

P. HOLL

Berechnen und Entwerfen von Turbinen- und Wasserkraft- Anlagen

Mit einer Anleitung zur Anwendung
des Turbinenrechenschiebers

NEU BEARBEITET VON

Dipl.-Ing. E. GLUNK

VORSTANDSMITGLIED IM ING.-BÜRO
OSKAR V. MILLER G.M.B.H. MÜNCHEN

VIERTE AUFLAGE

MIT 41 IN DEN TEXT GEDRUCKTEN ABBILDUNGEN
UND 6 TAFELN



MÜNCHEN UND BERLIN 1927

DRUCK UND VERLAG VON R. OLDENBOURG

Alle Rechte, einschließlich des Übersetzungsrechtes, vorbehalten
Copyright 1922 by R. Oldenbourg, München

Vorwort zur ersten Auflage.

Im Laufe des letzten Jahrzehntes hat sich der Bau von Wasserturbinen zu einem der wichtigsten Zweige der heutigen Maschinentechnik entwickelt. Infolge der vielfachen Verwendung der Wasserturbine als Antriebsmaschine in den mannigfaltigsten Industrien werden häufig Ingenieure, Betriebsleiter, Wasserkraftbesitzer usw., welche dem Wasserturbinenbau fernstehen, gezwungen, sich mit Ausnützung von Wasserkräften zu befassen und der Wasserturbine näherzutreten. Spezialkenntnisse im Turbinenbau sind dabei naturgemäß nicht immer vorhanden; ihr Mangel macht sich unangenehm fühlbar und erschwert den Verkehr zwischen Turbinenbesteller und Turbinenlieferant. Die eigene Tätigkeit als projektierender Ingenieur führte mir die Notwendigkeit, hierin Abhilfe zu schaffen, täglich vor Augen, und ich stellte mir die Aufgabe, ein Instrument zu konstruieren, welches die Gesetze der Wasserturbine in so einfacher Form zur Darstellung bringt, daß auch der Nichtfachmann im Turbinenbau an Hand desselben einen Einblick in das Verfahren beim Projektieren von Wasserkraftmaschinen gewinnen kann. Diese Aufgabe suchte ich mit dem von mir entworfenen Turbinenrechenschieber, dessen Beschreibung und Erläuterung Zweck der vorliegenden Abhandlung ist, zu lösen. Ich hoffe, mit diesem Instrument auch dem Fachmann im Wasserturbinenbau einen Zeit und Mühe sparenden Gehilfen in die Hand zu geben. Für etwaige Anregungen zur Vervollkommnung des Instruments werde ich jederzeit dankbar sein.

Um die Anwendung des Turbinenrechenschiebers jedermann klarzulegen, habe ich die Beschreibung so verfaßt, daß sie einen allgemeinen, kurzgefaßten Überblick über Wasserkraftprojektierung enthält. Einige Vertrautheit mit den einschlägigen Begriffen habe ich dabei vorausgesetzt und bin auf die verschiedenen hier zusammentreffenden Gebiete nur so weit eingegangen, als sie für die praktische Arbeit des projektierenden Ingenieurs in Betracht kommen. Die Projektierung von Zentrifugalpumpen, welche sich auch mit dem Turbinenrechenschieber erledigen läßt, ist im Anschluß daran kurz gestreift worden.

Berlin, im Februar 1908.

Ing. Holl.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Aus dem kleinen Werk spricht eine so gediegene Sachkenntnis des Verfassers auf dem Gebiete der Wasserkraftanlagen und der Stoff ist auf knappem Raum so übersichtlich zusammengestellt, daß jeder Techniker, der sich über die wichtigsten Abmessungen bei der Berechnung und für den Entwurf einer Wasserkraftanlage rasch unterrichten will, aus den Darlegungen Nutzen ziehen wird.

Der vom Verfasser für die einschlägigen Berechnungen besonders konstruierte Turbinen-Rechenschieber leistet dabei zwar ganz vortreffliche Dienste, setzt aber in der Handhabung eine gewisse Übung voraus. Aber auch ohne ihn bleibt der Wert des Buches bestehen.

Die vorliegende Ausgabe ist gegen die erste unverändert, da es dem Verfasser durch seinen allzufrühen Tod leider nicht mehr vergönnt gewesen ist, auf den Inhalt Einfluß zu nehmen und seine reichen Kenntnisse zu etwa noch wünschenswerten Verbesserungen zu benutzen.

Charlottenburg, im Mai 1913.

Professor E. Reichel.

Vorwort zur dritten Auflage.

Das von Ingenieur Holl im Jahre 1908 verfaßte Werk hatte den Zweck, allen denen, welche sich mit dem Bau und Betrieb von Wasserkraftanlagen zu befassen haben, ein wertvolles Hilfsmittel zur Lösung der mannigfaltigen Aufgaben, welche der Entwurf und die Berechnung von Turbinen- und Wasserkraftanlagen stellen, in die Hand zu geben. Zur Erleichterung der Projektierungsarbeiten hat Holl den Turbinenrechenschieber konstruiert, dessen Anwendung den Grundzug früherer Auflagen des Buches bildete.

Inzwischen hat sich der Turbinenbau in hohem Maße weiter entwickelt. Es ist gelungen, die Schnellläufigkeit der beiden Hauptturbinenarten, der Francis- und der Freistrahlturbine, derart zu steigern, daß ihre Anwendungsgebiete lückenlos ineinander greifen und nunmehr auf die Verwendung von früher gebräuchlichen weniger günstigen Turbinensystemen, wie Schwamkrugturbine, Verbundturbine u. a. verzichtet werden kann. Hand in Hand mit dieser Entwicklung ging der Ausbau der theoretischen Erkenntnisse über die Strömung des Wassers beim Durchfluß durch die Turbinen, über die hierbei auftretenden Reibungs- und Wirbelverluste, über den Wasseraustritt usw., deren zweckmäßige Anwendung wiederum eine erhebliche Steigerung der Wirkungsgrade brachte. Die Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen, und es weisen insbesondere die neueren Untersuchungen und Versuche von Kaplan u. a. darauf hin, daß noch weit höhere Schnelligkeiten als bisher erreichbar sind und damit auch die Ausnützung kleiner Wasserkräfte mit niedrigen Gefällen wirtschaftlich möglich erscheint.

Zur Beurteilung der Schnellläufigkeit einer Turbine wurde in neuerer Zeit mehr und mehr der von Camerer zuerst angewandte Begriff der „spezifischen Umlaufzahl“ benützt, während der von Holl aufgestellte, an sich klarere Begriff der „Systemziffer“ fast in Vergessenheit geriet.

Bei der vorliegenden Neubearbeitung des Buches wurde die fortschreitende Entwicklung des Turbinenbaues in weitgehendstem Maße berücksichtigt und hierbei nicht nur die Turbinen allein, sondern auch alle sonstigen mit dem Bau und Betrieb von Wasserkraftanlagen zusammenhängenden Einzelheiten und Fragen in den Kreis der Betrachtung gezogen. Der leitende Gedanke war hierbei, den Charakter des Buches in der Weise zu erweitern, daß der projektierende Ingenieur einen kurzen Leitfaden

über alle baulichen und maschinellen Einrichtungen von Wasserkraftanlagen erhält, welcher ihm nicht nur zur Bestimmung des jeweils für eine Anlage passenden Turbinensystems dienen, sondern ihm auch im Zusammenhang damit über alle sonst benötigten Konstruktionsdaten Aufschluß geben kann. Auf Einzelheiten wurde hierbei nicht eingegangen, da hierfür die Spezialliteratur zu benützen ist. Besonderer Wert wurde auf eine umfassende Angabe neuzeitlicher Erfahrungswerte gelegt, auch wurden in zahlreichen Fußnoten Hinweise auf ausgeführte Anlagen gegeben.

Die Richtung, welche damit dem Buche gegeben wurde, bedingte die Aufnahme verschiedener neuer Kapitel über Einzelteile von Wasserkraftanlagen, die Beispielsammlung wurde durch Aufnahme neuzeitlicher Anlagen ergänzt, ein kurzer Abschnitt über Anlage- und Betriebskosten von Wasserkraften wurde eingefügt u. a. m. Andererseits wurden die früheren sich auf die Beschreibung und Anwendung des Turbinenschiebers beziehenden Ausführungen wesentlich gekürzt oder in die Einleitung versetzt. Dies konnte um so eher erfolgen, als zwar der von Holl konstruierte Turbinenschieber ein ausgezeichnetes Hilfsmittel zur raschen Bestimmung des für einen gegebenen Fall passenden Turbinensystems darstellt, dagegen die von Holl gedachte Verwendung für gewöhnliche Rechnungen sich praktisch nicht bewährte, da der projektierende Ingenieur solche Rechnungen schneller und sicherer mit dem ohnehin zu seinem Rüstzeug gehörenden gewöhnlichen Rechenschieber ausführt. Aus diesem Grunde kann auch auf die teure Ausführung des Turbinenschiebers in Holz verzichtet werden, da zur Erreichung seines eigentlichen Verwendungszweckes die billigere Herstellung in Karton vollständig genügt. Der Schieber wurde der neueren Turbinenentwicklung entsprechend umgearbeitet und ermöglicht nach wie vor eine außerordentlich rasche Übersicht über die für eine bestimmte Wassermenge und ein bestimmtes Gefälle zu wählende Unterteilung, über die anwendbaren Turbinenarten und Turbinengrößen, die erreichbaren Drehzahlen u. dgl.

Im übrigen sei bemerkt, daß die Benützung des vorliegenden Buches den Besitz des Turbinenschiebers nicht zur Voraussetzung hat. Sämtliche beim Entwurf und bei der Berechnung von Turbinen- und Wasserkraftanlagen vorkommenden Aufgaben lassen sich mit Hilfe der im Buche gegebenen Tafeln und Formeln leicht auch ohne Turbinenschieber lösen.

Eine Sammlung der Formeln mit den hauptsächlichsten Konstruktionsdaten und Erfahrungswerten wurde im Anhang des Buches beigefügt.

München, im August 1921.

Dipl.-Ing. E. Glunk.

Vorwort zur vierten Auflage.

Das vorliegende Buch fand in seiner neuen Fassung so viel Anklang, daß ich daraus schließen darf, daß es tatsächlich zu einem Leitfaden für den projektierenden Wasserkraft-Ingenieur geworden ist. Die dritte Auflage war sehr schnell vergriffen; leider verzögerte sich jedoch die Herausgabe der neuen Auflage infolge anderweitiger Inanspruchnahme des Unterzeichneten. Ich hoffe aber, daß der nunmehr erscheinenden vierten Auflage des Buches die gleiche Anerkennung wie bisher zuteil wird.

Der Rahmen des Buches ist der gleiche wie bei der dritten Auflage geblieben; doch wurden die Grundlagen der neuesten Turbinentechnik berücksichtigt, und es wurde einigen Anregungen Rechnung getragen, die mir in dankenswerter Weise aus dem Kreise der Interessenten gegeben wurden. An einigen Berechnungsbeispielen wurde gezeigt, in welcher Weise bei der Projektierung von Turbinenanlagen vorzugehen ist, wenn der bearbeitende Ingenieur nicht im Besitze eines Turbinenschiebers ist. Gerade diese Beispiele zeigen aber, wie einfach und sicher die Anwendung des Schiebers ist und wie dieser die Möglichkeit gibt, auf mechanischem Wege nicht nur schnell das für einen bestimmten Fall passende Turbinensystem, die passenden Drehzahlen usw. zu finden, sondern auch das System und die Drehzahlen zu variieren, ohne daß wiederholte Probierrechnungen erforderlich sind.

Der Inhalt des Buches wurde noch durch ein Sachregister ergänzt.

München, im Frühjahr 1927.

Dipl.-Ing. E. Glunk.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung. Beschreibung des Turbinenrechenschlebers	1
§ 1. Verwendung zur Bestimmung des Turbinensystems	1
§ 2. Verwendung als gewöhnlicher Rechenschieber	4
I. Kapitel. Projektierung einer Turbine	7
§ 3. Bestimmung des Turbinensystems	7
§ 4. Bestimmung der Turbinenanordnung. Wahl der Umdrehungszahl	15
II. Kapitel. Vorläufige Dimensionierung der projektierten Turbine	20
§ 5. Bestimmung der Laufradabmessungen	20
§ 6. Sonstige Gesichtspunkte bei Festlegung der Turbinenabmessungen	24
§ 7. Turbinenserien	25
III. Kapitel. Projektierung von Turbinenanlagen für Elektrizitätsbetrieb	28
§ 8. Wahl der Antriebsturbinen für Stromerzeuger unter Berücksichti- gung verschiedener Stromarten	28
§ 9. Turbinenregulierungen. Maßnahmen gegen Durchgehen	32
§ 10. Sonstige Gesichtspunkte beim Entwurf hydroelektrischer Anlagen	37
IV. Kapitel. Ausgestaltung der Einzelheiten bei Projektierung von Wasserkraft- anlagen	40
§ 11. Wasserhaushalt	40
§ 12. Allgemeine Gesichtspunkte für die Errichtung einer Wasserkraft- anlage	44
§ 13. Wehre	46
§ 14. Kanaleinlauf	49
§ 15. Kanäle	50
§ 16. Stollen	56
§ 17. Wasserschloß und Wasserschloßausrüstung	58
§ 18. Sonstige Einrichtungen	64
§ 19. Druckrohrleitungen	67
§ 20. Maßnahmen gegen Drucksteigerungen. Schwungmassenbedarf . .	76
§ 21. Kraftstationen	83
§ 22. Vermessungen und Messungen	88
V. Kapitel. Bemerkungen zur Wasserkraftprojektierung	92
§ 23. Schwankungen in Gefälle und Wassermenge	92
§ 24. Wirkungsgrad	96
§ 25. Obere Grenze des zulässigen Gefälles	97
§ 26. Aufspeicherung des Betriebswassers	99
§ 27. Einfluß der äußeren Verhältnisse auf die konstruktive Ausführung der Turbinen	100
VI. Kapitel	103
§ 28. Projektierung von Zentrifugalpumpen	103
VII. Kapitel. Lager und Wellen	104
§ 29. Lager	104
§ 30. Wellen	106

	Seite
VIII. Kapitel. Beispielsammlung	108
Nr. 1. Bestimmung des Bruttogefälles aus dem Rohgefälle	108
„ 2. Bestimmung des Nettogefälles aus dem Bruttogefälle	113
„ 3. Projektierung und Dimensionierung einer Francisturbine	115
„ 4. Projektierung und Dimensionierung einer Freistrahlturbine	118
„ 5. Wahl der Turbinenart bei gegebener Drehzahl	119
„ 6. Wahl der Turbinenart bei gegebener Drehzahl	120
„ 7. Wahl der Turbinenart bei gegebener Drehzahl	121
„ 8. Wahl der Drehzahl	122
„ 9. Verhalten einer Turbine bei Änderung des Gefälles	124
„ 10. Wirkungsgrad und Leistung einer Turbine bei schwankendem Gefälle und konstanter Drehzahl	125
„ 11. Projektierung einer Turbine unter spezieller Berücksichtigung von Hochwasser- und Niederwasserperiode	126
„ 12. Beispiel für Serienmarkierung	128
„ 13. Beispiel für Benutzung von Serienmarken	129
„ 14. Projektierung einer hydroelektrischen Anlage	129
„ 15. Teilung der Kraft	135
„ 16. Teilung der Kraft	137
„ 17. Kegelradübersetzung	138
„ 18. Riemenantrieb	140
„ 19. Seiltrieb	142
„ 20. Projektierung eines Wasserschlosses samt Wasserschloßausrüstung	145
„ 21. Projektierung einer Zentrifugalpumpe	150
„ 22. Zentrifugalpumpe mit mehreren Druckstufen	151
„ 23. Zentrifugalpumpe mit Dampfturbinenantrieb	151
IX. Kapitel. Anwendung des Turbinenrechenschiebers auf einige hervorragende ausgeführte Turbinenkonstruktionen und auf einige bekannte Wasserkraftzentralen	152
I. Turbinen	152
II. Zentralen	155
1. Elektrizitätswerk Caffaro	155
2. Elektrizitätswerk Wangen an der Aare	155
3. Elektrizitätswerk Paderno an der Adda	156
4. Wasserkraftwerk Hemfurt (Edertalsperre)	157
5. Das Wasserkraftwerk Adamello	158
6. Das Walchenseekraftwerk	160
X. Kapitel. Wirtschaftlichkeit von Wasserkraftanlagen	172
Anhang. Zusammenstellung von Gleichungen und Konstruktionsdaten	177
1. Gleichungen	177
2. Konstruktionsdaten	183
Literaturverzeichnis	185
Sachregister	186

Einleitung.

Beschreibung des Turbinenrechenschiebers.

§ 1. Verwendung zur Bestimmung des Turbinensystemes.

Das Instrument hat die Form eines Rechenschiebers, dessen Ausführung aus Fig. 1 ersichtlich ist. Fig. 1 zeigt die Ausführung in Karton, der Schieber wird jedoch auch in Holz hergestellt. Das Instrument besteht, ähnlich wie ein gewöhnlicher Rechenschieber, aus dem Schieberkörper, der eine obere und eine untere Wange besitzt, aus der im Schieberkörper verschiebbaren Zunge und aus dem Läufer, der zum Ablesen dient.

Der Schieberkörper und die Zunge sind mit verschiedenen logarithmischen Skalen versehen, welche mit D , n , H und Q bezeichnet sind. Diese vier langen Skalen sind die Hauptskalen des Instruments; die übrigen noch darauf befindlichen Skalen werden als Hilfsskalen bezeichnet. Drei von den Hauptskalen beziehen sich auf die Bestimmungselemente der Wasserturbinen:

Wassermenge Q ,

Gefälle H ,

Umdrehungszahl n der Turbinenwelle,

während die vierte Hauptskala, die Skala D , zur Turbinendimensionierung dient. Die Skalen Q und D sind auf den beiden Wangen des Schieberkörpers, die Skalen H und n auf der Zunge angebracht. Außerdem befinden sich auf dem Schieberkörper besonders ausgebildete Systemdarstellungen, im folgenden „Systembilder“ genannt, für die im heutigen Turbinenbau so gut wie ausschließlich zur Verwendung kommenden Turbinensysteme: Freistrahlturbine (Pelton-turbine) und Francisturbine, nebst deren schnellaufende Abarten (Kaplanturbine u. a.).

Bekanntlich lassen sich mit diesen beiden Systemen sämtliche Aufgaben der Wasserkraftausnützung in der einfachsten und vorteilhaftesten

Weise lösen und es braucht daher auf andere Turbinensysteme nicht eingegangen zu werden¹⁾).

Die Skala Q gibt die pro Sekunde durch die Turbine hindurchströmende Wassermenge in Litern an. Die Skala H stellt das für die Turbine disponible Nettogefälle in Metern und die Skala n die Umdrehungszahl der Turbinenwelle pro Minute dar.

Q ist von 0,15 bis 100000 l pro Sekunde also bis 100 cbm Wasser pro Sekunde angegeben. Die Hauptskala H reicht von 0,2 bis 1500 m und die Hauptskala n von 10 bis 8000 Umdrehungen pro Minute.

Die Systembilder bestehen, wie die Fig. 1 und 2 erkennen lassen, in der Hauptsache aus horizontalen Linien von bestimmter Länge und Lage. Jede dieser Linien ist mit verschiedenen symbolischen Zeichen versehen, deren Bedeutung nachstehend erläutert ist.

Die horizontalen Linien der Systembilder werden als „Systemzüge“ bezeichnet. Jeder Systemzug stellt eine Turbinenart dar. Die betreffende Turbinenart ist durch die allgemeine Bezeichnung des Systembildes, zu welchem der Systemzug gehört, und durch die spezielle Inschrift auf dem Systemzug definiert. Die Systemzüge zeigen in ihrer Länge die Ausdehnung des Verwendungsbereichs ihrer Turbinenart an. Die obere und untere Grenze dieses Verwendungsbereichs, also die Enden des Systemzugs, sind durch Ausrufungszeichen, welche mit einem Pfeil in das Verwendungsgebiet hineinweisen, markiert. An diesen Stellen ist der Wirkungsgrad der Turbine schlecht; er bessert sich mit dem Fortschreiten im Sinn der Pfeile. Da, wo das betreffende Turbinensystem allgemein brauchbar zu werden beginnt, sind kleine Sterne angebracht, und die Stelle endlich, welche dem Maximum des Wirkungsgrades entspricht, ist durch einen großen Stern gekennzeichnet.

Die in den Systembildern eingeschriebenen Ziffern geben die Wirkungsgrade an, welche in den betreffenden Systemlagen unter Voraussetzung richtig gewählter Arbeitsprozesse des Wassers und unter sonst günstigen Umständen erreichbar sind. Die Zahlen gelten für Turbinen mittlerer Größe; für große Turbinen wird der Wirkungsgrad größer, für kleine Turbinen (Francisturbinen mit kleinem Laufraddurchmesser und Freistrahlturbinen mit dünnem Strahl) bleibt er unterhalb der eingeschrie-

¹⁾ Auf den Rechenschiebern früherer Herstellung waren auch noch die Systembilder der inneren radialen Freistrahlturbine (Schwamkrugturbine) sowie der Verbundturbine aufgenommen. Diese Turbinensysteme sind seit einigen Jahren verlassen, nachdem es gelungen ist, die früher bestehende Lücke zwischen den Pelton- und Francisturbinen auszufüllen teils durch Anwendung von Pelton- und Francisturbinen mit höheren, teils durch Konstruktion von Francisturbinen mit niedrigeren Drehzahlen.

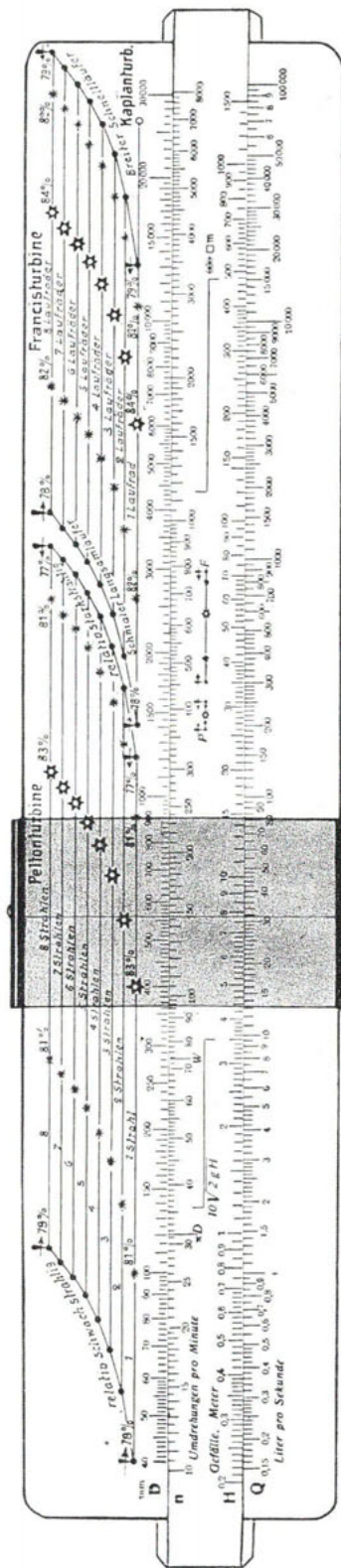


Fig. 1. Turbinenrechnenschieber in Kartonausführung.

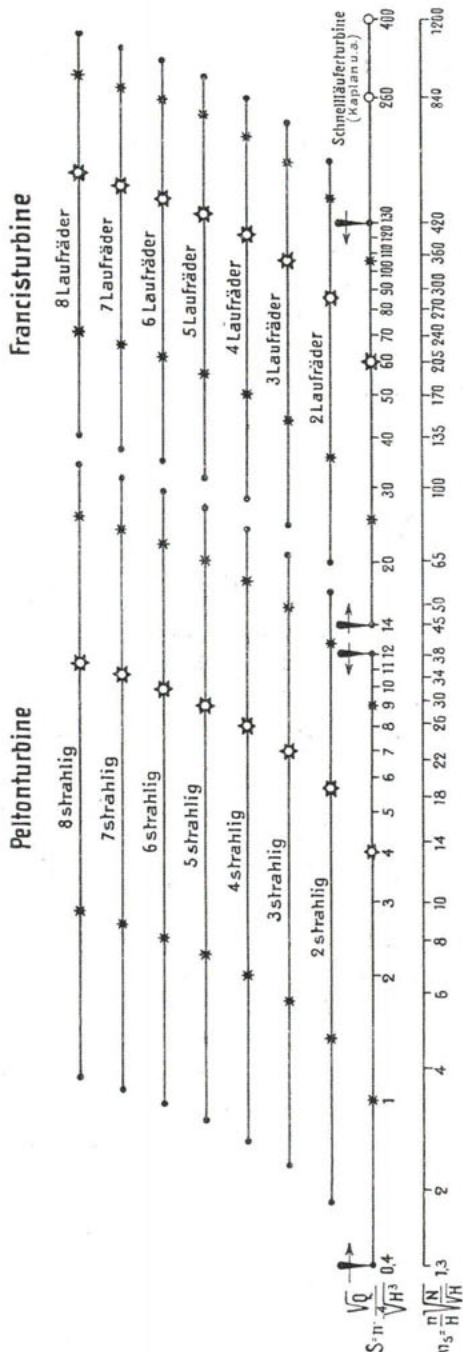


Fig. 2. Systembilder.

benen Werte. Gleichartige Zeichen in den Systembildern haben durchweg gleiche Wirkungsgradziffer¹⁾).

Am Systembild der Freistrahlturbine steht das Wort „Pelton-turbine“, am Francisbild das Wort „Francisturbine“. Die Grenzen des Peltonbildes sind demnach durch die Worte:

„relativ schwachstrahlig“ (untere Grenze),

„relativ starkstrahlig“ (obere Grenze)

charakterisiert, wodurch angedeutet werden soll, daß hier die Strahldurchmesser bzw. die Strahlabmessungen gegenüber den Laufrad-Durchmessern klein bzw. groß sind. Die Grenzbemerkungen des Francisbildes:

„Schmaler Langsamläufer“ (untere Grenze),

„Breiter Schnelläufer“ (obere Grenze)

bedürfen keiner Erläuterung. An das Francisbild schließen — etwa die spez. Drehzahlen 400—1200 umfassend — die Schnellläuferturbinen an.

Der Turbinenrechenschieber läßt sich zur Lösung verschiedener Probleme benützen. Er ist ein wertvolles Hilfsmittel beim Entwerfen von Wasserkraftanlagen und gibt dem projektierenden Ingenieur die Möglichkeit, in außerordentlich kurzer Zeit und ohne besondere Berechnungen sich über die für gegebene Wasser- und Gefällverhältnisse zweckmäßigste Turbinenart und Turbinengröße klar zu werden.

Über seine Anwendung für diese Zwecke sind in den folgenden Kapiteln, in welchen das Vorgehen bei Projektierung von Turbinen- und Wasserkraftanlagen entwickelt wird, die nötigen Erläuterungen gegeben.

§ 2. Verwendung als gewöhnlicher Rechenschieber.

Für überschlägige Berechnungen können auf dem Turbinenrechenschieber auch alle Rechnungen ausgeführt werden, zu welchen im allgemeinen der gewöhnliche Schieber benützt wird.

Die Skalen D , n und Q sind zu diesem Zwecke so zusammengestellt, daß sie einen gewöhnlichen Rechenschieber bilden, sofern man sich nur die eingeschriebenen Ziffern durch Weglassung von Nullen usw. durchweg auf das reduziert denkt, was an den Skalen gewöhnlicher Rechenschieber angeschrieben ist. Multiplikationen und Divisionen werden auf den Skalen D und n vorgenommen, genau, wie mit dem gewöhnlichen Rechenschieber, dessen Gebrauch hier als bekannt vorausgesetzt

¹⁾ Die Wirkungsgrade entsprechen Turbinen heutiger Konstruktion und Herstellung. Näheres über die Wirkungsgradziffern und ihr Verhältnis zu Bauart und Beaufschlagung der Turbinen enthält das V. Kapitel.

wird. Um eine Zahl ins Quadrat zu erheben, sucht man sie auf der Skala D auf (vom Komma ist abzusehen), geht senkrecht herunter auf die Skala Q und liest dort das Quadrat ab; das Komma ist wie beim gewöhnlichen Rechenschieber durch Schätzung festzulegen. Die Quadratwurzel aus einer Zahl erhält man durch den umgekehrten Weg, dabei ist wie beim gewöhnlichen Rechenschieber mit einiger Überlegung zu verfahren. Zur Berechnung von dritten Potenzen und dritten Wurzeln wird beim Kartonschieber die Zunge verkehrt, aber mit Oberseite nach oben, eingeschoben, so daß längs der Skala Q die verkehrte Hauptskala n vorbeiläuft. Um eine Zahl auf die dritte Potenz zu erheben, sucht man sie auf der Skala Q auf (vom Komma abzusehen), schiebt eine gleichnamige Zahl der verkehrten Hauptskala n darüber und liest auf der Skala Q an einer der Einserstellen der Skala n (10, 100, 1000, 10000) die dritte Potenz ab.

Die dritte Wurzel aus einer gegebenen Zahl ergibt sich, indem man die Zahl auf der Skala Q aufsucht (vom Komma abzusehen), eine Einserstelle der verkehrten Skala n darüber schiebt und nun die Stellen aufsucht, an welchen die Ziffernangabe (absolut genommen) der beiden Skalen übereinstimmt und dort abliest. Durch Schätzung ist festzustellen, welche der verschiedenen Stellen, die sich dabei darbieten, zu nehmen ist. Schiebt man z. B. eine Einserstelle der verkehrten Skala n über eine Achterstelle von Q , so sieht man sofort, entsprechend

$$\sqrt[3]{8} = 2$$

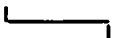
Übereinstimmung bei Zweierstellen und kann weiterhin an den übrigen übereinstimmenden Stellen ablesen.

$$\sqrt[3]{80} = 4,3 \qquad \sqrt[3]{800} = 9,3.$$

Auf der Skala n ist ferner bei $n = 31,416$ ein π -Strich markiert. Man kann damit in bekannter Weise Kreisumfänge πD berechnen: Man schiebt den Skalenanfang $n = 10$ unter den gegebenen, auf der Skala D aufgesuchten Durchmesser (Millimeter) und liest bei diesem π -Strich den gesuchten Kreisumfang auf der Skala D unmittelbar in Millimetern ab.

Kreisinhalte berechnet man mit Hilfe der zwei zusammengehörigen Zeichen , die sich auf der rechten Hälfte der Zungenoberseite befinden. Ist ein Durchmesser in Millimetern gegeben und soll dazu der Kreisinhalt gefunden werden, so schiebt man den nach oben weisenden Vertikalstrich dieses Doppelzeichens unter den auf der Skala D aufgesuchten Durchmesser in Millimetern und liest an dem nach unten

weisenden Vertikalstrich die Ziffernangabe der Skala Q ab. Durch Abstreichen von drei Stellen erhält man daraus den Kreisinhalt in Quadratmetern. Auf dem Schieber ist die Abstreichung der drei Stellen durch die Inschrift an dem Zeichen symbolisch ausgedrückt. Durch Anfügung einer Stelle an die Ziffernangabe erhält man den Kreisinhalt in Quadratzentimetern und durch Anfügung von drei Stellen in Quadratmillimetern. Das Vorgehen bei Umkehrung der Rechnung bedarf keiner weiteren Erläuterung.

Das auf der Zungenoberseite links befindliche Zeichen  dient zur Bestimmung der Größe $\sqrt{2gH}$. Es ist dies bekanntlich die ideelle Geschwindigkeit eines unter dem Gefälle H frei ausströmenden Wasserstrahls; die Kenntnis dieser Geschwindigkeit ist bei der Turbinenberechnung notwendig. Man schiebt den nach unten weisenden Vertikalstrich dieses Zeichens über den auf der Skala Q aufgesuchten Gefällswert H in Metern und liest auf der Skala D den Ziffernwert ab, den der nach oben weisende Vertikalstrich anzeigt. Dieser letztere Wert, mit 10 dividiert, gibt die Geschwindigkeit $\sqrt{2gH}$ in Metern pro Sekunde (berechnet mit $g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

I. Kapitel.

Projektierung einer Turbine.

§ 3. Bestimmung des Turbinensystems.

Zur Beurteilung einer Wasserkraft dienen in erster Linie das Netto-
gefälle H und die Nutzwassermenge Q . Aus diesen beiden Faktoren
läßt sich unter Zugrundelegung eines Turbinenwirkungsgrades $\eta_t = 0,75$
sofort die ungefähre Leistung der Wasserkraft bestimmen aus:

$$N_{\text{eff}} = 10 \cdot Q \cdot H \text{ in PS} \dots \dots \dots (1)$$

Bei Beginn der Projektierungsarbeiten ist im allgemeinen das
Nettogefälle H noch unbekannt und muß erst aus dem Bruttogefälle
berechnet werden. Als Bruttogefälle bezeichnet man den betriebs-

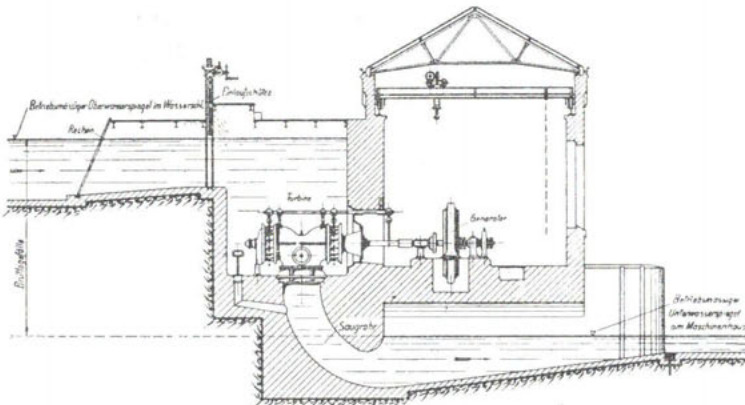


Fig. 3. Francisturbine im offenen Schacht.

mäßigen Höhenunterschied zwischen Oberwasserspiegel im Wasserschloß,
Vorbecken u. dgl. und zwischen Unterwasserspiegel am Maschinenhaus
(vgl. Fig. 3, 4 und 5). Der Ausdruck „betriebsmäßig“ bedeutet, daß für
beide Spiegel die Höhenlage bei normalem Wasserdurchfluß im Ober-

und Unterwasserkanal in Rechnung zu setzen ist. Aus diesem Bruttogefälle muß man das Nettogefälle berechnen und hat dabei folgende drei Fälle zu unterscheiden:

- Fall I. Francisturbinen im offenen Schacht (Fig. 3).¹⁾
- Fall II. Francisturbinen im geschlossenen Gehäuse, denen das Wasser durch eine Druckrohrleitung zugeführt wird (Fig. 4).
- Fall III. Freistrahlturbinen, denen das Wasser ebenfalls durch eine Druckrohrleitung zugeführt wird (Fig. 5).

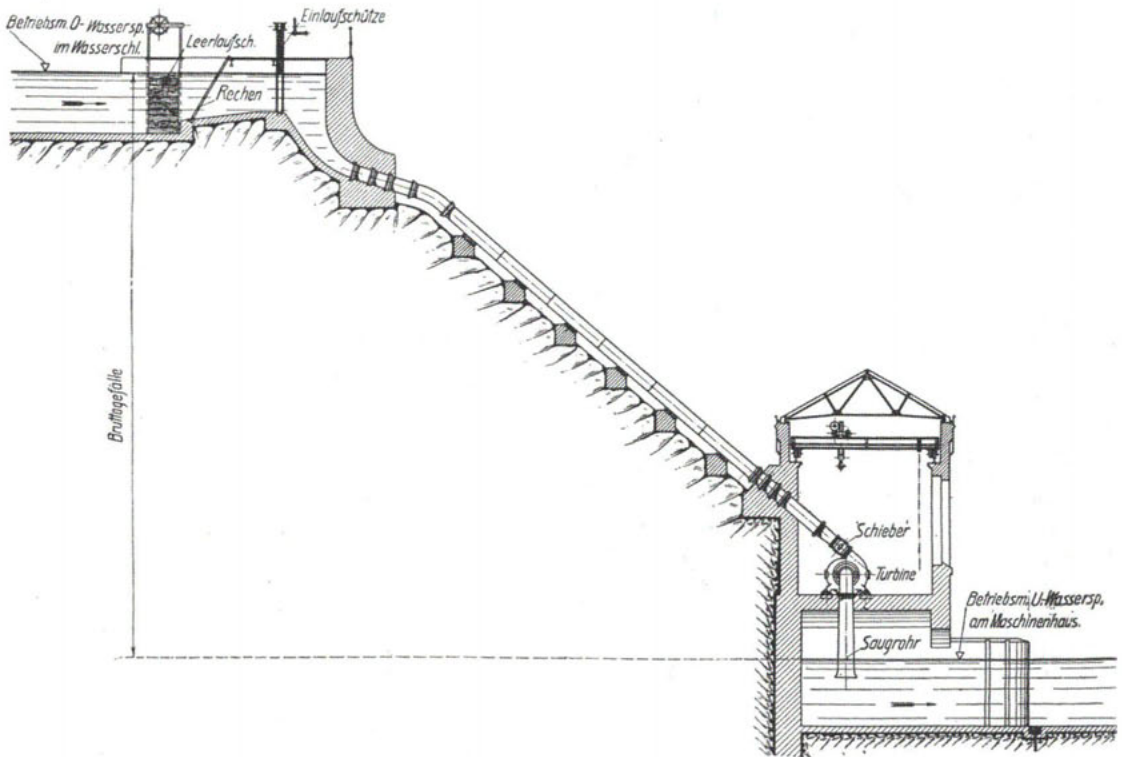


Fig. 4. Francisturbine im geschlossenen Gehäuse.

Im ersten Fall (Fig. 3) ist das Nettogefälle gleich dem Bruttogefälle abzüglich der Spiegelsenkung, welche entsteht, wenn das Wasser mit normaler Geschwindigkeit den Rechen im Wasserschloß passiert.

¹⁾ Fall I gilt auch für Schnellläufturbinen, insbesondere Kaplanurbinen.

Das Nettogefälle im zweiten Fall (Fig. 4) ist gleich dem Bruttogefälle weniger folgende Gefällsverluste:

1. Gefällsverlust durch Passieren des Rechens.
2. Gefällsverlust durch die Widerstände beim Passieren des Rohreinlaufs.
3. Druckverlust verursacht durch die Reibung des strömenden Wassers in der Druckrohrleitung vom Wasserschloß bis zum Abschlußorgan vor der Turbine.
4. Druckverlust verursacht durch Passieren der in der Rohrleitung vorkommenden Krümmer.
5. Druckverlust verursacht durch Passieren des Abschlußorgans vor der Turbine (Drosselklappe, Wasserschieber).

Die Bestimmung aller dieser Verluste wird später eingehend erörtert werden.

Im dritten Fall (Fig. 5) hat man vom Bruttogefälle wieder die oben-erwähnten Druckverluste 1—5 abzuziehen; außerdem kommt aber hier im allgemeinen noch ein weiterer Verlust in Abzug:

6. Gefällsverlust durch Freihängen der Turbine.

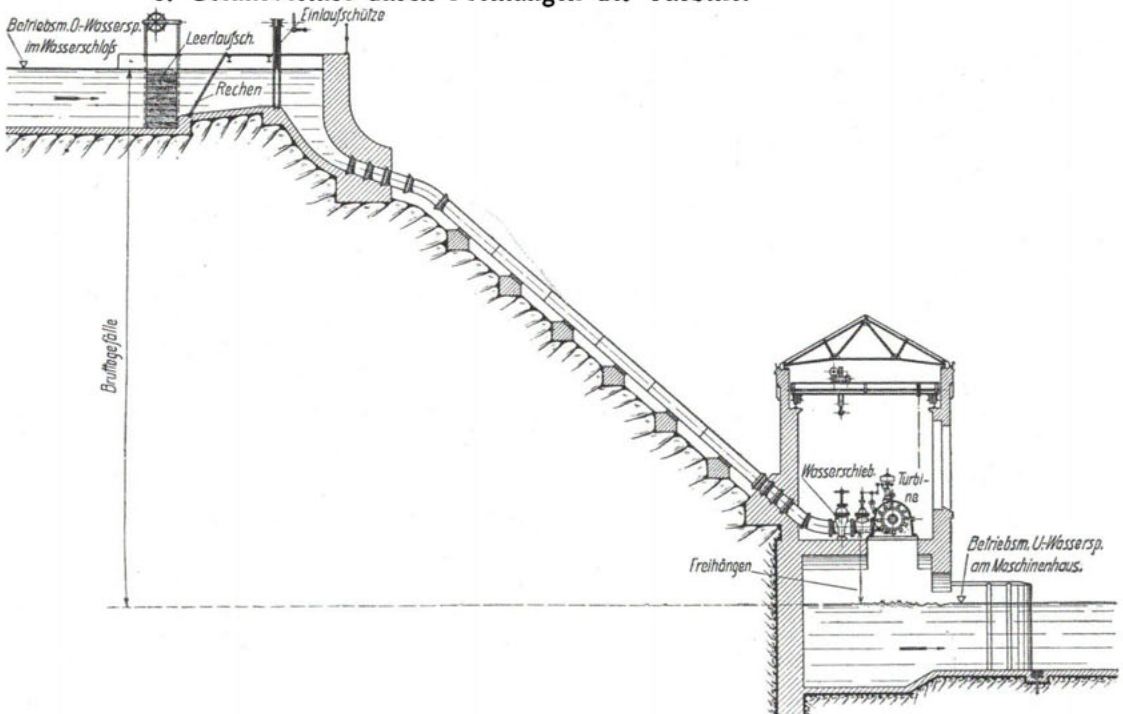


Fig. 5. Freistrahlturbine mit Druckrohrleitung.

Unter Freihängen versteht man den Abstand von Düsenmündung bis Unterwasserspiegel. Da bei Projektarbeiten die genaue Höhenlage der Düsen gewöhnlich noch nicht bekannt ist, so vernachlässigt man den geringen Unterschied in der Höhenlage von Düse und Maschinenhausflur und setzt für das Freihängen vorläufig die Entfernung von Maschinenhausflur bis Unterwasserspiegel in Rechnung. Daß dieser sechste Verlust hier noch hinzukommt, rührt daher, daß die Freistrahlturbine im Gegensatz zur Francisturbine gewöhnlich ohne Saugrohr arbeitet. Das Saugrohr ermöglicht in den beiden Fällen I und II (Fig. 3 u. 4) die Ausnützung auch der Gefällsstrecke von der Turbine abwärts bis zum Unterwasser. Bei der Freistrahlturbine ist dies im allgemeinen nicht angängig, weil hier infolge Wegfalls des inneren Überdruckes eine zwangsweise Führung des Wassers zwischen Laufrad und Unterwasser fehlt und durch das Ansteigen des Unterwassers in einem Saugrohr infolge des Rückdruckes auf die Laufschaufeln erhebliche Störungen im Arbeitsprozeß auftreten würden (sogen. Waten des Turbinenlaufrades). Es muß daher hier diese Gefällsstrecke als Verlust aufgefaßt werden. Man kann allerdings auch im Falle III durch besondere Konstruktion des Ausgußschachtes Saugwirkung erzielen und dadurch erreichen, daß ein Teil des Freihängens als Sauggefälle zur Wirkung kommt. Hierbei ist jedoch der Einbau von Belüftungsvorrichtungen erforderlich, der die Turbinenkonstruktion wieder kompliziert. Es wird daher meist von der Ausnützung der Saugwirkung abgesehen, umso mehr als bei den hier in Betracht kommenden größeren Gefällen der Freihang verhältnismäßig wenig ausmacht.

In die Fälle I, II, III lassen sich alle in der Praxis vorkommenden Turbinenprojekte einreihen. Die erste Aufgabe bei einem vorliegenden Projekt ist, an Hand des Bruttogefälles und der übrigen Daten zu untersuchen, welcher von den Fällen I, II und III in Betracht kommt, um dann das Nettogefälle H zu berechnen. Diese Voruntersuchung kann, wie im folgenden gezeigt wird, durch Berechnung der spez. Drehzahl (siehe Seite 13) und mit Hilfe der Tafeln II und III, oder in einfacher und übersichtlicher Weise mit dem Turbinenrechenschieber ausgeführt werden.

Es sei nun das Nettogefälle H gefunden, ferner sei die sekundliche Wassermenge Q der Turbine und die von ihr verlangte Umdrehungszahl n gegeben; gewünscht ist Auskunft über System und Wirkungsgrad der Turbine. Man verfährt folgendermaßen:

Man stellt die Zunge des Turbinenrechenschiebers mit Oberseite nach oben so ein, daß der Wert H Meter (Hauptskala H) genau über den gegebenen Wert Q Liter pro Sekunde (Hauptskala Q) zu stehen kommt; dann nimmt die Hauptskala n gegenüber den Systembildern eine solche

Lage ein, daß unter bzw. über jedem Systembild die zur bezüglichen Turbinenart passenden Umdrehungszahlen stehen. Man sucht also auf der Hauptskala n den Wert n Umdr./Min. auf, schiebt den Strich des Läufers darüber und sieht nach, welche Systemfigur und welcher Systemzug vom Läuferstrich durchschnitten wird. Dieser Strich schneidet meistens eine ganze Reihe von Systemzügen, und zwar, wie man sofort erkennt, in Punkten von verschieden guter Systemlage. Man hat nun, nachdem man aus der Bezeichnung des in Frage kommenden Systembilds das für den vorliegenden Fall passende Turbinensystem erkannt hat, unter den verschiedenen sich anbietenden Systemzügen zu wählen einerseits so, daß der Wirkungsgrad der Turbine ein möglichst guter wird, d. h. so, daß der gewählte Systempunkt möglichst nahe dem großen Stern seines Zuges oder wenigstens noch innerhalb des Sterngebiets liegt; anderseits ist jedoch zu beachten, daß in allen Systembildern diejenigen Züge, welche am nächsten der Skala n liegen, den Vorzug verdienen, denn sie geben die konstruktiv einfachsten Maschinen. Z. B. gibt, wie aus den Inschriften Tafel I, Fig. 1 hervorgeht, der erste Strich über n die Einstrahlpeltonturbine beziehungsweise die einfache Francisturbine; beim zweiten Strich hat man Maschinen mit Zweiteilung der Wassermenge: Zweistrahlpeltonturbine und Doppel- oder Zwillingsfrancisturbine, beim dritten Strich die Dreistrahlpeltonturbine und die dreifache Francisturbine usw. Wenn nun auch in manchen Fällen Teilung des Wassers, namentlich Zweiteilung bei Francisturbinen, ganz zweckmäßig sein kann, so empfiehlt es sich doch, mit der Unterteilung der Wassermenge nicht zu weit zu gehen, weil sonst die Maschinen und ihre Reguliervorrichtungen zu kompliziert werden. Aus diesem Grunde wird man sich häufig mit Systempunkten begnügen, die nicht mehr am großen Stern liegen, und eventuell bei weniger wichtigen Fällen auch mit Lagen außerhalb des Sterngebiets vorliebnehmen, wenn man hierdurch billigere und einfachere Maschinen erhält¹⁾.

Die Art der Untersuchung mittels des Rechenschiebers bzw. das Auffinden des passenden Turbinensystemes für einen bestimmten Fall gründet sich auf die von Ingenieur Holl veröffentlichten Untersuchungen über die Anwendungsgebiete von Turbinen, insbesondere von Freistrah- und Francisturbinen²⁾. Die Art jeder Turbine ist hiernach bestimmt

¹⁾ Die konstruktive Durchbildung der Freistrahlturbinen und Francisturbinen sowie deren Abarten ist heute so weit vorgeschritten, daß man für alle Fälle Turbinen günstigen Wirkungsgrades bauen kann und daher nur ausnahmsweise auf die Grenzlagen zurückgreifen muß. Auch geht man selten über Freistrahlturbinen mit 4 Strahlen oder Francisturbinen mit 4 Laufrädern hinaus.

²⁾ Näheres hierüber siehe Holl, „Die Wasserturbinen“, Sammlung Götschen, Band I und II.

durch ihre „Systemziffer“, d. h. eine nur von den Bestimmungselementen einer Turbine Q , H und n abhängige Verhältniszahl, durch welche die Grenzen der praktisch ausführbaren Konstruktionen, unter besonderer Berücksichtigung der Umfangsgeschwindigkeit, des Laufraddurchmessers u. dgl. gekennzeichnet werden.

Die Größe der Systemziffer ergibt sich nach Holl zu:

$$S = \frac{n \sqrt[3]{Q}}{\sqrt[3]{H^3}} = n_1 \sqrt[3]{Q_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

wenn mit n_1 und Q_1 die auf das Gefälle 1 m bezogene Umdrehungszahl und Wassermenge bezeichnet werden¹⁾.

Für die einstrahlige Peltonturbine werden innerhalb der Grenzen $S_{\min} \cong 0,4$ und $S_{\max} \cong 12$ noch brauchbare Wirkungsgrade erreicht. Für mehrstrahlige (n -strahlige) Turbinen ergeben sich gleiche Verhältnisse wie bei der einstrahligen Turbine bei einer um das $\sqrt[n]{n}$ fache erhöhten Systemziffer.

An das Gebiet der Freistrahlturbinen schließt sich heute unmittelbar das Gebiet der Francisturbinen an. Für die Francisturbine mit einem Laufrad ergeben Systemziffern von 14 bis über 130 brauchbare Wirkungsgrade, und zwar entsprechen die kleineren Systemziffern den langsam laufenden Turbinen (kleines n_1) die höheren Systemziffern den schnell laufenden Turbinen (großes n_1). Für Turbinen mit mehreren (m) Laufrädern erhöhen sich die Systemziffern wieder um das $\sqrt[m]{m}$ fache gegenüber gleichen Turbinen mit einem Laufrad.

Turbinen mit höheren Systemziffern als 130 bzw. mit höherer spezifischer Drehzahl als 420 werden als Schnellläuferturbinen bezeichnet. Sie erstrecken sich über das Gebiet von $S = 130$ bis etwa 400 und sind in erster Linie durch Kaplan, sodann durch Escher, Wyss, Voith, Lawaczeck u. a. entwickelt worden. Auch in Amerika wurden entsprechende Typen ausgebildet. Eine größere Bedeutung erlangten hievon die Flügel- oder Propeller-Turbinen, sowie die eigentlichen Kaplan-Turbinen, die sich von den Propeller-Turbinen durch eine etwas geringere Schaufelzahl, hauptsächlich aber durch die Drehbarkeit der Laufschaufeln unterscheiden. Diese Turbinen werden in der Regel mit nur einem Laufrad gebaut. Sie eignen sich wegen ihrer hohen Schnellläufigkeit besonders für niedrige Gefälle.

¹⁾ Im folgenden bedeutet der einer Größe angefügte Index 1 stets, daß sich dieselbe auf eine Turbine mit einem Rad bzw. mit einem Strahl und mit dem Gefälle 1 m bezieht.