

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	Differentiale Abkühlung der Luft bei umkehrbarer adiabater Entspannung unter äußerer Arbeitsleistung . . . . .	61
1.1.7	Nernstsches Wärmetheorem 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 $^3\text{He}$ in $^4\text{He}$ . . . . .	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

<b>2</b>	<b>Theorie der Wärmeübertragung im Gegenstrom und Kreuzstrom</b> von H. Hausen . . . . .	<b>131</b>
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
<b>3</b>	<b>Zerlegung von Gasgemischen bei sehr tiefen Temperaturen</b>	
	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 Verdampfungswärmen 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. $\Theta$ -Methode und Näherungs- verfahren 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
<b>4</b>	<b>Zerlegung der Luft</b> 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-Fränk1-Anlage zur Gewinnung großer Mengen Sauerstoffs mit bis zu 98 %iger Reinheit. . . . .	312
4.5.1.2	Linde-Fränk1-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
<b>5</b>	<b>Gewinnung von Ethylen von H. Linde . . . . .</b>	<b>341</b>
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 <sub>3</sub> -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
<b>6</b>	<b>Verflüssigung und Zerlegung von Erdgas von H. Linde . . . . .</b>	<b>363</b>
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
<b>7</b>	<b>Zerlegung wasserstoffreicher Gasgemische von H. Linde . . . . .</b>	<b>401</b>
	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
<b>8</b>	<b>Sonderanlagen für die friedliche Nutzung der Kernenergie von H. Linde</b>	<b>431</b>
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
<b>9</b>	<b>Ausführung und Betrieb der Anlagen zur Gasverflüssigung und Zerlegung von Gasgemischen von H. Linde . . . . .</b>	<b>441</b>
	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
<b>10</b>	<b>Anwendung der durch die Zerlegung gewonnenen oder verflüssigten Gase von H. Linde . . . . .</b>	<b>509</b>
	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
<b>11</b>	<b>Extrem tiefe Temperaturen</b> von H. Hausen. . . . .	<b>537</b>
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
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>		<b>561</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>		<b>587</b>