die in dieser Richtung durchgeführten zahlreichen Forschungsarbeiten (unter denen ich besonders auch diejenige von *Ackeret* nennen möchte), ergaben als Ursache der störenden Erscheinung die Verdampfung des Wassers bei niedriger Temperatur, die als Kavitation oder Hohlraumbildung bezeichnet wird. Da der Dampfdruck des Wassers eine Funktion der Temperatur ist (man sagt bekanntlich, dass bei Atmosphärendruck das Wasser bei 100 °C siedet) und da bei kleinerem Druck das Wasser auch bei kleinerer Temperatur siedet, war dann nur noch zu untersuchen, an welchen Stellen in der Turbine der Druck so klein wurde, dass bei der gegebenen Temperatur ein Sieden und damit eine Hohlraumbildung möglich war. Für diese Untersuchungen leistete nun der Satz von Daniel Bernoulli, nach welchem die Summe aus kinetischer und potentieller Energie, d. h. aus Geschwindigkeit und Druckhöhe, stets konstant ist, ganz ausgezeichnete Dienste. Durch systematische experimentelle Forschungen in den verschiedenen Laboratorien der Turbinenfirmen gelang es dann, besonders für Kaplanlaufräder, welche infolge ihrer hohen Schnellläufigkeit besonders kavitationsempfindlich sind, Schaufelformen zu finden, die auch bei hohen spezifischen Drehzahlen keine Kavitation aufweisen. Wie aus meinen Ausführungen hervorgeht, kann die Hohlraumbildung vermieden werden, wenn man dafür sorgt, dass der Druck an keiner Stelle in der Turbine auf den Verdampfungsdruck fällt. Als Kennzeichen für die Beurteilung, ob Kavitationsgefahr besteht, hat *Dieter Thoma* (München) den Kavitationskoeffizienten vorgeschlagen, der eine Funktion der spezifischen Drehzahl ist. Sorgt man dafür, dass beim Austritt des Wassers aus dem Saugrohr ein genügender Gegendruck vorhanden ist, so kann bei richtiger Konstruktion die Hohlraumbildung stets vermieden werden. Um einen genügenden Gegendruck zu schaffen, muss das Laufrad manchmal tief unter dem Unterwasserspiegel angeordnet wer-

den, was beim Bau des Kraftwerkes eine entsprechend tiefe Baugrube bedingt und wegen der Entwässerung dieser Grube erhebliche Kosten im Gefolge hat. Damit wird das Vermeiden der Kavitation auch zu einem wirtschaftlichen Problem, und es ist deshalb von Fall zu Fall zu erwägen, ob man nicht zur Vermeidung hoher Baukosten auf eine höhere Drehzahl verzichten und damit etwas höhere Maschinenkosten in Kauf nehmen will. Da ein Wasserkraftwerk aber eine Produktionsanlage zur Erzeugung elektrischer Energie ist, so spielt der Wirkungsgrad der Umsetzung von hydraulischer in elektrische Energie bei einer Entschlussfassung auch eine erhebliche Rolle. Da ist nun zu sagen, dass die Wahl einer kleineren Drehzahl bei gegebenem Gefälle und vorgeschriebener Leistung in den meisten Fällen eine Erhöhung des Wirkungsgrades mit sich bringt, und damit eine Vergrösserung der Produktion an Kilowattstunden.

Für den Ausbau der Wasserkräfte kommen heute nur noch die folgenden drei Turbinentypen in Frage:

1. Die Kaplan turbine

für kleine und mittlere Gefälle, d. h. für die Ausnützung der Wasserkräfte der Flüsse und Ströme in Laufwerken bis zu einem maximalen Gefälle von rund 60 m.

2. Die Francisturbine

für mittlere und höhere Gefälle, d. h. für die Ausnützung der Wasserkräfte der Bäche und Flüsse in Lauf- oder Speicherwerken bis zu einem maximalen Gefälle von rund 400 m.

3. Die Peltonturbine

für hohe Gefälle, d. h. für die Ausnützung der Wasserkräfte der Bäche durch Speicherung in Stauseen bis zu einem maximalen Gefälle von rund 2500 m.

Die Entwicklung der Wasserturbine bis zu ihrem heutigen Stand war nur möglich dank der systematischen experimentellen Forschungsarbeit in den verschiedenen hydraulischen Laboratorien, in Verbindung mit erkenntnistheoretischen Überlegungen physikalisch-mathematischer Natur.

Wenn auch schon im Jahre 1908 ein Wirkungsgrad von 90 % mit einer Peltonturbine und im Jahre 1915 ein Wirkungsgrad von 92 % mit einer Francisturbine erreicht wurde, so waren dies damals nur Einzelfälle, während solche Werte heute bei allen grösseren Turbinen, dank unserer vermehrten Erkenntnisse, fast regelmässig erreicht und z. T. sogar überschritten werden. Das gleiche gilt auch für die Kaplan turbine, die heute eine Entwicklungszeit von rund 30 Jahren hinter sich hat.

Wenn man sich fragt, welche Fortschritte die Zukunft auf dem Gebiete des Wasserturbinenbaues wohl noch bringen könnte, so glaube ich nicht, dass auf diesem Gebiete noch wesentliche Verbesserungen des Wirkungsgrades möglich sind, nachdem heute fast regelmässig bei allen grösseren Turbinen maximale Wirkungsgrade von 92 % bis 94 % erreicht werden. Die letzten Prozente herauszuholen wird immer schwerer, und man nähert sich auch hier asymptotisch einem Grenzwert, der ganz sicher nicht 100 % betragen kann. Es müsste denn sein, es gelänge uns, entsprechend der Supraleitfähigkeit, unsere Turbinen mit einem Stoff zu betreiben, der

keine Zähigkeit besitzt; dies wären aber keine Wasserturbinen mehr, und deshalb könnte ich dann auch nicht darüber sprechen.

Zu den hydraulischen Maschinen gehören nun aber auch die Wasserpumpen, die eine fast gleich lange Entwicklungszeit hinter sich haben wie die Wasserturbinen.

Angefangen bei den Schöpfrädern und den Wasserturbinen des grauen Altertums (die heute z. T. allerdings, z. B. in Ägypten, immer noch im Gebrauch sind) ging die Entwicklung über die mit Ventilen arbeitende Kolbenpumpe zur ventillosen Pumpe mit oszillierendem Zylinder zur heutigen Kreiselpumpe mit radialer oder axialer Durchströmung des Laufrades. Da jedes Laufrad einer Überdruckturbine bei Umkehrung der Drehrichtung auch als Pumpenlaufrad arbeitet, die Turbine also damit zur Pumpe wird, so ist es klar, dass die Fortschritte der Erkenntnisse auf dem Gebiete des Wasserturbinenbaues sich auch befruchtend auf die Entwicklung der Pumpen auswirkte. Während bei kleinen Fördermengen und grösseren Förderdrücken früher noch vielfach Kolbenpumpen verwendet wurden, tritt heute an ihre Stelle fast ausnahmslos die mehrstufige Zentrifugalpumpe. Bei grossen Fördermengen und kleinen Förderhöhen verwendet man die Kreiselpumpe mit axialem Durchfluss durch das Laufrad. Der Begriff der Schnellläufigkeit, ausgedrückt durch die Grösse der spezifischen Drehzahl, ist auch bei den Pumpen eingeführt worden, und sie werden dementsprechend klassifiziert. Der weitaus grösste Teil der heute zur Ausführung kommenden Pumpen sind Kreiselpumpen mit *radialer* oder *axialer* Durchströmung durch das Laufrad. Es sind ausserdem heute noch eine überaus grosse Zahl von Spezialpumpen vorhanden, mit denen es möglich ist, nicht nur Wasser, sondern auch Schlamm, Kies und grössere Steine sowie zähe Stoffe zu fördern. Das Gebiet des Pumpenbaues ist damit ausserordentlich erweitert worden, und ich muss es mir hier versagen, näher darauf einzutreten.

Will man einen Blick in die Zukunft tun, so könnte man, mit Rücksicht auf die bisherige Entwicklung der hydraulischen Maschinen, mit etwas Phantasie, die ja zum Erreichen von Fortschritten stets nötig sein wird, etwa folgendes sagen:

1. Der Leitapparat der Überdruckturbine könnte mit festen Leitschaufeln ausgeführt und die Regulierung durch Veränderung der Breite vorgenommen werden.

2. Die Zahl der Laufradschaufeln bei Überdruckturbinen könnte eventuell bis auf eine vermindert werden.

3. Durch Kombination von Überdruckturbinen verschiedenen Typs, welche die gleiche Generatorwelle antreiben, liesse sich eventuell das Kavitationsproblem leichter meistern.

4. Bei Speicherwerken mit künstlicher Speicherung hat man heute oft *eine* elektrische Maschine, die als Generator (bei Turbinenbetrieb) und als Motor (bei Pumpenbetrieb) arbeitet. Der hydraulische Teil besteht aber aus zwei Maschinen, näm-

lich einer Turbine und einer Pumpe. Es ist nun durchaus denkbar, dass zukünftig auch nur eine hydraulische Maschine aufgestellt wird, die als *Turbine* (mit hydraulischer Parallelschaltung) und als *Pumpe* (mit hydraulischer Serieschaltung) arbeitet. Für die Betriebsführung würde dies eine Vereinfachung bedeuten.

5. Durch Verbesserung der Gehäuseformen, und bei schnellaufenden Überdruckturbinen besonders des Saugrohres, lassen sich die Wirkungsgrade noch um 1...2 % über die heutigen Werte steigern.

Die Ausbildung des Maschineningenieurs

Gestatten Sie mir zum Schlusse noch einige Worte zur Ausbildung des Maschineningenieurs an der Hochschule. Während die ersten Semester ausschliesslich dem Studium der Grundlagenfächer (höhere Mathematik, Physik, Mechanik, Maschinenzeichnen, Maschinenelemente usw.) gewidmet sind, tritt der Studierende mit dem fünften Semester in das eigentliche Fachstudium ein. In diesem soll er nun damit vertraut gemacht werden, wie die Grundwissenschaften zur Lösung technischer Probleme, d. h. für die Berechnung und Konstruktion einer Maschine verwendet werden können. Die gründliche Kenntnis der Grundwissenschaften ist deshalb für den werdenden Maschineningenieur nicht *Selbstzweck*, sondern *Mittel* zum Zweck. Es genügt also nicht, wenn er mathematische Formeln und physikalische Sätze weiss, sondern er muss sie auch richtig anwenden können. In seiner späteren praktischen Tätigkeit ist es für ihn von grösster Bedeutung, dass er es versteht, sein Wissen in die praktische Tat umzusetzen, d. h. dass er etwas *kann*. Das Konstruieren einer Maschine besteht aber nicht nur in der Anwendung der Grundwissenschaften, denn vom richtigen Konstrukteur wird noch viel mehr erwartet. Er soll die Maschine nicht nur so berechnen können, dass sie die gestellten Bedingungen erfüllt, sondern er soll auch eine Lösung finden, die wirtschaftlich und betrieblich befriedigt. Seiner Phantasie ist damit ein weiterer Spielraum gelassen, und eine glückliche Idee hat schon sehr oft einen wesentlichen technischen Fortschritt gebracht. Der richtige Konstrukteur sollte künstlerisches Empfinden besitzen, denn die ästhetisch befriedigenden Formen sind in den weitaus meisten Fällen auch die zweckmässigsten. Ich möchte hier nur auf die neueren Erkenntnisse über Gestaltfestigkeit hinweisen. Wenn man das Maschinenkonstruieren von den dargelegten Gesichtspunkten aus betrachtet, so wird man zugeben müssen, dass es eine höchstqualifizierte Tätigkeit ist. Es wäre deshalb sehr zu begrüssen, wenn sich mehr Studierende, als dies heute der Fall ist, für die schöpferische Tätigkeit des Konstruierens begeistern würden, denn ich bin der Überzeugung, dass die Maschinenindustrie sehr gerne akademisch gebildete Konstrukteure aufnehmen würde.

Ausser der beruflichen Tüchtigkeit sind aber auch die rein persönlichen Eigenschaften des Ingenieurs nach meiner vollen Überzeugung von

grösster Bedeutung. Ein richtiger Ingenieur ist sich stets seiner hohen Verantwortung, die er beim Bau eines Werkes seinen Mitmenschen gegenüber übernimmt, voll bewusst. Er stellt auch die Erfüllung der von ihm übernommenen Pflichten allem anderen voran, und es muss sein Stolz sein, durch

Fleiss und Zuverlässigkeit sich seines akademischen Standes würdig zu erweisen.

Möge es Elternhaus und Schule und besonders auch unserer Hochschule immer wieder gelingen, Ingenieure heranzubilden, die diesen Titel voll und ganz verdienen.

Les condensateurs utilisés dans les télécommunications

Conférence présentée à la 8^e Journée de la technique des télécommunications, le 24 juin 1949, à Berne,
par J. Monney, Fribourg

621.319.4:621.39

Parmi les exigences formulées à l'égard des condensateurs, celles qui concernent une réduction du volume sont les plus fréquentes. Nous trouvons ici un aperçu des améliorations qui ont permis de restreindre les dimensions des condensateurs: moulage, augmentation de la constante diélectrique et utilisation du papier métallisé. L'article se termine par quelques indications concernant les condensateurs de précision au mica et les condensateurs électriques.

Einige der häufigsten Forderungen im Kondensatorenbau ist die der Volumenverkleinerung. Verschiedene Verbesserungen, z. B. Einpressen in Preßstoffe, Erhöhung der Dielektrizitätskonstanten und Verwendung von metallisierten Papieren haben dazu beigetragen. Ausserdem enthält der Aufsatz einige Angaben über Präzisionsmicakondensatoren und Elektrolytkondensatoren.

Introduction

Les différents types de condensateurs étant fort nombreux, et le terme de télécommunication ayant lui-même un sens très général, il ne saurait être question de faire ici un exposé complet de l'utilisation des condensateurs dans la technique des télécommunications. Nous nous bornerons plutôt à examiner quelques progrès réalisés pendant ces dernières années dans la fabrication des condensateurs, ainsi que les tendances, qui actuellement influencent leur évolution, tendances souvent contradictoires parce qu'imposées en fin de compte par les multiples exigences du public.

Les tendances les plus générales qui se font sentir pour tous les types de condensateurs sont une réduction des dimensions et, cela va de soi, une réduction des prix. Ceci ne signifie pas que les autres qualités, telles que la stabilité, l'étanchéité, la sécurité de fonctionnement, etc., n'aient pas d'importance, mais simplement que les questions de prix et de dimensions provoquent généralement les discussions les plus serrées; remarquons en passant que ce n'est pas uniquement pour le matériel militaire ou les postes de radio portatifs que l'on demande cette réduction de volume des condensateurs, mais aussi pour des installations fixes, telles que les centrales de téléphones et spécialement les installations de téléphonie à canaux multiples.

Commençons donc par celles des améliorations introduites récemment, qui ont permis de restreindre les dimensions des condensateurs sans porter préjudice à leurs autres qualités. Ce sont principalement le moulage dans des résines synthétiques, l'utilisation de matériaux à constante diélectrique élevée, que ce soit dans les masses d'imprégnation ou les céramiques, et, enfin, l'emploi du papier métallisé.

Le moulage des condensateurs

On peut mouler les condensateurs soit avec des résines synthétiques se polymérisant pendant le moulage (bakélites, araldite) soit avec des résines thermoplastiques que l'on injecte à des tempéra-

tures plus ou moins élevées (polythène, polystyrène), soit avec des cires minérales ayant un point de fusion suffisamment élevé. La préférence va, pour le moment, aux résines non thermoplastiques car spécialement là où la place est mesurée, on aime pouvoir souder les fils de contacts tout près de la masse de moulage sans que celle-ci se mette à fondre et à couler. Les résines utilisées supportant des températures de 200 °C, les condensateurs ne risquent en aucun cas d'être détériorés par l'action, même prolongée, d'un fer à souder.

En plus du volume réduit, ce mode de fabrication a l'avantage de soustraire les condensateurs à l'action de l'humidité et de leur conserver ainsi une résistance d'isolement élevée. On mesurera le progrès réalisé en comparant les épreuves auxquelles sont soumis les condensateurs. Pour les exécutions en tubes de carton ou de dellite, les prescriptions d'essai pour locaux secs consistent à laisser l'objet 24 heures à 20 °C et à une humidité de 100 % dans un récipient où l'on a vaporisé de l'eau au début de l'essai. Or, il est prouvé que des condensateurs qui ont subi cette épreuve avec succès ne conservent pas forcément une résistance d'isolement élevée même dans les locaux qualifiés de secs. En effet, l'humidité de l'air dans des conditions atmosphériques normales finit par pénétrer à travers le carton et provoque souvent après une ou deux années une diminution notable de la résistance d'isolement. Pour les condensateurs moulés, l'essai consiste à subir pendant mille heures une humidité de 100 % à 40 °C; c'est là une épreuve très dure qui permet de contrôler si un condensateur est suffisamment protégé contre l'influence de l'humidité. Les résultats obtenus permettent de prévoir que, de plus en plus, la protection extérieure des condensateurs se fera au moyen de résines synthétiques.

Augmentation de la constante diélectrique

Une diminution considérable du volume des condensateurs peut être obtenue par l'emploi de produits à constante diélectrique élevée: cires et huiles utilisées pour l'imprégnation du papier ou céra-