

Inhaltsverzeichnis

Häufig benutzte Bezeichnungen	XXI
Einleitung von H. Hausen	1
Aus der Geschichte der Gasverflüssigung und der Zerlegung von Gasgemischen	2
1 Verflüssigung der Gase und Erzeugung sehr tiefer Temperaturen	
von H. Hausen	7
1.1 Thermodynamische Grundlagen	7
1.1.1 Erforderliche Temperatursenkung	7
1.1.2 Zustandsgrößen der Gase und Flüssigkeiten	13
1.1.2.1 Thermische Zustandsgrößen	13
1.1.2.1.1 Zustandsgleichungen	16
1.1.2.1.2 Theorem der korrespondierenden Zustände	18
1.1.2.1.3 Zustandsgleichung von Redlich und Kwong ihre erhöhte Anpassung an die Versuchswerte durch Soave	19
1.1.2.1.4 Gesteigerte Anpassung der Gleichung von Redlich und Kwong an die Versuchswerte durch Peng und Robinson	21
1.1.2.1.5 Weitere Zustandsgleichungen	21
1.1.2.2 Kalorische Zustandsgrößen	22
1.1.2.2.1 Kalorische Zustandsgleichung	23
1.1.2.2.2 Kalorische Zustandsdiagramme	23
1.1.3 Mindestarbeitsaufwand und Idealprozesse der Kälteerzeugung und Gasverflüssigung	35
1.1.3.1 Berechnung des Mindestarbeitsaufwandes der Kälteerzeugung nach dem Carnotschen Kreisprozeß	35
1.1.3.2 Genauere Berechnung des Arbeitsaufwandes nach einem Idealprozeß für die Gasverflüssigung	37
1.1.3.2.1 Kältebedarf für die Gasverflüssigung	37
1.1.3.2.2 Idealprozeß der Verflüssigung	38
1.1.3.2.3 Vergleich des Idealprozesses der Gasverflüssigung mit dem Carnotschen Kreisprozeß	40
1.1.4 Abkühlung bei der Drosselung und bei der Entspannung unter äußerer Arbeitsleistung	40
1.1.4.1 Thomson-Joule-Effekt	41
1.1.4.2 Inversionskurve des differentialen Thomson-Joule-Effektes	43
1.1.4.3 Umkehrbare adiabate Entspannung unter äußerer Arbeitsleistung	44

1.1.5	Physikalische und technische Arbeit	45
1.1.5.1	Physikalische Arbeit	45
1.1.5.2	Technische Arbeit	46
1.1.6	Erster und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	46
1.1.6.1	Erster Hauptsatz	46
1.1.6.2	Zweiter Hauptsatz	47
1.1.6.3	Zusammenhang zwischen der thermischen und kalorischen Zustandsgleichung	48
1.1.6.4	Absolute Temperatur	50
1.1.6.5	Logarithmische Temperaturskala	52
1.1.6.6	Mindestarbeitsaufwand für die Gasverflüssigung nach dem II. Hauptsatz	53
1.1.6.7	Thermodynamische Beziehungen für den Thomson-Joule-Effekt	57
1.1.6.8	Physikalische Ursachen des Thomson-Joule-Effektes	60
1.1.6.9	Differentialre Abkühlung der Luft bei umkehrbarer adiabater Entspannung unter äußerer Arbeitsleistung	61
1.1.7	Nernstsches Wärmethorem und die Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunktes der Temperatur	62
1.1.8	Annäherung an den absoluten Nullpunkt der Temperatur durch Entmagnetisierung eines paramagnetischen Salzes	64
1.1.8.1	Physikalische Vorgänge bei der Magnetisierung und Entmagnetisierung	65
1.1.9	Erzeugung extrem tiefer Temperaturen durch Lösung von ^3He in ^4He	67
1.2	Theorie der praktischen Verfahren der Gasverflüssigung	69
1.2.1	Das Verfahren von Linde	69
1.2.1.1	Das Verfahren von Linde mit einfacher Entspannung	70
1.2.1.1.1	Technische Gestaltung eines Luftverflüssigers	72
1.2.1.1.2	Berechnung der Kälteleistung eines Verflüssigers	73
1.2.1.1.3	Weitere Bemerkungen über die gewinnbare Kältemenge	75
1.2.1.1.4	Berechnung des Arbeitsaufwandes	76
1.2.1.1.5	Berechnung der isothermen Kompressorarbeit bei nichtidealen Gasen	78
1.2.1.1.6	Arbeitsaufwand für die Verflüssigung von 1 kg Luft	80
1.2.1.2	Verfahren von Linde mit Hochdruckkreislauf und Vorkühlung	81
1.2.1.2.1	Hochdruckkreislauf	81
1.2.1.2.2	Kälteerzeugung und Arbeitsaufwand beim Hochdruckkreislauf	83
1.2.1.2.3	Vorkühlung	84
1.2.1.2.4	Arbeitsaufwand für die Vorkühlung	85
1.2.1.2.5	Einfluß der Vorkühlung auf den Arbeitsaufwand für die Luftverflüssigung	86
1.2.2	Luftverflüssigung nach Claude und Heylandt	87
1.2.2.1	Wirkungsweise des Claudeschen Luftverflüssigungsverfahrens	88
1.2.2.2	Verlauf der Entspannung in der Expansionsmaschine	90
1.2.2.3	Kälteleistung des Claudeschen Luftverflüssigungsverfahrens	91
1.2.2.4	Einfluß von Menge und Temperatur der zur Expansionsmaschine strömenden Luft auf die erzeugte Kältemenge	92
1.2.2.5	Arbeitsaufwand für die Luftverflüssigung nach Claude und Heylandt	98
1.2.2.6	Verfahren der Luftverflüssigung nach Heylandt	100

1.2.2.7	Vergleich des Verfahrens von Linde mit den Verfahren von Claude und Heylandt	102
1.2.2.8	Zusammensetzung der verflüssigten Luft	102
1.2.3	Die Verflüssigung von Wasserstoff und Helium	103
1.2.3.1	Ältere Verfahren der Verflüssigung von Wasserstoff und Helium	104
1.2.3.2	Neuzeitliche Art der Verflüssigung von Wasserstoff und Helium	105
1.2.3.2.1	Verflüssigung von Wasserstoff	105
1.2.3.2.2	Heliumverflüssigung nach Kapitza, Meißner und Collins	106
1.2.3.2.3	Neuzeitliche Gestaltung der Heliumverflüssiger	109
1.2.4	Weitere Verfahren zur Erzielung sehr tiefer Temperaturen	111
1.2.4.1	Kaskadenverfahren	111
1.2.4.2	Gemisch-Kältemaschine	112
1.2.5	Gaskältemaschinen	114
1.2.5.1	Die Gaskältemaschine nach Philips	114
1.2.5.2	Die Gaskältemaschine nach Vuilleumier	119
1.2.5.3	Zweistufige Gaskältemaschine nach Philips	120
1.2.6	Verluste der Verflüssigungsanlagen	121
1.3	Messung sehr tiefer Temperaturen	123
1.3.1	Thermodynamische Grundlagen	123
1.3.2	Fixpunkte und Meßbereiche	124
1.3.3	Dampfdruckthermometer	124
1.3.4	Widerstandsthermometer	125
1.3.5	Thermoelemente	127
1.3.6	Messung extrem tiefer Temperaturen	128
2	Theorie der Wärmeübertragung im Gegenstrom und Kreuzstrom	
	von H. Hausen	131
2.1	Wärmedurchgang in Rohrgegenströmern	131
2.1.1	Wärmeübergangskoeffizienten	132
2.1.1.1	Wärmeübergangskoeffizient bei der Strömung in Rohren	133
2.1.1.2	Wärmeübergang im Kreuzstrom	138
2.1.1.3	Wärmeübergang in gekrümmten Rohren	142
2.1.1.4	Wärmeübergang in rauen Rohren	143
2.1.1.5	Wärmeübergang in Haufwerken	144
2.1.1.6	Wärmeübertragung bei Verflüssigung und Verdampfung	146
2.1.1.6.1	Wärmeübergang bei Verflüssigung	146
2.1.1.6.2	Wärmeübertragung bei Verdampfung	147
2.1.1.6.3	Druckabhängigkeit der Wärmeübertragung bei Blasenverdampfung	149
2.1.2	Strömung und Druckverlust in Rohren, Kanälen und Haufwerken . .	150
2.1.2.1	Anlaufvorgang und ausgebildete Strömung	150
2.1.2.2	Druckabfall in Rohren	151
2.1.2.2.1	Druckabfall in geraden Rohren bei ausgebildeter Strömung	151
2.1.2.2.2	Druckabfall in geraden Rohren unter Berücksichtigung des Anlaufvorganges	153
2.1.2.2.3	Druckabfall in gekrümmten Rohren	154
2.1.2.3	Druckabfall im Kreuzstrom	155

2.1.2.4	Zusätzlicher Druckverlust durch allmählich zunehmende Verengung der Strömungsquerschnitte	157
2.1.2.5	Druckabfall in Haufwerken	157
2.1.3	Temperaturverlauf und mittlere Temperaturdifferenz in stetig wirkenden Gegenströmern (Rekuperatoren)	158
2.1.3.1	Allgemeine Beziehungen	158
2.1.3.2	Beziehungen für unveränderliche Wärmekapazitäten der Gase	160
2.1.3.3	Beziehungen für temperaturabhängige Wärmekapazitäten der Gase	162
2.1.3.4	Stufenverfahren	163
2.1.3.5	Bedeutung des q, T -Diagramms nach Bild 2.22 für Berechnungen in der Tieftemperaturtechnik	165
2.1.3.6	Berechnung der mittleren Temperaturdifferenz bei Kreuzgegenströmern	166
2.1.3.7	Anwendung der gewonnenen Beziehungen auf die Berechnung der Gegenströmer	168
2.2	Regeneratoren	169
2.2.1	Berechnung der Regeneratoren	171
2.2.2	Temperaturverlauf in Regeneratoren bei trockenem Betrieb	171
2.2.3	Wärmeübertragung und Druckverlust in Regeneratoren bei trockenem Betrieb	176
2.2.3.1	Wärmedurchgangskoeffizient	176
2.2.3.2	Wärmeübergangskoeffizienten und Druckverlust in Regeneratoren	178
2.2.4	Feuchte Regeneratoren	178
2.2.4.1	Ergebnisse der Berechnungen des Temperaturverlaufs in feuchten Regeneratoren	179
2.2.4.2	Näherungsgleichung zur Abschätzung des Temperaturverlaufs in der Längsrichtung eines feuchten Regenerators	182
2.2.4.3	Ablagerung des Kohlendioxids	183
2.2.5	Regeneratoren mit eingebauten Rohrbündeln	186
2.3	Wärmeaustauscher in kompakter Bauweise	187
2.3.1	Gestaltung der Wärmeaustauscher in Kompaktbauweise	187
2.3.2	Reversing exchanger (Umkehrwärmeaustauscher)	188
2.3.3	Wärmeaustauscher in Kompaktbauweise als Kondensatorverdampfer	189
2.3.4	Berechnung der Wärmeaustauscher in Kompaktbauweise	189
2.3.5	Benennungen	191
2.3.6	Kälteverluste der Rohrgegenströmer, Kompaktwärmeaustauscher und Regeneratoren	192
2.3.6.1	Die drei Arten von Kälteverlusten	192
2.3.6.2	Isolationsverlust	193
2.3.6.3	Kälteverlust durch Wärmeleitung in der Längsrichtung des Wärmeaustauschers	194
3	Zerlegung von Gasgemischen bei sehr tiefen Temperaturen	
	von H. Hausen	199
	Einleitung	199
3.1	Thermodynamische Grundlagen der Gaszerlegung	199

3.1.1	Zusammensetzung von Flüssigkeit und Dampf im thermodynamischen Gleichgewicht	200
3.1.1.1	Überblick über das Verhalten von Gemischen beim Verflüssigen, Verdampfen und im Gleichgewicht	200
3.1.1.1.1	Zusammensetzung der Luft	200
3.1.1.1.2	Verflüssigung und Verdampfung von Luft	201
3.1.1.1.3	Gleichgewicht siedender Gemische	203
3.1.1.1.4	Gleichgewicht von Dreistoffgemischen	209
3.1.1.2	Theorie des Gleichgewichtes von Gemischen	209
3.1.1.2.1	Gleichgewicht idealer Gemische	209
3.1.1.2.2	Nichtideale Gemische	214
3.1.1.2.3	Gleichgewicht zwischen der flüssigen und dampfförmigen Phase von Gemischen aus beliebig vielen Bestandteilen	215
3.1.1.2.4	Verteilungskoeffizient oder Gleichgewichtsverhältnis K_i	216
3.1.1.3	Thermodynamik des Gleichgewichtes zwischen einer flüssigen und einer dampfförmigen Phase	218
3.1.1.3.1	Gleichgewichtsbedingungen	218
3.1.1.3.2	Anwendung auf das Gleichgewicht siedender Gemische	218
3.1.1.3.3	Gleichung von Duhem-Margules	220
3.1.1.3.4	Lösungen der Gleichung von Duhem-Margules	220
3.1.1.3.5	Aktivitäten und Aktivitätskoeffizienten	222
3.1.1.3.6	Fugazität	223
3.1.1.3.6.1	Fugazität reiner Stoffe	223
3.1.1.3.6.2	Fugazität in Gemischen	224
3.1.1.3.6.3	Berechnung der Fugazität eines reinen Stoffes	224
3.1.1.3.6.4	Berechnung der Fugazitäten in Gemischen aus einer Zustandsgleichung	226
3.1.1.3.7	Berechnung des Verteilungskoeffizienten K_i aus den Gln. (3.42) und (3.43)	227
3.1.1.3.8	Lösung eines Gases in einer Flüssigkeit und Dampfgehalt eines Gas-Dampf-Gemisches	227
3.1.1.3.8.1	Löslichkeit eines Gases in einer Flüssigkeit	228
3.1.1.3.8.2	Dampfgehalt eines Gas-Dampf-Gemisches bei Teilkondensation .	230
3.2	Grundvorgänge der Zerlegung von Gemischen	232
3.2.1	Vorbemerkung	232
3.2.2	Änderung der Zusammensetzung bei der Verdampfung	232
3.2.2.1	Geschlossene Verdampfung	232
3.2.2.2	Offene Verdampfung	235
3.2.3	Änderung der Zusammensetzung bei der Kondensation	236
3.2.4	Berechnung der geschlossenen Kondensation aus Gemischen mit beliebig vielen Bestandteilen	239
3.2.5	Geschlossene Verdampfung von Gemischen	242
3.2.6	Berechnung der partiellen Kondensation aus Gemischen mit beliebig vielen Bestandteilen	242
3.3	Die Rektifikation	245
3.3.1	Vorgänge auf einem Rektifizierboden	245
3.3.2	Vorgänge in einem Säulenabschnitt	248

3.3.2.1	Bestimmung der theoretischen Bodenzahl	248
3.3.2.2	Zahl der Übergangseinheiten an Stelle der theoretischen Bodenzahl	253
3.3.3	Berechnung der theoretischen Bodenzahl bei ungleichen Verdampfungswärmenden der Bestandteile	254
3.3.3.1	Berechnung der Rektifikation mit Hilfe kalorischer Mengeneinheiten	254
3.3.3.2	Berechnung der Rektifikation mit genauen Enthalpiewerten	258
3.3.3.2.1	Berechnung der Rektifikation im h,x -Diagramm	258
3.3.3.2.2	Numerische Berechnung der Rektifikation	260
3.3.4	Rektifikation von Dreistoffgemischen	261
3.3.5	Rektifikation von Mehrstoffgemischen	265
3.3.5.1	Berechnung von Boden zu Boden	266
3.3.5.2	Berechnung der Rektifikation von Mehrstoffgemischen durch Lösung linearer Gleichungen mit Hilfe von Determinanten	270
3.3.5.3	Konvergenzverfahren	272
3.3.5.3.1	Berichtigung der Temperaturen auf den Rektifizierböden	272
3.3.5.3.2	Verbesserung der durch einen Iterationsschritt erhaltenen Werte der Zusammensetzung des Kopfproduktes. \varnothing -Methode und Näherungsverfahren von Newton-Raphson-Muller	273
3.3.5.3.3	Berichtigung der Mengenströme	274
3.3.5.3.4	Maßnahmen zur Beschleunigung der Konvergenz	274
3.4	Rücklaufverflüssiger	275
3.4.1	Vorgänge im Rücklaufverflüssiger	275
3.4.2	Ergebnisse der Berechnung eines Rücklaufverflüssigers und ihr Vergleich mit Versuchswerten	276
3.5	Idealprozeß der Gaszerlegung	278
4	Zerlegung der Luft von H. Linde	281
	Einleitung	281
4.1	Luftzerlegung durch Rektifikation	281
4.1.1	Rektifikation in einer Druckstufe (Einsäulenapparat)	282
4.1.2	Rektifikation in zwei Druckstufen (Zweisäulenapparat)	284
4.1.3	Vorzerlegung durch Rücklaufverflüssigung nach Claude	286
4.2	Vorgänge bei der Rektifikation im Ein- und Zweisäulenapparat	287
4.2.1	Behandlung der Luft als Zweistoffgemisch	288
4.2.1.1	Mengenbilanzen	288
4.2.1.2	Ermittlung der theoretischen Bodenzahl	289
4.2.1.3	Teilverdampfung der Flüssigkeit vor Eintritt in die Rektifiziersäule	289
4.2.2	Zweisäulenapparat	292
4.2.3	Behandlung der Luft als Dreistoffgemisch	294
4.3	Der Kältebedarf bei der Luftzerlegung und seine Deckung	298
4.3.1	Die verschiedenen Arten des Kältebedarfs	298
4.3.1.1	Umgebungsverlust	298
4.3.1.2	Austauschverlust	299
4.3.1.3	Zusätzlicher Kältebedarf, wenn Teile der Zerlegungsprodukte flüssig entnommen werden	299

4.3.1.4	Erhöhter Kältebedarf für die Inbetriebsetzung eines Zerlegungsapparates	300
4.3.1.5	Kälteerzeugung und ihre Verbindung mit dem Luftzerlegungsvorgang	300
4.3.2	Kältebilanz	301
4.4	Entfernung von Wasserdampf, Kohlendioxid und organischen Verunreinigungen aus der Luft	303
4.4.1	Sich selbst reinigende Wärmeaustauscher	303
4.4.2	Adsorber für Wasserdampf und Kohlendioxid	307
4.4.3	Adsorber für Kohlenwasserstoffe	309
4.5	Die verschiedenen Verfahren zur Luftzerlegung	310
4.5.1	Große Luftzerleger zur Gewinnung gasförmiger Produkte	310
4.5.1.1	Linde-Fränl-Anlage zur Gewinnung großer Mengen Sauerstoffs mit bis zu 98 %iger Reinheit	312
4.5.1.2	Linde-Fränl-Anlagen mit steingefüllten Regeneratoren und darin angeordneten Rohrschlangen	314
4.5.1.3	Große Sauerstoffanlagen mit reversing exchangers	315
4.5.1.4	Groß-Luftzerleger zur Gewinnung von Rein-Sauerstoff und reinstem Stickstoff	317
4.5.1.5	Groß-Sauerstoffanlagen mit Molekularsiebadsorbern	318
4.5.1.6	Groß-Luftzerleger mit Sauerstoff-Innenverdichtung	319
4.5.1.7	Anlagen zur Gewinnung größerer Mengen gasförmigen Sauerstoffs mittlerer Reinheit	322
4.5.1.8	Reinheit, Ausbeute, Arbeitsaufwand und Kosten von gasförmigem Sauerstoff und Stickstoff aus Groß-Luftzerlegern	323
4.5.2	Luftzerleger zur Gewinnung flüssiger Produkte	326
4.5.2.1	Luftzerlegungsanlage zur Gewinnung von flüssigem Sauerstoff	326
4.5.2.2	Große Luftzerleger mit Mitteldruck-Stickstoffkreislauf zur Gewinnung flüssiger Produkte	327
4.5.3	Kleine Luftzerleger	329
4.5.4	Gewinnung der Edelgase aus Luft	331
4.5.4.1	Argon	332
4.5.4.2	Neon und Helium	334
4.5.4.3	Krypton und Xenon	337
5	Gewinnung von Ethylen von H. Linde	341
5.1	Einleitung	341
5.2	Zusammensetzung der zu zerlegenden Gasgemische, die im „heißen Teil“ der Ethylenanlagen entstehen	343
5.3	Die wichtigsten verfahrenstechnischen Schritte von Gaszerlegungsanlagen zur Ethylengewinnung	344
5.3.1	Die Kombination von Teilkondensation und Rektifikation	344
5.3.1.1	Teilkondensation	344
5.3.1.2	Rektifikation	347
5.3.2	Rohgaskompression	348
5.3.3	Sauergasentfernung aus dem Rohgas	350
5.3.4	Trocknung des Rohgases	350

5.3.5	Acetylenhydrierung	351
5.4	Der kalte Teil von Ethylengewinnungsanlagen	352
5.4.1	Verfahren von Lummus sowie von Stone & Webster	352
5.4.2	Verfahren der Linde AG	353
5.5	Die Deckung des Kältebedarfs	356
5.5.1	Der C ₃ -Kältekreislauf	357
5.5.2	Der Ethylenkreislauf	357
5.5.3	Die Rückführung beim Verfahren der Linde AG	359
5.6	Arbeits- und Investitionsaufwand für die Ethylengewinnung sowie Anforderungen an die Reinheit des Ethylens	359
5.7	Gewinnung von reinstem Propylen	361
6	Verflüssigung und Zerlegung von Erdgas von H. Linde	363
6.1	Zusammensetzung verschiedener Erdgase	363
6.2	Die LNG-Kette	365
6.2.1	Einleitung	365
6.2.2	Die einzelnen Glieder der LNG-Kette	366
6.2.3	Baseload-Anlagen	367
6.2.3.1	Diagramm zur Ermittlung des Mindestarbeitsaufwandes für Zustandsänderungen von Methan	367
6.2.3.2	Die Kältekaskade zur Methanverflüssigung	368
6.2.3.3	Kälte-Gemischkreislauf zur Methanverflüssigung (multi component refrigerant, abgekürzt MCR)	373
6.2.3.4	Beschreibung der Erdgasverflüssigungsanlage Brunei, Borneo (Verfahren von Air Products und Shell)	374
6.2.4	Transport von flüssigem Erdgas über das Meer	378
6.2.4.1	Selbsttragende, freistehende Tanks mit ebenen Wänden	379
6.2.4.2	Selbsttragende, freistehende Tanks in Kugelform	380
6.2.4.3	In den Schiffskörper integrierte Membrantanks	381
6.2.5	Hafen- und Tankanlagen im Empfängerland (LNG-Terminal)	382
6.2.5.1	Nutzung der Exergie des flüssigen Erdgases im Empfängerland	383
6.3	Peakshaving-Anlagen	384
6.4	Satellitenstationen zur Erdgasversorgung	389
6.5	Erdgas als Vergaserkraftstoff	390
6.6	Gewinnung von Ethan und Propan-Butan (LPG) aus Erdgas	390
6.6.1	Verfahren mit einem Propankreislauf und einer Erdgasentspannungsturbine	391
6.6.2	Verfahren mit einem Propan- und einem Ethankreislauf	392
6.7	Die Abtrennung von Stickstoff und Helium aus Erdgas	394
6.7.1	Stickstoffabtrennung aus Erdgas	394
6.7.2	Heliumgewinnung aus Erdgas	397
7	Zerlegung wasserstoffreicher Gasgemische von H. Linde	401
	Einleitung	401
7.1	Entstehung wasserstoffreicher Gemische, deren Zusammensetzung und Verarbeitung	404

7.2	Verfahren zur Zerlegung wasserstoffreicher Gasgemische	409
7.2.1	Rectisolwäsche	409
7.2.2	Stickstoffwäsche	414
7.2.3	Zerlegung des Kreislaufgases einer Ammoniaksynthese („Purgegaszerleger“)	416
7.2.4	Trennung von Wasserstoff und Kohlenmonoxid durch eine Wäsche mit flüssigem Methan	417
7.2.5	Zerlegung des Kreislaufgases einer Fischer-Tropsch-Synthese . .	419
7.2.6	Zerlegung von Koksofengas mit Regeneratoren	423
7.2.7	Zerlegung von Abgasen aus Raffinerien und petrochemischen Betrieben	426
7.2.8	Gewinnung reinen Wasserstoffs mit Druckwechseladsorbern . . .	428
8	Sonderanlagen für die friedliche Nutzung der Kernenergie von H. Linde	431
8.1	Gewinnung von schwerem Wasserstoff und schwerem Wasser	431
8.1.1	Physikalische Grundlagen	431
8.1.2	Kälteerzeugung und Isolierung des Tiefsttemperaturteils	433
8.1.3	Verfahren der Fa. Sulzer (Domat/Ems)	434
8.1.4	Verfahren der Linde AG (Nangal/Indien)	436
8.2	Reinigung von Kreislaufhelium für Hochtemperaturkernreaktoren	439
8.3	Behandlung von Abgasen, die bei der Wiederaufbereitung von Kern- brennstoffen entstehen	440
9	Ausführung und Betrieb der Anlagen zur Gasverflüssigung und Zerlegung von Gasgemischen von H. Linde	441
	Einleitung	441
9.1	Verdichter	441
9.1.1	Anwendungsbereiche der verschiedenen Verdichterarten	441
9.1.2	Effektive Verdichterarbeit	442
9.1.3	Hubkolbenverdichter	444
9.1.4	Trockenlaufkompressoren	445
9.1.5	Schraubenverdichter	448
9.1.6	Turboverdichter	449
9.1.6.1	Radialverdichter	449
9.1.6.2	Axial-Radial-Turboverdichter	453
9.2	Expansionsmaschinen	454
9.2.1	Kolbenexpansionsmaschinen	454
9.2.1.1	Expansionsmaschine nach Heylandt	455
9.2.1.2	Helium-Expansionsmaschinen	456
9.2.2	Expansionsturbinen	457
9.2.2.1	Expansionsturbinen mit ölgeschmierten Lagern	457
9.2.2.2	Expansionsturbinen mit Gaslagern	462
9.3	Pumpen für verflüssigte Gase	462
9.3.1	Hochdruckkolbenpumpe	463
9.3.2	Radialpumpe	463
9.3.3	Radialtauchpumpe	464

9.4	Apparate	465
9.4.1	Werkstoffe	465
9.4.2	Wärmeaustauscher	468
9.4.2.1	Gegenströmer	468
9.4.2.2	Kreuzgegenströmer	471
9.4.2.3	Reversing exchangers	475
9.4.2.4	Regeneratoren	475
9.4.2.5	Verdampfer und Kondensatoren	477
9.4.3	Rektifiziersäulen	479
9.4.4	Adsorber	483
9.5	Behälter für die Lagerung und den Transport verflüssigter Gase	484
9.5.1	Großtanks zur drucklosen Speicherung verflüssigter Gase	485
9.5.2	Tanks mittlerer Größe mit Vakuumisolierung	486
9.5.2.1	Versand von Sauerstoff	487
9.5.3	Tanks mit Superisolierung	489
9.5.4	Kannen für kleine Mengen verflüssigter Gase	489
9.6	Zusammenbau und Isolierung der Apparate. Aufstellungsarten von Gesamtanlagen	490
9.7	Meß-, Regel- und Automatisierungstechnik	495
9.7.1	Meßumformer	495
9.7.2	Regelventile	496
9.7.3	Meßgrößen	497
9.7.3.1	Flüssigkeitsstand	497
9.7.3.2	Druck	498
9.7.3.3	Temperatur	498
9.7.3.4	Durchfluß	500
9.7.3.5	Analysen	500
9.8	Betriebsmaßnahmen	503
9.8.1	Inbetriebsetzung	503
9.8.2	Beharrungszustand	504
9.9	Sicherheitsfragen	504
9.9.1	Anlagen zur Verflüssigung oder Zerlegung von Gasgemischen mit brennbaren und giftigen Bestandteilen	504
9.9.2	Luftzerlegungsanlagen	507
10	Anwendung der durch die Zerlegung gewonnenen oder verflüssigten Gase von H. Linde	509
	Einleitung	509
10.1	Sauerstoff	510
10.1.1	Anwendung des Sauerstoffs in der Metallurgie	511
10.1.1.1	Roheisenerzeugung	511
10.1.1.2	Gußeisenerzeugung	511
10.1.1.3	Stahlerzeugung	511
10.1.1.4	Versorgung von Blasstahlwerken mit Sauerstoff	513
10.1.1.5	Gasschweißen (autogenes Schweißen)	514
10.1.1.6	Brennschneiden (autogenes Schneiden)	515

10.1.1.7	Weitere Verfahren zur Bearbeitung von Metallen mit der Acetylen-Sauerstoff-Flamme	515
10.1.1.8	Schmelzen von Nichteisenmetallen	516
10.1.1.9	Raffination und Rösten von Nichteisenmetallen	516
10.1.2	Anwendung des Sauerstoffs in der chemischen Industrie	517
10.1.2.1	Schwerölvergasung nach Shell-Texaco	517
10.1.2.2	Kohlevergasung nach Lurgi, Winkler und Koppers-Totzek	517
10.1.2.3	Weitere Oxidationsprozesse	519
10.1.3	Biotechnische Behandlung von Wasser mit Sauerstoff	519
10.1.3.1	Abwasserreinigung	519
10.1.3.2	Erhöhung des Sauerstoffgehaltes des Wassers in anderen Fällen	520
10.1.4	Lebensmitteltechnik	520
10.1.5	Bautechnik	521
10.1.6	Medizinische Technik	521
10.1.7	Flüssiger Sauerstoff	521
10.1.7.1	Lagerung, Transport und Verteilung von Sauerstoff	521
10.1.7.2	Raketentechnik	521
10.1.8	Erforderliche Reinheit des Sauerstoffs	522
10.2	Stickstoff	522
10.2.1	Stickstoff in der chemischen Industrie	522
10.2.2	Stickstoff als Inertgas und als Bestandteil von Reaktionsgasen	523
10.2.3	Tertiäre Erdölförderung mit Stickstoff	524
10.2.4	Gasförmiger und flüssiger Stickstoff in der Lebensmitteltechnik	524
10.2.5	Flüssiger Stickstoff für biologische und medizinische Zwecke	525
10.2.6	Sonstige Anwendungen von flüssigem Stickstoff	526
10.2.7	Erforderliche Reinheit des Stickstoffs	526
10.3	Edelgase	526
10.3.1	Helium	527
10.3.2	Neon, Krypton und Xenon	527
10.3.3	Argon	528
10.3.4	Reinheit von Edelgasen	530
10.4	Ethylen	530
10.4.1	Ethylen in der Petrochemie	530
10.4.2	Ethylen in der Lebensmitteltechnik	530
10.5	Verflüssigtes Erdgas	534
10.6	Wasserstoff	534
11	Extrem tiefe Temperaturen von H. Hausen	537
11.1	Vorbemerkung	537
11.2	Eigenschaften und Verhalten der Stoffe bei sehr tiefen Temperaturen	537
11.2.1	Physikalische Eigenschaften der verflüssigten und verfestigten Gase	538
11.2.1.1	Eigenschaften der flüssigen Luft, des flüssigen Sauerstoffs und flüssigen Stickstoffs	538
11.2.1.2	Eigenschaften des flüssigen und festen Wasserstoffs	539
11.2.1.3	Eigenschaften des flüssigen und festen Heliums	540
11.2.1.4	Besondere Eigenschaften von Helium II	542

11.2.2	Thermisches Verhalten anderer Stoffe bei sehr tiefen Temperaturen	544
11.2.2.1	Idealer fester Körper	544
11.2.2.2	Spezifische Wärmekapazität	545
11.2.2.3	Wärmeleitfähigkeit bei tiefen Temperaturen	547
11.2.2.4	Elektrische und magnetische Eigenschaften bei tiefen Temperaturen	548
11.2.2.4.1	Elektrische Supraleitung	549
11.2.2.4.2	Meißner-Ochsenfeld-Effekt	552
11.3	Technische Anwendungen der extrem tiefen Temperaturen	553
11.3.1	Kryopumpen	553
11.3.2	Weltraum-Simulationskammern	555
11.3.3	Mit flüssigem Helium gekühlte Teleskope für Infrarot-Beobachtungen	555
11.3.4	Blasenkammern	556
11.3.5	Anwendungen der Supraleitfähigkeit	556
11.3.5.1	Supraleitende Kabel	556
11.3.5.2	Supraleitende Magnete	557
11.3.5.3	Elektrische Generatoren mit supraleitenden Wicklungen	557
11.3.5.4	Magnetscheidung	557
11.3.5.5	Magnet-Schwebebahn	557
11.3.5.6	MHD-Generatoren	558
11.3.5.7	Fusions-Kernkraftwerke	559
11.3.5.8	Kleine supraleitende Magnete in der Meßtechnik	559
Literaturverzeichnis		561
Sachverzeichnis		587