

Tieftemperaturtechnologie

Dr.-Ing. Hartmut Frey
Dr. rer. nat. Rene A. Haefer

Herausgegeben von
Professor Dr.-Ing. Franz Xaver Eder

VDIVerlag GmbH

Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure • Düsseldorf

Iggij

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Physikalische Grundlagen	9
2.1. Einführung	9
2.2. Gesetze der Thermodynamik	9
2.2.1. Erster Hauptsatz der Thermodynamik	9
2.2.2. Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	13
2.2.3. Energie, Exergie, Anergie.	18
2.2.4. Weitere Zustandfunktionen.	20
2.2.4.1. Freie Energie.	20
2.2.4.2. Freie Enthalpie.	21
2.2.5. Mehrstoff-Systeme.	22
2.2.5.1. Chemisches Potential.	22
2.2.6. Dritter Hauptsatz der Thermodynamik.	23
2.2.6.1. Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts.	23
2.2.7. Wärmekapazität	24
2.3. Kinetische Theorie der Gase.	25
2.3.1. Ideale Gase.	25
2.3.2. Statistische Bedeutung der Entropie.	27
2.3.3. Geschwindigkeits-und Energieverteilung	28
2.3.4. Mittlere freie Weglänge, Stoßfrequenzen.	31
2.3.5. Transporterscheinungen in Gasen.	32
2.4. Thermodynamik der Gasverflüssigung	33
2.4.1. Reale Gase und Dämpfe.	33
2.4.1.1. Zustandsgleichung realer Gase.	33
2.4.1.2. Isothermen eines realen Gases, Dampfzustand, kritischer Zustand.	35
2.4.1.3. Phasengleichgewicht	37
2.4.1.4. T , s -Diagramm	40
2.4.2. Theoretische Verflüssigungsarbeit	43
2.4.3. Joule-Thomson-Effekt	45
2.5. Adiabatische Entmagnetisierung	50
2.6. Kernentmagnetisierung.	53

3. Kältemittel	55
3.1. Einführung	55
3.2. Helium	55
3.2.1. Zustandsdiagramme	55
3.2.2. Suprafluidität von Helium	65
3.2.3. Transporteigenschaften von Helium	66
3.2.4. Gemisch $^3\text{He}/^4\text{He}$	68
3.2.5. Entstehung, Vorkommen und Gewinnung von Helium	68
3.2.6. Umgang mit flüssigem Helium	73
3.3. Stickstoff	73
3.3.1. Thermisch-physikalische Eigenschaften	73
3.3.2. Gewinnung, Transport und Lagerung	76
3.4. Wasserstoff	79
3.4.1. Thermisch-physikalische Eigenschaften	79
3.4.2. Ortho-Para-Umwandlung	85
3.4.3. Gewinnung, Transport und Lagerung	88
3.4.4. Sicherheit	89
3.5. Neon	90
3.5.1. Thermisch-physikalische Eigenschaften	90
3.5.2. Gewinnung, Transport und Lagerung	94
3.6. Kältemittelgemische	95
3.6.1. Theorie der Mischungen	96
4. Verhalten von Werkstoffen bei tiefen Temperaturen	101
4.1. Einführung	101
4.2. Physikalische Modelle	101
4.2.1. Phononenanregung in Festkörpern, Debye-Theorie	101
4.2.2. Spezifische Wärmekapazität	105
4.3. Wärmeleitung	109
4.3.1. Isolatoren	109
4.3.2. Metalle	112
4.3.3. Halbleiter	113
4.3.4. Wärmeleitungsintegrale	113
4.3.5. Wärmewiderstand an Kontaktstellen	118
4.4. Elektrische Leitfähigkeit	119
4.4.1. Metalle	119
4.4.2. Halbleiter	121
4.5. Verhalten von Festkörpern in Magnetfeldern	124
4.6. Thermische Längenausdehnung	124
4.7. Mechanische Eigenschaften	126
4.7.1. Metalle	127
4.7.1.1. Stähle	129
4.7.1.2. Nichteisenmetalle	133

4.7.2.	Werkstoffermüdung bei tiefen Temperaturen . . . . .	.138
4.7.3.	Einfluß von Partikelstrahlung . . . . .	.138
4.8.	Kunststoffe bei tiefen Temperaturen (<i>G.Hartwig</i>). . . . .	.139
4.8.1.	Ungefüllte Polymere . . . . .	.139
4.8.1.1.	Klassifizierung der Kunststoffe . . . . .	.139
4.8.1.2.	Bindungsanisotropie und Molekülstruktur . . . . .	.140
4.8.1.3.	Tiefemperaturparameter von Polymeren . . . . .	.142
4.8.1.4.	Tieftemperatureigenschaften von ungefüllten Polymeren . . . . .	.142
4.8.1.4.1.	Spezifische Wärmekapazität . . . . .	.142
4.8.1.4.2.	Thermische Längenausdehnung . . . . .	.146
4.8.1.4.3.	Wärmeleitfähigkeit . . . . .	.150
4.8.1.4.4.	Temperaturleitfähigkeit . . . . .	.156
4.8.1.4.5.	Mechanische Verformung . . . . .	.157
4.8.1.4.6.	Elastizitäts- und Schubmodul . . . . .	.159
4.8.1.4.7.	Mechanische Dämpfung . . . . .	.163
4.8.1.4.8.	Dielektrische Dämpfung . . . . .	.166
4.8.1.4.9.	Mechanische Festigkeit . . . . .	.168
4.8.1.4.10.	Tiefemperatur-Duktilität . . . . .	.168
4.8.1.4.11.	Spannungsintensitätsfaktor, spezifische Bruch- energie . . . . .	.170
4.8.1.4.12.	Ermüdungsverhalten . . . . .	.171
4.8.2.	Gefüllte und faserverstärkte Polymerverbunde . . . . .	.173
4.8.2.1.	Klassifizierung . . . . .	.173
4.8.2.1.1.	Pulvergefüllte Polynierverbunde . . . . .	.173
4.8.2.1.2.	Faserverstärkte Polymerverbunde . . . . .	.173
4.8.2.2.	Tieftemperatureigenschaften von Polymerver- bunden . . . . .	.173
4.8.2.2.1.	Spezifische Wärmekapazität . . . . .	.173
4.8.2.2.2.	Thermische Längenausdehnung . . . . .	.174
4.8.2.2.3.	Wärmeleitfähigkeit . . . . .	.178
4.8.2.2.4.	Elastizität und mechanische Festigkeit . . . . .	.181
4.8.2.2.5.	Mechanische Dämpfung . . . . .	.183
4.8.2.2.6.	Bruchenergie . . . . .	.183
5.	Wärmeübertragung und Strömungsvorgänge . . . . .	.184
5.1.	Einführung . . . . .	.184
5.2.	Wärmeübergang durch Konvektion . . . . .	.185
5.2.1.	Fluid- und Energiebewegung . . . . .	.185
5.2.1.1.	Kontinuitätsgleichung . . . . .	.185
5.2.1.2.	Bewegungsgleichung . . . . .	.185
5.2.1.3.	Energiegleichung; Wärmeleitung in der Strömung . . . . .	.187
5.2.2.	Ähnlichkeitsbeziehungen des Wärmeübergangs . . . . .	.188
5.2.3.	Wärmeübergang und Grenzschicht . . . . .	.189
5.2.3.1.	Grenzschichttheorie . . . . .	.189

	5.2.3.2.	Längs angeströmte Platte	192
	5.2.3.3.	Rohrströmung	193
	5.2.4.	Wärmeübergang bei erzwungener Konvektion	196
	5.2.4.1.	Wärmeübergang bei laminarer Rohrströmung	198
	5.2.4.2.	Wärmeübergang bei turbulenter Rohrströmung	198
	5.2.4.3.	Wärmeübergang unter dem Einfluß starker Zentrifugalkräfte	198
	5.2.4.4.	Wärmeübergang in Kugelschüttungen	199
	5.2.5.	Wärmeübergang bei freier Konvektion	199
5.3.		Wärmeübergang bei Phasenänderung	200
	5.3.1.	Wärmeübergang beim Verdampfen	200
	5.3.1.1.	Blasenverdampfung	202
	5.3.1.2.	Filmverdampfung	205
	5.3.2.	Wärmeübergang beim Kondensieren	206
5.4.		Wärmeübertrager	207
	5.4.1.	Wärmedurchgang	208
	5.4.2.	Grundgleichung zur Berechnung von Wärmeübertragern	209
	5.4.2.1.	Gleichstrom	211
	5.4.2.2.	Gegenstrom	213
	5.4.2.3.	Kreuzstrom	213
	5.4.2.4.	Kreuz-Gegenstrom	214
	5.4.3.	H , r -Diagramm	214
	5.4.4.	Arbeitsverlust, Anpassung, Wirkungs- und Gütegrad	217
5.5.		Wärmerohr (Heat-pipe)	217
	5.5.1.	Einführung	217
	5.5.2.	Druckbilanz	218
	5.5.3.	Leistungsgrenzen	222
5.6.		Regeneratoren	225
	5.6.1.	Einführung	225
	5.6.2.	Speicherung, Zeitfunktion, Füllverlust	226
	5.6.3.	Differentialgleichungen	226
	5.6.4.	Dämpfungsregenerator, optimaler Füllelementdurchmesser	228
	5.6.5.	Linearisierte Näherungslösung und Gütegrad	229
	5.6.6.	Nasser Regenerator-Betrieb	232
6.		Thermische Isolation	233
	6.1.	Grundlagen	234
	6.1.1.	Wärmeleitung in Gasen	234
	6.1.2.	Wärmestrahlung	235
	6.1.3.	Einfluß des Gasdrucks auf die effektive Wärmeleitfähigkeit	237
	6.2.	Methoden der Wärmeisolation	239
	6.2.1.	Isolationen ohne Vakuum	239
	6.2.2.	Einfache Hochvakuumisolation	241

6.2.3.	Evakuierte Pulverisolationen	241
6.2.4.	Superisolation	243
6.2.4.1.	Typen der Superisolation	243
6.2.4.2.	Eigenschaften der Superisolation	244
6.2.4.3.	Ausführung von Superisolationen	247
6.2.4.4.	Zur Evakuierung der Superisolationen	247
6.2.5.	Neuartige Isolationen	249
6.3.	Weitere Maßnahmen zur Senkung der thermischen Belastung	250
6.4.	Vorratsbehälter für flüssigen Stickstoff	251
6.5.	Vorratsbehälter für flüssiges Helium	251
7.	Methoden der Kälteerzeugung	252
7.1.	Einführung	252
7.2.	Kaltdampfkaskaden	252
7.3.	Joule-Thomson-Verfahren	254
7.3.1.	Joule-Thomson-Prozeß	254
7.3.2.	Leistungsbedarf beim Joule-Thomson-Prozeß	257
7.3.3.	Joule-Thomson-Kaskaden	258
7.4.	Brayton-Verfahren	258
7.4.1.	Brayton-Prozeß	258
7.4.2.	Leistungsbedarf des Brayton-Prozesses	260
7.4.3.	Brayton-Kreisläufe für Temperaturen unterhalb 20 K	261
7.5.	Claude-Verfahren	265
7.5.1.	Claude-Prozeß	265
7.5.2.	Leistungsbedarf des Claude-Prozesses	266
7.5.3.	Helium-Refrigeratoren/Verflüssiger für 4,2 K nach dem Claude-Verfahren	26 [^]
7.5.4.	Helium-Kälteanlagen für Temperaturen unterhalb 4,2 K nach dem Claude-Verfahren	271
7.5.5.	Helium-Refrigeratoren/Verflüssiger mit Expansions-Ejektoren	273
7.5.6.	Komponenten von Kälteanlagen	275
7.5.6.1.	Expansionskolbenmaschinen	275
7.5.6.2.	Expansionsturbinen	276
7.5.6.3.	Kompressoren	278
7.5.6.4.	Cold Box	279
7.6.	Stirling-Verfahren	280
7.6.1.	Allgemeines über regenerative Kälteprozesse	280
7.6.2.	Beschreibung des Stirling-Prozesses	283
7.6.3.	Stirling-Philips-Kältemaschinen	284
7.7.	Gifford-McMahon-Verfahren	286
7.7.1.	Beschreibung des Gifford-Mc-Mahon-Prozesses	286
7.7.2.	Gifford-McMahon-Kältemaschinen	287

7.8.	Vuilleumier-Verfahren (<i>//. Korf</i>)	289
7.8.1.	Beschreibung des Vuilleumier-Prozesses.	289
7.8.2.	Vuilleumier-Kältemaschinen.	290
7.9.	Leistungsbedarf von Kälteanlagen.	290
8.	Tiefe Temperaturen in der Vakuumtechnik	293
8.1.	Einführung	293
8.2.	Molekularströmungen in nicht-isothermen Vakuumkammern.	294
8.2.1.	Kleinflächige, nichtabgeschirmte Kryopumpen.	294
8.2.2.	Abgeschirmte Kryopumpen.	296
8.2.3.	Einfangwahrscheinlichkeit und Transmissionskoeffizient	297
8.3.	Kondensation einheitlicher Gase.	297
8.3.1.	Meßmethoden.	297
8.3.2.	Dampfdruckkurven.	297
8.3.3.	Stickingkoeffizienten der Kondensation.	298
8.4.	Kryosorption an festen Gaskondensaten.	299
8.4.1.	Adsorptionseigenschaften.	299
8.4.2.	Saugvermögen von Kryosorptionsschichten.	299
8.5.	Kryosorption an porösen Festkörpern.	300
8.5.1.	Kryosorptionspumpen zum Vorevakuieren.	300
8.5.2.	Kryosorptionspanel für Drücke unterhalb 0,1 Pa.	300
8.6.	Kryotrapping.	300
8.7.	Kryogetterung an Metallfilmen.	301
8.8.	Kenngrößen von Kryopumpen.	302
8.8.1.	Enddruck und Saugvermögen.	302
8.8.2.	Thermische Belastung.	303
8.8.3.	Bedarf an Kryoflüssigkeiten.	303
8.8.4.	Kälteleistung für Refrigerator-Kryopumpen.	304
8.8.5.	Pumpkapazität und maximale Betriebsdauer.	304
8.8.6.	Startdruck.	305
8.9.	Praktische Ausführung von Kryopumpen.	305
8.9.1.	Bad-Kryopumpen.	305
8.9.2.	Verdampfer-Kryopumpen.	307
8.9.3.	Refrigerator-Kryopumpen.	308
8.9.3.1.	Refrigerator-Kryopumpen mit Gifford-McMahon-Kryogenerator.	308
8.9.3.2.	Refrigerator-Kryopumpen mit Stirling-Philips-Kryogenerator.	308
8.9.3.3.	Refrigerator-Kryopumpen mit Brayton- und mit Claude-Kälteanlage.	310
8.10.	Anwendungen.	310

9. Tieftemperaturtechnologie in der industriellen Fertigung und Verfahrenstechnik	313
9.1. Tiefe Temperaturen in der industriellen Fertigung	313
9.1.1. Kaltdehnen	313
9.1.1.1. Berechnung der Kaltdehnung	313
9.1.2. Restaustenitumwandlung	316
9.1.2.1. Theoretische Grundlagen	316
9.1.3. Debonding - Trennen miteinander verbundener Stoffe	321
9.1.4. Entgraten von elastischen und plastischen Formteilen	323
9.1.5. Kaltzerkleinern	325
9.1.6. Intensivkühlung beim Hohlkörperblasen	327
9.2. Tiefe Temperaturen in der Verfahrenstechnik	328
9.2.1. Tieftemperaturrektifikation	328
9.2.1.1. Einführung	328
9.2.1.2. Bilanzgleichungen, Pol und Querschnittsgerade	330
9.2.1.3. Gleichgewicht und Stufenkonstruktion	333
9.2.1.4. McCabe-Thiele-Diagramm und Näherungsrechnung	334
9.2.1.5. Aufbau und wirtschaftliche Optimierung	335
9.2.1.6. Abtrennung radioaktiver Edelgase aus kerntechnischen Anlagen	337
9.2.1.7. Schwerwassergewinnung	340
9.2.2. Erdgas; Verflüssigung, Transport und Lagerung	343
9.2.2.1. Einführung	343
9.2.2.2. Verflüssigung	345
9.2.2.3. Reinigung	345
9.2.2.4. Speicherung	346
9.2.2.5. Verdampfung	347
10. Grundlagen der Supraleitung	351
10.1. Einführung	351
10.2. Vorgänge bei der Supraleitung	351
10.2.1. Vorkommen der Supraleitung	353
10.2.2. Kritischer Strom, kritisches Magnetfeld, Meißner-Effekt.	355
10.2.3. Kondensationsenergie	356
10.3. Thermische Eigenschaften	359
10.3.1. Spezifische Wärmekapazität	359
10.3.2. Wärmeleitung	361
10.4. Londonsche Gleichungen und Eindringtiefe	361
10.5. Flußquantisierung und Dauerströme	362
10.6. Supraleitertypen	363
10.6.1. Supraleiter I. Art	363
10.6.2. Supraleiter II. Art	364
10.6.3. Supraleiter III. Art (harte Supraleiter)	366

10.7.	Tunneleffekt	367
10.8.	Josephson-Effekt	368
	10.8.1. Gleichstrom-Josephson-Effekt	369
	10.8.2. Wechselstrom-Josephson-Effekt	370
10.9.	Technische Supraleiter (<i>H. R. Kahn</i> u. <i>Ch. J. Raub</i>).	371
10.10.	Stabilisierung	381
	10.10.1. Kryostatische Stabilisierung	381
	10.10.2. Adiabatische Stabilisierung	383
	10.10.3. Dynamische Stabilisierung	384
	10.10.4. Frequenzverhalten der harten Supraleiter und Methoden zur Verminderung der Verluste.	386
	10.10.5. Vergleich eigenstabiler und kryogen stabilisierter Wicklungen.	390
11.	Anwendung der Supraleitung in der Energietechnik	392
11.1.	Einführung	392
11.2.	Supraleitende Magnete für die Energieerzeugung	392
	11.2.1. Kernfusion	392
	11.2.2. MHD-Generatoren	402
11.3.	Magnetische Energiespeicherung	405
11.4.	Magnetische Trennverfahren	406
11.5.	Magnetische Lagerungen	407
11.6.	Elektrische Maschinen mit supraleitenden Wicklungen.	408
11.7.	Supraleitende Kabel zur Übertragung elektrischer Energie.	413
12.	Tiefe Temperaturen in der Elektronik und Opto-Elektronik	419
12.1.	Einführung	419
12.2.	Supraleitende Quanten-Interferometer.	419
	12.2.1. Josephson-Kontakte.	420
	12.2.2. SQUID mit einem Josephson-Kontakt (RF-SQUID).	421
	12.2.3. SQUID mit zwei Josephson-Kontakten (DC-SQUID).	425
	12.2.4. Interferometer mit zwei Tunnelkontakten.	426
	12.2.5. SLUG (Superconducting Low Inductance Undulating Galvanometer).	427
	12.2.6. Supraleitende Magnetometer und Gradiometer.	428
	12.2.7. Suszeptometer.	431
	12.2.8. Voltmeter.	432
12.3.	Hochfrequenz-Anwendungen im Bereich Mikrowellen bis Infrarot ..	433
	12.3.1. Strom-Spannungs-Kennlinien der Josephson-Kontakte.	433
	12.3.2. Emission elektromagnetischer Wellen	436
	12.3.2.1. Josephson-Oszillator.	436
	12.3.2.2. Rauschthermometer.	437
	12.3.3. Absorption elektromagnetischer Wellen.	438
	12.3.3.1. Mitnahme der Oszillator-Frequenz.	438
	12.3.3.2. Erzeugung stabiler Gleichspannungen und des Spannungsnormals.	439

12.3.3.3.	Breitband-Detektor mit Josephson-Kontakt . . .	440
12.3.3.4.	Bolometer	441
12.3.3.5.	Lineare Detektoren und Frequenzkonverter . . .	442
12.3.4.	Parameterische Verstärker	445
12.4.	Digitale Anwendungen von Josephson-Tunnelkontakten	447
12.4.1.	Josephson-Tunnelkontakte als elektronische Schalter	447
12.4.2.	UND- und ODER-Gatter	449
12.4.3.	Datenspeicherung	451
12.4.4.	Technologische Fragen	454
12.4.4.1.	Kältesystem	454
12.4.4.2.	Herstellungsverfahren	454
12.4.5.	Anwendungen	455
13.	Tiefe Temperaturen in der Hochenergie-Physik	456
13.1.	Supraleitende Magnete für die Hochenergie-Physik	456
13.1.1.	Teilchendetektoren mit supraleitenden Magneten	456
13.1.1.1.	Blaskammern	456
13.1.1.2.	Funkenkammern	459
13.1.1.3.	Hyperonen-Blaskammer	459
13.1.1.4.	Spektrometer für Speicherringe	460
13.1.2.	Strahlführungsmagnete	460
13.1.3.	Gepulste supraleitende Magnete für Ringbeschleuniger	462
13.2.	Supraleitende Hohlraumresonatoren	464
13.2.1.	Hochfrequenz-Verluste und kritisches Hochfrequenzfeld . . .	464
13.2.2.	Supraleitende Resonatoren	465
13.2.3.	Supraleitende Linearbeschleuniger	466
13.2.4.	Supraleitender Teilchenseparator	466
13.3.	Targets	467
13.3.1.	Kryoflüssigkeits-Targets	467
13.3.2.	Polarisierte Targets	467
14.	Kryostate, Meß- und Regeltechnik bei Tief temperaturanlagen	469
14.1.	Kryostatentechnik	469
14.1.1.	Thermische Belastung	469
14.1.2.	Badkryostate	470
14.1.2.1.	Ausführungsformen von Badkryostaten	470
14.1.2.2.	Kältemittelbedarf von Badkryostaten bei 4,2 K und darunter	472
14.1.3.	Verdampferkryostate	473
14.1.3.1.	Verdampfungs- und Kaltgaskühlung	473
14.1.3.2.	Kältemittelbedarf bei Verdampferkryostaten	475
14.1.3.3.	Anwendungsbeispiele des Verdampferkryostaten	475
14.1.4.	Refrigerator-kryostate	476
14.1.4.1.	Kryostate mit Gaskältemaschinen für Tempera- turen oberhalb 10 K	476

	14.1.4.2.	Kryostate mit Kältemittelkreislauf	477
	14.1.4.2.1.	Kühlsysteme mit Helium als Arbeitsmedium	477
	14.1.4.2.2.	Kühlsysteme mit Stickstoff als Arbeitsmedium	480
	14.1.5.	Abkühlen und Aufwärmen von Kryostaten.	482
	14.1.6.	Spezielle Bauelemente für Kryostate.	484
	14.1.6.1.	LNj-gekühlte Strahlungsschilde.	484
	14.1.6.2.	Aufhängungen und Unterstützungen	485
	14.1.6.3.	Dichtungen.	486
	14.1.6.4.	Fenster.	487
	14.1.6.5.	Stromzuführungen	489
	14.1.6.6.	Transferleitungen und Kupplungen.	490
	14.1.6.7.	Systeme zum Abfüllen von Kryoflüssigkeiten	491
	14.1.6.8.	Rückgewinnung von Helium.	492
	14.1.7.	Erzeugung extrem tiefer Temperaturen	492
	14.1.7.1.	^3He -Kryostate.	492
	14.1.7.2.	$^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischkryostate.	495
	14.1.7.3.	Pomeranchuk-Kühlung	498
14.2.		Tiefemperaturmeß- und Regelungstechnik.	498
	14.2.1.	Messen tiefer Temperaturen	498
	14.2.1.1.	Temperaturskalen.	498
	14.2.1.2.	Primäre Thermometer.	501
	14.2.1.3.	Sekundäre Thermometer.	502
	14.2.1.3.1.	Widerstandsthermometer.	502
	14.2.1.3.2.	Halbleiterdioden-Thermometer.	506
	14.2.1.3.3.	Kapazitive Thermometer.	506
	14.2.1.3.4.	Thermoelemente für tiefe Temperaturen.	507
	14.2.1.3.5.	Dampfdruck-Thermometer.	508
	14.2.1.3.6.	Einfluß von Magnetfeldern auf die Temperatur- anzeige.	509
	14.2.1.3.7.	Temperaturmeßstellen.	516
	14.2.1.3.8.	Kalibrieren von Sekundär-Thermometern.	516
	14.2.2.	Messen von Drücken und Druckdifferenzen.	517
	14.2.3.	Messen der Standhöhe flüssiger Kältemittel.	519
	14.2.4.	Messen des Durchflusses.	521
	14.2.5.	Regelung von Tiefemperaturanlagen.	522
	14.2.5.1.	Standhöhenregelung	522
	14.2.5.2.	Temperaturregelung	523
	14.2.5.3.	Druckregelung.	524
	14.2.5.4.	Durchflußregelung.	526
	14.2.5.5.	Einsatz von Datenerfassungsanlagen und Prozeß- rechnern	527
15.		Schrifttum	528
16.		Sachwortverzeichnis	548