

Vergleichende Untersuchung von CO₂-Verdichtern in Hinblick auf den Einsatz in mobilen Anwendungen

Von der Gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von: Sven Försterling
aus: Marburg/Lahn

Eingereicht am: 30. Juni 2003
mündliche Prüfung am: 18. Dezember 2003

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler
Prof. Dr.-Ing. Fritz Steimle
Vorsitzender: Prof. Dr. techn. Reinhard Leithner

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Nomenklaturverzeichnis	ix
I Einführung und Grundlagen	xvii
1 Einleitung	1
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
2 Verdichterkonzepte für CO₂	9
2.1 Bauformen von CO ₂ -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
3 Anlagenkonzepte mobiler Kälteanlagen	25
3.1 Anlagenkonzepte herkömmlicher Kälteanlagen	25
3.2 Anlagenkonzepte für CO ₂ – Literaturübersicht	27
3.2.1 Einfacher CO ₂ -Kreislauf	27
3.2.2 Kreisläufe mit internem Wärmeübertrager	29
3.2.3 Weitere Verschaltungen mit Sammler	32
3.3 Untersuchte Anlagenkonzepte	33

4	Bewertungsgrößen und Wirkungsgrade	35
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
II	Untersuchungs- und Berechnungsmethoden	47
5	Versuchsanlagen	49
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 ₂ -Versuchsanlage	57
6	Verdichtermodellierung und Anlagensimulation	59
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
III	Ergebnisse	73
7	Untersuchung eines Tauchkolbenverdichters	75
7.1	Einfluss des Druckverhältnisses	75
7.1.1	Indikatorgramme	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
8	Untersuchung eines Schwenkringverdichters	105
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
9	Untersuchung eines Schrägscheibenverdichters	121
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
10	Untersuchung einer mobilen Kälteanlage	133
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
11	Zusammenfassung	149
IV	Anhang und Literaturverzeichnis	153
A	Daten	155
A.1	Verdichtergeometrien	155
A.2	Kältemittel	156
B	Berechnung idealer Prozesse	157
B.1	Einfacher Kreislauf	157
B.2	Kreislauf mit internem Wärmeübertrager	158
C	Versuchsanlagen und Messtechnik	161
C.1	Schaltpläne der Versuchsanlagen	161
C.1.1	R 134a-Serienanlage	161
C.1.2	CO ₂ -Versuchsanlage	162
C.1.3	CO ₂ -Verdichterprüfstand	163
C.2	Messgeräte, -prinzip, -bereich und -genauigkeit	164

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