



**Ersatz des
Kältemittels R22 in
bestehenden Kälte-
und Klimaanlage
- Aktueller Stand -**

Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH,
Hannover

im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese TEXTE-Veröffentlichung kann bezogen werden bei
Vorauszahlung von DM 15,- (7,67 Euro)
durch Post- bzw. Banküberweisung,
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der
Postbank Berlin (BLZ 10010010)
Fa. Werbung und Vertrieb,
Ahornstraße 1-2,
10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte
eine schriftliche Bestellung mit Nennung
der **Texte-Nummer** sowie des **Namens**
und der **Anschrift des Bestellers** an die
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in dem Bericht geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet III 1.4
Katja Schwaab

Berlin, Januar 2001

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Entwicklungsstand der Ersatzkältemittel für R22	4
2.1	R134a	6
2.2	R290	7
2.3	R404A	7
2.4	R407C	8
2.5	R410A	10
2.6	R417A	10
2.7	R507A	14
2.8	R717	15
2.9	R1270	16
2.10	CARE 50	16
3	Toxikologische und ökotoxikologische Daten	17
4	Stand der Forschung und Entwicklung zur Umstellung von R22-Kälteanlagen	21
5	Erfahrungsstand zu R22-Umstellungen	23
5.1	Studien und Fallbeispiele	23
5.2	Sachstand in Deutschland	27
5.2.1	Grundsätzliches	28
5.2.2	Deutsches Kälteanlagenbauerhandwerk	29
6	Bewertung des Forschungs- und Erfahrungsstands	36

7	Ökologische und ökonomische Bewertung des R22-Ersatzes in bestehenden Kälteanlagen	38
7.1	Atmosphärische Relevanz	38
7.1.1	Reduzierung von ozonschädigenden Emissionen	38
7.1.2	Treibhauspotential	43
7.1.3	TEWI-Bewertung	43
7.2	Entsorgungsaufwand	50
7.3	Ökonomische Bewertung	52
8	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	55
9	Abstract and conclusions	59
	Literatur	63

1 Einleitung

Zum Schutz der Ozonschicht wurden 1987 durch das Montrealer Protokoll erste internationale Maßnahmen zur Reduzierung der Verwendung von chlorhaltigen Stoffen, die maßgeblich zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht der Erde beitragen, beschlossen. Die Regulierungen des Montrealer Protokolls wurden auf den Folgekonferenzen in London 1990 und Kopenhagen 1992 nochmals verschärft und in Wien 1995 modifiziert. Gemäß der in Kopenhagen beschlossenen Ergänzung zum Protokoll gilt für Industrieländer seit dem 01.01.1996 ein absolutes Anwendungsverbot für vollhalogenierte FCKW in Neuanlagen. In Kopenhagen wurden erstmals auch die teilhalogenierten H-FCKW, und damit das bislang als Übergangskältemittel angesehene R22, einem Ausstiegsszenario unterworfen. In den Industrieländern soll durch eine schrittweise Reduzierung des Verbrauchs bis zum Jahr 2020 eine Verringerung um 99,5 % bezogen auf die Verbräuche im Jahr 1989 und bis zum Jahr 2030 ein vollständiger Ausstieg aus der Anwendung der H-FCKW erreicht werden [39].

Innerhalb der Europäischen Union soll der H-FCKW-Verbrauch in der EG gemäß der EG-Verordnung Nr. 3093/94 [56] bis zum 31. Dezember 2014 schrittweise auf Null reduziert werden. Die mittlerweile novellierte EG-Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen, die zum 1. Oktober 2000 inkraft treten soll, reduziert die bislang geltenden maximalen Verbrauchsmengen und verkürzt die Übergangsfrist zur Verwendung von H-FCKW-Frischware in bestehenden Anlagen auf den 1.1.2010. Ab dem 1.1.2015 soll dann auch die Verwendung von Recyclingware verboten sein.

Für die Bundesrepublik Deutschland gilt die FCKW-Halon-Verbots-Verordnung vom 06. Mai 1991 [21]. Auf der Basis dieser Verordnung ist die Verwendung des H-FCKW R22 in Neuanlagen bereits seit dem 1. Januar 2000 verboten. Nach diesem grundsätzlichen Verbot dürfen FCKW-Kältemittel in bestehenden Anlagen laut Paragraph 10, Absatz 2 der Verordnung so lange eingesetzt werden, bis Kältemittel mit geringerem Ozonabbaupotential nach dem Stand der Technik in diesen Anlagen einsetzbar sind. Derartige Kältemittel sind vom Umweltbundesamt bekanntzugeben. Um eine Bekanntgabe von Ersatzkältemitteln für das Kältemittel R22 in bestehenden Kälteanlagen vorzubereiten, hat das Umweltbundesamt

bereits im Jahr 1998 eine Studie zum Stand des Ersatzes des Kältemittels R22 in bestehenden Kälteanlagen erstellen lassen [51]. In dieser wurde die Ermittlung und Bewertung des Standes der Forschung und der praktischen Erfahrung bei der Umstellung bestehender R22-Kälteanlagen auf chlorfreie Ersatzkältemittel, die technisch einsetzbar sind, vorgenommen. Im Anschluß an die Darstellung der technisch notwendigen Grundkenntnisse wurden die bisherigen Anwendungen des Kältemittels R22 beschrieben und die in den Kälteanlagen enthaltenen R22-Mengen ermittelt, die als Grundlage zur Abschätzung der jährlichen Emissionen dieses Stoffes aus den Anlagen dienten. Die potentiellen Ersatzkältemittel wurden im Hinblick auf ihre Eignung als Ersatzstoffe in bestehenden R22-Kälteanlagen bewertet. Darüber hinaus wurden die Umstellungen von bestehenden R22-Kälteanlagen, die sowohl in der praktischen Anwendung als auch in Entwicklungs- und Forschungseinrichtungen durchgeführt wurden und im Rahmen einer Recherche ermittelt wurden, dargestellt und hinsichtlich der dabei gewonnenen Erfahrungen analysiert. Die wesentliche Schlußfolgerung dieser grundlegenden Studie war, daß seinerzeit nicht für alle Anwendungsbereiche ausreichende Erfahrungen für eine Umrüstung bestehender R22-haltiger Kälteanlagen vorlagen. Eine Bekanntgabe von Ersatzkältemitteln für R22 durch das Umweltbundesamt ist deshalb noch nicht erfolgt [54]. In der Erwartung, daß der Stand des Wissens und der Technik seit der Erarbeitung dieser Studie deutlich vorangeschritten und der Stand der Technik heute erreicht ist, ist mit der nun vorliegenden Studie "Aktueller Stand" eine erneute Sachstandsermittlung vorgenommen worden.

Dabei werden, soweit diese ihre Gültigkeit behalten haben, die Ausführungen der Studie des Jahres 1998 vorausgesetzt und soweit möglich auf diese verwiesen. Das betrifft insbesondere die allgemeinen Erläuterungen zur Umweltproblematik der halogenierten Kältemittel, die Darstellung der technischen Grundlagen der Kältemittel und deren Einsatzes im Kältemaschinenkreislauf sowie der Kältemittelgemische, deren Entwicklung im Zuge der Bereitstellung von Ersatzkältemitteln für bislang verwendete Stoffe umfangreich zugekommen hat. Ebenso sind die Anwendungsbereiche des R22 in der vorangegangenen Studie hinreichend dargestellt. Die Einschätzung der Bedeutung des Kältemittels R22 im deutschen Markt anhand der für das Jahr 1995 ermittelten Verbrauchsmengen kann hier beibehalten werden. Gleiches gilt für die Aufteilung des R22-Verbrauches auf seine Anwendungsbereiche.

Als Aktualisierung und Vertiefung der zum Zeitpunkt der Vorgängerstudie vorliegenden Erkenntnisse zu möglichen R22-Ersatzstoffen und ihren Eigenschaften, insbesondere in Hinblick auf ihren Einsatz in für R22 hergestellten Kälteanlagen, wird hier zunächst der aktuelle technisch-wissenschaftliche Stand der Entwicklung von Ersatzkältemitteln für das Kältemittel R22 zusammengefaßt. Im folgenden wird ebenso der aktuelle Stand der Forschung und Entwicklung zur Umstellung von bestehenden R22-Kälteanlagen ermittelt. Um den aktuellen Erfahrungsstand bei der Umrüstung von mit dem Kältemittel R22 betriebenen Kälteanlagen zu ermitteln, wurde eine Wiederholung sowie eine Vertiefung der Umfrage im Rahmen der Studie aus 1998 bei den Fachbetrieben der Kältetechnik-Branche durchgeführt. Mit Hilfe der Umfrage wird in einem repräsentativen Umfang der derzeitige Ersatz des Kältemittels R22 bzw. der mit R22-Ersatzkältemitteln betriebenen, vormals R22-Kälteanlagen erfaßt. Auf der Grundlage der durch die Recherche ermittelten Daten wird die Umstellung von R22-Kälteanlagen auf Ersatzkältemittel bewertet. Nach der Abschätzung der bis heute durch den Ersatz von R22 erreichten Minderung von ozonzerstörenden Emissionen sowie der Beurteilung der Umweltrelevanz des vollständigen Ersatzes des R22 durch Ersatzkältemittel kann schließlich die Umrüstung R22-haltiger Kälteanlagen unter Umweltgesichtspunkten, in Hinblick auf die technische Durchführbarkeit und die wirtschaftliche Vertretbarkeit bewertet werden.

2 Entwicklungsstand der Ersatzkältemittel für R22

Im folgenden wird die aktuelle Marktsituation der R22-Ersatzkältemittel ausgehend von den bereits im Jahr 1998 diskutierten möglichen Kältemitteln ermittelt sowie der derzeitige technisch-wissenschaftliche Sachstand in Hinblick auf deren Verwendung in für R22 konzipierten Kälteanlagen dargestellt.

In Tabelle 2.1 ist die im Jahr 1998 angegebene Liste möglicher R22-Ersatzkältemittel aktualisiert wiedergegeben.

Die Zahl der kommerziell verfügbaren Ersatzkältemittel für R22 hat sich gegenüber der in [51] ermittelten Zusammenstellung nicht erweitert. Die umfangreichen Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Ersatzkältemitteln für R22, die zur internationalen Zusammenarbeit im 'Alternative Refrigerant Evaluation Program (AREP)' [2], das 1991 vom Air Conditioning and Refrigeration Institute (ARI) initiiert wurde, um die besten Ersatzstoffe zu ermitteln und zu untersuchen, haben zu den drei Kältemitteln R134a, R407C und R410A als international akzeptierte R22-Ersatzkältemittel geführt. Dabei wurde zunächst der weltweit größte Einsatzbereich des R22, die stationären Klimaanlage, betrachtet. Neben anderen H-FKW-Kältemittelgemischen wurden Propan (R290) und Ammoniak (R717) zum möglichen Ersatz von R22 untersucht. Für die Anwendung in niedrigeren Temperaturbereichen der Gewerbekälte, Industriekälte und Transportkälte haben sich zudem die H-FKW-Gemische R404A und R507A etabliert. Während weiterhin vereinzelt für bestimmte Anwendungen neue Zusammensetzungen von Kältemittelgemischen von zwei oder mehr der Komponenten R32, R125, R134a und R143a vorgeschlagen und untersucht werden, z.B. in [27], wurden die Kältemittel R407A und R407B im relevanten Schrifttum der vergangenen 2 Jahre, das im Rahmen der vorliegenden Studie recherchiert wurde, nicht mehr als R22-Ersatzstoffe betrachtet. Schon die grundlegende Studie von 1998 konnte nur vereinzelt Referenzen zu diesen beiden Gemischen finden, so daß sie heute ohne Bedeutung in den Anwendungsbereichen des R22 sind.

Damit haben sich die Kältemittel R134a, R290, R404A, R407C, R410A, R417A, R507A, R717, R1270 und CARE 50 als kommerziell verfügbare Kältemittel im Fokus von Forschung und Entwicklung in den Einsatzbereichen des R22 durchgesetzt. Während die genannten Kältemittel inzwischen für geeignete R22-Anwendungsbereiche in Neuanlagen

industriell eingesetzt werden, sind sie in unterschiedlichem Umfang für einen Einsatz in bislang mit R22 betriebenen, bestehenden Kälteanlagen geeignet.

Tabelle 2.1: Ersatzstoffe für R22

Kältemittel	Komponenten Zusammensetzung (in Massen-%)	T ¹⁾ °C	GWP ²⁾ 100a	UVV-VBG20 Sicherheitsklasse ³⁾	ASHRAE Sicherheitsklasse ⁴⁾	Einsatz in Altanlagen
R22	100	-40,8	1500	1	A1	--
R134a	100	-26,1	1300	1	A1	(Retrofit)
R290	100	-42,1	~20	3	A3	Drop-In
R404A	R125/R134a/R143a 44/4/52	-46,5 (0,5)	3260	k.A. ⁵⁾	A1/A1	Retrofit
R407A	R32/R125/R134a 20/40/40	-45,8 (6,6)	1770	k.A.	A1/A1	Retrofit
R407B	R32/R125/R134a 10/70/20	-47,6 (4,4)	2290	k.A.	A1/A1	Retrofit
R407C	R32/R125/R134a 23/25/52	-44,3 (7,2)	1530	k.A.	A1/A1	Retrofit
R410A	R32/R125 50/50	-52,7 (0,2)	1830	k.A.	A1/A1	nein
R417A	R125/R134a/R600 46,6/50/3,4	-41,8 (5,1)	1955 ⁶⁾	k.A.	A1/A1	Drop-In
R507A	R125/R143a 50/50	-46,5	3300	k.A.	A1	Retrofit
R717	100	-33,3	<1	2	B2	(nein)
R1270	100	-47,7	k.A.	3	A3	Drop-In
CARE 50 ⁷⁾	R290/R170 (Zusammensetzung unbekannt)	-49 (5,8)	~20 ⁶⁾	3	k.A.	Drop-In

1) Siedetemperatur für p=1,013 bar; (): Temperaturleit beim Siededruck von p=1,013 bar

2) Treibhauspotential / kg CO₂ [39]; Es wurden im Hinblick auf eine einheitliche Datenquelle, nicht die 1995 vom IPCC erstellten, international anerkannten Treibhauspotentiale angegeben, da diese nur für wenige der hier aufgeführten Stoffe vorliegen.

3) Sicherheitseinstufung nach UVV-VBG20 [55]

4) Sicherheitsklassifizierung nach ASHRAE [3]

5) keine Angabe

6) gemäß Komponenten

7) Herstellerangaben

2.1 R134a

Das einzige H-FKW-Einstoff-Ersatzkältemittel für R22, R134a, zeichnet sich vor allem durch eine deutlich geringere Dampfdrucklage und eine je nach Einsatzbedingungen 30 bis 50% geringere volumetrische Kälteleistung gegenüber R22 aus, was bei einem Einsatz in einer Anlage mit Verdrängerverdichter zu einer in etwa in gleichem Maße verringerten Kälteleistung führt. Neben den bereits etablierten Retrofit-Umstellungsmaßnahmen würde ein Ersatz des R22 durch R134a in der Regel einen gleichzeitigen Austausch des verwendeten Verdichters erforderlich machen [51]. Das macht die Umrüstung auf R134a nur in dem Ausnahmefall empfehlenswert, wenn andere Umstände ohnehin einen Verdichtererersatz notwendig machen. Aufgrund der Drucklage des R134a ist es darüber hinaus nur in Anlagen für Klimaanlage und Wärmepumpen oder für Normalkühlung geeignet. Für solche Anlagen ist dann jedoch der energetisch gleichwertige Einsatz von R134a gegeben [2]. In Anlagen mit Schraubenverdichtern ist R134a im Vergleich zu anderen Verdrängermaschinen sogar energetisch besser als R22, und die Leistungseinbuße gegenüber R22 läßt sich durch den sogenannten Economiser-Betrieb auf etwa 20% reduzieren [44]. Abgesehen von der für eine bestehende Kälteanlage immer noch zu großen Leistungsdifferenz, kann eine solche Umstellung wegen des erhöhten Aufwandes jedoch auch nur im Einzelfall als sinnvoll bewertet werden.

In Kälteanlagen mit Strömungsmaschinen (Turboverdichter) findet das Kältemittel R22 vor allem im hohen Leistungsbereich Anwendung; es wird aber im Zuge des Ersatzes der FCKW, z.B. R11 und R12, in jüngerer Zeit zunehmend, auch für den mittleren Leistungsbereich, eingesetzt [51]. Vor allem die verhältnismäßig niedrige Drucklage des R134a stellt einen Vorteil zum Einsatz in Turboverdichtern dar [11]. Die in den vergangenen Jahren neu entwickelten R22-Turbomaschinen sind für die Umstellung auf einen Betrieb derart vorbereitet, daß diese durch den Austausch von nur wenigen Maschinenteilen verhältnismäßig leicht durchzuführen ist [28], [29]. Ein einfacher Retrofit-Austausch des Kältemittels wird aber in den wenigsten Fällen möglich sein, so daß in Abhängigkeit vom technischen Stand des Turboverdichters zumindest einige Verdichterteile ausgetauscht werden müssen, um den sicheren Betrieb der Anlage bei gleicher Kälteleistung und dem für R134a maximalen Wirkungsgrad zu gewährleisten [29].

2.2 R290

Die thermodynamischen Eigenschaften des Kohlenwasserstoffs Propan sowie dessen Mischungsverhalten mit den für R22 verwendeten Schmierstoffen, die chemisch-thermische Stabilität sowie die Materialverträglichkeit mit den in R22-Anlagen üblicherweise eingesetzten Werkstoffen deuten zunächst darauf hin, daß R290 gut als Drop-In-Ersatzstoff für R22 geeignet ist [51]. Die genannten chemisch-physikalischen Eigenschaften sowie die nahezu identische Dampfdrucklage des Einstoff-Kältemittels erfordern grundsätzlich keine Änderung der Anlagentechnik gegenüber R22. Wegen der deutlich höheren Löslichkeit von Propan im Kältemaschinenöl und der damit verbundenen Viskositätserniedrigung des Schmierstoffs ist im allgemeinen ein Öl höherer Viskosität bzw. bei einem Einsatz in Schraubenverdichtern, bei denen grundsätzlich ein in Kältemittel geringlösliches Kältemaschinenöl eingesetzt wird, ein anderer Öltyp mit geringerer Kohlenwasserstofflöslichkeit zu wählen [44]. Der Einsatz von teillöslichen PAG-Ölen für Kohlenwasserstoffe wurde in einem jüngeren Forschungsvorhaben des Forschungsrat Kältetechnik e.V. mit positiven Ergebnissen untersucht [49].

Während die volumetrische Kälteleistung mit Propan im Klima-, Normal- und Tiefkühlbereich um etwa 10% bis 15% geringer ist als bei R22, bleibt die theoretische Kälteleistungszahl annähernd identisch [36], [40], so daß auch das Leistungsverhalten bei einer entsprechend ausgelegten Anlage nicht grundsätzlich gegen die Eignung des R290 als Drop-In-Ersatzkältemittel spricht. In Wärmepumpen bietet Propan gegenüber R22 trotz etwas verringelter Leistung bei etwas höherer Effizienz anwendungstechnische Vorteile [51].

Die wesentliche Einschränkung beim Einsatz von Kohlenwasserstoffen als Kältemittel sind die aufgrund ihrer Brennbarkeit zu beachtenden Sicherheitsaspekte, die bei einer bestehenden R22-Anlage umfangreiche Nachrüstungen erfordern, was schon in [51] abschließend diskutiert wurde.

2.3 R404A

Als H-FKW-Kältemittelgemisch ist R404A grundsätzlich zu einem Retrofit-Ersatz gemäß den ausreichend bekannten Umrüstungsmaßnahmen geeignet [51]. Die thermodynamischen Stoffeigenschaften weisen eine ähnliche Drucklage und eine nur geringfügig von R22 abweichende volumetrische Kälteleistung aus [51]. Vorteilhaft ist das nahezu azeotro-

pe Gemischverhalten, so daß sich R404A beim Phasenwechsel praktisch wie ein Einstoff-Kältemittel verhält. Aufgrund der im Vergleich zu R22 relativ niedrigen kritischen Temperatur ergibt sich eine geringere energetische Effizienz des Dampfkälteprozesses bei Temperaturbedingungen der Klimaanwendung (hohe Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen). Im Normal- und Tiefkühlbereich ergeben sich nur um etwa 5% bis 10% niedrigere Leistungszahlen, so daß sich R404A in den letzten Jahren in der Gewerbekälte sowie der industriellen Kälteerzeugung etablieren konnte [6], [39], [51].

2.4 R407C

Schon die grundlegende Studie von 1998 hat von allen als R22-Ersatzkältemitteln diskutierten Stoffen die weitaus umfangreichste Zahl von Referenzen in Forschungs- und Entwicklungsberichten zum H-FKW-Kältemittelgemisch R407C ermittelt. Das speziell zur Nachbildung der Eigenschaften des R22, insbesondere für dessen Einsatz in stationären Klimaanlagen entwickelte Kältemittel hat sich in diesem Bereich in Neuanlagen mittlerweile industriell durchgesetzt. Es wurde im AREP-Programm neben R134a und R410A als zu favorisierender R22-Ersatzstoff ermittelt [48]. Das zeotrope Kältemittelgemisch, das einen verhältnismäßig großen Temperaturgleit beim Phasenwechsel von etwa 7 K aufweist, ist speziell in Drucklage und volumetrischer Kälteleistung dem R22 sehr ähnlich. Unter den Bedingungen der Klimatisierung läßt sich mit R407C, bei gleichwertiger Kälteleistungszahl, eine vergleichbare, nur unwesentlich geringere Kälteleistung erzielen [51], [40]. Da keine grundsätzliche Änderung der für R22 gegebenen Anlagentechnik notwendig ist, war R407C in den letzten Jahren weltweit das H-FKW-Kältemittel, das R22 in Neuanlagen im Bereich Klimaanlagen und Wärmepumpen mit Direktverdampfungs-Systemen (Luftkühler) [51] ersetzt hat [39]. Bei tieferen Verdampfungstemperaturen der Anwendungen der Normal- und besonders der Tiefkühlung bleibt die Kälteleistung deutlicher hinter der von R22 zurück [51], [36], [35], so daß R407C schon aus diesem Grund in diesen Anwendungsbereichen des R22 eher von untergeordneter Bedeutung geblieben ist [39]. Darüber hinaus werden in diesen Bereichen oftmals Systeme mit überfluteter Verdampfung eingesetzt, für die im allgemeinen der Einsatz von Kältemittelgemischen wie R407C mit starken Temperaturgleit während der Verdampfung, was gleichzeitig eine Fraktionierung während des Phasenwechsels bedeutet [51], nicht empfohlen wird. Dies gilt auch für die in stationären Klimaanlagen eingesetzten Kaltwassersätze. R22-Kaltwassersätze im höheren Leist-

ungsbereich mit Turbo- oder Schraubenverdichtern werden fast ausschließlich mit überfluteter Verdampfung ausgeführt [39]. Der fraktionelle Phasenwechsel in Bereichen der Anlage mit Vorlagen flüssigen Kältemittels (überflutete Verdampfer, Verflüssiger, Sammler) kann zur Abweichung der Zusammensetzung des im Betrieb der Anlage umlaufenden Gemisches von der nominellen Zusammensetzung des Kältemittels führen, was eine Änderung der Gemischeigenschaften zur Folge hat. Die Verschiebung der Zusammensetzung des Gemisches kann darüber hinaus durch eine selektive Öllöslichkeit der Gemischkomponenten beeinflusst sowie durch eine selektive Leckage aus der Anlage verstärkt werden [51]. Bei neuen Kälteanlagen ist diese Konzentrationsverschiebung eines zeotropen Gemisches ein wesentliches Konstruktionsmerkmal, und auch die selektive Öllöslichkeit an sich muß beachtet werden [44].¹

Beim Einsatz in bestehenden, für R22 ausgelegten Kälteanlagen werden zusätzlich die Wärmeübertragungseigenschaften von azeotropen Gemischen sowie gerade der Temperaturgleit in Wärmeübertragern als Nachteile und Vorbehalte genannt [51]. Zeotrope Gemische weisen im allgemeinen schlechtere Wärmeübertragungseigenschaften auf als Einstoff-Kältemittel oder azeotrope und nahezu zeotrope Kältemittelgemische [7], [25]. Dies führt zu Leistungseinbußen gegenüber R22, wenn die bestehenden Wärmeübertrager nicht mit der notwendigen Reserve dimensioniert sind. Während die Nachteile bei überfluteter Verdampfung schon genannt sind, muß der Temperaturgleit der Gemische zudem bei der Strömungsführung in den Wärmetauschern mit trockener Verdampfung berücksichtigt werden. Für zeotrope Gemische sind wegen des steigenden bzw. fallenden Temperaturverlaufs Gegenstrom- Wärmeübertrager zunächst besser geeignet als Gleichstrom- Wärmeübertrager [51], [5]. Der Einsatz des zeotropen Kältemittels im für R22 mit konstanter Verdampfungstemperatur ausgelegten Gegenstrom-Wärmeübertrager führt aber grundsätzlich zu einer Abnahme der mittleren Temperaturdifferenz im Wärmeübertrager, was bei gegebenem Wärmetauscher in der Regel zu einem Leistungsrückgang führt. Bei Beibehaltung der Kälteleistung des Verdampfers ist dann der Verdampfungsdruck zu senken, so daß

¹ Der Temperaturgleit von zeotropen Gemischen verspricht für neu konzipierte Anlagen durch eine Optimierung des Temperaturverlaufs in den Wärmeübertragern ein Potential zur Verbesserung der energetischen Effizienz der Kälteanlage. Die Nutzung der Änderung der Zusammensetzung während des Anlagenbetriebs zur Leistungsregelung und damit der Steigerung der Effizienz wird weiterhin verfolgt, z.B. in [8] und [37].

im Fall von Wasserkühlern bei niedrigerer Eintrittstemperatur des Kältemittels als für R22 für die entsprechende Frostsicherheit gesorgt werden muß.

2.5 R410A

Das in der jüngeren Vergangenheit als Ersatzstoff in einigen R22-Anwendungsbereichen in Neuanlagen vielbeachtete, nahezu azeotrope Kältemittelgemisch R410A erfordert aufgrund seiner deutlich von R22 abweichenden Eigenschaften, insbesondere der wesentlich höheren Dampfdrucklage, in fast allen Fällen Neuentwicklungen der Komponenten des Kältemittelkreislaufes, speziell des Verdichters [51], [44]. R410A kommt daher, wie schon in der Studie von 1998 festgestellt wurde, nicht als Retrofit-Ersatzstoff in R22-Altanlagen in Frage.

2.6 R417A

Das in [51] als ISCEON 59 als möglicher R22-Ersatzstoff in bestehenden Anlagen diskutierte Kältemittelgemisch aus R125/R134a/R600a mit den Massenanteilen 46%, 50% und 4% wird inzwischen in leichter Abwandlung in der Zusammensetzung R125/R134a/R600, Massenanteile 46,6%, 50% und 3,4% angeboten. Das Gemisch dieser Zusammensetzung erhielt im Februar 2000 die ASHRAE-Bezeichnung R417A mit der ASHRAE-Sicherheitsklassen-Einstufung A1/A1 (wenig giftig, nicht brennbar) [3], [51], [46]. Da die leichte Änderung der Gemischzusammensetzung in dieser Hinsicht keine wesentlich Änderung der thermophysikalischen Eigenschaften des Produktes mit sich bringt, ist es laut Herstellerangaben neben der Anwendung in Neuanlagen der R22-Anwendungen vor allem wegen seines Löslichkeitsverhaltens mit den für R22 gebräuchlichen Kältemaschinenölen ohne Änderungen am Design der für R22 ausgelegten Anlagen als Drop-In-Ersatzstoff in bestehenden Kälteanlagen geeignet. Schon in [51] wurde festgestellt, daß von den betrachteten R22-Ersatzstoffen, vorbehaltlich weiterer Untersuchungen zum Öl- bzw. Anlagenverhalten, einzig das Gemisch ISCEON 59 in größerem Umfang zum Drop-In-Einsatz geeignet sein könnte. Mit der Änderung der Zusammensetzung wurden für R417A neue auf Messungen beruhende thermodynamische Stoffdaten zur Verfügung gestellt [47], [45]. Die

Kontrolle der in [51]¹ angegebenen Ergebnisse der Simulation des einfachen theoretischen Kreisprozesses anhand der neuen Daten für R417A ergab derart abweichende Werte, daß die Wiedergabe der Korrektur hier angebracht ist. Der in Tabelle 2.2 und Bild 2.1 bis Bild 2.3 wiedergegebene korrigierte Vergleich der Kältemittel stellt gleichzeitig die Korrektur der in [24] durchgeführten Simulation dar.

¹ 5.7 Energetisches Verhalten der Kältemittel

Tabelle 2.2: Theoretischer Vergleich energetischer Anlagenkenndaten der Ersatzkältemittel für R22 bei unterschiedlichen Anlagenbedingungen

Supermarktkälteanlage: $t_0 = -10\text{ °C}$, $t_c = 25\text{ °C}$, $\Delta T_{\text{Überhitzung Verd}} = 5\text{ K}$, $\eta_{i\text{ Verd}} = 0,7$				
Kältemittel	Relative Kälteleistung	Relative Antriebsleistung	Relative Kälteleistungszahl	Änderung der Verdichtungs- temperatur (R22: 64,5 °C)
R22	1	1	1	0
R134a	0,61	0,61	1	-19,2
R290	0,88	0,90	0,98	-18,4
R404A	1,06	1,13	0,94	-22,3
R407C	0,92	0,94	0,98	-10,0
R410A	1,49	1,57	0,95	-3,5
R507A	1,08	1,16	0,93	-22,8
R717	1,02	1,02	1,00	56,6
R1270	1,07	1,09	0,98	-12,7
Care 50	0,94	0,94	1	-17,9
R417A	0,83	0,83	1,00	-23,7

Supermarktkälteanlage: $t_0 = -36\text{ °C}$, $t_c = 25\text{ °C}$, $\Delta T_{\text{Überhitzung Verd}} = 20\text{ K}$, $\eta_{i\text{ Verd}} = 0,7$				
Kältemittel	Relative Kälteleistung	Relative Antriebsleistung	Relative Kälteleistungszahl	Änderung der Verdichtungs- temperatur (R22: 117,9 °C)
R22	1	1	1	0
R134a	0,54	0,53	1,01	-38,3
R290	0,90	0,91	0,99	-37,8
R404A	1,04	1,12	0,93	-46,5
R407C	0,84	0,86	0,98	-20,8
R410A	1,49	1,60	0,93	-8,7
R507A	1,07	1,16	0,92	-47,4
R717	0,90	0,94	0,96	111,5
R1270	1,16	1,17	0,99	-27,2
Care 50	0,98	0,98	1	-37,3
R417A	0,79	0,78	1,01	-48,7

Klimaanlage: $t_0 = 0\text{ °C}$, $t_c = 45\text{ °C}$, $\Delta T_{\text{Überhitzung Verd}} = 5\text{ K}$, $\eta_{i\text{ Verd}} = 0,7$				
Kältemittel	Relative Kälteleistung	Relative Antriebsleistung	Relative Kälteleistungszahl	Änderung der Verdichtungs- temperatur (R22: 88,8 °C)
R22	1	1	1	0
R134a	0,63	0,63	1	-22,8
R290	0,83	0,86	0,96	-22,7
R404A	0,94	1,11	0,85	-25,4
R407C	0,91	0,95	0,96	-11,8
R410A	1,39	1,56	0,89	-3,6
R507A	0,98	1,13	0,87	-25,7
R717	1,13	1,09	1,04	66,7
R1270	1,02	1,05	0,97	-15,4
Care 50	0,89	0,91	0,98	-22,0
R417A	0,79	0,82	0,96	-27,8

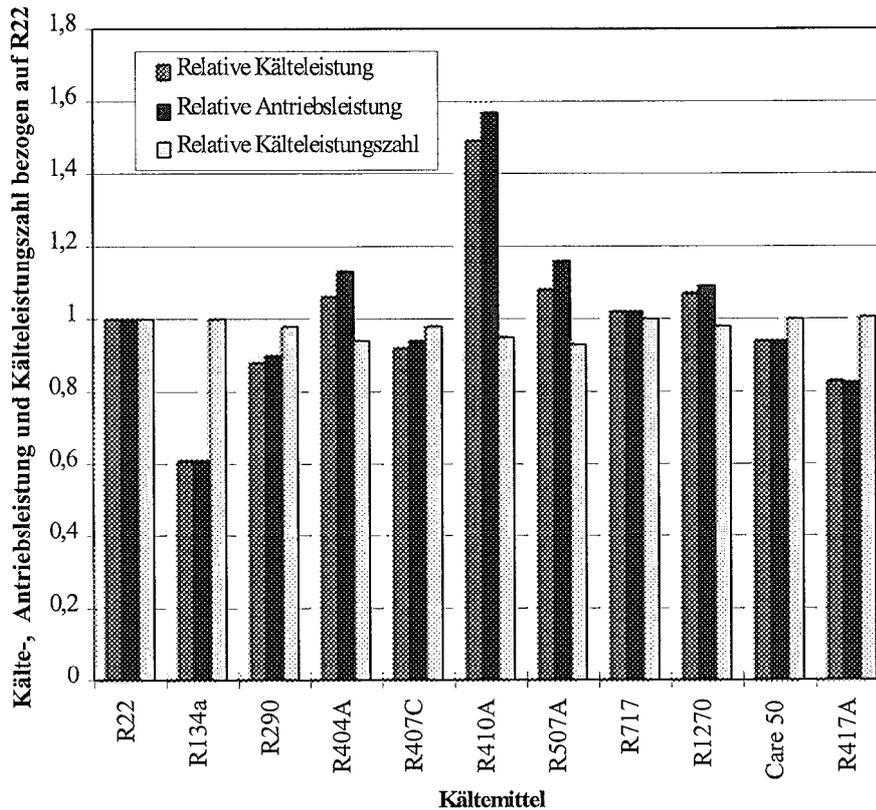


Bild 2.1: Relative Kälte- und Antriebsleistung sowie Kälteleistungszahl (bezogen auf R22) verschiedener Ersatzstoffe für das Beispiel Supermarktkälte / Normalkühlung

Damit hat sich der schon in [24] und [51] angebrachte Zweifel an den verfügbaren Stoffdaten des damaligen ISCEON 59 bestätigt. Im Gegensatz zu den dort ausgewiesenen überaus positiven theoretischen Ergebnissen zeigen die aktualisierten thermodynamischen Berechnungen einen Rückgang der Kälteleistung gegenüber R22 von etwa 20%, was bei nahezu gleicher Kälteleistungszahl einen ebenso starken Rückgang der Antriebsleistung des Prozesses bedeutet. Die in [44] wiedergegebenen theoretischen Werte für die Verdichter-Kälteleistung und die Verdichter-Kälteleistungszahl weisen einen geringeren Rückgang der Kälteleistung bei etwas ungünstigerer Leistungszahl im Vergleich zu R22 aus als die hier berechneten theoretischen Kreisläufe.

Im weiteren ist R417A wie R407C ein zeotropes Gemisch mit einem ähnlich beachtenswerten Temperaturgleit von etwa 5 K, so daß in dieser Hinsicht zunächst ebenso die in Zusammenhang mit R407C genannten nachteiligen Eigenschaften der zeotropen Kältemit-

telgemische zu berücksichtigen sind. So wird der Einsatz in überfluteten Systemen (und solchen mit Turboverdichtern) vom Hersteller nicht empfohlen [46].

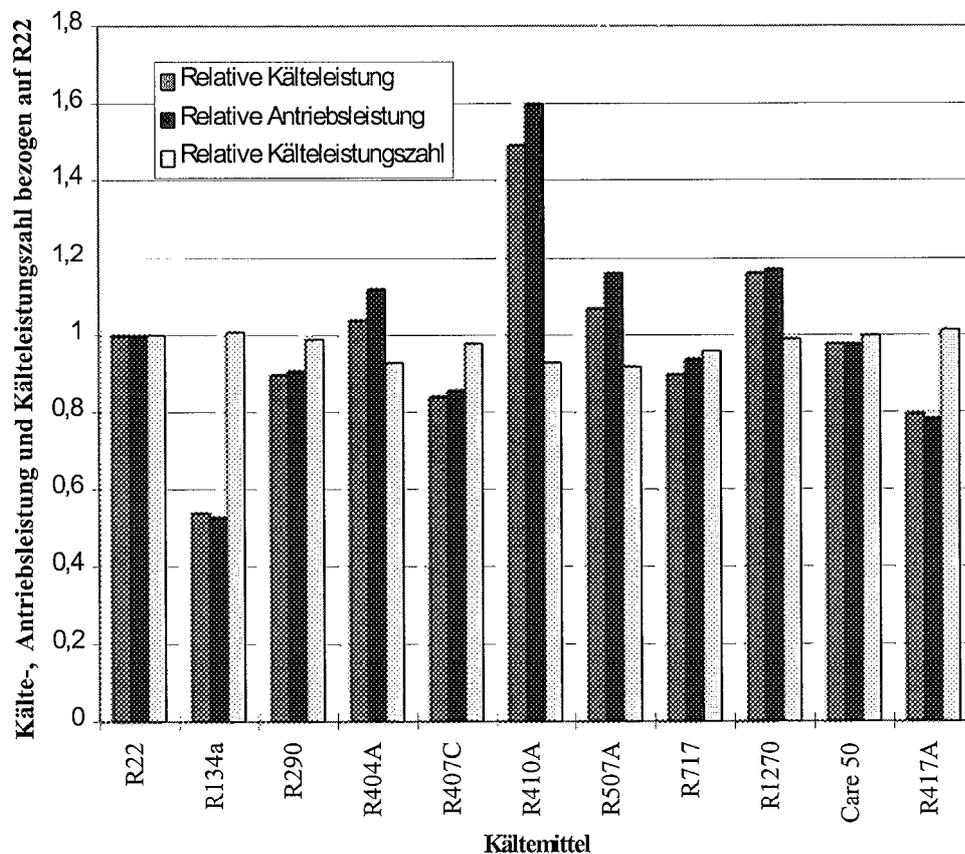


Bild 2.2: Relative Kälte- und Antriebsleistung sowie Kälteleistungszahl (bezogen auf R22) verschiedener Ersatzstoffe für das Beispiel Supermarktkälte / Tiefkühlung

2.7 R507A

Das azeotrope Kältemittelgemisch R507A hat ausgesprochen ähnliche Eigenschaften wie R404A, was auch schon anhand der hier wiedergegebenen theoretischen Berechnungen deutlich wird. Es wird deshalb auch oftmals zusammen mit R404A in der Diskussion zum R22-Ersatz genannt. Beide kommen trotz erforderlicher höherer Antriebsleistung dort zum Einsatz, wo der Temperaturgleit zeotroper Gemische problematisch ist, vor allem in Systemen mit überfluteter Verdampfung. Grundsätzlich gilt das zu R404A gesagte. Wie dieses ist das H-FKW-Gemisch R507A vor allem im Normal- und Tiefkühlbereich der Gewerbe- und Industriekälte geeignet und wird in den letzten Jahren ebenso zunehmend ein-

gesetzt [51]. Für einen Retrofit-Ersatz von R22 sind ebenfalls wiederum die für H-FKW bekannten Umstellungsmaßnahmen geeignet.

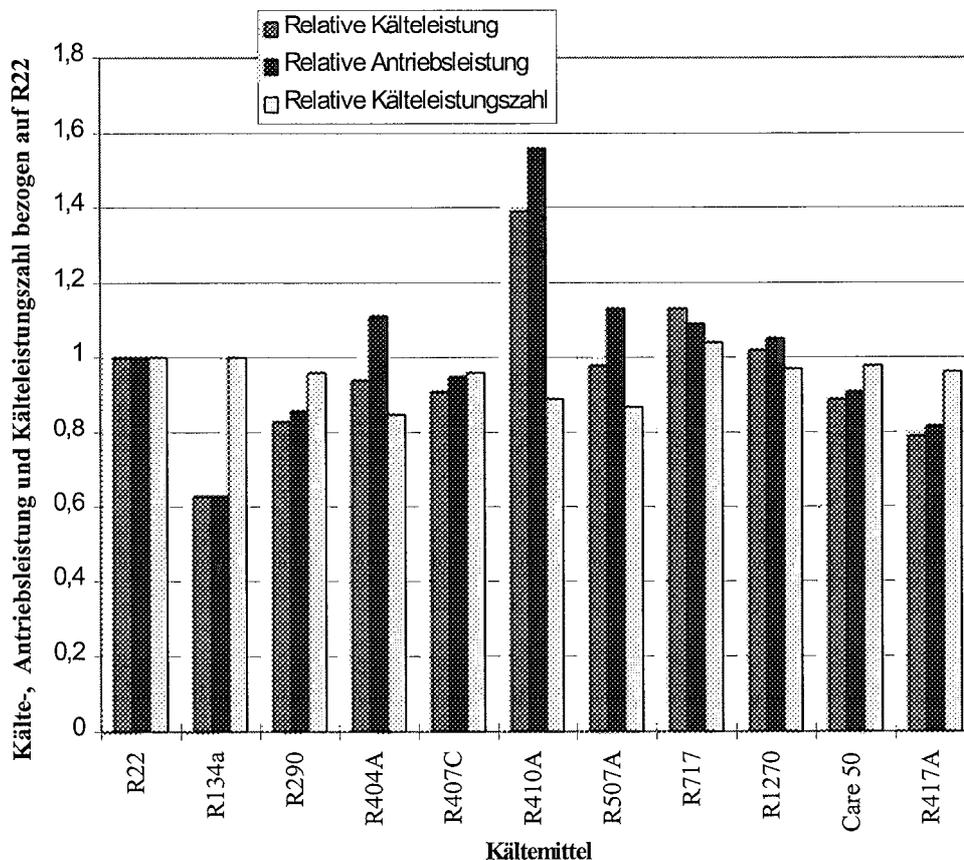


Bild 2.3: Relative Kälte- und Antriebsleistung sowie Kälteleistungszahl (bezogen auf R22) verschiedener Ersatzstoffe für das Beispiel Klimatisierung

2.8 R717

Ammoniak (R717) hat aufgrund seiner energetisch sehr guten Eigenschaften in Neuinstallationen im R22-Anwendungsbereich der Industriekälte und (in geringerem Ausmaß) auch der Gewerbekälte in der jüngeren Vergangenheit zunehmend an Bedeutung gewonnen [24]. Sein Einsatz in bestehenden R22-Anlagen wird vor allem wegen seiner Materialunverträglichkeit mit den dort üblicherweise eingesetzten Kupfer- und Buntmetallwerkstoffen sowie seiner örtlichen Gefährdung durch seine Toxizität und Entflammbarkeit in nahezu allen Fällen ausgeschlossen sein. Seltene Ausnahmen hiervon stellen die bereits in Hinblick auf

den R22-Ausstieg für eine Umstellung auf R717 erstellten neueren R22-Kälteanlagen im Leistungsbereich der industriellen Kälteerzeugung dar [39] [51].

2.9 R1270

Wie Propan ist der Kohlenwasserstoff Propen (R1270) aufgrund seiner thermophysikalischen Eigenschaften ein sehr guter Ersatzstoff in R22-Anwendungsbereichen. Das Einstoff-Kältemittel kann in Hinblick auf Ölverhalten und Materialverträglichkeit grundsätzlich als Drop-In in bestehenden Kälteanlagen eingesetzt werden. Wie Propan weist R1270 eine dem R22 sehr nahe kommende energetische Effizienz auf. Im Gegensatz zu R290 werden aber höhere Kälteleistungen bei ebenfalls steigender Antriebsleistung als mit R22 erbracht (Tabelle 2.2). Obwohl grundsätzlich keine Änderung der für R22 üblichen Anlagentechnik notwendig ist, wird R1270 aufgrund der örtlichen Gefährdung durch die starke Brennbarkeit der Kohlenwasserstoffe im allgemeinen nur dort in für R22 bestehenden Anlagen zum Einsatz kommen, wo die entsprechenden Sicherheitsvorschriften eingehalten werden können und die erforderlichen Sicherheitseinrichtungen vorhanden sind bzw. mit verhältnismäßigem Aufwand nachgerüstet werden können. Dies beschränkt den Einsatz im allgemeinen auf Anlagen geringer Füllmenge in öffentlich nicht zugänglichen Bereichen und bedeutet für die allgemeine R22-Kälteanlage eine nicht vertretbare Nachrüstung.

2.10 CARE 50

Für das Gemisch aus den Kohlenwasserstoffen Propan und Ethan (R170), CARE 50 gelten zunächst die Einschränkungen für die Anwendung von Kohlenwasserstoffen als Kältemittel. Darüber hinaus weist CARE 50 mit einem Temperaturleit von etwa 5 K ein ähnlich zeotropes Verhalten auf wie die H-FKW-Gemische R407C und R417A, was die schon diskutierte Anwendungsproblematik mit sich bringt. CARE 50 wurde als Drop-In-Ersatz für die Anwendungsbereiche von R22, R502, R404A und R407C in Gewerbe-, Klima- und Industriekälte sowie Wärmepumpen entwickelt [22] und läßt mit R22 vergleichbare Effizienz sowie Leistungen erwarten (Tabelle 2.2).

3 Toxikologische und ökotoxikologische Daten

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten toxikologischen sowie ökotoxikologischen Daten der hier diskutierten Kältemittel zusammengefaßt.

Chemische Substanzen können auf den menschlichen Organismus aufgrund ihrer akuten und chronischen **Toxizität** sowie ihrer ätzenden, reizenden, sensibilisierenden, krebserzeugenden, erbgutverändernden und fortpflanzungsgefährdenden Eigenschaften gesundheitsschädigend wirken. Alle diese Faktoren werden bei der Festsetzung der toxikologischen Einstufung und Kennzeichnung eines Stoffes berücksichtigt.

Die deutschen Unfallverhütungsvorschriften UVV-VGB 20 [55] ordnen die Kältemittel in die Gruppe 1 ein, wenn es sich um Stoffe ohne erhebliche gesundheitsschädigende Wirkung auf den Menschen handelt. Der Gruppe 2 werden giftige oder ätzende Kältemittel zugeordnet. Soweit diese Einstufung erfolgt ist, ist diese bereits in Tabelle 2.1 angegeben. Tabelle 2.1 enthält ebenso die erfolgte Sicherheitsklassifizierung gemäß dem ASHRAE-Standard 34-1997 [3], wobei die Klasse A für wenig giftige Stoffe gilt, Klasse B für stärker giftige Stoffe [51].

Die Gesundheitsgefährdung durch ein Kältemittel bzw. einen Arbeitsstoff wird im allgemeinen durch den Wert der Maximalen Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) bzw. den erlaubten Grenzwert (PEL) der Behörde für Berufssicherheit der USA gekennzeichnet, der die an einem Arbeitsplatz während eines definierten Zeitraums maximal zulässige Konzentration in der Luft angibt.

Ein wichtiger Parameter für die Beurteilung der akuten Toxizität eines Stoffes stellen die aus Tierversuchen ermittelten LD_{50} - bzw. LC_{50} -Werte dar. Der LD_{50} -Wert beschreibt die *letale* Dosis in mg Substanz pro kg Körpergewicht, bei der nach einmaliger Aufnahme innerhalb von 14 Tagen 50 % der Versuchstiere sterben. Dabei ist je nach den Versuchsbedingungen zu unterscheiden zwischen LD_{50} *oral* bei Aufnahme über den Verdauungstrakt und LD_{50} *dermal* bei Aufnahme über die Haut.

Da es sich bei den untersuchten Kältemitteln um Gase bzw. Gasgemische handelt, ist die **inhalative letale Dosis LC_{50}** zur Beschreibung der akuten Toxizität der Kältemittel maßgeblich. LC_{50} *inhalativ* beschreibt diejenige Luftkonzentration eines Gefahrstoffs in mg/l, bei der nach einer vierstündigen Exposition 50% der Versuchstiere innerhalb von 14 Tagen

sterben. Ersatzweise wird auch der Approximated Lethal Concentration-Wert (ALC) angegeben [12]. Der ALC beschreibt die niedrigste getestete Luftkonzentration eines Gefahrstoffs in mg/l, bei der nach einer vierstündigen Exposition eins oder mehrere der Versuchstiere innerhalb von 14 Tagen sterben.

Tabelle 3.1: Toxikologische Daten von Kältemitteln [12], [3], Zahlenangaben in ppm

Kältemittel	MAK langfristig 8h/Tag, 40h/Woche	MAK kurzfristig 60 min.	LC ₅₀ ppm, Ratte, 4h	ASHAE Sicherheitsklasse
R22	500	1.000	220.000	A1
R134a	1.000	2.000	800.000 ¹⁾	A1
R290	1.000	2.000	800.000 ¹⁾	A3
R404A	1.000 ²⁾	k.A. ³⁾	500.000	A1/A1
R407A	1.000 ²⁾	k.A.	k.A.	A1/A1
R407B	1.000 ²⁾	k.A.	k.A.	A1/A1
R407C	1.000 ²⁾	k.A.	k.A.	A1/A1
R410A	1.000 ²⁾	k.A.	520.000	A1/A1
R417A	k.A.	k.A.	k.A.	A1/A1
R507A	k.A.	k.A.	540.000	A1
R717	20	40 ⁴⁾	4.067	B2
R1270	1.000 ²⁾	k.A.	650.000 ⁵⁾	A3
CARE 50	k.A.	k.A.	k.A.	A3
R32	1.000 ²⁾	k.A.	760.000 ⁶⁾	A2
R125	1.000 ²⁾	k.A.	769.000	A1
R143A	1.000 ²⁾	k.A.	591.000 ⁶⁾	A2
R170	1.000 ²⁾	k.A.	24.838 ⁶⁾	A3
R600	1.000	2.000	280.000	A3
R12	1.000	2.000	800.000 ⁶⁾	A1

1) abweichend 15 min. Inhalation

2) Grenzwert Permissible Exposure Level (PEL der Behörde für Arbeitssicherheit, USA)

3) keine Angabe

4) hier für 5 min.

5) ALC-Wert, 2h Inhalation

6) ALC-Wert

Die **Ökotoxizität** eines Stoffes beschreibt die Giftigkeit für die biologische Umwelt, wobei die *terrestrische* Ökotoxizität die Belastung des Bodens und die *aquatische* die des Wassers bezeichnet. Bei der vorliegenden Untersuchung der Kältemittel muß infolge des gasförmigen Zustandes der Kältemittel die Betrachtung auf die *atmosphärische* und *stratosphärische* Ökotoxizität fallen. Der Umwelteinfluß der Kältemittel wird im allgemeinen durch ihr Ozonabbaupotential (ODP-Wert) und ihr Treibhauspotential (GWP-Wert) beschrieben. Wesentlich für die Langzeitwirkung eines Stoffes auf die atmosphärische bzw. stratosphärische Umwelt des Menschen ist die durchschnittliche atmosphärische bzw. stratosphärische Lebensdauer der Stoffe.¹

¹ Eine sehr detaillierte Studie zum Vergleich der Ökobilanzen bei der Verwendung der Kältemitteln Ammoniak, Propan, R134a, R404A, R407C, "Isceon 59" und R22 in Kälteanlagen und Wärmepumpen wurde kürzlich vom Schweizer Bundesamt für Energie veröffentlicht [26].

Tabelle 3.2: Ökotoxikologische Daten von Kältemitteln [12], [30]

Kältemittel	ODP – Ozone Depleting Potential (rel. zu R11)	GWP – Global Warming Potential [kg CO ₂ / 100a]	Ø atmosphärische Lebensdauer [Jahre]	Ø stratosphärische Lebensdauer [Jahre]
R22	0,04	1.500	12,1 ± 2,4	210
R134a	0,000015 ¹⁾	1.300	14,6 ± 2,9	210
R290	0	~20	k.A. ²⁾	k.A.
R404A	0,0001 ¹⁾	3.260	³⁾	³⁾
R407A	0,00002 ¹⁾	1.770	³⁾	³⁾
R407B	0,0002 ¹⁾	2.290	³⁾	³⁾
R407C	0,0002 ¹⁾	1.530	³⁾	³⁾
R410A	0,00002 ¹⁾	1.730	³⁾	³⁾
R417A	³⁾	1.955 ⁴⁾	³⁾	³⁾
R507A	0,00002 ¹⁾	3.300	³⁾	³⁾
R717	0	<1	k.A.	k.A.
R1270	0	k.A.	k.A.	k.A.
CARE 50	0	~20	k.A.	k.A.
R32	0	650	5,6 ± 1,4	k.A.
R125	0,00003 ¹⁾	2.800	32,6 ± 11,4	400
R143A	0	3.800	48,3 ± 16,9	k.A.
R170	0	~20	k.A.	k.A.
R600	0	~20	k.A.	k.A.
R12	0,82	8.100	102	k.A.

- 1) Angabe der exakten Werte, werden aber aufgrund der Geringfügigkeit zu Null gesetzt.
- 2) Keine Angaben
- 3) vgl. Komponenten
- 4) berechnet gemäß Zusammensetzung

4 Stand der Forschung und Entwicklung zur Umstellung von R22-Kälteanlagen

Die Zusammenstellung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Studie aus 1998 wurde im Rahmen der aktuellen Recherche der Fachliteratur, nationalen sowie internationalen Tagungsberichten und Forschungsberichten der letzten 2 Jahre erweitert bzw. in Hinblick auf neuere Erkenntnisse und Entwicklungen ergänzt.

Für die Umstellung von bestehenden R22-Kälteanlagen auf chlorfreie Ersatzkältemittel kann zunächst grundsätzlich auf die Forschungsergebnisse zurückgegriffen werden, die im Zuge des Ersatzes der vollhalogenierten, chlorhaltigen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), insbesondere der Kältemittel R12 [52] und R502 [53], erzielt wurden. In Abhängigkeit hauptsächlich vom Mischungsverhalten mit dem verwendeten Kältemaschinenöl, der Materialverträglichkeit, der Gefahrenpotentiale und der Drucklage des Ersatzkältemittels kommt eine sogenannte Drop-In- oder eine Retrofit-Umrüstung der Altanlage in Betracht [51], die sich unter Beibehaltung der Anlagentechnik vor allem durch die weitere Verwendung des bisher mit R22 verwendeten Kältemaschinenöltyps bzw. den Wechsel auf ein für das Ersatzkältemittel im Gegensatz zum bisherigen Öltyp geeigneten Schmierstoff unterscheiden [51]. Darüber hinaus können weitere Änderungen an der Anlage bzw. ihren Komponenten erforderlich sein, wie z.B. der Wechsel von Filtern, Trocknern und Dichtungen sowie der Anpassung von Expansionsventilen, wenn nicht Sicherheitsaspekte oder Materialinkompatibilitäten noch aufwendigere Nachrüstungen der Anlage erforderlich machen.

Die deutlich umfangreichsten Forschungsergebnisse lagen schon 1998 zur Retrofit-Umstellung von chlorhaltigen Kältemitteln auf chlorfreie H-FKW-Ersatzkältemittel vor. Die wesentlichen Problemkreise bei der hierfür nötigen Umstellung der Kälteanlage auf Ester- oder PAG-Öle, wie Feuchtigkeit, Reste des für R22 eingesetzten Mineralöles, Chlorreste sowie Verunreinigungen in der Kälteanlage, sind hinreichend bekannt und unter Beachtung der seit längerem vorliegenden zulässigen Grenzwerte beherrschbar [51]. Die trotz einer Weiterverwendung des Öltyps bei einer Drop-In-Umstellung notwendige Beachtung des Ölverhaltens des Ersatzkältemittels ist ebenfalls bekannt.

Forschungsergebnisse und Veröffentlichungen zu den neuen H-FKW-Kältemitteln der letzten 2 Jahre, die aufgrund der bereits umfangreich vorliegenden Erkenntnisse in geringerer Zahl veröffentlicht wurden, beziehen sich weiterhin auf das Ölverhalten bzw. die technischen Eigenschaften der eingesetzten Öle und die Wärmeübertragungseigenschaften der Alternativkältemittel, z.B. in [42], [59], [10], [43]. Zu den eingesetzten Esterölen liegen mittlerweile die umfassende Kenntnis ihrer physikalischen und technischen Eigenschaften und ihrer Handhabung sowie jahrelange positive Einsatzerfahrungen vor [19], [20].

Die während der vorhergehenden Studie im Mai 1998 eingewandten Nachteile bei der Umstellung von Rollkolbenverdichtern auf H-FKW mit Esterölen, die durch die mangelnde 'Eigenschmierung' des chlorfreien Kältemittels zu vorzeitigem Verschleiß des Verdichters bzw. des Schiebers des Rollkolbenverdichters führen [14], werden von anderer Seite bestätigt [5]. Während in [14] noch der Einsatz von neueren Schmierstoffen für H-FKW auf der Basis von Ethern [51] als günstiger empfohlen wurde, wird in [5] von der gemeinschaftlichen Entwicklung der Verdichter- und Schmierstoff- Hersteller eines neuen Öltyps auf der Basis von Alkylbenzol berichtet, das gut für diesen Verdichtertyp geeignet ist.

Die neueren Ergebnisse der theoretischen Betrachtung der Verdampfung der auch im Rahmen der vorliegenden Studie betrachteten Ersatzkältemittel (außer R417A und CARE 50) in bestehenden R22-Wärmeübertragern weisen R404A, R407C und R507A mit den geringsten Unterschieden zu R22 als am besten zum Retrofit geeignet aus [10]. Der dortige Autor widerspricht damit dem Urteil der oftmals an einzelnen Rohren oder Drähten durchgeführten Untersuchungen der Wärmeübertragungseigenschaften, die im allgemeinen schlechtere Eigenschaften der H-FKW-Gemische feststellen, da diese zumeist nicht unmittelbar auf den Betrieb in der technischen Anlage übertragbar seien. Die Berechnungsergebnisse sprechen sogar dafür, daß R407C nach R507A bei überfluteter Verdampfung am besten zum Retrofit in R22-Verdampfern geeignet ist.

Abgesehen von Detailfragen, deren Klärung nicht zur grundsätzlichen Durchführbarkeit des Retrofit (bzw. Drop-In) von R22-Anlagen notwendig ist, scheint sich die Forschung zur Umstellung erschöpft zu haben. Die Umrüstungsprozeduren sind hinlänglich bekannt [51] und werden von unterschiedlicher Seite als quasi Standard-Prozedur beschrieben, z.B. in [6].

5 Erfahrungsstand zu R22-Umstellungen

5.1 Studien und Fallbeispiele

In Ergänzung der im Rahmen der vorangegangenen Studie des Jahres 1998 ermittelten Berichte zur Umstellung von R22-Kälteanlagen auf Ersatzkältemittel konnten aktuelle Studien und Erfahrungsberichte der letzten zwei Jahre nur in geringem Umfang gefunden werden. Vor dem Hintergrund der im internationalen Vergleich deutlich kürzeren Austiegsfristen aus der Verwendung des R22 stammen die Autoren vorwiegend aus den Ländern der Europäischen Union.

Die relativ detaillierten Ergebnisse einer Vergleichsstudie zum R22-Retrofit mit den Kältemitteln R407C, R417A, R290 und CARE 50, die darüber hinaus einen guten Überblick zu möglichen Ersatzkältemitteln und den bei einer Umstellung wesentlichen Kriterien gibt, wurden in [11] veröffentlicht. Die Vergleiche wurden in vier Kaltwassersätzen mit trockener Verdampfung durchgeführt, wobei eine der Anlagen zum direkten Retrofit-Vergleich in vier Untersuchungen jeweils auf das Ersatzkältemittel umgestellt wurde. Der Kaltwassersatz mit hermetischem Hubkolben-Verdichter hatte eine nominelle Kälteleistung von 3 kW bei 9°C Kaltwassertemperatur und war mit Gegenstrom-Verdampfer und innerem Wärmetauscher ausgeführt. Die Umstellungen auf CARE 50, R290 und R417A wurden als Drop-In mit Mineralöl durchgeführt, für R407C fand ein Retrofit auf Polyolesteröl statt. Die Kohlenwasserstoffe erforderten eine Isolierung der Elektrik der Anlage.

Während keinerlei Störungen des Betriebverhaltens der umgestellten Anlagen zu verzeichnen waren, wird einschränkend angemerkt, daß der Öltransport mit R417A bei tieferen Temperaturen sorgfältig beobachtet werden sollte. Im direkten Leistungsvergleich bei gleicher Nutz- und Kühllufttemperatur war die Kälteleistung in jedem Fall gegenüber R22 reduziert. Bei einer Steigerung der Kälteleistungszahl von +4,7% wurde mit CARE 50 der geringste Rückgang um -5,7% festgestellt, gefolgt von R407C mit -6,5% (Leistungszahl -2,0%), Propan (-6,9%/+11,4%) und R417A (-8,2%/-18,5%). Die weiteren drei R22-Kaltwassersätze, die in früheren Jahren auf ein Entwicklungsgemisch des heutigen R417A (1993), R407C (1996) und CARE 50 (1996) umgestellt wurden, wurden zum Vergleich herangezogen und zeigten jeweils tendentiell die gleichen Änderungen des energetischen Verhaltens der jeweiligen Anlage. Hervorgehoben wird, daß in der Vergleichsanlage

mit R407C ein halbhermetischer Schraubenverdichter sowie ein Verdampfer in Parallelstrom-Ausführung und ein "überfluteter" Verflüssiger eingesetzt wurden, wobei letzterer eine Verschiebung der Zusammensetzung des umlaufenden Gemisches begründet. Insgesamt führte die Anlagenkonfiguration zu einer höheren Leistungsminderung gegenüber R22 von bis zu 9% und einer Minderung der Kälteleistungszahl von -18% (22% höherer Energieverbrauch bei gleicher Kälteleistung). Die Vergleichsanlage mit einem Entwicklungsgemisch¹ für R417A wurde als Drop-In unter Beibehaltung des R22-Alkylbenzolöles durchgeführt. Anhand von regelmäßigen Ölanalysen wurde der ordnungsgemäße Zustand der Anlage gezeigt. An der Anlage von 1993 mit hermetischem Hubkolbenverdichter wurde eine geringere Minderung von Kälteleistung (-11,5%) und der Kälteleistungszahl (-1% bis -4%) festgestellt, was hauptsächlich mit der unterschiedlichen Konfiguration der Wärmeübertrager und deren Verhalten im Hinblick auf den Öltransport begründet wird. Für CARE 50 wurde schließlich auch an der Vergleichsanlage mit hermetischem Hubkolbenverdichter in 1996 eine leichte Erhöhung der Kälteleistungszahl (+2,5%) sowie eine Verringerung der Kälteleistung um -18% festgestellt, wobei die besseren Resultate der neuen Untersuchung mit dem Einsatz des inneren Wärmeübertragers erklärt werden. Der grundsätzliche energetische Vorteil eines inneren Wärmeübertragers bei Verwendung von Kohlenwasserstoffen wird auch im Zusammenhang mit den gegenüber der Theorie guten Ergebnissen mit Propan hervorgehoben.

Ein weiterer Erfahrungsbericht wird in [6] wiedergegeben. Die 7,5 kW-R22-Schiffskälteanlage mit offenem Hubkolbenverdichter für -18°C/-20°C Kühlraumtemperatur wurde auf R404A umgestellt und wird seit 3 Jahren zuverlässig betrieben, ohne daß sich das Betriebsverhalten verschlechtert habe. Die Retrofit-Umstellung erforderte 3 Öl- und Filtertrocknerwechsel, den Austausch von Dichtungen und verursachte bei einem Zeitaufwand von 14 Stunden Kosten von etwa DM 7.400,-. Auch dieser Aufsatz gibt einen guten Überblick der Vorgehensweise bei der Retrofit-Umstellung und der zu beachtenden Punkte.

Einen zusammenfassenden Überblick der Retrofit-Erfahrungen mit R22-Klimaanlagen und Wärmepumpen gibt K. Bergklöf aus Schweden, wo die Nachfüllung von R22 in bestehenden Anlagen bereits ab Januar 2002 verboten sein wird [5]. Besonders hervorgehoben wird

¹ 37% R125, 53% R134a, 4% R600a, 6% R218

der Einsatz des zeotropen R407C unter Berücksichtigung verschiedener Wärmeübertrager-Ausführungen und Verdichtertypen. Anlagen mit Plattenwärmeübertragern mit Gegenstromführung zeigen nach der Umstellung in der Regel ein sehr ähnliches Betriebsverhalten wie zuvor mit R22, wobei die Leistung in Abhängigkeit von Optimierungsmaßnahmen etwas abweichen kann. Während vom Einsatz von R407C in überfluteten Verdampfern gänzlich abgeraten wird, führt eine "überflutete Kondensation" im Rohrbündelverflüssiger zu einem Anstieg der erforderlichen Antriebsenergie. In dieser Hinsicht fehlt es noch an ausgereiften Optimierungsmaßnahmen an der Anlage, die grundsätzlich dem höheren Energieverbrauch entgegenwirken können. Luftwärmeübertrager schließlich bedürfen ebenfalls genauerer Betrachtung bei Einsatz eines Kältemittels mit hohem Gleit insbesondere im Hinblick auf die Luftverteilung.

Hinsichtlich der Verdichter werden gute Erfahrungen mit Hubkolben- und Scrollverdichtern im Betrieb mit H-FKW und Esterölen hervorgehoben, während Rollkolbenverdichter, wie schon an anderer Stelle zitiert, große Probleme bereiteten, bis ein geeignetes Öl auf Alkylbenzol-Basis gefunden wurde. Für Schraubenverdichter liegen bereits viele positive Erfahrungen mit R407C vor, wobei es wesentlich war, ein Kältemaschinenöl mit speziell dafür geeigneten Mischungs- und Schmierungseigenschaften einzusetzen.

Erfahrungen mit der Umstellung von industriellen R22-Kälteanlagen großer Leistungen mit überfluteter Verdampfung und Pumpenumlauf des Kältemittels werden in [50] zusammengefaßt. Hervorzuheben ist die Feststellung, daß vom Autor keine Hinweise dafür gefunden werden konnten, daß bereits überflutete Kälteanlagen-Systeme auf Ersatzkältemittel umgestellt worden sind. Umfangreiche Forschungsarbeiten zum Anlagenverhalten von zeotropen Kältemittelgemischen liegen vor und werden weiterhin durchgeführt. Im Vordergrund hierbei steht die derzeitige Entscheidung, daß aufgrund ihrer Materialverträglichkeit und Sicherheitseigenschaften H-FKW-Gemische als Ersatzstoffe am geeignetsten erscheinen. Ammoniak – für Neuanlagen ein naheliegender Ersatz für R22 - scheidet als Retrofit-Ersatz ganz aus, Kohlenwasserstoffe wie Propan - grundsätzlich auch für überflutete Systeme hinreichend getestet und geeignet - würden aufgrund des großen Volumens bestehender Anlagen zu einer finanziell nicht vertretbaren Umrüstung der Sicherheitseinrichtungen führen.

Der englische Hersteller von R417A (bzw. ISCEON 59) veröffentlicht mehrere Referenzen zur Befüllung von für R22 hergestellten Klimaanlage mit seinem Produkt sowie zur Umstellung von mit R22 in Betrieb befindlichen Klimaanlage auf das vorgeschlagene Ersatzkältemittel [31]. Die genannten Importeure von mit Mineralöl befüllten Klimaanlage befüllen und vertreiben diese Neuanlagen unter den herkömmlichen Garantiebedingungen mit dem R22-Ersatz R417A. Darüber hinaus wird von 4 Fällen berichtet, in denen bestehende Klimaanlage von R22 durch Drop-In auf ISCEON 59 (1996) umgestellt wurden. Nach der einfachen Umstellung konnte keinerlei ungünstiger Effekt im Vergleich zu R22 festgestellt werden.

Für die Normal- bzw. die Tiefkühlung wird ISCEON 59 (1996) mit zwei Beispielen zur Drop-In-Anlagenumstellung von R22 empfohlen [32]. Die im Vergleich zum Betrieb mit R22 angegebenen Betriebsdaten einer Glykol-Kühlanlage mit -5°C Nutztemperatur zur Prozeßkühlung und Klimatisierung zeigen einen energetischen Vorteil des Ersatzkältemittels bei nahezu identischen äußeren Temperaturbedingungen der Anlage und vergleichbarer Sauggasttemperatur, niedrigerer Verflüssigungstemperatur sowie deutlich niedrigerer Verdichtungstemperatur. Das zweite Beispiel bezieht sich auf die Kälteanlage bei -30°C Verdampfungstemperatur eines Kühlhauses. Neben der Feststellung, daß ISCEON 59 ein geeigneter Ersatz für R22 ist, wird insbesondere auf die 39°C niedrigere Verdichtungs-temperatur hingewiesen.

Ein weiteres Fallbeispiel für die einfache Drop-In-Umstellung ist die eines 200 kW R22-Kaltwassersatzes für eine Kaltwassertemperatur von ca. $6,5^{\circ}\text{C}$ unter Beibehaltung des Mineralöls [57], [33]. Die Betriebsbedingungen vor und nach der Umstellung wurden aufgezeichnet und weisen eine vergleichbare Kälteleistung bei geringerem Energieverbrauch aus. In [57] werden auch Vergleichsmessungen der Kälte- und Antriebsleistung bezogen auf die inneren Bedingungen der Versuchsanlage (Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen) von R22 und ISCEON 59 wiedergegeben. Der Anstieg der Kälteleistungszahl mit dem Ersatzstoff gegenüber R22 wird bei einer Verdampfungstemperatur von $t_0 = -20^{\circ}\text{C}$ mit 12% angegeben, bei $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ beträgt er 4%, während die Kälteleistung leicht sinkt.

In einer weiteren Studie [57] wird schließlich über die erfolgreiche Umstellung zweier Klima-Split-Geräte auf ISCEON 59 (1998) berichtet, die nach geringfügigem Service

durch Erhöhung der Kältemittel-Füllmenge gleiche Betriebscharakteristiken wie zuvor mit R22 zeigten.

Studien zum Drop-In-Einsatz des ISCEON 59 in R22-Supermarktkälteanlagen in Holland und Schweden zeigen die Eignung des Ersatzkältemittels sowohl für Kühlmöbel der Normalkühlung mit 0,5°C Kühllufttemperatur als auch für Tiefkühleinrichtungen bei etwa -20°C [58]. Es wird jeweils bei gleichen Nutzttemperaturen eine etwas geringere Kälteleistung bei gleichem Energieverbrauch mit ISCEON 59 im Vergleich mit R22 angegeben.

5.2 Sachstand in Deutschland

Im Rahmen der Studie zum Ersatz von R22 von 1998 hatte das *FKW* eine Umfrage im deutschen Markt bei industriellen Herstellern von Kältemitteln, Schmierstoffen, Kälteanlagen sowie Anlagenkomponenten, und bei Kälteanlagenbauern und Servicefirmen zu vorgenommenen Umstellungen von R22-Kälteanlagen auf mögliche Ersatzkältemittel durchgeführt. Diese Umfrage führte zum damaligen Zeitpunkt zu dem Ergebnis, daß ein Ersatz des Kältemittels R22 im Anlagenbestand in Deutschland nicht stattgefunden hat, so daß praktische Erfahrungen bei der Umstellung von R22-Anlagen des deutschen Marktes praktisch nicht vorlagen. Die in der damaligen Recherche der nationalen und internationalen Literatur ermittelten und ausgewerteten Dokumentationen durchgeführter Umstellungen stellten ausschließlich Fallstudien z.B. der Hersteller von Kältemitteln und Kälteanlagen sowie Umstellungen unter Laborbedingungen dar. Dabei war die Untersuchung des international am meisten beachteten R22-Ersatzkältemittels R407C neben R134a, beide wichtige Kältemittel im weltweit großen Markt der Klimatisierung, der deutliche Schwerpunkt der Berichte. Für weitere Kältemittel (R290, R404A, Isceon 59) konnte eine geringe Anzahl von Fallstudien zum R22-Retrofit bzw. Drop-In ermittelt werden. Für die übrigen (R507A, R1270 und CARE 50) konnten solche Fallbeispiele nicht gefunden werden.

Um den aktuellen Erfahrungsstand bei der Umrüstung von mit dem Kältemittel R22 betriebenen Kälteanlagen zu ermitteln, ist nunmehr eine Wiederholung sowie eine Vertiefung dieser Recherche und eine Umfrage im deutschen Kälteanlagenbauerhandwerk durchgeführt worden.

5.2.1 Grundsätzliches

Die aktuellen Anfragen bei den Ansprechpartnern der Kälte-Industrie lieferte zunächst praktisch das gleiche Ergebnis wie die Umfrage in 1998. Die Kältemittel-Hersteller betrachten den R22-Ersatz in bestehenden Anlagen zwar (mit einer Ausnahme) zurückhaltend bis ablehnend, halten die Umrüstprozedur aber (ohne Ausnahme) für weitestgehend geklärt und bleiben bei einer Anfrage den Vorschlag eines Ersatzkältemittels nicht schuldig. Die seit 1998 gegebenenfalls vorliegenden Fallstudien wurden im allgemeinen nicht erweitert, so daß hier in der Zwischenzeit keine weiteren Aktivitäten zu verzeichnen waren.

Vergleichbares gilt für die industriellen Hersteller der Schmierstoffe. Während wenige Anfragen des Marktes zum Thema R22-Umstellung eingehen, erwartet man prinzipiell keine Probleme beim R22-Retrofit, jedoch rechnet man mit mehr Aufwand als bei der Umstellung von R12-Anlagen. Aus Sicht der Schmierstoff-Hersteller ist bei der Umstellung einer Anlage von einem chlorhaltigen auf ein chlorfreies Kältemittel im wesentlichen der Verschleißschutz des Verdichters bedenkenswert. Der Chloranteil im R22/Mineralöl- bzw. Alkylbenzolöl-Gemisch bewirkt einen "natürlichen" Verschleißschutz, der bei H-FKW-Kältemitteln fehlt. Darüber hinaus hält man insbesondere bei Tieftemperatur-Anwendungen die Problemstellungen der Ölrückführung und des Wärmeübergangs bei H-FKW/Esteröl-Gemischen für noch nicht hinreichend geklärt.

Die deutschen Hersteller von Anlagen-Komponenten wie Verdichtern, Wärmeübertragern oder Expansionsventilen können keine Marktreferenzen zur R22-Umrüstung geben, da sie keine Rückinformation zu umgestellten Anlagen haben. Probleme bei der Umstellung werden im Hinblick auf diese Komponenten im allgemeinen nicht erwartet. Grundsätzlich werden die Komponenten, insbesondere die Verdichter (z.B. Hubkolben-, Schrauben oder auch Scrollverdichter) als seit Jahren für die Umrüstung geeignet beschrieben. Im Fall der Verdichter sei die Umstellung ausdrücklich problemlos, ohne daß ein vorheriger Betrieb der R22-Maschinen mit einem Esteröl vorgesehen wird bzw. wurde, wie es an anderer Stelle zur Vorbereitung auf eine spätere Umstellung vorgeschlagen wurde [51]. Generell wird, wie schon in [51] festgestellt, auf die Erfahrungen und Handlungsanweisungen verwiesen, die auf der Umstellung von R12 und R502 auf H-FKW-Ersatzstoffe beruhen. Rollkolbenverdichter, für die sich die Umstellung auf chlorfreie Kältemittel als problembehaf-

tet erwies, werden im deutschen Markt nicht gefertigt. Von der Umstellung wurde von den Importeuren abgeraten [51].

5.2.2 Deutsches Kälteanlagenbauerhandwerk

Die erwähnte Umfrage im deutschen Kälteanlagenbauerhandwerk wurde in Zusammenarbeit mit dem Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V. (VDKF e.V.) und dem Bundesinnungsverband des Deutschen Kälteanlagenbauerhandwerks (BIV) in Form eines Fragebogens durchgeführt. Mit Hilfe des Fragebogens sollten möglichst repräsentativ Daten u.a. hinsichtlich

1. des aktuellen Umfangs der praktischen Erfahrungen zur Umrüstung von R22-Kälteanlagen,
 2. des zur Umrüstung jeweils eingesetzten Ersatzkältemittels,
 3. der gegebenenfalls bei der Umrüstung aufgetretenen technischen Probleme,
 4. des Umfangs des zur Umrüstung nötigen technischen Aufwandes,
 5. der Auswirkung der Umrüstung auf das Betriebsverhalten der Kälteanlage sowie
 6. der durchschnittlichen Kosten der Anlagenumrüstung
- ermittelt werden.

Der Fragebogen wurde mit Hilfe der Adressenliste von VDKF und BIV im August des Jahres an 1.535 Mitgliedsfirmen versandt. Bis Mitte September waren 264 Antwortfragebögen bzw. telefonische Meldungen eingegangen (17%), so daß die Umfrage nur mit Einschränkung als repräsentativ angesehen werden kann.

Zur Ermittlung der Gründe für ein Ausbleiben der Antworten wurde in der Folge bei etwa 50 zufällig ausgewählten Adressaten der Umfrage telefonisch nachgefragt. Als wesentlicher Grund für die "Zurückhaltung" wurde genannt, daß das Ausfüllen des Fragebogens zu zeitaufwendig sei und man nicht die Arbeitszeit zur notwendigen Datenerhebung bzw. -aufbereitung zur Verfügung stellen könne (9). Die Begründung mit hoher Arbeitsbelastung (Sommer-Saison) sowie Urlaubszeiten weist in die gleiche Richtung (10). Relativ hoch war auch der Anteil der Stellungnahmen, die zum Ausdruck brachten, der Fragebogen habe nicht ausgefüllt werden können, weil bislang seitens des Adressaten keine Umrüstung bestehender Kälteanlagen vorgenommen worden ist (14), während eine geringe Anzahl die Anfrage nicht zur Kenntnis genommen hatte oder nicht zu diesem Thema ansprechbar

war (6). Ein weiterer Anteil der Mitgliedsliste entsprach nicht der Zielgruppe der Umfrage, so z.B. Großhändler oder Hersteller von NebenkompONENTEN der Kältetechnik wie Meßtechnik, Isolierstoffen und Kälteträgern (7).

Von den eingetroffenen Antwortfragebögen enthielten 36 (13%) Angaben zu Erfahrungen zur Umrüstung von bestehenden R22-Kälteanlagen, der Großteil (84%) verzeichnete, daß bislang keine R22-Anlagen umgestellt worden sind. Alle positiven Antworten enthielten die Angabe der zum Teil abgeschätzten Anzahl der umgestellten Anlagen, des Anwendungsbereiches und des Ersatzkältemittels und eine Anmerkung zum Vorliegen von Problemen bei bzw. nach der Umstellung. Im weiteren (Anlagenkenndaten, Komponenten, Umstellungskosten) waren die Angaben unterschiedlich detailliert.

Es wurden insgesamt etwa 2.000 umgestellte Anlagen gemeldet. Eine größere Stückzahl von ca. 500 wurde in 3 Fällen angegeben (Bild 5.1), die nächsthohen Angaben waren ca. 80 und 52 Stück. Die weiteren Zahlen bewegen sich im Bereich von 1 bis 35.

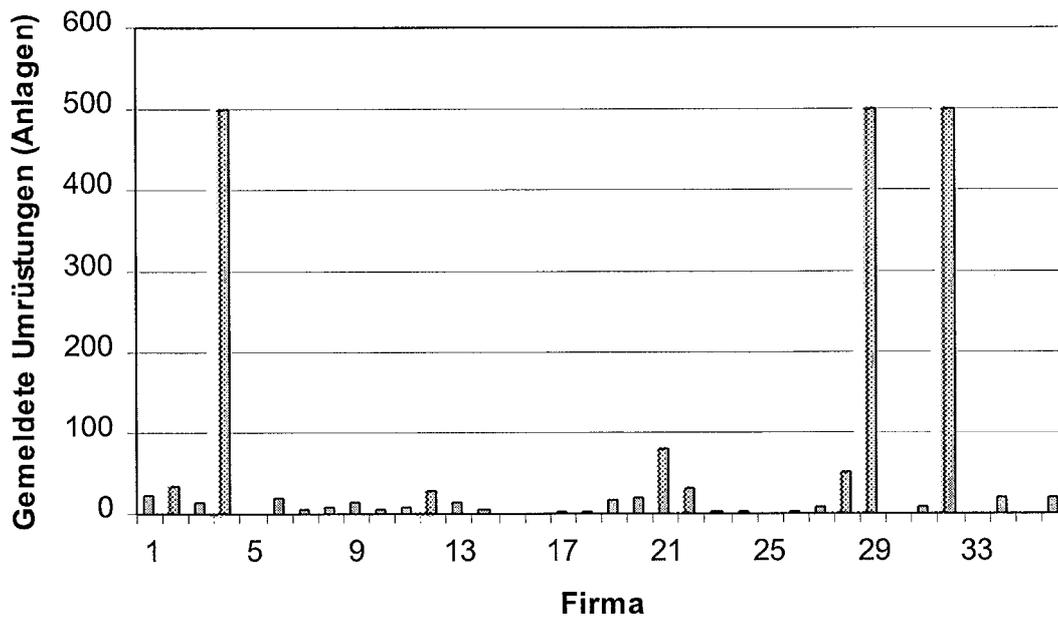


Bild 5.1: Gemeldete Anlagenumstellungen pro Firma¹

¹ der positiven Rückmeldungen

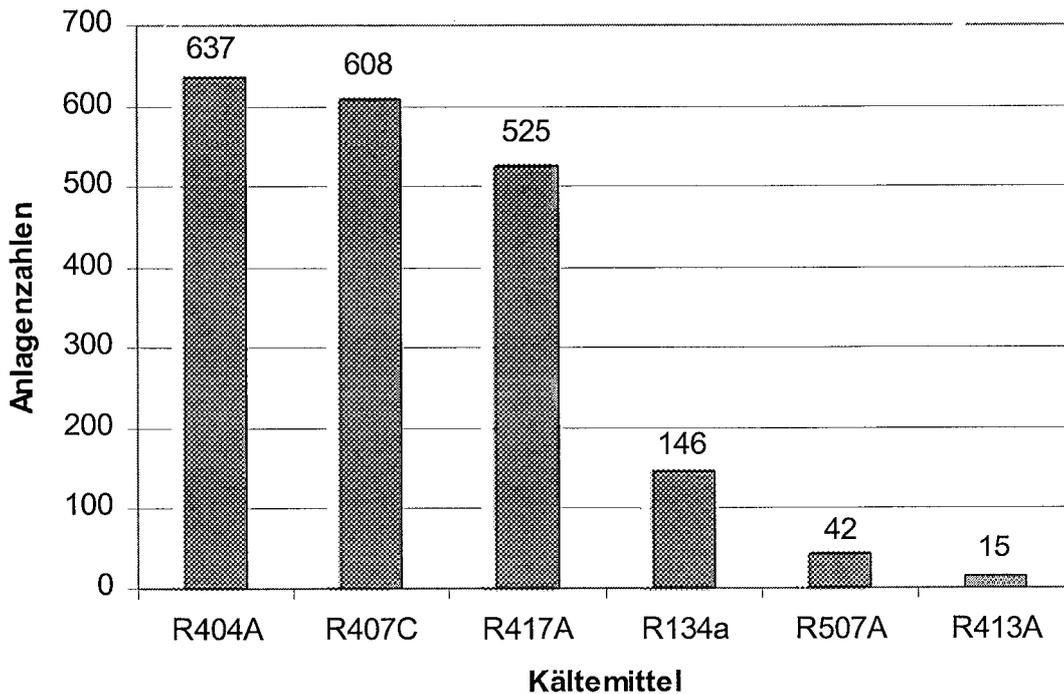


Bild 5.2: Anzahl der auf verschiedene Kältemittel umgestellten R22-Anlagen

Die Angaben der 3 Firmen mit der höchsten Anzahl umgestellter Anlagen bezogen sich 1. auf Klimaanlage, die auf R407C umgestellt wurden, 2. auf Tiefkühlautomaten der Gastronomie und Sole-Kühler (Umstellung auf R404A) sowie 3. auf Split-Klimageräte, wobei es sich bei den Split-Klimageräten um neue Importware handelt, aus denen R22 entnommen wurde und die mit R417A befüllt wurden.

Die Verteilung der Anzahl umgestellter Anlagen auf die Verwendung der Ersatzstoffe, basierend auf den 36 Rückmeldungen ist in Bild 5.2 dargestellt. Die Verteilung deutet darauf hin, daß als R22-Ersatz für bestehende Anlagen die Kältemittel R404A und R407C derzeit die größte Akzeptanz bei den mit den Umstellungen betreuten Firmen findet. Für das Kältemittel R417 A ist ebenfalls eine große Akzeptanz vorhanden. Unerwartet waren 15 Umstellungen auf das zeotrope Kältemittelgemisch R413 A, das als Ersatz für den FCKW R12 entwickelt wurde [52].

In Bild 5.3 wird die Anzahl der auf die verschiedenen Kältemittel umgestellten R22-Anlagen unterteilt nach Anwendungsbereichen dargestellt. Die Rangfolge der Anwen-

dungsbereiche entspricht in ihrer Tendenz den Marktanteilen des R22 in Deutschland. Dabei sind aufgrund der Anlagengrößen die genannten Stückzahlen im Bereich der Klimaanlage größer als in der Gewerbekälte, Industriekälte sowie Wärmepumpen und Transportkälte. Im Transportbereich wurden so gut wie keine Umstellungen notiert. Die Nennung der Ersatzkältemittel in den Anwendungsbereichen entspricht ihren Eigenschaften gemäß Abschnitt 2. In der Klimatisierung wurden vor allem R407C und R417A verwendet, in der Gewerbe- und Industriekälte hauptsächlich R404A, während R507A verhältnismäßig selten genannt wurde.

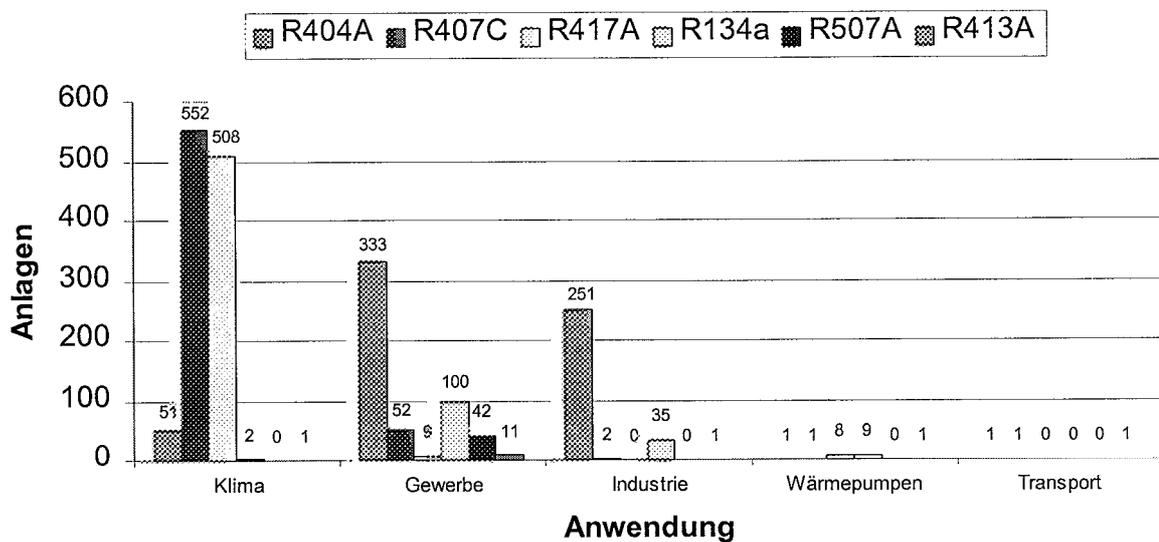


Bild 5.3: Anzahl der auf verschiedene Kältemittel umgestellten R22-Anlagen nach Anwendungsbereichen

Nach den gemachten Angaben wurden in der Umfrage vor allem Klimaanlage im kleinen Leistungsbereich von 0,5 bis 80 kW, Kälteanlagen des Kleingewerbes mit ca. 2 bis 50 kW sowie Gewerbekälteanlagen im mittleren Leistungsbereich bis 200 kW mit Kältemittelfüllmengen bis 300 kg erfaßt.

Soweit nähere Angaben zur Umstellung vorliegen, wurde in den Fällen der H-FKW ein Ölwechsel auf ein Esteröl vorgenommen. Bei einer Umstellung auf R417A wurde das für R22 vorgesehene Mineralöl beibehalten. Im allgemeinen wurde der hohe nötige Zeitaufwand für eine Umstellung der Anlage mit Ölwechsel hervorgehoben. Technische Probleme wurden explizit nicht genannt. Den Anmerkungen ist zu entnehmen, daß die Umstellung der bestehenden R22-Anlage in der Regel nur dann vorgenommen wurde, wenn andere

Instandsetzungsarbeiten, etwa bei einem Verdichterschaden, oder eine Erweiterung der Anlage durchzuführen waren. Bei Umstellungen auf R134a wurde in jedem Fall der Verdichter ersetzt. Weitere 16 von 525 Umstellungen auf R417A neben den bereits genannten 500 aus Bild 5.1 bezogen sich auf Neuanlagen, die für R22 vorgesehen gewesen waren.

Probleme nach der Umstellung der Anlage wurden in der überwiegenden Zahl der Fälle verneint. In einem Fall, der 15 Umstellungen bei Klimaanlage auf R404A dokumentiert, traten Verdichterdefekte auf. Darüber hinaus wurde in einem Fall angemerkt, daß der Ölwurf des Verdichters nach der Umstellung auf R404A sehr hoch sei, so daß eine Ölstandsüberwachung nötig ist. In zwei weiteren Fällen (R404A, R134a) wurde beobachtet, daß nach der Umstellung Magnetventile undicht wurden. Schließlich wurde eine Frisch- und Tiefkühlanlage von R22 auf R417A umgestellt, woraufhin es zu Problemen mit der Öllöslichkeit gekommen ist. Nach einer weiteren Umstellung auf R404A konnte die Kälteanlage sicher betrieben werden.

Die in 10 Antworten genannten Kosten der Umstellung im Verhältnis zum Neupreis der Kälteanlage bewegen sich entsprechend den Baugrößen der Kälteanlagen in einem weiten Bereich (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Kostenangaben zur Anlagenumstellung in DM

Anwendung	Kältemittel	Neupreis	Umstellung
Klima	R417A	1.500,- - 8.000,-	200,-
Klima	R417A	k.A.	400,-
Gewerbe (Normalkühlung)	R407C	1.100,- - 2.380,-	300,- - 685,-
Gewerbe, Klima	R134a, R407C	7.800,-	1.100,-
Gewerbe (Küchen Kühlraum)	R404A	k.A.	1.350,-
Gewerbe (Tiefkühlung, Bäckereien, Metzger)	R404A	k.A.	1.800,-
Gewerbe (Bierkühlung)	R134a	k.A.	2.400,-
Industrie (Werkzeugkühlung)	R134a	14.000,-	4.000,-
Gewerbe	R404A	k.A.	2.000,- - 5.000,-
Gewerbe	R507A, R134a	k.A.	500,- - 25.000,- ¹
Gewerbe (Tiefkühlung)	R507A	45.000,-	25.000,- ¹

¹ inklusive neuer Verdichter / Verflüssigungssatz

Kleine Klimaanlage und Kühlgeräte lassen sich, insbesondere wenn sie vor der Neuinstallation auf das Ersatzkältemittel umgestellt werden, relativ kostengünstig umrüsten. Es sind jedoch auch höhere Kosten in Höhe des halben Anschaffungspreises genannt worden. Speziell bei den genannten Umstellungen auf R507A muß aber davon ausgegangen werden, daß nicht die Umstellung ursächlich für den Verdichterwechsel war. Vielmehr wurde in einer Mehrzahl der Fälle die Umstellung dann durchgeführt, wenn der Verdichter aus anderen Gründen ersetzt werden mußte bzw. andere Instandsetzungsarbeiten anfielen. Bei einem Verdichterschaden kann der neue Verdichter dann gegebenenfalls so gewählt werden, daß die Anlage bei gleicher Leistung auf R134a umgestellt werden kann, wenn die Auslegung der anderen maßgeblichen Komponenten, insbesondere der Wärmeübertrager dies erlaubt. Anderenfalls müßten auch diese Komponenten ausgetauscht werden.

Zum Betriebsverhalten der Kälteanlagen nach der Umstellung sind nur wenige Angaben gemacht worden. Die nahezu regelmäßige Feststellung, es habe nach der Umstellung keine Probleme gegeben sowie die Fälle, in denen Betriebsparameter vor und nach der Umstellung genannt werden konnten, deuten jedoch darauf hin, daß in der Mehrzahl die umgestellten Kälteanlagen ihr Betriebsverhalten durch die Umstellung nicht geändert haben.

6 Bewertung des Forschungs- und Erfahrungsstands

Die Gesamtschau der Forschung zur Umstellung von chlorhaltigen Kältemittel auf chlorfreie Kältemittel, die schon mit der Forschung zum Einsatz solcher Ersatzstoffe in vorher mit FCKW betriebenen Kälteanlagen beginnt, zeigt, daß von dieser Seite in den vergangenen 10 Jahren die wesentlichen Voraussetzungen geschaffen wurden.

Die weltweite Entwicklung chlorfreier Alternativen hat die neuen teilhalogenierten H-FKW als geeignete Arbeitsstoffe hervorgebracht bzw. die alten, halogenfreien Kältemittel werden wieder als Alternativen wahrgenommen und die für einen Einsatz in zuvor mit FCKW oder H-FCKW betriebenen Kälteanlagen ausschlaggebenden Eigenschaften sind mittlerweile hinlänglich bekannt. Das betrifft zunächst die grundsätzliche Eignung als Kältemittel (chemische Stabilität, Lage der Dampfdruckkurve, thermophysikalische Eigenschaften) und geht insbesondere beim Einsatz in Altanlagen über die nötige Kenntnis der Materialverträglichkeit, des energetischen Verhaltens, der Gefahrenpotentiale und des Mischungsverhaltens mit den geeigneten Kältemaschinenölen hinaus. Vor allem für einen Einsatz der H-FKW-Kältemittel in herkömmlichen Anlagenkonzepten mußten neue Kältemaschinenöle bereitgestellt werden. Die in Hinblick auf das bislang verfolgte Anlagenkonzept, die energetische Effizienz und die Sicherheitsanforderungen möglichst genaue Wiedergabe der alten Kältemittel konnte nur durch die Entwicklung von R134a für den Ersatz von R12 und von Stoffgemischen für R22 erzielt werden. Gerade die speziellen Eigenschaften von zeotropen Kältemittelgemischen beim Einsatz in Kälteanlagen waren und sind neben den Wärmeübertragungseigenschaften und dem Ölverhalten die Forschungsschwerpunkte, denen wesentliche Bedeutung zukommt, ohne daß aber Ergebnisse ausstehen, die für die Beurteilung der Eignung eines Ersatzkältemittel zwingend notwendig sind.

Die neben den Eigenschaften der Arbeitsstoffe bei der praktischen Durchführung der Anlagenumstellung zu beachtende Vorgehensweise und die hierbei zu stellenden Anforderungen sind hinreichend bekannt, so daß insoweit der Stand der Forschung genügt, um die Durchführbarkeit des R22-Ersatzes in einer bestehenden Anlage zu beurteilen. Die Wahl des Ersatzkältemittels muß dabei, wie in den Ausführungen der vorigen Abschnitte und schon in der vorangegangenen Studie festgestellt wurde, grundsätzlich unter Beachtung der konkreten Ausführung der Kälteanlage getroffen werden. Grundsätzlich sind, vorbehaltlich einer ökologischen und wirtschaftlichen Bewertung der Umstellung des R22-

Anlagenbestandes, vor allem die H-FKW-Gemische R404A, R407C, R417A und R507A sowie, wegen ihrer starken Brennbarkeit in sehr geringerem Umfang, die Kohlenwasserstoffe R290, R1270 und CARE 50 zum Einsatz in Teilbereichen der R22-Anwendungsbereiche und -Anlagen geeignet. Für R134a gilt dies aufgrund der deutlich geringeren Kälteleistung nur mit großer Einschränkung, während Ammoniak praktisch nicht in Frage kommt.

Die um die Berichte zu Umstellungen von R22-Anlagen der letzten 2 Jahre ergänzte Recherche der vorangegangenen Studie weist eine Erweiterung sowie eine Ergänzung der Erfahrungen aus, so daß nunmehr, bei einer grundsätzlichen Vergleichbarkeit der Kohlenwasserstoffe Propan und Propen, für alle derzeit relevanten Ersatzstoffe entsprechende Umstellungsbeispiele vorliegen.

Auch die Umfrage im deutschen Kälteanlagenbauerhandwerk spricht dafür, daß der zur Umstellung von R22-Anlagen nötige technische Sachstand grundsätzlich gegeben ist, während vor allem wirtschaftliche Kriterien und die derzeitige fehlende Notwendigkeit der Umstellung breitere Aktivitäten in diesem Bereich verhindern. Die Ergebnisse zeigen, daß hauptsächlich in den R22-Anwendungsbereichen der Gewerbekälte sowie der Klimatisierung und etwas geringer in der Industriekälte bereits Erfahrungen mit der Umstellung insbesondere auf R404A und R407C vorliegen. Ebenso liegen auch Erfahrungen mit R417A, R507A sowie R134a vor, während die Kohlenwasserstoffe nicht genannt wurden. Der Einsatz der brennbaren Kältemittel stellt derzeit noch immer lediglich einen Spezialbereich im Kälteanlagenbau dar. Im verhältnismäßig kleinen Einsatzbereich der Wärmepumpen sind nach Auskunft der Umfrage bislang sehr wenige, in der Transportkälte praktisch keine R22-Anlagen umgestellt worden. Gerade letztere lassen aber die geringsten technischen Probleme beim R22-Ersatz erwarten.

Schließlich ist in Ländern wie etwa Schweden, in den die gesetzlichen Regelungen zur Umstellung der H-FCKW-Anlagen bereits mit vergleichbar kurzer Frist gelten, die Umstellung von R22-Anlagen bereits soweit Praxis, daß die Erfahrungsberichte nicht mehr nur auf Einzelbeispielen beruhen. Einschränkend wird auch hier angemerkt, daß die Realisierbarkeit der Umrüstung in Hinblick auf die bestehende Anlagenausführung und den Anwendungsbereich noch nicht für jede einzelne Anlage gänzlich geklärt ist.

7 Ökologische und ökonomische Bewertung des R22-Ersatzes in bestehenden Kälteanlagen

Unter Zugrundelegung der Einsatzmengen und Emissionen des Kältemittels R22 sowie der daraus ermittelten, mit dem Ozonabbaupotential (ODP) des R22 gewichteten, äquivalenten ODP-Mengen, die im Rahmen der Vorgängerstudie angegeben wurden, läßt sich anhand der Auswertung der recherchierten Daten zum Umfang des bislang vollzogenen R22-Ersatzes die bis heute durch den Ersatz von R22 erreichte Minderung von ozonzerstörenden Emissionen abschätzen. Des weiteren kann die Umweltrelevanz des vollständigen Ersatzes des R22 durch Ersatzkältemittel anhand der Verringerung der ozonrelevanten Emissionen, der Treibhauspotentiale und des energetischen Verhaltens der Ersatzkältemittel, und damit deren gesamten Treibhausbeitrages (TEWI) im Vergleich zu R22, sowie ferner anhand des bei der Anlagenumstellung erforderlichen Entsorgungsaufwandes von Betriebsstoffen ermittelt werden.

7.1 Atmosphärische Relevanz

7.1.1 Reduzierung von ozonschädigenden Emissionen

Gemäß der Studie des Jahres 1998 wurde der Verbrauch halogenierter Kältemittel im Jahr 1995 in Deutschland auf ca. 8.520 t abgeschätzt. Daran hatte der H-FCKW R22 einen Anteil von 56% (Bild 7.1), was gegenüber dem Jahre 1989 (44% von 7.000 t) [15] einen Anstieg bedeutet. Der vermehrte Einsatz von R22 erklärt sich dadurch, daß die Verwendung von FCKW geregelt und in Teilen verboten wurde. Die derzeitige Einschätzung des gesamten Kältemittelverbrauches in Deutschland kann von der Verbrauchsmenge des Jahres 1995 ausgehen, auch wenn sich die Anteile der eingesetzten Kältemittel in den 5 Folgejahren geändert haben. Zum einen wurden zunehmend Kälteanlagen mit FCKW durch solche mit Ersatzkältemitteln ersetzt bzw. auf Ersatzkältemittel umgestellt. Zum anderen wurde aber gerade auch R22 als Ersatzstoff vor allem in bestehenden R12- und R502-Anlagen bzw. in deren Anwendungsbereichen eingesetzt. Der Marktanteil der neuen H-FKW hat in dieser Zeit nur verhalten zugenommen.

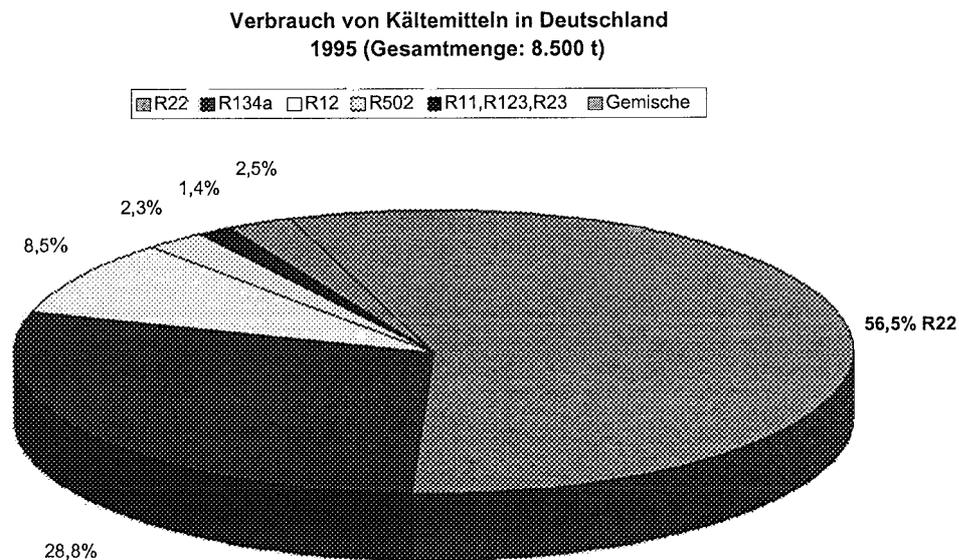


Bild 7.1: Anteile der einzelnen Kältemittel am gesamten Verbrauch halogenerter Kältemittel in Deutschland im Jahr 1995, Gesamtverbrauch 8524 t [51]

Die von den Teilnehmern des AFEAS-Programms übermittelten Zahlen weisen in den Jahren 1995 bis 1998 bei einer Zunahme der gesamten Menge weltweit verkaufter halogenerter Kältemittel von 6% eine Erhöhung des R22-Anteils von 57% auf 64% aus [1], wobei dort die neuen Gemische bzw. deren Komponenten R32, R125 und R143a nicht mit aufgenommen sind (Bild 7.4, Bild 7.5).

Auf der Konferenz zum Ozonschutz, The Earth Technologies Forum im Jahr 1998 [36] wurden zu erwartende Marktanteile der Kältemittel im europäischen Kältemittelmarkt für die Jahre 1998 und 2000 genannt. Im Gegensatz zur weltweiten Entwicklung ging man in der Prognose davon aus, daß der Marktanteil im Jahr 1998 schon auf 34% und im Jahr 2000 weiter auf 26% zurückgegangen sein wird, während der H-FKW R134a bereits nahezu den halben Bedarf an halogenierten Kältemitteln deckt. Für Europa wird für R404A und R507A bereits ein Marktanteil von 14,5% (1998) bis 19,5% (2000) abgeschätzt. Ein sehr geringer Anteil im Verhältnis zu den halogenierten Kältemitteln wird Propan zugerechnet, der unmerklich zunimmt.

Marktanteile der Kältemittel in Europa
Schätzung 1998

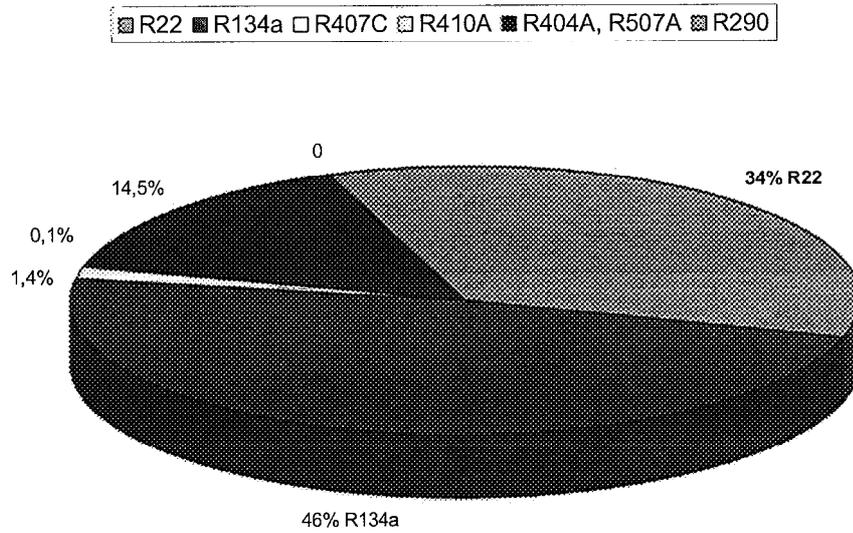


Bild 7.2: Abschätzung der Marktanteile der halogenierten Kältemittel (und Propan) in der Europäischen Union im Jahr 1998.

Marktanteile der Kältemittel in Europa
1998er Prognose für 2000

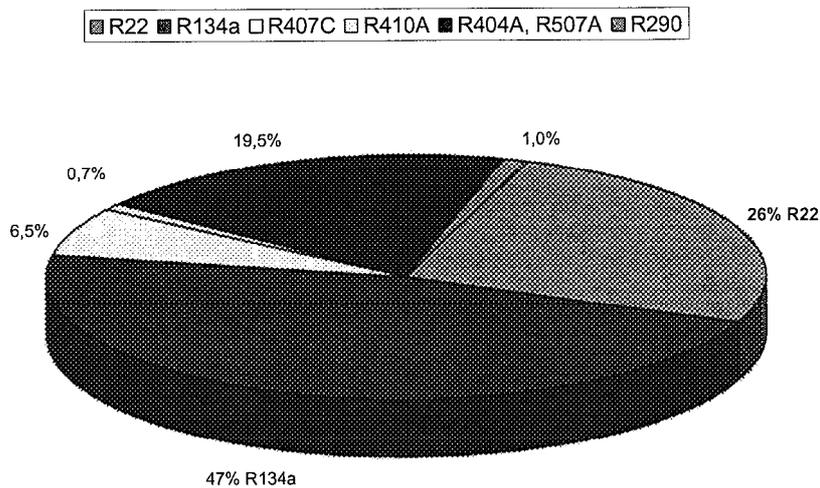


Bild 7.3: Prognose der Marktanteile der halogenierten Kältemittel (und Propan) in der Europäischen Union für das Jahr 2000

Da Deutschland in Einklang mit Europa den verhältnismäßig frühen Ausstieg auch aus der Verwendung des R22 verfolgt, ist von einer Zunahme des R22-Verbrauches nicht auszugehen, so daß man hier annehmen darf, daß der Anteil des Jahres 1995 eine recht gute Abschätzung auch des derzeitigen Marktanteils dieses Kältemittels ist, während sich der Marktanteil der früher geregelten FCKW verringert hat.

Wird also der Kältemittelbestand in 1995 in Deutschland anhand des jährlichen Verbrauches von etwa 5.000 t, der sich jeweils zur Hälfte aus Neuinstallationen und Nachfüllungen zusammensetzte, und einer mittleren Leckrate in den Anwendungsbereichen des R22 von 13% zu etwa 20.000 t abgeschätzt, kann davon ausgegangen werden, daß dieser Bestand auch heute noch gegeben ist. Da seit Beginn des Jahres 2000 in Deutschland keine Neubefüllung von R22 mehr stattfindet, dürfte der Verbrauch dieses Jahres auf ca. 2.500 t R22 sinken.

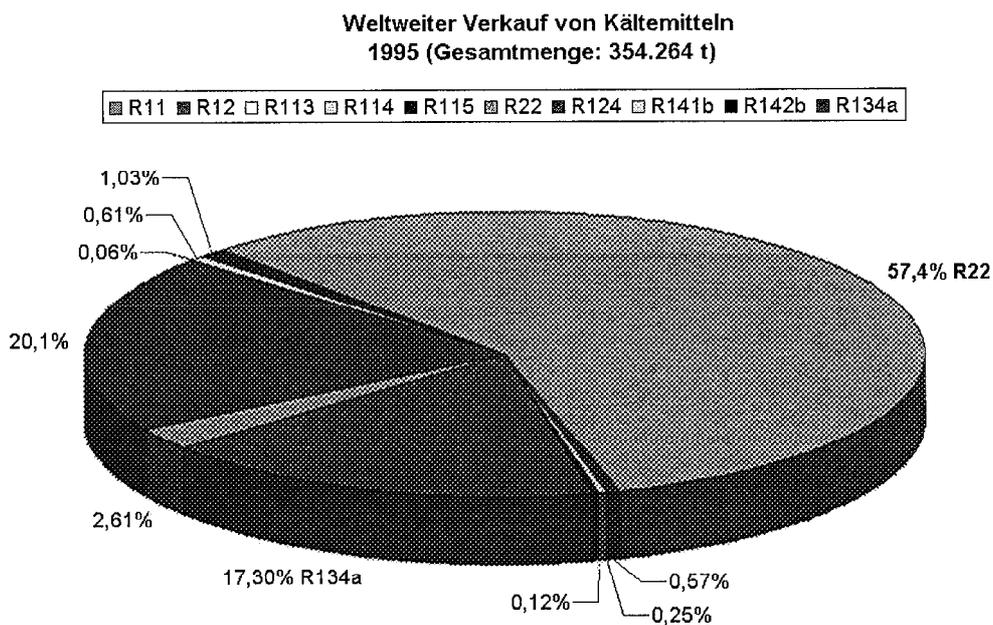


Bild 7.4: Weltweiter Jahresbedarf an halogenierten Kältemitteln im Jahr 1995 [1]

Der Ersatz des R22 durch Ersatzkältemittel würde pro Tonne Kältemittel entsprechend dem ODP-Wert von R22 den Gebrauch von ozonerstörenden Stoffen um 0,04 ODP-

Tonnen¹ (40 „ODP-kg“) reduzieren. Für die genannte mittlere Leckrate von 13% im R22-Anlagenbestand ergibt sich eine jährliche Emission von 100 ODP-Tonnen durch bestehende R22-Anlagen, die durch den vollständigen R22-Ersatz vermieden werden könnten. Nach den derzeitigen europäischen Regelungen wären dies bei Beibehaltung des heutigen Standes der Dichtheit von Kälteanlagen und des Anlagenbestandes mit der entsprechenden Füllmenge noch ca. 1.400 ODP-Tonnen, die bis zum endgültigen Verzicht auf R22 in die Atmosphäre abgelassen würden.

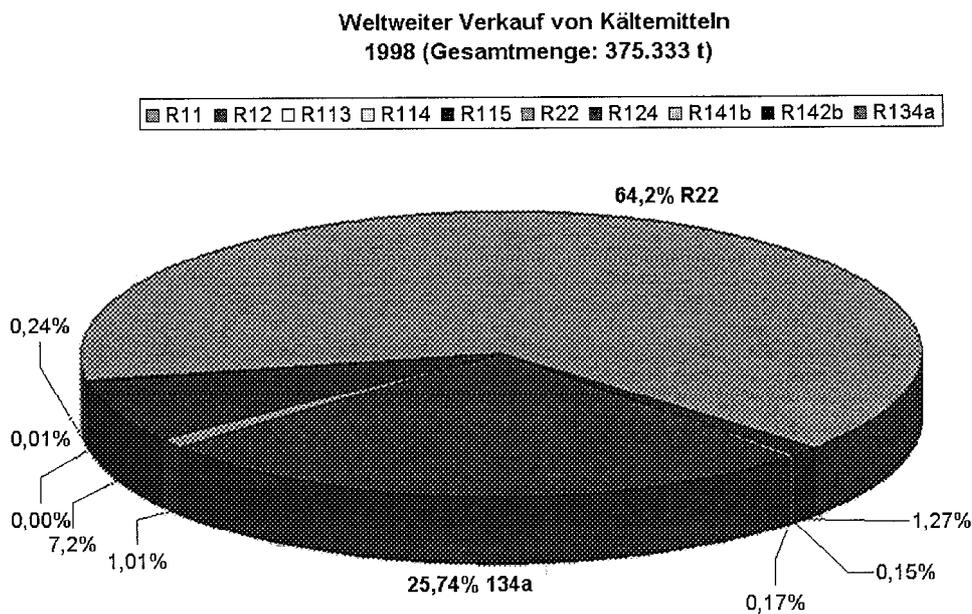


Bild 7.5: Weltweiter Jahresbedarf an halogenierten Kältemitteln im Jahr 1998 [1]

Als Ergebnis der durchgeführten Recherche und Umfrage (Abschnitt 5.2) ist erkennbar, daß bislang nur ein unwesentlicher Teil der R22-Anlagen in Deutschland auf andere Kältemittel umgestellt worden ist. R22-Anlagen wurden im wesentlichen nur dann umgerüstet, wenn ohnehin größere Veränderungen an der Anlage notwendig waren.

¹ ODP-gewichtete Kältemittelmenge [51]

7.1.2 Treibhauspotential

Während die diskutierten R22-Ersatzkältemittel forderungsgemäß kein Ozonabbaupotential besitzen ($ODP = 0$), tragen sie im unterschiedlichen Maße zum anthropogenen Treibhauseffekt der Erdatmosphäre bei. Im Protokoll des Weltklimagipfels 1997 in Kyoto sind erstmals völkerrechtlich verbindliche Reduktionsziele für die sogenannten Treibhausgase festgeschrieben worden. Neben den "alten" Treibhausgasen Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) wurden auch drei "neue" Treibhausgase berücksichtigt, nämlich teil- und vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (H-FKW, FKW) und Schwefelhexafluorid (SF_6). Aus diesem Grund sind in Zukunft auch Emissionen der neuen H-FKW-Kältemittel in die Atmosphäre möglichst zu vermeiden.

Neben dem ODP wird jedem Stoff der Wert des Treibhauspotentials (Global Warming Potential, GWP) zugeordnet [30] (Abschnitt 3, Tabelle 3.2). Als Referenz dient das Treibhausgas Kohlendioxid (CO_2) mit dem GWP-Wert 1. Aufgrund der unterschiedlichen Lebensdauer verschiedener Stoffe in der Atmosphäre sind die GWP-Werte abhängig vom Betrachtungszeitraum. Für die vergleichende Bewertung von Kältemitteln hat sich die Verwendung der Werte für einen Zeitraum von 100 Jahren etabliert. In der Tabelle 3.2 sind die GWP-Werte der betrachteten Kältemittel für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren aufgenommen. Während die Kältemittel Ammoniak kein oder die Kohlenwasserstoffe Propan, Propen und Ethan, also auch CARE 50, ein relativ geringes Treibhauspotential besitzen, weist von den H-FKW-Kältemitteln nur R134a ein deutlich geringeres Treibhauspotential als R22 auf. R407C besitzt ein etwas geringeres Treibhauspotential. Die übrigen hier betrachteten Ersatzstoffe, von denen R507A den höchsten Wert besitzt, zeigen durchweg höhere GWP-Werte als R22, so daß die direkte Treibhausbelastung bei gleicher Emission um 18 bis 120 % gegenüber R22 steigt.

7.1.3 TEWI-Bewertung

Der durch die Verwendung eines Kältemittels mögliche *direkte* Treibhauseffekt wird von dem GWP-Wert des eingesetzten Kältemittels und der Dichtheit der Anlage bzw. durch die emittierte Kältemittelmenge bestimmt. Der *indirekte* Beitrag zum Treibhauseffekt entsteht bei der Erzeugung der zum Antrieb der Kälteanlage benötigten Energie und der dabei frei-

gesetzten Menge an CO₂. Der indirekte Beitrag ist neben dem Energieverbrauch der Anlage von weiteren Einflüssen wie z.B. dem Anteil fossiler Energieträger oder der Effizienz bei der Energieerzeugung abhängig. Die Summe der CO₂-äquivalenten Menge des von einer Kälteanlage jährlich emittierten Kältemittels und der durch den jährlichen Energieverbrauch der Kälteanlage freigesetzten Menge Kohlendioxid und anderer Treibhausgase stellt den jährlichen Gesamttreibhauseffekt der Kälteanlage dar, der mit Hilfe des TEWI-Wertes (Total Equivalent Warming Impact) ausgedrückt werden kann.

Die jährliche Leckrate als Anteil der Kältemittelfüllmenge der Kälteanlage kann für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche nur abgeschätzt werden. Danach betragen die Leckraten für die Einsatzbereiche von R22 in der Gewerbekälte 10-15 % [53], [38], [18], der Industriekälte 5-10 % [38], [18] und von Wärmepumpen 1-4 % [23]. Für Gebäudeklimaanlagen kann die jährliche Leckrate mit 10 % [18] und für kompakte Klimageräte als Haushaltsgeräte mit deutlich unter 1 % abgeschätzt werden [38]. In der Transportkälte wird die jährliche Leckagemenge mit bis zu 25 % bis 30 % angegeben [53], [18].

Grundsätzlich ist der TEWI-Wert nur für einen Vergleich von konkreten Kälteanlagen bei Kenntnis ihrer für die jeweilige Anwendung benötigten Antriebsenergie, d.h. der energetischen Effizienz der Anlage, sowie des Wartungszustands und damit der aus der Anlage entweichenden Kältemittel-Emissionen geeignet. Neben der energetischen Effizienz des verwendeten Kältemittels hat der Wartungszustand ebenfalls Einfluß auf den Energieverbrauch. Umfangreiche TEWI-Vergleiche für Kälteanlagen verschiedener Konfiguration in unterschiedlichen Anwendungsbereichen unter Verwendung der verschiedenen Kältemittel wurden im Rahmen des 'Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study' (AFEAS)-Programms des amerikanischen Department of Energy (DOE) in Zusammenarbeit mit internationalen Kältemittel-Produzenten durchgeführt [16], [17].

Wie aus den vorigen Abschnitten der vorliegenden Studie hervorgeht, ist die Abschätzung der Änderung des Energieverbrauches einer auf ein Ersatzkältemittel umgestellten R22-Kälteanlage verhältnismäßig schwierig, da vielfältige Einflußfaktoren, insbesondere die Anlagenkonfiguration und die Anwendungsbedingungen eine wesentliche Auswirkung auf das energetische Verhalten der Kälteanlage (und des Kältemittels) haben. So enthalten zum Beispiel Erfahrungsberichte zu Umstellungen auf ein Ersatzkältemittel im gleichen Anwendungsbereich in Abhängigkeit von der Anlagenkonfiguration sowohl die Feststellung

eines höheren als auch eines niedrigeren Energieverbrauchs der jeweiligen Anlage. Andererseits unterscheiden sich auch die einzelnen Ersatzkältemittel, so daß für verschiedene Anwendungen jeweils ein anderes den geringsten Energieverbrauch erwarten läßt. Die Umstellung einer Kälteanlage kann auch den Begleiteffekt haben, daß die Anlage durch Verbesserungen aufgrund von optimierten Betriebsbedingungen und einer regelmäßigeren Wartung im Hinblick auf den Energieverbrauch günstiger wird [5]. Zudem besteht die Möglichkeit, daß bei der Umstellung Anlagen-Leckagen behoben werden.

Für eine Abschätzung des Beitrages der Kältemittel zum TEWI-Wert einer Kälteanlage ist es im Rahmen der hier durchgeführten Studie sinnvoll, die in Abschnitt 2.6 in Tabelle 2.2 wiedergegebenen theoretischen Leistungswerte der Kältemittel zur TEWI-Berechnung heranzuziehen. Aus den vorliegenden Erfahrungsberichten ist erkennbar, daß diese eine gute Abschätzung auch des Verhaltens der R22-Kälteanlagen nach einer Umstellung wiedergeben. Betont sei jedoch noch einmal, daß sich diese Abschätzung nicht soweit verallgemeinern läßt, daß sie auf beliebige Kälteanlagen übertragbar ist. Diese kann lediglich eine Einordnung der Kältemittel auf der Grundlage der Stoffdaten gestatten.

Der jährliche Gesamttreibhauseffekt einer Kälteanlage (TEWI) wurde somit im folgenden für die in Tabelle 2.2 betrachteten Anwendungsbedingungen der größten R22-Verbraucher in Deutschland, der Gewerbe-, Normal- und Tiefkühlung sowie der Klimaanlage, weltweit wichtigster Einsatzbereich des R22, unter Verwendung der verschiedenen Kältemittel berechnet. Die berechneten Leistungswerte der Anwendung in der Gewerbekälte lassen sich aufgrund der Randbedingungen jedoch auch auf die Industrie- und Transportkälte übertragen. Gleiches gilt für die Klimaanlage und Wärmepumpen.

Der jährliche TEWI berechnet sich gemäß

$$\text{TEWI} = \text{GWP} \cdot \mu_L \cdot m_o + n_a \cdot f \cdot \varepsilon_K \cdot Q_o$$

mit:

- GWP: Treibhauspotential des Kältemittels in kg CO₂ / 100a,
- μ_L : mittlere jährliche Leckrate der Kälteanlage in % der Füllmenge,
- m_o : Kältemittelfüllmenge in kg,
- n_a : jährliche Betriebsstunden,
- $f = 0,688$: Emission von CO₂ und anderen Treibhausgasen¹ bei der Energieerzeugung in kg CO₂/kWh [41],
- ε_K : Kälteleistungszahl und
- Q_o : Kälteleistung in kW.

Die Berechnung läßt die üblicherweise auf die Lebensdauer der Kälteanlage verteilten Kältemittel-Emissionen bei der Entsorgung der Kälteanlage außer Betracht, da die noch zu erwartende Lebensdauer der Anlage nicht bestimmt werden kann. Die hier zugrunde gelegten Werte für mittlere Leckrate, Kältemittelfüllmenge, jährliche Betriebsstunden sowie Kälteleistung für die betrachteten Anwendungen sind in folgender Tabelle wiedergegeben.

Tabelle 7.1: Randbedingungen der TEWI-Berechnung

	Anwendung					
	Supermarkt NK ¹⁾	Supermarkt TK ¹⁾	Klima Gebäude	Industrie Solesatz	Transport TK	Wärmepumpe Luft/Wasser
$\varepsilon_{\text{KR22}}$ ²⁾	4,46	2,06	3,31	2,06	2,06	4,31
μ_L	0,15	0,15	0,10	0,10	0,25	0,05
m_o [kg]	200,0	85,0	10,0	65,0	10,0	2,0
n_a [h]	2.500	2.500	1.500	8.000	2.500	2.000
Q_o, Q_H [kW]	80,0	20,0	20,0	120,0	10,0	50,0

1) Direktverdampfung

2) bzw. $\varepsilon_{\text{HR22}}$, Basis gemäß Tabelle 2

¹ umgerechnet auf CO₂-äquivalente Menge

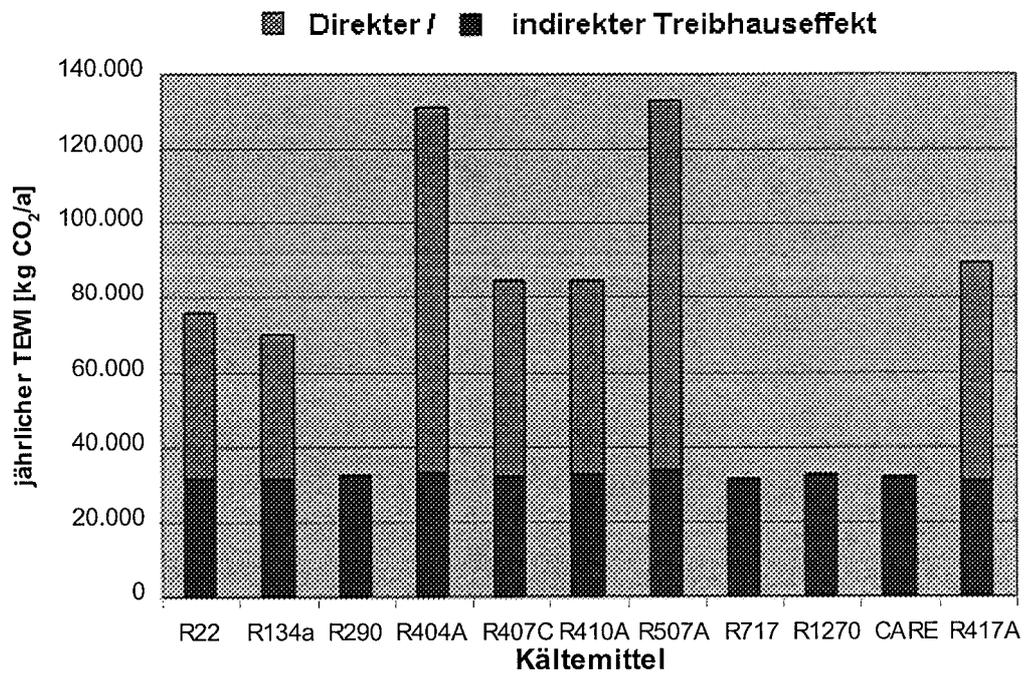


Bild 7.6: Jährlicher TEWI der Modell-Supermarktkälteanlage (Normalkühlung)

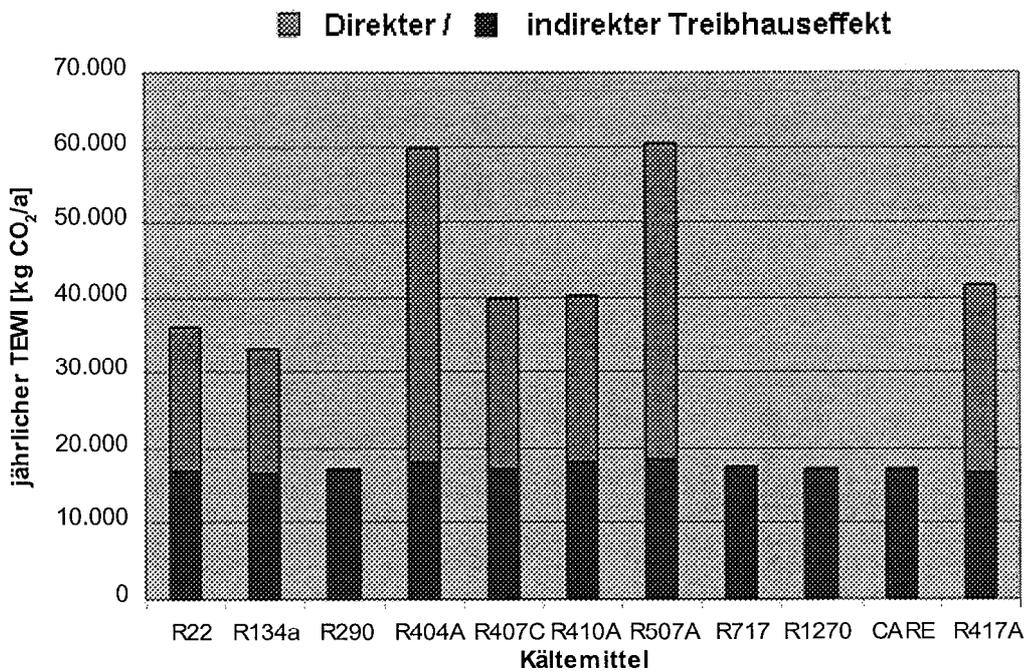


Bild 7.7: Jährlicher TEWI der Modell-Supermarktkälteanlage (Tiefkühlung)

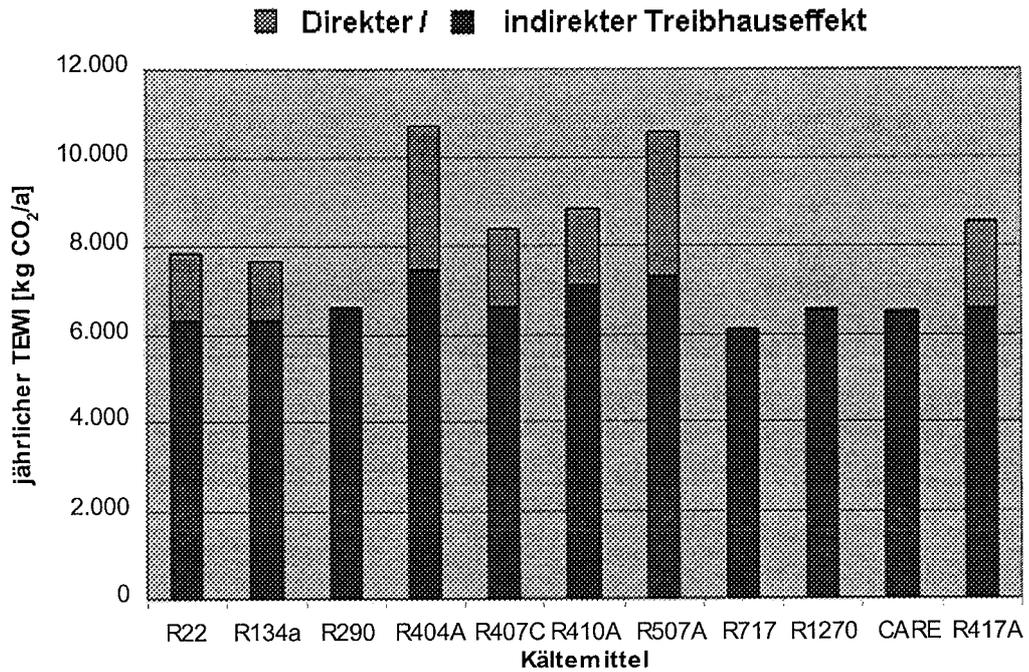


Bild 7.8: Jährlicher TEWI der Modell-Gebäudeklimaanlage

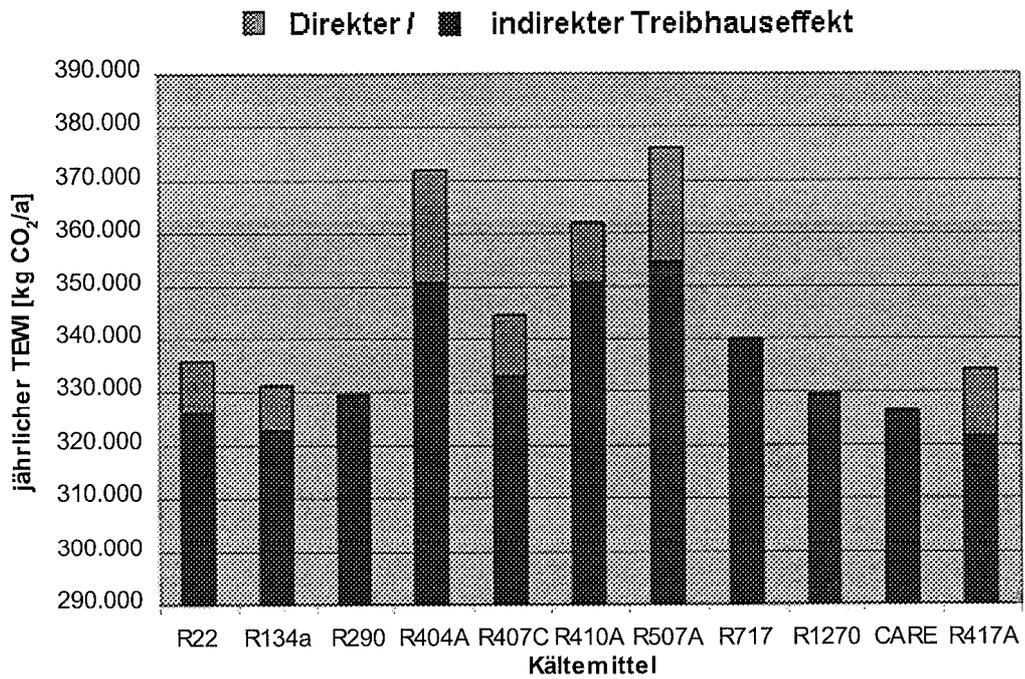


Bild 7.9: Jährlicher TEWI des Modell-Solesatzes

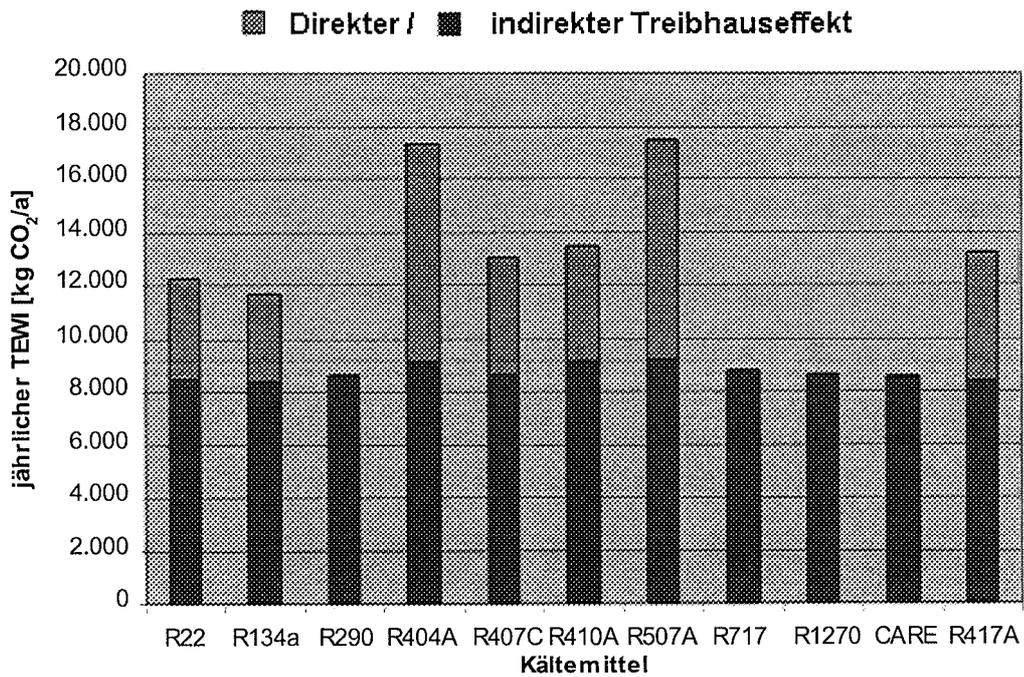


Bild 7.10: Jährlicher TEWI der Modell-Transportkälteanlage (Tiefkühlung)

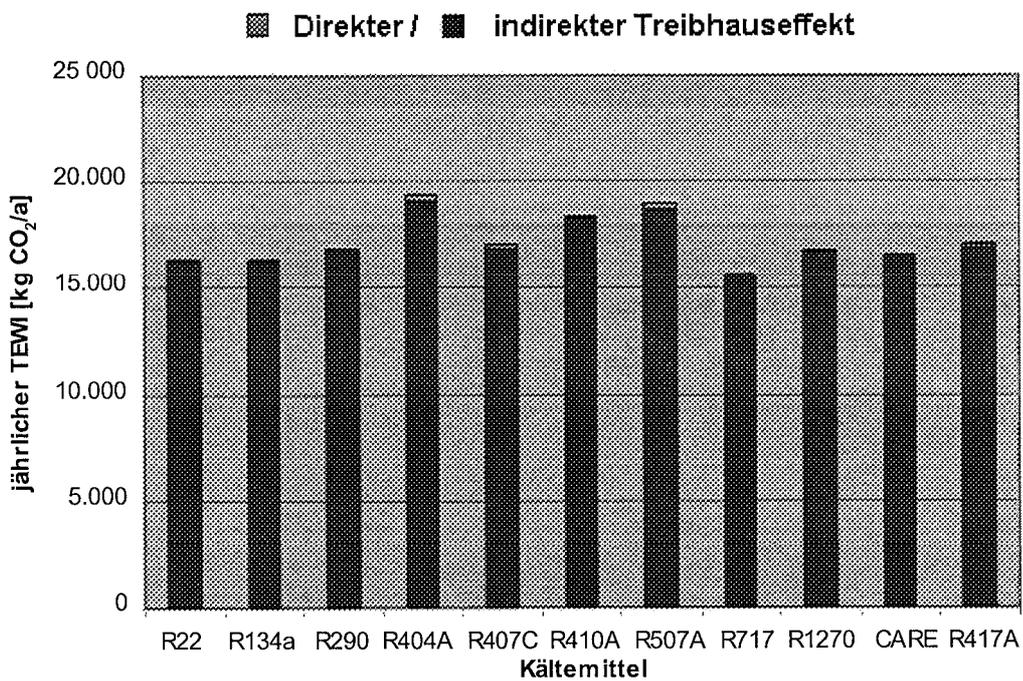


Bild 7.11: Jährlicher TEWI der Modell-Luft/Wasser-Wärmepumpe

Generell relativieren sich die Unterschiede des energetischen Verhaltens der Kälteanlage (des Kältemittels) mit zunehmender Emissionsmenge, also steigender Füllmenge und jährlicher Leckrate und abnehmender jährlicher Betriebszeit. Dann wird der TEWI im wesent-

lichen durch den direkten Treibhauseffekt, d.h. durch das Treibhauspotential des verwendeten Kältemittel bestimmt. Dies gilt bei den hier betrachteten Beispielen für die Supermarktkälteanlage mit verhältnismäßig großer Füllmenge (200 bzw. 65 kg) und einer Leckrate von 15% (Bild 7.6, Bild 7.7). Bei geringerer Füllmenge und Leckage werden die energetischen Unterschiede deutlicher, wie hier am Beispiel der Gebäudeklimaanlage (10 kg Füllung, 10% Leckage) trotz geringerer jährlicher Betriebszeit zu sehen ist (Bild 7.8). Das Beispiel des Solesatzes in Bild 7.9 schließlich zeigt, daß bei längerer jährlicher Betriebszeit (8.000 h) der energetische Effekt des Kältemittels (der Kälteanlage), auch bei relativ hohen Emissionen (6,5 kg/a) wieder an Bedeutung gewinnt.

Gemäß den Berechnungen könnte bei aktuell realistischen Leckraten der Kälteanlagen aufgrund der GWP-Werte der Kältemittel lediglich der Einsatz von R134a, der Kohlenwasserstoffe oder Ammoniak die den Treibhauseffekt betreffenden Emissionen senken¹. Alle H-FKW-Ersatzkältemittel außer R134a führen zu einer Erhöhung des Treibhauseffektes der Kälteanlagen. Bei geringen Leckraten (Bild 7.11 bzw. indirekter Anteil in allen Bildern) werden die CO₂-Emissionen, insbesondere bei langer jährlicher Laufzeit der Anlage, durch den Energieverbrauch der Anlage bestimmt und steigen, bei gleichem Wartungszustand und Anlagenverhalten des Kältemittels, beim Einsatz eines Ersatzkältemittels in der Regel an. Die Ausnahme in den den vorliegenden Berechnungen ist neben Ammoniak R417A, mit denen der indirekte Treibhauseffekt unwesentlich gegenüber R22 sinkt.

Der hier durchgeführte theoretische Vergleich wurde an anderer Stelle mit vergleichbarem Ergebnis auch auf der Grundlage von experimentellen Untersuchungen durchgeführt, z.B. von Verdichterleistungsmessungen in [4].

7.2 Entsorgungsaufwand

Bei der Umstellung von R22-Kälteanlagen fallen unterschiedliche Abfälle und Reststoffe an, die beseitigt werden müssen und zum Teil wieder aufgearbeitet werden können. Generell ist die Menge und die Zusammensetzung des Abfalls sowohl vom gewählten Umstellungsverfahren als auch von der Art der Anlage abhängig. In der Regel wird bei der Umstellung auf ein H-FKW-Ersatzkältemittel das Retrofit-Verfahren nach dem „Verfahren

¹ unwesentlich geringerer TEWI-Wert des R417A-Solesatzes in Bild 7.9

Esteröl“, „Verfahren Kältemittel“ oder auch dem „Verfahren Lösemittel“ zur Anwendung kommen, mit denen die Kälteanlagen möglichst weitgehend von den Rückständen des R22-Betriebes befreit werden [51], [52], [53]. In wenigen Fällen ist in Abhängigkeit von Ersatzkältemittel und Kälteanlage eine Drop-In-Umstellung möglich, bei der neben dem technischen Aufwand auch der Entsorgungsaufwand für Verbrauchsstoffe und Materialien geringer ist. Umstellungsmaßnahmen, die einen wesentlich höheren Aufwand im Hinblick auf die Sicherheit und/oder Materialverträglichkeit der Anlage erfordern, bei denen ein zusätzlicher Entsorgungsaufwand entstehen würde, der dann nicht mehr von Bedeutung ist, werden selten bleiben. Folgende Abfälle können im Rahmen von Umstellungsmaßnahmen anfallen [52], [53]:

- Kältemittel,
- Kältemaschinenöle,
- Löse- bzw. Spülmittel,
- Anlagenkomponenten wie Filter, Expansionsventile, Verdichter und Wärmeübertrager,
- Rohrmaterialien,
- Isolationsmaterialien,
- diverse Abfälle wie Verpackungsmaterial, Dichtungen, Schläuche, Gummi, etc.

Im Rahmen der früheren Forschungsberichte zum Ersatz der FCKW-Kältemittel wurde die erforderliche Infrastruktur zur Durchführung der Umstellung von Kälteanlagen auf Ersatzkältemittel bereits ausführlich beschrieben [52], [53]. Neben den Anforderungen an Personal, die erforderliche Ausrüstung und Materialien wurde auch der Aspekt der Entsorgung und Aufbereitung der genannten, gegebenenfalls anfallenden Reststoffe ausführlich erläutert. In Hinsicht auf diese Randbedingungen besteht kein grundsätzlicher Unterschied bei der Umstellung von R22-Kälteanlagen, so daß hier zunächst ebenso festgestellt werden kann, daß die zur Umstellung der Kälteanlagen erforderliche Infrastruktur in Deutschland gegeben ist.

Ebenso ist selbstverständlich die mit weniger Reststoffen und Entsorgungsaufwand durchzuführende Drop-In-Umstellung auf ein Kohlenwasserstoff-Kältemittel (R290, R1270,

CARE 50) oder R417A dem Retrofit mit einem H-FKW-Kältemittel in dieser Hinsicht vorzuziehen.

7.3 Ökonomische Bewertung

Die Kosten für eine Umstellung einer R22-Kälteanlage können sich, wie auch schon die in der Umfrage (Abschnitt 5.2.2, Tabelle 5.1) zum Teil genannten Zahlen zu erkennen geben, in Abhängigkeit von Bedingungen wie Anlagengröße, Alter und Wartungszustand der Anlage in einem weiten Bereich bewegen. Während mit der Anlagengröße zwar der Umfang der zur Umstellung notwendigen Arbeitsstoffe, Materialien und Austauschkomponenten sowie der Zeitaufwand steigen, kann man davon ausgehen, daß mit der Anlagengröße auch die Investition höher ist, so daß relativ zum Neupreis von vergleichbaren Kostensätzen ausgegangen werden kann. Bei höherem Alter und schlechterem Wartungszustand einer Anlage ist grundsätzlich mit höheren relativen Umstellungskosten zu rechnen, da es aufwendiger sein wird, die zur Umstellung auf das neue Kältemittel erforderliche Reinheit zu erreichen. Für Kälteanlagen, die zwar als R22-Anlagen geliefert werden, aber vor der Installation mit einem Ersatzkältemittel befüllt werden, können verhältnismäßig geringe Mehrkosten durch die „Umstellung“ abgeschätzt werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Einsatz des anderen Kältemittels mit den Komponentenherstellern abgestimmt wird. Diese Anlagen können nicht als umgestellte R22-Anlagen, sondern müssen als Neuanlagen gewertet werden. Für Anlagen, die sich bereits mit R22 in Betrieb befinden, muß nach dem vorgesehenen Ersatzkältemittel und dem zu wählenden Umstellungsverfahren differenziert werden.

Eine Umstellung einer üblichen R22-Anlage auf Ammoniak wird aufgrund der Materialverträglichkeit und den Sicherheitsanforderungen des Kältemittels in der Regel erhebliche Kosten verursachen, die in der Höhe einer Neuinstallation liegen dürften. Das wäre wirtschaftlich nicht vertretbar. In Ausnahmen kann eine R22-Anlage bereits in den wesentlichen Punkten in Hinblick auf eine spätere Umstellung auf NH_3 konzipiert sein, was aber schon dem Neupreis einer solchen Anlage zuzurechnen ist.

Solange die Kohlenwasserstoffe aufgrund der gegebenen Randbedingungen wie der Anlagengröße in Abhängigkeit vom Aufstellungsort sowie der bereits vorhandenen Sicherheitseinrichtungen als Drop-In-Ersatz für R22 eingesetzt werden können, ist dies eine kosten-

günstige Umstellung, da lediglich ein Ölwechsel und der Austausch von Kleinkomponenten wie Dichtungen, Filtertrockner und gegebenenfalls Expansionsorganen vorzunehmen ist. Sind die genannten Bedingungen nicht erfüllt, wird es je nach Größe und Füllmenge der Anlage zu erheblichen Nachrüstungen kommen müssen, die nicht pauschal wirtschaftlich bewertet werden können.

Die übrigen Ersatzkältemittel erfordern in Hinblick auf die wesentlichen Werkstoffe oder Sicherheitsvorkehrungen keine andere Anlagenkonzeption als R22. Für alle kann je nach Sachlage der Austausch von Dichtungen oder von Expansionsventilen und ein Filtertrocknerwechsel erforderlich sein. Einzig das als Drop-In-Ersatz vorgesehene Kältemittel R417A kann nach der Überprüfung von Anlagenausführung und der Kompatibilität mit den verwendeten Dichtungsmaterialien den kostengünstigsten, direkten Austausch des Kältemittels erlauben. Dies muß als besonderer Vorteil auch bei der Umstellung von hermetischen Verdichtern gesehen werden, bei denen oftmals ein Ölwechsel nicht oder nur so aufwendig möglich ist, daß dieser gegen einen mit entsprechendem Öl befüllten Verdichter ausgetauscht wird.

Die übrigen H-FKW-Kältemittel erfordern alle eine verhältnismäßig aufwendige Reinigung der Anlage, bei der im allgemeinen mehrere Öl- und Filtertrocknerwechsel anfallen. Der Einsatz des einzigen Einstoff-H-FKW R134a bedingt im Gegensatz zu den Gemischen den Austausch des Verdichters. Diese zusätzlich entstehenden Kosten sind grob mit 25% des Neupreises abzuschätzen.

Anhaltswerte für die bei einer Retrofit-Umstellung der R22-Anlage auf eins der H-FKW-Kältemittelgemische ergeben sich aus den Ausführungen zum Ersatz der Kältemittel R12 und R502 durch H-FKW-Gemische, da das Vorgehen hier grundsätzlich das gleiche ist [52], [53]. Wird die Umstellung unter Berücksichtigung aller anderen Gesichtspunkte durchgeführt, ergeben sich die Kosten der Umstellung: aus dem neuen Kältemittel, aus dem neuen Öl, wobei bis zu 3 Ölwechsel erforderlich sein können, und gegebenenfalls aus weiteren Komponenten und Kleinteilen.

In den im Rahmen der hier durchgeführten Recherche gesichteten Veröffentlichungen fand sich eine Kostenangabe für die Umstellung einer luftgekühlten R22-Schiffskälteanlage zur Luftkühlung bei $-18^{\circ}\text{C}/-20^{\circ}\text{C}$ mit 7,5 kW nomineller Antriebsleistung auf R404A [6]. Die Kosten der Umstellung, zu denen neben den Monteurstunden und dem Kältemittel 16 l

Polyolesteröl (3 Ölwechsel), ein Schauglas, 3 Filtertrockner, der Austausch des Expansionsventils sowie Kleinmaterial wie O-Ringe und flexible Kältemittelleitungen beitragen, werden mit DM 7.400,- angegeben. Die Dauer der Umstellungsprozedur belief sich auf etwa 14 h. Der Neupreis der Kälteanlage wurde nicht genannt, läßt sich aber mit DM 22.000,- bis DM 23.000,- recht genau kalkulieren, so daß die Umstellung Kosten in Höhe eines Drittels der Anlagenerstellung verursachte.

Die hier im Rahmen der Umfrage ermittelten Kosten (Tabelle 5.1) lassen eine Abschätzung von 10 bis zu 50% des Neupreises der Anlage zu. Wobei in der Abschätzung von 50% der Einbau eines neuen Verdichters enthalten ist. Der nötige Zeitaufwand wird ganz wesentlich von den örtlichen Gegebenheiten abhängen. Konkrete Angaben aus dem Rücklauf der Umfrage bewegen sich bei allgemeiner Anmerkung eines „größeren Zeitaufwandes“ zwischen 4 h und 12 h.

Die Erfahrungen des Ersatzes von R12 haben jedoch gezeigt, daß sich in Bereichen, in denen eine Automatisierung der Umstellung mittels entsprechenden Spüleinrichtungen sowie der entstehenden Routine möglich ist, etwa bei Standard-Kälteanlagen oder vergleichbaren Typen mit entsprechend großer Stückzahl, der Kostensatz pro Kälteanlage deutlich unter den in [52], [53] genannten senken läßt.

8 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

In dieser Studie wurde der aktuelle technische Sachstand bei der Umstellung mit dem H-FCKW-Kältemittel R22 betriebenen Kälteanlagen ermittelt. Dabei wurde die im Auftrag des Umweltbundesamtes zum gleichen Thema erstellte Studie des Jahres 1998 zugrunde gelegt, die schon die technischen Grundlagen der Anwendung von Kältemitteln und die Einsatzbereiche des R22 in der deutschen Kältetechnik aufgezeigt hat. Im weiteren wurden die zum damaligen Zeitpunkt vorliegenden Erkenntnisse zu möglichen Ersatzkältemitteln für R22 und zu deren Einsatz in bestehenden Anlagen ermittelt und bewertet. Gleichzeitig wurde der Erfahrungsstand bei der Umrüstung von R22-Anlagen recherchiert.

Damit ergänzen sich die beiden Studien zu einer umfassenden Betrachtung des Kältemittels R22 und seinem Ersatz im Anlagenbestand in den betroffenen Anwendungsbereichen in der Gewerbekälte, der Industriekälte, stationären Klimaanlageanlagen sowie in Transportkälteanlagen und Wärmepumpen, die in dieser Reihenfolge zum Verbrauch von R22 in Deutschland beitragen.

Die für einen Ersatz des R22 prinzipiell geeigneten Kältemittel werden auf ihre Einsetzbarkeit für Umstellungen von R22-Altanlagen untersucht. Dazu werden ihre Charakteristika in Bezug auf die Anforderungen an die Stoffeigenschaften wie Lage der Dampfdruckkurve, Stabilität, Materialverträglichkeit, Sicherheit, energetisches Verhalten im Vergleich zu R22 sowie die ökologischen Eigenschaften dargestellt und bewertet sowie toxikologische und ökotoxikologische Daten zusammengestellt.

Die Aktualisierung des Standes der Forschung und Entwicklung führt zunächst zu dem Ergebnis, daß sich mittlerweile die H-FKW-Kältemittel R134a, R404A, R407C, R410A, R417C und R507A in den klassischen R22-Anwendungsbereichen durchgesetzt haben. Im weiteren werden die Kohlenwasserstoffe Propan (R290), Propen (R1270) und CARE 50 (R290/R170 (Ethan)) sowie Ammoniak als geeignet angesehen, R22 in Teilbereichen zu ersetzen. Die wesentlichen Eigenschaften dieser Kältemittel wurden insbesondere in Hinblick auf den Einsatz im Anlagenbestand dargestellt und mögliche Folgen für diese Verwendung diskutiert. Hier wird zunächst deutlich, daß R410A und Ammoniak nur in Neuanlagen zur Anwendung kommen können. Die übrigen Kältemittel sind unter Beachtung ihrer spezifischen Eigenschaften und der jeweiligen Gegebenheiten der Altanlage, wie der

Ausführung der Anlage und des Einsatzbereiches, zum Drop-In-Einsatz (R417A, Kohlenwasserstoffe) oder zum vergleichsweise aufwendigeren Retrofit in R22-Anlagen geeignet.

In der Gewerbekälte sind aufgrund ihrer thermodynamischen Eigenschaften vor allem R404A und R507A geeignet, unter Beachtung des Rückgangs der Kälteleistung bei tiefen Temperaturen möglicherweise auch R407C oder R417A.

Das gleiche gilt in R22-Anwendungsbereichen der Industriekälte, wie für Kühlhäuser oder die Lebensmittelindustrie, wobei R407C und R417A, wiederum unter Beachtung der geringeren Kälteleistung, im allgemeinen wegen der fraktionierenden Verdampfung der zeotropen Gemische nur in Systemen mit Direktexpansion zum Einsatz kommen werden. In der Industriekälte sind einige R22-Systeme auf den späteren Einsatz von Ammoniak vorbereitet. In der Prozeßkühlung, z.B. der chemischen Industrie werden oftmals überflutete Verdampfer eingesetzt, so daß aus diesem Grund hier die nahezu-azeotropen bzw. azeotropen R404A und R507A die Wahl sein werden.

Für luftgekühlte Klimaanlage und Wärmepumpen wird R407C, das sich in diesem Bereich bereits international in Neuanlagen durchgesetzt hat, in Hinblick auf seine Eigenschaften das günstigste Ersatzkältemittel für R22 sein. Eine Alternative kann R417A sein. In regelmäßig mit überfluteten Verdampfern ausgestatteten Kaltwassersätzen wird wiederum die Zeotropie von R407C und R417A wesentlicher Nachteil sein. Insbesondere zur Umstellung von Turbo-Kaltwassersätzen ist R134a ein geeigneter Ersatzstoff, wobei jedoch ein Anpassung von Bauteilen des Turboverdichters erfolgen muß.

Der Einsatz von R22 als Drop-In-Ersatzstoff für R12 und R502 hat für Kälteanlagen der Transportkälte im besonderen Umfang stattgefunden. Für bereits durchgeführte Umstellungen von R22 auf ein Ersatzkältemittel konnten in der Transportkälte keine Hinweise gefunden werden. Die Anlagen der Frisch-, Normal- und Tiefkühlung lassen als Systeme mit Direktverdampfung jedoch keine wesentlichen Probleme bei der R22-Umrüstung erwarten, so daß hier Erfahrungen aus entsprechenden anderen Bereichen übertragbar sind.

Schließlich werden die Kohlenwasserstoffe aufgrund ihrer Sicherheitsanforderungen trotz ihrer sonst guten Eigenschaften als R22-Drop-In nur in Kälteanlagen sehr kleiner Füllmenge eingesetzt werden können.

Auf der Basis der jetzt vorliegenden zweiten Studie kann festgestellt werden, daß Umrüstungen von Kälteanlagen mit dem Kältemittel R22 grundsätzlich technisch möglich sind. Es bleibt aber bei der Feststellung, daß die Wahl des Ersatzstoffes ganz wesentlich von der gegebenen Anlagenkonfiguration und dem Anwendungsfall abhängt.

Die Daten der betrachteten R22-Ersatzstoffe wurden in Hinblick auf ihre toxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften ergänzt. Soweit diese Untersuchungen bislang verfügbar sind, stellen die Ersatzkältemittel keine höhere toxikologische Gefährdung dar, als die bisher in der Kältetechnik eingesetzten Arbeitsstoffe. Die erforderlichen Grenzwerte für ihre Anwendung liegen vor. Ökotoxikologisch sind Kältemittel vor allem in Hinblick auf die Schädigung der Ozonschicht und ihren Beitrag zum Treibhauseffekt charakterisiert. Die halogenierten Kältemittel haben als Treibhausgase im Vergleich zu den Kohlenwasserstoffen und vor allem zu Ammoniak ein sehr hohes Treibhauspotential. Aufgrund der hohen Stabilität weisen sie bei einer Freisetzung in die Atmosphäre eine lange Verweildauer auf.

Die ökologische Analyse des R22-Ersatzes muß neben der ursprünglichen Zielsetzung der Vermeidung von ozonschichtschädigenden Arbeitsstoffen und dem Entsorgungsaufwand der bei der Umstellung anfallenden Reststoffen auch die mittlerweile sehr bedeutend betrachtete Auswirkung der Kältetechnik auf den Treibhauseffekt umfassen. Die Einordnung der durch den vollständigen Verzicht auf den H-FCKW R22 in den bestehenden Kälteanlagen erzielbaren Vermeidung von ozonrelevanten Emissionen in die durch den FCKW-Ausstieg bereits vollzogene Minderung weist hier einen gegebenen, vergleichsweisen geringen Effekt aus, verglichen mit den verbleibenden ozonzerstörenden Stoffen nach dem FCKW-Ausstieg ist der Beitrag von R22 bei den restlichen H-FCKW relativ groß. Für den Vergleich der Ersatzkältemittel für R22 in Hinblick auf den TEWI-Beitrag ist zunächst die im allgemeinen etwas geringeren energetischen Effizienz und damit der höhere Energieverbrauch der Ersatzkältemittel wesentlich. Dies gilt im besonderen beim Einsatz in nicht für deren Einsatz optimal ausgelegten, sondern für R22 konzipierten, bestehenden Anlagen. Bei gleicher Leckagemenge führen mit Ausnahme von R407C und R134a zusätzlich die höheren GWP-Werte der H-FCKW-Ersatzkältemittel zu einem höheren Treibhauseffekt. Bei Verwendung von R134a wird darüber hinaus die Leckrate gegenüber R407C aufgrund des niedrigeren Druckniveaus geringer sein.

Damit ergeben sich beim R22-Ersatz durch H-FKW außer beim Einsatz von R134a und R407C in der Summe höhere Treibhauseffekte der Kälteanlagen (TEWI). Für R134a wird der TEWI kleiner als mit R22 sein, für R407C etwa von gleicher Größe. Wegen der kleineren volumetrischen Kälteleistung ist die Umstellung auf R134a im allgemeinen nur kostenintensiv durch einen Verdichterwechsel möglich. Damit bleibt R407C aus ökologischer Sicht der empfehlenswerte R22-Ersatzstoff aus der Gruppe der H-FKW für den Anwendungsbereich Klima und trockener Verdampfung. In den Anwendungsbereichen Gewerbe und Industrie ist das nahezu azeotrope Gemisch R404A trotz des höheren GWP als R22-Ersatz einsetzbar.

Der im weiteren ermittelte Stand der Forschung und Entwicklung zur Umstellung von Kälteanlagen auf Ersatzkältemittel läßt den Schluß zu, daß die Kenntnisse der stofflichen und technischen Bedingungen und der Vorgehensweise bei der Anlagenumstellung in ausreichendem Maße gegeben sind. Die aktualisierte Sichtung der Erfahrungen, die durch eine Umfrage im deutschen Kälteanlagenbauerhandwerk vertieft wurde, macht deutlich, daß mittlerweile vor allem in der Gewerbe-, Industrie- und Klimakälte ausreichende Erfahrungen zum Einsatz aller betrachteter Ersatzkältemittel in ursprünglichen R22-Anlagen vorliegen. Die Entscheidung über eine Durchführung muß unter Berücksichtigung des zu erreichenden umweltrelevanten Effektes und der wirtschaftlichen Vertretbarkeit fallen. Das mit einer Durchführung der Umstellungen beauftragte Handwerk kann die Eignung eines Ersatzkältemittels in einer gegebenen Anlage und für den betreffenden Anwendungsfall beurteilen. Diese Einzelfallentscheidung wird notwendig bleiben, da kein Ersatzstoff das R22 in allen seinen Eigenschaften und Anwendungsbereichen gänzlich ersetzen kann.

9 Abstract and conclusions

In this study the actual technical status when retrofitting refrigeration systems with the refrigerant HCFC 22 has been evaluated. Basis for this evaluation was the study concerning the same topic and performed in 1998 under order of the Umweltbundesamt which already has shown the technical fundamentals of the application of refrigerants and especially those of R22 in Germany. The results concerning possible alternatives for R22 and their application in existing refrigeration systems as well as the experience when retrofitting R22 systems have been elaborated and evaluated at that time.

In so far the two studies together form a complete consideration of the refrigerant R22 and its substitution in existing systems in the application fields of commercial refrigeration, industrial refrigeration, stationary air conditioning systems as well as in transport refrigeration and heat pumps, which all together in this order contribute to the R22 consumption in Germany.

The refrigerants principally suitable for these substitution of R22 have been investigated concerning their application for retrofitting existing R22 systems.

For this purpose their characteristic behavior concerning their material properties as for instance wiper pressure temperature relationship, stability, material compatibility, safety and energetic behavior in comparison to R22 have been shown and evaluated as well as their toxicological and ecotoxicological data.

The updated actual state of research and development shows first that meanwhile the HCF refrigerants R134A, R404A, R407C, R410A, R417C and R507A have been applied in a wide range of the classical R22 application areas. Further on, the hydro carbons propane (R290), propene R1270 and CARE 50 (R290/R170 (ethane)) as well as ammonia have been considered to substitute R22 in certain applications. The important properties of these refrigerants are shown especially in concerning the application in existing systems and possible consequences for their application have been discussed. The result is that R410A and ammonia are only applicable in new systems where as the other refrigerants can be used under the consideration of their special properties and the special existing system concerning their design and application range for drop in (R417A, hydro carbons) or for the comparable more expensive retrofit in R22 systems.

For commercial refrigeration the refrigerants R410A and R507A are preferably suitable, also possibly R407C or R417A take into account their decrease of the refrigeration capacity at low temperatures.

The same holds for R22 application in industrial refrigeration as for example refrigerated cold stores or the food industry where by R407C and R417A again under the consideration of the decrease refrigeration capacity can be used only in systems with direct expansion because of the fractional evaporation of the zeotropic mixtures. In industrial refrigeration some R22 systems have already been prepared for a later application of ammonia. In process cooling as for example in the chemical industry very often flooded evaporators are implied so that here the near-azeotropic or azeotropic refrigerant mixtures R404A and R507A will be preferred.

For air-cooled air-conditioning systems and heat pumps R407C which already internationally has been gained in new systems abroad application will be the preferred substitute for R22 because of its properties. Another alternative could be R417A. For waterchillers, normally using flooded evaporators the azeotropic behavior of R407C and R417A again show an important disadvantage. Especially for retrofitting centrifugal waterchillers R134A is a suitable alternative whereby components of the turbocompressor have to be modified.

Substitution of R12 and R502 by using R22 as drop in has been performed in a broad range for transport refrigeration system whereby no retrofits of R22 have been reported. For systems of fresh-, normal- and low temperature food with direct evaporation no important problems when substituting R22 can be expected. Therefore the experiences of comparative other application fields can be applied.

Further on, the hydrocarbons which show good properties as R22 drop in can be applied because of the safety requirements only in refrigeration systems with very low charge.

Based on the newly performed second study it can be stated, that retrofitting existing R22 systems is principally technical possible but the choice of the substitute depends very much from the design of the system and its application range.

The data of the considered R22 substitutes have been completed concerning that toxicological and ecotoxicological properties. As far as these data are available so far, the substitutes do not show a higher toxicological danger as the formally used refrigerants in the

refrigeration applications. The limits for their application are available. Concerning their ecotoxicological behavior the refrigerants are characterized especially concerning their depletion of the ozone layer and their contribution to the green house warming effect. The halogenated refrigerants as green house gases show a very high global warming potential in comparison to the hydrocarbons and especially to ammonia because of their high stability and long life time in the atmosphere.

The ecological analysis of the R22 substitution has to take into consideration additionally to the former goal of avoiding ozone depleting substances taken also to account the efforts for the rest substances when retrofitting systems also the meanwhile very important influence on the global warming effect. Whereas the phase out of the HCFC R22 in existing systems in order to avoid ozone depleting emissions shows a comparable low effect concerning the already performed phase out of CFC's a rather high contribution can be stated in comparison to the HCFC's still in application. For the evaluation of the substitutes for R22 concerning the TEWI contribution the in general lower energetic efficiency and therefore the higher energy consumption of these alternatives are important. This is especially the case in systems designed for R22 and not optimized for the alternatives. Assuming equal leakages the higher GWP-Values of the HFC alternatives lead to a higher global warming effect with exception of R407C and R134A. When using R134A because of the lower pressure level the leakage rate will be lower. Therefore, when substitution R22 by HFC's with acceptance of R134A and R507C the total equivalent warming impact of the systems will be higher. For R134A the TEWI will be lower as using R22 whereby for R407C it will be nearly equal. Because of the lower volumetric capacity the substitution of R22 by R134A in general will be more expensive because of a necessary compressor change. Therefore, from ecological considerations R407C will be the preferred R22 alternative between the HFC substitutes for air-condition systems with dry evaporation. In commercial and industrial refrigeration the near azeotropic mixture R404A despite its higher GWP is applicable as R22 alternative.

Concerning the newly evaluated status of research and development regarding the retrofitting of existing systems with R22 substitutes it can be stated that the knowledge of the fluid behavior and the technical conditions as well as the retrofitting procedure is available to its efficient amount. The actual evaluation of the experiences gained by a questionnaire

in the German refrigeration industry, shows clearly that meanwhile especially in the commercial and industrial refrigeration as well as in air-conditioning applications sufficient knowledge for using all considered alternatives in existing R22 systems are available. The decision for retrofitting must be made under consideration of the ecological effect to be gained and the agreeable economical effort. The companies employed with retrofitting existing systems have the knowledge of choosing the alternative refrigerant for a special planned and application case. This decision for an individual case is necessary because for substituting R22 is no alternative available which can substitute R22 with all its properties and in its application fields.

Literatur

- [1] AFEAS Program Office: http://www.afeas.org/prodsales_download.html, Last updated Tuesday, June 20, 2000
- [2] Air-Conditioning and Refrigeration Institute, R-22 Alternative Refrigeration Evaluation Program, 1991-1997.
- [3] ANSI/ASHRAE 34-1997, Number Designation and Safety Classification of Refrigerants, up to and incl. Addendum 34k-2000, ASHRAE, Atlanta, Georgia, 2000.
- [4] Arnemann, M.; Gebhardt, D.; Kruse, H.: Experimentelle Bewertung neuer Kältemittelgemische als Ersatz für R22 und R502, DKV-Tagungsbericht, 21. Jahrg (1994), Bd. II/2, S. 225-239
- [5] Berglöf, K.: Replacing R22 in Existing Air Conditioning and Heat Pump Systems, Seventh Annual Conference of the Institute of Refrigeration, Phase Out – Impact on End-Users, England, 17.11.98.
- [6] Biffin, R.; Bessell, P.: Options and Practicalities of Retro-fitting Existing DX Refrigeration Systems Operating on R22, Seventh Annual Conference of the Institute of Refrigeration, Phase Out – Impact on End-Users, England, 17.11.98..
- [7] Bivens, D., Patron, D., Yokozeki, A.: Performance of R-32/R-125/R-134a Mixtures in Systems with Accumulators or Flooded Evaporators, ASHRAE Transactions: Symposia, September 1997.
- [8] Bobbo, S.; Camporese, R.; Kruse, H.; Halm, N.: Heat Pump Control with Zeotropic Mixtures, 6th IEA International Energy Agency Heat Pump Conference, Berlin, May 31-June 2, 1999.
- [9] Bonekamp, S.: Verdampfung von Ersatzkältemitteln für R22 in technischen Rohrbündel-Wärmeaustauschern, KI Luft- und Kältetechnik 5/2000.
- [10] Bonekamp, S.: Wärmeübergang in Rohrbündel-Verdampfern bei Ersatzkältemitteln für R22, DKV-Tagungsbericht Berlin, 26. Jhrg. (1999), Bd. II.1, auch in [9].

- [11] Butler, D.: Replacing R22 in Existing DX Liquid Chillers, Seventh Annual Conference of the Institute of Refrigeration, Phase Out – Impact on End-Users, England, 17.11.98.
- [12] Calm, J.: ARTI Refrigerant Database ‘Ferret’, Arlington, USA [13].
- [13] Calm, J.: Property, Safety, and Environmental Data for Alternative Refrigerants, The Earth Technologies Forum, Conference Proceedings, October 26-28, 1998
- [14] DAIKIN R407C, Firmenschrift, Küba Kältetechnik GmbH, DAIKIN Vertrieb, 1998
- [15] DKV-Statusbericht Nr. 4: „DKV-Verbundvorhaben Minderung von FCKW-Emissionen in der Kälte- und Klimatechnik“, 1. Statusseminar, 28.4.1990, Bonn, Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V., Stuttgart.
- [16] DOE/AFEAS GW Project: Energy and Global Warming Impacts of CFC Alternative Technologies, Executive Summary, Oak Ridge National Laboratory, Dezember 1991
- [17] DOE/AFEAS TEWI-III Report: Energy and Global Warming Impacts of HFC Refrigerants and Emerging Technologies: TEWI Phase 3, Oak Ridge National Laboratory, März 1997
- [18] Fachgespräch zum Thema “Umrüstung von bestehenden Kälte- und Klimaanlage” der chemischen Industrie, Umweltbundesamt Berlin, 20.09.1994.
- [19] Fahl, J.: Esteröle und ihre Eigenschaften, Die Kälte & Klimatechnik, 4/2000.
- [20] Fahl, J.: Neopentylpolyolester in der Anwendung als Kältemaschinenöl, Die Kälte & Klimatechnik, 4/2000.
- [21] FCKW-Halon-Verbots-Verordnung, Bundesgesetzblatt Teil 1, Bonn, 16.5. 1991.
- [22] Firmeninformation: Natural Cooling..., Calor Gas Refrigeration, England
- [23] Fischer, S.K.; Hughes, P.J.; Faichild, P.D.: Energy and Global Warming Impacts of CFC Alternative Technologies. Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (AFEAS) and U.S. Department of Energy (DOE). Washington, Oak Ridge: December 1991, 7.1-7.14
- [24] Forschungsrat Kältetechnik: Aktueller Überblick zum Ersatz des Kältemittels R22. Forschungsrat Kältetechnik e.V., Frankfurt, September 1997

- [25] Forschungsrat Kältetechnik: Wärmeübergang beim Sieden der Gemische R404A, R507, R407C und R410A, Bericht zum AiF-Forschungsvorhaben, Forschungsrat Kältetechnik e.V., Frankfurt, Oktober 1995.
- [26] Frischknecht, R.: Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel - Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen, ESU-services, Bundesamtes für Energie (BFE), Schlußbericht, Bern, Dezember 1999
- [27] Gabriellii, C.; Vamling, L.: Replacement of R22 in Heat Pumps used for District Heating, Eighth International Refrigeration Conference at Purdue University, West Lafayette, IN, USA – July 25-28, 2000.
- [28] Hartmann, K.: Ersatzkältemittel für Turboverdichter, Ki Klima Kälte Heizung 1-2/1993.
- [29] Hartmann, K.: Verhalten von Radialverdichtern bei wechselnden Kältemitteln, KI Luft- und Kältetechnik 4/1999.
- [30] Houghton, J. et. al.: Climate Change 1995, The Science of Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press 1996
- [31] ISCEON Refrigerants, ISCEON 59 (R417A), Refrigerant Case Study No. 1: Air Conditioning, Rhodia Organique Fine Ltd., Bristol, Feb. 2000.
- [32] ISCEON Refrigerants, ISCEON 59 (R417A), Refrigerant Case Study No. 2: Process Cooling in Cold Stores, Rhodia Organique Fine Ltd., Bristol, Feb. 2000.
- [33] ISCEON Refrigerants, ISCEON 59 (R417A), Refrigerant Case Study No. 3: RAF Base converts Command Centre A/C Units, Rhodia Organique Fine Ltd., Bristol, Feb. 2000.
- [34] ISCEON Refrigerants, ISCEON 59 (R417A), Refrigerant Case Study No. 4 (NZ): Air Conditioning, Rhodia Organique Fine Ltd., Bristol, Feb. 2000.
- [35] König, H.: Systemvergleich für R22-Ersatzstoffe: R407C und R410A, Ki Luft- und Kältetechnik 10/1998.
- [36] Kruse, H.; König, H.: System Comparison of R-22 Replacement Refrigerants: R-407C and R-410A, The Earth Technologies Forum, Conference Proceedings, October 26-28, 1998

- [37] Kusaka, M.; Nakatani, K.; Takatani, T.: The Development of Energy-Saving Technology by the Composition Control of R407C, Eighth International Refrigeration Conference at Purdue University, West Lafayette, IN, USA – July 25-28, 2000.
- [38] Lotz, H.: DKV-Statusbericht Nr. 13: “Beitrag der Deutschen Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik zur Verringerung der Treibhausbelastung bis zum Jahr 2005”. Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V., Stuttgart, April 1993.
- [39] Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, 1998 Report of Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee, UNEP United Nations Environment Programme Ozone Secretariat, December 1998.
- [40] Motta, F.; Domanski, P.: Performance of R-22 and its Alternatives Working at High Outdoor Temperatures, Eighth International Refrigeration Conference at Purdue University, West Lafayette, IN, USA – July 25-28, 2000.
- [41] Öko-Institut; Gesamthochschule Kassel: Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme v4.0. Erstellt im Auftrage des Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit, 2000.
- [42] Polyolester-Schmierstoffe in der praktischen Anwendung, Bericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11339, Forschungsrat Kältetechnik e.V., Frankfurt, November 1999.
- [43] Refrigeration into the Third Millennium, Proceedings of the 20th International Congress of Refrigeration, Sydney, 19-24 Sept 1999, Veröffentlichung der Proceedings steht aus.
- [44] Renz, H.: Anforderungen an Komponenten- und Systemauslegung beim R22-Ausstieg, Die Kälte und Klimatechnik 2/1999.
- [45] Rhodia Organique Fine Ltd.: Kreislauf- und Stoffdatenberechnungsprogramm ‘ISCool Solutions’, Version 1.1, 2/2000.
- [46] Rhodia, ISCEON 59 erhält ASHRAE-Nummer, Kurz & Aktuell, KK Die Kälte und Klimatechnik 3/2000.
- [47] Roberts, N.; Jawad, S.: Investigation of the Vapour Liquid Equilibrium Behaviour of Blends Comprising R125, R134a and R600 or R600a, Eighth International Refrigeration Conference at Purdue University, West Lafayette, IN, USA – July 25-28, 2000.

- [48] Spatz, M.: Replacements for HCFC-22 in Air-Conditioning and Heat Pump Systems, Eighth International Refrigeration Conference at Purdue University, West Lafayette, IN, USA – July 25-28, 2000.
- [49] Stabilität von Kohlenwasserstoffen im Kältemittelkreislauf, Bericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 10927, Forschungsrat Kältetechnik e.V., Frankfurt, März 1999.
- [50] Thomas, A.: Replacing R22 in Existing Flooded and Pump Circulation Systems, Seventh Annual Conference of the Institute of Refrigeration, Phase Out – Impact on End-Users, England, 17.11.98.
- [51] Umweltbundesamt Berlin: Forschungsbericht: Ersatz des Kältemittels R22 in bestehenden Kälte- und Klimaanlageanlagen, UBA-Texte 34/98, Berlin, Mai 1998 (FKW Studie).
- [52] Umweltbundesamt Berlin: Forschungsbericht: Ersatz von R12 in bestehenden Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen in der Bundesrepublik Deutschland durch Kältemittel mit geringerem Ozonabbaupotential, UBA-Texte 6/96, Berlin, Januar 1996 (FKW Studie).
- [53] Umweltbundesamt Berlin: Forschungsbericht: Ersatz von R502 in bestehenden Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen in der Bundesrepublik Deutschland durch Kältemittel mit geringerem Ozonabbaupotential, UBA-Texte 29/97, Berlin, Juni 1997 (FKW Studie).
- [54] Umweltbundesamt Berlin: Schutz der Ozonschicht, Ausstieg aus der Verwendung des H-FCKW Kältemittels R22 in Kälte- und Klimaanlageanlagen, Eine Information des Umweltbundesamtes, 26.11.99
- [55] UVV VBG 20: Unfallverhütungsvorschrift Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kühleinrichtungen mit Durchführungsanweisungen. vom Oktober 1997
- [56] Verordnung (EG) Nr. 3093/94 des Rates der europäischen Union vom 15.12.1994 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 333/1, 22.12.1994.
- [57] Voigt, A.: Royal Air Force kühlt mit ISCEON 59, Die Kälte & Klimatechnik 4/1999

[58] Voigt, A.; Rhodia Organique Fine Ltd.: Isceon 59 proves its suitability for commercial refrigeration and ac systems, Reprinted from ACR Today June 2000.

[59] Wärmeübergang beim Sieden von Kältemittel/Öl-Gemischen, Bericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11336, Forschungsrat Kältetechnik e.V., Frankfurt, Juli 2000.