

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XVIII
1 Allgemeine strömungstechnische Grundlagen	1
1.1 Absolute und relative Strömung	1
1.2 Erhaltungssätze.....	2
1.2.1 Erhaltung der Masse.....	2
1.2.2 Erhaltung der Energie	3
1.2.3 Erhaltung der Bewegungsgröße	4
1.3 Grenzschichten, Grenzschichtbeeinflussung.....	7
1.4 Strömung auf gekrümmten Bahnen	11
1.4.1 Kräftegleichgewicht	11
1.4.2 Erzwungene und freie Wirbel	14
1.4.3 Strömung in gekrümmten Kanälen.....	15
1.5 Strömungsverluste	17
1.5.1 Reibungsverluste	17
1.5.2 Verwirbelungsverluste	20
1.6 Diffusoren.....	22
1.7 Strömungsverteilung in Parallelsträngen, Rohrleitungsnetze.....	26
2 Bauarten und Leistungsdaten	29
2.1 Wirkungsweise und Aufbau.....	29
2.2 Leistungsdaten	33
2.2.1 Spezifische Förderarbeit, Förderhöhe	33
2.2.2 Netto-Energiehöhe im Saugstutzen, NPSH.....	35
2.2.3 Leistung und Wirkungsgrad	36
2.2.4 Kennlinien	36
2.3 Pumpentypen und ihre Anwendung.....	37
2.3.1 Übersicht.....	37
2.3.2 Klassifizierungsmöglichkeiten und Einsatzgebiete	40
2.3.3 Bauarten	42
2.3.4 Sonderbauarten	50
3 Grundlagen der hydraulischen Berechnung	54
3.1 Eindimensionale Berechnung mit Geschwindigkeitsdreiecken	54
3.2 Energieübertragung im Laufrad: Spezifische Förderarbeit, Förderhöhe....	57

3.3	Die Strömungsumlenkung durch die Schaufeln. Abströmbeiwert und Minderumlenkung	60
3.4	Dimensionslose Kennzahlen. Ähnlichkeitsgesetze. Spezifische Drehzahl	64
3.5	Leistungsbilanz und Wirkungsgrade.....	68
3.6	Berechnung der Nebenverluste.....	70
3.6.1	Radreibungsverluste.....	70
3.6.2	Leckverluste axial durchströmter Dichtspalte	73
3.6.3	Leistungsverlust der Zwischenstufendichtung.....	78
3.6.4	Spaltverluste an offenen Laufrädern	79
3.6.5	Leckverluste radial oder diagonal durchströmter Dichtspalte	80
3.6.6	Mechanische Verlustleistung	81
3.7	Grundsätzliches zur Berechnung der Leitvorrichtung	82
3.8	Hydraulische Verluste	87
3.9	Statistische Angaben über Druckzahlen, Wirkungsgrade und Verluste.....	90
3.10	Wirkungsgradaufwertung	97
3.11	Hinweise zur Verlustminimierung	100
3.12	Berechnungstabellen	101
4	Kennlinien	113
4.1	Drosselkurve und Leistungsaufnahme	113
4.1.1	Die theoretische Kennlinie (ohne Strömungsverluste)	113
4.1.2	Die reale Kennlinie mit Strömungsverlusten.....	116
4.1.3	Komponentenkennlinien	119
4.1.4	Förderhöhe und Leistungsaufnahme beim Betrieb gegen geschlossenen Schieber	124
4.1.5	Einfluß der Pumpengröße und der Drehzahl	127
4.1.6	Einfluß der spezifischen Drehzahl auf die Kennlinienform	127
4.2	Bestpunktlage	128
4.3	Vorausbestimmung der Kennlinie	132
4.4	Kennfelder	134
4.5	Anpassen der Kennlinie.....	135
4.5.1	Abdrehen des Laufrades.....	137
4.5.2	Zuschärfung der Schaufeln am Laufradaustritt	140
4.5.3	Änderungen am Leitapparat	141
4.6	Analyse von Kennlinienabweichungen und Leistungsdefiziten.....	142
5	Teillastverhalten. 3-dimensionale Strömungsvorgänge und ihre Wirkung auf die Kennlinien.....	146
5.1	Grundsätzliche Überlegungen	146
5.2	Die Strömung im Laufrad.....	149
5.2.1	Übersicht.....	149
5.2.2	Physikalische Mechanismen.....	152
5.2.3	Zusammenwirken der verschiedenen Mechanismen	157
5.2.4	Rückströmung am Laufradeintritt	160

5.2.5	Die Strömung am Laufradaustritt	166
5.2.6	Meßtechnische Erkennung des Rückströmbeginns	167
5.3	Die Strömung in der Leitvorrichtung	168
5.3.1	Strömungsablösung im Leitrad	168
5.3.2	Der Druckrückgewinn im Leitrad	170
5.3.3	Einfluß der Anströmung auf Druckrückgewinn und Ablösung ..	172
5.3.4	Die Strömung in Spiralgehäusen	174
5.3.5	Die Strömung in Ringgehäusen und Leitringen	175
5.4	Auswirkungen der Rückströmung	176
5.4.1	Auswirkung der Rückströmung am Laufradeintritt	176
5.4.2	Auswirkung der Rückströmung am Laufradaustritt	180
5.4.3	Auswirkung auf Radseitenraumströmung und Axial Schub	187
5.4.4	Schädliche Auswirkungen der Teillastrezirkulation	189
5.5	Einfluß von Ablösung und Rezirkulation auf die Kennlinie	190
5.5.1	Arten von Kennlinieninstabilität	190
5.5.2	Kennlinien mit Sattel (Instabilitäten vom Typ S)	191
5.5.3	Instabilitäten vom Typ F	198
5.6	Maßnahmen zur Beeinflussung der Kennlinienform	198
5.6.1	Einführung	198
5.6.2	Beeinflussung des Rezirkulationsbeginns am Laufradeintritt ..	199
5.6.3	Beeinflussung des Rezirkulationsbeginns am Laufradaustritt ..	200
5.6.4	Beseitigung einer Instabilität vom Typ F	200
5.6.5	Beeinflussung der Sattel-Instabilität der Radialräder mit $n_q < 50$	201
5.6.6	Beeinflussung der Sattel-Instabilität der Radialräder mit $n_q > 50$	204
5.6.7	Beeinflussung der Instabilität der Halbaxial- und Axialräder ..	204
5.6.8	Reduktion von Förderhöhe und Leistung bei Nullförderung ..	205
6	Saugverhalten und Kavitation	209
6.1	Physikalische Grundlagen	209
6.1.1	Entstehung und Implosion von Dampfblasen in einer Strömung	209
6.1.2	Blasendynamik	211
6.2	Kavitation am Laufradeintritt	214
6.2.1	Druckverteilung und Blasenfeld	214
6.2.2	Erforderlicher NPSH-Wert. Ausmaß der Kavitation. Kavitationskriterien	216
6.2.3	Modellgesetze für Kavitationsströmungen	217
6.2.4	Die Saugzahl	219
6.2.5	Experimentelle Bestimmung des erforderlichen NPSH _R -Wertes	221
6.3	Bestimmung des NPSH _R -Wertes	230
6.3.1	Einflußparameter auf den NPSH _R -Wert	230
6.3.2	Berechnung des NPSH _R -Wertes	232

6.3.3	Abschätzung des NPSH ₃ -Wertes als Funktion des Förderstromes	236
6.4	Einfluß der Fluideigenschaften.....	239
6.4.1	Thermodynamische Einflüsse	239
6.4.2	Nichtkondensierbare Gase	241
6.4.3	Zugspannungen in der Flüssigkeit.....	242
6.5	Kavitationsbedingte Schwingungen und Geräusche	243
6.5.1	Erregermechanismen.....	243
6.5.2	Kavitationsschallmessungen zur Quantifizierung der hydrodynamischen Kavitationsintensität.....	244
6.5.3	Frequenzverhalten des Kavitationsschalls.....	248
6.6	Kavitationserosion.....	249
6.6.1	Untersuchungsmethoden	249
6.6.2	Kavitationswiderstand.....	252
6.6.3	Vorausberechnung von Kavitationsschäden aufgrund der Blasenfeldlänge.....	254
6.6.4	Abschätzung der Erosion aufgrund des Flüssigkeitsschalles....	257
6.6.5	Körperschallmessungen zur Kavitationsdiagnose	258
6.6.6	Farberosionsversuche zur Bestimmung des Implosionsortes ...	259
6.6.7	Erosionsschwellwert und Materialverhalten bei verschiedenen hydrodynamischen Kavitationsintensitäten	260
6.6.8	Zusammenfassende Beurteilung.....	263
6.7	Die Wahl des Zulaufdruckes in der Anlage (NPSH _A)	267
6.8	Kavitationsschäden: Analyse und Abhilfe.....	269
6.8.1	Aufnahme des Schadens und der Betriebsparameter.....	269
6.8.2	Kavitationsformen und typische Arten von Kavitationsschäden	270
6.8.3	Behebung von Kavitationsschäden	275
6.9	Ungenügende Saugfähigkeit: Analyse und Abhilfe	276
7	Berechnung und Entwurf der hydraulischen Komponenten	277
7.1	Methoden und Randbedingungen	277
7.1.1	Methoden zur Entwicklung hydraulischer Komponenten	277
7.1.2	Hydraulische Anforderungen	278
7.1.3	Rechenmodelle.....	279
7.2	Radiale Laufräder	281
7.2.1	Bestimmung der Hauptabmessungen	282
7.2.2	Der Laufradentwurf.....	290
7.2.3	Kriterien für die Schaufelgestaltung.....	296
7.2.4	Gestaltungskriterien für Sauglaufräder.....	299
7.2.5	Ausnützung dreidimensionaler Effekte	300
7.3	Radiale Laufräder für spezifische Drehzahlen $n_q < 18$	301
7.3.1	Einfach gekrümmte Schaufeln (Zylinderschaufeln)	301
7.3.2	Lochscheiben	303
7.3.3	Radialer Schaufelstern	305

7.4	Radiale Laufräder für Pumpen mit Verstopfungsgefahr	306
7.5	Halbaxiale Laufräder	308
7.6	Axiale Laufräder und Leitapparate	314
7.6.1	Eigenschaften	314
7.6.2	Berechnung und Wahl der Hauptabmessungen	315
7.6.3	Einige Eigenschaften von Tragflügeln	320
7.6.4	Schaufelauslegung	326
7.6.5	Profilauswahl	329
7.6.6	Leitradauslegung	331
7.7	Vorsatzläufer	333
7.7.1	Berechnung der Vorsatzläufer	334
7.7.2	Entwurf und Gestaltung der Vorsatzläufer	339
7.7.3	Abstimmung von Vorsatzläufer und Laufrad	340
7.7.4	Hinweise für die Anwendung der Vorsatzläufer	342
7.8	Spiralgehäuse	343
7.8.1	Berechnung und Wahl der Hauptabmessungen	343
7.8.2	Entwurf und Gestaltung der Spiralgehäuse	347
7.8.3	Einfluß der Gestaltung auf das hydraulische Verhalten	352
7.9	Radiale Leiträder mit und ohne Rückführung	353
7.9.1	Berechnung und Wahl der Hauptabmessungen	353
7.9.2	Entwurf und Gestaltung radialer Leiträder	360
7.10	Halbaxiale Leiträder	362
7.11	Spirale mit Leitrad oder Stützschaufelring	363
7.12	Ringräume und Leitringe	364
7.13	Einlaufgehäuse für Pumpen mit durchgehender Welle	365
8	Numerische Strömungsberechnungen	370
8.1	Übersicht	370
8.2	Quasi-3D-Verfahren	372
8.3	Dreidimensionale Euler-Verfahren	374
8.4	Navier-Stokes-Berechnungen	374
8.4.1	Grundgleichungen	374
8.4.2	Möglichkeiten von 3D-Navier-Stokes-Berechnungen	377
8.4.3	Netzerzeugung	379
8.4.4	Randbedingungen	382
8.5	Integral- und Mittelwertbildung bei Laufradberechnungen	382
8.6	Vergleich zwischen Rechnung und Messung	388
8.6.1	Auswertung gemessener Geschwindigkeitsverteilungen	388
8.6.2	Auswertung industriell durchgeführter Versuche	389
8.6.3	Unsicherheiten	389
8.7	Laufradberechnung	390
8.7.1	Globalwerte im Bestpunkt	390
8.7.2	Geschwindigkeitsprofile	393
8.7.3	Einflußparameter	394
8.7.4	Berechnungsbeispiel	394

8.7.5	Berechnung von Kavitationsströmungen.....	397
8.8	Leitrad- oder Stufenberechnungen.....	398
8.9	Kriterien für die Beurteilung numerischer Berechnungen	400
8.9.1	Allgemeine Hinweise	400
8.9.2	Konsistenz und Plausibilität der Rechnung.....	401
8.9.3	Werden die verlangten Leistungsdaten erreicht?.....	401
8.9.4	Maximierung des hydraulischen Wirkungsgrades.....	402
8.9.5	Kennlinienstabilität	404
9	Hydraulische Kräfte	405
9.1	Die Strömung im Radseitenraum.....	405
9.2	Axialschub.....	411
9.2.1	Axialkraftberechnung allgemein	411
9.2.2	Einstufige Pumpen mit einflutigem, überhängendem Laufrad	416
9.2.3	Mehrstufige Pumpen	417
9.2.4	Doppelflutige Laufräder.....	419
9.2.5	Halbaxiale Laufräder.....	420
9.2.6	Axialpumpen.....	420
9.2.7	Rückenschaufeln	421
9.2.8	Halboffene Laufräder.....	422
9.2.9	Instationärer Axialschub	423
9.3	Radialschub	423
9.3.1	Definition und Abgrenzung.....	423
9.3.2	Messung von Radialkräften.....	425
9.3.3	Pumpen mit Einfachspirale	426
9.3.4	Pumpen mit Doppelspirale.....	430
9.3.5	Pumpen mit Ringraum.....	431
9.3.6	Leitradpumpen	432
9.3.7	Radialschub infolge ungleichförmiger Zuströmung	432
9.3.8	Axialpumpen.....	433
9.3.9	Radialschubausgleich.....	433
9.3.10	Radialschubberechnung	434
10	Schwingungen und Geräusche.....	437
10.1	Instationäre Strömungsvorgänge am Laufradaustritt	437
10.2	Druckpulsationen.....	440
10.2.1	Entstehung von Druckpulsationen.....	440
10.2.2	Strömung und Schallerzeugung.....	441
10.2.3	Einflußparameter der Pumpe.....	442
10.2.4	Einfluß des Systems	443
10.2.5	Modellgesetze	445
10.2.6	Messung und Auswertung	445
10.2.7	Druckpulsationen ausgeführter Pumpen.....	446
10.2.8	Auswirkungen von Druckpulsationen	448
10.2.9	Auslegungsrichtlinien.....	448

10.3 Akustische Erscheinungen.....	451
10.3.1 Akustische Resonanzen in Rohrleitungen	451
10.3.2 Körperschall.....	454
10.3.3 Luftschall	455
10.4 Hydraulische Anregung durch Wirbelstraßen.....	456
10.5 Übersicht über mechanische Schwingungen bei Kreiselpumpen.....	458
10.6 Rotordynamik	460
10.6.1 Übersicht.....	460
10.6.2 Kräfte in Spaltdichtungen.....	461
10.6.3 Hydraulische Laufradwechselwirkung	468
10.6.4 Lagerreaktionen	479
10.6.5 Eigenwerte und kritische Drehzahlen.....	470
10.6.6 Rotor-Instabilitäten	473
10.7 Hydraulische Schwingungsanregung	476
10.7.1 Interferenz zwischen Lauf- und Leitschaufeln	476
10.7.2 Umlaufende Ablösungen	477
10.7.3 Übrige Erregermechanismen	479
10.8 Richtlinien für die Konstruktion schwingungsarmer Pumpen	482
10.9 Schwingungsdiagnose.....	484
11 Verhalten der Kreiselpumpen in Anlagen.....	490
11.1 Anlagenkennlinien und Arbeitspunkt. Einzelbetrieb, Parallel- und Reihenschaltung	490
11.2 Regelung.....	495
11.3 Statische und dynamische Stabilität.....	501
11.4 Anfahren, Abschalten	503
11.5 Ausfall des Antriebes, Druckstoß	507
11.6 Zulässiger Betriebsbereich	508
11.7 Der Pumpenzulauf	511
11.7.1 Zulaufleitungen	511
11.7.2 Transientes Absinken des Zulaufdruckes	512
11.7.3 Einlaufbauwerke	514
11.8 Druckleitungen	516
12 Turbinenbetrieb. Allgemeines Kennfeld	519
12.1 Rückwärtslaufende Kreiselpumpen als Turbinen	519
12.1.1 Theoretische und reale Kennlinien.....	519
12.1.2 Leerlauf- und Widerstandskennlinien	524
12.1.3 Berechnung der Kennlinien aufgrund empirischer Korrelationen	525
12.1.4 Verhalten der Turbinen in Anlagen.....	528
12.2 Allgemeines Kennfeld	532
13 Einfluß des Fördermediums	538
13.1 Förderung von Flüssigkeiten mit hoher Viskosität	538

Fehler! Unbekanntes Schalterargument. Formelzeichen

13.1.1	Wirkung der Viskosität auf Einzelverluste und Kennlinie	538
13.1.2	Umrechnung der Kennlinie von Wasser auf viskose Medien...	545
13.2	Förderung von Gas-Flüssigkeits-Gemischen	550
13.2.1	Phasenverteilung in der Rohrströmung	551
13.2.2	Phasenverteilung in der Pumpenströmung und Einflußparameter.....	554
13.2.3	Empirische Behandlung von Zweiphasenströmungen	557
13.2.4	Verhalten von Kreiselpumpen bei Gas-Flüssigkeits- Förderung.....	560
13.3	Entspannung von Zweiphasengemischen in Turbinen	566
13.3.1	Berechnung des Arbeitsumsatzes	566
13.3.2	Vorausberechnung der Turbinenkennlinien bei Zweiphasenströmung.....	568
13.4	Hydraulischer Feststofftransport	571
13.5	Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten	575
Literaturverzeichnis		577
Sachverzeichnis		591

Liste der Tafeln

Tafel 0.1	Abmessungen und Strömungsgrößen.....	XXIV
Tafel 0.2	Abmessungen der hydraulischen Komponenten	XXV
Tafel 1.1	Häufig verwendete Druckverlustbeiwerte.....	27
Tafel 1.2	Berechnung von Rohrleitungsnetzen	28
Tafel 2.1	Hydraulische Pumpenkomponenten und Schaltungen	32
Tafel 2.2	Förderhöhe und Haltedruckhöhe (NPSH).....	34
Tafel 2.3	Pumpentypen	39
Tafel 2.4	Einsatzgebiete von Kreiselpumpen.....	41
Tafel 3.1	Geschwindigkeitsdreiecke am Laufradeintritt	102
Tafel 3.2	Geschwindigkeitsdreiecke am Laufradaustritt	103
Tafel 3.3	Energieübertragung im Laufrad.....	104
Tafel 3.4	Ähnlichkeitsgesetze und dimensionslose Kennzahlen	105
Tafel 3.5	Leistungsbilanz, Wirkungsgrade und Verluste	106
Tafel 3.6	Reibleistung rotierender Scheiben oder Zylinder	107
Tafel 3.7 (1)	Spaltverluste I.....	108
Tafel 3.7 (2)	Spaltverluste II	109
Tafel 3.8 (1)	Hydraulische Verluste im Laufrad.....	110
Tafel 3.8 (2)	Hydraulische Verluste im Leitapparat	111
Tafel 3.9	Statistische Wirkungsgradangaben und Wirkungsgrad- aufwertung.....	112

Tafel 4.1	Leitapparat-Gerade und Bestpunktlage	129
Tafel 4.2	Anpassen der Kennlinie	136
Tafel 4.3	Analyse von Leistungsdefiziten	144
Tafel 5.1	Interpretation und Anpassung der Kennlinienform.....	207/208
Tafel 6.1	Abschätzung des Risikos von Kavitationsschäden	265/266
Tafel 6.2	Festlegung des NPSH _A -Wertes	268
Tafel 6.3	Kavitationsschäden	271
Tafel 6.4	Analyse von NPSH-Problemen	276
Tafel 7.1	Lauftradberechnung	289
Tafel 7.2	Drallverteilung am Laufradaustritt	313
Tafel 7.3	Hauptabmessungen axialer Laufräder.....	316
Tafel 7.4	Tragflügelprofile.....	321
Tafel 7.5	Schaufelauslegung axialer Laufräder.....	327
Tafel 7.6	Berechnung der Vorsatzläufer	336
Tafel 7.7	Berechnung des Leitapparates	359
Tafel 9.1	Rotation des Fluids im Radseitenraum	414
Tafel 9.2	Axialkraftberechnung	415
Tafel 9.3	Halboffene Laufräder. Rückenschaufeln	421
Tafel 9.4	Radialschubberechnung	436
Tafel 10.1	Hydraulisch verursachte Schäden an Pumpenbauteilen.....	449
Tafel 10.2	Auslegungsrichtlinien für niedrige Druckpulsationen.....	450
Tafel 10.3	Akustische Wirkung von Systemkomponenten.....	452
Tafel 10.4	Schwingungsanregung durch Wirbelstraßen.....	457
Tafel 10.5	Erzwungene und selbsterregte Schwingungen.....	475
Tafel 10.6	Schwingungsdiagnose.....	487/488/489
Tafel 12.1	Turbinenkennlinien.....	529
Tafel 13.1 (1)	Umrechnung der Kennlinien von Wasserförderung auf viskose Medien.....	549
Tafel 13.1 (2)	Berechnung der Kennlinien für viskose Medien	550
Tafel 13.2	Gas-Flüssigkeits-Gemische.....	559
Tafel 13.3	Expansion von Gas-Flüssigkeits-Gemischen	570
Tafel 13.4	Feststofftransport.....	573

Liste der Tabellen

Tabelle 1.1	Grenzrauigkeiten	19
Tabelle 6.1	Gebräuchliche Saugzahlen.....	219
Tabelle 6.2	Typische NPSH-Verhältnisse	225
Tabelle 6.3	Beiwerte λ_c und λ_w bei stoßfreier Anströmung.....	233

Fehler! Unbekanntes Schalterargument. Formelzeichen

Tabelle 7.1	Saugradauslegung	300
Tabelle 7.2	Schaufelzahlen für Laufräder mit $n_q > 140$	320
Tabelle 7.3	Leit- und Laufschaufelzahl-Kombinationen	356
Tabelle 10.1	Luftschallberechnung nach Gleichung (10.6)	456
Tabelle 10.2	Beurteilung von Wellenschwingungen	472
Tabelle 10.3	Beurteilung von Lagergehäuseschwingungen	486