

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Nomenklaturverzeichnis	ix
<b>I Einführung und Grundlagen</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Kohlendioxid als Kältemittel . . . . .	1
1.1.1 Historische Entwicklung und Umweltrelevanz . . . . .	1
1.1.2 Aktuelle Entwicklung und Forschungsbedarf . . . . .	2
1.2 Ziele der Arbeit . . . . .	4
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Verdichterkonzepte für CO<sub>2</sub></b>	<b>9</b>
2.1 Bauformen von CO <sub>2</sub> -Verdichtern – Literaturübersicht . . . . .	9
2.1.1 Tauchkolbenverdichter . . . . .	10
2.1.2 Kreuzkopfverdichter . . . . .	12
2.1.3 Axialkolbenverdichter . . . . .	13
2.1.4 Rotationskolbenverdichter . . . . .	18
2.2 Untersuchte Verdichterkonzepte . . . . .	19
2.2.1 Tauchkolbenverdichter . . . . .	19
2.2.2 Schwenkringverdichter . . . . .	21
2.2.3 Schrägscheibenverdichter . . . . .	22
<b>3 Anlagenkonzepte mobiler Kälteanlagen</b>	<b>25</b>
3.1 Anlagenkonzepte herkömmlicher Kälteanlagen . . . . .	25
3.2 Anlagenkonzepte für CO <sub>2</sub> – Literaturübersicht . . . . .	27
3.2.1 Einfacher CO <sub>2</sub> -Kreislauf . . . . .	27
3.2.2 Kreisläufe mit internem Wärmeübertrager . . . . .	29
3.2.3 Weitere Verschaltungen mit Sammler . . . . .	32
3.3 Untersuchte Anlagenkonzepte . . . . .	33

<b>4</b>	<b>Bewertungsgrößen und Wirkungsgrade</b>	<b>35</b>
4.1	Äußere Bewertungsgrößen für Kolbenverdichter . . . . .	35
4.1.1	Effektiver Liefergrad . . . . .	36
4.1.2	Effektiver Gütegrad . . . . .	36
4.1.3	Isentroper Verdichterwirkungsgrad . . . . .	37
4.1.4	Energetische Effizienz . . . . .	37
4.2	Innere Bewertungsgrößen für Kolbenverdichter . . . . .	37
4.2.1	Mechanischer Wirkungsgrad . . . . .	38
4.2.2	Verlustanteile des Liefergrades . . . . .	38
4.2.3	Indizierter Liefergrad . . . . .	42
4.2.4	Indizierter Gütegrad . . . . .	43
4.3	Bewertungsgrößen für Kälteanlagen . . . . .	43
4.3.1	Kälteleistung . . . . .	44
4.3.2	Kälteleistungszahl . . . . .	44
<b>II</b>	<b>Untersuchungs- und Berechnungsmethoden</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>Versuchsanlagen</b>	<b>49</b>
5.1	Verdichterprüfstand . . . . .	49
5.1.1	Prüfstandskreislauf . . . . .	49
5.1.2	Antriebseinheit . . . . .	51
5.1.3	Messmethoden und Messtechnik . . . . .	52
5.2	Kälteanlagenprüfstand . . . . .	56
5.2.1	R134a-Serienanlage . . . . .	57
5.2.2	CO <sub>2</sub> -Versuchsanlage . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Verdichtermodellierung und Anlagensimulation</b>	<b>59</b>
6.1	Verdichtermodellierung . . . . .	59
6.1.1	Energiebilanz . . . . .	61
6.1.2	Massenbilanz . . . . .	63
6.1.3	Eigenschaften des Kältemittels . . . . .	64
6.1.4	Kinematische Grundgleichungen . . . . .	65
6.1.5	Ventilströmung . . . . .	67
6.1.6	Ventildynamik . . . . .	68
6.1.7	Parameter für die Simulation . . . . .	71
6.2	Anlagensimulation . . . . .	72
<b>III</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Untersuchung eines Tauchkolbenverdichters</b>	<b>75</b>
7.1	Einfluss des Druckverhältnisses . . . . .	75
7.1.1	Indikatordiagramme . . . . .	75
7.1.2	Verdichtertemperaturen . . . . .	77
7.1.3	Güte- und Liefergrade . . . . .	80
7.1.4	Liefergradverlustanteile . . . . .	82
7.2	Drehzahlverhalten – Einfluss auf Ventilspätschlüsse . . . . .	84

7.2.1	Indikatordiagramme – Verdichter mit Ringventilsystem . . . . .	84
7.2.2	Indikatordiagramme – Verdichter mit Lamellenventilsystem . . . . .	99
7.2.3	Güte- und Liefergrade . . . . .	99
7.3	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen . . . . .	102
<b>8</b>	<b>Untersuchung eines Schwenkringverdichters</b>	<b>105</b>
8.1	Versuchsbedingungen . . . . .	105
8.2	Indikatordiagramme . . . . .	106
8.3	Güte- und Liefergrade . . . . .	110
8.4	Verdichterkennfeld . . . . .	113
8.5	Mechanischer Gütegrad . . . . .	114
8.6	Variation des Hubvolumens . . . . .	115
8.7	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen . . . . .	119
<b>9</b>	<b>Untersuchung eines Schrägscheibenverdichters</b>	<b>121</b>
9.1	Theoretischer Vergleich . . . . .	121
9.2	Experimenteller Vergleich . . . . .	124
9.2.1	Güte- und Liefergrade . . . . .	124
9.2.2	Verdichtertemperaturen . . . . .	126
9.3	Vergleich der untersuchten Verdichterkonzepte . . . . .	128
9.4	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen . . . . .	131
<b>10</b>	<b>Untersuchung einer mobilen Kälteanlage</b>	<b>133</b>
10.1	Experimentelle Untersuchung . . . . .	133
10.1.1	Optimale Anlagenfüllmenge . . . . .	134
10.1.2	Leistungsprüfungen . . . . .	136
10.2	Theoretische Untersuchung . . . . .	141
10.3	Energetische und ökologische Bilanzierung . . . . .	144
10.4	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen . . . . .	147
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>149</b>
<b>IV</b>	<b>Anhang und Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>
<b>A</b>	<b>Daten</b>	<b>155</b>
A.1	Verdichtergeometrien . . . . .	155
A.2	Kältemittel . . . . .	156
<b>B</b>	<b>Berechnung idealer Prozesse</b>	<b>157</b>
B.1	Einfacher Kreislauf . . . . .	157
B.2	Kreislauf mit internem Wärmeübertrager . . . . .	158
<b>C</b>	<b>Versuchsanlagen und Messtechnik</b>	<b>161</b>
C.1	Schaltpläne der Versuchsanlagen . . . . .	161
C.1.1	R 134a-Serienanlage . . . . .	161
C.1.2	CO <sub>2</sub> -Versuchsanlage . . . . .	162
C.1.3	CO <sub>2</sub> -Verdichterprüfstand . . . . .	163
C.2	Messgeräte, -prinzip, -bereich und -genauigkeit . . . . .	164

<b>D Modelle</b>	<b>165</b>
D.1 Ventilströmung – Herleitung der Druckabfallsbeziehung und Messung von $\alpha$ .	165
D.2 Verdichtersimulation - Gleichungssystem . . . . .	167
D.3 Validierung des Verdichtermodelles . . . . .	170
D.4 Anlagensimulation - Informationsflussdiagramm . . . . .	172
<b>E Parameter und Ergebnisse der TEWI-Studie</b>	<b>173</b>
E.1 Randbedingungen . . . . .	173
E.2 Weitere Ergebnisse . . . . .	174
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>189</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>191</b>