

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Kohlendioxid als Kältemittel

Kohlendioxid (R 744) ist ein natürliches, nicht brennbares Kältemittel. Es besitzt kein Ozonzerstörungspotential und leistet in den Mengen, die für die Befüllung von Klima- und Kälteanlagen verwendet werden, nur einen vernachlässigbaren Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt. Kohlendioxid ist eine natürliche Substanz und fällt als Abfallprodukt in der chemischen Industrie an. Es muss nicht speziell als Kältemittel hergestellt werden, ist überall auf der Welt verfügbar und kostengünstig zu erwerben. Verglichen mit den momentan in mobilen Klima- und Tiefkühlanlagen eingesetzten Fluorkohlenwasserstoffen (FKW) kann der Einsatz von Kohlendioxid für bestimmte Anwendungsbereiche, insbesondere unter gemäßigten Klimabedingungen ökologische Vorteile aufweisen (siehe z.B. Lorentzen [1993] und Grohmann [1998]). Nachteile bei der Verwendung von Kohlendioxid ergeben sich besonders aus den deutlich höheren Prozess- und Stillstandsdrücken, dem niedrigen kritischen Punkt und der geringen Molmasse.

1.1.1 Historische Entwicklung und Umweltrelevanz

Erstmalig wurde Kohlendioxid als Kältemittel in einer Kompressionskältemaschine im Jahre 1850 von Alexander Catlin Twinning eingesetzt (siehe Fischer [2002]). Danach zählte Kohlendioxid weltweit bis zur Erfindung der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) im Jahre 1928 durch Midgley zu einem der wichtigsten Kältemittel. Neben dem Einsatz in stationären Kälte- und Klimaanlageanlagen fand es Verwendung in Schiffskälteanlagen, die um 1930 zu 80% mit Kohlendioxid betrieben wurden (siehe Schäfer [1938], Plank [1966a] und Drescher [1931]). Nach Einführung des Sicherheitskältemittels R12 wurde im Jahre 1939 erstmals ein Pkw mit einer mobilen Klimaanlage ausgestattet (siehe Bhatti [1997]). Aufgrund der günstigen Eigenschaften der FCKW bezüglich Drucklage, Ungiftigkeit, Nichtbrennbarkeit und energetischer Effizienz wurden durch ihren breiten Einsatz bis auf wenige Ausnahmen fast alle bisher verwendeten Kältemittel vollständig vom Markt verdrängt (siehe Sheridan [1999]). Nach einer weitgehenden Einstellung der Produktion von gewöhnlichen Kälte- und Klimaanlageanlagen mit Kohlendioxid als Kältemittel wurde erst Ende der 1980er Jahre wieder eine Laborklimaanlage mit Kohlendioxid als Kältemittel in Betrieb genommen (siehe Lorentzen [1993]).

Ein wichtiger Auslöser für die erneute Suche nach alternativen Kältemitteln war die inzwischen von Rowland [1996] und Molina [1996] im Jahre 1974 aufgestellte Hypothese von der

ozonzerstörenden Wirkung der Fluorchlorkohlenwasserstoffe in der Stratosphäre, die in den folgenden Jahren insbesondere bei der Untersuchung des antarktischen Ozonloches in den achziger Jahren bestätigt werden konnte (siehe Stolarski [1996]). Schließlich führten diese Erkenntnisse über das Protokoll von Montreal im Jahre 1987 zu einem schrittweisen Verbot der Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Daher wurden die bis dahin in mobilen Klima- und Kälteanlagen verwendeten FCKW R 12 und R 502 ab Anfang der 1990er Jahre schrittweise durch chlorfreie Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) bzw. FKW-Gemische und vorübergehend durch teilhalogenierte Übergangskältemittel mit geringerem Ozonabbaupotential wie R 22 ersetzt.

Während sich für mobile Klimaanwendungen insbesondere im Pkw-Sektor R 134a als einheitliches Kältemittel durchgesetzt hat, wird für Kälteanlagen – je nach Einsatzbereich – neben R 134a auch eine Vielfalt von zeotropen und azeotropen Kältemittelgemischen wie z.B. R 404A, R 410A und R 507 verwendet (siehe z.B. Böhler [1999], Sonnekalb [1998] und Schwarz [2000]). Obwohl diese Stoffe kein ozonschichtzerstörendes Potential besitzen, tragen sie aufgrund hoher GWP¹-Werte – R 134a hat einen GWP-Wert von 1300 und R 404A einen GWP-Wert von 3800 – im Falle direkter Kältemittellemission zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Daher wurde im Protokoll von Kyoto im Jahre 1997, das die Industriestaaten auf eine Senkung der weltweiten CO₂-Emissionen festlegt, eine verschärfte Kontrolle beim Umgang mit fluorierten Kohlenwasserstoffen und eine Optimierung bestehender R 134a-Anlagen und die Untersuchung von Alternativen beschlossen (siehe König [1998]). Ungeklärt sind weiterhin auch die schädigenden Auswirkungen möglicher Zerfallsprodukte der FKW (siehe Frischknecht [1999], Wallington [1995] und Tromp [1995]).

1.1.2 Aktuelle Entwicklung und Forschungsbedarf

In den 1990er Jahren setzte eine Renaissance bei der Entwicklung überkritischer Kompressions-Kaltdampfprozesse mit Kohlendioxid als Arbeitsmittel ein, und es wurden zunehmend Untersuchungen über mobile Klima- und Kälteanlagen sowie verschiedene Wärmepumpenanwendungen durchgeführt und publiziert (siehe z.B. Lorentzen et al. [1993], Köhler et al. [1995] und McEnaney [1998]).

Zur Realisierung hoher Kälteleistungszahlen, die sowohl unter ökologischen als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten wünschenswert sind, werden für diese Anwendungsfelder optimierte Anlagenkomponenten benötigt. Ein wichtiger Bestandteil aktueller Forschung ist deshalb auch die Entwicklung und Untersuchung neuer, für Kohlendioxid geeigneter Verdichterkonzepte (siehe z.B. Süß [1998], Kaiser [1999], Dorin [1998], Sakamoto [2000], Norris [2002] und Försterling [1999, 2002]).

In der vorhandenen Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungen zu neuentwickelten CO₂-Verdichtern unterschiedlicher Bauart (siehe Kap. 2), wovon aber nur ein Teil dieser Arbeiten Fahrzeugverdichter behandelt. Experimentell bestimmte Güte- und Liefergrade bzw. Indikatordiagramme werden nur in wenigen Arbeiten angegeben und meistens nur für einige wenige Betriebszustände bei niedrigen Drehzahlen und Drücken:

Süß [1998] führt grundlegende Untersuchungen an Tauchkolben- und Taumelscheibenverdichtern durch und wendet dabei gewonnene Ergebnisse vergleichend auf weitere

¹Global Warming Potential

Verdichterkonzepte an. Dabei wird die innere Prozessgüte unter anderem anhand von gemessenen und berechneten Indikatordiagrammen für einige wenige Betriebspunkte eines Tauchkolbenverdichters bestimmt. Klöcker [2001], Heyl [2000] und Rieberer [1998] präsentieren gemessene effektive Liefer- und Gütegrade dieses Verdichters ebenfalls nur für wenige Betriebspunkte bei niedrigen Drehzahlen. Ebenso zeigen die Arbeiten von Földi [1998] (Taumelscheibenverdichter), Takeuchi [1999] (Scrollverdichter) und Nekså [2000] (2-stufiger Hermetikverdichter) nur bruchstückhafte Ergebnisse hinsichtlich experimentell bestimmter Verdichterbewertungsgrößen auf. Dagegen sind bei Sakamoto [2000] (Schwinkscheibenverdichter) Verläufe von Liefer- und Wirkungsgraden in Abhängigkeit von der Drehzahl zu finden.

Insgesamt fehlen in der Literatur aber systematische Studien über Fahrzeugverdichter, die das Verhalten verschiedener Verdichterbewertungsgrößen in Abhängigkeit von Druck und Drehzahl über das gesamte Anforderungsspektrum mobiler Klima-, Kälte- und Wärmepumpenanwendungen hin, basierend auf experimentellen und theoretischen Methoden, untersuchen. Außerdem bestehen Defizite hinsichtlich vergleichender Untersuchungen verschiedener Verdichterkonzepte mittels einheitlicher Methoden besonders im Bereich hoher Drehzahlen und niedriger Saugdrücke. Weiterhin gibt es keine Publikationen über CO₂-Verdichterprototypen, die auf dem in der mobilen Hydraulik üblichen Schrägscheiben- oder Schrägachsenprinzip basieren.

Große Anstrengungen bei der Entwicklung von Pkw-Klimaanlagen mit CO₂ wurden besonders von Seiten der Automobilindustrie unternommen (siehe z.B. Wertenbach [1996], Földi [1998], Gentner [1998], Adiprasito [1998] und Mager [2002a, 2002b]).

Die Entwicklung von Transportkälteanlagen wurde aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Stückzahlen dagegen mit einem deutlich geringeren Aufwand vorangetrieben. Da aber CO₂-Klimaanlagenkonzepte aus dem Pkw-Bereich nicht unverändert im Bereich mobiler Kälteanlagen übernommen werden können, sind angepasste Entwicklungen erforderlich.

Untersuchungen zu mobilen Kälteanlagen mit CO₂ als Kältemittel finden sich nur bei Sonnekalb [1998, 2002] und Kauffeld [1998]. Sonnekalb hat Kälteleistungen und relative Leistungszahlen für eine mit thermostatischem Expansionsventil ausgestattete Transportkälteanlage ohne internen Wärmeübertrager gemessen. Außerdem wurden von ihm Temperaturverläufe im Verdampfer bzw. internen Wärmeübertrager verschiedener Anlagenversionen gemessen und berechnet. Kauffeld stellt Berechnungen einer Kälteanlage mit internem Wärmeübertrager vor und zeigt berechnete Leistungszahlen über dem Anlagenhochdruck, wobei aber kein experimentell bestimmtes CO₂-Verdichterkennfeld für die Modellierung verwendet wird.

Es fehlen systematische experimentelle und theoretische Untersuchungen verschiedener Anlagentypen mit und ohne internen Wärmeübertrager bzw. Sammler, die eine Aussage hinsichtlich Kälteleistung, Leistungszahl und Verdichtungsendtemperatur in Abhängigkeit von wichtigen Anlagenparametern wie Anlagenhochdruck bzw. Füllmenge, Kühlraumtemperatur, Umgebungstemperatur und Drehzahl treffen.

Ziel vieler im Zusammenhang mit der Kältemittelfrage durchgeführter Studien ist es, einen Vergleich der Umweltrelevanz beider Kältemittel, CO₂ und R134a, anhand von TEWI²-Studien durchzuführen. Neben dem direkten Treibhauspotential des Kältemittels, das

²Total Equivalent Warming Impact

während des Betriebs, bei Unfällen, Wartung und Entsorgung in die Atmosphäre entweicht, wird bei TEWI-Betrachtungen auch immer der indirekte Anteil an treibhauswirksamem CO₂ berücksichtigt, das durch den Mehrverbrauch beim Antrieb über den Fahrzeugmotor zusätzlich ausgestoßen wird.

Die Schwierigkeit bei der Erstellung von TEWI-Studien liegt darin, dass der berechnete TEWI-Wert sehr stark von den angenommenen Randbedingungen wie Klimazone, Standzeit, Fahrverhalten, Lebensdauer, Servicehäufigkeit, Leckage, Fahrzeuggröße, Anlagengewicht und dem Entwicklungsstand der untersuchten Anlagen abhängt (siehe Kubessa et al. [1997]). Daher finden sich in der Literatur TEWI-Berechnungen, die zum Teil zu stark voneinander abweichenden Resultaten führen.

Im Bereich der Pkw-Klimaanlagen kommen z.B. Wertenbach [1998], Gentner [1998], Hirata [1998] und Pettersen [1996] in der TEWI-Bewertung eindeutig zu dem Ergebnis, dass durch den Einsatz einer CO₂-Anlage im Vergleich zur R134a-Anlage eine Reduktion der Treibhausemissionen zu erwarten ist. Dabei weisen die in diesen Arbeiten untersuchten CO₂-Anlagen im Vergleich zur untersuchten R134a-Referenzanlage eine mindestens ebenso hohe, und teilweise sogar höhere Leistungszahl auf. Bhatti [1997] kommt dagegen bei seinen TEWI-Berechnungen genau zum gegenteiligen Ergebnis, dass der Einsatz einer CO₂-Klimaanlage gegenüber einer R134a-Anlage zu einer deutlichen Zunahme der Treibhausemissionen führt. Allerdings muss angemerkt werden, dass Bhatti in seinen Berechnungen eine CO₂-Anlage zugrunde legt, die im Vergleich zu der R134a-Anlage eine bis zu 48 % geringere Leistungszahl hat und damit nicht mehr dem heutigen Entwicklungsstand einer solchen Anlage entspricht. In der Studie von Sumantran [1999] wird der TEWI-Wert für sechs unterschiedliche Klimabedingungen unter der Annahme berechnet, dass der COP der CO₂-Anlage um 30 % geringer ist als bei der R134a-Anlage. Der berechnete TEWI-Wert fällt in den gemäßigten Breiten klar zugunsten der CO₂-Anlage und in tropischen Gegenden deutlich zugunsten der R134a-Anlage aus. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt auch eine Studie des Oak Ridge National Laboratory (siehe Sand [1997]). Einigkeit herrscht bei den meisten Veröffentlichungen darüber, dass mit einer CO₂-Klimaanlage eine größere Kälteleistung erreicht werden kann.

Die bisher zitierten Studien beziehen sich alle nur auf Pkw-Klimaanwendungen und können nicht auf den Bereich der mobilen Kälteanlagen übertragen werden. Bei Kälteanlagen ergeben sich deutlich veränderte Randbedingungen: Niedrige Kühlraumtemperaturen, hohe Betriebsstundenzahlen verbunden mit der in Mitteleuropa gemäßigten mittleren Betriebstemperatur führen im Vergleich zu einer Pkw-Anlage zu einem veränderten Szenario, das im Rahmen einer angepassten TEWI-Betrachtung untersucht werden sollte.

Aufgrund oben formulierter Defizite im Stand des Wissens wurde ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf hinsichtlich vergleichender Untersuchungen von CO₂-Verdichtern in Hinblick auf deren Einsatz in mobilen Anwendungen und der Untersuchung von mobilen Kälteanlagen festgestellt. Ausgehend vom aktuellen Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeit werden im nächsten Abschnitt die Ziele dieser Arbeit formuliert.

1.2 Ziele der Arbeit

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die vergleichende systematische Untersuchung verschiedener CO₂-Kältemittel-Verdichterkonzepte für Fahrzeuganwendungen in typischen Betriebszuständen, wie sie beim Betrieb von Bus- und Pkw-Klimaanlagen, in mobilen

Frischdienst- und Tiefkühlanlagen, sowie in mobilen Wärmepumpenapplikationen auftreten. Gegenstand der Untersuchung sind drei von verschiedenen Verdichterherstellern entwickelte und konstruierte Verdichterprototypen, die auf dem Tauchkolben-, Schwenkring- und Schrägscheibenprinzip basieren. Bei dem Schrägscheibenverdichter handelt es sich um eine Neukonstruktion, die hinsichtlich ihrer Bauweise von einer weggesteuerten Serien-Hydraulikpumpe abgeleitet wurde. Die Untersuchung hinsichtlich der Funktions- und Leistungsfähigkeit erfolgt experimentell mit Hilfe eines Prüfstandes und theoretisch unter Zuhilfenahme eines Simulationsmodells.

Die Anwendung der verschiedenen Untersuchungsmethoden soll anhand folgender Ziele erfolgen:

- Experimentelle und theoretische Generierung von Indikator diagrammen und deren Auswertung in Hinblick auf die innere Prozessgüte.
- Experimentelle Bestimmung der Abhängigkeiten verschiedener Bewertungsgrößen über ein weites Spektrum von Saug- bzw. Hochdruck und Drehzahl. Mathematische Formulierung dieser Zusammenhänge in Form eines Verdichterkennfeldes.
- Diskussion verschiedener physikalischer Effekte bzw. Größen wie Ventilspätschluss, Druckpulsation, Druckverluste im Ventil, Wärmeübertragung im Zylinderkopf und Verdichtungsendtemperatur.
- Vergleich verschiedener Ventilsysteme.
- Analyse und Vergleich von druck- und weggesteuertem Verdichterprinzip.
- Vergleich der drei Verdichterkonzepte.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist die Untersuchung des Prototypen einer mobilen Kühlanlage mit dem Kältemittel Kohlendioxid, die sowohl für eine Kühlraumtemperatur im Bereich des Gefrierpunktes (sog. Frischdienstanlage) als auch für die Tiefkühlung bis etwa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ betrachtet wird. Vor dem Hintergrund der Substitution der bisher ausschließlich verwendeten synthetischen Kältemittel mit sehr hohem Treibhauspotential (R 134a, R 404A, R 410A u.a.) durch das umweltfreundliche Kältemittel Kohlendioxid soll ein Schwerpunkt auf folgende Untersuchungsschritte gelegt werden:

- Simulation des Gesamtsystems und Validierung experimentell bestimmter Anlagenwirkungsgrade mit am Verdichterprüfstand ermittelten Verdichterkennfeldern mit Hilfe einer Simulationsplattform für Kälte- und Wärmepumpensysteme. Systematische Variation von Kühlraum- und Umgebungstemperatur, Drehzahl und Anlagenfüllmenge.
- Experimentelle Untersuchung einer dem Stand der Technik entsprechenden Serienanlage mit dem Kältemittel R 134a und Vergleich mit einer optimierten Version der untersuchten CO_2 -Anlage anhand von Kreisprozessrechnungen.
- Diskussion verschiedener Anlagenverschaltungen mit und ohne internen Wärmeübertrager bzw. Sammler und Betrachtung von Kälteleistung, Leistungszahl und Verdichtungsendtemperatur.
- Ökologische Bewertung der CO_2 - bzw. R 134a-Anlage im Rahmen einer TEWI-Studie.