

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur dritten Auflage	V
Aus dem Vorwort zur ersten Auflage.....	VII
Zum Gebrauch des Buches.....	VIII
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	16
1.5 Strömungsverluste	18
1.5.1 Berechnung von Reibungsverlusten.....	18
1.5.2 Rauheitseinfluß auf die Reibungsverluste.....	21
1.5.3 Verwirbelungsverluste	25
1.6 Diffusoren	27
1.7 Fluidstrahlen	32
1.8 Ausgleich ungleichförmiger Geschwindigkeitsprofile	33
1.9 Strömungsverteilung in Parallelsträngen. Rohrleitungsnetze	35
2 Bauarten und Leistungsdaten	39
2.1 Wirkungsweise und Aufbau	39
2.2 Leistungsdaten	43
2.2.1 Spezifische Förderarbeit, Förderhöhe	43
2.2.2 Netto-Energiehöhe im Saugstutzen, NPSH.....	45
2.2.3 Leistung und Wirkungsgrad.....	46
2.2.4 Kennlinien.....	46
2.3 Pumpentypen und ihre Anwendung	47
2.3.1 Übersicht	47
2.3.2 Klassifizierungsmöglichkeiten und Einsatzgebiete.....	50

2.3.3 Bauarten	52
2.3.4 Sonderbauarten.....	64
3 Grundlagen der hydraulischen Berechnung.....	69
3.1 Berechnung nach Stromfadentheorie.....	69
3.2 Energieübertragung im Laufrad: Spezifische Förderarbeit. Förderhöhe ..	72
3.3 Die Strömungsumlenkung durch die Schaufeln. Abströmbeiwert und Minderumlenkung.....	75
3.4 Dimensionslose Kennzahlen. Ähnlichkeitsgesetze. Spezifische Drehzahl	80
3.5 Leistungsbilanz und Wirkungsgrade	83
3.6 Berechnung der Nebenverluste.....	85
3.6.1 Radreibungsverluste.....	86
3.6.2 Leckverluste axial durchströmter Dichtpalte	90
3.6.3 Leistungsverlust der Zwischenstufendichtung	98
3.6.4 Leckverluste radial oder diagonal durchströmter Dichtpalte.....	98
3.6.5 Spaltverluste an offenen Laufrädern	99
3.6.6 Mechanische Verlustleistung	101
3.7 Grundsätzliches zur Berechnung der Leitvorrichtung	102
3.8 Hydraulische Verluste	107
3.9 Statistische Angaben über Druckzahlen, Wirkungsgrade und Verluste ..	112
3.10 Einfluß der Rauheit und der Reynolds-Zahl.....	120
3.10.1 Übersicht	120
3.10.2 Wirkungsgradaufwertung.....	121
3.10.3 Wirkungsgradberechnung aus Verlustanalysen	123
3.11 Hinweise zur Verlustminimierung.....	129
3.12 Berechnungstafeln	130
4 Kennlinien.....	145
4.1 Drosselkurve und Leistungsaufnahme.....	145
4.1.1 Die theoretische Kennlinie (ohne Strömungsverluste).....	145
4.1.2 Die reale Kennlinie mit Strömungsverlusten	148
4.1.3 Komponentenkennlinien	151
4.1.4 Förderhöhe und Leistungsaufnahme beim Betrieb gegen geschlossenen Schieber	157
4.1.5 Einfluß der Pumpengröße und der Drehzahl.....	160
4.1.6 Einfluß der spezifischen Drehzahl auf die Kennlinienform	160
4.2 Bestpunktlage	161
4.3 Vorausbestimmung der Kennlinie	165
4.4 Kennfelder	167
4.5 Anpassen der Kennlinie	169
4.5.1 Abdrehen des Laufrades.....	169
4.5.2 Zuschärfung der Schaufeln am Laufradaustritt.....	176
4.5.3 Änderungen am Leitapparat	178
4.6 Analyse von Kennlinienabweichungen und Leistungsdefiziten	178
4.7 Berechnung von Kennlinienänderungen.....	182

5 Teillastverhalten. 3-dimensionale Strömungsvorgänge und ihre Wirkung auf die Kennlinien	187
5.1 Grundsätzliche Überlegungen	187
5.2 Die Strömung im Laufrad	190
5.2.1 Übersicht	190
5.2.2 Physikalische Mechanismen	193
5.2.3 Zusammenwirken der verschiedenen Mechanismen	198
5.2.4 Rückströmung am Laufradeintritt	201
5.2.5 Die Strömung am Laufradaustritt	207
5.2.6 Meßtechnische Erkennung des Rückströmbeginns	208
5.3 Die Strömung in der Leitvorrichtung	209
5.3.1 Strömungsablösung im Leitrad	209
5.3.2 Der Druckrückgewinn im Leitrad	212
5.3.3 Einfluß der Anströmung auf Druckrückgewinn und Ablösung	213
5.3.4 Die Strömung in Spiralgehäusen	215
5.3.5 Die Strömung in Ringgehäusen und Leitringen	216
5.4 Auswirkungen der Rückströmung	217
5.4.1 Auswirkung der Rückströmung am Laufradeintritt	217
5.4.2 Auswirkung der Rückströmung am Laufradaustritt	222
5.4.3 Auswirkung auf Radseitenraumströmung und Axialschub	228
5.4.4 Schädliche Auswirkungen der Teillastrezirkulation	230
5.5 Einfluß von Ablösung und Rezirkulation auf die Kennlinie	231
5.5.1 Arten von Kennlinieninstabilität	231
5.5.2 Kennlinien mit Sattel (Instabilitäten vom Typ S)	232
5.5.3 Instabilitäten vom Typ F	241
5.6 Maßnahmen zur Beeinflussung der Kennlinienform	241
5.6.1 Einführung	241
5.6.2 Beeinflussung des Rezirkulationsbeginns am Laufradeintritt	242
5.6.3 Beeinflussung des Rezirkulationsbeginns am Laufradaustritt	243
5.6.4 Beseitigung einer Instabilität vom Typ F	243
5.6.5 Beeinflussung der Sattel-Instabilität der Radialräder mit $n_q < 50$	244
5.6.6 Beeinflussung der Sattel-Instabilität der Radialräder mit $n_q > 50$	249
5.6.7 Beeinflussung der Instabilität der Halbaxial- und Axialräder	249
5.6.8 Reduktion von Förderhöhe und Leistung bei Nullförderung	250
5.7 Zur Strömung in offenen Axialrädern	251
6 Saugverhalten und Kavitation	259
6.1 Physikalische Grundlagen	259
6.1.1 Entstehung und Implosion von Dampfblasen in einer Strömung	259
6.1.2 Blasendynamik	261
6.2 Kavitation in Laufrad und Leitrad	264
6.2.1 Druckverteilung und Blasenfeld	264
6.2.2 Erforderlicher NPSH-Wert. Ausmaß der Kavitation. Kavitationskriterien	266
6.2.3 Modellgesetze für Kavitationsströmungen	268

6.2.4 Die Saugzahl	271
6.2.5 Experimentelle Bestimmung des erforderlichen $NPSH_R$ -Wertes	274
6.2.6 Spaltkavitation	283
6.3 Bestimmung des $NPSH_R$ -Wertes	284
6.3.1 Einflußparameter auf den $NPSH_R$ -Wert	284
6.3.2 Berechnung des $NPSH_R$ -Wertes	286
6.3.3 Abschätzung des $NPSH_3$ -Wertes als Funktion des Förderstromes ..	291
6.4 Einfluß der Fluideigenschaften	294
6.4.1 Thermodynamische Einflüsse	295
6.4.2 Nichtkondensierbare Gase	298
6.4.3 Keimgehalt und Zugspannungen in der Flüssigkeit	298
6.5 Kavitationsbedingte Schwingungen und Geräusche	301
6.5.1 Erregermechanismen	301
6.5.2 Kavitationsschallmessungen zur Quantifizierung der hydro-dynamischen Kavitationsintensität	302
6.5.3 Frequenzverhalten des Kavitationsschalls	305
6.6 Kavitationserosion	307
6.6.1 Untersuchungsmethoden	307
6.6.2 Kavitationswiderstand	310
6.6.3 Vorausberechnung von Kavitationsschäden aufgrund der Blasenfeldlänge	313
6.6.4 Abschätzung der Erosion aufgrund des Flüssigkeitsschalles	316
6.6.5 Körperschallmessungen zur Kavitationsdiagnose	318
6.6.6 Farberosionsversuche zur Bestimmung des Implosionsortes	318
6.6.7 Erosionsschwellwert und Materialverhalten bei verschiedenen hydrodynamischen Kavitationsintensitäten	320
6.6.8 Zusammenfassende Beurteilung	323
6.7 Die Wahl des Zulaufdruckes in der Anlage ($NPSH_A$)	326
6.8 Kavitationsschäden: Analyse und Abhilfe	330
6.8.1 Aufnahme des Schadens und der Betriebsparameter	330
6.8.2 Kavitationsformen und typische Arten von Kavitationsschäden	331
6.8.3 Behebung von Kavitationsschäden	336
6.9 Ungenügende Saugfähigkeit: Analyse und Abhilfe	337
7 Berechnung und Entwurf der hydraulischen Komponenten	339
7.1 Methoden und Randbedingungen	339
7.1.1 Methoden zur Entwicklung hydraulischer Komponenten	339
7.1.2 Hydraulische Anforderungen	340
7.1.3 Rechenmodelle	341
7.2 Radiale Laufräder	343
7.2.1 Bestimmung der Hauptabmessungen	344
7.2.2 Der Laufradentwurf	352
7.2.3 Kriterien für die Schaufelgestaltung	360
7.2.4 Gestaltungskriterien für Sauglaufräder	361
7.2.5 Ausnutzung dreidimensionaler Effekte	363

7.3 Radiale Laufräder für kleine spezifische Drehzahlen.....	364
7.3.1 Einfach gekrümmte Schaufeln (Zylinderschaufeln).....	364
7.3.2 Lochscheiben	366
7.3.3 Radialer Schaufelstern	368
7.3.4 Doppeltwirkende Laufräder mit radialen Schaufeln	369
7.4 Radiale Laufräder für Pumpen mit Verstopfungsgefahr.....	371
7.5 Halbaxiale Laufräder	377
7.6 Axiale Laufräder und Leitapparate.....	382
7.6.1 Eigenschaften.....	382
7.6.2 Berechnung und Wahl der Hauptabmessungen	384
7.6.3 Einige Eigenschaften von Tragflügeln.....	389
7.6.4 Schaufelauslegung	394
7.6.5 Profilauswahl	402
7.6.6 Leitradauslegung	404
7.7 Vorsatzläufer	406
7.7.1 Berechnung der Vorsatzläufer	407
7.7.2 Entwurf und Gestaltung der Vorsatzläufer	412
7.7.3 Abstimmung von Vorsatzläufer und Laufrad.....	414
7.7.4 Hinweise für die Anwendung der Vorsatzläufer	415
7.8 Spiralgehäuse.....	417
7.8.1 Berechnung und Wahl der Hauptabmessungen	417
7.8.2 Entwurf und Gestaltung der Spiralgehäuse.....	421
7.8.3 Einfluß der Gestaltung auf das hydraulische Verhalten.....	425
7.9 Radiale Leiträder mit und ohne Rückführung	427
7.9.1 Berechnung und Wahl der Hauptabmessungen	427
7.9.2 Entwurf und Gestaltung radialer Leiträder	433
7.10 Halbaxiale Leiträder	436
7.11 Spirale mit Leitrad oder Stützschaufelring	437
7.12 Ringräume und Leitringe	438
7.13 Einlaufgehäuse für Pumpen mit durchgehender Welle	439
8 Numerische Strömungsberechnungen	445
8.1 Übersicht.....	445
8.2 Quasi-3D-Verfahren und 3D-Euler-Rechnungen.....	447
8.2.1 Quasi-3D-Verfahren.....	447
8.2.2 Dreidimensionale Euler-Verfahren	449
8.3 Grundlagen für Navier-Stokes-Berechnungen	449
8.3.1 Navier-Stokes-Gleichungen	449
8.3.2 Turbulenzmodellierung	451
8.3.3 Behandlung der Strömung in Wandnähe	455
8.3.4 Netzerzeugung	458
8.3.5 Numerische Verfahren und Steuerparameter	461
8.3.6 Randbedingungen	463
8.3.7 Anfangswerte	465
8.3.8 Möglichkeiten von 3D-Navier-Stokes-Berechnungen	466

8.4 Mittelwertbildung und Datenaufbereitung.....	468
8.5 Laufradberechnung.....	476
8.5.1 Globalwerte im Bestpunkt.....	476
8.5.2 Geschwindigkeitsprofile.....	479
8.5.3 Einflußparameter	480
8.5.4 Berechnungsbeispiel	480
8.6 Berechnung von Leitvorrichtungen und Stufen.....	484
8.6.1 Getrennte Berechnung der Leitvorrichtung.....	484
8.6.2 Stationäre Berechnung von Stufen oder kompletten Maschinen	484
8.6.3 Instationäre Berechnungen	487
8.7 Zwei-Phasen- und Kavitationsströmungen.....	488
8.8 Berechnungsstrategien, Unsicherheiten, Qualität.....	491
8.8.1 Unsicherheiten, Fehlerquellen, Fehlerreduktion	491
8.8.2 Qualitätssicherung bei CFD-Rechnungen	495
8.8.3 Vergleich zwischen Rechnung und Messung.....	506
8.9 Kriterien für die Beurteilung numerischer Berechnungen.....	508
8.9.1 Allgemeine Hinweise	508
8.9.2 Konsistenz und Plausibilität der Rechnung.....	508
8.9.3 Werden die verlangten Leistungsdaten erreicht?	509
8.9.4 Maximierung des hydraulischen Wirkungsgrades	509
8.9.5 Kennlinienstabilität	512
8.10 Grundsätzliches zu CFD-Rechnungen.....	512
9 Hydraulische Kräfte.....	515
9.1 Die Strömung im Radseitenraum.....	515
9.2 Axialkräfte	528
9.2.1 Axialkraftberechnung allgemein	528
9.2.2 Einstufige Pumpen mit einflutigem, überhängendem Laufrad.....	531
9.2.3 Mehrstufige Pumpen	535
9.2.4 Doppelflutige Laufräder.....	539
9.2.5 Halbaxiale Laufräder.....	540
9.2.6 Axialpumpen	540
9.2.7 Rückenschaufeln	540
9.2.8 Halboffene Laufräder	542
9.2.9 Instationäre Axialkräfte.....	543
9.3 Radialkräfte	543
9.3.1 Definition und Abgrenzung.....	543
9.3.2 Messung von Radialkräften.....	545
9.3.3 Pumpen mit Einfachspirale	546
9.3.4 Pumpen mit Doppelspirale	551
9.3.5 Pumpen mit Ringraum.....	552
9.3.6 Leitradpumpen	553
9.3.7 Radialkraft infolge ungleichförmiger Zuströmung	553
9.3.8 Axialpumpen.....	555
9.3.9 Radialkräfte in Pumpen mit Eikanallaufra.....	555

9.3.10 Radialkraftausgleich.....	557
9.3.11 Radialkraftberechnung	558
10 Schwingungen und Geräusche	563
10.1 Instationäre Strömungsvorgänge am Laufradaustritt.....	563
10.2 Druckpulsationen.....	566
10.2.1 Entstehung von Druckpulsationen	566
10.2.2 Strömung und Schallerzeugung	567
10.2.3 Einflußparameter der Pumpe.....	568
10.2.4 Einfluß des Systems	569
10.2.5 Modellgesetze	570
10.2.6 Messung und Auswertung.....	571
10.2.7 Druckpulsationen ausgeführter Pumpen	573
10.2.8 Auswirkungen von Druckpulsationen.....	576
10.2.9 Auslegungsrichtlinien	576
10.3 Bauteilbeanspruchung durch instationäre Strömungsvorgänge.....	577
10.4 Schallabstrahlung	579
10.4.1 Körperschall.....	579
10.4.2 Luftschall	580
10.5 Übersicht über mechanische Schwingungen bei Kreiselpumpen	583
10.6 Rotordynamik	585
10.6.1 Übersicht	585
10.6.2 Kräfte in Spaltdichtungen	586
10.6.3 Hydraulische Laufradwechselwirkung.....	593
10.6.4 Lagerreaktionen	595
10.6.5 Eigenwerte und kritische Drehzahlen	595
10.6.6 Rotor-Instabilitäten	598
10.7 Hydraulische Schwingungsanregung	602
10.7.1 Interferenzen zwischen Lauf- und Leitschaufeln.....	602
10.7.2 Umlaufende Ablösungen.....	608
10.7.3 Übrige Erregermechanismen.....	610
10.8 Richtlinien für die Konstruktion schwingungssarmer Pumpen.....	615
10.9 Zulässige Schwingungen	618
10.10 Allgemeine Schwingungsdiagnose.....	622
10.10.1 Überblick.....	622
10.10.2 Schwingungsmessungen	623
10.10.3 Schwingungsdiagnose.....	625
10.11 Lagergehäuseschwingungen: Mechanismus, Diagnose, Abhilfe	631
10.11.1 Hydraulische Erregermechanismen.....	632
10.11.2 Mechanische Auswirkungen hydraulischer Anregung	637
10.11.3 Hydraulische und mechanische Abhilfe.....	640
10.11.4 Diagnose von Lagergehäuseschwingungen	641
10.12 Hydraulische u. akustische Anregung v. Rohrleitungsschwingungen.	653
10.12.1 Anregung von Rohrleitungsschwingungen durch Pumpen.....	654
10.12.2 Anregung von Rohrschwingungen durch Komponenten.....	656

10.12.3 Akustische Resonanzen in Rohrleitungen.....	657
10.12.4 Hydraulische Anregung durch Wirbelstraßen.....	661
10.12.5 Kopplung zwischen Strömung und Schallwellen.....	663
10.12.6 Zum Mechanismus von Rohrleitungsschwingungen.....	667
10.13 Torsionsschwingungen	671
11 Verhalten der Kreiselpumpen in Anlagen	675
11.1 Anlagenkennlinien und Arbeitspunkt. Einzelbetrieb, Parallel- und Reihenschaltung.....	675
11.2 Regelung.....	680
11.3 Statische und dynamische Stabilität.....	687
11.4 Anfahren, Abschalten	689
11.5 Ausfall des Antriebes, Druckstoß	693
11.6 Zulässiger Betriebsbereich.....	694
11.7 Der Pumpenzulauf	697
11.7.1 Zulaufleitungen	697
11.7.2 Transientes Absinken des Zulaufdruckes.....	700
11.7.3 Einlaufbauwerke. Zulauf aus Behältern mit freiem Fluidspiegel...	706
11.7.4 Topfpumpen	721
11.8 Druckleitungen	722
12 Turbinenbetrieb. Allgemeines Kennfeld	725
12.1 Rückwärtslaufende Kreiselpumpen als Turbinen	725
12.1.1 Theoretische und reale Kennlinien.....	725
12.1.2 Leerlauf- und Widerstandskennlinien	730
12.1.3 Berechnung der Kennlinien aufgrund empirischer Korrelationen .	732
12.1.4 Berechnung der Turbinenkennlinien aufgrund Verlustanalysen....	736
12.1.5 Verhalten der Turbinen in Anlagen.....	741
12.2 Allgemeines Kennfeld	744
13 Einfluß des Fördermediums	751
13.1 Förderung von Flüssigkeiten mit hoher Viskosität.....	751
13.1.1 Wirkung der Viskosität auf Einzelverluste und Kennlinie.....	751
13.1.2 Umrechnung der Kennlinie von Wasser auf viskose Medien	758
13.1.3 Einfluß der Zähigkeit auf das Saugverhalten	765
13.1.4 Anfahren der Pumpe mit einem viskosen Medium	765
13.1.5 Hinweise für die Anwendung.....	766
13.2 Förderung von Gas-Flüssigkeits-Gemischen.....	767
13.2.1 Phasenverteilung in der Rohrströmung	767
13.2.2 Phasenverteilung in der Pumpenströmung, Einflußparameter	771
13.2.3 Empirische Behandlung von Zweiphasenströmungen	782
13.2.4 Verhalten von Kreiselpumpen bei Gas-Flüssigkeits-Förderung	789
13.2.5 Helico-axiale Mehrphasenpumpen.....	794
13.2.6 Systemkennlinien	797
13.2.7 Flüssigkeits- und Gasansammlungen	800

XVIII Inhaltsverzeichnis

13.2.8 Ungelöste und gelöste Gase und NPSH	802
13.3 Entspannung von Zweiphasengemischen in Turbinen	804
13.3.1 Berechnung des Arbeitsumsatzes.....	804
13.3.2 Berechnung der Turbinenkennlinien bei Zweiphasenströmung.....	806
13.4 Hydraulischer Feststofftransport	809
13.5 Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten.....	817
14 Werkstoffwahl für hohe Geschwindigkeiten	823
14.1 Ermüdungsbrüche an Laufrädern oder Leiträdern.....	824
14.2 Korrosion.....	835
14.2.1 Grundsätzliches	835
14.2.2 Korrosionsmechanismen	836
14.2.3 Korrosion in Trinkwasser, Kühlwasser, Abwasser	841
14.2.4 Korrosion in Meerwasser und Lagerstättenwasser.....	843
14.3 Erosionskorrosion in vollentsalztem Wasser.....	849
14.4 Materialwahl und zulässige Geschwindigkeiten.....	857
14.4.1 Definition häufig vorkommender Fördermedien	858
14.4.2 Metallische Pumpenwerkstoffe	859
14.4.3 Laufräder, Leiträder und Gehäuse.....	865
14.4.4 Spaltringwerkstoffe	877
14.4.5 Werkstoffe für medium berührte Wellen.....	880
14.4.6 Werkstoffe für Speisewasser- und Kondensatpumpen	880
14.4.7 Werkstoffe für REA-Pumpen.....	882
14.5 Hydroabrasiver Verschleiß	883
14.5.1 Einflußparameter.....	883
14.5.2 Quantitative Verschleißabschätzung	886
14.5.3 Materialverhalten und Feststoffeinfluß	893
14.5.4 Materialwahl	896
14.5.5 Abrasionsverschleiß in Feststoffpumpen	898
15 Zur Auswahl und Qualität von Kreiselpumpen	901
15.1 Die Pumpenspezifikation.....	902
15.2 Bestimmung von Pumpentyp und Baugröße	904
15.3 Technische Qualitätskriterien	910
15.3.1 Strömungstechnische Kriterien	910
15.3.2 Herstellungsqualität	914
15.4 Hochleistungspumpen	919
Anhang	925
A1 Umrechnung von Maßeinheiten	925
A2 Eigenschaften von Wasser im Sättigungszustand.....	927
A3 Lösung von Gasen in Wasser	930
A4 Qualitätsanforderungen an Gußstücke.....	933
A5 Physikalische Größen	935
A5.1 Atmosphärischer Luftdruck.....	935

A5.2 Fallbeschleunigung.....	935
A6 Schallgeschwindigkeit in einer Flüssigkeit.....	936
A7 Mechanische Schwingungen. Grundbegriffe.....	937
A7.1. Freie Schwingungen mit viskoser Dämpfung	937
A7.2. Erzwungene Schwingungen	939
A7.3. Eigenfrequenzen einfacher Strukturen	946
Literaturverzeichnis	947
Sachverzeichnis.....	973
Formelzeichen.....	XXIV