

Johann Friedrich Gülich

Kreiselpumpen

Handbuch für Entwicklung,
Anlagenplanung und Betrieb

3., korrigierte und ergänzte Auflage

fyj Springer

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 Neben Verluste.....	85
3.6.1 Radreibungsverluste.....	86
3.6.2 Leckverluste axial durchströmter Dichtspalte.....	90
3.6.3 Leistungsverlust der Zwischenstufendichtung.....	98
3.6.4 Leckverluste radial oder diagonal durchströmter Dichtspalte.....	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
3.1.2 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 Axial Schub.....	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 $n^{\wedge} < 50$...	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 Modelgesetze 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 EinflußparameteraufdenNPSH _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 Ausnützung 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 Doppelwirkende 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 Einkanallaufrad.....	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 Leitschaufelri.....	602
10.7.2 Umlaufende Ablösungen.....	608
10.7.3 Übrige Erregermechanismen.....	610
10.8 Richtlinien für die Konstruktion schwingungsarmer 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
 1 1.7.1 Zulaufleitungen.....697
 1 1.7.2 Transientes Absinken des Zulaufdruckes.....700
 1 1.7.3 Einlaufbauwerke. Zulauf aus Behältern mit freiem Fluidspiegel...706
 1 1.7.4 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

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'sehe 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 mediumsberührte Wellen.....	
14.4.6 Werkstoffe für Speisewasser- und Kondensatpumpen.....	
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.....	r.937
A7.2. Erzwungene Schwingungen.....	939
A7.3. Eigenfrequenzen einfacher Strukturen.....	946
Literaturverzeichnis.....	947
Sachverzeichnis.....	973
Formelzeichen.....	XXIV