
Jürgen Giesecke • Stephan Heimerl
Emil Mosonyi†

Wasserkraftanlagen

Planung, Bau und Betrieb

6., aktualisierte und erweiterte Auflage

Inhaltsverzeichnis

1	Entwicklungsstufen der Wasserkraftnutzung	1
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
2	Grundlagen der Wasserkraftnutzung	27
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
3	Grundsätze der Planung und Projektierung	43
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
3.2	Grundlagen für Auswahl und Weiterentwicklung von Wasserkraftstandorten	59
3.2.1	Wassermengenwirtschaftliche Erhebungen	59
3.2.2	Energiewirtschaftliche Erhebungen	62
3.2.3	Ausbaugrad	66
3.3	Beurteilung von Wasserkraftanlagenprojekten	68
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
3.4	Gesetzliche Vorgaben für Bau und Betrieb von Wasserkraftanlagen	97
3.4.1	Rechts- und Normhierarchie	97
3.4.2	Wesentliche Rechtsnormen für die Wasserkraft	98
3.5	Versicherung von Wasserkraftanlagen	105
3.6	Literatur	107
4	Typen von Wasserkraftanlagen	109
4.1	Klassifizierung der Wasserkraftanlagen	109
4.2	Einteilung von Wasserkraftanlagen hinsichtlich der Nutzfalhhöhe	111
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
4.3	Weitere bedeutende Wasserkraftanlagengruppen	124
4.3.1	Pumpspeicherkraftwerke als Regelungskraftwerke	124
4.3.2	Kleinwasserkraftanlagen	127
4.3.3	Dotationskraftwerke	131

4.3.4	Energienutzung in Leitungssystemen	132
4.4	Sonderformen der Wasserkraftnutzung	135
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
4.5	Literatur	156
5	Wasserfassung	159
5.1	Anordnung, Bauweise und Bemessung des Einlaufbauwerkes	161
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
5.2	Schutz gegen Treibgut und Treibeis	182
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
5.3	Verschlussorgane	195
5.4	Literatur	199
6	Freispegelleitungen	201
6.1	Hydraulische Bemessung	201
6.2	Sedimenttransport	210
6.3	Wellenbildung und Wasserspiegelschwingungen	214
6.4	Konstruktive Ausbildung und Befestigungen	216
6.5	Übergang in Druckrohrleitungen	221
6.6	Literatur	223
7	Sandfang	225
7.1	Konstruktive Ausbildung	225

7.2	Bemessung	229
7.2.1	Bemessungsgrundlagen	229
7.2.2	Beckenauslegung	232
7.2.3	Komplexe Systeme	236
7.3	Literatur	236
8	Druckrohrleitungen	237
8.1	Rohrtypen und Rohrverbindungen	237
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
8.2	Hydraulische Bemessung von Druckrohrleitungen	247
8.2.1	Hydraulische Grundlagen	247
8.2.2	Wirtschaftlich optimaler Rohrdurchmesser	252
8.3	Dynamische Strömungsvorgänge - Druckstöße in Rohrleitungen	253
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
8.4	Statische Bemessung von Druckrohrleitungen	273
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 eingeeerdeten Druckrohrleitungen	289
8.4.3.3	Äußere Belastungen bei grabenlos verlegten Druckrohrleitungen	300
8.4.4	Schnittgrößen in Rohrringrichtung bei eingeeerdeten 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

8.5	Trassierung, Rohrkrümmer, Rohraufleger und Dehnungsausgleicher	314
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
8.6	Beurteilung von Schäden und der Sicherheit bestehender älterer Druckrohrleitungen aus Stahl	326
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
8.7	Literatur	328
9	Druckstollen und Druckschächte	331
9.1	Konstruktive Ausbildung	331
9.2	Wirtschaftlich optimaler Durchmesser	334
9.3	Statische Bemessung	335
9.4	Spezielle Bemessungskriterien für Druckschächte und Druckstollen ohne und mit Auskleidung	348
9.4.1	Übersicht und Aufgabenstellung	348
9.4.2	Hinweise für dichte Auskleidungen	349
9.4.3	Hinweise für durchlässige Auskleidungen	350
9.4	Literatur	351
10	Rohrabzweige und Verteilrohrleitungen	353
10.1	Typen	353
10.2	Bemessung von Rohrabzweigen	355
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
10.3	Literatur	380
11	Wasserschlässer und Schwallkammern	381
11.1	Anordnung	381

11.2 Aufgaben	382
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
11.3 Typen und Bauweisen	384
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. Schachtwasserschlösser	385
11.3.3.2 Kammerwasserschlösser	385
11.3.3.3 Gedrosselte Wasserschlösser	386
11.3.3.4 Differenzialwasserschlösser	387
11.3.3.5 Windkessel-Wasserschlösser	388
11.3.3.6 Dreikammerwasserschloss	388
11.4 Hydraulische Berechnung	390
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
11.5 Sonderausführungen	428
11.5.1 Anordnung bei Mitteldruckanlagen	428
11.5.2 Geheiztes Wasserschloss	428
11.5.3 Windkessel-Wasserschloss	428
11.6 Literatur	439

12	Verschluss- und Regelorgane bei Rohrleitungen	441
12.1	Anordnung und Grundformen von Krafthaus- und Grundablasschiebern	441
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
12.2	Hydraulisches Verhalten	449
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
12.3	Gestaltungsgrundsätze	460
12.4	Antrieb und Steuerung	461
12.5	Typen	463
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
12.6	Literatur	488
13	Krafthaus	489
13.1	Krafthautypen	490
13.1.1	Grundlegende Unterscheidungsmerkmale der Krafthautypen	491
13.1.2	Besondere Aspekte bei unterschiedlichen Wasserkraftanlagentypen	500
13.2	Regelungs- und Leittechnik für den Wasserkraftanlagenbetrieb	507
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	Unschärfe Ansätze in der Fuzzy Logik	513
13.3	Betrieb und Unterhalt von Wasserkraftanlagen	520
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
13.4	Literatur	529
14	Funktionsweise von hydraulischen Maschinen	531
14.1	Unterscheidungsmerkmale	531
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
14.2	Bemessungsgrundlagen	535
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 ψ	541

14.2.4.2	Durchflusszahl φ	542
14.2.4.3	Leistungszahl II	542
14.2.4.4	Laufzahl σ_L	542
14.2.4.5	Durchmesserzahl δ	542
14.2.5	Druckkennzahlen zur Kavitationsbeurteilung	542
14.2.5.1	Thoma-Beiwert σ_{Th}	543
14.2.5.2	Saugkennzahl S_q	544
14.2.5.3	Zusammenhang zwischen σ_{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
14.3	Turbinenbauteile	555
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
14.4	Turbinenregelung	569
14.4.1	Turbinenregelungsarten	570
14.4.1.1	Leitradregelung	570
14.4.1.2	Lauftradregelung	571
14.4.1.3	Düsen- und Strahlableiterregelung	572
14.4.1.4	Regelung bei Durchströmturbinen	572
14.4.1.5	Bypassregelung bei Hochdruckanlagen	572
14.4.2	Steuerung der Turbinenregelung	573
14.5	Pumpen und Pumpenturbinen	576
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
14.6	Literatur	589
15	Hydraulische Maschinen zur Energieerzeugung	591
15.1	Propeller- und Kaplan-Turbinen	591
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
15.2	Francis-Turbinen	607
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
15.3	Pelton-Turbinen	614
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
15.4	Durchströmturbinen	625
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
15.5	Hydraulische Strömungsmaschinen für kleine Durchflüsse und niedrige Fallhöhen	629
15.5.1	Vorbemerkung	629
15.5.2	Wasserräder	629
15.5.2.1	Unterschlächtinge Wasserräder	630
15.5.2.2	Mittelschlächtinge Wasserräder	631
15.5.2.3	Oberschlächtinge 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
15.6	Literatur	643

16 Elektrotechnische Ausrüstung	647
16.1 Grundlagen der elektrischen Energietechnik	647
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
16.2 Grundprinzip der elektromagnetischen Energieumwandlung	660
16.3 Elektrische Maschinen und Transformatoren in Wasserkraftanlagen	661
16.3.1 Transformatoren	663
16.3.2 Bewegte elektrische Maschinen	664
16.3.3 Synchroner Wasserkraftgeneratoren	668
16.3.3.1 Polzahl und Frequenz	668
16.3.3.2 Ausbildung von Ständer und Läufer	671
16.3.4 Asynchroner Generatoren	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
16.4 Betriebsarten von Wasserkraftgeneratoren	679
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
16.5 Bemessung von Wasserkraftgeneratoren	685
16.5.1 Kühlung	686
16.5.2 Einbau und Anordnung	687
16.5.3 Läuferarten	689
16.5.4 Erregereinrichtungen	689
16.5.5 Dimensionierung	690
16.5.6 Durchgangsdrehzahl	692
16.5.7 Kurzschlussfestigkeit	692
16.6 Aufbereitung und Ableitung der Drehstromenergie eines Kraftwerkes	694
16.6.1 Leistungsbilanz und Wirkungsgrad	695
16.6.2 Transformatoren	696

16.6.3	Eigenversorgung	697
16.6.4	Schaltanlagen und Energieableitung	697
16.7	Grundlagen elektrischer Verbundsysteme	699
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
16.8	Literatur	707
17	Pumpspeicherkraftwerke	709
17.1	Grundlagen der Pumpspeicherung	709
17.2	Ergänzende Energiespeichersysteme	711
17.3	Pumpspeichersysteme	713
17.4	Historische Entwicklung der Pumpspeicherung	715
17.5	Bautechnische Gesichtspunkte	716
17.6	Maschinentechnische Gesichtspunkte	720
17.7	Betriebsweisen von Pumpspeicherwerken	722
17.8	Pumpspeicherkraft in Deutschland	728
17.9	Sonderformen der Pumpspeichertechniken	733
17.9.1	Extreme Förderhöhen und Leistungen	733
17.9.2	Untertage-Pumpspeicherkraftwerke	734
17.9.3	Meerwasser-Pumpspeicherkraftwerke	735
17.9.4	Luftspeicherkraftwerke	737
17.9.5	Pumpspeicherwerk mit drehzahlvariablen Maschinensätzen	739
17.10	Literatur	742
18	Wasserkraft und Umwelt	745
18.1	Einflüsse auf die Atmosphäre	747
18.2	Beeinflussung der ober- und unterirdischen Gewässer	749
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

18.3 Einflüsse auf das biologische System	761
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
18.4 Einflüsse auf die oberen Bodenschichten	773
18.5 Einflüsse auf den Baugrund	774
18.6 Auswirkungen auf den Menschen	774
18.6.1 Landschaft und Lebensumfeld	774
18.6.2 Sicherheitsaspekte	776
18.7 Spezielle Aspekte bei Mehrzweckanlagen in warm-trockenen Regionen	777
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 ₂ -Produktion	783
18.7.3.6 Ergebnisse der vergleichenden Speicherpotenzial-Abschätzung	783
18.7.4 Das Flusskraftwerk Tiszalök - eine optimierte Mehrzweckanlage	785
18.8 Besondere Umweltaspekte von der Errichtung bis zum Rückbau einer Anlage	788
18.9 Literatur	788
19 Mindestwasserregelungen	793
19.1 Gebräuchliche Methoden zur Mindestwasserfestlegung	793
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 Fließgewässerhabitats und ihre Beschreibung	797
19.1.3.3 Schnittstelle Abiotik zu Biotik	798

19.1.4	Entscheidungsmodelle	799
19.2	Mindestwasserregelungen in Deutschland	799
19.3	Vorgehensweise zur Bestimmung von Mindestwasserregelungen	799
19.4	Das Simulationsmodell CASIMIR	800
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
19.5	Auswirkungen der Mindestwasserabgaben auf die Energieerzeugung in Wasserkraftanlagen	819
19.6	Literatur	820
20	Durchgängigkeit für die Aquafauna an Wasserkraftstandorten	823
20.1	Fischaufstiegsanlagen	825
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
20.2	Fischschutz- und Fischabstiegseinrichtungen	845
20.4	Literatur	847
21	Ausführungsbeispiele	849
21.1	Hochrheinkraftwerk Säckingen	849
21.2	Wasserkraftnutzung durch die Schluchseewerk AG	851
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
21.3	Großprojekt Drei-Schluchten-Kraftwerk am Jangtse in China	876
21.3.1	Der Jangtse und historische Hochwasserkatastrophen	876
21.3.2	Projektauslegung	877
21.3.3	Problemfelder	880
21.4	Kleinwasserkraftanlage Großarl	881
21.5	Kleinwasserkraftanlage Vöhrenbach mit der Gewölbereihenmauer Linach	888
21.5.1	Übersicht	888
21.5.2	Konzeption	889
21.5.3	Streiflichter der Sanierung eines nationalen Baudenkmales	891
21.6	Literatur	893
22	Symbole, Einheiten, Umrechnungsfaktoren	895
22.1	Kenngrößen und Symbole	895
22.2	Abkürzungen	909
22.3	Griechisches Alphabet	909
22.4	Einheitenabkürzungen	909
22.5	Einheiten und Umrechnungsfaktoren	910

Autoren	913
Sachverzeichnis	915