

---

# Wasserkraftanlagen

---

Jürgen Giesecke • Stephan Heimerl  
Emil Mosonyi<sup>†</sup>

# Wasserkraftanlagen

Planung, Bau und Betrieb

6., aktualisierte und erweiterte Auflage

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h.  
Jürgen Giesecke  
Universität Stuttgart  
Institut für Wasser- und  
Umweltsystemmodellierung  
Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Stuttgart, Deutschland

Professor em. Dr. techn. habil. Dr. sc. techn.  
Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. mult. Emil Mosonyi<sup>f</sup>

Dr.-Ing. Stephan Heimerl  
Fichtner Water and Transportation GmbH  
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-642-53870-4  
DOI 10.1007/978-3-642-53871-1

ISBN 978-3-642-53871-1 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, 1998, 2003, 2005, 2009, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

## Vorwort zur 6. Auflage

Vor rund eineinhalb Jahrzehnten erschien im Jahr 1997 erstmals die vorliegende, neu konzipierte Buchveröffentlichung. Den Ausgangspunkt bildeten einige Fachbücher von Emil Mosonyi, die in ungarischer, englischer und deutscher Sprache abgefasst waren und vielseitige Schwerpunkte der Wasserkraftnutzung abhandelten. Nach einem langen und erfüllten Leben verstarb Herr Professor em. Dr. techn. habil. Dr. sc. techn. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. mult. Emil Mosonyi am 24. April 2009 im 99. Lebensjahr während der Endbearbeitung der 5. Auflage. Bis zuletzt begleitete er in geistiger Frische und mit ausgeprägter Willensstärke die seitherigen fünf Auflagen, die aufgrund einer ungebrochen starken Nachfrage binnen zwölf Jahren ständig aktualisiert und mit über der Hälfte des anfänglichen Buchumfanges zur Anpassung an die technischen Fortschritte erweitert worden sind.

Jede persönliche Begegnung mit Emil Mosonyi war eine Bereicherung dank seiner lebenswürdigen Ausstrahlung und menschlichen Wärme, aber auch dank seiner ingenieurwissenschaftlichen Begabung und seines vorausschauenden, visionären Verstandes. Seine weltweiten Freunde und Fachkollegen aus der Wasserbaupraxis, Forschung und Lehre verloren mit ihm eine herausragende Persönlichkeit der Zeitgeschichte. Ihrer werden wir alle in Hochachtung, Dankbarkeit und Verehrung gedenken. Möge das nunmehrige, umfassende Werk in der 6. Auflage als bleibendes Vermächtnis des großen Altmeisters des Wasserbaus allseits betrachtet werden.

Von Anfang an brachte sich Dr.-Ing. Stephan Heimerl im Rahmen seiner hervorragenden Ausbildung und wissenschaftlichen Qualifikation sowie seiner eindrucksvollen baupraktischen Erfahrungsfülle in die fachkompetente Mitarbeit an den Buchausgaben ein. Mit seiner inzwischen erlangten eigenständigen Mitwirkung als Koautor trägt er zur anerkannten Qualität dieses Standardwerkes bei.

Wenngleich die Wasserkraft eine seit Jahrtausenden althergebrachte, hocheffiziente Energiequelle ist, gilt es doch, permanent neu gewonnene Erkenntnisse und technische Weiterentwicklungen aufzugreifen, die der faszinierenden Nutzung dieser erneuerbaren Energie vielfältige Impulse verleihen. Dieser Tatsache trägt wiederum die vorliegende 6. Auflage Rechnung. So wurden einschlägige Statistiken, tabellarische Übersichten und Zahlenangaben fortgeschrieben. Sie beziehen sich insbesondere auf Wasserkraftpotenziale, Projektentwicklungen und Projektimplementierungen, auf Risikoanalysen sowie ökonomische Bewertungen. Erweitert wurden ebenso die Umstellungen der Eurocode-Reihen, der maßgebenden Vertragswerke und der technischen Normen, Richtlinien und Vorgaben im nationalen und internationalen Umfeld.

Eine weitgehende Überarbeitung erfuhren darüber hinaus insbesondere die Abschnitte über Triebwassersysteme, Sedimentmanagement, hydraulische Strömungsmaschinen für kleine Durchflüsse und niedrige Fallhöhen, über Energiespeicherung, vor allem Pumpspeicherkraftwerke, über das Stromverbundnetz, ferner über Fischaufstiegsanlagen und Fischabstiegsanlagen sowie über den generellen Fischschutz. Eine Vielzahl kleinerer Ergänzungen und textlicher Abrundungen bisheriger Buchinhalte traten hinzu. Manche dieser Verbesserungen und Weiterentwicklungen gehen auf Anregungen aus dem Leserkreis und nicht zuletzt auf

Fachveröffentlichungen zurück, die dankbar aufgenommen und eingearbeitet worden sind.

Erneut erweisen wir dem hochangesehenen Springer Verlag unseren großen Dank für das stets bekundete Wohlwollen, für die Förderung des gesamten Vorhabens und für die wiederum ansprechende Gestaltung des Buches.

Stuttgart, im November 2013

Jürgen Giesecke und Stephan Heimerl

## Vorwort zur 5. Auflage

Erfreulicherweise war bereits binnen zweier Jahre die 2005 erschienene 4. Auflage des vorliegenden Buches vergriffen, so dass ein Nachdruck dieser Ausgabe notwendig geworden war. Parallel dazu wurde diese 5. Auflage angegangen, bei der einige aufwendigere Punkte anstanden. So wurde das gesamte Werk auf die am 1. August 2006 per Gesetz in Kraft getretene Neuregelung der deutschen Rechtschreibung abgestimmt. Ebenso wurden die technischen Sachverhalte geprüft, wobei - wie auch bei den vorhergehenden Auflagen - die wissenschaftlichen und praxisnahen Fortschritte sowie Neufassungen von maßgebenden Richtlinien, Normen und Gesetzesvorgaben zu berücksichtigen waren. Schließlich wurden auch die zahlreichen konstruktiven Anregungen etlicher Kolleginnen und Kollegen aufgegriffen, die uns dankenswerterweise übermittelt wurden.

Die hiernach auszurichtende 5. Auflage liegt in stärkerer Überarbeitung nunmehr vor und dürfte weitere Leserkreise erschließen.

Beispielhaft sind für die insgesamt gut 60 Seiten umfassende Erweiterung zu nennen: die gesamtgesellschaftliche Bewertung von Wasserkraftanlagen, die Sondernutzungsarten in Form der Meeresenergie oder der unterirdischen Gewässersysteme, der Umgang mit Rechengut, die Bemessung von Sandfängen, einige Gesichtspunkte zu Druckrohrleitungen und deren Bemessung, konstruktive Details bei Krafthäusern, eine Erweiterung im Bereich Arbeitssicherheit und Betrieb, diverse Weiterentwicklungen bei Turbinen und Wasserrädern sowie zusätzliche Aspekte bei elektrischen Verbundsystemen. Des weiteren wurden vor allem verschiedene Umwelt-Gesichtspunkte zu Feststoffmanagement, Schwall-Sunk-Erscheinungen, Temperatur- und Sauerstoffregime etc., neuere Erkenntnisse bei der Modellierung von Mindestwasserfragestellungen im Bereich von Gewässersohle und benthischen Organismen sowie einige Punkte bei Fischaufstiegsanlagen ergänzt. Schließlich wurden auch die Beispielanlagen fortgeschrieben sowie um die Mehrzweckanlage Tiszalök und die Kleinwasserkraftanlage Vöhrenbach mit der Gewölbereihenmauer Linach erweitert.

Es war ein besonderer Wunsch, bei der umfassenden Aufgabe der Aktualisierung und Fortschreibung dieses Buches Herrn Dr.-Ing. Stephan Heimerl in vollem Umfang einzubeziehen. Dabei sind wir ihm zu tiefstem Dank verpflichtet. In vielfältiger Weise brachte er seine beachtliche Fachkompetenz und seine umfassenden, in der Wasserbaupraxis gewonnenen Erfahrungen ein. Seit über einem Jahrzehnt der Mitwirkung an den Buchauflagen zeichnet er sich durch ein hohes Maß an Einsatzfreude, aktiver und kritischer Mitarbeit an den Buchkapiteln, ferner durch Organi-

sationsgeschick, Zuverlässigkeit und nicht zuletzt durch die Übernahme des gesamten Layouts aus.

Dem weltweit renommierten Springer-Verlag gebühren unser Dank und unsere Anerkennung für die stets erwiesene Unterstützung sowie für die gewohnt hervorragende Ausstattung der umfangreichen Buchveröffentlichung.

Stuttgart/Karlsruhe, im Februar 2009

Jürgen Giesecke und Emil Mosonyi

## Vorwort zur 3. Auflage

Im Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit nimmt der Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen - Boden, Wasser, Luft - eine herausragende Stellung ein. So ist es u. a. das Ziel der Wasserwirtschaft, die Gewässer als Lebensraum zu sichern. In gleichem Sinne hat sich die Deckung des Energiebedarfes unter weitgehender Schonung der Umwelt zu einer zentralen Frage der Menschheit entwickelt, wobei nach Möglichkeit heimische Energiequellen zu nutzen sind. Eine ideale Energiequelle sollte unerschöpflich, umweltverträglich, vielerorts verfügbar und kostengünstig sein. In hohem Maße entspricht diesen Kriterien die viele Vorteile bietende Wasserkraft. Sie zählt vorrangig zu den umweltfreundlichen, ständig erneuerbaren Energieressourcen.

Wasserkraft bedeutet unerschöpfliche Sonnenenergie. Die Sonne hält den Wasserkreislauf mit Verdunstung, Wolkenbildung, Niederschlag und Abfluss aufrecht. Solange Wassermassen ein Gefälle zum Meeresniveau haben, enthalten sie potenzielle Energie. Das Wesen der Wasserkraftnutzung beruht in der Fähigkeit des fallenden Wassers, Arbeit zu verrichten, und so wandeln Wasserkraftwerke die Schwereenergie in eine Bewegungsenergie bis hin zur Gewinnung elektrischen Stromes um.

Seit mehr als vier Jahrtausenden ist die Wasserkraftnutzung zur Arbeitserleichterung des Menschen bekannt. Wasserräder zur Umwandlung der kinetischen Energie des strömenden Wassers in mechanische Energie lassen sich bis in das 3. Jahrtausend v. Chr. in China und im Vorderen Orient zurückverfolgen. Eine europaweite Verbreitung begann im frühen Mittelalter. Wasserräder dienen für Getreidemühlen, Schleifereien, Säge-, Stampf- und Hammerwerke. Im 19. Jahrhundert setzte die Entwicklung von Wasserturbinen bzw. Turbinen ein. Das dynamoelektrische Prinzip wurde entdeckt. Als am 12. September 1891 anlässlich einer internationalen Elektrizitätsausstellung in Frankfurt/Main 1.000 Glühbirnen zu leuchten und ein 10 m hoher, künstlicher Wasserfall zu sprudeln begannen, war der Durchbruch für die Fernübertragung elektrischen Stromes, hier vom 175 km entfernten Flusskraftwerk Lauffen/Neckar, mit 25-kV-Drehstromübertragung geschafft.

Wesentliche Elemente der bautechnischen Auslegung sind je nach Wasserkraftanlagentyp Wasserfassung, Stau- und Speicherbecken, Hochwasserentlastung und Betriebsauslass, Sandfang und Triebwasserleitung, Stollen- und Druckschacht, Verteilrohrleitung, Wasserschloss und Krafthaus bzw. Kraftwerkskaverne. Bedeutende Elemente des Maschinenbaues sind Regel- und Verschlussorgane sowie hydraulische Maschinen, also Turbinen und Speicherpumpen. Schließlich sind gewich-

tige Elemente der elektrotechnischen Ausrüstung Generatoren, Transformatoren, Schaltanlagen, Leit- und Steuerungstechnik.

Wasserkraftnutzung bedeutet wie jede andere technische Anlage und wie jede menschliche Zivilisation überhaupt einen Eingriff in die Natur, sei es durch den Aufstau oder durch die Ausleitung von Wasser in einem Fließgewässer, durch die Einschränkung der Wasserführung und der Durchgängigkeit für Fische und andere Gewässerorganismen, sei es durch Fischausfall in Turbinen oder durch die Störung und Beeinträchtigung ursprünglicher, aquatischer Lebensgemeinschaften. Handlungsbedarf ergibt sich hieraus für die Erhaltung oder Wiederherstellung ökologisch funktionsfähiger Lebensräume und damit für eine ausgewogene Abstimmung von Energienutzung und ökologischem Gleichgewicht, von neugestaltendem Wasserbau und Landschaftsschutz.

Aus der Verbindung der Wasserkraft mit einer übergreifenden Wasserwirtschaft, der Mehrzweckaufgaben und dem Hochwasserschutz, resultieren weite Aufgabengebiete der Modernisierung, der Erweiterung oder des Neubaus von Wasserkraftanlagen unterschiedlicher Größe. Auch die Wiederinbetriebnahme stillgelegter Kleinwasserkraftwerke zur dezentralen Stromversorgung trägt zum Umweltschutz bei. Entscheidend sind hierbei Akzeptanz, Wirtschaftlichkeit und rechtliche Rahmenbedingungen.

Dieser Tatsache trägt das vorliegende Buch Rechnung. Sein inhaltlicher Aufbau folgt den vorstehenden Gesichtspunkten für die Rangordnung der Wasserkraft innerhalb der konkurrierenden Energiequellen, für Umweltverträglichkeit und Planungsgrundsätze, Bauausführung und Betrieb. Es stützt sich partiell auf das zuletzt in der 3. Auflage erschienene, englischsprachige Standardwerk „Water Power Development“ von Emil Mosonyi. Dieses umfasst die Einzelbände 1: „Low Head Power Plants“, Ausgabe 1984, und 2/A + B: „High Head Power Plants“, Ausgabe 1991, mit insgesamt 2.165 Seiten. Die Bände erschienen im Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Akadémiai Kiadó, Budapest. Vorläufer waren bis in die 50er Jahre zurückreichende Fachbücher des Autors in ungarischer, deutscher und englischer Sprache.

Die vorliegende, gänzlich neu gefasste Buchveröffentlichung, die binnen sechs Jahren in drei Auflagen jeweils erheblich erweitert worden ist, verfolgt das Ziel, einen möglichst großen Kreis von Wasserbauingenieuren anzusprechen, ob als Planer, Konstrukteur, Bau- oder Betriebsleiter, ob im Consulting-Bereich, in der Bauwirtschaft, in staatlichen oder kommunalen Aufsichtsbehörden oder in der Wissenschaft tätig, ob in seiner Eigenschaft als Student oder Spezialist. Der Leitgedanke war, nicht nur Theorie und praktische Umsetzung zusammenzuführen, sondern ebenso die Fülle an Erfahrungen der beiden Autoren aus der Berufspraxis im Wasserbau, aus der Lehre und Forschung sowie aus der Tätigkeit als Beratender Ingenieur und Gutachter internationaler Finanzierungsinstitutionen einzubringen. So sehr hierfür der Buchumfang in Grenzen zu halten war, wurde dennoch auf eine geschlossene, vor allem anschauliche und nachvollziehbare Darstellung der Einzelthemen und der komplexen Zusammenhänge geachtet.

In dieser Absicht einer gesamtheitlichen Wiedergabe der theoretischen Grundlagen, Bemessungsansätze, Planungsziele, Konstruktion, Bauausführung und Inbetriebnahme, aber auch der Grundsätze für eine umweltfreundliche Auslegung und Gestaltung der Wasserkraftanlage, wurden der maschinen- und elektrotechnischen

Ausrüstung gebührender Platz eingeräumt. Das Buch sollte zudem für diesen Bereich der Ingenieurwissenschaften dem Leser zumindest die einschlägige Vorplanung ermöglichen, um nicht nur die Gesamtplanung eines Wasserkraftwerkes sondern auch die statisch-konstruktiven Auswirkungen der Maschinenelemente zu erfassen. Kennzeichnende Ausführungsbeispiele weisen in dieselbe Richtung.

Die gegenüber der 1. Auflage über 220 zusätzliche Seiten umfassenden Erweiterungen beziehen sich hauptsächlich auf die Themenfelder: Einordnung der Wasserkraft in die Energiesysteme, Grundsätze der Planung und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung, Dimensionierungsgrundlagen für die verschiedenen Anlagenkomponenten unter Einbeziehung vor allem der Finite-Elemente-Berechnungsmethoden, die Weiterentwicklungen von hydraulischen Maschinen zur Energieerzeugung und Generatoren und schließlich die verschiedenartigen betrieblichen Aspekte unter Berücksichtigung der Fuzzy Logik sowie der Kleinwasserkraftanlagen. Eine erhebliche Überarbeitung mit zahlreichen Ergänzungen erfuhren die Kapitel über Elektrotechnische Ausrüstung, Pumpspeichieranlagen sowie über Wechselbeziehungen zwischen Wasserkraft und Umwelt, Mindestwasserregelungen und Durchgängigkeit.

Die Gelegenheit bot sich an, mit der 3. Auflage sämtliche Wiedergaben statistischer Kennzahlen für nationale und internationale Energieversorgungsbereiche mit Schwerpunkt Wasserkraft zu aktualisieren und überdies die jüngsten Erkenntnisse hinsichtlich Umweltschutz sowie einschlägiger natur- und ingenieurwissenschaftlicher Fortentwicklungen zu berücksichtigen.

Um das vorliegende, inzwischen zweimal fortgeschriebene Fachbuch mit jeweils neuen Erkenntnissen von Wasserkraftanlagen auszustatten, die in 21 Hauptkapitel untergliederten Themenbereiche aufzuarbeiten und diese schließlich in Text und Bild ausgewogen wiederzugeben, bedurfte es der tatkräftigen Zuarbeit bewährter wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Stuttgart.

Zu diesem besonders zu würdigenden Mitarbeiterstab zählen die Herren Dr.-Ing. Georg Förster, Dipl.-Ing. Andreas Eisner, Dr.-Ing. Klaus Jorde, Privatdozent Dr.-Ing. Walter Marx, Dr.-Ing. Matthias Schneider und Dipl.-Ing. Frank Zöllner. Den Herren Förster und Schneider oblag die Bearbeitung der unter Kapitel 8, 9 und 10 dargestellten Druck- und Verteilrohrleitungen sowie Druckstollen in der 1. und 2. Auflage, während Herr Zöllner sich dem Kapitel 8 in der 3. Auflage widmete. Des Kapitels 19 über das Leitthema Mindestwasser in Verbindung mit dem in Kapitel 13 wiedergegebenen Komplex der Fuzzy Logik sowie Teilen des Kapitels 18 Wasserkraft und Umwelt haben sich im Wesentlichen die Herren Jorde, Schneider und Eisner angenommen. In allen drei Auflagen machte sich Herr Marx um die Abfassung des Kapitels 11 über Wasserschläsler und Schwallkammern sowie des innerhalb des Kapitels 18 neu aufgenommenen Abschnittes über Bewirtschaftung von Talsperren hinsichtlich Wasserkraftgewinnung und landwirtschaftlicher Bewässerung sehr verdient.

Herr Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Gutt, Ordinarius für Elektrische Maschinen, Antriebs- und Mechatroniksysteme, Direktor des gleichnamigen Institutes der Universität Stuttgart, konnte als hoch angesehener Fachmann für die Erstbearbeitung des eigenständigen Buchkapitels „Elektrotechnische Ausrüstung“ gewonnen werden. Hierbei wurde er von Herrn cand.-el. Markus Schlenker unterstützt. Hinzu ge-



kommen waren für die 2. Auflage ebenso die Herren Dr.-Ing. Dietrich Labahn, Berlin, und Dr.-Ing. habil. Zbigniew Styczynski, Stuttgart, die sich in spezieller Zuarbeit für Herrn Prof. Dr.-Ing. Gutt hervorgetan haben. Den genannten Herren sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt.

Für alle drei Auflagen leistete Herr Dr.-Ing. Stephan Heimerl große Dienste. Dieses trifft um so mehr für die vorliegende Ausgabe zu, als dass er inzwischen von der Universität Stuttgart in die Privatwirtschaft übergewechselt ist und seine freien Tage über lange Monate hinweg eingebracht hat. Wie in den beiden vorangegangenen Auflagen fand Herr Dr. Heimerl sich erneut bereit, die mit der umfangreichen Erweiterung notwendigen Arbeitsabläufe aufeinander abzustimmen. Sachkundig wurden anfallende Textüberarbeitungen ebenso ausgeführt wie neue Fassungen sowie Bilder und Tabellen umgesetzt, wo notwendig auch erweitert und abgerundet. Umsicht, Können und Sorgfalt erforderte gleichermaßen die Erstellung der für die unmittelbare Drucklegung abgeschlossenen Vorlage. Mit seiner Tatkraft gelang es, die engen Zeitvorgaben für die ineinandergreifende Aufgabenvielfalt einzuhalten. Herrn Dr. Heimerl gebühren daher im besonderen Maße Dank und Anerkennung.

Dem weltweit renommierten Springer-Verlag sagen die Verfasser aufrichtigen Dank für seine Initiativen zur Entstehung und zur Fortführung des hervorragend ausgestatteten Buches, für die umsichtige Begleitung der einzelnen Bearbeitungsphasen und für das vielfach bewiesene Wohlwollen.

Stuttgart/Karlsruhe im Frühjahr 2003

Jürgen Giesecke und Emil Mosonyi

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Entwicklungsstufen der Wasserkraftnutzung</b>	<b>1</b>
1.1	Ansätze der Wasserkraftnutzung	1
1.2	Wasserradgetriebene Schöpfwerke und Mühlen	5
1.3	Übergang vom Wasserrad zur Wasserturbine	7
1.4	Fernübertragung elektrischer Energie	9
1.5	Wasserkraftanlagen und ihre Umgebung	9
1.6	Mehrzweckaufgaben der Wasserkraft	13
1.7	Wasserkraftnutzung im Spiegelbild der Energieträger	14
1.7.1	Nutzung von fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen	14
1.7.2	Nutzung erneuerbarer Energien	15
1.7.3	Kriterien der Energieversorgung und Vergleich der Energieerzeugungsformen	18
1.7.4	Künftige Entwicklung der Wasserkraftnutzung	23
1.7.4.1	Grundlegende Perspektiven	23
1.7.4.2	Beitrag der Wasserkraft zur Reduktion der Treibhausgasemissionen	24
1.8	Literatur	25
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Wasserkraftnutzung</b>	<b>27</b>
2.1	Energie des Wassers	27
2.1.1	Energie des ruhenden Wassers	27
2.1.2	Energie des fließenden Wassers	28
2.1.3	Nutzbare Gesamtenergie des fließenden Wassers	29
2.1.4	Potenziale zur Wasserkraftnutzung	33
2.1.5	Potenzielle Energie eines Speichervolumens	35
2.2	Verfügbares und genutztes Wasserkraftpotenzial	35
2.2.1	Wasserkraftpotenzial weltweit	35
2.2.2	Wasserkraftpotenzial in Deutschland	37
2.3	Literatur	42
<b>3</b>	<b>Grundsätze der Planung und Projektierung</b>	<b>43</b>
3.1	Planungsprozess, Projektentwicklung und Projektbewertung	43
3.1.1	Projektphasen	43
3.1.2	Besondere Aspekte bei Reaktivierung, Modernisierung und Erweiterung	49
3.1.3	Projektentwicklung im Rahmen von Finanzierungsmodellen	51
3.1.4	Bewertungsaufgaben bei verschiedenartigen Vorhabensanlässen	53
3.1.4.1	Bewertungsfragestellungen in den Projektierungsphasen	53

3.1.4.2	Begutachtung und Due-Diligence-Prüfung bei Wasserkraft-Vorhaben	54
3.1.4.3	Berücksichtigung der Umweltaspekte	56
3.1.5	Risikoanalyse für Wasserkraftanlagen	57
<b>3.2</b>	<b>Grundlagen für Auswahl und Weiterentwicklung von Wasserkraftstandorten</b>	<b>59</b>
3.2.1	Wassermengenwirtschaftliche Erhebungen	59
3.2.2	Energiewirtschaftliche Erhebungen	62
3.2.3	Ausbaugrad	66
<b>3.3</b>	<b>Beurteilung von Wasserkraftanlagenprojekten</b>	<b>68</b>
3.3.1	Betriebswirtschaftliche Betrachtung	69
3.3.1.1	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	70
3.3.1.2	Investitionsrechnung zur Untersuchung der Wirtschaftlichkeit	71
3.3.1.3	Grundlagen der Zinsrechnung, Abschreibung und Annuität	72
3.3.1.4	Statische Verfahren der Investitionsrechnung	74
3.3.1.5	Dynamische Verfahren der Investitionsrechnung	74
3.3.1.6	Besondere Kenngrößen bei Wasserkraftanlagen	76
3.3.1.7	Wirtschaftlichkeitsaspekte bei Pumpspeicherkraftwerken	84
3.3.2	Gesamtwirtschaftliche und gesamtgesellschaftliche Betrachtung	85
3.3.2.1	Grundlagen der gesamtgesellschaftlichen Bewertungsverfahren	85
3.3.2.2	Gesamtgesellschaftliche Bewertungsansätze bei Wasserkraftprojekten	86
3.3.2.3	Bedeutung von Mehrzweckaufgaben	92
3.3.3	Ansatz für eine systematische Beurteilung von Wasserkraftanlagenprojekten	94
<b>3.4</b>	<b>Gesetzliche Vorgaben für Bau und Betrieb von Wasserkraftanlagen</b>	<b>97</b>
3.4.1	Rechts- und Normhierarchie	97
3.4.2	Wesentliche Rechtsnormen für die Wasserkraft	98
<b>3.5</b>	<b>Versicherung von Wasserkraftanlagen</b>	<b>105</b>
<b>3.6</b>	<b>Literatur</b>	<b>107</b>
<b>4</b>	<b>Typen von Wasserkraftanlagen</b>	<b>109</b>
<b>4.1</b>	<b>Klassifizierung der Wasserkraftanlagen</b>	<b>109</b>
<b>4.2</b>	<b>Einteilung von Wasserkraftanlagen hinsichtlich der Nutzfallhöhe</b>	<b>111</b>
4.2.1	Laufwasserkraftwerke als Niederdruckkraftwerke	111
4.2.1.1	Flusskraftwerke	111
4.2.1.2	Ausleitungskraftwerke	119
4.2.2	Mitteldruckkraftwerke	120
4.2.3	Hochdruckkraftwerke	122
<b>4.3</b>	<b>Weitere bedeutende Wasserkraftanlagengruppen</b>	<b>124</b>
4.3.1	Pumpspeicherkraftwerke als Regelungskraftwerke	124
4.3.2	Kleinwasserkraftanlagen	127
4.3.3	Dotationskraftwerke	131

4.3.4	Energienutzung in Leitungssystemen	132
<b>4.4</b>	<b>Sonderformen der Wasserkraftnutzung</b>	<b>135</b>
4.4.1	Meeresenergienutzung	135
4.4.1.1	Nutzung der Gezeitenenergie	135
4.4.1.2	Nutzung der Meeresströmung	144
4.4.1.3	Wellenenergienutzung	146
4.4.1.4	Gradienten- und Osmosekraftwerke	151
4.4.1.5	Auswirkungen auf die Umwelt durch die Meeresenergienutzung	152
4.4.2	Depressionskraftwerke	153
4.4.3	Gletscherkraftwerke	154
4.4.4	Wasserkraftanlagen mit unterirdischen Speichersystemen	155
<b>4.5</b>	<b>Literatur</b>	<b>156</b>
<b>5</b>	<b>Wasserfassung</b>	<b>159</b>
<b>5.1</b>	<b>Anordnung, Bauweise und Bemessung des Einlaufbauwerkes</b>	<b>161</b>
5.1.1	Kraftwerke im Fließgewässer	161
5.1.2	Entnahme aus Fließgewässern	161
5.1.3	Entnahme aus stehenden Gewässern	168
5.1.4	Bemessungsgrundlagen für das Einlaufbauwerk	170
<b>5.2</b>	<b>Schutz gegen Treibgut und Treibeis</b>	<b>182</b>
5.2.1	Rechenanlagen	183
5.2.1.1	Konstruktive Ausbildung	183
5.2.1.2	Bemessung	184
5.2.1.3	Betrieb und Wartung der Rechenanlagen	189
5.2.2	Tauchwand und Schwimmbalken	193
<b>5.3</b>	<b>Verschlussorgane</b>	<b>195</b>
<b>5.4</b>	<b>Literatur</b>	<b>199</b>
<b>6</b>	<b>Freispiegelleitungen</b>	<b>201</b>
<b>6.1</b>	<b>Hydraulische Bemessung</b>	<b>201</b>
<b>6.2</b>	<b>Sedimenttransport</b>	<b>210</b>
<b>6.3</b>	<b>Wellenbildung und Wasserspiegelschwingungen</b>	<b>214</b>
<b>6.4</b>	<b>Konstruktive Ausbildung und Befestigungen</b>	<b>216</b>
<b>6.5</b>	<b>Übergang in Druckrohrleitungen</b>	<b>221</b>
<b>6.6</b>	<b>Literatur</b>	<b>223</b>
<b>7</b>	<b>Sandfang</b>	<b>225</b>
<b>7.1</b>	<b>Konstruktive Ausbildung</b>	<b>225</b>

<b>7.2</b>	<b>Bemessung</b>	<b>229</b>
7.2.1	Bemessungsgrundlagen	229
7.2.2	Beckenauslegung	232
7.2.3	Komplexe Systeme	236
<b>7.3</b>	<b>Literatur</b>	<b>236</b>
<b>8</b>	<b>Druckrohrleitungen</b>	<b>237</b>
<b>8.1</b>	<b>Rohrtypen und Rohrverbindungen</b>	<b>237</b>
8.1.1	Stahlrohre	239
8.1.2	Druckrohre aus duktilem Gusseisen	243
8.1.3	Betonrohre	243
8.1.4	Rohre aus glasfaserverstärktem Kunststoffharz	244
8.1.5	Holzrohre	246
<b>8.2</b>	<b>Hydraulische Bemessung von Druckrohrleitungen</b>	<b>247</b>
8.2.1	Hydraulische Grundlagen	247
8.2.2	Wirtschaftlich optimaler Rohrdurchmesser	252
<b>8.3</b>	<b>Dynamische Strömungsvorgänge - Druckstöße in Rohrleitungen</b>	<b>253</b>
8.3.1	Druckwellengeschwindigkeit	255
8.3.2	Druckstoßberechnung	259
8.3.2.1	Joukowsky-Stoß	260
8.3.2.2	Einfluss der Schließzeit auf den Joukowsky-Stoß	261
8.3.2.3	Druckstoß nach der Theorie der starren Wassersäule	262
8.3.2.4	Druckstoß nach der Theorie der elastischen Wassersäule	264
8.3.3	Charakteristikenverfahren	267
8.3.4	Abminderung von Druckstößen	271
<b>8.4</b>	<b>Statische Bemessung von Druckrohrleitungen</b>	<b>273</b>
8.4.1	Spannungen und Rohrwanddicke	274
8.4.2	Einbeulen und Verformen	279
8.4.3	Äußere Belastungen von Druckrohrleitungen	282
8.4.3.1	Äußere Belastungen bei offen verlegten Druckrohrleitungen	288
8.4.3.2	Äußere Belastungen bei eingedeckten Druckrohrleitungen	289
8.4.3.3	Äußere Belastungen bei grabenlos verlegten Druckrohrleitungen	300
8.4.4	Schnittgrößen in Rohrringrichtung bei eingedeckten Druckrohrleitungen	305
8.4.5	Maßgebende Nachweise für die Druckrohrleitungs Bemessung	308
8.4.5.1	Spannungs-/Dehnungsnachweis	308
8.4.5.2	Tragfähigkeitsnachweis	308
8.4.5.3	Verformungsnachweis	309
8.4.5.4	Stabilitätsnachweis	309
8.4.6	Sicherheitsnachweis für Druckrohrleitungen in Anlehnung an den Eurocode	312

<b>8.5</b>	<b>Trassierung, Rohrkrümmer, Rohraufleger und Dehnungsausgleicher</b>	<b>314</b>
8.5.1	Trassierung	314
8.5.2	Rohrkrümmer	314
8.5.3	Fixpunkte und Zwischenaufleger	316
8.5.3.1	Auflagerkräfte	317
8.5.3.2	Beanspruchung der Rohrwandung im Auflagerbereich	319
8.5.4	Dehnungsausgleicher	325
<b>8.6</b>	<b>Beurteilung von Schäden und der Sicherheit bestehender älterer Druckrohrleitungen aus Stahl</b>	<b>326</b>
8.6.1	Allgemeines	326
8.6.2	Untersuchungsschritte	326
8.6.3	Kennwerte	327
8.6.4	Entscheidungskriterien für den Weiterbetrieb von Altanlagen	328
<b>8.7</b>	<b>Literatur</b>	<b>328</b>
<b>9</b>	<b>Druckstollen und Druckschächte</b>	<b>331</b>
<b>9.1</b>	<b>Konstruktive Ausbildung</b>	<b>331</b>
<b>9.2</b>	<b>Wirtschaftlich optimaler Durchmesser</b>	<b>334</b>
<b>9.3</b>	<b>Statische Bemessung</b>	<b>335</b>
<b>9.4</b>	<b>Spezielle Bemessungskriterien für Druckschächte und Druckstollen ohne und mit Auskleidung</b>	<b>348</b>
9.4.1	Übersicht und Aufgabenstellung	348
9.4.2	Hinweise für dichte Auskleidungen	349
9.4.3	Hinweise für durchlässige Auskleidungen	350
<b>9.4</b>	<b>Literatur</b>	<b>351</b>
<b>10</b>	<b>Rohrabzweige und Verteilrohrleitungen</b>	<b>353</b>
<b>10.1</b>	<b>Typen</b>	<b>353</b>
<b>10.2</b>	<b>Bemessung von Rohrabzweigen</b>	<b>355</b>
10.2.1	Bemessung nach dem Flächenvergleichsverfahren	355
10.2.2	Überschlägige Bemessung eines Hosenrohres	362
10.2.3	Spannungsermittlung mit der Finite-Elemente-Methode	366
10.2.3.1	Die fünf Schritte der Finite-Elemente-Methode	366
10.2.3.2	Ermittlung von Verschiebungen, Verzerrungen und Spannungen	373
10.2.3.3	Umsetzung von Finite-Elemente-Berechnungen	377
<b>10.3</b>	<b>Literatur</b>	<b>380</b>
<b>11</b>	<b>Wasserschlässer und Schwallkammern</b>	<b>381</b>
<b>11.1</b>	<b>Anordnung</b>	<b>381</b>

<b>11.2 Aufgaben</b>	<b>382</b>
11.2.1 Hydraulische Trennung des Zuleitungsdruckstollens von der Falleitung	382
11.2.2 Dämpfung der Druckstoßentwicklung	383
11.2.3 Verbesserung der Regelung	383
11.2.4 Beschleunigter Ausgleich der Wasservolumina	384
<b>11.3 Typen und Bauweisen</b>	<b>384</b>
11.3.1 Kriterien für die Entwicklung verschiedener Wasserschlossformen	384
11.3.2 Bauliche Ausbildung	385
11.3.3 Typisierung nach der hydraulischen Funktionsweise	385
11.3.3.1 Einfache Becken- bzw. Schachtwasserschlöser	385
11.3.3.2 Kammerwasserschlöser	385
11.3.3.3 Gedrosselte Wasserschlöser	386
11.3.3.4 Differenzialwasserschlöser	387
11.3.3.5 Windkessel-Wasserschlöser	388
11.3.3.6 Dreikammerwasserschloss	388
<b>11.4 Hydraulische Berechnung</b>	<b>390</b>
11.4.1 Schachtwasserschloss - Grundgleichungen	390
11.4.2 Gedrosseltes Wasserschloss	393
11.4.3 Differenzialwasserschloss	394
11.4.4 Lösungsmethoden	396
11.4.4.1 Analytische Lösungen	396
11.4.4.2 Numerische Behandlung	405
11.4.5 Stabilitätsproblem	410
11.4.5.1 Die Thomaschen Stabilitätskriterien	410
11.4.5.2 Beschleunigungs- bzw. Verzögerungszeit $t_a$	411
11.4.6 Schwingungsvorgänge	413
11.4.7 Bemessungs- und Optimierungsaufgaben	414
11.4.8 Überschlagsformeln	415
11.4.9 Wasserschloss und Triebwasserleitung	416
11.4.9.1 Gekoppeltes Schwingungsverhalten	416
11.4.9.2 Gekoppelte Berechnung im Zeitbereich	418
11.4.9.3 Lastvorgaben für die Stollenpanzerung	426
11.4.9.4 Wasserschlossüberwachung mittels Fuzzy Logik	426
<b>11.5 Sonderausführungen</b>	<b>428</b>
11.5.1 Anordnung bei Mitteldruckanlagen	428
11.5.2 Geheiztes Wasserschloss	428
11.5.3 Windkessel-Wasserschloss	428
<b>11.6 Literatur</b>	<b>439</b>

<b>12</b>	<b>Verschluss- und Regelorgane bei Rohrleitungen</b>	<b>441</b>
<b>12.1</b>	<b>Anordnung und Grundformen von Krafthaus- und Grundablasschiebern</b>	<b>441</b>
12.1.1	Aufgaben und Anordnung	441
12.1.2	Grundtypen	443
12.1.3	Schieber in Turbinen- und Pumpenleitungen	444
12.1.4	Schieber in Grundablässen und Hochwasserentlastungsanlagen	445
12.1.5	Schnellschlussorgane	446
12.1.6	Be- und Entlüftungsventile	447
12.1.7	Bemessung von Entlüftungseinrichtungen für Druckstollen	448
12.1.8	Hilfseinrichtungen	449
<b>12.2</b>	<b>Hydraulisches Verhalten</b>	<b>449</b>
12.2.1	Strömungsvorgänge	449
12.2.2	Verlusthöhen	450
12.2.3	Durchfluss und Ausfluss	452
12.2.4	Ermittlung der Energiehöhen	455
12.2.5	Kavitation	456
12.2.6	Druckstoß	459
12.2.7	Schwingungen	459
<b>12.3</b>	<b>Gestaltungsgrundsätze</b>	<b>460</b>
<b>12.4</b>	<b>Antrieb und Steuerung</b>	<b>461</b>
<b>12.5</b>	<b>Typen</b>	<b>463</b>
12.5.1	Keilschieber und Flachschieber	463
12.5.1.1	Wirkungsweise und Anwendungsbereich	463
12.5.1.2	Konstruktiver Aufbau	464
12.5.1.3	Hydraulisches Verhalten	465
12.5.1.4	Vor- und Nachteile	465
12.5.2	Drosselklappen	466
12.5.2.1	Wirkungsweise und Anwendungsbereich	466
12.5.2.2	Konstruktiver Aufbau	467
12.5.2.3	Hydraulisches Verhalten	468
12.5.2.4	Vor- und Nachteile	471
12.5.3	Kugelschieber	471
12.5.3.1	Wirkungsweise und Anwendungsbereich	471
12.5.3.2	Konstruktiver Aufbau	472
12.5.3.3	Hydraulisches Verhalten	474
12.5.3.4	Vor- und Nachteile	475
12.5.4	Ringschieber und Hohlstrahlschieber	475
12.5.4.1	Wirkungsweise und Anwendungsbereich	475
12.5.4.2	Konstruktiver Aufbau	478
12.5.4.3	Hydraulisches Verhalten	479
12.5.4.4	Vor- und Nachteile	481
12.5.5	Kegelstrahlschieber	482
12.5.5.1	Wirkungsweise und Anwendungsbereich	482



12.5.5.2	Konstruktiver Aufbau	483
12.5.5.3	Hydraulisches Verhalten	485
12.5.5.4	Vor- und Nachteile	487
<b>12.6</b>	<b>Literatur</b>	<b>488</b>
<b>13</b>	<b>Krafthaus</b>	<b>489</b>
<b>13.1</b>	<b>Krafthaustypen</b>	<b>490</b>
13.1.1	Grundlegende Unterscheidungsmerkmale der Krafthaustypen	491
13.1.2	Besondere Aspekte bei unterschiedlichen Wasserkraftanlagentypen	500
<b>13.2</b>	<b>Regelungs- und Leittechnik für den Wasserkraftanlagenbetrieb</b>	<b>507</b>
13.2.1	Grundprinzipien der Regelungs- und Leittechnik	507
13.2.2	Fuzzy Logik zur Abbildung von Steuerungs- und Regelungsvorgängen	511
13.2.2.1	Grundlagen der Fuzzy Logik	512
13.2.2.2	Unscharfe Ansätze in der Fuzzy Logik	513
<b>13.3</b>	<b>Betrieb und Unterhalt von Wasserkraftanlagen</b>	<b>520</b>
13.3.1	Betriebs-, Anlagen- und Arbeitssicherheit bei Wasserkraftanlagen	520
13.3.1.1	Betriebssichere Organisation	520
13.3.1.2	Betriebssicherheit	522
13.3.1.3	Allgemeine Anlagen- und Arbeitssicherheitsanforderungen	523
13.3.1.4	Lärmemissionen	524
13.3.1.5	Schwingungen	525
13.3.1.6	Elektromagnetische Felder und elektrische Anlagen	526
13.3.1.7	Gewässerschutz und Gefahrgüter	526
13.3.2	Instandhaltung und Erneuerung von Wasserkraftanlagen	527
<b>13.4</b>	<b>Literatur</b>	<b>529</b>
<b>14</b>	<b>Funktionsweise von hydraulischen Maschinen</b>	<b>531</b>
<b>14.1</b>	<b>Unterscheidungsmerkmale</b>	<b>531</b>
14.1.1	Bauweise hinsichtlich Wellenausrichtung und Wasserzuführung	532
14.1.2	Einteilung nach der Regelungsart	533
14.1.3	Einteilung in Abhängigkeit des Durchflusses $Q$ und der Fallhöhe $h_f$	533
14.1.4	Einteilung in Abhängigkeit der spezifischen Drehzahl $n_q$ und der Fallhöhe $h_f$	533
14.1.5	Langsam-, Mittel-, Schnellläufigkeit	535
14.1.6	Einteilung nach dem Verwendungszweck und der Betriebsart	535
<b>14.2</b>	<b>Bemessungsgrundlagen</b>	<b>535</b>
14.2.1	Turbinendrehmoment	535
14.2.2	Fallhöhe, Energiehöhe, spezifische Stutzenarbeit	537
14.2.3	Spezifische Drehzahl, Drehzahl, Synchrondrehzahl	538
14.2.4	Dimensionslose Kennwerte	541
14.2.4.1	Druckzahl $\psi$	541

14.2.4.2	Durchflusszahl $\varphi$	542
14.2.4.3	Leistungszahl $II$	542
14.2.4.4	Laufzahl $\sigma_L$	542
14.2.4.5	Durchmesserzahl $\delta$	542
14.2.5	Druckkennzahlen zur Kavitationsbeurteilung	542
14.2.5.1	Thoma-Beiwert $\sigma_{Th}$	543
14.2.5.2	Saugkennzahl $S_q$	544
14.2.5.3	Zusammenhang zwischen $\sigma_{Th}$ und $S_q$	544
14.2.5.4	NPSH-Wert	544
14.2.6	Turbinenkennlinien	544
14.2.6.1	Turbinenwirkungsgrad	544
14.2.6.2	Leistungs-, Wirkungsgrad- und Drehmomentenkennlinie	548
14.2.6.3	Muschelkurven und Muscheldiagramme	549
14.2.7	Numerische Strömungsberechnung	553
<b>14.3</b>	<b>Turbinenbauteile</b>	<b>555</b>
14.3.1	Bauteile von Überdruckturbinen	555
14.3.1.1	Turbinenzulauf, Einlaufschacht und Spiralgehäuse	555
14.3.1.2	Saugrohr und Saugschlauch	561
14.3.2	Bauteile von Gleichdruckturbinen	565
14.3.3	Turbinenwelle, Getriebe und Turbinenlager	565
14.3.4	Getriebe und Riemenantrieb	567
<b>14.4</b>	<b>Turbinenregelung</b>	<b>569</b>
14.4.1	Turbinenregelungsarten	570
14.4.1.1	Leitradregelung	570
14.4.1.2	Lauftradregelung	571
14.4.1.3	Düsen- und Strahlablenkerregelung	572
14.4.1.4	Regelung bei Durchströmturbinen	572
14.4.1.5	Bypassregelung bei Hochdruckanlagen	572
14.4.2	Steuerung der Turbinenregelung	573
<b>14.5</b>	<b>Pumpen und Pumpenturbinen</b>	<b>576</b>
14.5.1	Kreiselpumpen	577
14.5.1.1	Grundlagen	577
14.5.1.2	Bemessung	577
14.5.1.3	Anordnung, Bauweisen und Betrieb	580
14.5.1.4	Wellenkupplungen	584
14.5.2	Pumpenturbinen	586
14.5.2.1	Allgemeine Bauweisen und Betrieb	586
14.5.2.2	Sonderformen	587
<b>14.6</b>	<b>Literatur</b>	<b>589</b>
<b>15</b>	<b>Hydraulische Maschinen zur Energieerzeugung</b>	<b>591</b>
<b>15.1</b>	<b>Propeller- und Kaplan-Turbinen</b>	<b>591</b>
15.1.1	Konstruktion und Betriebsweise	591
15.1.1.1	Rohrturbinen	595

15.1.1.2	Straflo-Turbinen	599
15.1.1.3	Diagonalturbinen	600
15.1.2	Bemessung	601
15.1.2.1	Grundlagen	601
15.1.2.2	Berechnungsschema zur Vordimensionierung	607
<b>15.2</b>	<b>Francis-Turbinen</b>	<b>607</b>
15.2.1	Konstruktion und Betriebsweise	607
15.2.2	Bemessung	611
15.2.2.1	Grundlagen	611
15.2.2.2	Berechnungsschema zur Vordimensionierung	614
<b>15.3</b>	<b>Pelton-Turbinen</b>	<b>614</b>
15.3.1	Konstruktion und Betriebsweise	614
15.3.2	Unterschied zwischen Francis- und Pelton-Turbine	619
15.3.3	Bemessung	620
15.3.3.1	Grundlagen	620
15.3.3.2	Berechnungsschema zur Vordimensionierung	625
<b>15.4</b>	<b>Durchströmturbinen</b>	<b>625</b>
15.4.1	Konstruktion und Betriebsweise	625
15.4.2	Bemessung	627
15.4.2.1	Grundlagen	627
15.4.2.2	Berechnungsschema zur Vordimensionierung	628
<b>15.5</b>	<b>Hydraulische Strömungsmaschinen für kleine Durchflüsse und niedrige Fallhöhen</b>	<b>629</b>
15.5.1	Vorbemerkung	629
15.5.2	Wasserräder	629
15.5.2.1	Unterschlächtige Wasserräder	630
15.5.2.2	Mittelschlächtige Wasserräder	631
15.5.2.3	Oberschlächtige Wasserräder	632
15.5.2.4	Allgemeine Entwurfsgrundsätze und Weiterentwicklungen	632
15.5.3	Wasserkraftschnecken	634
15.5.4	Weiterentwicklungen von hydraulischen Strömungsmaschinen	636
15.5.4.1	Wasserwirbelkraftwerk	636
15.5.4.2	Steffturbine	637
15.5.4.3	Very-Low-Head-Turbine	638
15.5.4.4	Wasserkraftwerke in Unterwasseranordnung	639
15.5.5	Kinetische Strömungsmaschinen	640
15.5.5.1	Grundlagen	640
15.5.5.2	Entwicklungen kinetischer Strömungsmaschinen	642
<b>15.6</b>	<b>Literatur</b>	<b>643</b>

<b>16</b>	<b>Elektrotechnische Ausrüstung</b>	<b>647</b>
<b>16.1</b>	<b>Grundlagen der elektrischen Energietechnik</b>	<b>647</b>
16.1.1	Gleichstromtechnik	647
16.1.2	Wechselstromtechnik	651
16.1.3	Wechselwirkungen und Zusammenhänge zwischen elektrischen Strömen und Spannungen und magnetischen Feldern	655
16.1.4	Kraftwirkung durch das Zusammenwirken magnetischer Felder	659
<b>16.2</b>	<b>Grundprinzip der elektromagnetischen Energieumwandlung</b>	<b>660</b>
<b>16.3</b>	<b>Elektrische Maschinen und Transformatoren in Wasserkraftanlagen</b>	<b>661</b>
16.3.1	Transformatoren	663
16.3.2	Bewegte elektrische Maschinen	664
16.3.3	Synchrone Wasserkraftgeneratoren	668
16.3.3.1	Polzahl und Frequenz	668
16.3.3.2	Ausbildung von Ständer und Läufer	671
16.3.4	Asynchrongeneratoren	672
16.3.5	Generatorschutz und -überwachung	674
16.3.6	Entwicklungstendenzen bei Wasserkraftgeneratoren	676
16.3.6.1	Generatoren mit veränderbaren Drehzahlen	676
16.3.6.2	Permanentmagneterregung von Synchronmaschinen	678
16.3.6.3	Hochspannungsgeneratoren	678
<b>16.4</b>	<b>Betriebsarten von Wasserkraftgeneratoren</b>	<b>679</b>
16.4.1	Leerlauf	679
16.4.2	Generatorbetrieb	680
16.4.3	Motorbetrieb	681
16.4.4	Übergang zwischen den verschiedenen Betriebsarten	682
16.4.5	Synchronisation	682
16.4.6	Inselbetrieb	683
16.4.7	Blindleistungs- bzw. Phasenschieberbetrieb	683
16.4.8	Reluktanzbetrieb	684
16.4.9	Belastungsgrenzen der Synchronmaschine	684
<b>16.5</b>	<b>Bemessung von Wasserkraftgeneratoren</b>	<b>685</b>
16.5.1	Kühlung	686
16.5.2	Einbau und Anordnung	687
16.5.3	Läuferarten	689
16.5.4	Erregerleinrichtungen	689
16.5.5	Dimensionierung	690
16.5.6	Durchgangsdrehzahl	692
16.5.7	Kurzschlussfestigkeit	692
<b>16.6</b>	<b>Aufbereitung und Ableitung der Drehstromenergie eines Kraftwerkes</b>	<b>694</b>
16.6.1	Leistungsbilanz und Wirkungsgrad	695
16.6.2	Transformatoren	696

16.6.3	Eigenversorgung	697
16.6.4	Schaltanlagen und Energieableitung	697
<b>16.7</b>	<b>Grundlagen elektrischer Verbundsysteme</b>	<b>699</b>
16.7.1	Einbindung der Kraftwerke in das elektrische Verbundsystem	699
16.7.2	Aufgaben der Netzleitwarte und Kraftwerkseinsatzplanung	702
16.7.3	Grundlastdeckung und Regelungsaufgaben im Netzbetrieb	704
16.7.4	Hochspannungs-Gleichstrom-Kopplung unterschiedlicher Netze	705
16.7.5	Entwicklung des Strommarktes	706
<b>16.8</b>	<b>Literatur</b>	<b>707</b>
<b>17</b>	<b>Pumpspeicherkraftwerke</b>	<b>709</b>
<b>17.1</b>	<b>Grundlagen der Pumpspeicherung</b>	<b>709</b>
<b>17.2</b>	<b>Ergänzende Energiespeichersysteme</b>	<b>711</b>
<b>17.3</b>	<b>Pumpspeichersysteme</b>	<b>713</b>
<b>17.4</b>	<b>Historische Entwicklung der Pumpspeicherung</b>	<b>715</b>
<b>17.5</b>	<b>Bautechnische Gesichtspunkte</b>	<b>716</b>
<b>17.6</b>	<b>Maschinentechnische Gesichtspunkte</b>	<b>720</b>
<b>17.7</b>	<b>Betriebsweisen von Pumpspeicherwerken</b>	<b>722</b>
<b>17.8</b>	<b>Pumpspeicherkraft in Deutschland</b>	<b>728</b>
<b>17.9</b>	<b>Sonderformen der Pumpspeichertechniken</b>	<b>733</b>
17.9.1	Extreme Förderhöhen und Leistungen	733
17.9.2	Untertage-Pumpspeicherkraftwerke	734
17.8.3	Meerwasser-Pumpspeicherkraftwerke	735
17.9.4	Luftspeicherkraftwerke	737
17.9.5	Pumpspeicherwerk mit drehzahlvariablen Maschinensätzen	739
<b>17.10</b>	<b>Literatur</b>	<b>742</b>
<b>18</b>	<b>Wasserkraft und Umwelt</b>	<b>745</b>
<b>18.1</b>	<b>Einflüsse auf die Atmosphäre</b>	<b>747</b>
<b>18.2</b>	<b>Beeinflussung der ober- und unterirdischen Gewässer</b>	<b>749</b>
18.2.1	Veränderung der Gewässercharakteristik	750
18.2.1.1	Fließgewässertypische Strömungsmuster	750
18.2.1.2	Geschiebe- und Schwebstoffhaushalt	751
18.2.1.3	Abfluss- und Hochwasserregime	754
18.2.1.4	Wasserspiegelschwankungen infolge Schwell- oder Schwallbetrieb	757
18.2.1.5	Wasserspiegeländerungen in Stauräumen und deren Unterlauf	759
18.2.1.6	Flussregulierung	760
18.2.1.7	Eisbildung und Eistransport	760
18.2.2	Wechselwirkungen mit dem Grundwasser	760

<b>18.3</b>	<b>Einflüsse auf das biologische System</b>	<b>761</b>
18.3.1	Bedeutung von Strömung und Substrat	761
18.3.1.1	Auswirkungen auf die Fischfauna	762
18.3.1.2	Auswirkungen auf das Zoobenthon	763
18.3.1.3	Auswirkungen auf die Pflanzenwelt	764
18.3.2	Temperaturregime	766
18.3.3	Sauerstoffhaushalt	767
18.3.4	Selbstreinigungsprozesse	770
18.3.5	Treibgut	771
18.3.6	Ufer- und Stauraumgestaltung	772
<b>18.4</b>	<b>Einflüsse auf die oberen Bodenschichten</b>	<b>773</b>
<b>18.5</b>	<b>Einflüsse auf den Baugrund</b>	<b>774</b>
<b>18.6</b>	<b>Auswirkungen auf den Menschen</b>	<b>774</b>
18.6.1	Landschaft und Lebensumfeld	774
18.6.2	Sicherheitsaspekte	776
<b>18.7</b>	<b>Spezielle Aspekte bei Mehrzweckanlagen in warm-trockenen Regionen</b>	<b>777</b>
18.7.1	Wasserkraft und Bewässerung	777
18.7.2	Umweltrelevante Gestaltungsmaßnahmen von Stauanlagen in Entwicklungsländern der wärmeren Klimazonen	778
18.7.2.1	Gestaltungsprioritäten	778
18.7.2.2	Gestaltungs- und Präventionsmaßnahmen	779
18.7.3	Energetische Bewertung der Flächen-Inanspruchnahme von Wasserspeichern	780
18.7.3.1	Speicher-Parameter	781
18.7.3.2	Energetisches Potenzial von Bewässerungswasser	781
18.7.3.3	Potenzial von Biomasse im Stauraum	782
18.7.3.4	Spezifisches Gesamt-Energiepotenzial eines Wasserspeichers	782
18.7.3.5	Durch Speicherkraftwerke vermiedene CO <sub>2</sub> -Produktion	783
18.7.3.6	Ergebnisse der vergleichenden Speicherpotenzial-Abschätzung	783
18.7.4	Das Flusskraftwerk Tiszaölök - eine optimierte Mehrzweckanlage	785
<b>18.8</b>	<b>Besondere Umweltaspekte von der Errichtung bis zum Rückbau einer Anlage</b>	<b>788</b>
<b>18.9</b>	<b>Literatur</b>	<b>788</b>
<b>19</b>	<b>Mindestwasserregelungen</b>	<b>793</b>
<b>19.1</b>	<b>Gebräuchliche Methoden zur Mindestwasserfestlegung</b>	<b>793</b>
19.1.1	Kenngrößen	794
19.1.2	Einfache Verfahren	795
19.1.3	Habitatsimulationsmodelle	796
19.1.3.1	Hintergrund	796
19.1.3.2	Fließgewässerhabitate und ihre Beschreibung	797
19.1.3.3	Schnittstelle Abiotik zu Biotik	798

19.1.4	Entscheidungsmodelle	799
<b>19.2</b>	<b>Mindestwasserregelungen in Deutschland</b>	<b>799</b>
<b>19.3</b>	<b>Vorgehensweise zur Bestimmung von Mindestwasserregelungen</b>	<b>799</b>
<b>19.4</b>	<b>Das Simulationsmodell CASIMIR</b>	<b>800</b>
19.4.1	Konzeption im Hinblick auf Mindestwasserregelungen	801
19.4.2	Gewässersohle und benthische Organismen	802
19.4.2.1	FST-Halbkugelmethode zur Bestimmung sohlennaher Strömungsverhältnisse	803
19.4.2.2	Habitatansprüche der benthischen Organismen	803
19.4.2.3	Modellierungsansatz für Benthoshabitate über die FST- Halbkugelmethode	804
19.4.2.4	Modellierungsansatz für Benthoshabitate über eine hydraulische 2- D-Modellierung	806
19.4.3	Freiwasserraum und Fischhabitate	807
19.4.3.1	Fische als Zeigerorganismen	808
19.4.3.2	Präferenzfunktionen	809
19.4.3.3	Fuzzy-logischer Ansatz für die Habitatmodellierung	811
19.4.3.4	Darstellung der Habitateignung	813
19.4.3.5	Kriterien für die Bewertung der Modellierungsergebnisse mit CASIMIR bei Mindestwasseruntersuchungen	815
<b>19.5</b>	<b>Auswirkungen der Mindestwasserabgaben auf die Energieerzeugung in Wasserkraftanlagen</b>	<b>819</b>
<b>19.6</b>	<b>Literatur</b>	<b>820</b>
<b>20</b>	<b>Durchgängigkeit für die Aquafauna an Wasserkraftstandorten</b>	<b>823</b>
<b>20.1</b>	<b>Fischaufstiegsanlagen</b>	<b>825</b>
20.1.1	Grundlagen	825
20.1.1.1	Wanderkorridor	826
20.1.1.2	Anordnung von Fischaufstiegsanlagen	827
20.1.1.3	Ausbildung des Einstiegs in Fischaufstiegsanlagen	828
20.1.1.4	Leitströmung im Einstiegsbereich	830
20.1.1.5	Abfluss und Strömungscharakteristika in Fischaufstiegsanlagen	831
20.1.1.6	Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen	832
20.1.1.8	Gestaltung der Sohle in Fischaufstiegsanlagen	833
20.1.1.9	Ausstieg aus Fischaufstiegsanlagen	833
20.1.1.9	Betriebszeiten	834
20.1.1.10	Wartung der Fischaufstiegsanlagen	834
20.1.1.11	Störungsvermeidung und Lenkung der Öffentlichkeit	835
20.1.2	Bauweisen von Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbaren Querbauwerken	835
20.1.2.1	Beckenpässe	837
20.1.2.2	Schlitz- oder Vertical-Slot-Pass	839
20.1.2.3	Raugerinne-Beckenpass	839

20.1.2.4	Raugerinne in Störsteinbauweise	840
20.1.2.5	Denil- oder Gegenstrompass	840
20.1.2.6	Aalpass	841
20.1.2.7	Fischschleuse	842
20.1.2.8	Fischaufzug	842
20.1.2.9	Umgehungsgerinne	843
20.1.2.10	Gewässerbreite und teilbreite Raugerinne	843
<b>20.2</b>	<b>Fischschutz- und Fischabstiegseinrichtungen</b>	<b>845</b>
<b>20.4</b>	<b>Literatur</b>	<b>847</b>
<b>21</b>	<b>Ausführungsbeispiele</b>	<b>849</b>
<b>21.1</b>	<b>Hochrheinkraftwerk Säckingen</b>	<b>849</b>
<b>21.2</b>	<b>Wasserkraftnutzung durch die Schluchseewerk AG</b>	<b>851</b>
21.2.1	Anlagensystem der Schluchseewerk AG	851
21.2.1.1	Werksgruppe Schluchsee	851
21.2.1.2	Werksgruppe Hotzenwald	853
21.2.1.3	Merkmale des Pumpspeicherbetriebes	853
21.2.2	Werksgruppe Schluchsee	855
21.2.3	Werksgruppe Hotzenwald	859
21.2.3.1	Pumpspeicherwerk Säckingen	859
21.2.3.2	Pumpspeicherwerk Hornbergstufe mit Kavernenkraftwerk Wehr	862
21.2.3.3	Zubau einer Kleinwasserkraftanlage	873
21.2.4	Geplante Ausbaustufen der Schluchseewerke	874
<b>21.3</b>	<b>Großprojekt Drei-Schluchten-Kraftwerk am Jangtse in China</b>	<b>876</b>
21.3.1	Der Jangtse und historische Hochwasserkatastrophen	876
21.3.2	Projektauslegung	877
21.3.3	Problemfelder	880
<b>21.4</b>	<b>Kleinwasserkraftanlage Großarl</b>	<b>881</b>
<b>21.5</b>	<b>Kleinwasserkraftanlage Vöhrenbach mit der Gewölbereihenmauer Linach</b>	<b>888</b>
21.5.1	Übersicht	888
21.5.2	Konzeption	889
21.5.3	Streiflichter der Sanierung eines nationalen Baudenkmales	891
<b>21.6</b>	<b>Literatur</b>	<b>893</b>
<b>22</b>	<b>Symbole, Einheiten, Umrechnungsfaktoren</b>	<b>895</b>
<b>22.1</b>	<b>Kenngrößen und Symbole</b>	<b>895</b>
<b>22.2</b>	<b>Abkürzungen</b>	<b>909</b>
<b>22.3</b>	<b>Griechisches Alphabet</b>	<b>909</b>
<b>22.4</b>	<b>Einheitenabkürzungen</b>	<b>909</b>
<b>22.5</b>	<b>Einheiten und Umrechnungsfaktoren</b>	<b>910</b>



<b>Autoren</b>	<b>913</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>915</b>