

**Forschungsprogramm**  
**Umgebungs- und Abwärme,**  
**Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)**

# **Umweltrelevanz** **natürlicher Kältemittel**

## **Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen**

ausgearbeitet durch  
**Dr. Rolf Frischknecht**  
**ESU-services**  
**Zentralstrasse 8**  
**8610 Uster**  
[esu-services@access.ch](mailto:esu-services@access.ch)

im Auftrag des  
**Bundesamtes für Energie**

## Vorwort

Im Jahre 1996 hat das Institut für Energietechnik der ETH Zürich im Auftrag des damaligen Bundesamtes für Energiewirtschaft eine vergleichende Ökobilanz verschiedener Kältemittel durchgeführt. Aufgrund neuer technischer Entwicklungen und Erkenntnisse hat das Bundesamt für Energie eine Aktualisierung dieser Arbeit in Auftrag gegeben. In diesem Projekt wird versucht, die Umwelteinwirkungen der sogenannten natürlichen und der teilhalogenierten Kältemittel mit einer konsistenten und möglichst vollständigen Ökobilanz zu quantifizieren. Bei diesem Vorhaben konnte ich auf die Unterstützung zahlreicher Fachleute aus der Kältetechnikbranche, der Kältemittelhersteller aber auch der Umweltmodellierung und der Ökobilanzierung zählen. Ich möchte deshalb an dieser Stelle Herrn U. Berger, (Migros-Genossenschaftsbund), Herrn H. Eicher (Zehag), Herrn Hüftli (Kühlanlagen Universal AG Zürich), Herrn R. Kälin (Truttman Kühlanlagen AG), Herrn Nussbaum (Baumgartner AG), den Herren D. Trüssel und R. Wymann (KWT AG), den Herren S. Schaller und G. Gysin (SchallerUto), Herrn G. Schindler (Schindler AG), Herrn C. Schneider (LKS KälteSchweiz AG/ Linde), Herrn A. Steiner (Wettstein AG), Herrn Petter Neksa (Sintef, N) und Herrn G. Peter (Jäggi/ Güntner Schweiz AG), Herrn M. Berg (EAWAG) und Herrn M.A.J. Huijbregts (Universität Amsterdam), Herr J. Chmielarski und Herrn H. Henna (Armstrong Insulation Products), Mitarbeitern eines europäischen und eines US-amerikanischen Kältemittelherstellers, Herrn D. Colbourne (Calorgas), Herrn H. van Balken (EFMA), Herrn C. Mulliss (Rhodia Organique Fine Limited), und Herrn L. Frederikkson, (AGA Group) für ihre Unterstützung herzlich danken.

Speziell danken möchte ich Herrn Dr. M. Zogg für den Auftrag und das mir entgegengebrachte Vertrauen, den Mitgliedern der Projektbegleitgruppe, Herr Dr. Th. Afjei (Infel), Herr Dr. H. Lotz, Herr G. Reiner (Sulzer Frio-therm), Herr Dr. Ch. Rentsch (BUWAL), und Herr F. Rognon (BFE), für die fruchtbaren Diskussionen und wertvollen Hinweise, sowie Herrn Dr. R. Bretz (CIBA Specialty Chemicals Inc.) für seine kritische Begleitung der Erarbeitung der Sachbilanzen und seinen gutachterlichen Bericht.

Dr. Rolf Frischknecht

Dezember 1999

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

### Impressum

<i>Auftraggeber:</i>	Bundesamt für Energie (BFE)
<i>Autor:</i>	Dr. R. Frischknecht
<i>Begleitgruppe:</i>	Dr. M. Zogg, Projektbegleiter BFE, Oberburg Fabrice Rognon, BFE, Bern Dr. Christoph Rentsch, BUWAL, Bern Dr. Th. Afjei, Infel, Zürich Dr. H. Lotz, Beratender Ingenieur (DKV, VDI), Giengen G. Reiner, Sulzer Frio-therm, Rothenburg
<i>Zitiervorschlag:</i>	R. Frischknecht, 1999: Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel; Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen, Bundesamt für Energie, Bern
<i>Bezugsquelle:</i>	ENET, Nr. 9933303, Fax: 031-352 77 56, E-Mail: n+1@email.ch

© BFE, Bern 1999

## Zusammenfassung

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, die Umweltauswirkungen der Anwendung natürlicher und synthetischer Kältemittel zu quantifizieren und zu vergleichen. Sie enthält Ökobilanzen der Wärmebereitstellung mit Wärmepumpen und der Kälteerzeugung zur Kühlung in Gebäuden, von industriellen Prozessen und in Supermärkten. Es werden Anlagen mit Ammoniak, Propan und Kohlendioxid, sowie mit HFC-134a, HFC-404A, HFC-407C, HFC-410A, Isceon 59 und dem teilhalogenierten HCFC-22 (als Referenz) betrachtet. In der Wirkungsabschätzung werden die Umwelteffekte nicht erneuerbare Primärenergie, Treibhauseffekt, Ozonschichtabbau, Versäuerung, Sommersmog, aquatische und terrestrische Ökotoxizität (Giftwirkung in Gewässern und auf Böden) und karzinogene und erbgutschädigende Effekte durch die Emission radioaktiver Isotope quantifiziert.

Die Ergebnisse der Ökobilanzen zeigen, dass der Energieeffizienz eine zentrale Rolle zukommt. Die Strombereitstellung steuert z.B. bei Sole/Wasser-Wärmepumpen rund 90% zum Bedarf nichterneuerbarer Energie bei, zwischen 40 und 70% zum Treibhauspotenzial, zwischen 30 und über 75% zum Ozonabbaupotenzial, je etwa 65% zum Versäuerungspotenzial und zum Ökotoxizitätspotenzial aquatisch, rund 35% zum Sommersmogpotenzial, 40 bis 50% zum Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch und praktisch 100% zur Emission radioaktiver Isotope. Relevante Beiträge der Kältemittelherstellung und -emission sind beim Treibhauspotenzial (ca. 25% für HFC-134a, HFC-407C und HCFC-22, über 30% für Isceon 59 und 40% für HFC-404A), beim Ozonabbaupotenzial (über 35% bei der Produktion von HFCs, gut 70% durch die HCFC-22-Emissionen) und bei der Ökotoxizität terrestrisch (über 10% durch HFC-134a-Emissionen) zu verzeichnen. Bei Versäuerung (HFCs, HCFC und Ammoniak) und beim Sommersmog (Propan) stammen Anteile von 2 bis 5% von den Kältemittlemissionen.

Die umweltlichen Stoffeigenschaften der Kältemittel sind bei den Umweltwirkungen Treibhauseffekt, Ozonschichtabbau, terrestrische Ökotoxizität sowie - wenn auch weniger deutlich - bei Sommersmog und Versäuerung resultatbeeinflussend. Anlagen mit natürlichen Kältemitteln weisen bei vergleichbaren Jahresarbeitszahlen und heutigen Kältemittel-Verlusten gegenüber Anlagen mit halogenierten Kältemitteln deutliche (Ozonschichtabbau, Treibhauseffekt) bis erkennbare (terrestrische Ökotoxizität) umweltliche Vorteile auf. Bezüglich Sommersmog sind die Anlagen mit synthetischen Kältemitteln gegenüber denjenigen mit Propan leicht im Vorteil. Das Versäuerungspotenzial von Anlagen mit Ammoniak und HFCs unterscheidet sich praktisch nicht; Anlagen mit Propan sind diesbezüglich leicht im Vorteil. Die Unterschiede bezüglich Treibhauseffekt, Ozonschichtabbau, terrestrische Ökotoxizität und Sommersmog können verringert werden, wenn bei den Anlagen die Kältemittelverluste bei Erstellung, Betrieb und Entsorgung konsequent minimiert werden und Produktionsanlagen für fluorierte Kohlenwasserstoffe generell mit einer Nachverbrennung ausgerüstet werden. Zusammenfassend lässt sich folgern:

*Bei gleicher oder besserer Energieeffizienz der Anlagen mit natürlichen Kältemitteln weisen die natürlichen Kältemittel bis auf eine Ausnahme ("Sommersmog" bei Propan) erkennbare bis deutliche umweltliche Vorteile gegenüber Systemen mit synthetischen Kältemitteln auf.*

*Bei schlechterer Energieeffizienz der Anlagen mit natürlichen Kältemitteln ist eine Güterabwägung erforderlich zwischen der Schonung nicht erneuerbarer Primärenergien, der Versäuerung, dem Sommersmog, der Giftwirkung in Gewässern und der Emission radioaktiver Emissionen einerseits und dem Treibhauseffekt, dem Ozonschichtabbau und der Giftwirkung auf den Boden andererseits, um die Frage des umweltlichen Vorteils natürlicher oder synthetischer Kältemittel beantworten zu können.*

## Résumé

Le but de la présente étude est de quantifier et de comparer les impacts environnementaux de l'application de réfrigérants naturels et synthétiques. L'étude comprend des écobilans (Analyses du cycle de Vie, ACV) de l'approvisionnement de chaleur avec des pompes de chaleur, de la production de froid pour la climatisation d'immeubles, le refroidissement de procédés industriels et la réfrigération dans les supermarchés. Les installations considérées utilisent l'ammoniac, le propane, le dioxyde de carbone, le HFC-134a, le HFC-404A, le HFC-407C, le HFC-410A, l'Isceon 59 ou le composé semi-halogéné HCFC-22 (référence) comme réfrigérant. L'énergie primaire non-renouvelable, l'effet de serre, la destruction de la couche d'ozone, l'acidification, la création d'ozone photochimique (smog estival), l'écotoxicité aquatique et terrestre, les effets carcinogènes et mutagènes causés par l'émission d'isotopes radioactifs ont été inclus dans l'analyse des impacts environnementaux.

Les résultats des écobilans montrent que l'efficacité énergétique joue un rôle primordial. Dans le cas des pompes de chaleur (saumure/eau), l'approvisionnement en électricité représente environ 90% du besoin en énergie primaire non-renouvelable, elle contribue entre 40 et 70% à l'effet de serre, entre 30 et en dessus de 75% à la destruction de la couche d'ozone, à 65% à l'acidification et à l'écotoxicité aquatique, à environ 35% au potentiel de création d'ozone photochimique, entre 40 et 50% à l'écotoxicité terrestre et elle couvre quasiment la totalité (100%) des émissions d'isotopes radioactifs. Les impacts environnementaux à relever en matière de production et d'émission des réfrigérants sont l'effet de serre (environ 25% pour le HFC-134a, le HFC-407C et le HCFC-22, au dessus de 30% pour l'Isceon 59 et 40% pour le HFC-404A), la destruction de la couche d'ozone (au dessus de 35% pour la production des HFC, environ 70% causés par les émissions de HCFC-22) et l'écotoxicité terrestre (en dessus de 10% par les émissions de HFC-134a). Les émissions des réfrigérants contribuent entre 2 et 5% à l'acidification (HFC, HCFC-22 et ammoniac) et au smog estival (propane).

Les propriétés à effet environnemental des réfrigérants influent le résultat en matière d'effet de serre, de destruction de la couche d'ozone, d'écotoxicité terrestre et - en moindre envergure - de potentiel de création d'ozone photochimique et d'acidification. Les installations opérées avec des réfrigérants naturels ont des avantages nets (destruction de la couche d'ozone) à percevables (écotoxicité terrestre) à performance équivalente (efficacité Énergétique et fuite de réfrigérant). Les réfrigérants synthétiques ont un potentiel moins élevé de création d'ozone photochimique que le propane. Les potentiels d'acidification de l'ammoniac et des HFC ne se distinguent pratiquement pas. Les différences en matière d'effet de serre, de destruction de la couche d'ozone, d'écotoxicité terrestre et de potentiel de création d'ozone photochimique peuvent être réduites si les pertes de réfrigérants peuvent être minimisées pour l'installation, l'opération et la mise hors service des installations. Le traitement des gaz à potentiel de destruction de la couche d'ozone par postcombustion sur les sites de production des hydrocarbures fluorés réduirait de façon significative ces émissions. En guise de conclusion l'on peut dire que:

Les impacts environnementaux des systèmes à réfrigérants *naturels* sont plus faibles à une exception près (smog estival pour le propane) que ceux des systèmes à réfrigérants synthétiques si l'on considère *la même ou une plus grande* efficacité énergétique. Si l'on compare des systèmes à réfrigérants *synthétiques* à des systèmes à réfrigérants *naturels* avec une *plus faible* efficacité énergétique, des jugements de valeur sont incontournables. Si dans ce cas l'on est amené à identifier l'avantage environnemental global soit des réfrigérants synthétiques soit des réfrigérants naturels, il faut faire une pondération entre le besoin en énergie primaire non-renouvelable, l'acidification, la création d'ozone photochimique, l'écotoxicité aquatique et les effets carcinogènes et mutagènes causés par les radio-isotopes d'une part et l'effet de serre, la destruction de la couche d'ozone et l'écotoxicité terrestre d'autre part.

## Abstract

The goal of the present study is to quantify and compare the environmental impacts related to the use of natural and synthetic refrigerants. It contains Life Cycle Assessments (LCAs) of heat supply with heat pumps and of building air conditioning, as well as industrial and commercial refrigeration. The systems analysed use ammonia, propane, carbon dioxide, and HFC-134a, HFC-404A, HFC-407C, HFC-410A, Isceon 59 and HCFC-22 (the reference refrigerant). In the Life Cycle Impact Assessment the environmental impacts non renewable primary energy demand, global warming, ozone depletion, acidification, photochemical ozone creation, aquatic and terrestrial ecotoxicity and carcinogenic and hereditary effects due to ionising radiation are considered.

The results of the Life Cycle Assessments show that the energy efficiency plays a key role. For an earth-coupled heat pump, for instance, the electricity production contributes about 90% to the demand of non renewable primary energy, between 40 and 70% to the global warming potential, between 30 and over 75% to the ozone depletion potential, about 65% each to the acidification potential and the aquatic ecotoxicity, about 35% to the photochemical ozone creation potential, 40 to 50% to the terrestrial ecotoxicity and nearly 100% to the emission of radionuclides. Relevant contributions of the production and emission of refrigerants are to be expected for global warming (about 25% for HFC-134a, HFC-407C and HCFC-22, above 30% for Isceon 59 and 40% for HFC-404A), for ozone depletion (above 35% in the production of HFCs, 70% caused by HCFC-22 emissions) and for the terrestrial ecotoxicity (above 10% caused by HFC-134a-emissions). For acidification (HFCs, HCFC-22 and ammonia) and for photochemical ozone creation (propane), about 2 to 5% of the total impact score stems from the emission of the refrigerant.

The environmentally related properties of refrigerants influence the impact scores of the environmental impact categories global warming, ozone depletion, terrestrial ecotoxicity, and - to a lesser extent - acidification and photochemical ozone creation. Systems with natural refrigerants show distinctly (ozone depletion, global warming) to perceptibly (terrestrial ecotoxicity) lower impact scores assuming similar energy efficiency and current refrigerant losses. On the other hand, systems using synthetic refrigerants show lower photochemical ozone creation potentials compared to systems using propane. The acidification potential of systems using ammonia or HFCs are practically identical; here, systems using propane show slightly smaller values. The differences in global warming potential, ozone depletion potential, terrestrial ecotoxicity and tropospheric ozone creation potential may be reduced by systematically reduce refrigerant losses during installation, operation and dismantling of refrigeration systems. Furthermore the ozone depletion potential of HFCs may be reduced by burning ozone depleting by-products of the HFC-production instead of venting them. Summing up the following conclusions may be drawn:

Systems using *natural* refrigerants with a *similar or better* energy efficiency compared to others show distinctly to perceptibly lower environmental impact scores except for photochemical ozone creation (propane systems).

When comparing systems using *synthetic* refrigerants to systems using *natural* ones with a *lower* energy efficiency, value judgements are indispensable. A trade-off between non renewable primary energy demand, acidification, photochemical ozone creation, aquatic ecotoxicity, and carcinogenic and hereditary effects due to ionising radiation on the one hand, and global warming, ozone depletion, and terrestrial ecotoxicity on the other is necessary in order to identify the overall environmental benefit of natural or synthetic refrigerants.



# Inhalt

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>I</b>
<b>RÉSUMÉ</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>DAS WICHTIGSTE IN KÜRZE</b>	<b>VII</b>
<b>1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung .....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Übersicht über den Bericht .....	1
<b>2 METHODIK ÖKOBILANZIERUNG</b>	<b>3</b>
2.1 Vorgehen .....	3
2.2 ISO-konform oder nicht?.....	5
<b>3 UNTERSUCHUNGSRAHMEN</b>	<b>6</b>
3.1 Übersicht.....	6
3.2 Systemauswahl .....	6
3.2.1 Kältetechnikanwendungen.....	6
3.2.2 Kältemittel .....	7
3.3 Vorgehensweise in der Sachbilanz .....	7
3.3.1 Vergleichsbasis (Funktionelle Einheit).....	7
3.3.2 Alternative Technologien .....	8
3.3.3 Systemgrenzen .....	9
3.3.4 Allokationsprobleme .....	9
3.3.5 Strommix .....	12
3.4 Vorgehensweise in der Wirkungsbilanz.....	12
3.4.1 Einleitung .....	12
3.4.2 Begründung der Auswahl.....	13
3.4.3 Charakterisierungsfaktoren der einzelnen Kategorien .....	14
3.4.4 Verzicht auf Gesamttaggregation.....	21
<b>4 AUSWAHL UND SACHBILANZIERUNG DER SYSTEME</b>	<b>22</b>
4.1 Übersicht.....	22
4.2 Wahl der zu bilanzierenden Anlagen.....	22
4.3 Wärmepumpen.....	23
4.3.1 Technischer Beschrieb .....	23
4.3.2 Ökobilanzrelevante Kenngrößen und Annahmen.....	24
4.4 Kaltwasser- und Solesätze .....	26
4.4.1 Technischer Beschrieb .....	26
4.4.2 Vergleich Ammoniak zu Propan und teilhalogenierten Kältemitteln.....	28
4.4.3 Vergleich Kaltwassersatz zu Solesatz .....	29
4.4.4 Ökobilanzrelevante Kenngrößen und Annahmen.....	29
4.5 Supermarkt-Kälteanlagen .....	30

4.5.1	Technischer Beschrieb .....	30
4.5.2	Ökobilanzrelevante Kenngrößen und Annahmen.....	30
4.6	Kältemittelherstellung.....	33
4.6.1	Teilhalogenierte Kältemittel .....	33
4.6.2	Propan, Ammoniak und Kohlendioxid .....	34
4.7	Strombereitstellung .....	35
4.7.1	Strommix Schweiz plus Stromhandel.....	35
4.7.2	Strommix UCPT-E-Länder .....	36
4.7.3	Erdgasbefeuertes Magermotor-Blockheizkraftwerk .....	37
4.7.4	Erdgasbefeuertes Kombikraftwerk (Gas und Dampf-Kraftwerk).....	37
<b>5</b>	<b>RESULTATE UND DISKUSSION DER ÖKOBILANZEN</b>	<b>38</b>
5.1	Übersicht.....	38
5.2	Wirkungsbilanzergebnisse der Kältemittel und der Strombereitstellung.....	38
5.2.1	Kältemittlemissionen und -herstellung.....	38
5.2.2	Strombereitstellung .....	39
5.2.3	Ausgewählte Materialien.....	40
5.3	Wärmepumpen .....	41
5.3.1	Vergleich der Wärmepumpen mit verschiedenen Kältemitteln.....	41
5.3.2	Dominanzanalyse Prozessschritte .....	42
5.3.3	Dominanzanalyse Schadstoffe .....	47
5.3.4	Sensitivitätsanalyse Strombereitstellung.....	49
5.3.5	Vergleich verschiedener Anlagegrößen .....	54
5.3.6	Sensitivitätsanalyse Kältemittel-Verlustarten.....	59
5.3.7	Optimierte Produktion des Kältemittels HFC-134a .....	65
5.3.8	TEWI und Ökobilanz-Treibhauspotenzial .....	67
5.4	Kaltwasser- und Solesatz .....	68
5.4.1	Vergleich der Kaltwassersätze.....	68
5.4.2	Vergleich der Solesätze.....	70
5.5	Supermarkt-Kälteanlagen.....	73
5.6	Sensitivitätsanalyse Jahresarbeitszahl.....	76
5.6.1	Einführung.....	76
5.6.2	Wärmepumpen.....	76
5.6.3	Kaltwassersätze .....	82
5.6.4	Solesätze .....	87
5.6.5	Supermarkt-Kälteanlagen .....	91
5.7	Systemübergreifende Beurteilung.....	96
5.8	Vereinfachte umweltbezogene Auswahl einer Kälteanlage .....	97
5.9	Datenqualität.....	99
<b>6</b>	<b>PRAKTISCHE HINWEISE UND AUSBLICK</b>	<b>101</b>
6.1	Praktische Hinweise .....	101
6.2	Ausblick .....	101
	<b>REVIEW - BERICHT</b>	<b>103</b>
	<b>BEGRIFFE UND ABKÜRZUNGEN</b>	<b>114</b>
	<b>LITERATUR</b>	<b>115</b>



# Das Wichtigste in Kürze

## Zielsetzung

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, die lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen des Einsatzes natürlicher Kältemittel und teilhalogener Kohlenwasserstoffe in Wärmepumpen und Kälteanlagen zu quantifizieren und zu vergleichen. Es soll eine Grundlage geschaffen werden, die es Anlagebetreibern und Herstellern erlaubt, Aussagen über die Umweltauswirkungen ihrer Anlagen zu machen<sup>1</sup> und um Optimierungspotenziale bei den untersuchten Technologien erkennen zu können.

Die Studie soll weiter Aufschluss geben über den Stellenwert der Umweltwirkungen von Abbauprodukten teilhalogener Kohlenwasserstoffe (insb. Trifluoressigsäure, TFA).

## Methode

Die Umweltrelevanz wird mithilfe der Methode der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) gemäss ISO 14040ff. quantifiziert. Die Wirkungsabschätzung erfolgt auf der Ebene einzelner Umweltwirkungen (wie Treibhauseffekt, Ozonschichtabbau, Versäuerung, etc.). Auf eine Gesamtagggregation wird unter anderem deshalb verzichtet, weil eine Gewichtung "nicht für zur Veröffentlichung bestimmte vergleichende Aussagen angewendet werden [darf]" (ISO 1998b:Ziffer 9).

Die Interpretation der Ergebnisse beinhaltet neben einer Analyse der resultatbestimmenden Ressourcenverbräuche und Schadstoffe auch eine Analyse darüber, welchen Anteil die einzelnen Prozesse innerhalb der betrachteten Systeme zu den Gesamtergebnissen beitragen. Zudem werden Sensitivitätsanalysen bezüglich Verlustraten, Strombereitstellung (Strommix Schweiz oder Europa, Durchschnitts- und Grenzstrommixe) und der Energieeffizienz der Anlagen durchgeführt, um die Stabilität der Aussagen zu überprüfen.

Die Studie wurde einem externen Review durch Dr. R. Bretz, CIBA Specialty Chemicals Inc., unterzogen. Dessen Bericht ist integral im Schlussbericht enthalten.

## Untersuchungsrahmen und bilanzierte Systeme

Aus der Vielzahl kältetechnischer Systeme wurden die folgenden ausgewählt:

- Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen zur Gebäudeheizung (7 resp. 50kW<sub>th</sub>),
- Kaltwassersatz für Gebäudeklimatisierung (400kW<sub>th</sub>, 6/12°C, 1'500h Jahreslaufzeit) und Solesatz für industrielle Tiefkühlung (120kW<sub>th</sub>, -25/-30°C, 8'000h Jahreslaufzeit),
- Supermarkt-Kälteanlage (Normal- und Tiefkühlung) mit ca. 100kW<sub>th</sub> Kälteleistung.

Damit kann der Einsatz verschiedener Kältemittel, unterschiedlicher Anlagegrössen (von einigen kW bis einige hundert kW) und unterschiedlicher Systemeigenschaften modelliert werden. Letzteres zeigt sich beispielsweise im unterschiedlichen Betriebsstrombedarf pro kg Kältemittel (Kaltwasser- versus Solesatz), in den stark unterschiedlichen Laufzeiten aber auch in den stark unterschiedlichen Kältemittel-Verlustraten während des Betriebs der Anlagen.

Innerhalb der einzelnen Systeme sind, bedingt durch die thermodynamischen Eigenschaften des Kältemittels, durch die Anlagenkonfiguration (Sekundärkreislauf oder Direktverdamp-

---

<sup>1</sup> Siehe hierzu insbesondere Unterkap. 5.6 und 5.8.

fung bei Supermarkt-Kühlanlagen), durch eine mehr oder weniger optimierte Abstimmung der Komponenten aufeinander, durch unterschiedliches Teillastverhalten etc., grosse Unterschiede in der Energieeffizienz zu gewärtigen. Der Einfluss des Kältemittels allein kann dabei nicht isoliert werden. Aus diesem Grund sind die Vergleiche auf der Basis der hier verwendeten unterschiedlichen Jahresarbeitszahlen (Wärmepumpe, Kaltwasser- und Solesatz) resp. des Energieverbrauchs bei den Supermarkt-Kälteanlagen mit Vorsicht zu interpretieren.

Für den Vergleich stehen Anlagen mit den Kältemitteln Ammoniak, Propan, Kohlendioxid, HFC-134a, HFC-404A, HFC-407C, HFC-410A und Isceon 59<sup>2</sup> sowie - als Referenz - dem HCFC-22 zur Verfügung.

Bezugsgrösse (funktionelle Einheit) ist bei den Systemen Wärmepumpe, Kaltwassersatz und Solesatz die an das Wärmeverteilnetz abgegebene resp. dem Kälteverteilnetz entzogene Energie. Bei den Supermarkt-Kälteanlagen wird zusätzlich die Kälteverteilung berücksichtigt, da hier Systeme mit Direktverdampfung und/oder mit Kälteübertragungsmedium möglich sind. Die Bezugsgrösse ist hier der Betrieb eines Laufmeters Kühlmöbel.

Die Sachbilanzen umfassen Rohstoff- und Energiegewinnung, Herstellungsaufwendungen für Materialien, Betriebsstoffe, Energieträger und Halbfabrikate, die Erstellung der kältetechnischen Anlagen, deren Betrieb und Entsorgung. Zudem werden auch die Transport- und die Entsorgungsaufwendungen der Produktionsabfälle miteinbezogen. Die durch unvorsichtiges Arbeiten und Lecks verursachten Kältemittelverluste sind in den Kältemittel-Verlustmengen inbegriffen. Die Datenlage bezüglich Verlusten ist insgesamt als eher dürftig einzustufen.

Allfällige Abwärmenutzungen zu Heizzwecken bleiben unberücksichtigt. Die bei der Herstellung teilhalogenierter Kältemittel anfallenden Nebenprodukte (Salzsäure und Wasser) bleiben ebenfalls unberücksichtigt, sodass die gesamten Prozessaufwendungen und -emissionen den Kältemitteln resp. deren Vorprodukten zugeordnet werden. Die Herstellung von Kohlendioxid wird als Rückgewinnungsprozess betrachtet, weshalb die Rohstoffgewinnung (in der Regel fossile Brennstoffe) nicht berücksichtigt wird. Die Emission des als Kältemittel eingesetzten CO<sub>2</sub> wird hier aber eingerechnet.

In dieser Studie wird als Standardfall der schweizerische Strommix unter Berücksichtigung des Stromhandels verwendet. In Sensitivitätsbetrachtungen werden auch der westeuropäische Strommix, ein erdgasbefeuertes Blockheizkraftwerk und ein ebenfalls erdgasbefeuertes Kombikraftwerk (Gas und Dampf-Kraftwerk) eingesetzt.

Die Umweltrelevanz wird mit den folgenden Umweltwirkindikatoren quantifiziert<sup>3</sup>:

- Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie,
- Treibhauspotenzial,
- Ozonschichtabbauendes Potenzial,
- Versäuerungspotenzial,
- Sommersmogbildendes Potenzial,
- Ökotoxizitätspotenzial aquatisch (Giftwirkung in Gewässern),
- Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch (Giftwirkung auf Böden), und
- Emission radioaktiver Isotope (krebserzeugende und erbgutschädigende Wirkung).

---

<sup>2</sup> Zusammensetzung: HFC-134a: 50%; HFC-125: 46.5%; Butan (R-600): 3.5%.

<sup>3</sup> Das Überdüngungspotenzial (Ammoniak) wird nicht betrachtet, da die Überdüngung hauptsächlich durch die konventionelle Landwirtschaft verursacht wird. Der Beitrag der hier betrachteten Systeme an die gesamteuropäische überdüngende Wirkung ist denn auch um eine Grössenordnung tiefer als deren Beitrag zum gesamteuropäischen Versäuerungs-, Sommersmog-, Bodenvergiftungs- oder Treibhauspotenzial.

## Sachbilanzen der kältetechnischen Systeme

### Wärmepumpen

Es werden Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen mit einer Heizleistung von 7 resp. 50kW<sub>th</sub> betrachtet. Die maximale Vorlauftemperatur beträgt 45°C, die minimale Aussentemperatur -8°C. Die Jahresarbeitszahl wird der Leistungszahl bei 3°C Aussentemperatur und einer Vorlauftemperatur von 36.8°C gleichgesetzt<sup>4</sup>. Die Jahresbetriebsstundenzahl bei Vollast beträgt 1'850 Stunden und die Anlagenlebensdauer 15 resp. 20 Jahre für die 7 resp. 50kW<sub>th</sub>-Anlagen.

Die Jahresarbeitszahlen der verschiedenen Wärmepumpen-Anlagen variieren zwischen 3.6 und 4.2 (Sole/Wasser-Wärmepumpe) und zwischen 3.2 und 4.0 (Luft/Wasser-Wärmepumpe). Die Kältemittelfüllmengen betragen bei den 7kW<sub>th</sub>-Sole/Wasser-Anlagen 1kg für Propan und CO<sub>2</sub> und 2 kg für die teilhalogenierten Kältemittel. Die 50kW<sub>th</sub>-Sole/Wasser-Wärmepumpen werden mit 5kg (Propan, CO<sub>2</sub>) resp. 10kg (teilhalogenierte Kältemittel) befüllt. Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen lauten die Werte für Propan und CO<sub>2</sub> resp. für die teilhalogenierten Kältemittel 1.5 resp. 3kg und 7.5 resp. 15kg (je 7 und 50kW<sub>th</sub>-Anlage). Die Kältemittel-Verlustrate im Betrieb wird mit 8% pro Jahr (Durchschnitt heute) und 2% pro Jahr (zukünftiger Zielwert) angenommen.

### Kaltwasser- und Solesätze

Es werden Kaltwassersätze mit einer Nennkälteleistung von 400kW und Solesätze mit einer Kälteleistung von 120kW betrachtet. Als Vergleichsgrösse wird die an den Kälte Trägerkreislauf abgegebene Energie auf 6/12°C (Kaltwassersatz) resp. auf -25/-30°C (Solesatz) verwendet. Die Vollbetriebsstunden betragen 1'500h (Kaltwassersatz) resp. 8'000h (Solesatz) pro Jahr. Die Anlagenlebensdauer wird mit 20 Jahren veranschlagt.

Die auf die Kälteleistung bezogenen Jahresarbeitszahlen der Anlagen variieren zwischen 3.3 und 4.3 (Kaltwassersatz) und zwischen rund 1.0 und 1.5 (Solesatz). Die Kältemittelfüllmengen betragen für die Ammoniakanlagen 66kg, für die übrigen Anlagen 65kg.

Beim Erstbefüllen der Kaltwasser- und Solesatz-Anlage wird mit 0.5% resp. 2% Kältemittelverlusten gerechnet (Durchschnitt heute für Ammoniak resp. für alle übrigen Kältemittel). In Zukunft wird für die teilhalogenierten Kältemittel und Propan ein Wert von 1% erwartet. Im Betrieb werden 5% resp. 10% pro Jahr emittiert (Durchschnitt heute für Ammoniak resp. für alle übrigen Kältemittel). Dieser Wert dürfte in Zukunft auf 2% resp. 5% pro Jahr gesenkt werden. Beim Rückbau der Anlage wird heute mit Kältemittelverlusten von 5% resp. 15% (für Ammoniak resp. alle übrigen Kältemittel) und in Zukunft mit 2% resp. 5% gerechnet.

### Supermarkt-Kälteanlagen

Aus der Vielzahl der verschiedenen Anlagen-Konzepte werden die folgenden Systeme analysiert:

---

<sup>4</sup> Die Jahresarbeitszahl errechnet sich aus dem Verhältnis der während eines Jahres erzeugten Wärme (resp. der entzogenen Kälte) zur im selben Zeitraum benötigten elektrischen Energie. Die Leistungszahl errechnet sich aus dem Verhältnis der Nutzwärme- (resp. Nutzkälteleistung) zur Gesamtleistungsaufnahme.

- Tiefkühlung:  
Ammoniak (mit Kälte-trägersystem), HFC-404A und HCFC-22 mit Direktverdampfung.
- Normalkühlung:  
Ammoniak, HFC-134a, HFC-404A und HCFC-22 mit Kälte-trägersystem, HCFC-22 mit Direktverdampfung.

Bei Supermarkt-Kälteanlagen ist die Angabe einer Jahresarbeitszahl nicht praktikabel. Deshalb werden die Sachbilanzen auf den Betrieb eines Laufmeters Kühlmöbel während einem Jahr bezogen. Der jährliche Strombedarf liegt im Durchschnitt je nach Anlagentyp zwischen 4.3 MWh und 5.4 MWh pro Laufmeter und Jahr. Die Lebensdauer der Kälteanlagen wird mit 15 Jahren veranschlagt.

Für diese Untersuchung wird eine fiktive Anlage mit einer Normalkühlleistung von 82.3kW und einer Tiefkühlleistung von 21.3kW definiert. Im Durchschnitt werden pro Laufmeter Kühlmöbel 1.41kW Kälteleistung (Normal- und Tiefkühlung) installiert<sup>5</sup>. Pro kW Kälteleistung werden zudem 12.5kg Kupfer resp. 18kg Chromstahl und 1.2kg Kälteisolation für die Verteilungen benötigt.

Bezogen auf die installierte Kälteleistung schwanken bei Systemen mit Kälte-träger die Mittelwerte der Kältemittel-Erstfüllmengen für die Normalkühlung zwischen 0.3 und knapp 0.7 kg pro kW. Beim direktverdampfenden HCFC-22-System werden 2.8kg pro kW benötigt. Für die Tiefkühlung werden knapp 0.6kg Ammoniak pro kW benötigt. Für die Direktverdampfung werden im Tiefkühlbereich 3.6kg HFC-404A resp. 4.25kg HCFC-22 pro kW eingefüllt.

Die Kältemittelverluste beim Befüllen der Anlage werden für beide Szenarien (Durchschnitt heute und Zukunft) mit 3% (teilhalogenierte Kältemittel) resp. 0.5% (Ammoniak) angenommen. Im Betrieb werden für den heutigen Durchschnitt 13.5% resp. 5% pro Jahr (teilhalogenierte Kältemittel resp. Ammoniak) und für den zukünftigen Zielwert 6% resp. 2% pro Jahr angenommen. Beim Rückbau der Anlagen wird mit 15% resp. 5% (Durchschnitt heute, teilhalogenierte Kältemittel resp. Ammoniak) und 10% resp. 2% (zukünftige Zielwerte) gerechnet<sup>6</sup>.

## Resultate

### Vergleich der kältetechnischen Anlagen

Stellvertretend werden hier die vergleichenden Ergebnisse einer 7kW<sub>th</sub>-Sole/Wasser-Wärmepumpe, des Kaltwasser- und des Solesatzes sowie der Supermarkt-Kälteanlagen gezeigt. Die zugrundeliegenden Kältemittelverluste entsprechen dem Durchschnitt heute. Die Strombereitstellung erfolgt mit dem schweizerischen Strommix, der 65% der Stromimporte (vorwiegend aus Frankreich und Deutschland) enthält. Die Sensitivität der Systeme bezüglich Jahresarbeitszahl wird in einer Bandbreite angezeigt, welcher dieselbe (hohe resp. tiefe) Energieeffizienz für alle Systeme zugrunde liegt.

Beim *Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergie* und bei den *Emissionen radioaktiver Isotope* zeigt sich die Korrelation zur Jahresarbeitszahl resp. zum Energiebedarf bei allen vier untersuchten Systemen sehr deutlich (siehe Fig. Z.1 bis Z.4). Die Unterschiede sind dort praktisch proportional zur Energieeffizienz der Anlagen. Bei allen andern Kategorien zeigen sich jedoch durchaus unterschiedliche Muster. So zeigen die natürlichen im Vergleich zu den syn-

<sup>5</sup> Die unterschiedliche Geometrie und der unterschiedliche Energiebedarf der Kühlmöbel wird über Korrekturfaktoren berücksichtigt.

<sup>6</sup> Dass durchaus auch tiefere Verlustraten bei Anlagen mit teilhalogenierten Kältemitteln möglich sind, zeigen Erfahrungen aus den Niederlanden (Van Gerwen & Verwoerd 1998). Durch eine konsequente, gesetzlich vorgeschriebene Qualitätskontrolle und andere Vorgaben, konnten in den Niederlanden die jährlichen Verlustraten von Supermarkt-Kälteanlagen von 7 auf 3% gesenkt werden.

thetischen Kältemittel beim *Treibhauspotenzial* durchwegs deutlich unterproportionale Werte. Bei den Wärmepumpen und den Kaltwassersätzen weist das Gemisch HFC-404A mit Abstand den höchsten Wert auf (siehe Fig. Z.1 und Fig. Z.2). Beim *Ozonschichtabbau* zeigt sich das Verbesserungspotenzial durch Verlassen der HCFC-22-Technologie (Reduktion um 50 bis 60%). Durch einen Wechsel von HCFC-22 auf Propan, Ammoniak oder CO<sub>2</sub> kann - ähnliche Jahresarbeitszahl vorausgesetzt - ein Reduktionsfaktor von etwa 10 erreicht werden. Beim Solesatz ist eine Verminderung um einen Faktor vier möglich.

Bei den Umweltwirkungen *Versäuerung*, *Sommersmog* und *aquatische Ökotoxizität* sind die Unterschiede weit weniger deutlich. Bei den Solesätzen, wo die Strombereitstellung die Werte dieser Indikatoren am stärksten prägt, spielen die umweltlichen Stoffeigenschaften und die Herstellungsprozesse des Kältemittels eine untergeordnete Rolle (siehe Fig. Z.3). Es zeigt sich aber, dass bei den Ammoniak-, HFC- und der HCFC-22-Anlagen die versäuernden Gesamtemissionen tendenziell höher liegen als diejenigen von CO<sub>2</sub> und Propan (siehe Fig. Z.1 bis Z.3). Bei den Supermarktanlagen haben die grossen Kältemittelfüllmengen der reinen Direktverdampfungsanlage mit HCFC-22 zur Folge, dass der Energieeffizienzgewinn durch die erhöhten Kältemittlemissionen mehr als kompensiert wird (siehe Fig. Z.4).

Beim *Sommersmog* zeigt die Propan-Wärmepumpe infolge der Propanemissionen den höchsten Wert (siehe Fig. Z.1). Eingesetzt in Kaltwassersätzen ist die erhöhte sommersmogbildende Wirkung der Emission dieses Kältemittels bei gleicher Jahresarbeitszahl noch deutlicher erkennbar (siehe Fig. Z.2).

Bei der *terrestrischen Ökotoxizität* sind ebenfalls deutlichere Abhängigkeiten von den umweltlichen Stoffeigenschaften der Kältemittel erkennbar. Anlagen mit HFC-134a als Kältemittel oder substantielle Komponente in Kältemittelgemischen weisen generell leicht bis spürbar erhöhte Gesamtwirkungen auf. Bei den Solesätzen ist der relative Unterschied bei vergleichbaren Jahresarbeitszahlen am geringsten.

In den nachfolgenden Fig. Z.1 bis Z.4 entsprechen 100% den in Tab. Z.1 angegebenen Werten. Die Resultate der CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe basieren auf Kenngrössen, die bis heute weder mit serienreifen CO<sub>2</sub>-Aggregaten noch mit Prototypen realisiert worden sind.

	Einheit	Sole/Wasser-Wärmepumpe TJ <sup>1)</sup>	Kaltwassersatz TJ <sup>2)</sup>	Solesatz TJ <sup>2)</sup>	Supermarkt-Kälteanlage m <sup>3</sup> /a <sup>3)</sup>
Nicht erneuerbare Energie	MJ PE-Äquiv.	733'000	698'000	2'250'000	44'800
Treibhauseffekt	kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	28'500	21'600	38'700	1'670
Ozonschichtabbau	kg R11-Äquiv.	0.27	0.211	0.236	0.0391
Versäuerung	kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	106	77.7	227	5.21
Sommersmog	kg Ethylen-Äquiv.	41.9	14.9	44.9	0.978
Ökotoxizität aquatisch	kg 1,4-DCB-Äquiv.	3'400'000	2'540'000	7'750'000	161'000
Ökotoxizität terrestrisch	kg 1,4-DCB-Äquiv.	66.4	37.6	107	2.19
Radioaktivität	kBq U-235-Äquiv.	12'200	12'500	40'900	806

Tab. Z.1: Maximalwerte der Wirkungsindikatorergebnisse der Ökobilanz von den vier betrachteten kältetechnischen Anwendungen (1TJ = 278MWh).

Bemerkung: Grosse Zahlen dürfen nicht a priori mit grosser Umweltrelevanz gleichgesetzt werden (z.B. Ökotoxizität aquatisch im Vergleich zu Ozonschichtabbau).

<sup>1)</sup>: An das Verteilnetz abgegebene Heizenergie (1TJ).

<sup>2)</sup>: Dem Verteilnetz entzogene Kälteenergie (1TJ).

<sup>3)</sup>: Betrieb eines Laufmeters Kühlmöbel pro Jahr.

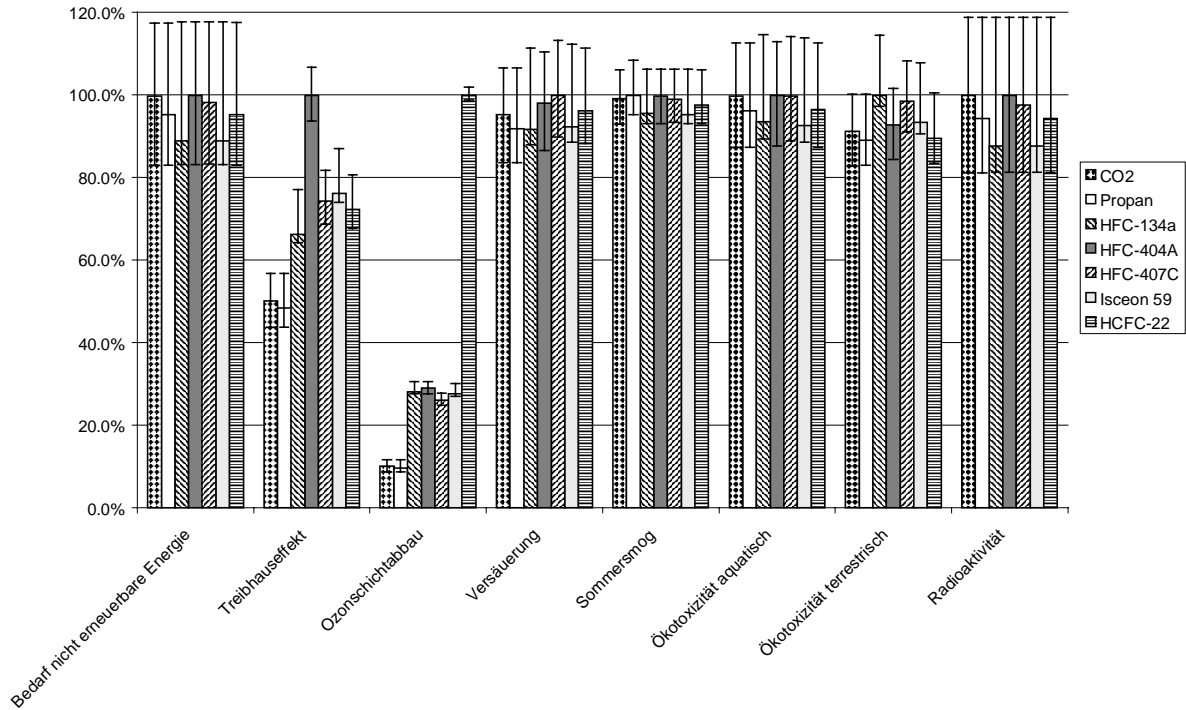


Fig. Z.1: Vergleich der Umweltwirkungen von sieben 7kW<sub>th</sub> Sole/Wasser-Wärmepumpen unter der Annahme heute durchschnittlicher Verlustmengen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie. Bandbreite: Höchstwerte: Jahresarbeitszahl (inkl. Hilfsenergie) 3.0 für alle Systeme. Tiefstwerte: Jahresarbeitszahl (inkl. Hilfsenergie) 4.5 für alle Systeme.

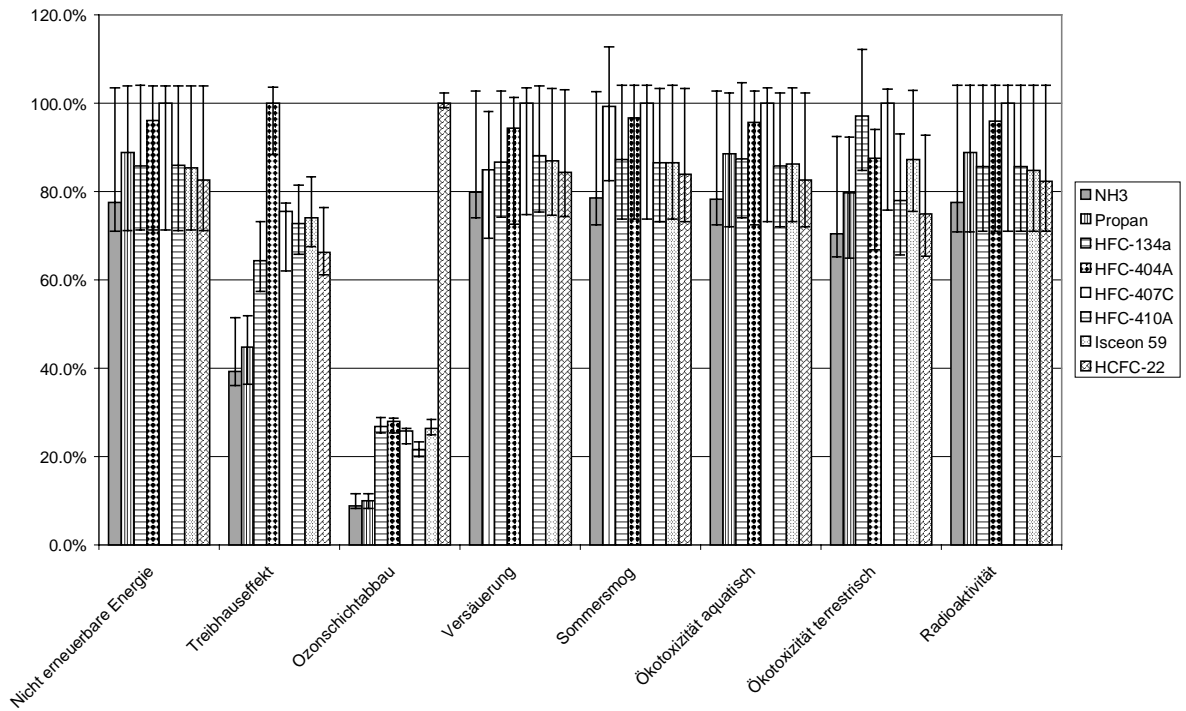


Fig. Z.2: Vergleich der Umweltwirkungen von acht Kaltwassersätzen (6/12°C) unter der Annahme heute durchschnittlicher Verlustmengen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Basis: 1TJ dem Verteilnetz entzogene Energie. Bandbreite: Höchstwerte: Jahresarbeitszahl (inkl. Hilfsenergie) 3.2 für alle Systeme. Tiefstwerte: Jahresarbeitszahl (inkl. Hilfsenergie) 4.7 für alle Systeme.

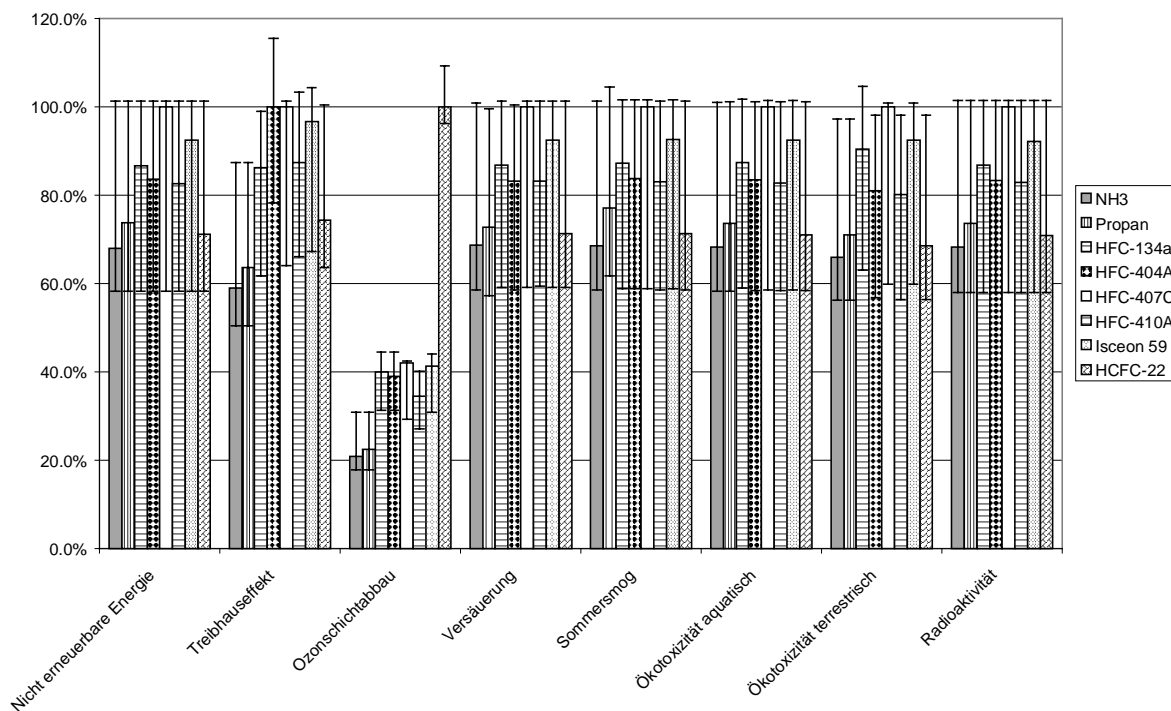


Fig. Z.3: Vergleich der Umweltwirkungen von acht Solesätzen (-25/-30°C) unter der Annahme heute durchschnittlicher Verlustmengen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Basis: 1TJ dem Verteilnetz entzogene Energie. Bandbreite: Höchstwerte: Jahresarbeitszahl (inkl. Hilfsenergie) 1.0 für alle Systeme. Tiefstwerte: Jahresarbeitszahl (inkl. Hilfsenergie) 1.75 für alle Systeme.

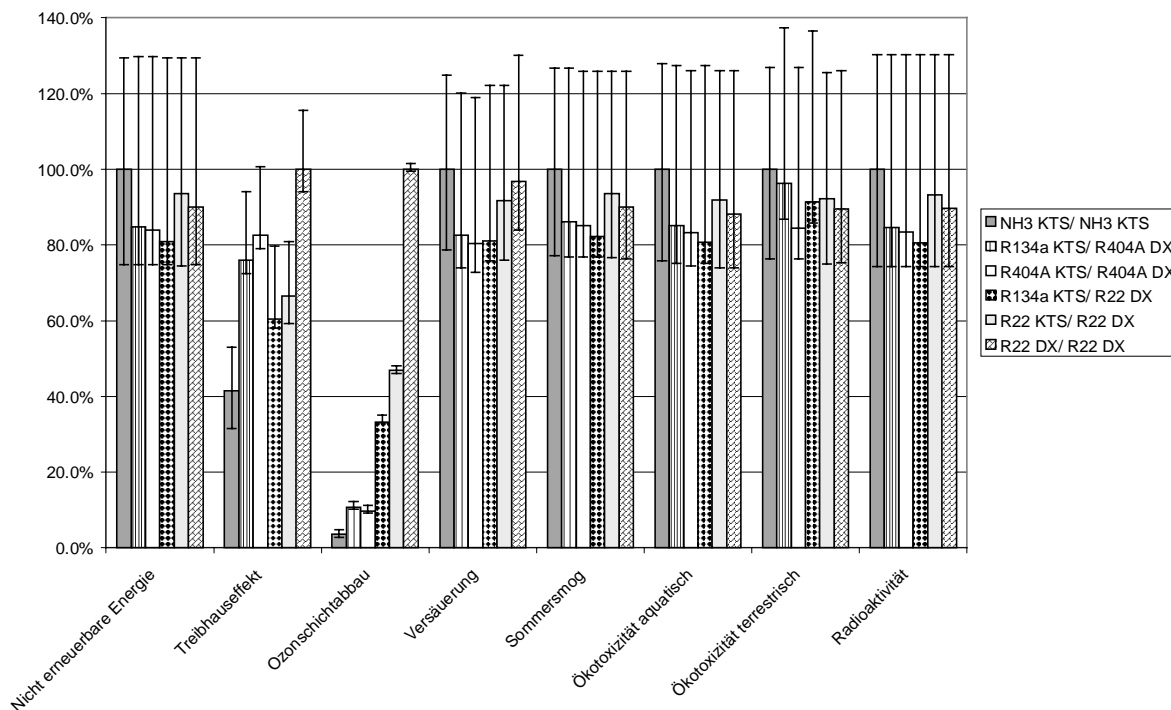


Fig. Z.4: Vergleich der Umweltwirkungen von sechs Supermarkt-Kälteanlage-Konzepten unter der Annahme heute durchschnittlicher Verlustmengen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Basis: Betrieb von 1 Laufmeter Kühlmöbel pro Jahr. Bandbreite: Höchstwert: Strombedarf 7'000kWh/m'.a für alle Systeme. Tiefstwert: Strombedarf 4'000kWh/m'.a für alle Systeme. KTS: Kälteträgersystem; DX: Direktverdampfung.

Werden zukünftig angestrebte, sehr niedrige Kältemittel-Verlustraten in die Sachbilanz eingesetzt, so reduzieren sich bei vergleichbaren Jahresarbeitszahlen die Unterschiede zwischen den Kältemitteln bei den kältemittelsensitiven Kategorien *Treibhauseffekt*, *Ozonschichtabbau*, *Sommersmog* und *terrestrische Ökotoxizität*. Sie werden gering, ohne jedoch ganz zu verschwinden. Wird angenommen, dass die teilhalogenierten Kältemitteln ausschliesslich in Anlagen mit Nachverbrennung (zur Zerstörung ozonschichtabbauender Zwischenprodukte) hergestellt werden, kann das *ozonschichtabbauende Potenzial* dieser Kältemittel auf das Niveau von Ammoniak, Propan oder CO<sub>2</sub> gesenkt werden. Unterschiede sind dann noch beim *Treibhauspotenzial* und der *Giftwirkung auf den Boden* zu gewärtigen.

Unter Annahme der bestehenden westeuropäischen Strombereitstellung mit ihren teilweise ohne Rauchgasreinigung ausgerüsteten fossilthermischen Kraftwerken fallen die Wirkindikatorergebnisse deutlich höher aus und der direkte Einfluss der Kältemittelproduktion und -emission ist deutlich geringer. Bei Annahme moderner erdgasbetriebener Kraftwerke akzentuieren sich hingegen die Unterschiede, welche sich durch die unterschiedlichen umweltlichen Stoffeigenschaften und Kältemittel-Herstellungsverfahren ergeben.

Für eine Abschätzung der Umweltauswirkungen eigener Anlagen seien Anlagenplaner und Anlagenbauer auf die beiden Unterkap. 5.6 und 5.8 verwiesen.

## Erkenntnisse

Die während dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse führen zu den nachstehenden Folgerungen. Diese gelten unter den in dieser Studie gesetzten Rahmenbedingungen und den gemachten Annahmen insbesondere bezüglich Energieeffizienz der Anlagen, der Kältemittelherstellung und der Kältemittelverluste.

- Die Energieeffizienz spielt in den Bilanzen der heutigen Situation bei fünf der acht berücksichtigten Indikatoren, nämlich bei *Primärenergiebedarf*, *Versäuerung*, *Sommersmog* (Wärmepumpe und Solesatz), *Ökotoxizität aquatisch* und bei den *Emissionen radioaktiver Isotope* die entscheidende Rolle.
- Als zweite wichtige Kenngrösse haben sich die Verlustraten und damit verbunden die umweltlichen Eigenschaften der Kältemittel erwiesen.
- Beim *Treibhauspotenzial* und dem *Ozonschichtabbau* sind die umweltlichen Stoffeigenschaften und Herstellungsprozesse der Kältemittel entscheidend, bei der *Ökotoxizität terrestrisch* und beim *Sommersmog* (Kaltwassersatz) immerhin noch spürbar.
- Beim *ozonschichtabbauenden Potenzial* können erhöhte Werte der HFCs nicht durch eine höhere Energieeffizienz wettgemacht werden.
- Beim *Treibhauseffekt* sind deutlich höhere Jahresarbeitszahlen nötig (um über 60% bei Wärmepumpe und Kaltwassersatz, um zwischen 20 und 40% beim Solesatz, 70 bis 120% bei Supermarktanlagen), um das Treibhauspotenzial der HFC-Anlagen (HFC-134a) demjenigen der besten übrigen Anlagen (Ammoniak, Propan und CO<sub>2</sub>) anzugleichen.
- Zur Angleichung bei der *Ökotoxizität terrestrisch* muss die Betriebsenergieeffizienz von Anlagen mit HFC-134a-haltigen Kältemitteln um 8% (Solesatz), 13% (Sole/Wasser-Wärmepumpe), 15% (Supermarkt-Kälteanlage) resp. 20% (Kaltwassersatz) höher liegen, um die Werte der Ammoniak-, Propan- oder CO<sub>2</sub>-Anlagen zu erreichen. Dies ist auf die ökotoxische Wirkung des persistenten Abbauproduktes Trifluoressigsäure (TFA) zurückzuführen.
- Die Propan-Anlagen müssen eine um knapp 3% (Wärmepumpen, Solesätze) bis maximal 12% (Kaltwassersätze) bessere Energieeffizienz aufweisen als die übrigen Kälteanlagen



- resp. Wärmepumpen, um das erhöhte *sommersmogbildende Potenzial* infolge der Propanverluste ausgleichen zu können.
- Wird die kältetechnische Anlage irgendwo in Westeuropa betrieben (und demzufolge der westeuropäische Strommix der Analyse zugrundegelegt) so reduziert sich der Einfluss der Kältemittelwahl beim *Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch* und beim *Treibhauspotenzial* deutlich, während das *ozonschichtabbauenden Potenzial* praktisch invariant gegenüber einer unterschiedlichen Strombereitstellung bestehen bleibt.
  - Bei einer - im Sinne der hier berücksichtigten Umwelteffekte - umwelteffizienteren Art der Strombereitstellung z.B. mit erdgasbefeuerten Kombikraftwerken akzentuieren sich hingegen die Unterschiede der Kältemittel in den vorgenannten Wirkkategorien.
  - Durch konsequente Minderung der Kältemittelverluste beim Befüllen, Betreiben und Entsorgen der Anlage können die kältemittelspezifischen Unterschiede (bei vergleichbarer Energieeffizienz) bezüglich *Treibhauspotenzial*, *Ozonschichtabbau*, *Sommersmog* und *Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch* deutlich vermindert aber nicht ganz beseitigt werden.
  - Durch konsequente Nachverbrennung von Nebenprodukten bei der Herstellung von Fluorkohlenwasserstoffen (HFC) könnte das lebenszyklusbezogene *ozonschichtabbauende Potenzial* auf das Niveau der natürlichen Kältemittel gesenkt werden. Dies ist jedoch bei weitem nicht in allen Produktionsstätten realisiert. Hier besteht ein Informations- und eventuell ein Regulierungsbedarf bezüglich der Emission ozonschichtabbauender Substanzen bei der Herstellung von z.B. Fluorkohlenwasserstoffen.
  - Die Herstellung der Anlagekomponenten spielt bei Kaltwasser- und Solesätzen eine untergeordnete Rolle. Bei den Wärmepumpen ist das Herstellen resp. das Entsorgen der Erdsonden bezüglich *sommersmogbildendem Potenzial* und *Versäuerungspotenzial* resp. der *Giftwirkung in Gewässern und auf Böden* von einiger Bedeutung. Auch die Werkstoffwahl bei den Supermarkt-Verteilungen (rostfreier Stahl oder Kupfer) kann das Ergebnis bezüglich *Versäuerungspotenzial* beeinflussen.
  - Sofern die Energieeffizienz der zur Diskussion stehenden Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln deutlich schlechter ist als bei vergleichbaren Anlagen mit HFCs, müssen die Entscheidungsträger eine Gewichtung der verschiedenen Umweltwirkungen vornehmen. Werden *Energieressourcenschonung*, *Versäuerung*, *Sommersmog*, *Gewässergiftigkeit* und die *Emission radioaktiver Isotope* (und die damit zusammenhängende krebserzeugende und erbgutverändernde Wirkung) deutlich wichtiger eingestuft als *Treibhauseffekt*, *Ozonschichtabbau* und *Bodengiftigkeit*, so sind energieeffizientere Anlagen im Vorteil.
  - Fokussieren die Entscheidungsträger auf *Treibhauseffekt*, *Ozonschichtabbau* und *Bodengiftigkeit*, so können gewisse Einbussen bei der Energieeffizienz von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln toleriert werden. Sollte der *Ozonschichtabbau* als alleiniges Umweltkriterium massgebend sein, so weisen Propan, Ammoniak und CO<sub>2</sub> Vorteile auf, wenn die Produktion teilhalogener Kältemittel (teilweise) ohne Nachverbrennung erfolgt.
  - Die hier gezeigten Ergebnisse können nicht ohne weiteres auf die Situation in anderen Ländern oder auf anderen Kontinenten übertragen werden. Die Rahmenbedingungen bezüglich Energiepolitik und Luftreinhaltung (Art der Strombereitstellung, Emissionsstandards in Industrie und in Kraftwerken) können sich stark unterscheiden und andere umweltliche Schwerpunkte aufzeigen.
  - Die Studie macht keine Aussagen über die umweltliche Relevanz der hier untersuchten kältetechnischen Anlagen im Vergleich zu alternativen technischen Lösungen. Ob aus umweltlicher Sicht ein Kaltwassersatz einzusetzen oder andere Lösungen (z.B. Verdun-

stungskühlung, Reduktion der Wärmelasten) zu bevorzugen wären, sollte vorgängig mit Hilfe einer Ökobilanz überprüft werden.

Die Folgerungen können wie folgt zusammengefasst werden:

Für in der Schweiz betriebene oder in Betrieb zu nehmende kältetechnische Anlagen können die folgenden zwei Situationen unterschieden werden:

- *Gleiche oder bessere Energieeffizienz der Anlagen mit natürlichen Kältemitteln:*  
Anlagen mit natürlichen Kältemitteln weisen bis auf eine Ausnahmen (*Sommersmog* bei Propan) erkennbare bis deutliche umweltliche Vorteile gegenüber Systemen mit teilhalogenierten Kältemitteln auf.
- *Schlechtere Energieeffizienz der Anlagen mit natürlichen Kältemitteln:*  
Eine Güterabwägung ist erforderlich zwischen der *Schonung nicht erneuerbarer Primärenergien*, der *Versäuerung*, dem *Sommersmog*, der *Giftwirkung in Gewässern* und der *Emission radioaktiver Emissionen* einerseits und dem *Treibhauseffekt*, dem *Ozonschichtabbau* und der *Giftwirkung auf den Boden* andererseits, um die Frage des umweltlichen Vorteils natürlicher oder teilhalogenerter Kältemittel beantworten zu können.

Das erhöhte *ozonschichtabbauende Potenzial* der HFC-Aggregate könnte durch konsequente Nachverbrennung der in der Herstellung von HFCs entstehenden Nebenprodukte auf das Niveau von Propan- oder Ammoniak-Aggregaten gesenkt werden.

Können die ehrgeizigen Ziele sehr tiefer Verlustmengen beim Befüllen, Betreiben und Entsorgen kältetechnischer Anlagen erreicht werden (<1% pro Jahr), sind aufgrund der umweltlichen Stoffeigenschaften der Kältemittel praktisch keine Unterschiede mehr auszumachen.

Unabhängig vom gewählten Kältemittel ist der energetischen Optimierung bei Planung, Betrieb und Wartung von kältetechnischen Anlagen ein besonderes Augenmerk zu widmen.

# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Einleitung

Im Jahre 1996 hat das Bundesamt für Energie eine Ökobilanz-Studie zum Thema "Umweltrelevanz alternativer Kältemittel" veröffentlicht (Weibel 1996). Seither sind in verschiedenen Bereichen neue Erkenntnisse gewonnen worden, welche eine Neu Beurteilung der Situation angemessen erscheinen liessen. Die Entwicklung von Aggregaten auf der Basis natürlicher Kältemittel ist weiter fortgeschritten. Es sind neue Kältemittelgemische entwickelt worden, die sich für Sanierungen von Anlagen mit Fluorchlorkohlenstoffen (FCKW, CFC) oder Fluorchlorkohlenwasserstoffen (H-FCKW, HCFC) eignen. Zudem sind verschiedene Erfahrungen mit dem Schadstofftransport und der Deposition des persistenten Abbauproduktes des Fluorkohlenwasserstoffes HFC-134a, Trifluoressigsäure, gemacht und in wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert worden. Nicht zuletzt wurden in der Ökobilanzierung die Bewertungsverfahren von Schadstoffen und Ressourcen innerhalb einzelner Umweltwirkungskategorien weiterentwickelt.

## 1.2 Zielsetzung

Das Projekt "Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel" hat zum Ziel, die lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen des Einsatzes sogenannt "natürlicher" Kältemittel (Ammoniak, Propan und Kohlendioxid) und teilhalogener Kohlenwasserstoffe in Wärmepumpen und Kälteanlagen zu quantifizieren und zu vergleichen. Es soll eine Grundlage geschaffen werden, die es Anlagebetreibern und Herstellern erlaubt, eigene Anlagen auf der Basis weniger Kenndaten bezüglich Umweltauswirkungen zuverlässig beurteilen und Optimierungspotenziale erkennen zu können.

Die Umweltrelevanz wird auf der Ebene einzelner Umweltwirkungen (wie Treibhauseffekt, Ozonschichtabbau, Versäuerung, etc.) quantifiziert. In der Resultatdiskussion werden auch die Herkunft relevanter Anteile der Gesamtumweltbelastung ausgewiesen, Sensitivitäten bezüglich massgebender Parameter (Kältemittelverluste, Strombereitstellungsart, Jahresarbeitszahl) aufgezeigt und die Datenqualität besprochen. Zudem wird auf Besonderheiten bei der Benutzung der Ergebnisse für die Beurteilung eigener, spezifischer Anlagen hingewiesen.

Die Studie soll weiter Aufschluss geben über den Stellenwert der Umweltwirkungen von Abbauprodukten teilhalogener Kohlenwasserstoffe (insb. Trifluoressigsäure, TFA) in Ökobilanzen von Kälteanlagen.

## 1.3 Übersicht über den Bericht

Der vorliegende Schlussbericht und der Anhangband sind wie folgt aufgebaut: In Kap. 2 wird die Methode der Ökobilanzierung kurz vorgestellt und mit den Anforderungen der einschlägigen internationalen Norm verglichen. Kap. 3 enthält Ausführungen zu den wesentlichen Annahmen und Entscheiden, die zur Bearbeitung der Fragestellung notwendig waren. Darunter fallen insbesondere die Wahl der zu untersuchenden Systeme, die Frage der Systemgrenzen, der Allokation (Zuteilung der Emissionen auf einzelne Produkte bei gleichzeitiger Herstellung mehrerer Produkte), der Strommixwahl und - von zentraler Bedeutung - die Auswahl der in der Wirkungsabschätzung berücksichtigten Umwelteffekte.

In Kap. 4. werden die kältetechnischen Systeme kurz beschrieben und die ökobilanzrelevanten Kenngrößen aufgeführt. Zudem werden auch die verwendeten Strommixmodelle und die Herstellung der Kältemittel summarisch und mit Gewicht auf zentrale Kenngrößen beschrieben.

Kap. 5 enthält eine ausführliche Resultatdiskussion. Für einen Wärmepumpentyp werden neben den Gesamtergebnissen auch je eine Dominanzanalyse bezüglich Prozessschritte und bezüglich Schadstoffe gezeigt. Zudem wird der Einfluss der Strombereitstellung diskutiert. Alle vier betrachteten kältetechnischen Systeme werden zudem auf der Basis zukünftiger tieferer Kältemittel-Verlustmengen verglichen. In separaten Unterkapiteln wird der Einfluss der Variation der Jahresarbeitszahl resp. des Strombedarfs auf die Ergebnisse ausführlich diskutiert (Unterkap. 5.6), und Kenngrößen für die umweltliche Evaluation neuer Kälteanlagen gegeben (Unterkap. 5.8). Das Kapitel wird mit Ausführungen zur Datenqualität abgerundet. Kap. 6 enthält praktische Hinweise und einen Ausblick.

Danach folgen der Review-Bericht von Dr. R. Bretz, eine Liste der verwendeten Abkürzungen und das Literaturverzeichnis. Im Anhangband sind die ausführlichen Herleitungen der Sachbilanzdaten für Kältemittel und deren Ausgangsprodukte, der Herstellung der Komponenten, Anlagen und Betriebsstoffe, des Betriebs und der Entsorgung der Anlagen dokumentiert. Insbesondere sind wichtige Kenndaten der für die Analyse zur Verfügung stehenden Betriebsdaten von gut dreissig Supermarkt-Kälteanlagen aufgeführt. Zudem sind weitergehende Ausführungen zur Wahl des adäquaten Strommixes, und zum Stoffschicksal und der ökotoxischen Wirkung von Trifluoressigsäure (TFA) enthalten.

## 2 Methodik Ökobilanzierung

### 2.1 Vorgehen

Die Ökobilanz bzw. das Life Cycle Assessment (LCA) ist eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt<sup>7</sup> verbundenen Umweltauswirkungen. Die Ökobilanz beruht auf einem Lebenszyklus-Ansatz. Damit werden die Umweltauswirkungen eines Produktes von der Wiege bis zur Bahre („cradle to grave“) oder eben von der Rohstoffentnahme bis zur Entsorgung des Produktes und der Produktionsabfälle erfasst und beurteilt.

Die Internationale Normierungsorganisation ISO hat die Vorgehensweise innerhalb der Ökobilanz-Methode mit der Norm ISO 14040 (ISO 1997) in ihren Grundzügen und mit ISO 14041 (ISO 1998a) für die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie die Sachbilanz standardisiert. Die Normen zu den weiteren Phasen der Ökobilanz liegen als Entwürfe zur Abstimmung vor (ISO 1998b&c).

Eine Ökobilanz lässt sich gemäss ISO 14040 grob in vier Phasen unterteilen (siehe Fig. 2.1): (1) Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, (2) Sachbilanz, (3) Wirkungsabschätzung und (4) Auswertung.

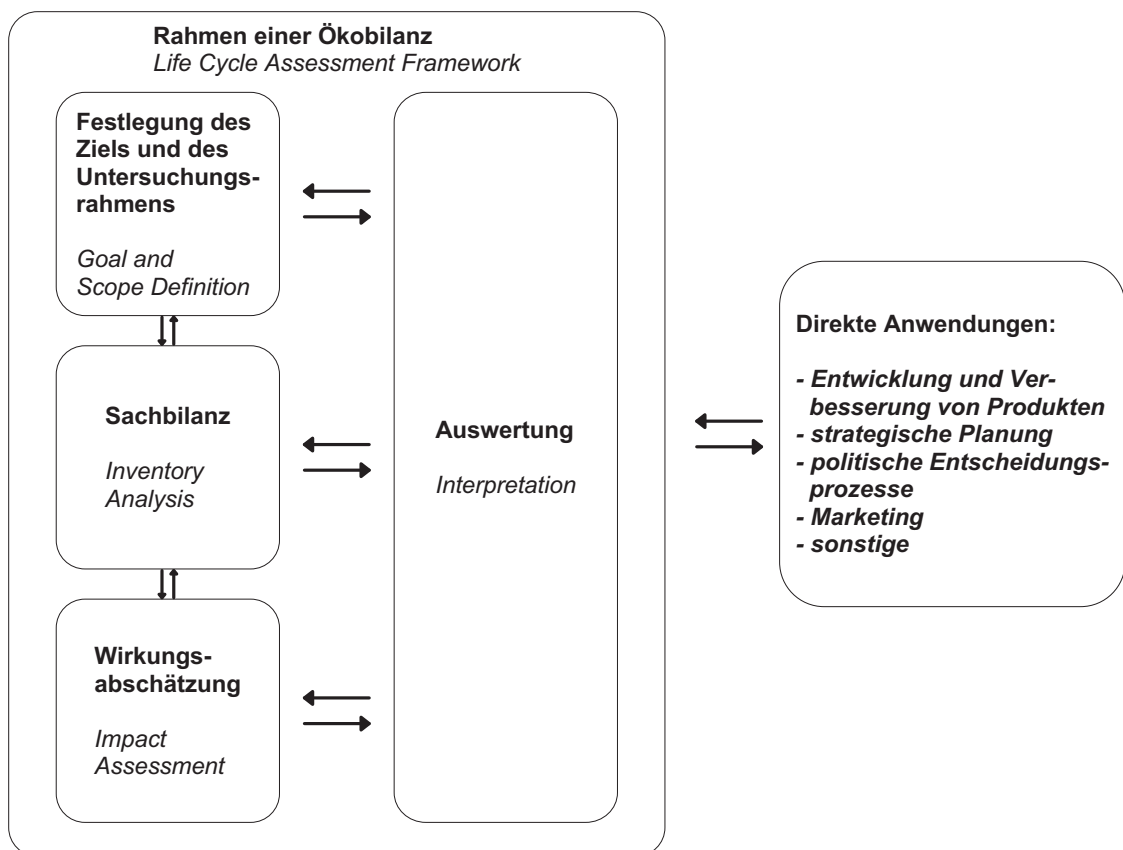


Fig. 2.1: Bestandteile einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA); Bezeichnungen in **deutsch** und *englisch*; gemäss ISO 14040 (ISO 1997).

<sup>7</sup> Der Begriff Produkt schliesst hier Dienstleistungen mit ein.

Die *Zieldefinition* (Phase 1) enthält die Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes, der sogenannten funktionellen Einheit. Zudem werden diejenigen Umweltaspekte definiert, die in der Auswertung berücksichtigt werden sollen. Der *Untersuchungsrahmen* wird abgesteckt, indem die für ein Produkt massgebenden Prozesse bestimmt und beschrieben werden.

In der *Sachbilanz* (=Ökoinventar, Phase 2) werden die Umwelteinwirkungen und der Bedarf an Halbfabrikaten, Hilfsstoffen und Energie der am Produktlebenszyklus beteiligten Prozesse erfasst und zusammengestellt. Diese Daten werden in Bezug gesetzt zum Untersuchungsgegenstand, der funktionellen Einheit.

Ausgehend von der Sachbilanz wird die *Wirkungsabschätzung* (Phase 3) durchgeführt. In ISO 14040 ist die Wirkungsabschätzung als ein einziger Schritt dargestellt, enthält aber die folgenden sieben Teilschritte (ISO 1998b):

- Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Modellen: Hier werden jene Festlegungen spezifiziert, die in der Zieldefinition grob umrissen wurden.

*Beispiel:* Die Wirkungskategorie "Treibhauseffekt" wird ausgewählt, da sie sowohl Schäden an der menschlichen Gesundheit wie auch Ökosystemschäden verursacht. Ausserdem wird festgelegt, dass die Modelle des IPCC<sup>8</sup> verwendet werden sollen und der Indikator "kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente" gewählt werden soll (und nicht z.B. Strahlungsveränderung oder Temperaturveränderung).

- Zuordnung der Sachbilanz-Ergebnisse (Klassifizierung): Dieser Schritt umfasst die Einteilung der Umwelteinwirkungen nach Umweltauswirkungen, die sie verursachen.

*Beispiel:* Die Substanzen CO<sub>2</sub> und Methan werden beide der Klasse "Treibhauseffekt" zugeordnet.

- Berechnung der Wirkungsindikator-Ergebnisse (Charakterisierung): Um verschiedene Substanzen mit gleicher Umweltauswirkung vergleichen zu können, werden sie entsprechend ihrer Wirkung gewichtet. Dazu wird eine Referenzsubstanz bestimmt, bezüglich derer die Wirksamkeit der andern Schadstoffe ermittelt wird.

*Beispiel:* Die Umweltauswirkung "Treibhauseffekt" wird auf der Basis der Treibhauspotenziale (*global warming potential, GWP*) quantifiziert. Referenzsubstanz ist CO<sub>2</sub>. GWP hat deshalb die Dimension [kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent]. Methan hat eine 21-mal grössere Treibhauswirkung als CO<sub>2</sub> (Houghton et al. 1996). Eine Emission von z.B. 1'000t Methan hat somit ein Treibhauspotenzial von 21'000t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten.

Diesen drei verbindlichen Schritten können folgende optionale Schritte folgen:

- Berechnung der Höhe der Wirkungsindikator-Ergebnisse im Verhältnis zu einem oder mehreren Referenzwert(en) (Normierung): Die charakterisierten Auswirkungswerte werden normalisiert. Dazu werden die Umweltauswirkungen des Untersuchungsgegenstandes in Bezug gesetzt zu den gesamten Umweltauswirkungen einer Region (z.B. Europas oder der Schweiz). Mittels Normierung wird somit der Beitrag der produktspezifischen Umweltauswirkungen an den gesamten (europäischen oder schweizerischen) Umweltauswirkungen bestimmt. Das Resultat der Normierung sind standardisierte, dimensionslose Auswirkungswerte.

*Beispiel:* Die gesamteuropäischen Treibhausgasemissionen des Jahres 1990 betragen ca. 6.5 Mia. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Die Emission von 21'000t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (1'000t Methan) entspricht somit einem normierten Auswirkungswert von  $3.2 \cdot 10^{-6}$ . Das heisst, dass das untersuchte Produktsystem, welches 1'000t Methan emittiert, einen Beitrag von 3.2 Million-

---

<sup>8</sup> Für Abkürzungen siehe am Ende dieses Schlussberichtes vor dem Literaturverzeichnis.

stel (ppm) an den Treibhauseffekt des Jahres 1990 beiträgt und damit auch diesen Anteil der Auswirkungen verantwortet.

- Ordnung: Die normalisierten Auswirkungswerte pro Wirkungskategorie können nun sortiert und möglicherweise klassiert werden.

*Beispiel:* Die verbal-argumentative Bewertung nach UBA (Schmitz et al. 1994) ordnet die Wirkungskategorien nach verschiedenen Kriterien.

- Gewichtung: Die Auswirkungswerte werden weiter zusammengefasst (bewertet). Gemäss ISO 14040 (ISO 1997) darf dies bei internen Studien und bei externen nicht-vergleichenden Studien gemacht werden. Bei extern kommunizierten Produktvergleichen wie der vorliegenden Studie soll hingegen keine Vollaggregation vorgenommen werden. Zudem sollen in allen Fällen die vor der Gewichtung vorhandenen Daten verfügbar bleiben.

*Beispiel:* Der oben errechnete normalisierte Auswirkungswert für 21'000t CO<sub>2</sub>-Äquivalente ( $3.2 \cdot 10^{-6}$ ) wird gemäss Eco-indicator 95 (Goedkoop 1995) mit dem Reduktionsfaktor 2.5 gewichtet (d.h. multipliziert).

- Analyse der Datenqualität: Es wird untersucht, welchen Einfluss die identifizierten Unsicherheiten auf die Höhe der Auswirkungswerte pro Wirkungskategorie und damit auf die Aussagekraft der Ergebnisse haben.

In der *Auswertung* (Phase 4) werden die Resultate der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung entsprechend dem festgelegten Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz zusammengefasst. Es werden Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen formuliert.

## 2.2 ISO-konform oder nicht?

Die vorliegende Studie versucht so weit wie möglich den Anforderungen der ISO-Normen gerecht zu werden. Es wird auf eine Gesamttaggregation verzichtet (siehe Abschnitt 3.4.4)<sup>9</sup>, die Sachbilanzen werden so detailliert und nachvollziehbar wie möglich dokumentiert. Die Formulierung der Fragestellung und der zu berücksichtigenden Umweltwirkungen erfolgte in Diskussion mit einer Projektbegleitgruppe. Der Entwurf dieses Schlussberichts und des Anhangbandes wurde in verschiedenen Stadien des Projektes in der Projektbegleitgruppe diskutiert. Ein externes Review wurde durchgeführt und der Kommentar des Reviewers ist im vorliegenden Schlussbericht in voller Länge wiedergegeben (siehe Kap. 7).

Gemäss den Anforderung von ISO (1998b) wurden soweit bekannt auch möglicherweise betroffenen Kreise eingeladen, zu den Sachbilanzdaten, sowie zu den Ergebnissen und Folgerungen der Studie Stellung zu nehmen. Einzelne Industrievertreter haben von diesem Angebot Gebrauch gemacht und damit geholfen, die Qualität der Studie deutlich zu steigern.

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte kann die vorliegende Studie als ISO-konform betrachtet werden.

---

<sup>9</sup> Ob eine Gewichtung als grundsätzlich nicht ISO-konform zu gelten hat, ist in Fachkreisen jedoch noch umstritten.

## 3 Untersuchungsrahmen

### 3.1 Übersicht

Im diesem Kapitel wird der Untersuchungsrahmen beschrieben. Dies beinhaltet einerseits die allgemeinen Festlegungen für die Sachbilanzen (Kap. 3.3). Andererseits werden die Umweltwirkungsindikatoren beschrieben, mithilfe derer die Umweltrelevanz der hier untersuchten kältetechnischen Anlagen quantifiziert werden soll (Kap. 3.4). Zuerst wird jedoch eine Begründung für die Auswahl der untersuchten Systeme gegeben (Kap. 3.2).

### 3.2 Systemauswahl

#### 3.2.1 Kältetechnikanwendungen

Die Kältetechnik wird in vielen Bereichen und mit sehr unterschiedlichen Systemanforderungen angewendet. Für diese Studie musste eine Auswahl getroffen werden, die sich nach der umweltlichen Relevanz und der Beeinflussbarkeit durch die schweizerische Politik richtete. Aus den in Tab. 3.1 aufgeführten Anwendungen wurden vier Systeme ausgewählt.

	Beispiel Anwendung	Argument
Haushaltgeräte	Kühlschrank	in CH nur Kohlenwasserstoffe als Kälte- und Isoliermittel
Gebäudeklima	Kaltwassersatz	Kohlenwasserstoffe und Ammoniak in Konkurrenz zu HFC
Gewerbekälte	Supermarkt-Kälteanlage	Ammoniak in Konkurrenz zu HFC
Industriekälte	Solesatz	Kohlenwasserstoffe und Ammoniak in Konkurrenz zu HFC
Transportkälte/ -klima	Pkw-, Bahn-Klimaanlage	100% Import, da keine Produktion im Inland
Raumwärme	Wärmepumpe	Kohlenwasserstoffe in Konkurrenz zu HFC

Tab. 3.1: Anwendungsbereiche der Kältetechnik und Hauptargument, die zur Auswahl der in dieser Studie bilanzierten Systeme (kursiv) geführt haben.

Bei den Haushaltgeräten und hier insbesondere bei den für den schweizerischen Markt hergestellten Kühlschränken werden nur noch Kohlenwasserstoffe eingesetzt. Hier besteht somit aus Sicht der Behörden kein Evaluationsbedarf. Der Bereich der Transportkälte wird als umweltlich sehr relevant betrachtet. Dies einerseits infolge der hohen Verlusten mobiler Systeme und andererseits infolge des erhöhten Energiebedarfs (insbesondere bei Klimaanlagen) und den damit verbundenen erhöhten Schadstoffemissionen. Erste Abschätzungen der ADEME (1996) haben gezeigt, dass durchschnittlich pro Fahrzeug und Jahr rund 1 Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalente zusätzlich durch den erhöhten Treibstoffbedarf für den Betrieb der Kälteanlage (30%) und den Kältemittelverlust (70%) emittiert werden. Da jedoch keine mobilen Klimaanlagen in der Schweiz hergestellt werden, sind die direkten Einflussmöglichkeiten gering und es wurde von einer Bilanzierung von Aggregaten dieses Wachstumssektors abgesehen.

In den anderen vier Anwendungsgebieten stehen die Fluorkohlenwasserstoffe in Konkurrenz zu den natürlichen Kältemitteln, wobei die natürlichen Kältemittel und insbesondere Ammoniak in gewissen Bereichen marktdominierend sind (Industriekälte), in anderen jedoch eine (noch) marginale Bedeutung haben (Supermarkt-Kälteanlagen).

Der Markt der serienmässig hergestellten Kleinwärmepumpen ist für die Kohlenwasserstoffe interessant, wobei deren Anwendung mit Berufung auf die Produkthaftung durch einzelne (v.a. US-amerikanische) Kompressorenhersteller stark behindert wird.



Aus den aufgeführten Überlegungen wurden deshalb die folgenden Systeme ausgewählt:

- Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen zur Gebäudeheizung (7 resp. 50kW<sub>th</sub>),
- Kaltwassersatz für Gebäudeklimatisierung (400kW<sub>th</sub>, 6/12°C, 1'500h Jahreslaufzeit) und Solesatz für industrielle Tiefkühlung (120kW<sub>th</sub>, -25/-30°C, 8'000h Jahreslaufzeit),
- Supermarkt-Kälteanlage (Normal- und Tiefkühlung) mit ca. 100kW<sub>th</sub> Kälteleistung.

Damit kann der Einsatz verschiedener Kältemittel, unterschiedlicher Anlagegrösse (von einigen kW bis einige hundert kW) und unterschiedlicher Systemeigenschaften modelliert werden. Letzteres zeigt sich beispielsweise im unterschiedlichen Strombedarf pro kg Kältemittel (Kaltwasser- versus Solesatz), in den stark unterschiedlichen Laufzeiten aber auch in den stark unterschiedlichen Verlustraten während des Betriebs der Anlagen.

### 3.2.2 Kältemittel

Für die im vorstehenden Abschnitt ausgewählten Anwendungen stehen verschiedene Kältemittel und Kältemittelgemische zur Verfügung.

Um einen repräsentativen Querschnitt über heute vorwiegend eingesetzte und in Zukunft möglicherweise einsetzbare Kältemittel zu erhalten, wurden Ammoniak, Propan, Kohlendioxid, HFC-134a, HFC-404A, HFC-407C, HFC-410A, Isceon 59 und, als Referenzkältemittel, HCFC-22 bilanziert. Die [Tab. 3.2](#) gibt eine Übersicht über die jeweils eingesetzten Kältemittel und die Art und Weise, wie Informationen über wichtige Kenngrössen vorgelegt haben.

	Wärmepumpen	Kaltwasser-/ Solesätze	Supermarkt- Kälteanlagen
Ammoniak	-	S	M
Propan	S	S	-
CO <sub>2</sub>	A	-	-
HFC-134a	S	S	M
HFC-404A	S	S	M
HFC-407C	S	S	-
HFC-410A	-	S	-
Isceon 59	A	S	-
HCFC-22	S	S	M

Tab. 3.2: In den untersuchten Kältetechnik-Systemen eingesetzte Kältemittel.

-: Nicht untersucht.

A: Daten wie Energieverbrauch, Jahresarbeitszahl, Kältemittelmengen beruhen auf Annahmen.

M: Daten wie Energieverbrauch, Kältemittelfüllmengen basieren auf Messungen resp. Stücklisten.

S: Daten wie Energiebedarf, Jahresarbeitszahl, Kältemittelfüllmengen basieren auf Simulationsergebnissen.

## 3.3 Vorgehensweise in der Sachbilanz

### 3.3.1 Vergleichsbasis (Funktionelle Einheit)

In dieser Studie werden ausgewählte Umweltwirkungen der vorgehend aufgelisteten Systeme der Kältetechnik quantifiziert. Das Hauptaugenmerk liegt auf den Unterschieden, die sich durch den Einsatz verschiedener Kältemittel ergeben. Um den Einsatz verschiedener Kältemittel umweltlich vergleichen zu können, müssen die verschiedenen Lösungen eine äquiva-

lente (Dienst-)Leistung liefern. Zu diesem Zweck werden hier die folgenden funktionellen Einheiten (Bezugsgrößen) definiert:

*Wärmepumpen:*

Als Vergleichsbasis wird bei den Wärmepumpen die an das Wärmeverteilnetz abgegebene Wärmeenergie (min. Aussentemperatur  $-8^{\circ}\text{C}$ , max. Vorlauftemperatur  $45^{\circ}\text{C}$ ) verwendet. Da die Wärmeverteilung im Haus von der Wahl des Kältemittels unabhängig ist und lediglich Niedertemperaturheizsysteme betrachtet werden, kann auf das Bilanzieren der zusätzlichen Systemkomponente Verteilnetz verzichtet werden.

*Kaltwasser- und Solesätze:*

Bei den Kaltwasser- und Solesätzen wird aus demselben Grund die dem Kälteverteilnetz (Kaltwassernetz  $6/12^{\circ}\text{C}$  resp. Solekreislauf  $-25/-30^{\circ}\text{C}$ ) entzogene Kälteenergie als Bezugsgrösse verwendet.

*Supermarkt-Kälteanlagen:*

Aufgrund der Erfahrungen eines Grossverteilers eignet sich bei Supermarkt-Kälteanlagen die Bezugsgrösse "Laufmeter Kühlmöbel" (Berger 1999). Um dem unterschiedlichen Betriebsenergieaufwand von Kühlmöbeln (Kühlvitrine, Bedienungstheke, Kühlinsel, etc.) Rechnung tragen zu können, werden Korrekturfaktoren eingeführt. Da hier nicht die Frage des geeigneten Kühlmöbels im Vordergrund steht, wird auf das Mitbilanzieren der Herstellung der Kühlmöbel verzichtet.

Damit ist für alle Systeme eine ausreichende aber trotzdem nicht vollständige Vergleichbarkeit der Systeme erreicht.

Bei den Wärmepumpen sind einzelne Kältemittel bei grossen Temperaturspreizungen auf der Wärmesenkenseite besser geeignet als andere (insbesondere  $\text{CO}_2$ ). Dadurch kann die Auslegung des hier gewählten Heizsystems für einzelne Kältemittel energetisch nur suboptimale Lösungen zulassen. Durch die Variation der Jahresarbeitszahl wird jedoch derartigen Einflüssen Rechnung getragen.

Auch bei den Kaltwasser- und Solesätzen sind einzelne Kältemittel nicht in ihrem optimalen Bereich eingesetzt. Dies betrifft vor allem den Tiefkühlbereich, wo auch Anlagen mit den Kältemitteln HFC-134a, HFC-407C und Isceon 59 bilanziert werden.

Bei den Supermarkt-Kälteanlagen sind in der Regel auch Kühlräume an die Kälteanlage angeschlossen. Diese werden mit der hier gewählten funktionellen Einheit nicht berücksichtigt. Aufgrund der Erfahrungen von Berger (1999) beeinflussen diese Kühlräume die Relationen bezüglich spezifischem Energieverbrauch aber nur wenig.

### 3.3.2 Alternative Technologien

Die vorliegende Studie vergleicht ausgewählte Umweltwirkungen von kältetechnischen Systemen, die auf dem Einsatz von Kältemitteln beruhen. Sie klammert damit Fragestellungen aus, die alternative Technologien betreffen, die dieselbe Funktion erfüllen könnten.

So kann Niedertemperaturwärme auch mit Erdgas-, Heizöl- oder Holzfeuerungen bereitgestellt werden. Auch Sonnenkollektoren in Kombination mit einem deutlich erhöhten Wärmeschutz und einem Wärmespeicher sind eine denkbare Alternative zum hier bilanzierten Heizsystem.

Im Gebäudebereich sind neben der klassischen Technologie der Kaltwassersätze verschiedene alternative Kühlmöglichkeiten verfügbar. Erwähnt seien hier die Nachtauskühlung, die freie Kühlung, oder die Verdunstungskühlung mit und ohne Lufttrocknung (Tassou & Lau 1998).

### 3.3.3 Systemgrenzen

Die bilanzierten Systeme sind so definiert, dass sie innerhalb einer Anwendung (Wärmepumpe, Kaltwassersatz, etc.) eine ausreichend vergleichbare (Dienst-)Leistung erbringen. Die Prozessketten sind entsprechend nicht vollständig und somit nur bedingt für einen Vergleich mit den oben genannten alternativen Technologien geeignet.

Die Energieträgerbereitstellung, die Herstellung von vielen Grundstoffen und Halbfabrikaten, die Transport- und Entsorgungsdienstleistungen sind gemäss den "Ökoinventaren von Energiesystemen" (Frischknecht et al. 1996) und den "Ökoinventaren von Entsorgungsprozessen" (Zimmermann et al. 1998) bilanziert. Entsprechend sind die Infrastrukturaufwendungen (wie Strassen, Kraftwerksbau, Überlandleitungen etc.) in die Sachbilanzen miteinbezogen.

Bei der Bilanzierung der kältetechnischen Systeme werden die Aufwendungen zur Erstellung der Anlagen wie Bau des Kompressors, der Kälteverteilungen, etc. berücksichtigt. Bei der Herstellung der Komponenten oder auch der Kältemittel und deren Ausgangsprodukte wird jedoch auf eine Bilanzierung der Infrastrukturaufwendungen (Fabrikationsanlagen) verzichtet. Aufgrund der Erfahrungen früherer Untersuchungen ist der gemachte Fehler für die Aussagegenauigkeit nicht relevant (vgl. Frischknecht et al. 1995).

Unfälle, die mit einer gewissen Häufigkeit<sup>10</sup> auftreten, sind ebenfalls Bestandteil des Bilanzgebietes. Sehr seltene aber umso folgenschwerere Unfälle (wie z.B. Kernschmelzung bei Kernkraftwerken, Öltankerhavarien mit einer Schadenssumme von über 5 Mio. US-\$ oder der Bruch einer Staumauer) bleiben aus methodischen Gründen ausgeklammert. Die mit derartigen Unfällen verbundenen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt sollten mit geeigneteren Instrumenten wie beispielsweise der Risikoanalyse quantifiziert werden (siehe auch Wolfer & Seiler 1999).

Das ungewollte Entweichen von Kältemitteln beim Befüllen, während des Betriebs oder beim Rückbau einer Anlage wird jedoch als regelmässig auftretendes Ereignis betrachtet. Deshalb enthalten die Verlustmengen einen Anteil dieser ereignisbedingten Emissionen.

### 3.3.4 Allokationsprobleme

Bei der Bilanzierung von Produkten und Dienstleistungen müssen die zu betrachtenden Prozessketten von den übrigen wirtschaftlichen Aktivitäten getrennt werden. Werden in einem Prozess mehrere Produkte gleichzeitig hergestellt, müssen Kriterien beigezogen werden, mithilfe derer die Aufwendungen und Emissionen auf die Kuppelprodukte aufgeteilt werden können (Allokation).

Wie die Allokationsprobleme bei der Energieträgerbereitstellung gelöst worden sind, ist in Frischknecht et al. (1996:Teil III:4ff.) dokumentiert. In dieser Studie sind bei verschiedenen Prozessen zusätzliche Allokationsentscheide gefällt worden. Eine Übersicht über diese Entscheidung gibt Tab. 3.3.

Die hier aufgeführten Allokationen haben in den meisten Fällen einen untergeordneten Einfluss auf die Ergebnisse. Dies soll im einzelnen kurz erläutert werden.

Der Entscheid, die Erdsonde auf *eine* Wärmepumpengeneration abzuschreiben entspringt einer Strategie der Vorsicht. Da es nicht gesichert ist, dass nach Ablauf der Funktionsdauer der ersten Wärmepumpe wiederum eine Wärmepumpe installiert wird, kann die gewählte Vorgehensweise als konservativ (oder risikoscheu) bezeichnet werden. Umgekehrt ist auch eine eher risikofreudige Haltung denkbar, indem die Aufwendungen für die Erdsonde auf zwei

---

<sup>10</sup> Unfälle, die mit einer Häufigkeit von  $1 \cdot 10^{-3}$  pro GWa oder höher eintreten, werden in Frischknecht et al. (1996) berücksichtigt.

Generationen von Wärmepumpen und damit auf 30 bis 40 Jahre Funktionsdauer "abgeschrieben" werden. Dieser Entscheidung ist jedoch von der Wahl des Kältemittels unabhängig und somit nicht ergebnisrelevant.

Die beim Betreiben von Kälteanlagen freigesetzte Abwärme kann unabhängig vom gewählten Kältemittel genutzt werden. Der Entscheidung, diese allfällige Abwärmenutzung nicht zu berücksichtigen, ist deshalb ebenfalls nicht ergebnisrelevant.

Die Herstellungsaufwendungen und Emissionen des Kompressors sind von stark untergeordneter Bedeutung. Deshalb erübrigt sich hier eine Diskussion des Allokationsschlüssels ebenfalls.

Bei der Herstellung der Ausgangsrohstoffe der Kältemittelproduktion wird die Maximalvariante "Alles auf das hier interessierende Zielprodukt" gewählt. Dies entspricht bezüglich Energiebedarf und Feedstock-Produktion einem Szenario des "Schlechtesten Falles", der jedoch nicht resultatbestimmend ist. Die Prozessemissionen - und nur diese beeinflussen (insbesondere in der Wirkungskategorie "Ozonschichtabbau") die Ergebnisse merklich - können jedoch den hier interessierenden Zielprodukten zu 100% zugeordnet werden, da die Zielprodukte für diese Emissionen verantwortlich sind.

Durch eine detaillierte Analyse einer Raffinerie konnten die für einzelne Erdölprodukte relevanten Teilprozesse eruiert werden. Für die in Teilprozessen benötigte Energie, die erforderlichen Katalysatoren und die anfallenden Wasserschadstoffe konnten produktspezifische Allokationsfaktoren bestimmt werden. Innerhalb eines Teilprozesses wurde die Masse als arbiträres Allokationskriterium verwendet, da die Zwischenprodukte nicht auf öffentlichen Märkten gehandelt werden und deren Heizwerte sich nur unwesentlich unterscheiden.

Bei der Ammoniakherstellung wird die Reinigung des Rohgases von  $\text{CO}_2$  als Recycling-Prozess betrachtet. Entsprechend wird die Bereitstellung der Kohlenwasserstoffe für das  $\text{CO}_2$  in Form von Erdgas oder Heizölen der Ammoniakherstellung, der Energieaufwand zum Abtrennen des  $\text{CO}_2$  aber dem  $\text{CO}_2$  zugeordnet. Das bei der Rückgewinnung entweichende  $\text{CO}_2$  wird nach Massgabe der Massen der beiden Produkte Ammoniak und Kohlendioxid aufgeteilt. Alle drei Entscheidungen sind jedoch für die Ergebnisse der kältetechnischen Anwendungen von stark untergeordneter Bedeutung.

<b>Prozessschritt/ Produkte</b>	<b>Gegenstand</b>	<b>Allokationskriterium</b>
<i>Erdsonden-Wärmepumpe:</i>		
- Wärme von 1. Wärmepumpe - Wärme von 2. Wärmepumpe	Aufwendungen und Emissionen der Erstellung der Erdwärmesonde	Alles auf den Betrieb der ersten Wärmepumpe (15 resp. 20 Jahre)
<i>Kaltwasser- und Solesatz:</i>		
- Kälte (Normal- und Tiefkühlung) - Abwärme	Energieaufwand, Prozessemissionen Luft, Anlagenbau	Alles auf Kälteerzeugung (die allfällig für Heizzwecke genutzte Abwärme wird als Nebenprodukt betrachtet)
<i>Supermarkt-Kälteerzeugung:</i>		
- Kälte (Normal- und Tiefkühlung) - Abwärme	Energieaufwand, Prozessemissionen Luft, Anlagenbau	Alles auf Kälteerzeugung (die allfällig für Heizzwecke genutzte Abwärme wird als Nebenprodukt betrachtet)
<i>Kompressor-Herstellung:</i>		
- Kompressoren versch. Leistung	Energieaufwand, Feedstock, Prozessemissionen Luft, Wasser	Gemäss Kompressorgewicht
<i>Ethylendichlorid:</i>		
- Ethylendichlorid - Wasser	Energieaufwand, Feedstock, Prozessemissionen Luft, Wasser	Alles auf Ethylendichlorid
<i>Methylenchlorid:</i>		
- Methylenchlorid - Salzsäure	Energieaufwand, Feedstock, Prozessemissionen Luft, Wasser	Alles auf Methylenchlorid
<i>Trichlormethan/ Tetrachlormethan:</i>		
- Trichlormethan/ Tetrachlormethan - Salzsäure	Energieaufwand, Feedstock, Prozessemissionen Luft, Wasser	Alles auf Trichlormethan/ Tetrachlormethan
<i>Trichlorethylen/ Perchlorethylen:</i>		
- Trichlorethylen/ Perchlorethylen - Wasser	Energieaufwand, Feedstock, Prozessemissionen Luft, Wasser	Alles auf Trichlorethylen/ Perchlorethylen
<i>HCFC-22/ HFC-134a etc.:</i>		
- HCFC-22/ HFC-134a etc. - Salzsäure	Energieaufwand, Feedstock, Prozessemissionen Luft, Wasser etc.	Alles auf HCFC-22/ HFC-134a
<i>Propan ab Raffinerie:</i>		
- Propan/ Butan - übrige Raffinerieprodukte	Energieaufwand, Feedstock, Emissionen Luft und Wasser, Abfälle	Masse (auf der Stufe Teilprozess wie atmosph. Destillation, oder Dampfreformieren); daraus Bestimmen von Energie-, Abwasser- und Katalysatorfaktoren
<i>Ammoniak-Herstellung:</i>		
- Ammoniak - CO <sub>2</sub>	Energieaufwand, Feedstock (Methan, Erdöl) CO <sub>2</sub> -Emissionen	siehe CO <sub>2</sub> -Rückgewinnung
<i>CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung:</i>		
- CO <sub>2</sub> - gereinigter Rohgasstrom (feedstock) der Ammoniakherstellung	Energieaufwand, Feedstock (Methan, Erdöl), CO <sub>2</sub> -Emissionen	Energieaufwand auf CO <sub>2</sub> , Feedstock auf Ammoniak CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Massgabe der Produktgewichte

Tab. 3.3: Ausgewählte Kuppelprozesse in den Sachbilanzen der bilanzierten kältetechnischen Systeme und dabei verwendete Allokationskriterien.

### 3.3.5 Strommix

Für die Berücksichtigung der Umwelteinwirkungen des Strombedarfs in Ökobilanzen können generell zwei Betrachtungsweisen unterschieden werden (vgl. Frischknecht 1998:S. 47ff.):

- beschreibende Analyse und
- entscheidorientierte Analyse.

Die beschreibende Analyse dient dazu, einen aktuellen oder vergangenen Zustand zu beschreiben. Firmen geben beispielsweise in ihrem Umweltbericht an, was sie im letzten Jahr produziert haben, welche Schadstoffmengen dabei emittiert und welche Abfallmengen produziert worden sind. Der europäische und der schweizerische durchschnittliche Strommix sind z.B. für beschreibende Analysen geeignet<sup>11</sup>.

Die entscheidorientierte Analyse demgegenüber versucht die Folgen eines Entscheides abzubilden. Eine Entscheidung kann einen Mehr- oder Minderverbrauch gegenüber dem heutigen Zustand zur Folge haben. In einer entscheidungsorientierten Betrachtung sollen die mit diesem Mehr- oder Minderverbrauch zusammenhängenden Aktivitäten berücksichtigt werden. Die Strombereitstellung mit einem deutschen Steinkohlekraftwerk, einem Gaskombikraftwerk, einem (französischen) Kernkraftwerk oder einem Gas-Blockheizkraftwerk sind Technologien, die bei einem allfälligen Mehr- oder Minderverbrauch zu- oder abgeschaltet werden (Grenztechnologien). Weitergehende Ausführungen finden sich im Anhangband.

In dieser Studie werden die folgenden Strombereitstellungsarten in Sensitivitätsbetrachtungen modelliert:

Beschreibende Analysen	Entscheidorientierte Analysen
<i>Schweizer Strommix (inkl. Stromhandel)</i>	Gasmotor-Blockheizkraftwerk <sup>2)</sup>
Westeuropäischer Strommix (UCPTE) <sup>1)</sup>	Gas und Dampf-Gaskraftwerk

Tab. 3.4: In dieser Studie verwendete Strommodelle zur Bereitstellung des Betriebsstroms für die betrachteten Anlagen.

*Kursiv:* Standardfall.

<sup>1)</sup>: Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité

<sup>2)</sup>: Mit Exergie als Allokationsschlüssel und Gasheizung als Spitzenkessel.

Wichtige Kenngrößen der genannten Strommodelle sind in Kap. 4.7 zusammengestellt. Die kompletten Eingabedaten sind im Anhangband dokumentiert.

## 3.4 Vorgehensweise in der Wirkungsbilanz

### 3.4.1 Einleitung

Bei der Beurteilung von Kältemitteln ist der TEWI (Total Equivalent Warming Impact) eine vertraute und weitverbreitete Kenngrösse. Sie beurteilt die Treibhausgasemissionen der Energiebereitstellung (indirekter Anteil) und der Kältemittlemissionen (direkter Anteil) von Kältetechnik-Anwendungen. Damit kann aber nur ein wenn auch wichtiger Aspekt der Umweltrelevanz von Kältemitteln abgedeckt werden. Die vorliegende Studie versucht diesbezüglich eine umfassendere Betrachtung, weshalb die folgenden Umweltwirkungen zur

<sup>11</sup> Die Wahl des geographischen Bereichs ist dabei von der Fragestellung abhängig. Für eine Beschreibung vergangener Aktivitäten in der Schweiz ist z.B. der schweizerische einem europäischen Strommix vorzuziehen. Der Stromhandel mit andern europäischen Ländern sollte jedoch berücksichtigt werden, wobei ökonomische und vertragliche gegenüber physikalischen Informationen bevorzugt werden sollten.

lich eine umfassendere Betrachtung, weshalb die folgenden Umweltwirkungen zur umweltlichen Beurteilung herangezogen werden:

- Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie,
- Treibhauspotenzial,
- Ozonschichtabbauendes Potenzial,
- Versäuerungspotenzial,
- Sommersmogbildendes Potenzial,
- Ökotoxizitätspotenzial aquatisch (Giftwirkung in Gewässern),
- Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch (Giftwirkung auf Böden), und
- Emission radioaktiver Isotope (krebserzeugende und erbgutschädigende Wirkung).

In den folgenden Abschnitten werden die Wahl dieser acht Umweltwirkungskategorien begründet und die Charakterisierungsfaktoren beispielhaft aufgezeigt. Anschliessend erfolgt eine Begründung, weshalb in dieser Studie auf eine Gesamttaggregation verzichtet wird.

### 3.4.2 Begründung der Auswahl

Aufgrund der Erkenntnisse über die Umweltbeeinträchtigung natürlicher und teilhalogener Kältemittel, die mit früheren Studien gewonnen worden sind, hat man sich in dieser Studie auf die folgenden acht Umweltwirkungen beschränkt:

#### *Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie:*

Der Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergie wird gewählt, da die Energieeffizienz in vielen Studien als die zentrale Grösse genannt wird und etliche Studien sich auf das Ausweisen des Primärenergiebedarfs beschränken. Es ist der einzige ressourcenorientierte Indikator dieser Studie.

#### *Treibhauspotenzial:*

Die Tatsache, dass die teilhalogenierten Kältemittel ein teilweise beträchtliches direktes Treibhauspotenzial aufweisen und auch die Energiebereitstellung oftmals bedeutende Mengen treibhauswirksamer Gase emittiert, legt ein Berücksichtigen dieser Umweltwirkung nahe. Auch lassen sich die Ergebnisse mit dem sonst in der Kältetechnik gebräuchlichen TEWI vergleichen.

#### *Ozonschichtabbauendes Potenzial:*

Die teilhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (HCFC) und neu nun die Fluorkohlenwasserstoffe (HFC) sind Ersatzkältemittel der stark ozonschichtabbauenden Fluorchlorkohlenwasserstoffe (CFC-11, CFC-12 und anderen). Da heute der Einsatz von HCFCs wie HCFC-22 (z.B. in relativ neuen Kälteanlagen) noch weit verbreitet ist, und der Unterschied zwischen HCFCs, HFCs und natürlichen Kältemitteln in der Herstellung quantifiziert werden soll, wird diese Umweltwirkung berücksichtigt.

#### *Versäuerungspotenzial:*

Ammoniak und die Zerfallsprodukte Salz- und Flusssäure der teilhalogenierten Kältemittel sind versäuernd wirkende Substanzen. Zudem sind fossile Kraftwerke bedeutende Quellen versäuernder Substanzen. Das Versäuerungspotenzial wird berücksichtigt, um den Einfluss der Kältemittlemissionen am Gesamtwirkpotenzial quantifizieren zu können.

*Sommersmogbildendes Potenzial:*

Propan ist eine Vorläufersubstanz der sommerlichen bodennahen Ozonbildung. Das sommernogbildende Potenzial wird berücksichtigt, um den Einfluss der Propanemissionen am Gesamtwirkpotenzial quantifizieren zu können.

*Ökotoxizitätspotenzial aquatisch und terrestrisch:*

Aus bestimmten Fluorkohlenwasserstoffen entstehen bei dessen Abbau nicht nur Salz- und Flusssäure sondern auch die sehr persistente, herbizid wirkende Trifluoressigsäure (TFA). Zudem werden bei der Strombereitstellung (beispielsweise in Stein- und Braunkohlekraftwerken) und bei der Erdölförderung und -veredelung beachtliche Mengen an Schwermetallen emittiert, die sich in den Ökosystemen anreichern und ebenfalls ökotoxisch wirken. Durch eine Bewertung des ökotoxischen Potenzials auf Gewässer und Böden kann die Relevanz der Kältemittlemissionen eruiert werden.

*Emission radioaktiver Emissionen:*

Die Emission radioaktiver Isotope ist eng verknüpft mit der Bereitstellung elektrischer Energie und damit ähnlich wie die Umweltwirkung "Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie" ein Indikator für die Energieeffizienz einer kältetechnischen Anlage.

*Überdüngungspotenzial:*

Das Überdüngungspotenzial wird in dieser Studie nicht betrachtet, da dieses Umweltproblem hauptsächlich durch landwirtschaftliche Prozesse verursacht wird. Tatsächlich ist der Beitrag der hier untersuchten kältetechnischen Anlagen zum gesamteuropäischen Überdüngungspotenzial um eine Größenordnung kleiner als deren Beiträge zum Treibhauspotenzial, zur Versäuerung, zum Sommersmog oder auch zum Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch.

Weitere Umweltwirkungen werden als nicht ergebnisrelevant (wie z.B. die direkte Inanspruchnahme von Flächen, Lärm oder die Nutzung mineralischer Ressourcen) oder aber als redundant zu anderen, hier berücksichtigten Kategorien eingestuft. Letzteres gilt beispielsweise für die Kategorie *Wintersmog* gemäss Goedkoop (1995) oder auch gemäss Frischknecht (1998). Eine Einschätzung der Aussagekraft der Charakterisierungsmodelle findet sich in Unterkap. 5.9.

### 3.4.3 Charakterisierungsfaktoren der einzelnen Kategorien

Für diese Studie wird versucht, auf die jeweils aktuellsten Charakterisierungsfaktoren zurückzugreifen. Deshalb wird darauf verzichtet, ein integrales Set von Charakterisierungsfaktoren einer Publikation (z.B. Heijungs et al. 1992a&b oder Goedkoop 1995) zu verwenden. Das bedeutet aber auch, dass eine Gesamttaggregation dieser acht Umweltwirkungen zu einem eindimensionalen Indikator nur mit grossem Aufwand machbar wäre.

*Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie:*

Der Indikator "Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie" wird in dieser Studie basierend auf den folgenden drei Thesen definiert (siehe auch Frischknecht et al. 1998):

1. Nichterneuerbare Ressourcen und nicht-nachhaltig genutzte Ressourcen haben einen Eigenwert.
2. Die aus diesen Ressourcen mit heutiger Technik nutzbare Energie bestimmt deren Eigenwert.
3. Alle anderen Aspekte wie Verfügbarkeit, Nachfrage, Substitutionsmöglichkeiten etc. tragen nichts zum Eigenwert der Ressourcen bei.



Aus diesen Thesen lässt sich die Berechnungsweise des Indikators ableiten. Der Indikator "Bedarf nicht erneuerbare Energie" umfasst:

- Fossile Energieträger, aggregiert auf der Basis des Bedarfs an fossilen Ressourcen und gewichtet mit ihrem oberen Heizwert.
- Uran, aggregiert auf der Basis des Bedarfs an spaltbarem Uran und gewichtet mit der in einem modernen Leichtwasserreaktor gewinnbaren Energiemenge.
- Nicht-nachhaltig genutzte Biomasse, aggregiert auf der Basis der geernteten Biomasse und gewichtet mit ihrem oberen Heizwert.

Der in den Sachbilanzen ermittelte Einsatz energetischer Ressourcen wird mit den in Tab. 3.5 zusammengestellten Heizwerten aus Frischknecht et al. (1996:Teil III:Tab. III.8.1) gewichtet.

	Einheit	oberer Heizwert MJ
Erdölgas	Nm <sup>3</sup>	45
Grubengas (Methan)	kg	39.8
Rohbraunkohle vor Förderung	kg	9.5
Rohfördersteinkohle vor Aufbereitung	kg	19
Rohgas (Erdgas)	Nm <sup>3</sup>	39
Rohöl ab Bohrloch	t	45600
Uran ab Erz	kg	460000 <sup>1)</sup>

Tab. 3.5: Charakterisierungsfaktoren "Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie".  
<sup>1)</sup>: Entspricht der in einem modernen Leichtwasserreaktor freigesetzten Energiemenge, ohne Berücksichtigung des bei der Anreicherung anfallenden, zu entsorgenden abgereicherten Urans. Wird das abgereicherte Uran energetisch bewertet, resultiert ein Energie-Äquivalenzwert von 900'000MJ/kg U-235.

Der Indikator "Bedarf nicht erneuerbare Energie" deckt somit einen Teilbereich des Schutzgutes "Ressourcen" ab. Der hier verwendete Indikator unterscheidet sich von dem von Kasser & Pöll (1999) definierten Indikator "Graue Energie" in der Art der Berechnung (Die Wasserkraft wird hier nicht berücksichtigt) und folglich auch in den damit (direkt oder indirekt) berücksichtigten Umwelteffekten.

#### *Treibhauspotenzial:*

Für diejenigen Substanzen, welche zur Verstärkung des Treibhauseffekts beitragen, wird das Treibhauspotenzial (global warming potential, GWP) nach IPCC (Houghton et al. 1996) als Wirkungsparameter beigezogen. Dabei werden Absorptionskoeffizienten für infrarote Wärmestrahlung, die Verweildauer der Gase in der Atmosphäre und die erwartete Immissionsentwicklung berücksichtigt. Für verschiedene Zeithorizonte (20, 100 oder 500 Jahre) wird dann die potentielle Wirkung eines Kilogramms eines Treibhausgases im Vergleich zu derjenigen eines Kilogramms CO<sub>2</sub> bestimmt. Somit können atmosphärische Emissionen in äquivalente Emissionsmengen CO<sub>2</sub> umgerechnet werden. In Tab. 3.6 sind die direkten Wirkungen und zusätzlich die indirekte Wirkung von Methan und den ozonzerstörenden Substanzen berücksichtigt. Der Integrationszeitraum beträgt 100 Jahre.

Die Werte für CFC-114, CFC-115 und CFC-13 werden aus Houghton et al. (1994) entnommen. Um die indirekte Wirkung des Ozonabbaus, die in Houghton et al. (1996) ausgewiesen wird, zu berücksichtigen, werden die Werte analog der ozonabbauenden Substanzen CFC-113 (für CFC-114 und CFC-115) resp. CFC-12 (für CFC-13) korrigiert.

Negative Werte bedeuten, dass die indirekten Effekte dieser Substanzen (Ozonschichtabbau) der Klimaerwärmung entgegenwirken.

	Einheit	Treibhaus potenzial kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.
1,1,1-Trichlorethan	kg	-204 <sup>1)</sup>
C2F6	kg	9200
CF4	kg	6500
CH4 Methan	kg	21
CO2 Kohlendioxid	kg	1
Dichlormethan	kg	9
H 1301 Halon	kg	-34700 <sup>1)</sup>
Isceon 59 FKW	kg	1950 <sup>3)</sup>
N2O Lachgas	kg	310
R11 FCKW	kg	1070 <sup>1)</sup>
R113 FCKW	kg	3060 <sup>1)</sup>
R114 FCKW	kg	5690 <sup>4)</sup>
R115 FCKW	kg	5690 <sup>4)</sup>
R12 FCKW	kg	6640 <sup>1)</sup>
R123 H-FCKW	kg	32 <sup>1)</sup>
R124 H-FCKW	kg	410 <sup>1)</sup>
R125 FKW	kg	2800
R13 FCKW	kg	9130 <sup>4)</sup>
R134a FKW	kg	1300
R141b H-FCKW	kg	250 <sup>1)</sup>
R142b H-FCKW	kg	1650 <sup>1)</sup>
R143a FKW	kg	3800
R152a FKW	kg	140
R22 H-FCKW	kg	1350 <sup>1)</sup>
R23 FKW	kg	11700
R32 FKW	kg	650
R404A FKW	kg	3260 <sup>3)</sup>
R407C FKW	kg	1530 <sup>3)</sup>
R410A FKW	kg	1730 <sup>3)</sup>
R502 FCKW	kg	3570 <sup>2)</sup>
SF6	kg	23900
Tetrachlormethan	kg	-1530 <sup>1)</sup>
Trichlormethan (Chloroform)	kg	4

Tab. 3.6: Charakterisierungsfaktoren "Treibhauspotenzial" gemäss Houghton et al. (1996).  
<sup>1)</sup>: Geometrisches Mittel des indirekten Effektes infolge Ozonschichtabbau berücksichtigt.  
<sup>2)</sup>: Houghton et al. 1994  
<sup>3)</sup>: Eigene Berechnung aufgrund der Zusammensetzung  
<sup>4)</sup>: Direktes Treibhauspotenzial aus Houghton et al. 1994; indirekter Effekt infolge Ozonschichtabbau analog zu HCFC-113 (HCFC-114 &-115) resp. CFC-12 (CFC-13) berücksichtigt.

#### *Ozonschichtabbauendes Potenzial:*

Der Abbau der stratosphärischen Ozonschicht wird durch die Katalysatorwirkung von Halogenen unter speziellen klimatischen Bedingungen verursacht. Unter Berücksichtigung der stratosphärischen Verweilzeit und vorausgesagter Immissionskonzentration wird das ozonschichtabbauende Potenzial (ozone depletion potential, ODP) bestimmt. Die ODP-Werte beziehen sich auf die Vergleichssubstanz Fluorchlorkohlenwasserstoff CFC-11 und werden dem aktualisierten Handbuch der Internationalen Verträge zum Schutze der Ozonschicht der UNEP entnommen (UNEP 1998, siehe Tab. 3.7).

	Einheit	Ozonschichtabbauendes Potenzial CFC-11-Äquiv.
1,1,1-Trichlorethan	kg	0.1
CH3Br	kg	0.6
Dichlormonofluormethan	kg	0.04
H 1211 Halon	kg	3
H 1301 Halon	kg	10
R11 FCKW	kg	1
R113 FCKW	kg	0.8
R114 FCKW	kg	1
R115 FCKW	kg	0.5
R12 FCKW	kg	1
R13 FCKW	kg	1
R141b H-FCKW	kg	0.11
R142b H-FCKW	kg	0.065
R22 H-FCKW	kg	0.055
R31 H-FCKW	kg	0.02
R502 FCKW	kg	0.283
Tetrachlormethan	kg	1.1

Tab. 3.7: Charakterisierungsfaktoren ozonschichtabbauendes Potenzial gemäss UNEP (1998)

*Versäuerungspotenzial:*

Der Beitrag verschiedener emittierter Substanzen zur Versäuerung aquatischer und terrestrischer Systeme wird mithilfe des Versäuerungspotenzials bestimmt. Die mit der Emission versäuernder Substanzen einhergehende pH-Senkung in Gewässern und Böden kann zur Mobilisierung von Schwermetallen führen, welche damit für Pflanzen und Tiere verfügbar werden.

	Einheit	Versäuerungspotenzial kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.
H <sub>2</sub> S Schwefelwasserstoff	kg	1.88
HCl Salzsäure	kg	0.88
HF Fluorwasserstoff	kg	1.6
Isceon 59 FKW	kg	1.11
NH <sub>3</sub> Ammoniak	kg	1.88
NO <sub>x</sub> Stickoxide als NO <sub>2</sub>	kg	0.7
R123 H-FCKW	kg	0.42
R124 H-FCKW	kg	0.48
R125 FKW	kg	1.35
R134a FKW	kg	0.96
R141b H-FCKW	kg	0.82
R142b H-FCKW	kg	0.95
R152a FKW	kg	0.97
R22 H-FCKW	kg	1.11
R32 FKW	kg	1.21
R404A FKW	kg	0.632
R407C FKW	kg	1.12
R410A FKW	kg	1.28
R502 FCKW	kg	0.542
SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub>	kg	1

Tab. 3.8: Charakterisierungsfaktoren "Versäuerungspotenzial" gemäss Hauschild &amp; Wenzel (1997) und eigenen Ergänzungen.

Das Potenzial einer Substanz zur Bildung von H<sup>+</sup>-Ionen wird mit demjenigen von SO<sub>2</sub> verglichen, was zu entsprechenden Äquivalenzfaktoren führt. Diese sind dem Band 2 "Scientific Background" des Grundlagenwerks "Environmental Assessment of Products" (Hauschild & Wenzel 1997:164) entnommen (siehe Tab. 3.8). Auf eine regionale Differenzierung, wie sie dort vorgeschlagen wird, muss hier mangels Informationen verzichtet werden.

Halogenierte Kohlenwasserstoffe tragen über deren Abbauprodukte Salz- und Flusssäure ebenfalls zur Versäuerung bei. Die Grundlagen dazu sind im Anhangband dargelegt.

*Sommersmogbildendes Potenzial:*

Für Substanzen, die zur Bildung troposphärischen Ozons beitragen, wird das "Sommersmogbildende Potenzial" ("photochemical ozone creation potential", POCP) bestimmt. Das POCP ist ein relatives Mass, mit Äthylen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) als Referenzsubstanz, mithilfe dessen das Oxidationsvermögen eines Kilogramms einer Substanz verglichen mit demjenigen von Äthylen beschrieben wird. Die neben den Kohlenwasserstoffen wichtige Vorläufersubstanz NO<sub>x</sub> wird in UN-ECE (1994) nicht berücksichtigt. Dies mit der Begründung, dass die Kohlenwasserstoffe die limitierenden Faktoren bei der Ozonbildung seien. Diese Annahme ist für das schweizerische Mittelland jedoch nicht stichhaltig. In der Schweiz sind die Stickoxide durchaus von Belang, weshalb hier die Stickoxide mit einem Charakterisierungsfaktor von 0.645 kg Äthylen-Äquiv./kg NO<sub>x</sub> gewichtet werden<sup>12</sup>. Tab. 3.9 zeigt Charakterisierungsfaktoren für ausgewählte Kohlenwasserstoffe und für die Stickoxide.

	Einheit	Sommersmogbildendes Potenzial kg Äthylen-Äquiv.
1,1,1-Trichlorethan	kg	0.021
Alkane	kg	0.398
Aromaten	kg	0.761
Benzaldehyd	kg	-0.334
Benzol	kg	0.189
Butan	kg	0.41
CH <sub>4</sub> Methan	kg	0.007
Dichlormethan	kg	0.01
Ethen	kg	1
NM VOC	kg	0.416
NO <sub>x</sub> Stickoxide als NO <sub>2</sub>	kg	0.754
Pentan	kg	0.408
Propan	kg	0.42
Tetrachlormethan	kg	0.021
Toluol	kg	0.563
Xylol	kg	0.849

Tab. 3.9: Auswahl von Charakterisierungsfaktoren "Sommersmogbildendes Potenzial" gemäss UN-ECE (1994) und eigenen Ergänzungen (NO<sub>x</sub>). Die gesamte Liste findet sich im Anhangband.

*Ökotoxizitätspotenzial aquatisch und terrestrisch:*

Das Ökotoxizitätspotenzial aquatisch und terrestrisch von Metallen, anorganischen Substanzen und Kohlenwasserstoffen wird mithilfe des Multimodellmodells USES-LCA quantifiziert (Huijbregts 1999a-c). Das Modell basiert auf USES 2.0, das innerhalb der Europäischen Uni-

<sup>12</sup> Annahme: jährliche Stickoxid- und Kohlenwasserstofffrachten (ohne Methan) in der Schweiz liefern denselben Beitrag zum Sommersmog. Die Frachten betragen im Jahre 1995 136'000t NO<sub>x</sub> und 211'000t NMVOC.

on zur Risikobeurteilung von Substanzen verwendet wird. Es wurde für Ökobilanzzwecke angepasst, indem u.a. "worst case"-Annahmen (z.B. betreffend Nahrungsaufnahme) durch realistischere ersetzt wurden oder das Einführen eines Stofftransports von der Troposphäre zur Stratosphäre berücksichtigt wird.

Das Modell berechnet Toxizitätspotenziale für die Umweltwirkungen Humantoxizität, Ökotoxizität in Gewässern, Böden und Sedimenten. In Analogie zu andern Umweltwirkkategorien werden die Toxizitätspotenziale auf eine Referenzsubstanz bezogen. Für die in dieser Studie berücksichtigten Wirkungen aquatische resp. terrestrische Ökotoxizität ist dies 1,4-Dichlorbenzol (1,4-DCB), das in Oberflächengewässer (Süsswasser) resp. in industrielle Böden emittiert wird (Huijbregts 1999a:12).

Für Fluor- und Fluorchlorkohlenwasserstoffe, die zum persistenten Abbauprodukt Trifluoressigsäure (TFA) abgebaut werden (HFC-134a, HCFC-123, HCFC-124, siehe Tab. 3.10), wird die Ökotoxizität von TFA anteilmässig zur Bewertung dieser Kältemittel herangezogen. Im Anhangband in Kap. 7 werden physikalisch-chemische Eigenschaften von TFA und dessen Umweltwirkungen ausführlich beschrieben und diskutiert.

emittiertes Kältemittel	Globale Emissionen <sup>1)</sup> [kt/a] / [Gew.-%]	HF [kt/a] / [Gew.-%]	HCl [kt/a] / [Gew.-%]	TFA [kt/a] / [Gew.-%]
HFC-134a	663 / 100	400 / 60.3	/ 0	240 / 36.2
HCFC-124	330 / 100	50 / 15.2	90 / 27.3	280 / 84.8
HCFC-123	857 / 100	/ 0	410 / 47.8	640 / 74.7

Tab. 3.10: Emissionsmengen von Kältemitteln und Abschätzungen der Mengen entstehender Abbauprodukte gemäss David (1993). Daraus abgeleitet die Anteile in Gew.-%.  
<sup>1)</sup>: Die Emissionen sind eine obere Abschätzung. Auf den prozentualen Anteil der Abbauprodukte hat dies jedoch gemäss David (1993) keinen Einfluss.

In Tab. 3.11 sind die Ökotoxizitätspotenziale einer kleinen Auswahl von Luft- und Wasser-schadstoffen aufgeführt. Die komplette Liste der Charakterisierungsfaktoren findet sich im Anhangband.

Eintrag in		Einheit	Ökotoxizität aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizität terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.
Luft	1,1,1-Trichlorethan	kg	0.44	0.00018
	Cr Chrom	kg	6500	82
	Hg Quecksilber	kg	1600000	28000
	Ni Nickel	kg	5000000	40
	R123 H-FCKW	kg	27000	4.3
	R124 H-FCKW	kg	31000	4.9
	R134a FKW	kg	13000	2.1
	R404A FKW	kg	520	0.084
	R407C FKW	kg	6760	1.09
	Se Selen	kg	28000000	54
	V Vanadium	kg	16000000	670
	Zn Zink	kg	89000	5.8
Wasser	Ion Barium f <sup>1)</sup>	kg	1100000	5.10E-19
	Ion Barium s <sup>2)</sup>	kg	1400000	6.70E-19
	Ion Kobalt f	kg	5800000	2.70E-18
	Ion Molybdaen f	kg	2800000	2.50E-18
	Ion Nickel f	kg	3000000	3.60E-19
	Ion Selen f	kg	34000000	1.60E-17
	Ion Vanadium f	kg	11000000	1.10E-17
	Ion Zink f	kg	18000	1.20E-21
	Tributylzinn TBT f	kg	290000	0.11
	Tributylzinn TBT s	kg	760000	0.0069
Boden	Cd in Boden	kg	150000	220
	Co in Boden	kg	2900000	220
	Kupfer	kg	170000	60
	Nickel	kg	1500000	82

Tab. 3.11: Ausgewählte Charakterisierungsfaktoren "Ökotoxizität aquatisch und terrestrisch" nach Huijbregts (1999a, 1999b & 1999c).

<sup>1)</sup>: f: Einleitung in Seen und Flüsse (f=freshwater)

<sup>2)</sup>: s: Einleitung in Meere (s=seawater).

#### *Emission radioaktiver Emissionen:*

In früheren Ökobilanz-Arbeiten wurden die Emissionen radioaktiver Isotope ohne Rücksicht auf ihre Wirksamkeit zusammengefasst. In Frischknecht et al. (2000) werden nun deren krebserzeugende und erbgutschädigende Wirkung auf den Menschen quantifiziert und auf das Referenzisotop Uran-235 bezogen.

Grundlage der Charakterisierung sind Modelle, die das Stoffschicksal und die nachfolgende Exposition des Menschen abbilden. Die durch die Exposition zu gewärtigenden Effekte basieren zum grossen Teil auf epidemiologischen Studien. Die nachfolgende Schadensanalyse basiert auf dem Konzept der beeinträchtigten resp. verlorenen Lebensjahre (disability adjusted life years, DALY), das im neuen Eco-indicator 99 (Goedkoop et al. 1998, Goedkoop & Sprinensma 1999) eingeführt wird. Die hier aufgeführten Charakterisierungsfaktoren gelten unter der Annahme, dass Schäden in ferner Zukunft gleich gewichtet werden wie äquivalente Schäden die heute auftreten.

In Tab. 3.12 sind die Charakterisierungswerte einer Auswahl von Isotopen aufgeführt. Die komplette Liste der Faktoren findet sich im Anhangband.

Eintrag in		Einheit	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
Luft	C14	kBq	10
	Cs137	kBq	0.619
	H3	kBq	0.000667
	I129	kBq	44.8
	Kr85	kBq	0.0000667
	Ra226	kBq	0.0433
	Rn222	kBq	0.00114
	U235	kBq	1
	Xe133	kBq	0.0000667
Wasser	C14 s <sup>2)</sup>	kBq	0.0571
	Cs137 f <sup>1)</sup>	kBq	8.1
	Cs137 s	kBq	0.00376
	H3 f	kBq	0.0000214
	H3 s	kBq	0.00000329
	I129 s	kBq	4.76
	Ra 226 f	kBq	0.00619
	U235 f	kBq	0.11
	U235 s	kBq	0.00119

Tab. 3.12: Ausgewählte Charakterisierungsfaktoren "Emission radioaktiver Isotope" gemäss Frischknecht et al. (2000). Die komplette Liste findet sich im Anhangband.

<sup>1)</sup>: f: Einleitung in Süsswasser (f=freshwater);

<sup>2)</sup>: s: Einleitung in Meere (s=seawater).

### 3.4.4 Verzicht auf Gesamttaggregation

Eine Vollaggregation oder Gesamtbewertung hat zum Ziel, die Resultate aus der Sach- oder Wirkbilanz auf eine eindimensionale Grösse zusammenzufassen. Dies kann z.B. mit der Methode der ökologischen Knappheit erfolgen (Brand et al. 1998) oder in Form von externen Umweltschadenskosten (ExternE 1995).

Eine Gesamtbewertung beinhaltet immer subjektive Wertungen, über die nur selten Konsens herrscht. Sollen die in der Zukunft erwarteten Schäden infolge der Verstärkung des Treibhauseffekts höher gewichtet werden als die heute schon beobachtbaren Schäden an der menschlichen Gesundheit aufgrund der Ausdünnung der Ozonschicht oder infolge der Emission lungengängiger Partikel? Je nach Weltanschauung und Ausrichtung der persönlichen Werte können verschiedene Personen zu ganz anderen Schlüssen gelangen. Im neuen Eco-indicator 99 wird versucht, diese Werteunterschiede mit drei deutlich verschiedenen Kulturtypen zu operationalisieren (Hofstetter 1998, Goedkoop et al. 1998, Goedkoop & Spriensma 1999).

Das Problem der Vergleichbarkeit von hier verwendeten Umweltwirkkategorien wie "Treibhauspotenzial", "Ozonschichtabbauendes Potenzial" etc. besteht darin, dass die Schäden, die mit 1kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. resp. mit 1kg CFC-11-Äquiv. verursacht werden, nicht quantifiziert sind. Auch hier geht der Eco-indicator 99 einen Schritt weiter, indem er die drei Schutzgüter "Menschliche Gesundheit", "Ökosystem-Gesundheit" und "Ressourcen" definiert und die mit den Umweltwirkungen verbundenen Schäden zu quantifizieren versucht (Goedkoop & Spriensma 1999).

Die operationalisierte Methode stand für dieses Projekt aber zu spät zur Verfügung, weshalb wir hier auf eine schadensorientierte Bewertung auf der Stufe Schutzgüter verzichten.

## 4 Auswahl und Sachbilanzierung der Systeme

### 4.1 Übersicht

Im diesem Kapitel werden die in der Ökobilanz untersuchten Systeme beschrieben. In Unterkap. 4.2 wird die Auswahl der bilanzierten Anlagen erläutert und begründet. Die nachfolgenden Unterkapitel enthalten Beschreibungen der untersuchten Wärmepumpen (4.3), Kaltwasser- und Solesätze (4.4) und der Supermarkt-Kälteanlagen (4.5).

Die Sachbilanzdaten werden jeweils modular für Anlagenherstellung, -betrieb und -entsorgung erfasst und modelliert. Die detaillierten Herleitungen und Daten hierzu sind im separaten Anhangband dokumentiert. In diesem Kapitel werden die Anlagenkonfiguration und die wichtigsten Kenngrößen beschrieben. Diese dienen einem besseren Verständnis der nachfolgenden Resultatdiskussion.

### 4.2 Wahl der zu bilanzierenden Anlagen

Auf eine praxisbezogene Bilanzierung der in Kap. 3.2 aufgeführten kältetechnischen Systeme wurde grosser Wert gelegt. Es konnte auf Informationen und die Expertise erfahrener Fachkräfte der Kältetechnik zurückgegriffen werden (u.a. Berger 1999, KWT 1999, Reiner 1999, Schaller 1999). Die Wahl konkreter Anlagen erfolgte unter den Aspekten "Marktanteil", "Zukunftsperspektiven der Anwendung" aber auch "Datenverfügbarkeit".

Bei den Wärmepumpen werden Haushalts-Wärmepumpen im kleinen Leistungsbereich mit einem grossen Marktpotenzial und grossen Stückzahlen betrachtet. Bei den Kaltwassersätzen konzentriert man sich auf das weitverbreitete Temperaturniveau 6/12°C in einem mittleren Leistungsbereich (400kW Kälteleistung). Sie kommen hauptsächlich in der Klimatechnik zur Anwendung. Der Solesatz (-25/-30°C) basiert auf einer ähnlichen Anlagenkonfiguration wie der Kaltwassersatz. Es wird eine Anlage mit gleichem Kompressor angenommen, die aber infolge tieferer Temperaturen eine deutlich kleinere Kälteleistung erreicht (120kW). Der Solesatz wird vorwiegend im industriellen Bereich und in der Lebensmittel-Tiefkühlung angewendet. Bei den Supermarkt-Kälteanlagen schliesslich konnte auf eine ausführliche Datenbank des Migros-Genossenschaftsbundes zurückgegriffen werden (Berger 1999), die ein repräsentatives Bild bezüglich Systeme und Anlagengrösse erlaubt. Zudem haben die Anlagenhersteller wichtige Informationen beigesteuert (Baumgartner 1999, Linde 1999, Schaller 1999, Schindler 1999, Truttmann 1999, Universal 1999, Wettstein 1999, Zehag 1999).

Die Datenlage bezüglich Verlustmengen bei Installation, Betrieb und Entsorgung von kältetechnischen Anlagen ist eher dürftig. Real gemessene Daten einer repräsentativen Anzahl von Anlagen liegen nicht vor. Es werden deshalb mehrheitlich die Werte der Stoffflusserhebung für die Treibhausgasbilanz Schweiz 1998 verwendet (Klaus & Dinkel 1999), die auf March Consulting Group (1999), AFEAS (1997) und der Befragung von zwei Kältetechnik-Fachleuten basieren. Die Verlustraten werden für Ammoniak-Anlagen deutlich tiefer angenommen als für Anlagen mit andern Kältemitteln. Da bei Ammoniak-Anlagen aus Sicherheitsgründen tiefe Verlustraten angestrebt werden und in der Schweiz bei Anlagen mit teilhalogenierten Kältemitteln ein konsequentes Monitoring, wie es beispielsweise in den Niederlanden gesetzlich vorgeschrieben ist (Van Gerwen & Verwoerd 1998), fehlt, ist diese Annahme durchaus plausibel.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Anlagen im einzelnen beschrieben.







Im Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Winterthur-Töss sind praktisch ausschliesslich Wärmepumpen mit HCFC-22 (42 Anlagen), HFC-407C (37) und Propan (20) im Leistungsbereich zwischen 2.7 und 28kW<sub>th</sub> getestet worden (WPZ 1999a). Die ermittelten Leistungszahlen (B0/W35 bei Sole/Wasser-Wärmepumpen resp. A2/W35 bei Luft/Wasser-Wärmepumpen<sup>14</sup>) variieren zwischen 3.8 und 5.0 (Sole/Wasser) resp. zwischen 2.7 und 3.7 (Luft/Wasser).

	Sole/Wasser-Wärmepumpe			Luft/Wasser-Wärmepumpe		
	Durchschnitt/ $\sigma$	Maximum/ Minimum	Anzahl Anlagen	Durchschnitt/ $\sigma$	Maximum/ Minimum	Anzahl Anlagen
Propan	4.49 +/- 0.30	5.0/ 4.1	10	3.26 +/- 0.27	3.7/ 2.9	10
HFC-134a	3.98 +/- 0.15	4.2/ 3.9	4	3.3	3.3/ 3.3	1
HFC-404A	4.07 +/- 0.15	4.2/ 3.9	3	3.2	3.2/ 3.2	1
HFC-407C	4.45 +/- 0.26	5.0/ 4.0	30	3.20 +/- 0.17	3.4/ 3.0	7
HCFC-22	4.23 +/- 0.29	4.8/ 3.8	26	3.01 +/- 0.25	3.5/ 2.7	16

Tab. 4.1: Leistungszahlen (B0/W35 resp. A2/W35) der im Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Winterthur-Töss getesteten Sole/Wasser- resp. Luft/Wasser-Wärmepumpen (von 2.7 bis 28kW<sub>th</sub>). Quelle: (WPZ 1999a).  $\sigma$ : Standardabweichung

Aus dieser Zusammenstellung wird deutlich, dass neben dem Kältemittel auch die Anlagenkonfiguration einen entscheidenden Einfluss auf die Energieeffizienz ausübt. Entsprechend gross ist die Bandbreite der gemessenen Leistungszahlen. Die in dieser Studie verwendeten Leistungszahlen (ohne resp. mit Berücksichtigung der Hilfsenergie für Pumpen und Ventilatoren) der verschiedenen Wärmepumpen-Anlagen basieren auf Modellierungen an einem Wärmepumpen-Aggregat (KWT 1999) und sind in Tab. 4.2 zusammengestellt. Die Unterschiede der Leistungszahlen sind eher zufällig und zwischen Sole/Wasser und Luft/Wasser eher zu gering und sollten deshalb nicht überbewertet werden<sup>15</sup>. Aus diesem Grund werden auch Ergebnisse mit variierender Jahresarbeitszahl berechnet (siehe Unterkap. 5.6).

	Sole/Wasser-Wärmepumpe 7kW	Sole/Wasser-Wärmepumpe 50kW	Luft/Wasser-Wärmepumpe 7kW	Luft/Wasser-Wärmepumpe 50kW
Kältemittel Propan	3.82/ 3.62 <sup>1)</sup>	3.90/ 3.74	3.59/ 3.33	4.02/ 3.81
Kältemittel CO <sub>2</sub>	3.62/ 3.44	3.69/ 3.55	3.25/ 3.04	3.32/ 3.17
Kältemittel HFC-134a	4.16/ 3.92	4.20/ 4.02	3.59/ 3.33	3.63/ 3.45
Kältemittel HFC-404A	3.62/ 3.44	3.69/ 3.55	3.25/ 3.04	3.32/ 3.17
Kältemittel HFC-407C	3.70/ 3.51	3.77/ 3.62	3.48/ 3.24	3.95/ 3.75
Kältemittel Isceon 59	4.16/ 3.92	4.20/ 4.02	3.59/ 3.33	3.63/ 3.45
Kältemittel HCFC-22	3.82/ 3.62	3.90/ 3.74	3.59/ 3.33	4.02/ 3.81

Tab. 4.2: Leistungszahl (hier als Jahresarbeitszahl verwendet) in Abhängigkeit des Kältemittels gemäss Angaben von KWT (1999). Temperaturen: Aussenluft 3°C, Vorlauf 36.8°C. System für minimale Aussentemperatur -8°C und maximale Vorlauftemperatur 45°C. Kursiv: Werte basierend auf Annahmen (Isceon 59 = HFC-134a; CO<sub>2</sub> = HFC-404A).<sup>1)</sup>: exkl./ inkl. Hilfsstrombedarf für Pumpen und Ventilatoren.

Die Kältemittelfüllmengen betragen gemäss einer Auswertung der Angaben in (WPZ 1999b) bei den 7kW<sub>th</sub>-Sole/Wasser-Anlagen 1kg für Propan und CO<sub>2</sub> und 2 kg für die teilhalogenier-

<sup>14</sup> B0/W35: Soletemperatur 0°C; Wasservorlauftemperatur 35°C;  
A2/W35: Umgebungsluft-Temperatur 2°C, Wasservorlauftemperatur 35°C.

<sup>15</sup> Die Leistungszahlen werden in den Sachbilanzen als Jahresarbeitszahlen verwendet.

ten Kältemittel. Die  $50\text{kW}_{\text{th}}$ -Sole/Wasser-Wärmepumpen werden mit 5kg (Propan,  $\text{CO}_2$ ) resp. 10kg (teihalogenierte Kältemittel) befüllt. Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen lauten die Werte für Propan und  $\text{CO}_2$  resp. teihalogenierte Kältemittel 1.5 resp. 3kg und 7.5 resp. 15kg (je 7 resp.  $50\text{kW}_{\text{th}}$ -Anlage).

Die Leckagerate im Betrieb wird mit 8% pro Jahr (Durchschnitt heute) angenommen. Da pro TJ an den Wärmetauscher des Wärmeverteilnetzes abgegebene Energiemenge 1.43 resp. 0.15 Wärmepumpenanlagen benötigt werden (7 resp.  $50\text{kW}$ -Anlage), führt dies zu spezifischen Kältemittlemissionen während dem Betrieb von 171.6 resp.  $24.0\%$ <sup>16</sup> der Erstfüllmengen pro TJ Heizenergie. Bei einer in Zukunft zu erwartenden Leckage von 2% pro Jahr reduziert sich die emittierte Menge auf 42.9 resp. 6% der Erstfüllmenge pro TJ Wärme.

Als Materialien kommen zum überwiegenden Teil Metalle zum Einsatz. Daneben spielen bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen die Kälteflüssigkeit massenmässig eine gewisse Rolle. Die kompletten Eingabedaten sind im Anhangband dokumentiert.

## 4.4 Kaltwasser- und Solesätze

### 4.4.1 Technischer Beschrieb

Die Kaltwasser- und Solesätze bauen mit Ausnahme der zweistufigen Expansion beim Solesatz mit Ammoniak als Kältemittel auf einstufiger Expansion und Verdichtung auf. Beim Solesatz mit Ammoniak ist eine zweistufige Expansion mit Zwischenentspannung notwendig (siehe Fig. 4.5). Der Solesatz mit Propan oder teihalogenierten Kältemitteln wird mit Kondensatunterkühlung expandiert. Die Verdichtung erfolgt bei allen Anlagen einstufig, bei den Solesätzen mit Zwischenabsaugung.

Als Verdampfer werden bei den Ammoniakanlagen Plattenwärmetauscher mit überflutetem Flüssigkeitsabscheider verwendet (siehe Fig. 4.3 und Fig. 4.5). Bei Propan und den teihalogenierten Kältemitteln gelangen Trockenexpansionsverdampfer in Rohrbündelbauart zum Einsatz (siehe Fig. 4.4 und Fig. 4.6). Als Verflüssiger werden Plattenapparate (Ammoniak) resp. Bündelrohrapparate (Propan und teihalogenierte Kältemittel) eingesetzt.

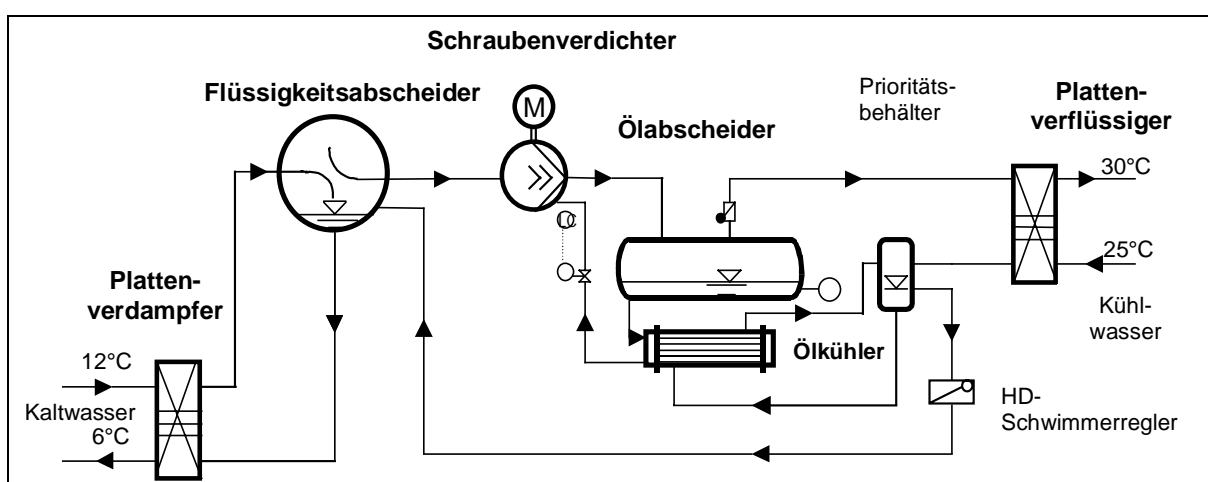


Fig. 4.3: Prinzipschema des hier bilanzierten Kaltwassersatzes für Ammoniak (Reiner 1999).

<sup>16</sup> Leckage 7kW-Anlagen:  $1.43[\text{Anlagen/TJ}] \times 15[\text{a}] \times 8[\%/a] = 171.6[\%/TJ]$   
 Leckage 50kW-Anlagen:  $0.15[\text{Anlagen/TJ}] \times 20[\text{a}] \times 8[\%/a] = 24.0[\%/TJ]$

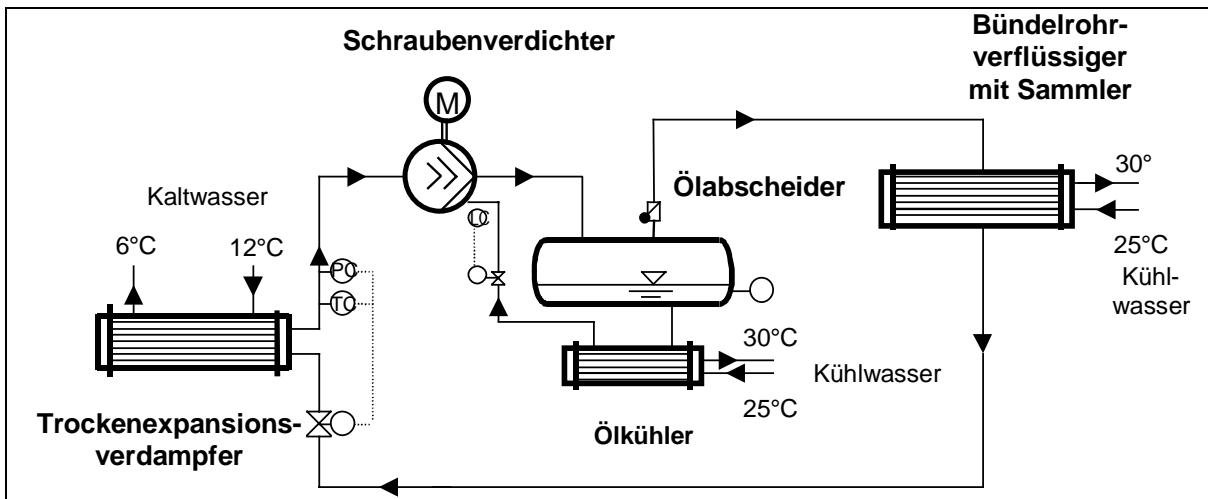


Fig. 4.4: Prinzipschema des hier bilanzierten Kaltwassersatzes für teilhalogenierte Kältemittel und Propan (Reiner 1999).

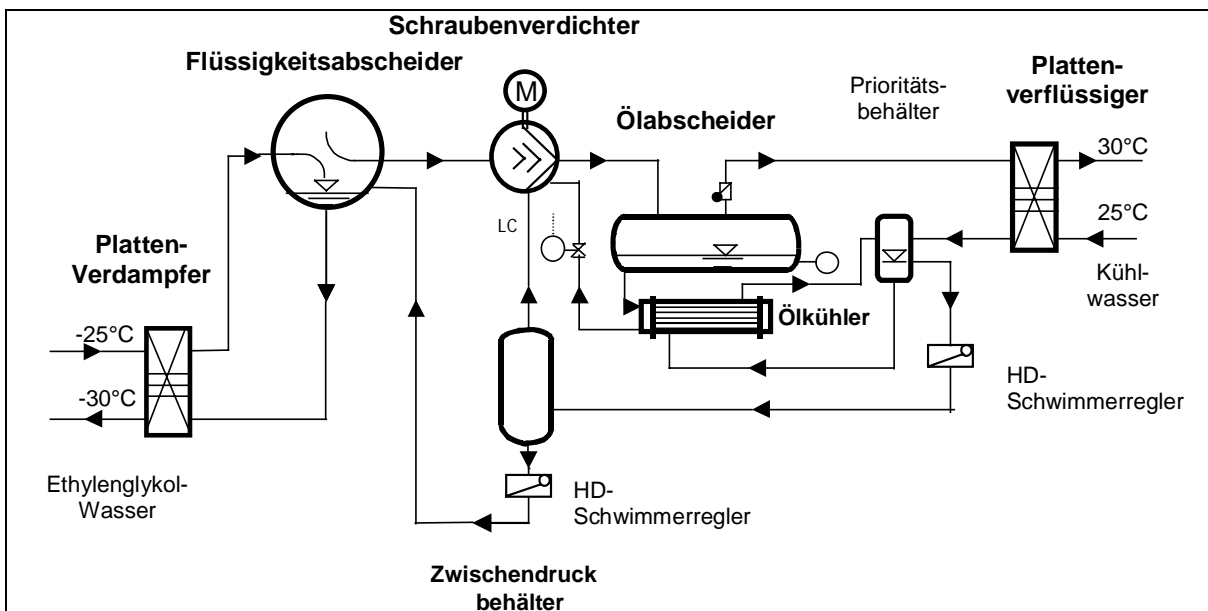


Fig. 4.5: Prinzipschema des hier bilanzierten Solesatzes für Ammoniak (Reiner 1999).

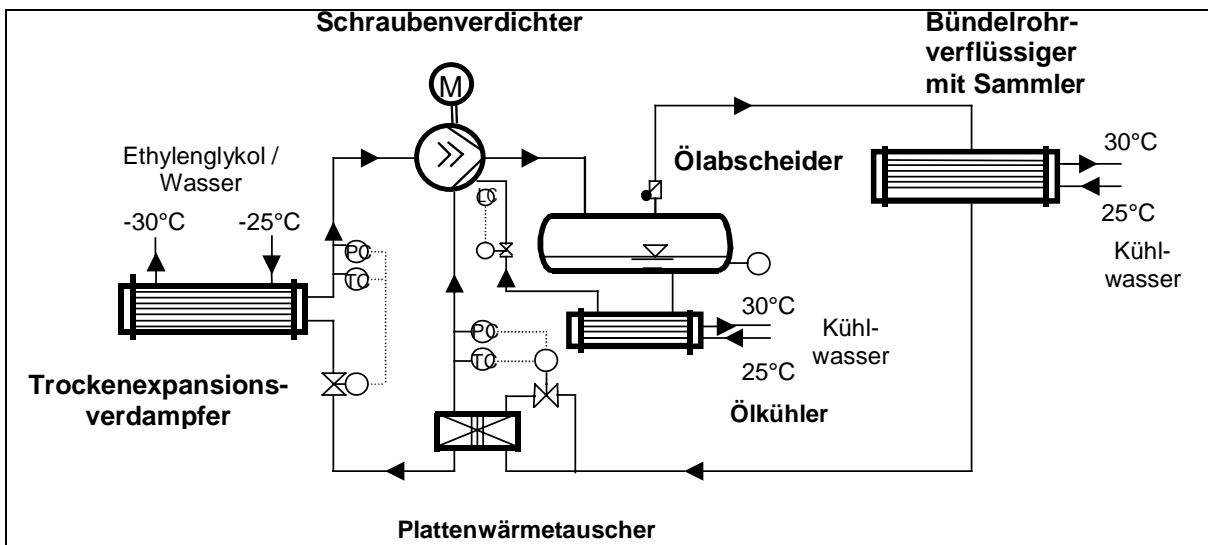


Fig. 4.6: Prinzipschema des hier bilanzierten Solesatzes für teilhalogenierte Kältemittel und Propan (Reiner 1999).

Alle Anlagen werden mit einem Schraubenverdichter mit nachgeschaltetem Ölabscheider betrieben. Die Ölkühlung erfolgt durch Kühlwasser oder durch das Kältemittel. Die Komponenten der Anlagen sind in Tab. 4.3 zusammenfassend aufgeführt.

Kältemittel	Kältemaschine	Ammoniak		HFC + Propan	
		Kaltwasser-satz	Solesatz	Kaltwasser-satz	Solesatz
Kreislauf	Expansion	1-stufig	2-stufig, mit Zwischenentspannung	1-stufig	1-stufig, mit Kondensatunterkühlung
	Verdichtung	1-stufig	1-stufig, mit Zwischenabsaugung	1-stufig	1-stufig, mit Zwischenabsaugung
Verdampfer	Typ	Plattenapparat, mit überflutetem Flüssigkeitsabscheider		Trockenexpansionsverdampfer in Rohrbündelbauart	
Verdichter	Typ	Schraubenverdichter mit nachgeschaltetem Ölabscheider, Ölkühlung durch Kühlwasser oder Kältemittel			
Verflüssiger	Typ	Plattenapparat	Plattenapparat	Bündelrohrapparat	
Expansionsorgan	Typ	1 Hochdruckschwimmerregler	2 Hochdruckschwimmerregler	1 Thermostatisches Expansionsventil	2 Thermostatische Expansionsventile

Tab. 4.3: Komponenten der hier bilanzierten Kaltwasser- und Solesätze (Reiner 1999).

#### 4.4.2 Vergleich Ammoniak zu Propan und teilhalogenierten Kältemitteln

Ammoniak ist in Öl praktisch nicht löslich. Die Ölabscheidung nach dem Verdichter ist sehr effizient, weshalb die Verdampfer als überflutete Plattenwärmetauscher mit aufgebautem Flüssigkeitsabscheider ausgeführt werden können (geringe Temperaturdifferenz - hohe Leistungszahl). Die Expansion erfolgt meist durch Hochdruckschwimmerregler, die alles anfallende Kondensat passieren lassen, aber den Kältemitteldampf zurückhalten. Durch Ausdampfen des Kältemittels erfolgt periodisch eine automatische Ölrückführung. Für den Verflüssiger werden oft Plattenwärmetauscher gewählt.

HFCs und Kohlenwasserstoffe mischen sich mit Öl. Der Kreislauf muss deshalb so ausgeführt werden, dass das Öl ständig wieder rückgeführt wird. Die Gasgeschwindigkeit in den Verdampferrohren wird so gewählt, dass das Öl aus dem Verdampfer mitgerissen wird. Die Flüssigkeitseinspritzung in den Verdampfer wird durch thermostatische Expansionsventile geregelt. Regelgröße für den Füllungsgrad ist die Überhitzung des Kältemittels im Verdampfer (Trockenexpansionsverdampfer).

Werden Kolben- anstelle der hier zugrundeliegenden Schraubenkompressoren verwendet, kann die Jahresarbeitszahl des Ammoniak-, des Propan- und des HFC-404A- und HFC-407C-Kaltwassersatzes um ca. 5 bis 10% gesteigert werden. Bei den Solekühlsätzen sind Verbesserungen von 4 bis über 13% möglich (HCFC-22- resp. Ammoniak-Anlage). Bei der Ammoniakanlage ist allerdings sowohl eine zweistufige Verdichtung als auch eine zweistufige Entspannung notwendig, was natürlich der Grund für diese deutliche Verbesserung der Energieeffizienz ist.

### 4.4.3 Vergleich Kaltwassersatz zu Solesatz

Der Solesatz arbeitet bei tieferen Verdampfungstemperaturen und hat deshalb eine wesentlich niedrigere Leistungszahl als der Kaltwassersatz. Da er meist in der Produktion eingesetzt wird, weist er auch eine viel höhere Jahresbetriebsstundenzahl auf. Beides sind Gründe dafür, den Solekreislauf möglichst energieeffizient zu machen. Dies kann entweder durch 2-fache Expansion mit Zwischenabsaugung des Entspannungsgases geschehen (Ammoniak) oder durch Kondensatunterkühlung in einem Wärmetauscher (HFC und Propan). Der bei dessen Kühlung entstehende Kältemitteldampf wird ebenfalls durch Zwischenabsaugung abgeführt (geringerer Energieverbrauch).

### 4.4.4 Ökobilanzrelevante Kenngrößen und Annahmen

Die Sachbilanz der Kaltwasser- und Solesätze umfasst die Herstellung der Kältemaschine (inkl. Flüssigkeits- und Ölabscheider, Verrohrungen und Grundrahmen), eines 20 Meter langen Kälte-trägerkreislaufs (Kaltwasser resp. Ethylenglykol), des Rückkühlwasserkreislaufs sowie des Kältemittels und Schmieröls. Zudem werden die Montageaufwendungen (Strom und Schweissgase) und die Transporte (der Anlage und der Monteure auf die Baustelle) einbezogen.

Als Vergleichsgrösse wird die dem Kälte-trägerkreislauf entzogene Energie auf 6/12°C (Kaltwassersatz) resp. auf -25/-30°C (Solesatz) verwendet. Die Kälteleistung der betrachteten Anlagen beträgt 400kW (Kaltwassersatz) resp. 120kW (Solesatz). Die Vollbetriebsstunden betragen 1'500h (Kaltwassersatz) resp. 8'000h (Solesatz). Die Anlagenlebensdauer wird mit 20 Jahren veranschlagt (alle Angaben gemäss Reiner (1999)).

Die Jahresarbeitszahlen bei Verwenden verschiedener Kältemittel wurde mit einem Simulationsprogramm des Kompressorherstellers Sabroe ermittelt (siehe Tab. 4.4). Die Anlagenkonfiguration wurde jedem Kältemittel entsprechend gewählt. Bei den Solesätzen erkennt man jedoch aufgrund der tiefen Jahresarbeitszahlen, dass die Kältemittel HFC-134a, Isceon 59 und HFC-407C für den Einsatz im Tieftemperaturbereich weniger geeignet sind. Bei Kältemittelgemischen mit grossem Temperaturgleit (z.B. Isceon 59) liesse sich aber die Jahresarbeitszahl durch möglichst reinen Gegenstrom in Verdampfer und Kondensator verbessern.

	Kaltwassersatz	Solesatz
Kältemittel Ammoniak	4.30	1.49
Kältemittel Propan	3.74	1.38
Kältemittel HFC-134a	3.90	1.17 <sup>1)</sup>
Kältemittel HFC-404A	3.45	1.22
Kältemittel HFC-407C	3.32	1.01 <sup>1)</sup>
Kältemittel HFC-410A	3.87	1.23
Kältemittel Isceon 59	4.04	1.10 <sup>1)</sup>
Kältemittel HCFC-22	4.04	1.43

Tab. 4.4: Jahresarbeitszahl (inkl. Hilfsenergie für Pumpen und Ventilatoren) in Abhängigkeit des Kältemittels für Kaltwassersatz 6/12°C und Solesatz -25/-30°C gemäss Angaben von Reiner (1999). Kühlwassertemperatur 25/30°C. Berechnet mit Sabroe-Simulationsprogramm.

<sup>1)</sup>: Diese Kältemittel sind für den Einsatz im Tieftemperaturbereich weniger geeignet.

Die Kältemittelfüllmengen betragen für die Ammoniakanlagen 66kg, für die übrigen Anlagen 65kg (Menge gleich für Kaltwasser- und Solesatz). Zudem werden 80kg (Ammoniak-Anlage) resp. 90kg (alle übrigen) Schmieröl benötigt.

Beim Erstbefüllen der Kaltwasser- und Solesatz-Anlage wird mit 0.5% resp. 2% Kältemittelverlusten gerechnet (Durchschnitt heute für Ammoniak resp. für alle übrigen Kältemittel). In Zukunft wird für die teilhalogenierten Kältemittel ein Wert von 1% erwartet. Im Betrieb werden 5% resp. 10% pro Jahr emittiert (Durchschnitt heute für Ammoniak resp. für alle übrigen Kältemittel). Dieser Wert dürfte in Zukunft auf 2% resp. 5% pro Jahr gesenkt werden. Beim Rückbau der Anlage schliesslich wird heute mit Kältemittelverlusten von 5% resp. 15% (für Ammoniak resp. alle übrigen Kältemittel) und in Zukunft mit 2% resp. 10% gerechnet.

Die kompletten Eingabedaten sind im Anhangband aufgeführt.

## 4.5 Supermarkt-Kälteanlagen

### 4.5.1 Technischer Beschrieb

In Supermärkten werden gekühlte und tiefgefrorene Speisen in Kühlvitrienen, Kühlinseln, Bedienungstheken, Tiefkühlschränken etc. für den Verkauf gelagert. Die Bereitstellung der Kälte erfolgt für die beiden Temperaturniveaus, Normal- resp. Tiefkühlung, getrennt.

Es wird zwischen Systemen mit Direktverdampfung (für Normal- und Tiefkühlung oder nur für Tiefkühlung) und Systemen mit Kälte-trägerkreislauf (nur für Normalkühlung oder für beide) unterschieden. Die Direktverdampfung insbesondere des Tiefkühlbereichs kann entweder zentral oder dezentral mit Einzelaggregaten erfolgen.

Schliesslich stehen eine Vielzahl von Kältemitteln zur Verfügung. So sind reine Ammoniak-Anlagen mit Kälte-trägerkreislauf in Betrieb - aber auch Anlagen, bei denen Ammoniak für die Normal- und z.B. HFC-404A oder HCFC-22 (mit Direktverdampfung) für die Tiefkühlung verwendet werden. Die Kältemittel HCFC-22 und HFC-404A werden aber auch im Normalkühlbereich eingesetzt. Entsprechend häufig sind Kälteanlagen mit einem dieser beiden teilhalogenierten Kältemittel befüllt. HFC-134a wird nur im Normalkühlbereich eingesetzt, meist mit einem Kälte-trägerkreislauf. Der Tiefkühlbereich wird dann mit HCFC-22 oder HFC-404A (vorwiegend mit Direktverdampfung) betrieben.

Oft müssen in Supermärkten auch noch Kühlräume (z.B. für die Metzgerei) gekühlt werden. Dies erfolgt üblicherweise mit Luftkühlern, die am Normalkühlkreislauf angeschlossen sind. In geeigneten Fällen werden Wärmetauscher zur Abgabe der Abwärme an das Heizungssystem oder für den Kälteentzug bei der Raumklimatisierung von im gleichen Gebäude vorhandenen Büroräumen eingesetzt. Die Verflüssigung des Kältemittels erfolgt entweder direkt oder indirekt über einen Glykolkreislauf durch luftgekühlte Verflüssiger.

### 4.5.2 Ökobilanzrelevante Kenngrössen und Annahmen

Aus der Vielzahl der verschiedenen Konzepte werden die folgenden sechs Kombinationen analysiert (siehe Tab. 4.5):

	Normalkühlung	Tiefkühlung
NH3 KTS/ NH3 KTS	Ammoniak; Kälte-trägersystem	Ammoniak; Kälte-trägersystem
R134a KTS/R404A DX	HFC-134a; Kälte-trägersystem	HFC-404A; Direktverdampfung
R404A KTS/R404A DX	HFC-404A; Kälte-trägersystem	HFC-404A; Direktverdampfung
R134a KTS/R22 DX	HFC-134a; Kälte-trägersystem	HCFC-22; Direktverdampfung
R22 KTS/R22 DX	HCFC-22; Kälte-trägersystem	HCFC-22; Direktverdampfung
R22 DX/R22 DX	HCFC-22; Direktverdampfung	HCFC-22; Direktverdampfung

Tab. 4.5: Die in dieser Studie untersuchten Supermarkt-Kälteanlagen-Konzepte.  
KTS: Kälte-trägersystem; DX: Direktverdampfung.



Die bilanzierten Systeme umfassen die Herstellung der Verdichter, diverser Wärmetauscher, des Rückkühlsystems (für alle Systeme gleich), des Kältemittelsammlers, der Verteilungen (Chromstahl für die Ammoniak-Anlage, Kupfer für alle anderen), der Kältemittel und Kälte-trägerflüssigkeiten, der Kälteisolation, und die Aufwendungen für den Zusammenbau (Strombedarf und Schweissgase) sowie die Transporte der Anlage zum Kunden und die Transporte (mit einem Lieferwagen) der Monteure auf die Baustelle. Die Herstellung der Kühlmöbel selbst wird nicht bilanziert. Ebenso werden die Aufwendungen für die Steuerung der Anlage weggelassen.

Bei Supermarkt-Kälteanlagen ist die Angabe einer Jahresarbeitszahl nicht praktikabel. Aus diesem Grund werden die Sachbilanzen hier nicht auf die abgegebene Kälteleistung bezogen, sondern auf den Betrieb eines Laufmeters Kühlmöbel während einem Jahr. Da die Art und Bauweise der Kühlmöbel einen Einfluss auf deren Kältebedarf hat, werden von Berger (1999) für die Laufmeter Korrekturfaktoren bezüglich Energieverbrauch eingeführt (siehe Tab. 4.6).

Kühlmöbelbeschreibung	Korr.-faktor
Kühlvitrienen (h = 2 m)	1
Kühlvitrienen (h = 2.2 m)	1.1
Kühlinsel (Breite < 1.5 m)	0.5
Kühlinsel (Breite > 1.5 m)	1
Bedienungstheken	0.5
Kühlunterbauten	0.25
Tiefkühlkombination (h= 2 m)	1
Tiefkühlkombination (h= 2.2 m)	1.1
Tiefkühlschrank (h=2 m)	1
Tiefkühlschrank (h=2.2 m)	1.1
Tiefkühlinsel (Breite < 1.5 m)	0.5
Tiefkühlinsel (Breite > 1.5 m)	1

Tab. 4.6: Korrekturfaktoren für die Bestimmung der Bezugsgrösse "Laufmeter Kühlmöbel" (Berger 1999).

Der jährliche Strombedarf der Kälteanlagen beruht auf Messungen und wird auf den (korrigierten) Laufmeter Kühlmöbel bezogen. Der Bedarf liegt im Durchschnitt je nach Anlagentyp zwischen 4.3 MWh und 5.4 MWh pro Laufmeter und Jahr (siehe Tab. 4.7). Die Auswertung der relativ kleinen Stichprobe zeigt, dass der Anlagentyp mit HFC-134a und HCFC-22 den tiefsten spezifischen Energieverbrauch aufweist. Bei den Anlagen, die das Kältemittel HFC-404A für die Tiefkühl- oder für beide Kühlkreisläufe einsetzen, sind die Werte um 5% resp. knapp 4% höher. Der spezifische Stromverbrauch der reinen HCFC-22 Anlagen liegt gegenüber dem tiefsten Verbrauch um 11.5% (System mit reiner Direktverdampfung) resp. 16% (Normalkühlung mit Kälte-trägerkreislauf) höher. Die höchsten Werte weisen die (wenigen ausgemessenen) Ammoniak-Anlagen aus. Ihr Stromverbrauch liegt 24% über dem Mittelwert der untersuchten HFC-134a/HCFC-22-Systeme<sup>17</sup>.

Die Leistung der untersuchten Anlagen variiert zwischen 30 und 300kW. Für die Sachbilanzen wurde eine fiktive Anlage definiert mit einer Normalkühlleistung von 82.3kW und einer Tiefkühlleistung von 21.3kW. Im Durchschnitt werden pro (korr.) Laufmeter Kühlmöbel 1.41kW Kälteleistung (Normal- und Tiefkühlung) installiert. Pro kW Kälteleistung werden zudem 12.5kg Kupfer resp. 18kg Chromstahl und 1.2kg Kälteisolation für die Verteilungen (inkl. Rückkühlkreislauf) benötigt.

<sup>17</sup> Die Gründe für die schlechte Energieeffizienz der Ammoniakanlagen sind nicht bekannt. Ungünstiges Teillastverhalten ist eine Möglichkeit.

[kWh/m'.a]	Anzahl Anlagen <sup>1)</sup>	Normalkühlung	Tiefkühlung	Total
NH3 KTS/ NH3 KTS <sup>2)</sup>	6/ 3	5'366	5'963	5'384
R134a KTS/R404A DX	8/ 10	3'881	5'824	4'554
R404A KTS/R404A DX	4/ 10	5'248	5'824	4'500
R134a KTS/R22 DX	8/ 16	3'881	6'070	4'333
R22 KTS/R22 DX	5/ 16	4'408	6'070	5'035
R22 DX/R22 DX	8/ 16	3'302	6'070	4'828

Tab. 4.7: Durchschnittlicher spezifischer Strombedarf in kWh pr Laufmeter (korr.) Kühlmöbel und Jahr von 29 analysierten Supermarkt-Kälteanlagen in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration. In dieser Studie werden die Total-Werte verwendet.

<sup>1)</sup>: Normalkühlung/ Tiefkühlung

<sup>2)</sup>: KTS: Kälteträgersystem; DX: Direktverdampfung

Das Kompressorgewicht beträgt 840kg (in erster Näherung für alle Anlagen), das Wärmetauscher-Gesamtgewicht 760kg (Ammoniak-Anlage) resp. 815kg (alle übrigen).

Bei Systemen mit Kälte Träger schwanken die Kältemittel-Erstfüllmengen von 31 Supermarktanlagen verschiedener Konfigurationen für die Normalkühlung je nach Kältemittel zwischen 0.16 und 1.0 kg pro kW installierte Kälteleistung. Für die Tiefkühlung, bei der nur Ammoniak-Kälteanlagen mit Sekundärkreislauf bilanziert werden, liegen die Werte zwischen 0.46 und 0.7kg pro kW. Für die Direktverdampfung werden im Tiefkühlbereich Kältemittelmengen zwischen 2.1 und 8.3 kg pro kW benötigt. Bei den wenigen Anlagen mit Sekundärkreislauf liegen die Werte zwischen 0.5 und 1.3kg, wobei Ammoniakanlagen eher tiefere Werte aufweisen. Im Anhangband sind die Kältemittelfüllmengen, die Kälteleistungen und der spezifische Stromverbrauch aller 31 Anlagen wiedergegeben.

Die in Tab. 4.8 aufgeführten Mittelwerte der Kältemittelmengen werden auf eine Leistung von  $82.3\text{kW}_{\text{NK}}$  resp.  $21.3\text{kW}_{\text{TK}}$  hochgerechnet und für die Sachbilanzen verwendet.

Kältemittel	Direktverdampfung		Sekundärkreislauf	
	Normalkühlung [kg/kW <sub>NK</sub> ]	Tiefkühlung [kg/kW <sub>TK</sub> ]	Normalkühlung [kg/kW <sub>NK</sub> ]	Tiefkühlung [kg/kW <sub>TK</sub> ]
Ammoniak	- <sup>1)</sup>	-	0.29 (6)	0.59 (3)
HFC-134a	-	-	0.67 (8)	-
HFC-404A	-	3.64 (10) <sup>2)</sup>	0.46 (4)	1.05 (1) <sup>3)</sup>
HCFC-22	2.81 (8)	4.25 (16)	0.65 (5)	1.34 (1) <sup>3)</sup>

Tab. 4.8: Durchschnittliche, spezifische Kältemittelmengen in kg pro kW installierte Kälteleistung von 31 analysierten Supermarkt-Kälteanlagen in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration und des Kältemittels.

Kälteleistung: Normalkühlung (NK):  $82.3\text{kW}$ ; Tiefkühlung (TK):  $21.3\text{kW}$ .

<sup>1)</sup>: - bedeutet keine Anlage dieses Typs

<sup>2)</sup>: In Klammern: Anzahl Anlagen dieses Typs

<sup>3)</sup>: In dieser Studie nicht berücksichtigt.

Für alle Systeme mit einem oder zwei Sekundärkreisläufen wird dieselbe Menge Kälteflüssigkeit pro Temperaturniveau angenommen. Die Werte schwanken hier zwischen knapp 5.5 und mehr als 23kg (Normalkühlung) resp. zwischen 14 und 67.5kg (Tiefkühlung) jeweils bezogen auf das installierte kW Kälteleistung. Der Durchschnitt liegt für die Normalkühlung bei knapp  $13\text{kg/kW}_{\text{NK}}$ , für die Tiefkühlung bei  $44\text{kg/kW}_{\text{TK}}$ . Mangels präziserer Angaben wird das Kälteflüssigkeitsmedium als Propylenglykol verbucht.

Nicht alle Anlagen sind mit einem Rückkühlsystem mit Kälte­träger ausgerüstet. Es werden bis zu 16.6 kg Kälte­träger pro kW installierte Gesamtkälte­leistung benötigt. Der Durchschnitt über alle Anlagen (inkl. der Anlagen ohne Kälte­träger-Rückkühlung) liegt bei 5.6 kg/kW<sub>tot</sub>.

Die Kälte­mittelverluste beim Befüllen der Anlage werden für beide Szenarien (Durchschnitt heute und Zukunft) mit 3% (teilhalogenierte Kälte­mittel) resp. 0.5% (Ammoniak) angenommen. Im Betrieb werden für den heutigen Durchschnitt 13.5% resp. 5% pro Jahr (teilhalogenierte Kälte­mittel resp. Ammoniak) und für den zukünftigen Zielwert 6% resp. 2% pro Jahr angenommen. Beim Rückbau der Anlagen wird mit 15% resp. 5% (Durchschnitt heute, teilhalogenierte Kälte­mittel resp. Ammoniak) und 5% resp. 2% (zukünftiger Zielwert) gerechnet.

Eine im Entwurf vorliegende Studie des Forschungsrats Kälte­technik weist für 19 ausgemessene Supermarkt-Verbundanlagen, Baujahr 1991 bis 1999, mit 60 bis 360kg HCFC- und HFC-Füllmengen spezifische Verluste in der Höhe von 9.3% pro Jahr aus (Bandbreite von 0 bis 100%; unter Berücksichtigung von Havarien; FKT 1999:130). Für Kälteanlagen mit Füllmengen zwischen 50 und 400kg werden dort 5% als zulässiger spezifischer Kälte­mittelverlust bezeichnet. Dies deutet darauf hin, dass die hier verwendeten Verlustmengen somit tendenziell eher zu hoch sein könnten.

Die Lebensdauer der Kälteanlage wird mit 15 Jahren veranschlagt.

Die kompletten Eingabedaten sind im Anhangband aufgeführt.

## 4.6 Kälte­mittelherstellung

### 4.6.1 Teilhalogenierte Kälte­mittel

Die Bilanzierung teilhalogenerter Kälte­mittel basiert auf Angaben aus der Fachliteratur und punktuell von Herstellern. Aus diesen Angaben konnten die Bedarfe an Rohstoffen und Energie­trägern abgeleitet werden. Für die Herstellung von HCFC-22 stehen Informationen über Prozessemissionen eines holländischen Werks von DuPont de Nemours zur Verfügung. Für HFC-134a werden in McCulloch & Campbell (1998) Prozessemissionen in der Höhe von 77kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. pro kg Kälte­mittel ausgewiesen. Dieser Wert stammt aus einer internationalen Erhebung aller AFEAS-Mitgliedsfirmen<sup>18</sup>. Aufgrund der möglichen Prozessführungen kann es sich z.B. um CFC-113, CFC-114a, HCFC-124, HCFC-133a oder HFC-134a handeln (Webb & Winfield 1992). Dies ist insofern von Belang, als die voll- und teilhalogenierten Kohlenwasserstoffe mit Ausnahme von HFC-134a neben der Treibhauswirkung auch eine ozonschichtabbauende Wirkung haben.

Wird angenommen, dass je 1 Gew.-% CFC-113 (Zwischenprodukt der Perchloräthylen-Route) und HCFC-124 (Zwischenprodukt der Trichloräthylen-Route) sowie 1.9 Gew.-% HFC-134a emittiert wird, so resultieren Emissionsfaktoren von 77.4kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten und von 0.0082kg CFC-11-Äquivalenten<sup>19</sup>. Diese Annahme wurde von einem Vertreter eines europäischen Herstellers als grundsätzlich plausibel beurteilt.

Ein europäischer Hersteller stellte Sachbilanzdaten seiner HFC-134a-Produktion zur Verfügung, die über eine Nachverbrennung von treibhauswirksamen und ozonschichtabbauenden Nebenprodukten verfügt. Von einem US-amerikanischen Hersteller liegen Angaben zum Pri-

<sup>18</sup> AFEAS: Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study

<sup>19</sup> Houghton et al. (1996) machen für CFC-114a und HCFC-133a keine Angaben über das Treibhauspotenzial. Wäre HFC-134a alleine für die 77kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente verantwortlich, würde dies einem unwahrscheinlich hohen Verlust von 6 bis 7.7 Gew.-% entsprechen (je nach dem für die Umrechnung verwendeten Treibhauspotenzial von HFC-134a).

märenergiebedarf und zu den Treibhausgasemissionen der Kältemittel HCFC-22 und HFC-134a vor. Die Werte liegen zwischen den AFEAS-Durchschnittswerten und den Werten bei optimierter Produktion und werden deshalb hier nicht weiter berücksichtigt.

Neben den Herstellungsprozessen der Kältemittel selbst, werden auch die Ausgangsprodukte wie Trichlorethylen oder Perchlorethylen mit Grobbilanzen erfasst. Die Massenbilanzen wurden aus Wells (1991) entnommen, während die Energiebedarfe aus Fachartikeln entnommen werden konnten. Mangels Informationen über Prozessemissionen wurde im Sinne einer konservativen Schätzung angenommen, dass jeweils 1 Gew.-% des Produktes in die Atmosphäre entweicht. Ein Vergleich mit - leider stark aggregierten - Werten von Boustead (1997a&b) zeigen, dass bei Tri- und Perchlorethylen atmosphärische Prozessemissionen chlorierter Kohlenwasserstoffe von 1 bis über 2.5 Gew.-% ausgewiesen werden (Boustead 1997b:21/26).

Die kompletten Sachbilanzdaten und deren Herleitung werden im Anhangband beschrieben.

#### 4.6.2 Propan, Ammoniak und Kohlendioxid

Für die Herstellung von *Propan* wird auf die Sachbilanzdaten der Ökoinventare von Energiesystemen (Frischknecht et al. 1996:Teil IV:128ff.) abgestützt. Wie in Abschnitt 3.3.4 erläutert, wird der Energiebedarf zur Herstellung von Propan auf der Basis des Energiebedarfs der Raffinerie-Teilprozesse ermittelt, die dazu benötigt werden. So werden rund 3MJ thermische Energie pro kg Propan oder Butan benötigt (Frischknecht et al. 1996:Teil IV:142). Lebenszyklusbezogen werden insgesamt rund 56MJ Primärenergie-Äquivalente benötigt. Davon sind ca. 46MJ Rohölfeedstock, woraus sich ein lebenszyklusbezogener Energiebedarf von ca. 10MJ pro kg Propan errechnet. McCulloch & Campbell (1998) gehen für Isobutan von einem Energiebedarf in der Raffinerie von ebenfalls ca. 10MJ pro kg aus.

Die Reinigung von Raffinerie-Propan erfolgt mithilfe von Molekularsieben, um das Propan zu trocknen und allfällig vorhandenen Schwefel abzutrennen. Danach wird das Propan in Zylinder abgefüllt und bis zum Verkauf gelagert. Diese Aufwendungen werden in Analogie zu den andern Kältemitteln abgeschätzt.

Die Bilanzierung von *Ammoniak* beruht auf Publikationen der Europäischen Vereinigung der Düngemittelhersteller (EFMA 1995). Darin werden Energieträger-, Feedstock- und Katalysatorbedarf einerseits, ausgewählte Emissionen und Abfallaufkommen andererseits dokumentiert. Die Angaben gelten für technisches Ammoniak, wie es für die Düngemittelherstellung benötigt wird. Weitere Reinigungsschritte sind notwendig, um den erforderlichen Reinheitsgrad für kältetechnische Anwendungen von 99.8% zu erreichen. Dazu liegen jedoch auch in z.B. eurammon (1996a & b) keine Informationen vor. Aufgrund der bereits hohen Aufwendungen der technischen Ammoniak-Qualität wird auf eine Abschätzung des zusätzlichen Reinigungsaufwandes verzichtet.

Die Bilanzierung der Gewinnung von *Kohlendioxid* erfolgt aus Gründen der Datenverfügbarkeit ausschliesslich über den Weg der Ammoniakherstellung, obwohl durchaus auch noch andere Rückgewinnungsmöglichkeiten bestehen. Das Bilanzgebiet umfasst bei diesem Recyclingprodukt lediglich die Aufwendungen für die Rückgewinnung aus dem Rohgasstrom der Ammoniakherstellung. Die Bereitstellung des Kohlenstoffs (aus Erdgas oder Schwerölen) wird ganz der Ammoniakherstellung angerechnet. Die nachfolgende Reinigung kann dank Firmenangaben berücksichtigt werden.

Die ausführlichen Prozessbeschreibungen und die kompletten Sachbilanzdaten sind im Anhangband dokumentiert.

## 4.7 Strombereitstellung

### 4.7.1 Strommix Schweiz plus Stromhandel

Für die Bilanzierung nationaler Strommixe bestehen verschiedene Modelle, die z.B. in Ménard et al. (1998) beschrieben sind. Die dort eingeführten vier Modelle unterscheiden sich stark in der Art, wie der Stromhandel berücksichtigt wird (siehe Tab. 4.9).

Modell	ausgewiesen in
M1 Inlanderzeugung = Verbrauchermix	Frischknecht et al. (1996)
M2 Inlanderzeugung + Importe = Verbrauchermix	Dieser Studie
M3 Inlanderzeugung - Exporte + Importe = Verbrauchermix	Frischknecht et al. (1996), Habersatter et al. (1998)
M4 Inlanderzeugung + Import/Export Saldo = Verbrauchermix	Empfehlung Ménard et al. (1998)

Tab. 4.9: In Ménard et al. (1998) diskutierte Strommodelle.

Eine Umfrage bei sechs grossen schweizerischen Überlandwerken (ATEL, BKW, EGL, EOS, EWZ und NOK) hat ergeben, dass diese in den Verträgen mit ihren Kunden in der Regel keine Aussagen darüber machen, aus welchem Land resp. welchem Kraftwerk sie den zu liefernden Strom beschaffen werden. Der Anteil an Transitgeschäften (zeitgleiche Lieferung von im Ausland beschaffter Elektrizität an ausländische Kunden) schwankt im Bereich von Null bis wenige Prozente. Eine Ausnahme bildet die ATEL, welche gemäss Jahresbericht zusätzlich zum Energieabsatz substantielle Transite für Dritte durchführt<sup>20</sup>. Dabei kann es sich um Transite innerhalb der Schweiz oder über die Schweizer Grenze hinaus handeln. Ausgehend von diesen Umständen, die sich im Zuge der Deregulierung des europäischen Strommarktes stark ändern werden, zeigt sich, dass die Modelle M3 und M4 als Extremfälle zur Abbildung der Situation in der Schweiz Mitte der neunziger Jahre gelten können.

Aus diesem Grund wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass der in der Schweiz verbrauchte und der ins Ausland exportierte Strom insgesamt durch Kraftwerke im In- und Ausland erzeugt wird (Modell M2). Diese Variante ist in Frischknecht et al. (1996:Teil XVI) beschrieben. Der Anteil Transitgeschäfte bei dieser Variante beträgt für den Durchschnitt der Jahre 1990 bis 1994 rund 35% (Frischknecht et al. 1996:Teil XVI:7) und kann als Kombination der Modelle M1 und M3 berechnet werden. Der hier verwendete Strommix setzt sich aus den folgenden Erzeugungsarten zusammen (siehe Tab. 4.10):

<sup>20</sup> Im Jahre 1996, das in Ménard et al. (1998) zitiert wird, betrug der Energieabsatz von 22'753GWh und das zusätzliche Volumen "Transite für Dritte" 7'394GWh (ATEL 1998). Dieses explizite Transit-Volumen wird in Ménard et al. (1998:93) nicht ausgewiesen. Es erscheint auch nicht in der Schweizerischen Elektrizitätsstatistik.

Durchschnitt 1990-1994	Inland-Stromproduktion Schweiz	Inland-Stromproduktion Schweiz minus Export plus Import	Inland-Stromproduktion Schweiz plus Stromhandel
Steinkohle		4.6%	3.0%
Braunkohle		2.4%	1.5%
Erdöl	1.0%	2.2%	1.8%
Erdgas <sup>1)</sup>		1.3%	0.9%
Andere Gase <sup>1)</sup>		0.7%	0.4%
<i>Total fossilthermisch</i>	<i>1.0%</i>	<i>11.1%</i>	<i>7.6%</i>
Wasserkraft	58.8%	39.1%	46.0%
Umwälzwasserkraft	0.9%	0.9%	0.9%
Kernkraft	38.2%	48.1%	44.7%
Andere <sup>2)</sup>	1.1%	0.7%	0.8%
Total Produktion	100.0%	100.0%	100.0%
Quelle	Frischknecht et al. (1996:Teil XVI:9ff.)		diese Studie

Tab. 4.10: Strommix "Schweiz Inlandproduktion", "Schweiz plus Stromimport" und "Schweiz plus Stromhandel". Das in dieser Studie verwendete Modell "Strom plus Stromhandel" entspricht einer Situation mit 35% zeitgleichem, vertraglich vereinbartem Stromtransit durch die Schweiz.

<sup>1)</sup>: Wird beides unter "Strom ab Brenngas-Kraftwerk Land X" verbucht. Dies umfasst reine Erdgas- als auch Hochofengas- und Koksofengas-Kraftwerke.

<sup>2)</sup>: Umfasst geothermische Kraftwerke, Strom aus Kehrlichtverbrennungsanlagen u.ä.

#### 4.7.2 Strommix UCPT-E-Länder

Hierbei handelt es sich um die unveränderte Modellierung des westeuropäischen Verbundstromes der Jahre 1990 bis 1994 gemäss Frischknecht et al. (1996:XIV:10). Die durchschnittliche jährliche Stromproduktion in den UCPT-E-Ländern und die daraus bestimmten Anteile der verschiedenen Kraftwerkstechniken ist in Tab. 4.11 aufgeführt.

	Stromproduktion UCPT-E 1990-1994 GWh/a	Anteile Energieträger am Strommix %
Steinkohle	280'217	17.5
Braunkohle	169'659	10.5
Erdöl	155'658	9.7
Erdgas <sup>1)</sup>	125'932	7.9
Andere Gase <sup>1)</sup>	30'434	1.9
<i>Total fossilthermisch</i>	<i>761'900</i>	<i>47.5</i>
Wasserkraft	228'920	14.2
Umwälzwasserkraft	15'651	1.0
Kernkraft	591'730	36.9
Andere <sup>2)</sup>	6'553	0.4
Total Produktion	1'604'754	100.0

Tab. 4.11: Mittlere jährliche Nettostromproduktion in UCPT-E-Europa der Jahre 1990-1994 und daraus resultierende Anteile verschiedener Energieträger.

Der technische Stand der einzelnen Kraftwerkstypen wird weitgehend länderspezifisch modelliert.

<sup>1)</sup>: Wird beides unter "Strom ab Brenngas-Kraftwerk Land X" verbucht. Dies umfasst reine Erdgas- als auch Hochofengas- und Koksofengas-Kraftwerke.

<sup>2)</sup>: Umfasst geothermische Kraftwerke, Strom aus Kehrlichtverbrennungsanlagen u.ä.

### 4.7.3 Erdgasbefeuertes Magermotor-Blockheizkraftwerk

Betrachtet wird ein Magermotor-Erdgas-Blockheizkraftwerk ohne Katalysator und ohne interne Wärmepumpe. Die Wirkungsgrade des Aggregats selbst betragen 32.2% elektrisch und 55% thermisch. Somit wird pro TJ Erdgas 0.322TJ Elektrizität und 0.55TJ Wärme erzeugt. Die Exergie von Wärme und Strom betragen 0.182<sup>21</sup> resp. 1. Daraus ergeben sich die Allokationsfaktoren 0.238 und 0.762 für Wärme resp. Strom. Das bedeutet, dass der Produktion von 0.322TJ Strom 0.762TJ Erdgas zugeordnet werden. Andererseits wird aus 0.238TJ Erdgas 0.55TJ Wärme produziert. Darin zeigt sich, dass eine Allokation gemäss Exergie gleichbedeutend ist mit einer über 55% Deckung der Wärmeproduktion durch unbelastete Abwärme aus der Stromproduktion.

Grundlage für die Erfassung der Herstellungsaufwendungen und der Betriebsemissionen bildet die Bilanzierung eines 192kW<sub>el</sub>-Blockheizkraftwerkes in Frischknecht et al. (1996:Teil XIV)<sup>22</sup>. Anpassungen werden bezüglich Energieeffizienz, Stickoxidemissionen und Auslegung vorgenommen. Zudem werden die Komponenten Katalysator und Wärmepumpe und deren Herstellungsaufwendungen weggelassen.

Aufgrund des geänderten LRV-Grenzwertes für Stickoxide (von 80 auf 250mg/Nm<sup>3</sup>) können Erdgasmotoren ohne Katalysatoren betrieben werden. Unter der Annahme, dass neue Anlagen den Grenzwert gerade erfüllen, resultiert ein Stickoxid-Emissionsfaktor im stationären Betrieb von 78kg pro TJ Erdgas (Zogg 1998:Korrigenda).

Die jährliche Vollbetriebsstundenzahl der erdgasbefeuerten Klein-BHKWs ab 1993 lag bei 4'850 Stunden (Kaufmann 1998:34). Bei einer Lebensdauer von 100'000h entspricht dies knapp 21 Jahren. Die von Frischknecht et al. (1996:Teil XIV) abweichenden Eingabedaten sind im Anhangband aufgeführt.

### 4.7.4 Erdgasbefeuertes Kombikraftwerk (Gas und Dampf-Kraftwerk)

Als GuD-Kraftwerk wird ein schlüsselfertiges Kraftwerk der Firma ABB bilanziert. Die ursprüngliche Bilanzierung erfolgte in Dones et al. (1996:36ff.) und in Frischknecht (1998:147). Es handelt sich um ein standardisiertes Gas- und Dampf-Kraftwerk mit einer Nettoleistung von 271MW. Die Effizienz der Gasturbine wird gesteigert, indem das Turbinenabgas zur Dampferzeugung verwendet und damit eine Hochdruck- und eine Niederdruck-Dampfturbine angetrieben werden. Gas- und Dampfturbine liegen dabei auf derselben Welle und sind mit einer Kupplung zwischen Dampfturbine und Generator verbunden. Die Hoch- und Niederdruck-Dampfturbine sind über ein Getriebe miteinander verbunden.

Der Bruttowirkungsgrad der Anlage wird in (Bachmann & Schulz 1999) mit 58.95% angegeben. Bei einem Eigenbedarf von 6MW resultiert ein Nettowirkungsgrad von 57.6%. Die Gasturbine liefert rund zwei Drittel der mechanischen Energie, der Rest stammt von den beiden Dampfturbinen. Die Stickoxidwerte liegen bei 25vppm (bei 15% O<sub>2</sub> im Abgas), was einem spezifischen Emissionsfaktor von 14.5kg NO<sub>x</sub> als NO<sub>2</sub> pro TJ Erdgas entspricht. Die kompletten Sachbilanzdaten finden sich im Anhangband.

<sup>21</sup> Vorlauftemperatur 85°C, Nutztemperatur 20°C.

<sup>22</sup> Es handelt sich dabei um den Gasmotoren-BHKW GM 234 V12 der Firma DIMAG Dieselmotoren AG.

## 5 Resultate und Diskussion der Ökobilanzen

### 5.1 Übersicht

Im diesem Kapitel werden die Resultate der Ökobilanzen und deren Interpretation vorgestellt. In Unterkapitel 5.2 werden die Umweltwirkungen der Kältemittelherstellung und -emission sowie der hier verwendeten Strombereitstellungsarten gezeigt. Danach werden die Wirkbilanzen der betrachteten kältetechnischen Anlagen anwendungsbezogen unter Annahme heutiger und zukünftiger Kältemittelverlustmengen verglichen. Anhand der  $7\text{kW}_{\text{th}}$  Sole/Wasser-Wärmepumpe wird gezeigt, welche Prozessschritte resp. welche Schadstoffe und Ressourcen wieviel zu den acht Umweltwirkungspotenzialen beitragen (Abschnitte 5.3.3 und 5.3.4). Der Einfluss der Strombereitstellungsart wird in Abschnitt 5.3.5 und die Unterschiede bezüglich Wärmepumpenart (Sole/Wasser oder Luft/Wasser) und -grösse in Abschnitt 5.3.6 diskutiert. Da die Kältemittel-Verlustmengen in Zukunft deutlich tiefer liegen dürften als heute, werden diese in Abschnitt 5.3.7 variiert. Zudem wird aufgezeigt, welchen Effekt eine optimierte Produktion des Kältemittels HFC-134a auf die Wirkbilanzergebnisse der Wärmepumpe hat (Abschnitt 5.3.8). Schliesslich wird der klassische TEWI mit dem hier ermittelten lebenszyklusbezogenen Treibhauspotenzial verglichen (Abschnitt 5.3.9).

Danach folgen Systemvergleiche der Kaltwasser- und Solesätze und der Supermarkt-Kälteanlagen je mit heutigen und zukünftigen Kältemittel-Verluststraten (Unterkapitel 5.4 bis 5.5). Das Unterkap. 5.6 ist für den Anlagenplaner gedacht, der eine Neuanlage beurteilen soll. Mit den dort gezeigten Diagrammen können die Umweltwirkungen von Sole/Wasser-Wärmepumpen, Kaltwasser- und Solesätzen und Supermarkt-Kälteanlagen in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl resp. des Jahresstromverbrauchs (Supermarkt) bestimmt werden. Nach einer systemübergreifenden Beurteilung der Ökobilanzergebnisse (Unterkap. 5.7) folgen vereinfachende Überlegungen zur Wahl des umweltlich besten Kältemittels (Unterkap. 5.8). Das Resultatkapitel wird mit Ausführungen zur Datenqualität abgerundet.

### 5.2 Wirkungsbilanzergebnisse der Kältemittel und der Strombereitstellung

Um die nachfolgende Resultatdiskussion besser nachvollziehen zu können, werden hier Wirkbilanzergebnisse der Kältemittel, der Strombereitstellung und ausgewählter Materialien aufgeführt.

#### 5.2.1 Kältemittlemissionen und -herstellung

In diesem Abschnitt werden die direkten Umweltwirkungen der Emission und die indirekten Umweltwirkungen der dadurch erforderlichen Produktion von Kältemitteln aufgezeigt. Die Gesamtwirkungen sind in [Tab. 5.1](#), die direkten Anteile in [Tab. 5.2](#) aufgeführt. Beim Primärenergieaufwand sind lediglich indirekte Beiträge zu verzeichnen. Der Primärenergieaufwand liegt bei den teilhalogenierten Kältemitteln bei ca. 260MJ Primärenergie-Äquiv. Damit liegt er um einen Faktor vier bis fünf über demjenigen von Ammoniak oder Propan. Kohlendioxid weist einen nochmals deutlich tieferen Primärenergieaufwand auf. Man erkennt das direkte Treibhauspotenzial der Kältemittel wie auch deutlich erhöhte Werte beim Versauerungspotenzial (Ammoniak und teilhalogenierte Kältemittel), beim sommersmogbildenden Potenzial (Propan) und beim terrestrischen Ökotoxizitätspotenzial (teilhalogenierte Kältemittel).



Beim ozonschichtabbauenden Potenzial lassen sich die drei Gruppen HCFC, HFC und natürliche Kältemittel mit in dieser Reihenfolge jeweils deutlich abnehmenden Werten erkennen. Die unterschiedliche Höhe der Emissionen radioaktiver Isotope ist Ausdruck eines höheren Strombedarfs in der Prozesskette der teilhalogenierten Kältemittel.

	Bedarf nicht-erneuerbare Primärenergie	Treibhauspotenzial	Ozonschichtabbauendes Potenzial	Versäuerungspotenzial	Sommer-smogbildendes Potenzial	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch	Emission radioaktiver Isotope
	MJ PE-Äquiv.	kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	kg CFC-11-Äquiv.	kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	kg Ethylen-Äquiv.	kg 1,4-DCB-Äquiv.	kg 1,4-DCB-Äquiv.	kBq-U-235-Äquiv.
Ammoniak	kg 44.2	2.53	8.91E-07	1.89	0.00303	1.55E+02	3.57E-03	0.0168
Propan	kg 61	0.954	4.6E-06	0.00745	0.431	3.87E+02	6.29E-03	0.0312
Kohlendioxid	kg 5.47	2.62	1.25E-07	0.00165	0.000639	4.47E+01	1.09E-03	0.0194
HFC-134a	kg 260	1372 <sup>1)</sup>	0.00801	1.0575	0.0184	1.50E+04	2.25E+00	0.736
HFC-404A	kg 259	3396	0.00801	0.727	0.0179	2.27E+03	1.91E-01	0.704
HFC-407C	kg 235	1656	0.00685	1.232	0.0164	8.56E+03	1.22E+00	0.724
HFC-410A	kg 207	1904	0.00549	1.397	0.0143	1.41E+03	9.08E-02	0.712
Isceon 59	kg 244	2044	0.00781	1.218	0.0184	8.37E+03	1.18E+00	0.679
HCFC-22	kg 116	1555	0.0578	1.1753	0.00855	8.18E+02	5.98E-02	0.522

Tab. 5.1: Wirkungsbilanz der hier untersuchten Kältemittel bezogen auf die Emission und die Produktion (von der Rohstoffgewinnung bis und mit Regionalverteilung in der Schweiz) von 1kg Kältemittel.

<sup>1)</sup>: In Campbell & McCulloch (1998) werden allein 77kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. Prozessemissionen ausgewiesen (plus 1'300kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. direkter Anteil). Da hier bei ozonschichtabbauenden Substanzen der (negative) indirekte Beitrag zum Treibhauseffekt berücksichtigt wird, resultiert ein tieferer Wert.

	Bedarf nicht-erneuerbare Primärenergie	Treibhauspotenzial	Ozonschichtabbauendes Potenzial	Versäuerungspotenzial	Sommer-smogbildendes Potenzial	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch	Emission radioaktiver Isotope
Ammoniak	kg 0.0%	0.0%	0.0%	99.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Propan	kg 0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	97.6%	0.0%	0.0%	0.0%
Kohlendioxid	kg 0.0%	38.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
HFC-134a	kg 0.0%	94.8%	0.0%	90.8%	0.0%	86.5%	93.3%	0.0%
HFC-404A	kg 0.0%	96.0%	0.0%	86.9%	0.0%	22.9%	44.0%	0.0%
HFC-407C	kg 0.0%	92.4%	0.0%	90.9%	0.0%	79.0%	89.1%	0.0%
HFC-410A	kg 0.0%	90.9%	0.0%	91.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Isceon 59	kg 0.0%	95.4%	0.0%	91.1%	0.0%	77.7%	88.8%	0.0%
HCFC-22	kg 0.0%	86.8%	95.2%	94.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tab. 5.2: Anteil der direkten, durch die Emission des Kältemittels selbst verursachten Umweltwirkung an der durch Kältemittel-Herstellung und -Emission verursachten Gesamtumweltwirkung (=100%).

### 5.2.2 Strombereitstellung

Bei der Strombereitstellung wird unterschieden zwischen Modellen, die für die Beschreibung einer Situation geeignet sind (Strommix Schweiz plus Stromhandel, Strommix UCPTE) und solchen, die in entscheidorientierte Analysen verwendet werden sollten (hier Erdgas-Blockheizkraftwerk und Erdgas-GuD-Kraftwerk).

Pro TJ Strom müssen zwischen 2.3 und knapp 3.6TJ nicht erneuerbare Primärenergieträger (Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran) gefördert werden (siehe Tab. 5.3). Da im schweizerischen

Strommix auch unter Berücksichtigung des Stromhandels mit ausländischen Werken ein vergleichsweise geringer fossilt thermischer Anteil zum Strommix beiträgt, sind die Potenziale bezüglich Treibhauseffekt, Versäuerung, Sommersmogbildung und aquatischer und terrestrischer Ökotoxizität deutlich tiefer als beim westeuropäischen Verbundstrom.

Das ozonschichtabbauende Potenzial der Strombereitstellung ist sehr gering, weshalb die Unterschiede unerheblich sind. Bei der Emission radioaktiver Isotope ist zwischen dem Schweizer und dem europäischen Mix ein deutlicher Unterschied erkennbar, der auf den höheren Anteil Kernenergie im Schweizer Mix zurückzuführen ist.

Bei den beiden erdgasbefeuerten Kraftwerken fallen die meist höheren Werte des Blockheizkraftwerkes auf. Hier muss berücksichtigt werden, dass der Allokationsfaktor für BHKW-Strom auf der Basis der Exergieinhalte von Wärme und Strom ermittelt worden ist. Dadurch wird die Wärme deutlich weniger belastet als z.B. Wärme die mittels eines kondensierenden Gaskessels erzeugt wird.

	Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie MWh PE-Äquiv.	Treibhauspotenzial kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Ozonschichtabbauendes Potenzial kg CFC-11-Äquiv.	Versäuerungspotenzial kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Sommersmogbildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
Schweiz plus Handel	2.28E+00	1.20E+02	2.59E-04	8.02E-01	1.82E-01	2.78E+04	3.71E-01	1.49E+02
UCPTE-Europa	3.56E+00	5.97E+02	3.32E-04	4.32E+00	8.78E-01	1.27E+05	2.24E+00	1.00E+02
Blockheizkraftwerk <sup>1)</sup>	3.04E+00	6.15E+02	4.10E-05	9.10E-01	8.60E-01	5.86E+03	1.45E-01	7.27E-01
GuD-Kraftwerk <sup>1)</sup>	2.49E+00	4.82E+02	1.13E-04	4.50E-01	2.65E-01	5.43E+03	1.54E-01	9.60E-01
<i>Nutzwärme:</i>								
Kond. Kessel <sup>1)</sup>	1.36E+00	2.71E+02	2.10E-05	2.53E-01	2.16E-01	3.05E+03	7.41E-02	3.30E+00
Blockheizkraftwerk <sup>1)</sup>	5.48E-01	1.11E+02	7.48E-06	1.65E-01	1.56E-01	1.20E+03	2.73E-02	1.51E-01

Tab. 5.3: Wirkungsbilanz der hier verwendeten Strommixe resp. Stromerzeugungsarten bezogen auf die Lieferung von 1MWh Strom auf Niederspannungsniveau. Da beim Blockheizkraftwerk (BHKW) eine Allokation durchgeführt werden muss, sind die Werte für 1MWh Nutzwärme ab BHKW und, zu Vergleichszwecken, ab einem kondensierenden Gaskessel aufgeführt.

<sup>1)</sup>: Mit Erdgas befeuert.

### 5.2.3 Ausgewählte Materialien

Da bei kältetechnischen Anlagen mehrheitlich metallische Werkstoffe eingesetzt werden, liegt hier das Hauptaugenmerk auf den Wirkungsbilanzen von Metallen (siehe Tab. 5.4). Zwischen Kupfer und rostfreiem Stahl zeigen sich deutliche Unterschiede. Kupfer weist einen deutlich höheren Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergie auf. Das Versäuerungspotenzial der rostfreien Stähle ist aber knapp doppelt so hoch wie dasjenige von Kupfer. Es wird aber noch von demjenigen von Aluminium übertroffen, das 0.35kg SO<sub>2</sub>-Äquiv. pro kg Werkstoff freisetzt.

Die Armaflex<sup>®</sup>-Isolation weist einen Aufwand an nicht erneuerbarer Primärenergie auf, der leicht unter demjenigen von Kupfer liegt. Über 20% dieses Primärenergieverbrauchs wird durch die langen Transportwege mit Lkw's verursacht, die infolge der geringen Dichte verpackter Isolierschläuche die erlaubte Nutzlast nur zu rund 7% ausnützen können.

	Bedarf nicht-erneuerbare Primärenergie MWh PE-Äquiv.	Treibhauspotenzial kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Ozonschichtabbauendes Potenzial kg CFC-11-Äquiv.	Versäuerungspotenzial kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Sommer-smogbildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
Kupfer	175	13.2	5.85E-06	0.0739	0.0197	3150	0.0677	0.643
rostfreier Stahl	99.3	5.46	3.03E-06	0.142	0.0086	768	0.0126	0.41
Aluminium	95.6	5.99	2.46E-06	0.351	0.00995	2240	0.0374	0.275
Baustahl	31.6	1.79	3.98E-07	0.00692	0.0025	863	0.00585	0.0568
Gusseisen	68.2	4.25	1.96E-06	0.0311	0.00724	1990	0.0322	0.0698
Armaflex®-Isolation	158	6.17	4.02E-05	0.0482	0.0355	1520	0.0337	0.384

Tab. 5.4: Wirkungsbilanz einer Auswahl von Materialien, die in den hier bilanzierten kältetechnischen Systeme häufig eingesetzt werden. Die Entsorgung der Materialien ist hier nicht berücksichtigt.

Damit sind wesentliche Informationen gegeben, um die in den folgenden Unterkapiteln geführten Resultatdiskussionen besser nachvollziehen zu können.

### 5.3 Wärmepumpen

#### 5.3.1 Vergleich der Wärmepumpen mit verschiedenen Kältemitteln

Auf der Basis der in Unterkap. 4.3 beschriebenen Annahmen werden die sieben Wärmepumpen miteinander verglichen (siehe Tab. 5.5 und Fig. 5.1).

Wärmepumpe mit	Bedarf nicht-erneuerbare Primärenergie MJ PE-Äquiv.	Treibhauspotenzial kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Ozonschichtabbauendes Potenzial kg CFC-11-Äquiv.	Versäuerungspotenzial kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Sommer-smogbildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
CO <sub>2</sub>	7.31E+05	1.43E+04	0.0272	101	37.6	3.39E+06	60.6	1.22E+04
Propan	6.98E+05	1.38E+04	0.0261	97.4	37.9	3.27E+06	59.1	1.15E+04
HFC-134a	6.51E+05	1.89E+04	0.0756	97.2	36.2	3.18E+06	66.4	1.07E+04
HFC-404A	7.33E+05	2.85E+04	0.0782	104	37.8	3.40E+06	61.6	1.22E+04
HFC-407C	7.20E+05	2.12E+04	0.0704	106	37.5	3.39E+06	65.4	1.19E+04
Isceon 59	6.51E+05	2.17E+04	0.0743	97.9	36.1	3.15E+06	62	1.07E+04
HCFC-22	6.98E+05	2.06E+04	0.269	102	37	3.28E+06	59.4	1.15E+04

Tab. 5.5: Wirkungsindikatorergebnisse der Ökobilanz einer 7kW<sub>th</sub> Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

Beim Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergie und bei den Emissionen radioaktiver Isotope zeigt sich die Korrelation zur Jahresarbeitszahl deutlich. Die Unterschiede sind dort praktisch proportional. Bei allen andern Kategorien zeigen sich jedoch durchaus unterschiedliche Muster. So zeigen die natürlichen Kältemittel deutlich tiefere Werte beim Treibhauseffekt im Vergleich zu den teilhalogenierten, wo das Gemisch HFC-404A mit Abstand den höchsten Wert aufweist. Beim Ozonschichtabbau zeigt sich das Verbesserungspotenzial durch Verlassen der HCFC-22-Technologie (Reduktion um mind. 70%). Durch einen Wechsel auf Propan

oder CO<sub>2</sub> kann - ähnliche Jahresarbeitszahl vorausgesetzt - ein Reduktionsfaktor von etwa 10 mühelos erreicht werden.

Bei den Umweltwirkungen Versäuerung, Sommersmog und aquatische Ökotoxizität sind die Unterschiede weit weniger deutlich. Es zeigt sich aber, dass die versäuernden Gesamtemissionen der HFC-134a-Wärmepumpe trotz einer sehr guten Jahresarbeitszahl etwa denen der Propan-Wärmepumpe entsprechen.

Beim Sommersmog zeigt die Propan-Wärmepumpe infolge der Kältemittel-Emissionen den höchsten Wert. Wärmepumpen mit deutlich besserer Jahresarbeitszahl (hier HFC-134a und Isceon 59) liegen um knapp 5% tiefer. Die aquatische Ökotoxizität zeigt wieder eine dem Energieverbrauch deutlich nähere Verteilung, wobei die Emission von HFC-134a zu geringfügigen Verschiebungen bei den HFC-134a-, HFC-407C- und Isceon 59-Wärmepumpen führt.

Bei der terrestrischen Ökotoxizität sind es ebenfalls diese drei HFC-Wärmepumpen, welche durch die Emission von HFC-134a leicht bis spürbar erhöhte Gesamtwirkungen aufweisen, als aufgrund der Verhältnisse der Energieeffizienz erwartet würde.

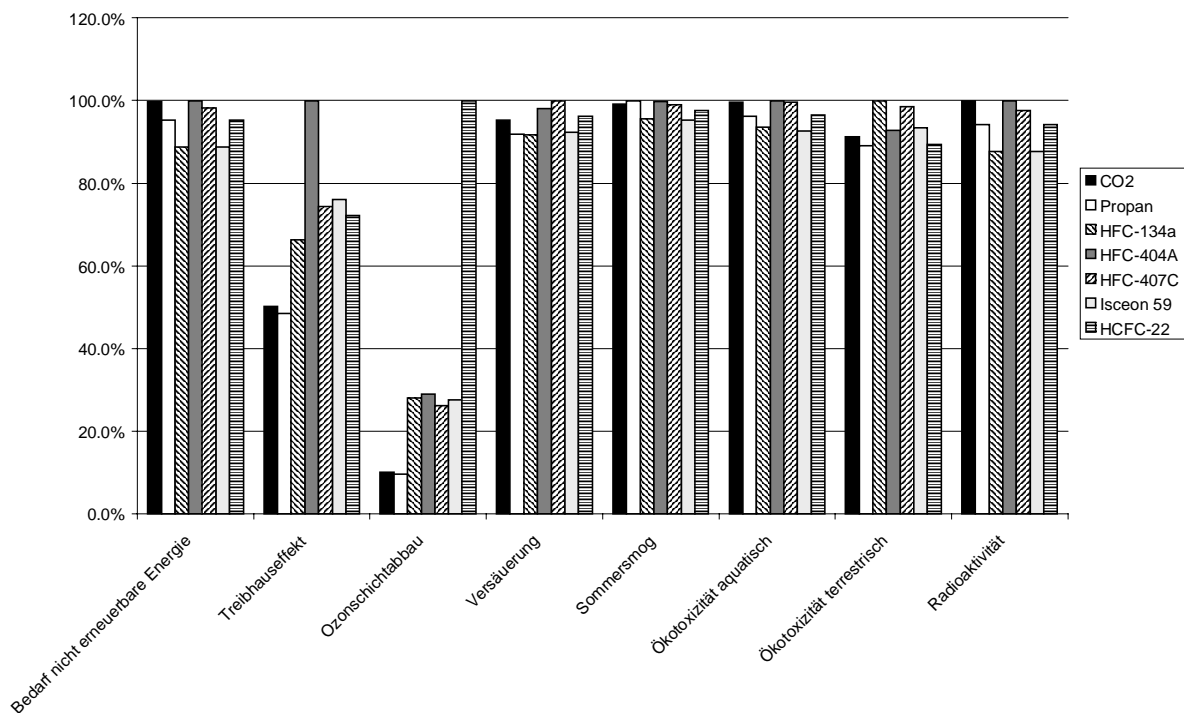


Fig. 5.1: Vergleich der Umweltwirkungen der 7kW<sub>th</sub> Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln auf der Basis der an das Verteilnetz abgegebenen Heizenergie. Die jeweils höchsten Werte pro Umweltwirkung (siehe Tab. 5.5) wurden zu 100% gesetzt.

### 5.3.2 Dominanzanalyse Prozessschritte

Die Diskussion der Ergebnisse für die Wärmebereitstellung mit Wärmepumpen ist in die folgenden fünf Prozessschritte aufgeteilt:

- Kältemittlemission im Betrieb,
- Betriebsstrom-Bereitstellung (Strommix Schweiz inkl. Stromhandel),
- Fertigung der Wärmepumpenanlage (inkl. Kältemittlemission beim Befüllen),
- Entsorgung der Wärmepumpenanlage (inkl. Kältemittlemission beim Rückbau),
- Kältemittelherstellung (für Erst- und Nachfüllungen).

Für eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von  $7\text{kW}_{\text{th}}$  werden die Beiträge dieser Prozessschritte zu den Umweltwirkungen beim Einsatz verschiedener Kältemittel aufgezeigt. Die Darstellung erfolgt in Prozenten der einzelnen Gesamtwirkungen. Für die Werte der Wirkungsindikatorergebnisse sei auf Tab. 5.5 verwiesen.

*Generelle Einschätzung:*

Die Strombereitstellung ist bei einigen Umweltwirkungen für alle Kältemittel der relevante Prozess. Dies gilt insbesondere für die radioaktiven Emissionen und den Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie. Nicht zu unterschätzen ist jedoch auch die Infrastruktur, welche doch teilweise beachtliche Anteile an die Gesamtbelastung beisteuert. Hier zeigt sich der Aufwand für das Bohren der Erdsonden (dieselbetriebene Baumaschinen) im deutlich grössten Anteil an sommersmogverursachenden Schadstoffen. Die Entsorgung der Anlage ist v.a. bei den beiden Kategorien Ökotoxizität aquatisch und terrestrisch von einiger Bedeutung.

Nach dieser Gesamteinschätzung wird auf Eigenheiten der einzelnen Kältemittel eingegangen.

*CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe (siehe Fig. 5.2):*

Der Anteil der Kältemittlemissionen am Treibhauseffekt (wie auch an allen andern Umweltwirkungen) ist vernachlässigbar. Auch die Herstellung des Kältemittels fällt nicht ins Gewicht.

*Propan-Wärmepumpe (siehe Fig. 5.3):*

Die Kältemittlemissionen im Betrieb und bei der Entsorgung machen sich in der Kategorie "Sommersmog" bemerkbar. Ansonsten zeigt sich ein der Dominanzanalyse der CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe sehr ähnliches Bild.

*HFC-134a-Wärmepumpe (siehe Fig. 5.4):*

Die Umweltwirkungen "Treibhauseffekt", "Versäuerung" und "terrestrische Ökotoxizität" werden durch die Kältemittlemissionen im Betrieb und - weniger deutlich - bei der Entsorgung beeinflusst. Zudem zeigen sich die Emissionen ozonschichtabbauender Substanzen bei der Herstellung von HFC-134a deutlich.

*HFC-404A-Wärmepumpe (siehe Fig. 5.5):*

Da dieses Gemisch von HFCs nur einen geringen Anteil HFC-134a enthält (4 Gew.-%), ist der Beitrag zur Ökotoxizität der Kältemittel-Emissionen im Betrieb sehr klein. Ansonsten zeigt die Dominanzanalyse dieser Wärmepumpe ähnliche Charakteristika wie die HFC-134a-Wärmepumpe.

*HFC-407A-Wärmepumpe (siehe Fig. 5.6):*

Ein geringeres direktes Treibhauspotenzial des Kältemittels im Vergleich zu HFC-404A und ein gegenüber HFC-404A höherer Anteil an HFC-134a (terrestrische Ökotoxizität) prägen das Bild der Dominanzanalyse dieses Gemisches.

*Isceon 59-Wärmepumpe (siehe Fig. 5.7):*

Als Gemisch von HFCs zeigt die Dominanzanalyse der Isceon-59-Wärmepumpe eine ähnliche Struktur wie die HFC-134a-Wärmepumpe. Infolge des höheren Treibhauspotenzials ist der Anteil am Treibhauseffekt etwas höher, wogegen der Beitrag zur terrestrischen Ökotoxizität, zu der in diesem Gemisch nur HFC-134a beiträgt, geringer ausfällt.

*HCFC-22-Wärmepumpe (siehe Fig. 5.8):*

Hier fallen erwartungsgemäss die Umweltwirkungen "Ozonschichtabbau" und "Treibhauseffekt" auf. Die ozonabbauende Wirkung wird zu mehr als zwei Dritteln durch die Betriebskäl-

temittelverluste verursacht. Bei den andern Kategorien zeigt sich ein der HFC-404A-Wärmepumpe ähnliches Bild.

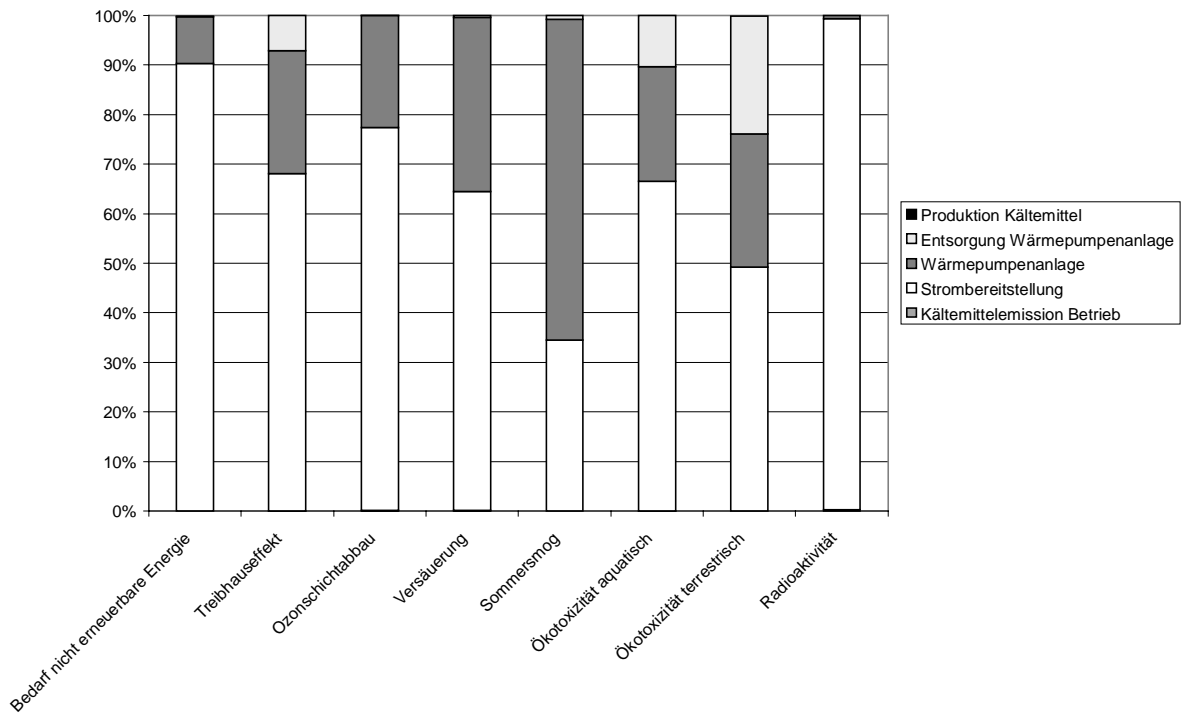


Fig. 5.2: Dominanzanalyse der Prozessschritte der CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe (Sole/Wasser, 7kW<sub>th</sub>).

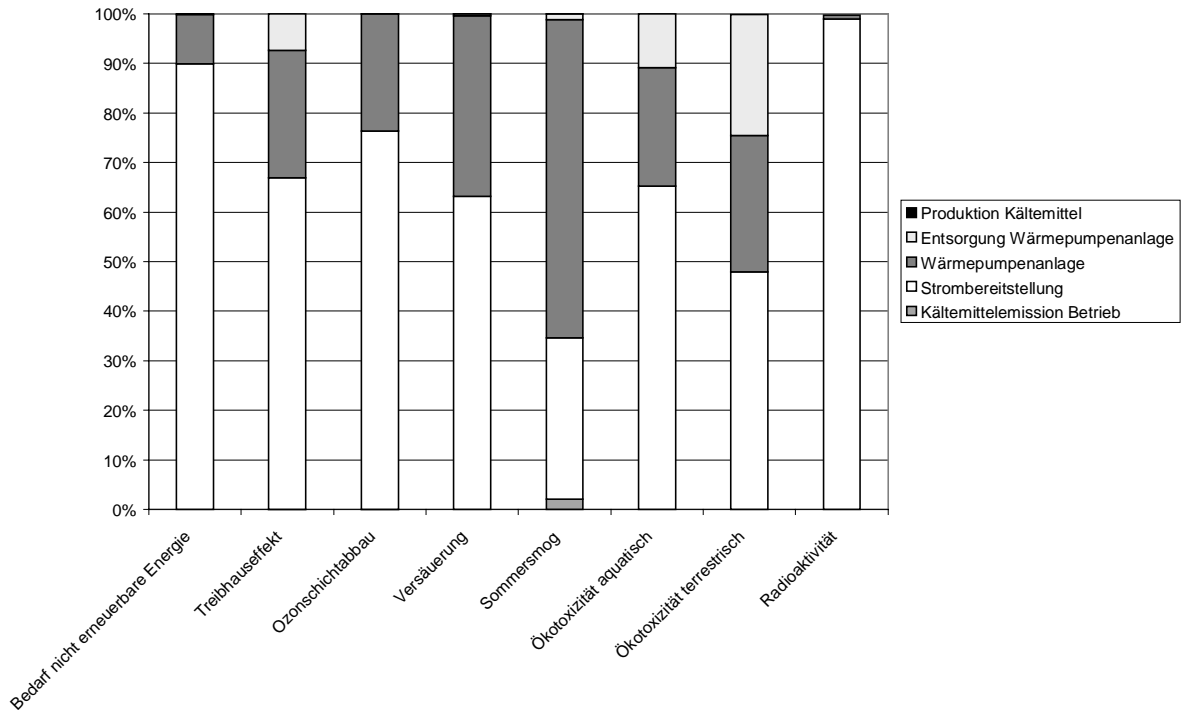


Fig. 5.3: Dominanzanalyse der Prozessschritte der Propan-Wärmepumpe (Sole/Wasser, 7kW<sub>th</sub>).

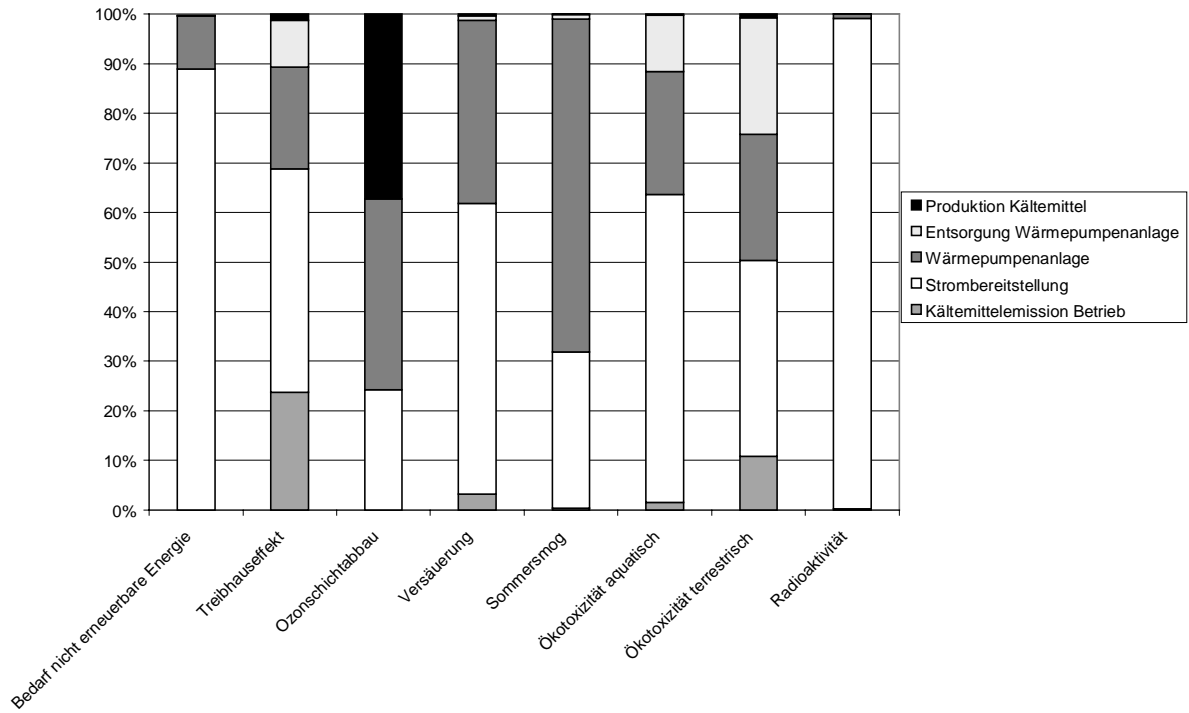


Fig. 5.4: Dominanzanalyse der Prozessschritte der HFC-134a-Wärmepumpe (Sole/Wasser, 7kW<sub>th</sub>).

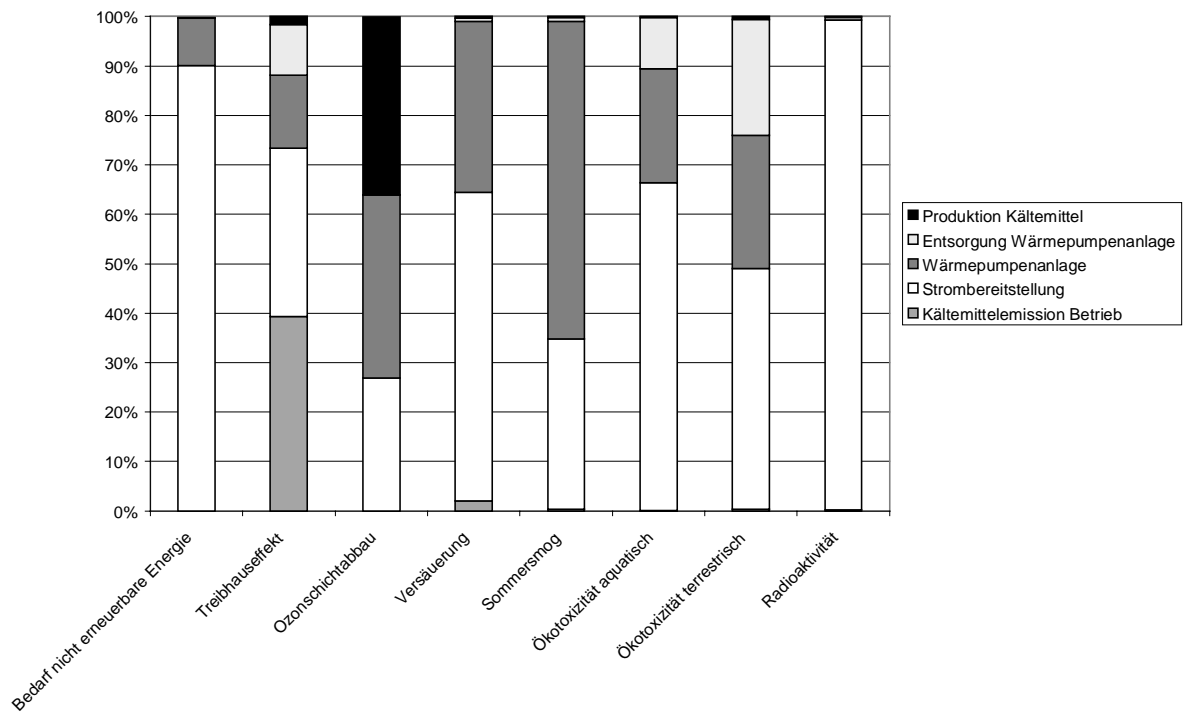


Fig. 5.5: Dominanzanalyse der Prozessschritte der HFC-404A-Wärmepumpe (Sole/Wasser, 7kW<sub>th</sub>).

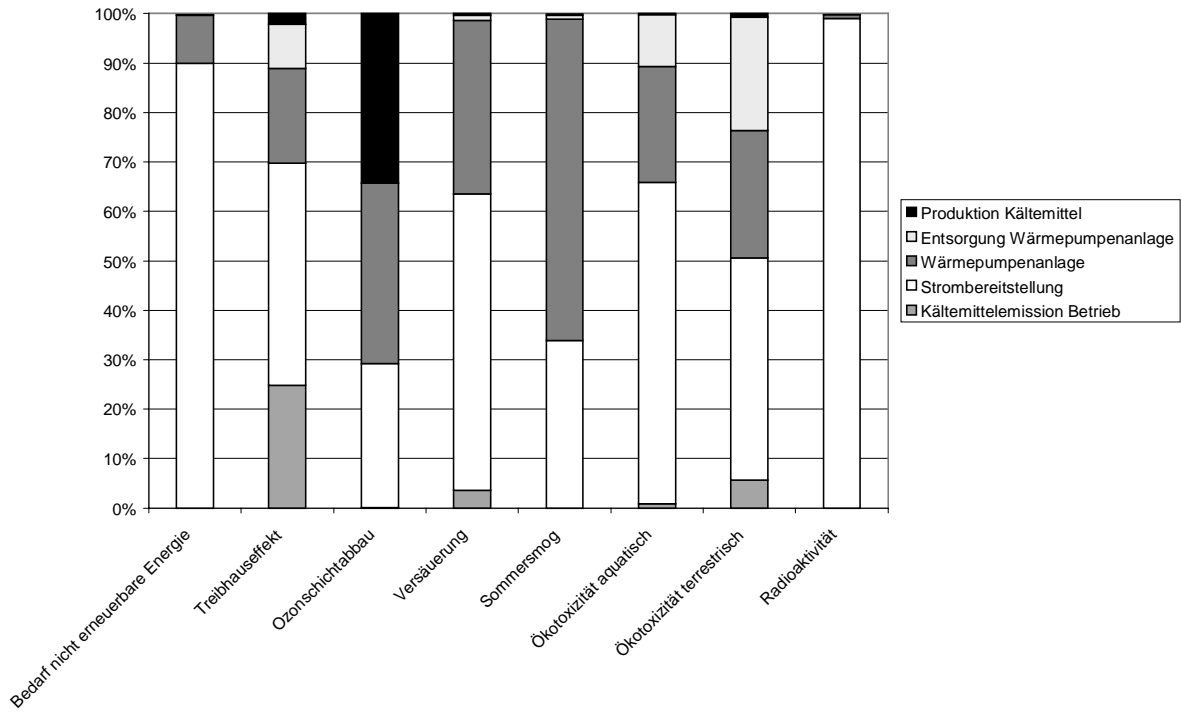


Fig. 5.6: Dominanzanalyse der Prozessschritte der HFC-407C-Wärmepumpe (Sole/Wasser, 7kW<sub>th</sub>).

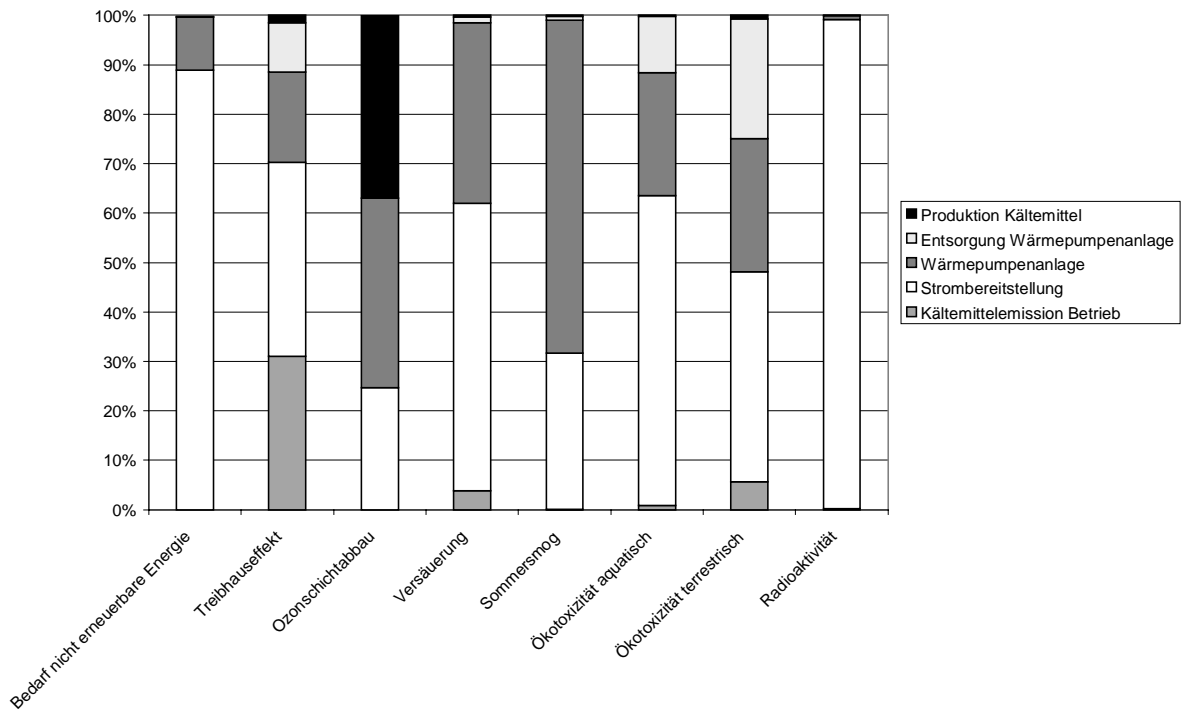


Fig. 5.7: Dominanzanalyse der Prozessschritte der Isceon 59-Wärmepumpe (Sole/Wasser, 7kW<sub>th</sub>).



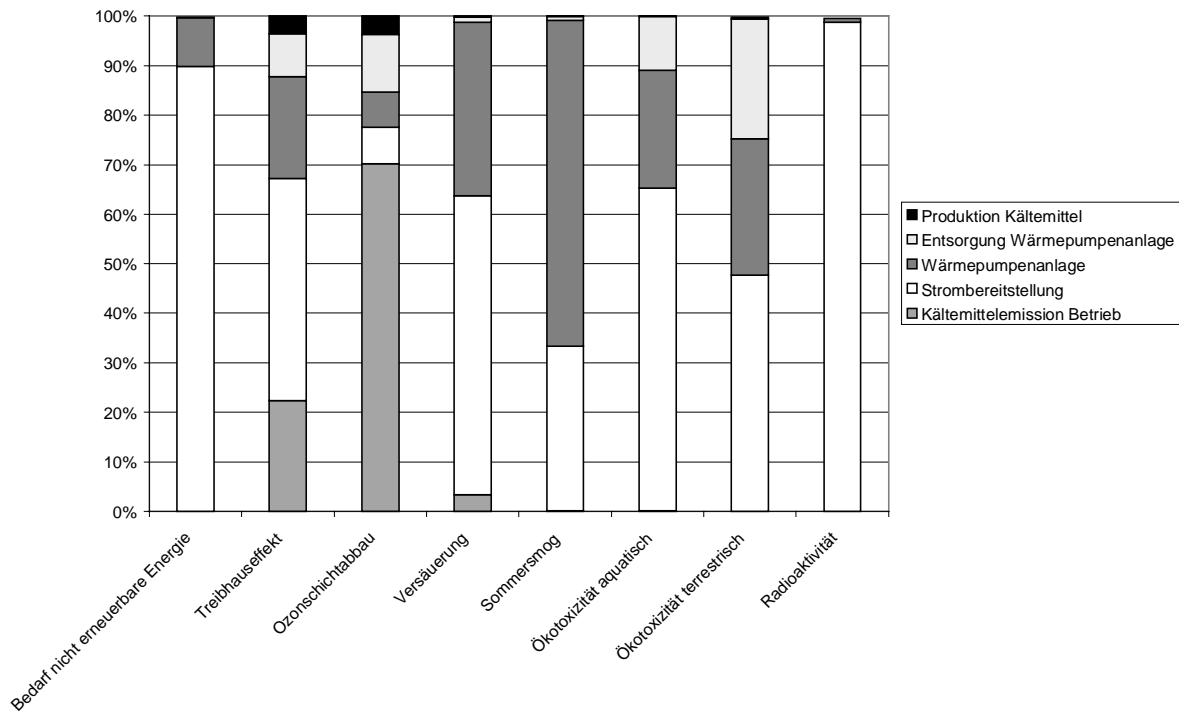


Fig. 5.8: Dominanzanalyse der Prozessschritte der HCFC-22-Wärmepumpe (Sole/Wasser, 7kW<sub>th</sub>).

### 5.3.3 Dominanzanalyse Schadstoffe

Die Dominanzanalyse der Schadstoffe wird ebenfalls anhand der Sole/Wasser-Wärmepumpen mit einer thermischen Leistung von 7kW<sub>th</sub> durchgeführt.

Die Ergebnisse in den einzelnen Umweltwirkungen werden in der Regel durch wenige Schadstoffe resp. Ressourcen beeinflusst. Diese werden teilweise in den vorgelagerten Prozessketten ausgestossen und sind somit durch Massnahmen bei den Kältetechniksystemen lediglich indirekt beeinflussbar.

#### *Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf:*

Mit rund 75% ist der Uranbedarf der dominierende nicht erneuerbare Energieträger, gefolgt von Erdöl (11 bis 12%), Steinkohle (ca. 7%) und Braunkohle (3%). Im hohen Uranbedarf zeigt sich die Dominanz der Strombereitstellung aus energetischer Sicht. Die Anteile gelten unabhängig vom eingesetzten Kältemittel. Darin widerspiegelt sich auch die geringe primärenergetische Bedeutung der Kältemittelherstellung.

#### *Treibhauseffekt:*

Bei den natürlichen Kältemitteln ist CO<sub>2</sub> mit einem Anteil von über 90% das dominante Treibhausgas. Bei den teilhalogenierten Kältemitteln steuert CO<sub>2</sub> nur noch zwischen 46 und 63% bei. Ein wichtiger Anteil wird dort durch die Kältemittel selbst (zwischen 28 und 47%, HCFC-22 resp. HFC-404A) verursacht. Methan und Lachgas sind mit Anteilen zwischen je 2 und 4% von untergeordneter Bedeutung. CFC-113, von welchem angenommen wird, dass es bei der Herstellung von HFCs freigesetzt wird, steuert bei den Wärmepumpen mit teilhalogenierten Kältemitteln (ohne HCFC-22) als Folge des hohen Treibhauspotenzials zwischen 0.7 und 1.0% bei. Bei der HCFC-22 Wärmepumpe ist HFC-23 erwähnenswert, welches bei der Kältemittel-Produktion emittiert wird und über 5% des lebenszyklusbezogenen Treibhauseffekts ausmacht.

*Ozonschichtabbau:*

Beim HCFC-22 führt dessen Emission bei Anlagen-Fertigung, Betrieb und Entsorgung zu 86% der Gesamtwirkung. Die bei der Herstellung vermuteten Emissionen an CFC-113 (56 bis 67% der Gesamtwirkung bei den HFCs) und die bei der Urananreicherung zu verzeichnenden CFC-114-Emissionen tragen zusammen bei den andern teilhalogenierten Kältemitteln zu 75 bis 89% zum Ozonschichtabbau bei. CFC-114 ist bei den natürlichen Kältemitteln alleine zu knapp 40% für die Gesamtwirkung verantwortlich. Halon, dessen Einsatz als Feuerlöschmitteln auf Bohrinseln und auf Schiffen in Frischknecht et al. (1996) berücksichtigt worden ist, steuert bei den teilhalogenierten Kältemitteln 2.5 resp. rund 10% bei (HCFC-22 resp. HFC-407C). Bei CO<sub>2</sub> und Propan sind es rund 25%. Tetrachlormethan-Emissionen verursachen zwischen 7 und 13% der Gesamtwirkung bei teilhalogenierten Kältemitteln (ohne HCFC-22). Bei natürlichen Kältemitteln stammen über 25% durch indirekte Tetrachlormethan-Emissionen (Herstellung von Natronlauge und Chlor).

*Versäuerung:*

Der Beitrag von Schwefeldioxid zur Versäuerung ist nur leicht vom Kältemittel abhängig und beläuft sich auf zwischen 66 und 71%. Nach den Stickoxiden (Anteile von 25 bis 27%) sind die Emission teilhalogenerter Kältemittel mit 2.5 bis 4.6% die dritt wichtigsten Beiträge. Danach folgen noch Salz- und Flusssäure mit Anteilen von 1.3 resp. 0.3%.

*Sommersmog:*

Die Stickoxide sind zu knapp zwei Dritteln für die Gesamtmenge an Sommersmogwirkung der Wärmepumpenanwendung verantwortlich. Dabei zeigt sich eine relativ geringe Abhängigkeit vom Kältemittel. Die Kohlenwasserstoffe steuern das restliche Drittel bei. Als Einzelsubstanz ist Propan bei der Propan-Wärmepumpe mit einem Beitrag von 2.5% zu erwähnen.

*Aquatische Ökotoxizität:*

Vanadium-Emissionen in die Atmosphäre sind für gut 30% der aquatischen Ökotoxizität verantwortlich. Es wird hier vorwiegend durch Stein- und Braunkohlekraftwerke und bei der Entsorgung der Polyethylenrohre (Kehrichtverbrennung) ausgestossen. Nickel und Selen sind zwei weitere Luftschadstoffe, die je ca. 2 bis 3% zur Gesamtwirkung beitragen. Vanadium und Selen ins Süßwasser steuern 10 resp. 25% bei und stammen aus Raffinerieprozessen und dem Abbau von Uran. Kobalt, Molybdän und Nickel ins Wasser verursachen zusammen ca. 6% der Gesamtwirkung. Bariumemissionen ins Süßwasser und in den Ozean tragen 20% zum Gesamtwert der aquatischen Ökotoxizität bei. Das Barium wird vorwiegend bei der Erdölförderung (beim Erbohren von Offshore-Erdölfeldern) emittiert. Die Emission von HFC-134a führt zu Anteilen von 1.7 resp. 0.8% für die HFC-134a-, resp. HFC-407C- und Isceon 59-Wärmepumpe.

*Terrestrische Ökotoxizität:*

Bei der terrestrischen Ökotoxizität spielen die HFC-134a-Emissionen eine gewisse Rolle. Der Anteil dieses Fluorkohlenwasserstoffes an der Gesamtwirkung liegt je nach eingesetztem Kältemittel(gemisch) bei 0.6% (HFC-404A), 6.8% (HFC-407C), 6.9% (Isceon 59) resp. 13.3% (HFC-134a). Die Wirkung wird über das sehr persistente Abbauprodukt Trifluoressigsäure (TFA) verursacht. Ansonsten sind es ausschliesslich Schwermetalle, die mit namhaften Beiträgen die Gesamtwirkung bestimmen. Es sind dies Vanadium (62 bis 71%, davon rund 28% aus der Entsorgung der Polyethylenrohre), Quecksilber (21 bis 25%) und Nickel (ca. 1.2%), welche in die Luft emittiert werden. Arsen-, Blei-, Cadmium-, Kobalt-, Kupfer-, Selen- und Zink-Emissionen in die Luft steuern alle im Bereich 0.1 bis 0.3% bei.

*Radioaktivität:*

In dieser Kategorie zeigt sich dieselbe Struktur wie bei einer Dominanzanalyse der Kernenergieprozesskette. Neben den Langzeitemissionen von Radon-222 aus den verlassenen Uranaufbereitungsanlagen und -schlammteichen sind die Kohlenstoff-14-Emissionen der Kraftwerke erwähnenswert.

**5.3.4 Sensitivitätsanalyse Strombereitstellung**

In diesem Abschnitt soll der Einfluss der Art der Strombereitstellung analysiert werden. Die Sensitivitätsbetrachtung zeigt vor allem die Effizienz der Strombereitstellung bezüglich der hier ausgewählten Kriterien auf. Wärmepumpen mit einem höheren Stromverbrauch reagieren sensibler auf unterschiedliche Strombereitstellungsarten als energieeffizientere Wärmepumpen. Damit lassen sich auch Aussagen über die Relevanz der Anlagenherstellung, -entsorgung sowie der Herstellung und Emission der Kältemittel ableiten.

*Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie (siehe Fig. 5.9):*

Dank dem hohen Wasserkraftanteil weist der schweizerische Strommix auch unter Berücksichtigung der Strombeschaffung im Ausland mit rund 0.7TJ pro TJ von der Wärmepumpe an das Heizungsverteilnetz abgegebene Energie den tiefsten Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergieträger auf. Bei Anwendung der Wärmepumpe irgendwo im westeuropäischen Raum (UCPTE) liegt die Energieeffizienz bei ca. 1TJ nicht erneuerbare Energie pro TJ an das Verteilssystem abgegebene Wärme. Für neu zuzubauende Wärmepumpen liegt die Energieeffizienz der Wärmepumpe bei den hier zugrundeliegenden (recht hohen) Jahresarbeitszahlen von 3.4 bis 3.9 je nach unterstellter Technologie zwischen 0.7 und 0.92 TJ Primärenergie pro TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

*Treibhauseffekt (siehe Fig. 5.10):*

Bei den beiden für beschreibende Analysen geeigneten Strommodellen bestehen Unterschiede bezüglich Treibhauspotenzial im Bereich Faktor zwei bis drei. Die beiden erdgasbefeuerten Kraftwerke liegen demgegenüber näher beieinander. Beim Erdgas-BHKW muss beachtet werden, dass die gleichzeitig erzeugte Wärme mit einem spezifischen Ausstoss von Treibhausgasen belastet ist, der um 59% tiefer liegt als derjenige von modernen, kondensierenden Erdgasheizungen (siehe Tab. 5.3).

*Ozonschichtabbau (siehe Fig. 5.11):*

Die Gesamtwirkung Ozonschichtabbau wird durch den Strombedarf und damit auch durch die Wahl des Strommodells nur schwach beeinflusst. Lediglich bei bereits tiefen Werten (bei Propan oder CO<sub>2</sub>) sind die relativen Differenzen gross.

*Versäuerung (siehe Fig. 5.12):*

Die Wirkungskategorie "Versäuerung" wird stark von der Strombereitstellung geprägt und hat - im Gegensatz zum Umweltproblem "Ozonschichtabbau" - einen grösseren Einfluss auf das Endergebnis als die Wahl des Kältemittels. Für die zubauorientierten Strommodelle (Erdgaskraftwerke) zeigt sich der Einfluss der umweltlichen Eigenschaften und der Herstellungsprozesse der Kältemittel deutlicher, wenn auch insgesamt auf tieferem Niveau.

*Sommersmog (siehe Fig. 5.13):*

Auch beim Sommersmog ist die Strombereitstellung stärker diskriminierend als die Wahl des Kältemittels. Erstaunlich sind hier die relativ hohen Werte des Erdgas-BHKWs. Sie sind auf die geänderten Vorschriften der Luftreinhalteverordnung (Erhöhung des Stickoxid-Grenzwertes von 80 auf 250mg/Nm<sup>3</sup>) zurückzuführen. Wärmekraftkopplungs-Anlagen, welche mit einem Katalysator ausgerüstet sind, erreichen hier deutlich tiefere Gesamtbelastungen.

### Aquatische Ökotoxizität (siehe Fig. 5.14):

Auch dieser Umwelteffekt wird innerhalb der hier betrachteten Wärmepumpen-Systeme hauptsächlich durch die Art der Strombereitstellung geprägt. Das aquatische Ökotoxizitätspotenzial der westeuropäischen Strombereitstellung liegt, bedingt durch den höheren Anteil an Braun- und Steinkohle-, und Schwerölkraftwerken um einen Faktor 3 über demjenigen der schweizerischen Stromversorgung.

Bei den erdgasbefeuerten Kraftwerken zeigt sich der erhöhte Einfluss der Kältemittlemissionen, indem hier die Unterschiede weit weniger deutlich sind als sie infolge der unterschiedlichen Energieeffizienz alleine zu erwarten wären.

### Terrestrische Ökotoxizität (siehe Fig. 5.15):

Bei den eher tieferen Werten der schweizerischen und der Erdgas-Strombereitstellung zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Kältemittlemissionen (HFC-134a-Emissionen bei HFC-134a, Isceon 59 und HFC-407C). Bei der Bilanzierung existierender Wärmepumpen im nicht näher definierten westeuropäischen (UCPTE-)Raum zeigt sich dann aber eine Verschiebung in Richtung energiedominierte Rangfolge (siehe "Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie"). Hier ist also die klare Definition des geographischen Geltungsbereichs wie auch des Studiencharakters (beschreibende oder entscheidorientierte Ökobilanz) von entscheidender Bedeutung für die umweltliche Relevanz der Kältemittlemissionen.

### Emission radioaktiver Isotope (siehe Fig. 5.16):

Bei den Emissionen radioaktiver Isotope zeigt sich nun wieder die jahresarbeitszahl-abhängige Rangfolge. Die Rangfolge innerhalb der verschiedenen Kältemittel bleibt erhalten. Die Höhe der Umweltwirkung ist jedoch bei erdgasbetriebenen Kraftwerken sehr gering (nur indirekte Anteile), weshalb in diesen Fällen der Indikator kaum entscheidungsrelevant ist.

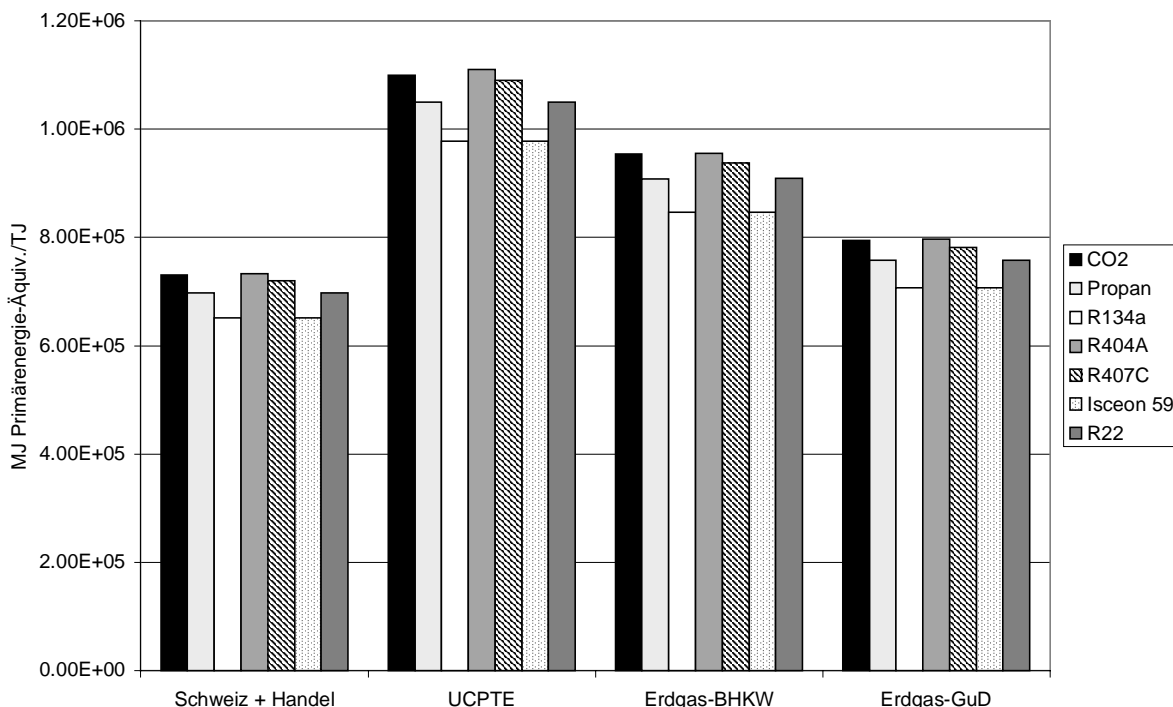


Fig. 5.9: Vergleich des Bedarfs nicht erneuerbarer Primärenergie von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Strombereitstellung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

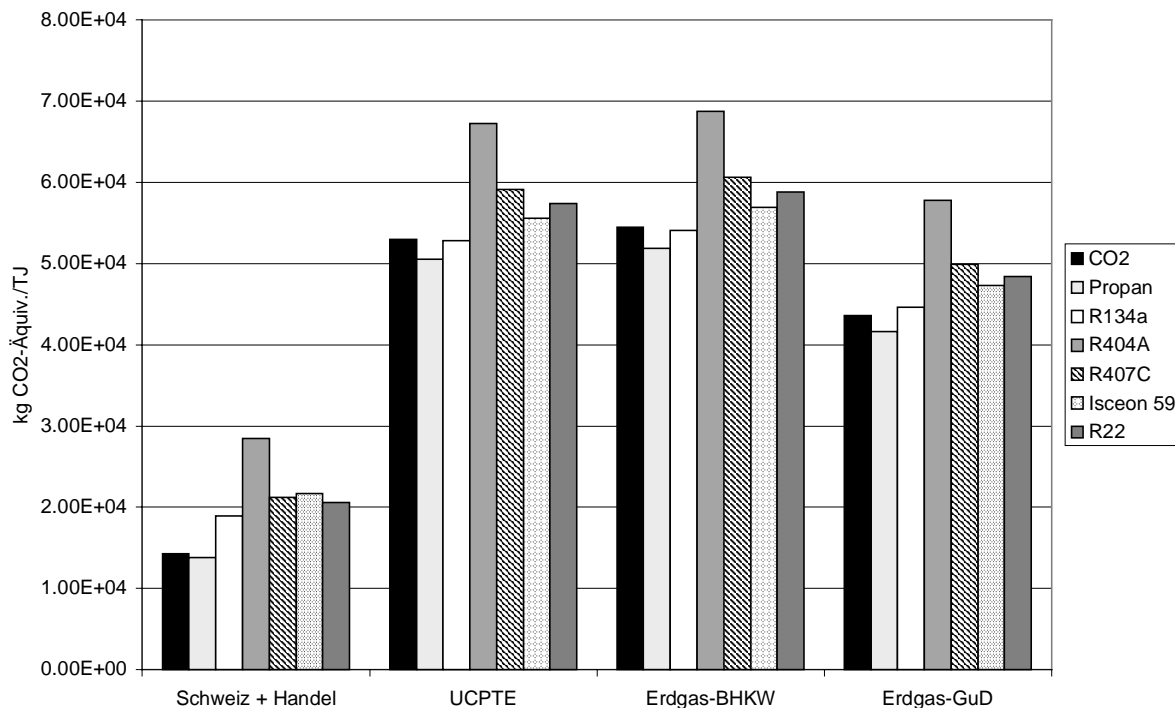


Fig. 5.10: Vergleich des Treibhauspotenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Strombereitstellung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

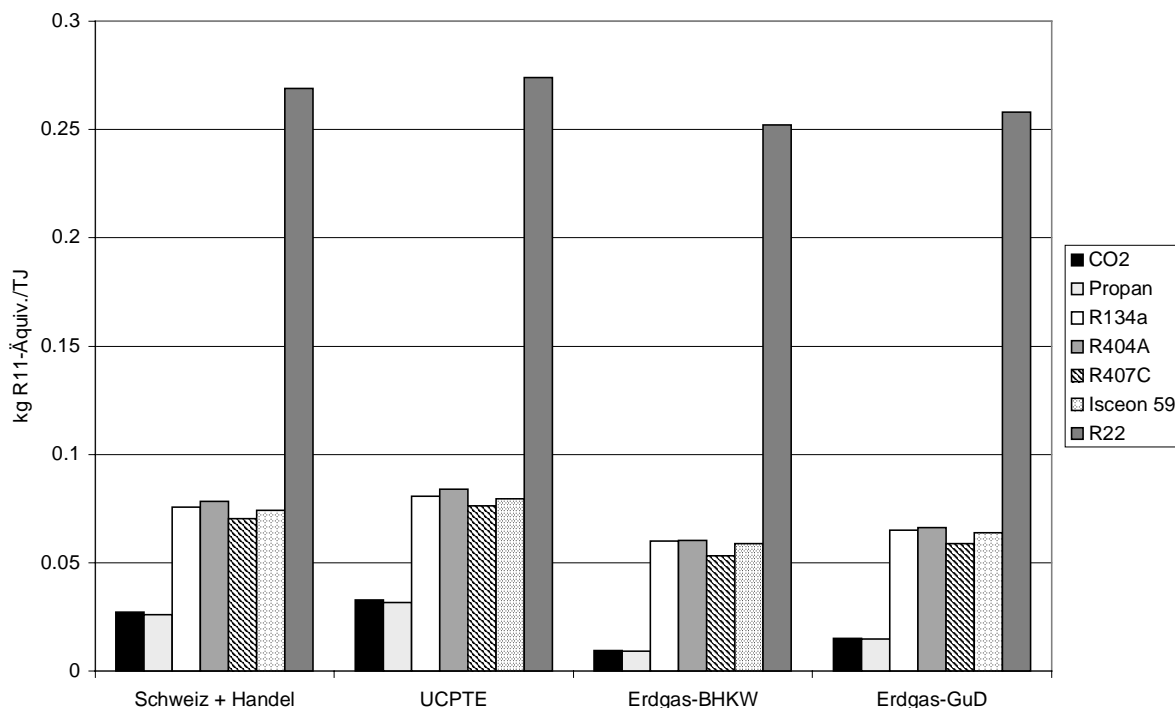


Fig. 5.11: Vergleich des ozonschichtabbauenden Potenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Strombereitstellung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

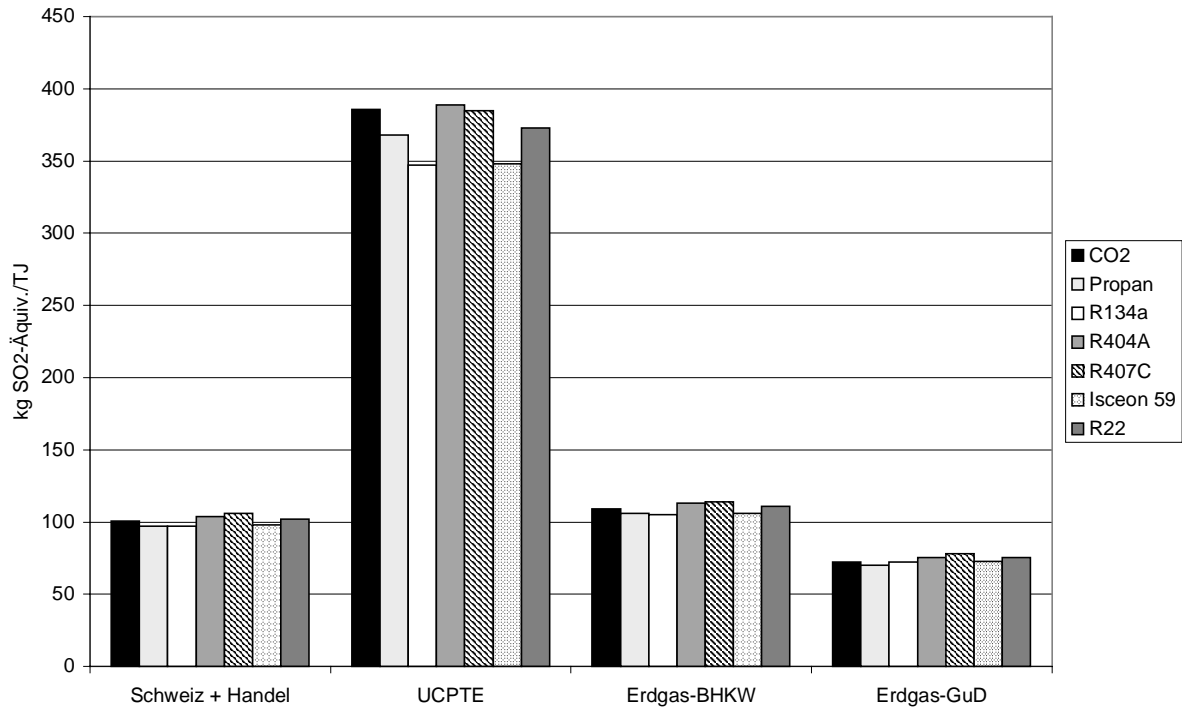


Fig. 5.12: Vergleich des Versäuerungspotenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7\text{kW}_{\text{th}}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Strombereitstellung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

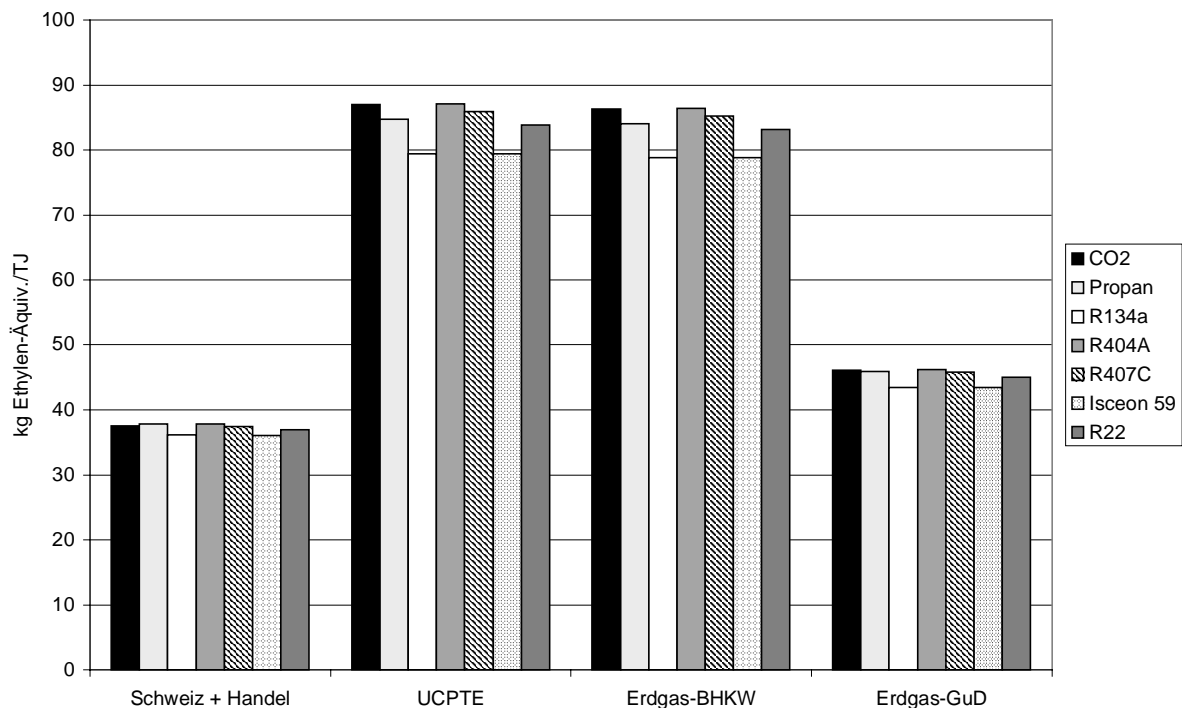


Fig. 5.13: Vergleich des sommersmogbildenden Potenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7\text{kW}_{\text{th}}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Strombereitstellung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

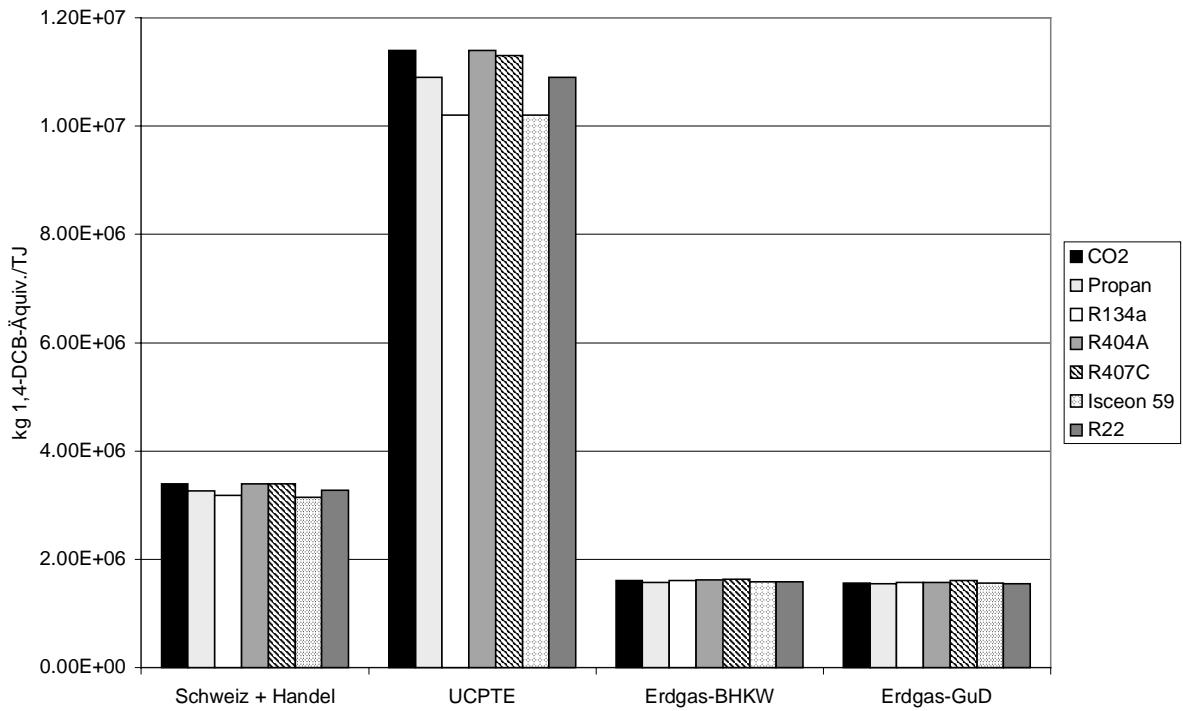


Fig. 5.14: Vergleich des aquatischen Ökotoxizitätspotenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Strombereitstellung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

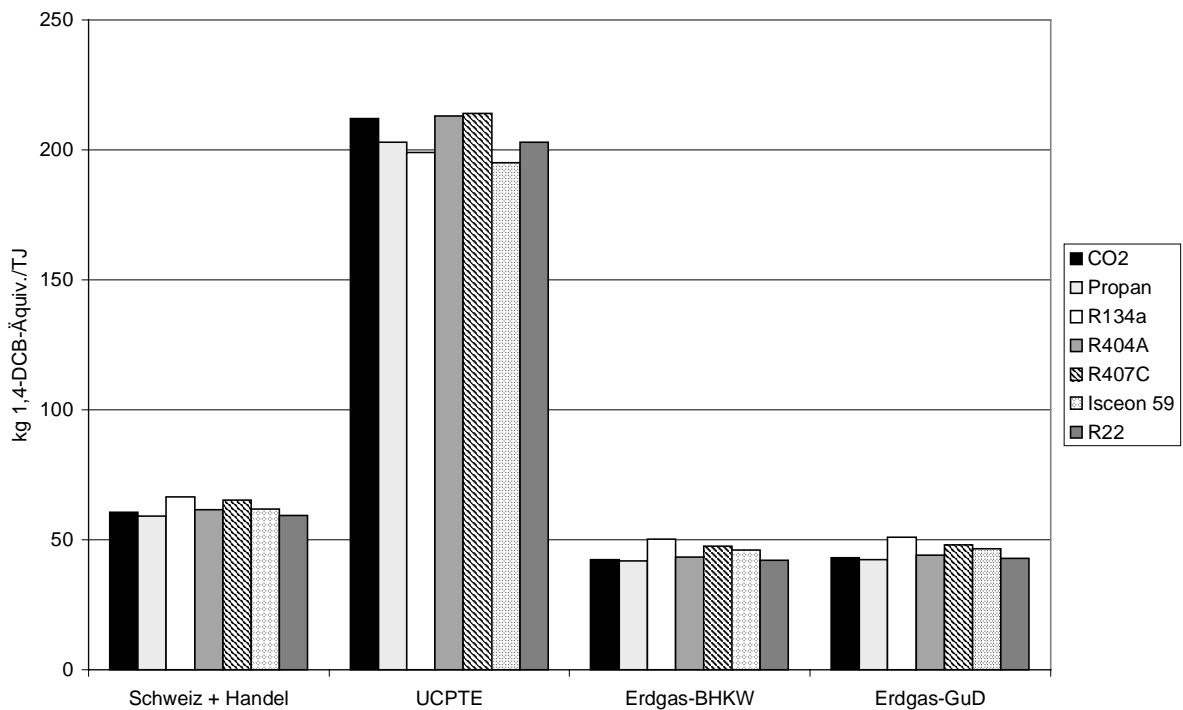


Fig. 5.15: Vergleich des terrestrischen Ökotoxizitätspotenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Strombereitstellung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

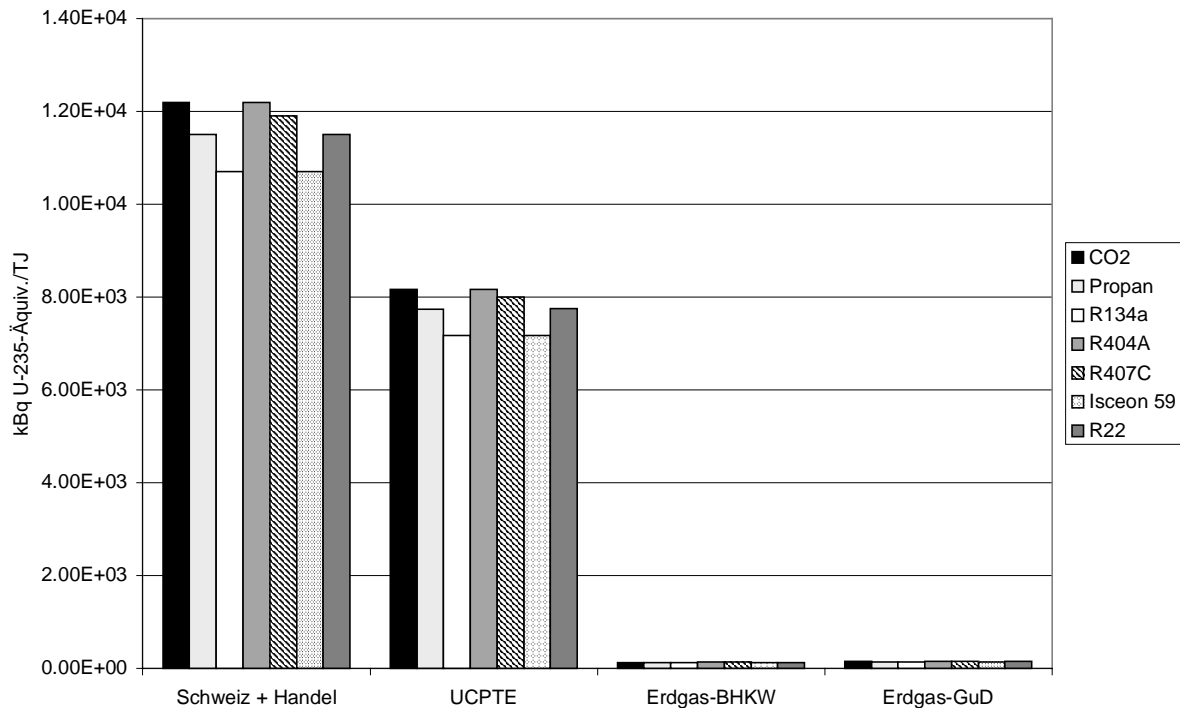


Fig. 5.16: Vergleich der Emissionen radioaktiver Isotope von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7\text{kW}_{\text{th}}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Strombereitstellung. Basis:  $1\text{TJ}$  an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Wärmepumpentypen (Sole/Wasser und Luft/Wasser) und Anlagegrößen ( $7\text{kW}_{\text{th}}$  und  $50\text{kW}_{\text{th}}$ ) miteinander verglichen.

### 5.3.5 Vergleich verschiedener Anlagegrößen

Der Vergleich verschiedener Anlagegrößen erfolgt unter Berücksichtigung heutiger Verlustmengen und einer Strombereitstellung mit dem schweizerischen Strommix. Die wichtigsten Kenngrößen der hier verglichenen Anlagen sind in Unterkapitel 4.3 aufgeführt.

*Nicht erneuerbare Energie (siehe Fig. 5.17):*

Die lebenszyklusbezogene Energieeffizienz ist erwartungsgemäss bei grösseren Anlagen generell etwas besser. Die leicht höheren Jahresarbeitszahlen (eigentlich Leistungszahlen) der Sole/Wasser-Wärmepumpen gegenüber den Luft/Wasser-Wärmepumpen werden durch den erhöhten Aufwand für das Errichten der Erdsonden mehr als kompensiert. Auffallend ist zudem, dass die relativen Effizienzunterschiede der Kältemittel innerhalb der Luft/Wasser-Wärmepumpen nicht gleich bleibt.

*Treibhauseffekt (siehe Fig. 5.18):*

Unabhängig von der Anlagengrösse emittieren die Wärmepumpen mit teilhalogenierten Kältemitteln mehr treibhauswirksame Gase als die  $\text{CO}_2$ - oder Propan-Wärmepumpen. Dies trotz teilweise deutlich höherer Jahresarbeitszahl.

*Ozonschichtabbau (siehe Fig. 5.19):*

Auch das ozonschichtabbauende Potenzial ist nahezu unabhängig von der Art und Grösse der hier untersuchten Wärmepumpen. Bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen machen sich die grösseren Kältemittel-Füllmengen in etwas erhöhten Werten bemerkbar.



*Versäuerung (siehe Fig. 5.20):*

Der Skaleneffekt (von 7 auf 50kW<sub>th</sub>) ist beim Versäuerungspotenzial noch deutlicher erkennbar als bei der Primärenergie. Als Gründe sind hier die höhere Materialintensität und die höheren spezifischen Kältemittelfüllmengen zu nennen.

*Sommersmog (siehe Fig. 5.21):*

Die deutlichen Unterschiede zwischen Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen sind auf die erheblichen Aufwendungen der Erdsonden-Erstellung und dem damit verbundenen Dieselbedarf zurückzuführen. Zudem sind die Kältemittel-Emissionen der Propan-Wärmepumpe gut zu erkennen, da sie eine deutliche Abweichung von den Verhältnissen des Primärenergiebedarfs abweichen.

*Aquatische und terrestrische Ökotoxizität (siehe Fig. 5.22 und 5.23):*

Auch das aquatische und terrestrische Ökotoxizitätspotenzial ist bei grösseren Wärmepumpen tiefer als bei kleinen und bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen tiefer als bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen. Der Skaleneffekt resp. der Bau und die Entsorgung der Erdsonden bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen sind für diese Unterschiede verantwortlich.

*Emission radioaktiver Isotope (siehe Fig. 5.24):*

Die Emissionen radioaktiver Isotope sind an der Strombedarf gekoppelt und deshalb primär von der Jahresarbeitszahl abhängig. Die 50kW<sub>th</sub> Luft/Wasser-Wärmepumpen mit Propan, HFC-407C und HCFC-22 als Kältemittel weisen gemäss KWT (1999) eine bessere Jahresarbeitszahl auf als die entsprechenden Sole/Wasser-Wärmepumpen. Bei den Wärmepumpen kleiner Leistung weisen die Sole/Wasser-Wärmepumpen generell höhere Leistungszahlen auf.

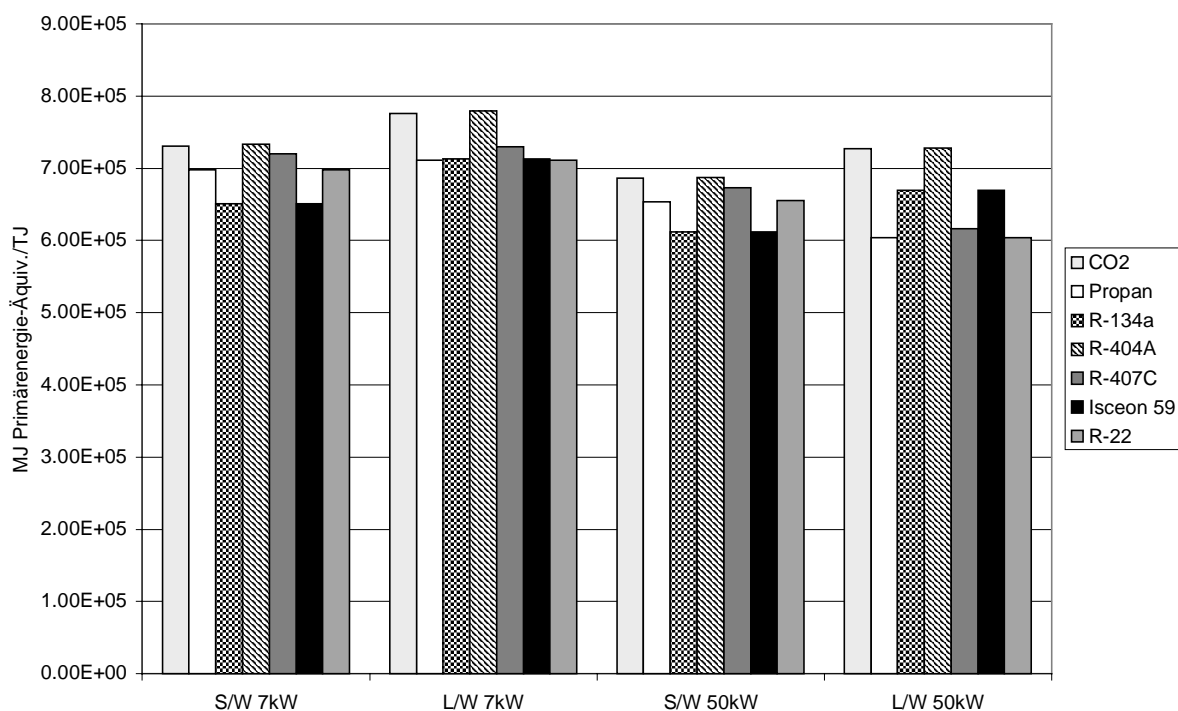


Fig. 5.17: Vergleich des Bedarfs nicht erneuerbarer Primärenergie von Sole/Wasser(S/W)- und Luft/Wasser(L/W)-Wärmepumpen mit 7 resp. 50kW<sub>th</sub> Heizleistung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

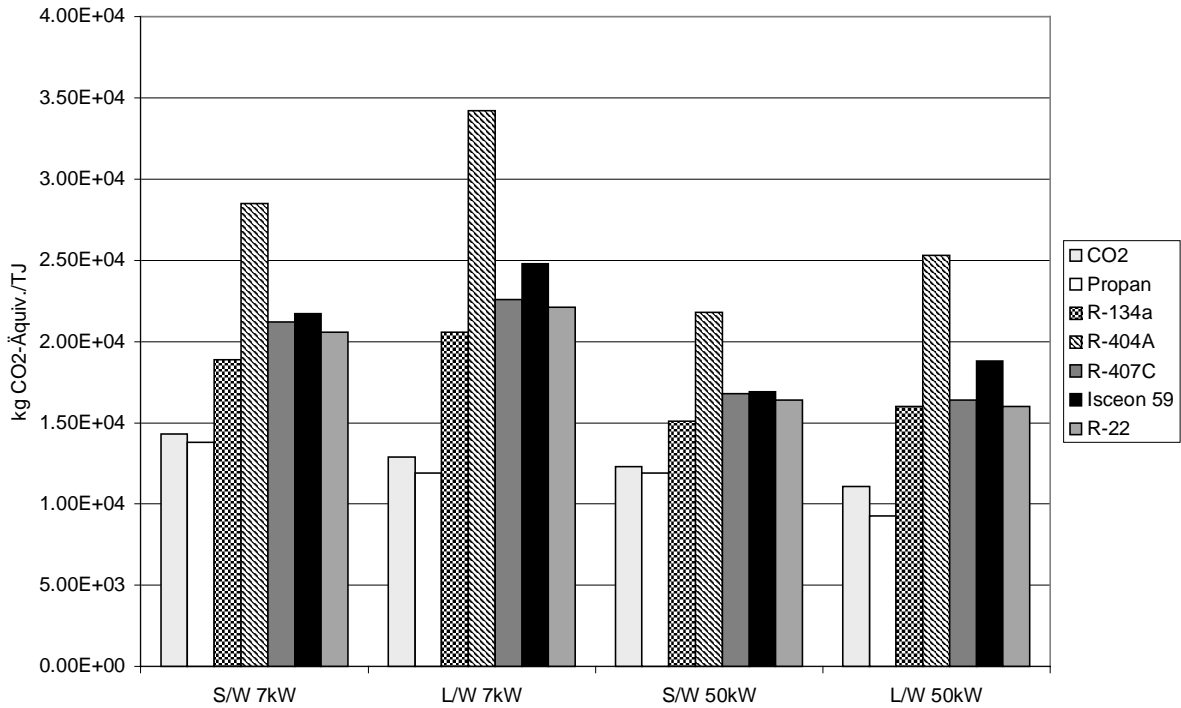


Fig. 5.18: Vergleich des Treibhauspotenzials von Sole/Wasser(S/W)- und Luft/Wasser(L/W)-Wärmepumpen mit 7 resp. 50kW<sub>th</sub> Heizleistung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

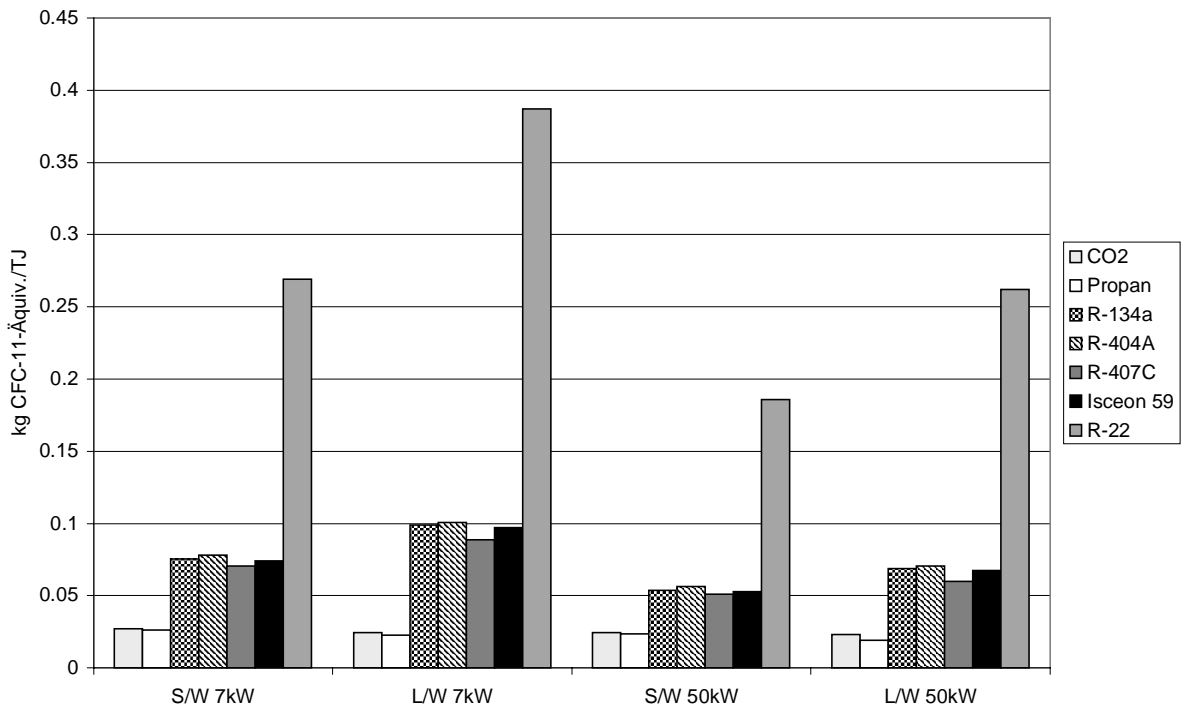


Fig. 5.19: Vergleich des ozonschichtabbauenden Potenzials von Sole/Wasser(S/W)- und Luft/Wasser(L/W)-Wärmepumpen mit 7 resp. 50kW<sub>th</sub> Heizleistung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

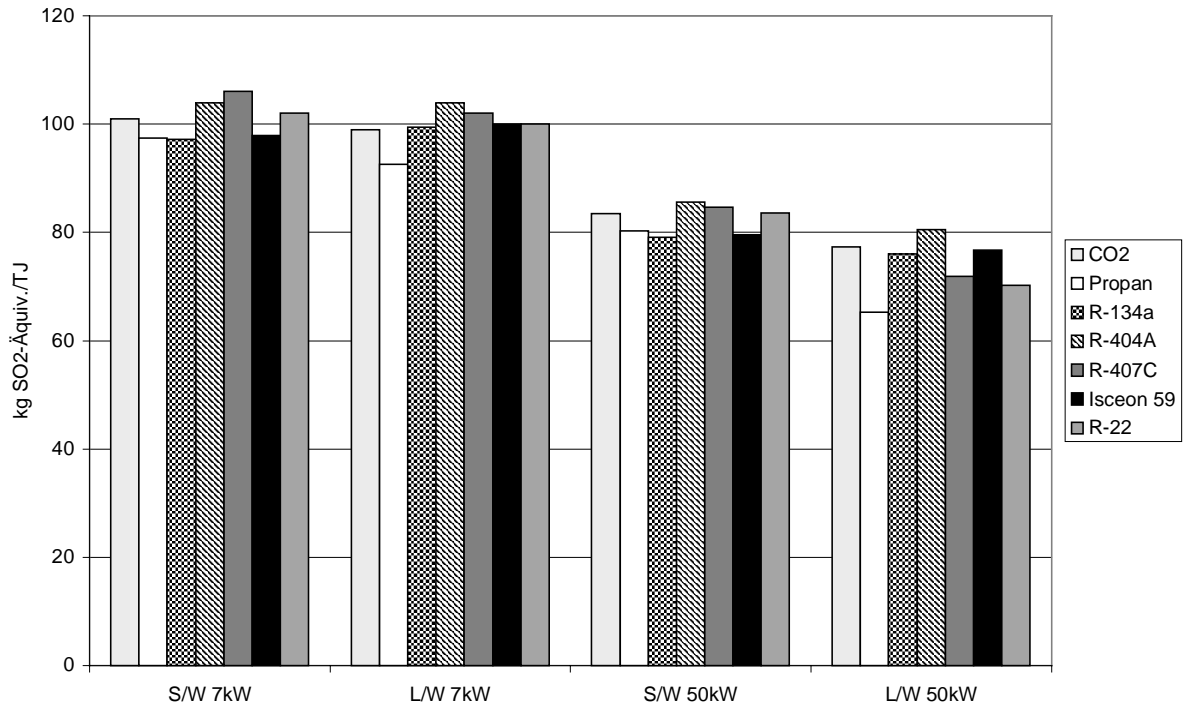


Fig. 5.20: Vergleich des Versauerungspotenzials von Sole/Wasser(S/W)- und Luft/Wasser(L/W)-Wärmepumpen mit 7 resp. 50kW<sub>th</sub> Heizleistung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

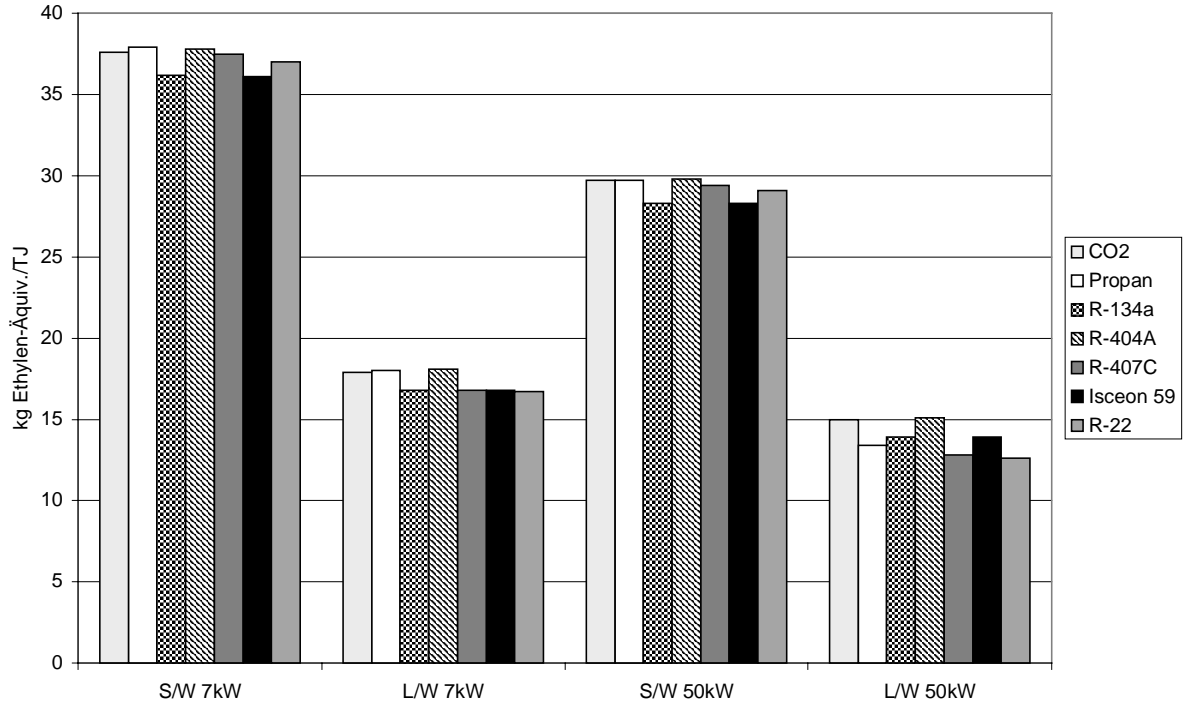


Fig. 5.21: Vergleich des sommernmogbildenden Potenzials von Sole/Wasser(S/W)- und Luft/Wasser(L/W)-Wärmepumpen mit 7 resp. 50kW<sub>th</sub> Heizleistung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

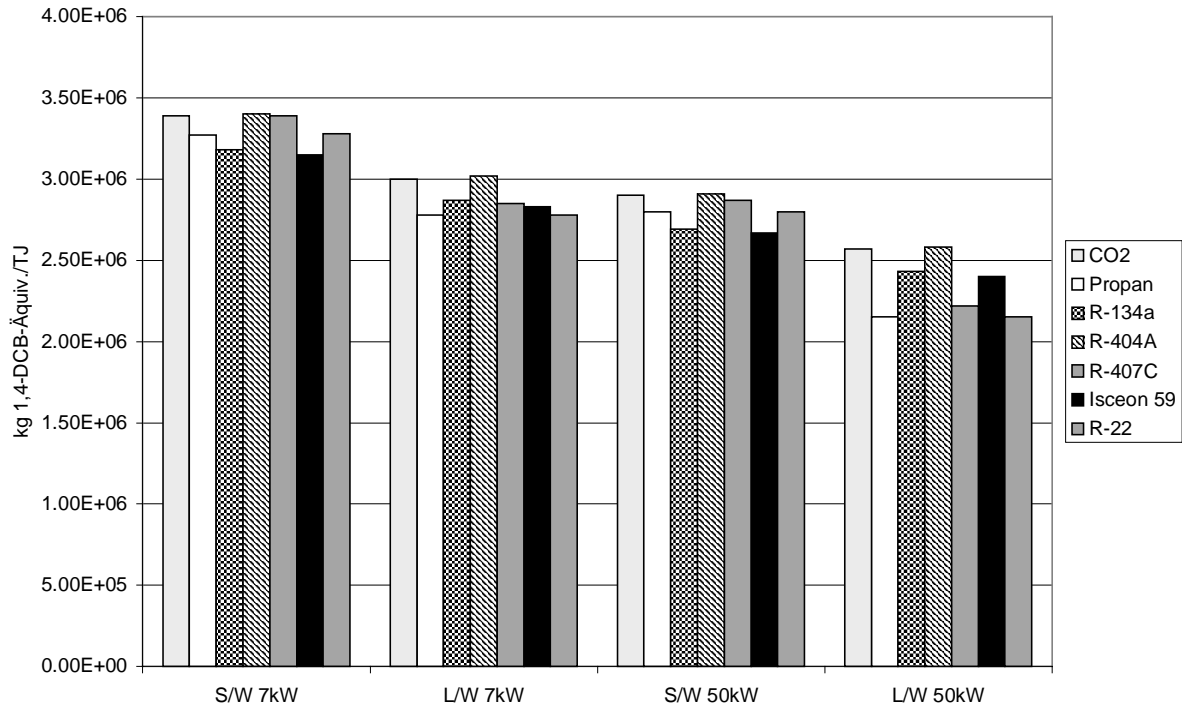


Fig. 5.22: Vergleich des Ökotoxizitätspotenzials aquatisch von Sole/Wasser(S/W)- und Luft/Wasser(L/W)-Wärmepumpen mit 7 resp. 50kW<sub>th</sub> Heizleistung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

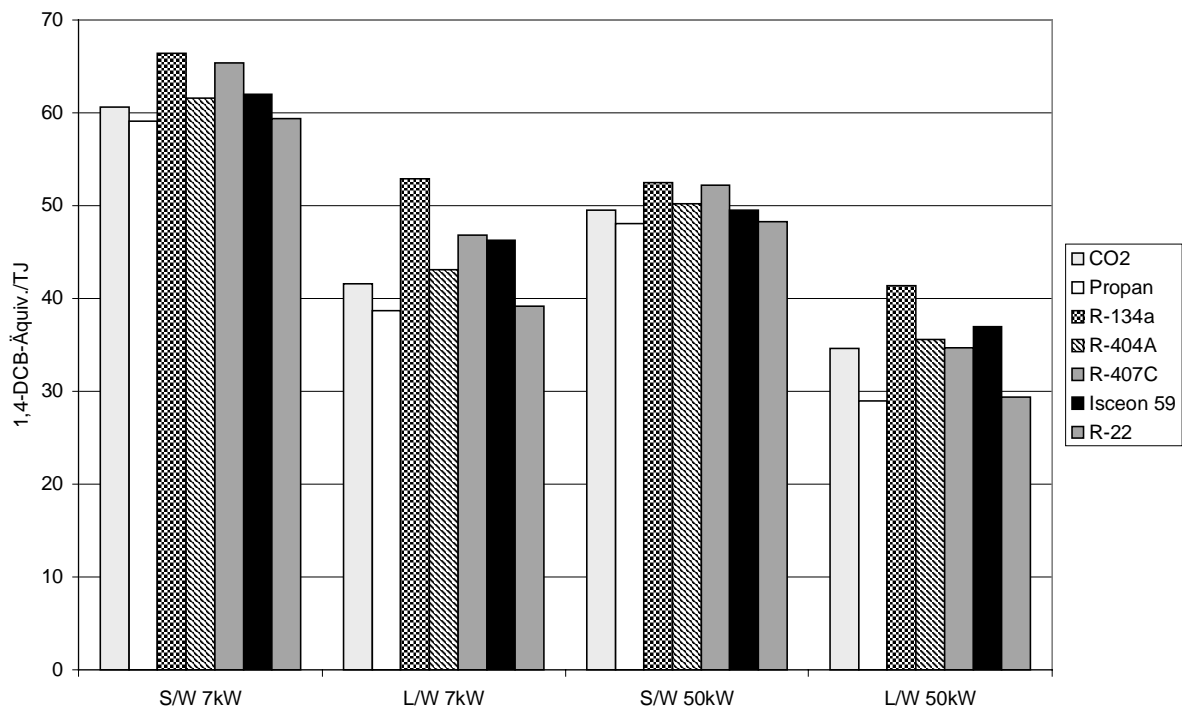


Fig. 5.23: Vergleich des Ökotoxizitätspotenzials terrestrisch von Sole/Wasser(S/W)- und Luft/Wasser(L/W)-Wärmepumpen mit 7 resp. 50kW<sub>th</sub> Heizleistung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

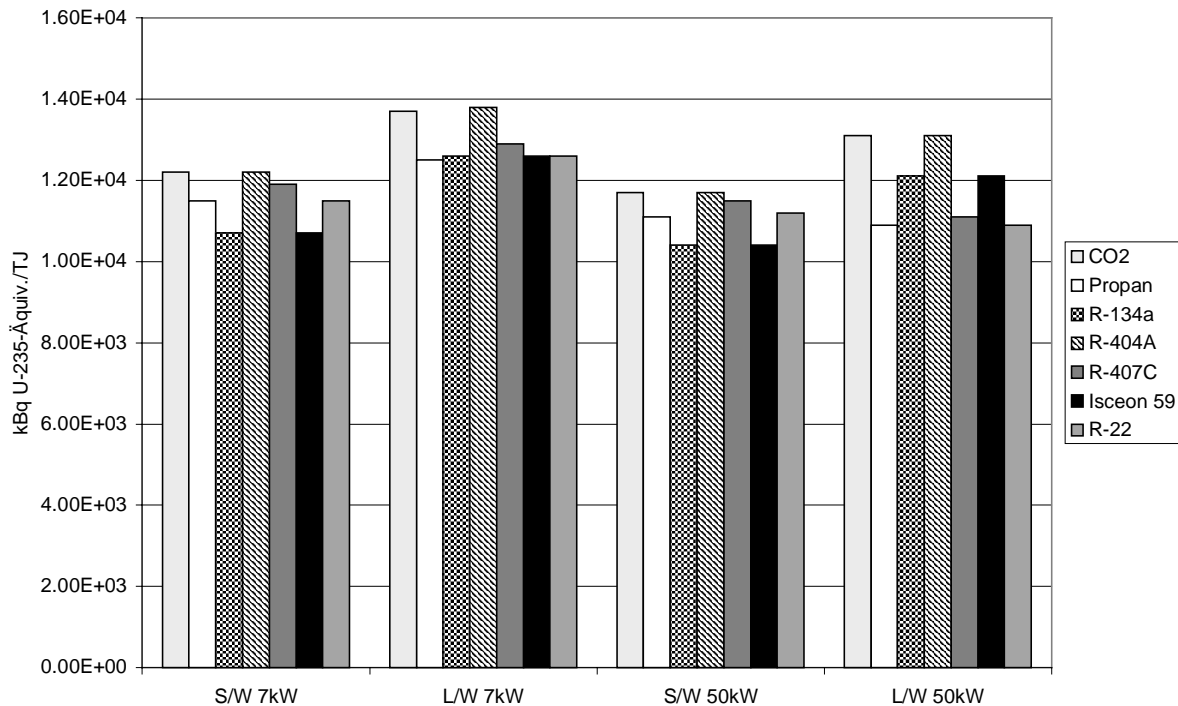


Fig. 5.24: Vergleich der Emissionen radioaktiver Isotope von Sole/Wasser(S/W)- und Luft/Wasser(L/W)-Wärmepumpen mit 7 resp. 50kW<sub>th</sub> Heizleistung. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

Im folgenden Abschnitt werden die heute zu gewärtigenden und in Zukunft zu erwartenden Verlustraten miteinander verglichen.

### 5.3.6 Sensitivitätsanalyse Kältemittel-Verlustraten

Für zukünftige Systeme rechnet man mit generell tieferen Verlustraten während dem Betrieb aber auch bei der Geräte-, und Kältemittelherstellung und bei der Geräteentsorgung. Aus diesem Grund wurden auch für deutlich tiefere Leckageraten Bilanzen gerechnet. Sie sollen hier mit denjenigen auf der Basis der heutigen Situation verglichen werden. Der Vergleich erfolgt für kleine Sole/Wasser-Wärmepumpen, die mit Strom der schweizerischen Stromversorgung angetrieben werden. Die Produktion der Kältemittel wird gemäss dem Durchschnitt der AFEAS-Mitglieder angenommen.

*Nicht erneuerbare Energie (siehe Fig. 5.25):*

Hier zeigt eine Reduktion der Verlustmengen (und damit auch der zu produzierenden Kältemittelmenge) erwartungsgemäss keine nennenswerte Beeinflussung der Gesamtbilanz (maximal 0.2% Reduktion). Der Primärenergieaufwand zur Herstellung der zusätzlichen Kältemittelmenge bei hohen Verlustraten ist vernachlässigbar.

*Treibhauseffekt (siehe Fig. 5.26):*

Da die HFCs und HCFC-22 treibhauswirksam sind, zeigen reduzierte Kältemittelmengen auch deutliche Unterschiede im gesamten Treibhauspotenzial. Bei teilhalogenierten Kältemitteln kann mit stark reduzierten Verlustmengen das Treibhauspotenzial der Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen um 22% (HFC-134a) bis 36% (HFC-404A) reduziert werden.

*Ozonschichtabbau (siehe Fig. 5.27):*

Die mit HCFC-22 betriebene Wärmepumpe reagiert bezüglich Ozonschichtabbau am empfindlichsten auf eine Änderung der Leckagerate (minus 65%). Aber auch bei den andern teilhalogenierten Kältemitteln ist ein Einfluss infolge der angenommenen CFC- und HCFC-Emissionen bei der Herstellung spürbar (Reduktion um etwas mehr als 25%).

*Versäuerung (siehe Fig. 5.28):*

Die versäuernde Wirkung der chlorierten und fluorierten Kohlenwasserstoffe macht sich bei der Variation der Verlustraten mit einer 2 bis knapp 4% Reduktion ebenfalls bemerkbar, am stärksten (absolut gesehen) bei Isceon 59 und HFC-407C.

*Sommersmog (siehe Fig. 5.29):*

Bei der Sommersmogbildung ist der Einfluss reduzierter Verlustraten einzig bei der Propan-Wärmepumpe zu beobachten, wo durch tiefere Verluste eine Reduktion des sommersmogbildenden Potenzials um knapp 2% erreicht werden kann.

*Aquatische Ökotoxizität (siehe Fig. 5.30):*

Bei der aquatischen Ökotoxizität sind die Veränderungen bei den teilhalogenierten Kältemitteln mit 0.3% (HCFC-22, HFC-404A) bis 1.6% (HFC-134a) gering. Die reduzierten Verluste beeinflussen die Gesamergebnisse bei den natürlichen Kältemitteln nicht.

*Terrestrische Ökotoxizität (siehe Fig. 5.31):*

Bei der terrestrischen Ökotoxizität ergeben sich deutliche Veränderungen bei Annahme unterschiedlicher Leckageraten. Es sind diejenigen Wärmepumpen betroffen, die Kältemittel mit einem hohen Anteil an HFC-134a verwenden. Bei niedrigen Verlustmengen sind die Wärmepumpen mit teilhalogenierten Kältemitteln den anderen etwa ebenbürtig. Dabei sind aber die unterschiedlichen Jahresarbeitszahlen zu berücksichtigen (HFC-134a: 3.92, Propan: 3.62, Kohlendioxid 3.44).

*Emission radioaktiver Isotope (siehe Fig. 5.32):*

Infolge der reinen Stromabhängigkeit dieses Parameters und der Dominanz des Betriebsstrombedarfs sind hier infolge der Verminderung der Verlustmengen in der Zukunft praktisch keine Unterschiede feststellbar. Die Höhe der Emission radioaktiver Isotope wird ausschliesslich durch die Jahresarbeitszahl (hier Leistungszahl) bestimmt.

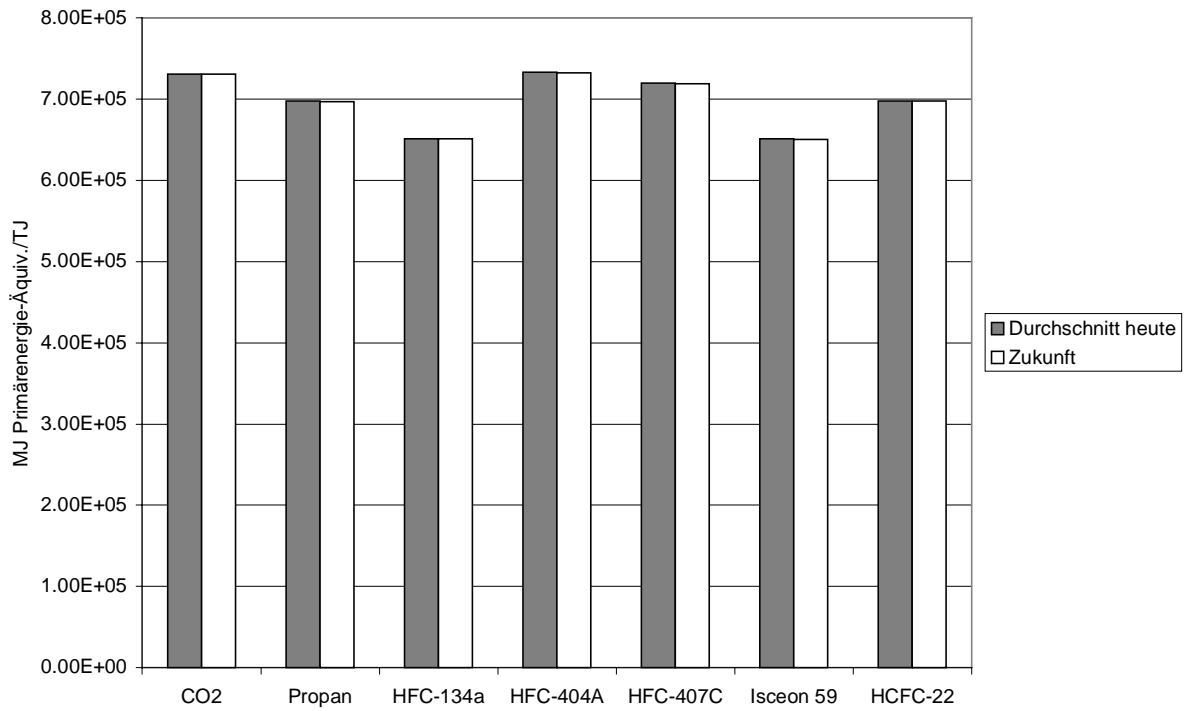


Fig. 5.25: Variation der Leckageraten der Kältemittel und dessen Einfluss auf den Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergie einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

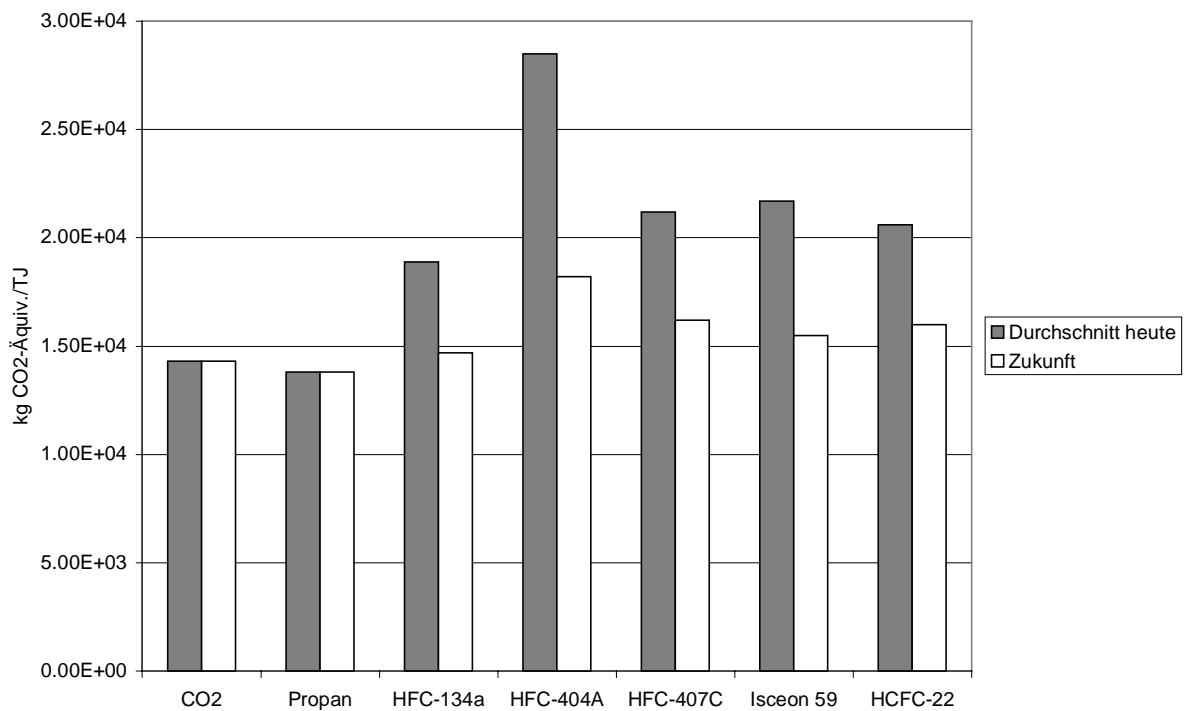


Fig. 5.26: Variation der Leckageraten der Kältemittel und dessen Einfluss auf das Treibhauspotenzial einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

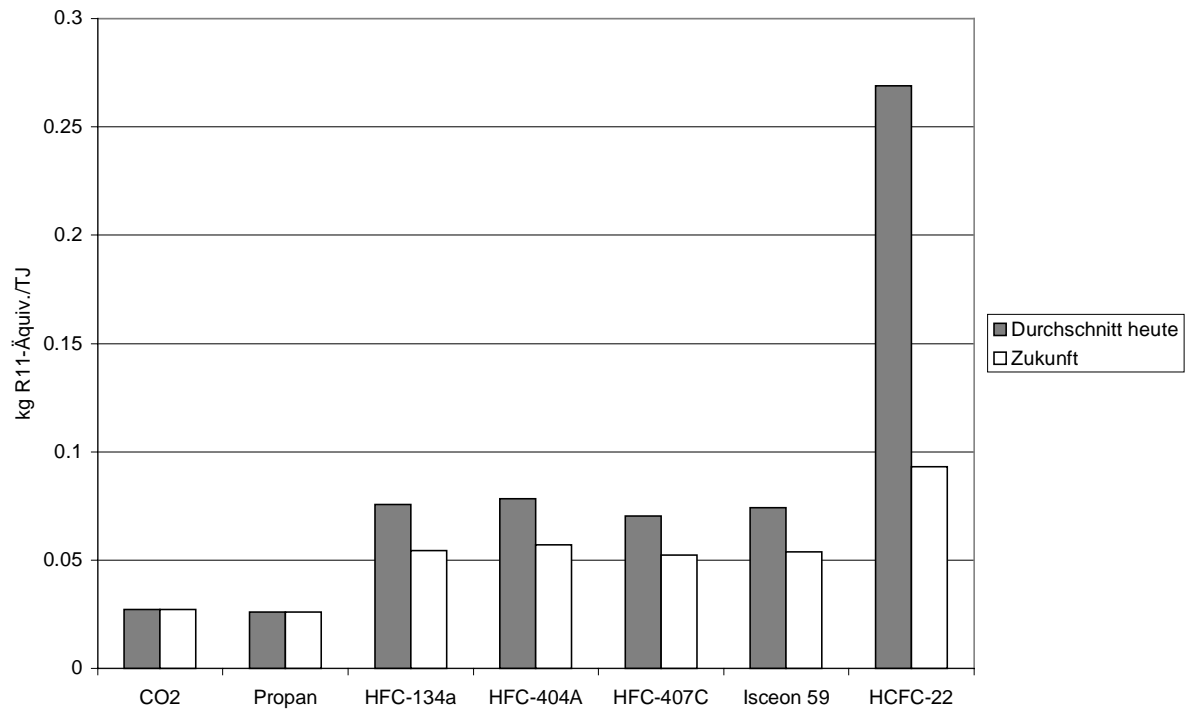


Fig. 5.27: Variation der Leckageraten der Kältemittel und dessen Einfluss auf das Ozonabbau-potenzial einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

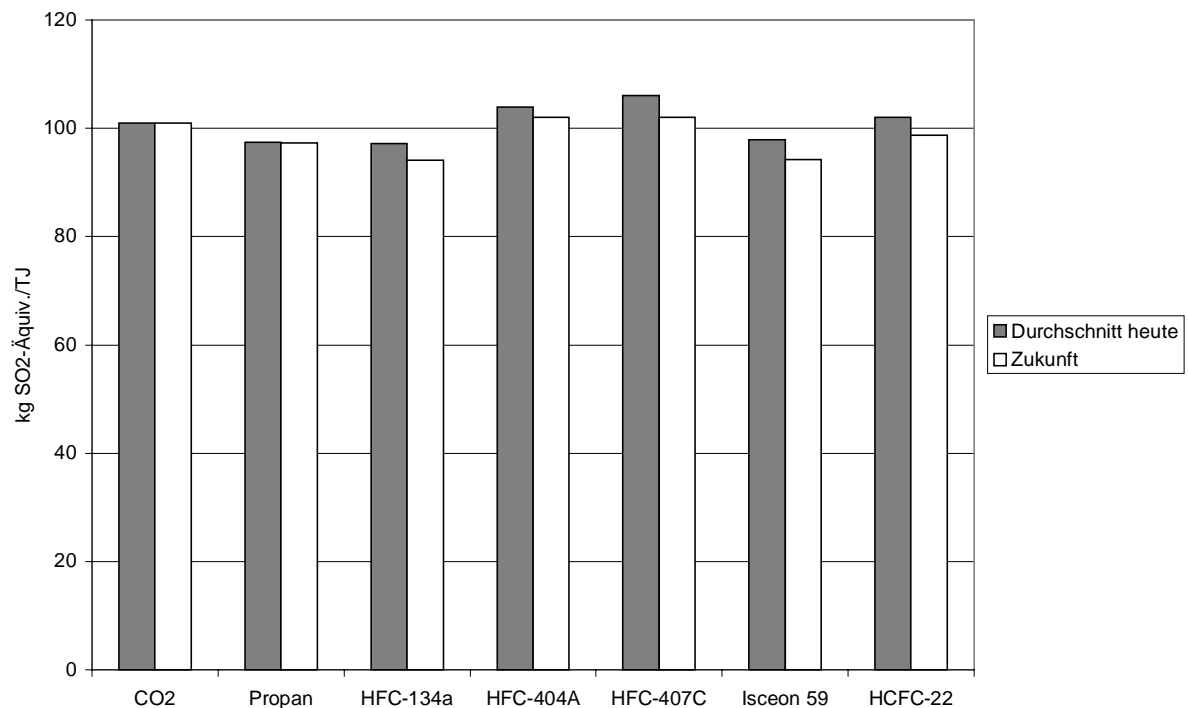


Fig. 5.28: Variation der Leckageraten der Kältemittel und dessen Einfluss auf das Versäuerungs-potenzial einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.



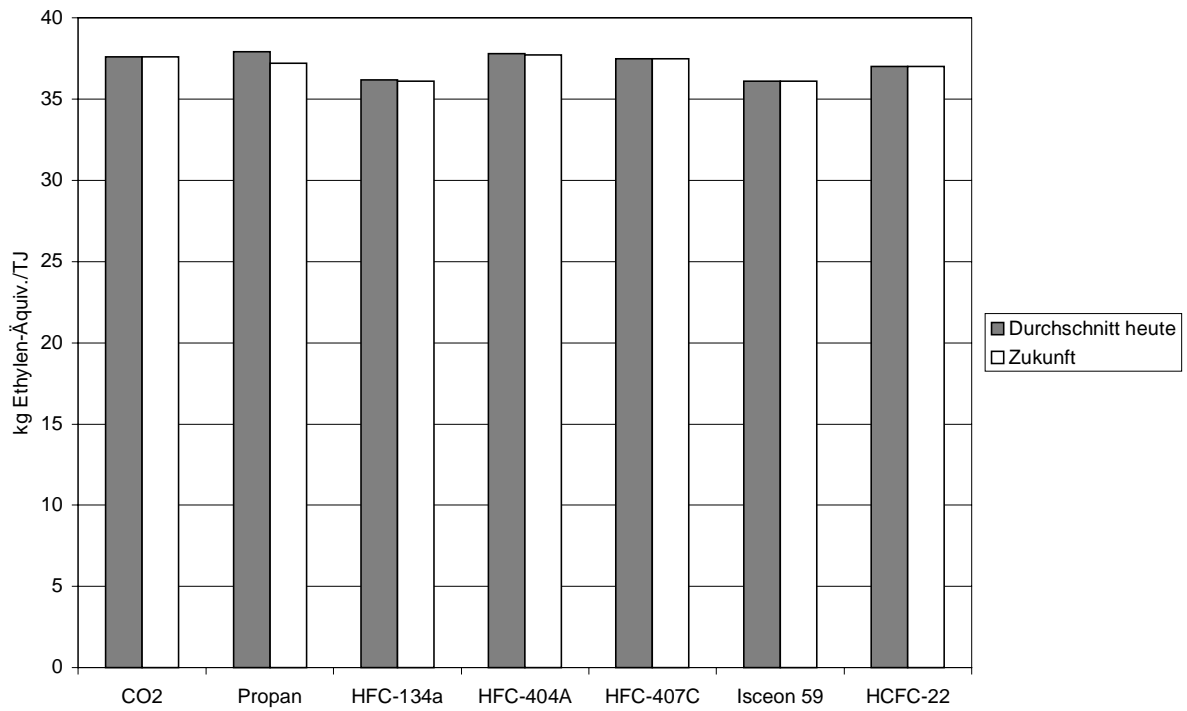


Fig. 5.29: Variation der Leckageraten der Kältemittel und dessen Einfluss auf das sommertaugliche Potenzial einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

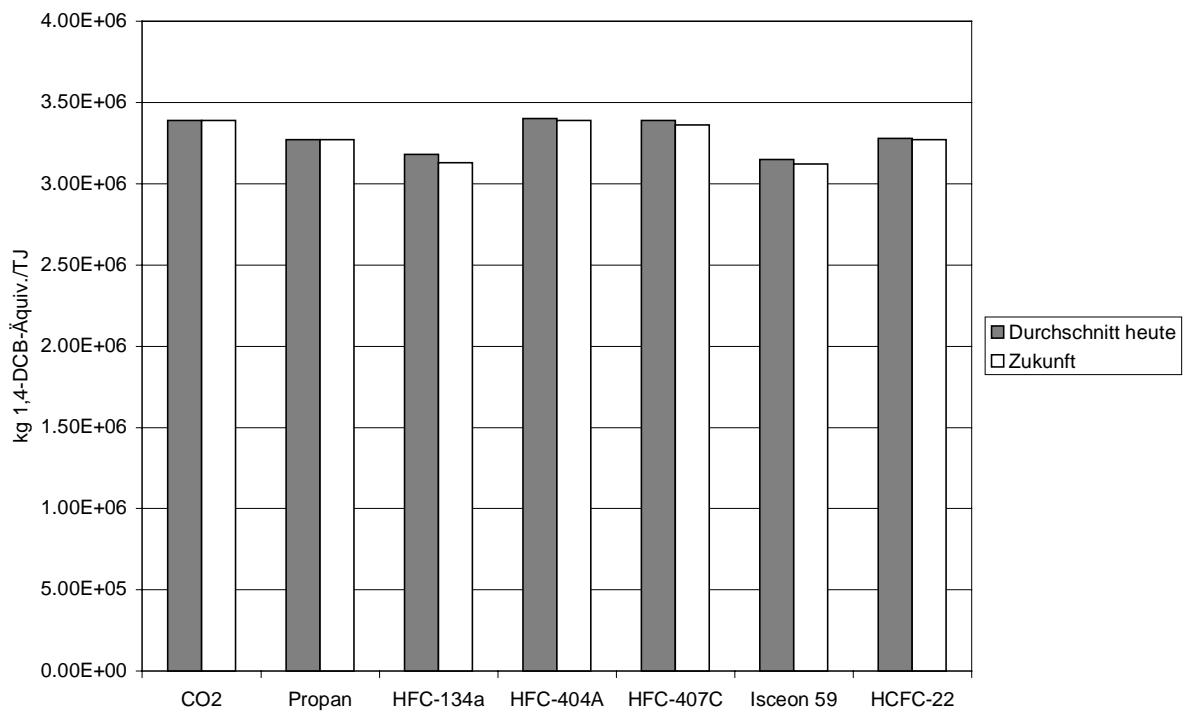


Fig. 5.30: Variation der Leckageraten der Kältemittel und dessen Einfluss auf das aquatische Ökotoxizitäts-Potenzial einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

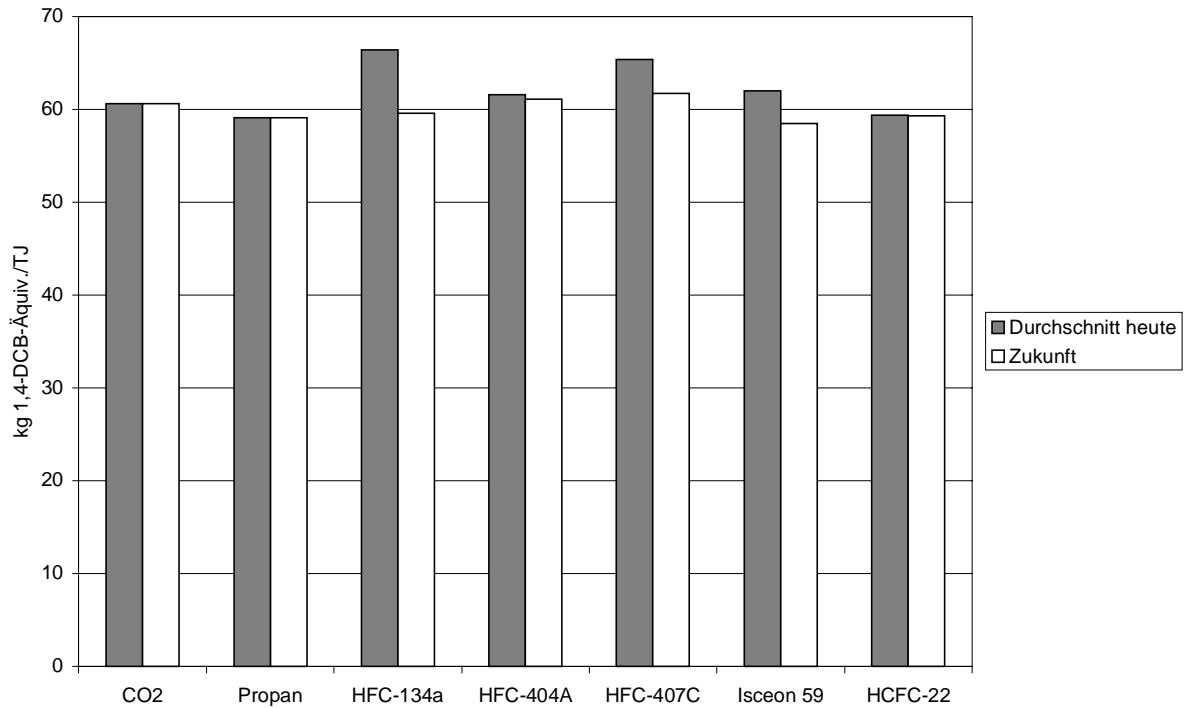


Fig. 5.31: Variation der Leckageraten der Kältemittel und dessen Einfluss auf das terrestrische Ökotoxizitäts-Potenzial einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

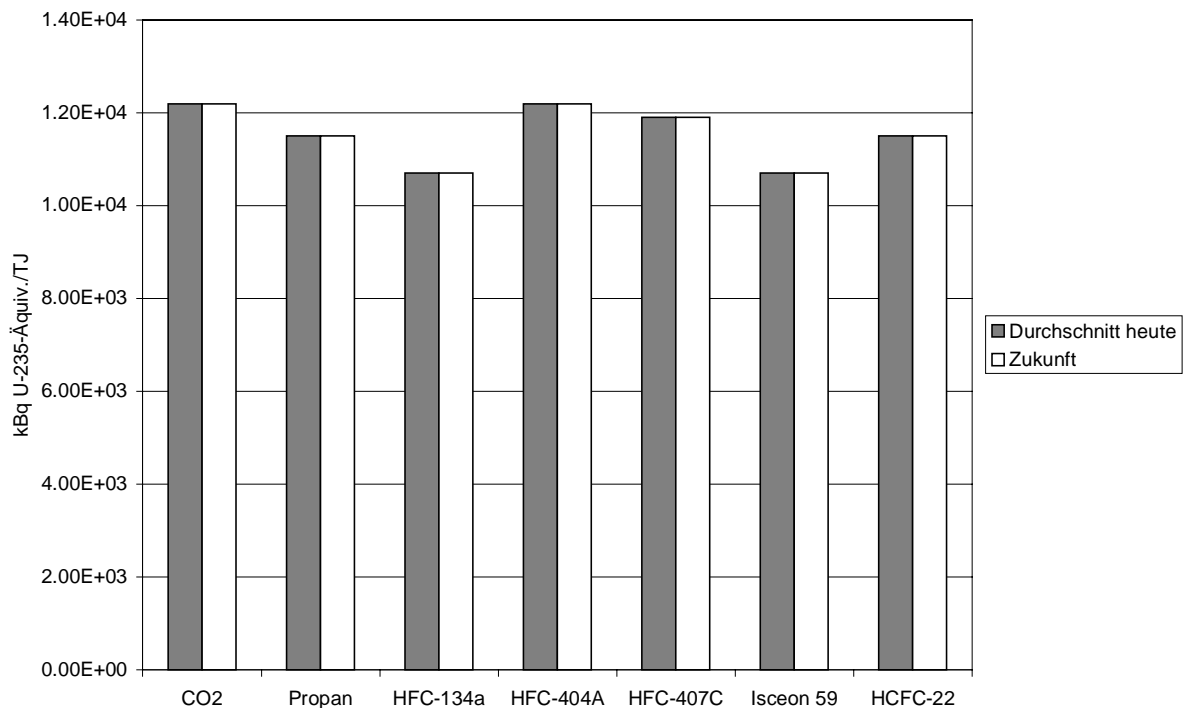


Fig. 5.32: Variation der Leckageraten der Kältemittel und dessen Einfluss auf die Emission radioaktiver Isotope einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

### 5.3.7 Optimierte Produktion des Kältemittels HFC-134a

Die Daten zur Herstellung der teilhalogenierten Kältemittel basieren u.a. auf Durchschnittswerten der AFEAS-Mitglieder. Die Produktionsanlagen sind aber bezüglich Technologie und Rückhaltetechniken stark unterschiedlich. Von einem europäischen Herstellungsprozess von HFC-134a, bei dem allfällige CFC-, HCFC- und HFC-Emissionen in einer Nachverbrennung zerstört werden, liegt eine vertrauliche Sachbilanz vor (HFC-134a 1999). Die nachfolgende Betrachtung soll die Sensitivität der Ergebnisse bezüglich dieser optimierten Produktion aufzeigen.

In den Darstellungen werden zu Vergleichszwecken jeweils neben der Anlage mit HFC-134a auch die Anlagen mit CO<sub>2</sub>, Propan und HCFC-22 gezeigt. Da bei den Kältemittelgemischen HFC-404A, HFC-407C und Isceon 59 andere HFCs eingesetzt werden, über die bezüglich optimierter Produktion nichts bekannt ist, werden diese weggelassen. Die Resultate dürften jedoch für diese Gemische ähnlich ausfallen.

*Nicht erneuerbare Primärenergie (siehe Fig. 5.33):*

Der Unterschied im Primärenergiebedarf ist kleiner als 0.2% obwohl die Sachbilanz des europäischen Herstellers einen 50% geringeren kumulierten Energiebedarf ausweist. Auch hier verdeutlicht sich nochmals die Tatsache, dass der Energiebedarf in der Produktion des Kältemittels HFC-134a im Vergleich zu den übrigen Verbräuchen marginal ist.

*Treibhauseffekt (siehe Fig. 5.34):*

Die Treibhausgasemissionen können durch die Nachverbrennung von allfällig entstehenden halogenierten Kohlenwasserstoffen um gut 2% oder 400kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. pro TJ gesenkt werden. Bei zukünftig zu erwartenden tiefen Verlustmengen beträgt der Unterschied zwischen durchschnittlicher und optimierter Produktion noch rund 200kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. pro TJ.

*Ozonschichtabbau (siehe Fig. 5.35):*

Beim Ozonschichtabbau ist die deutlichste Verringerung zu verzeichnen (minus 67.5%). Durch die effiziente Zerstörung von ozonschichtabbauenden Substanzen (insb. CFC-113 und HCFC-124) gelingt es, die lebenszyklusbezogene, ozonschichtabbauende Wirkung von HFC-134a auf das Niveau des Ozonabbaupotenzials der natürlichen Kältemittel zu senken. In diesem Falle dominieren die indirekten, weitgehend kältemittelunabhängigen Beiträge (Urananreicherung: CFC-114; Offshore-Ölförderung und Hochseetanker: Halon 1301).

*Andere Umweltwirkungen:*

Die Optimierung der Produktion hat praktisch keinen Einfluss auf die Ergebnisse bei den übrigen Umweltwirkungen. Während beim Sommersmog und bei der Versäuerung für die optimierte Produktion eine Erhöhung je im Promillebereich zu verzeichnen ist, sind die Werte für terrestrische und aquatische Ökotoxizität um 1.3% resp. 0.6% tiefer. Die Emissionen radioaktiver Isotope bleiben unverändert.

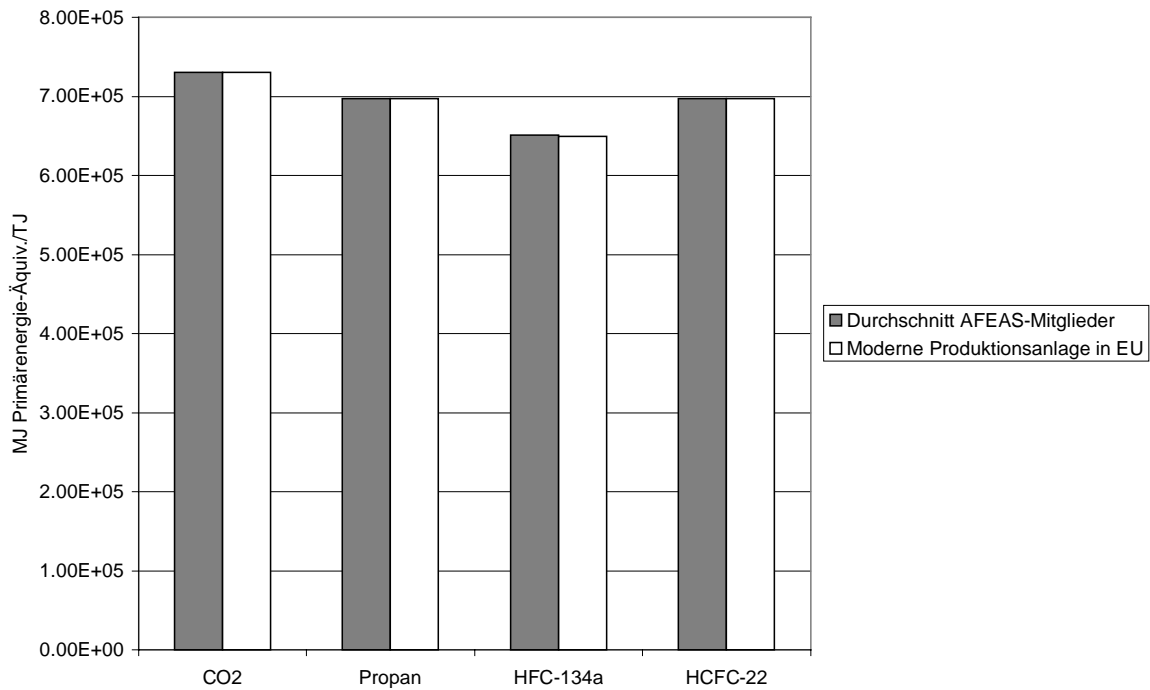


Fig. 5.33: Einfluss der Produktion von HFC-134a auf den Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergie einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

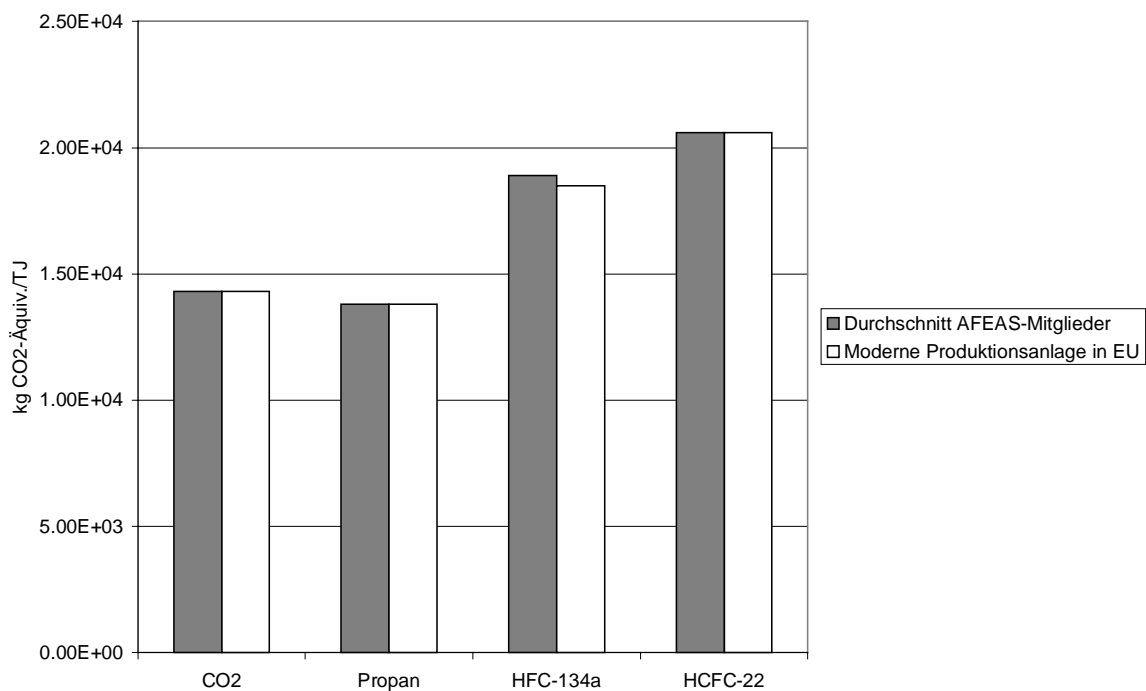


Fig. 5.34: Einfluss der Produktion von HFC-134a auf das Treibhauspotenzial einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

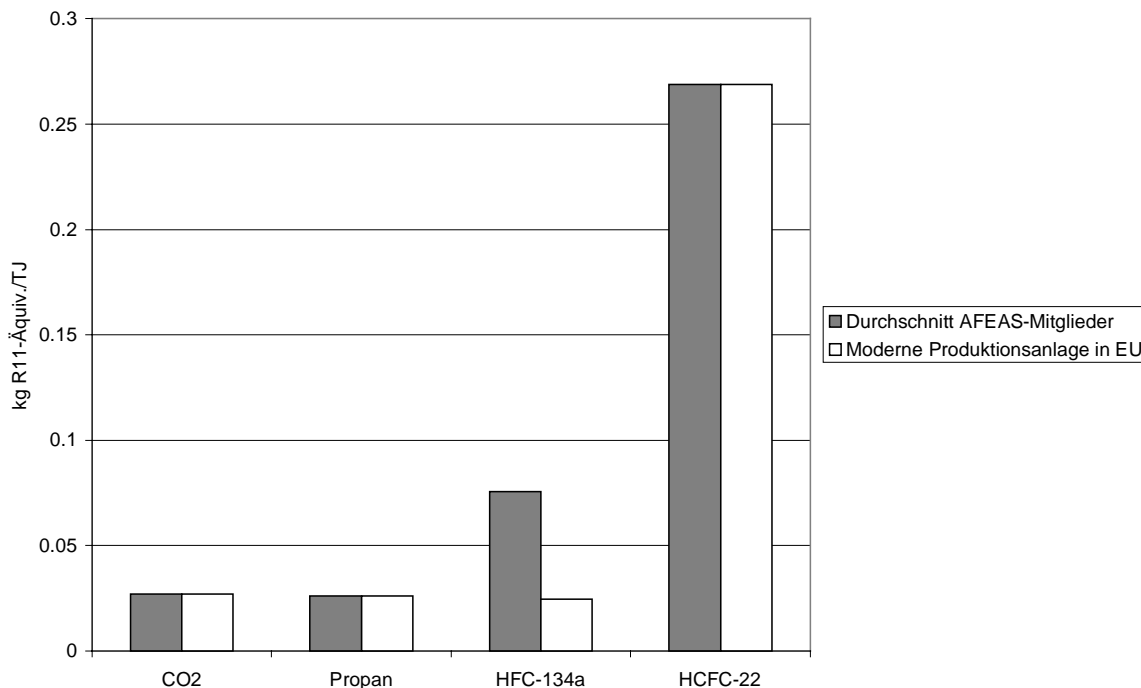


Fig. 5.35: Einfluss der Produktion von HFC-134a auf das ozonschichtabbauende Potenzial einer 7kWth Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

*Fazit:*

Es zeigt sich, dass mit einer optimierten HFC-134a-Produktion mit weitgehender Abgasbehandlung eine deutliche Verringerung der ozonschichtabbauenden Wirkung erzielt werden kann. Die Verbesserung bezüglich Treibhauseffekt sind demgegenüber als Folge des bedeutenden Anteils des direkten Treibhauseffektes von HFC-134a am gesamten Treibhauspotenzial deutlich geringer.

**5.3.8 TEWI und Ökobilanz-Treibhauspotenzial**

Es stellt sich die Frage, inwiefern sich der klassische TEWI (Total Equivalent Warming Impact) vom Treibhauspotenzial auf der Basis einer Lebenszyklusbetrachtung unterscheidet. Der TEWI berechnet sich als gewichtete Summe des direkten Treibhauseffektes der emittierten Kältemittelmenge und dem indirekten Anteil aus der Strombereitstellung während des Betriebs von Kälteanlagen. In Tab. 5.6 sind die Ergebnisse der beiden Berechnungsweisen einander gegenübergestellt.

Pro TJ Heizenergie	Strombedarf [TJ]	TEWI <sub>indirekt</sub> [CO <sub>2</sub> -Äquiv.]	Leckagen [kg]	TEWI <sub>direkt</sub> [CO <sub>2</sub> -Äquiv.]	TEWI <sub>total</sub> [CO <sub>2</sub> -Äquiv.]	Ökobilanz Treibhauspotenzial [CO <sub>2</sub> -Äquiv.]	Anteil TEWI am THP <sub>Ökobilanz</sub>
CO2	0.291	9.72E+03	1.95	1.95	9.72E+03	1.43E+04	68.0%
Propan	0.276	9.22E+03	1.95	0	9.22E+03	1.38E+04	66.8%
HFC-134a	0.255	8.52E+03	3.89	5060	1.36E+04	1.89E+04	71.8%
HFC-404A	0.291	9.72E+03	3.89	12688	2.24E+04	2.85E+04	78.6%
HFC-407C	0.285	9.52E+03	3.89	5955	1.55E+04	2.12E+04	73.0%
Isceon 59	0.255	8.52E+03	3.89	7589	1.61E+04	2.17E+04	74.2%
HCFC-22	0.276	9.22E+03	3.89	5254	1.45E+04	2.06E+04	70.3%

Tab. 5.6: Vergleich des TEWI mit dem Treibhauspotenzial gemäss der Ökobilanz einer 7kW<sub>th</sub> Sole/Wasser-Wärmepumpe mit verschiedenen Kältemitteln. Basis: 1TJ an das Verteilnetz abgegebene Heizenergie.

Der TEWI berücksichtigt zwischen zwei Dritteln und knapp 80% des ökobilanzbezogenen Treibhauseffektes des Betriebs einer Sole/Wasser-Wärmepumpe. Wesentliche fehlende Anteile stammen aus der Infrastruktur und aus der Herstellung der Kältemittel selbst (bei HFC-134a ca. 6% des direkten Treibhauspotenzials oder 3.6% des totalen Treibhauspotenzials). Die Reihenfolge der Treibhausrelevanz der untersuchten Kältemittel ist jedoch beim TEWI und beim ökobilanzbezogenen Treibhauspotenzial dieselbe.

## 5.4 Kaltwasser- und Solesatz

### 5.4.1 Vergleich der Kaltwassersätze

Die Sachbilanzen der Kaltwasser- und Solesätze basieren auf den in Unterkap. 4.4 beschriebenen Grundlagen und Annahmen.

Die Wirkungsindikatorergebnisse zeigen ein ähnliches Bild wie bei den Wärmepumpen (siehe Tab. 5.7 und Fig. 5.36). Der Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergie, die Emission radioaktiver Isotope und das aquatische Ökotoxizitätspotenzial widerspiegeln die Verhältnisse der dem Vergleich zugrundegelegten Energieeffizienz der Kaltwassersätze. Pro TJ Kälte werden beispielsweise zwischen 540 und 700MJ nicht erneuerbare Primärenergieträger benötigt (Faktor 1.3), was dem Unterschied der Jahresarbeitszahlen entspricht.

Bei der Versäuerung und beim Sommersmog zeigen sich die Umweltwirkungen der Kältemittelemissionen, indem der Kaltwassersatz mit Ammoniak (Versäuerung) resp. mit Propan (Sommersmog) erhöhte Gesamtwirkungen aufweist. Ansonsten entspricht die Reihenfolge der hier zugrundegelegten Energieeffizienz. Die Unterschiede zwischen dem höchsten und dem tiefsten Wert sind infolge der Kältemittelemissionen kleiner als diejenigen der Jahresarbeitszahlen (1.25 bei der Versäuerung resp. 1.27 beim Sommersmog).

Kaltwassersatz mit	Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie MJ PE-Äquiv.	Treibhauspotenzial kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Ozonschichtabbauendes Potenzial kg CFC-11-Äquiv.	Versäuerungspotenzial kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Sommersmogbildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
Ammoniak	5.41E+05	8.46E+03	0.0186	62.1	11.7	1.99E+06	26.5	9.69E+03
Propan	6.20E+05	9.65E+03	0.0211	66	14.8	2.25E+06	30	1.11E+04
HFC-134a	5.99E+05	1.39E+04	0.0566	67.4	13	2.22E+06	36.5	1.07E+04
HFC-404A	6.71E+05	2.16E+04	0.0589	73.3	14.4	2.43E+06	32.9	1.20E+04
HFC-407C	6.98E+05	1.63E+04	0.0545	77.7	14.9	2.54E+06	37.6	1.25E+04
HFC-410A	6.00E+05	1.57E+04	0.0453	68.5	12.9	2.18E+06	29.3	1.07E+04
Isceon 59	5.96E+05	1.60E+04	0.0556	67.6	12.9	2.19E+06	32.8	1.06E+04
HCFC-22	5.77E+05	1.43E+04	0.211	65.6	12.5	2.10E+06	28.2	1.03E+04

Tab. 5.7: Wirkungsindikatorergebnisse der Ökobilanz von Kaltwassersätzen 6/12°C mit 400kW Nennkälteleistung und verschiedenen Kältemitteln bezogen auf 1TJ dem Verteilnetz entzogene Energie. Die Verlustmengen entsprechen dem Durchschnitt heute.

Beim Ozonschichtabbau, beim Treibhauseffekt und - in allerdings geringerer Ausprägung - beim terrestrischen Ökotoxizitätspotenzial sind Unterschiede aufgrund der umweltlichen Stoffeigenschaften der Kältemittel zu beobachten. Die ozonschichtabbauende Wirkung des HCFC-22 zeigt sich deutlich. Die Emission ozonschichtabbauender Zwischenprodukte bei der Herstellung der Fluorkohlenwasserstoffe bewirkt ein im Vergleich zu den natürlichen Käl-

temitteln noch deutlich höheres Ozonschichtabbaupotenzial. Die Energieeffizienz spielt hier kaum eine Rolle.

Auch beim Treibhauseffekt liegen die natürlichen gegenüber den teilhalogenierten Kältemitteln deutlich tiefer, auch gegenüber HCFC-22, HFC-134a und Isceon 59, die in diesem Vergleich ähnliche Jahresarbeitszahlen aufweisen. Der Unterschied zwischen dem System mit dem tiefsten (Ammoniak) und dem höchsten Treibhausgaspotenzial (HFC-404A) liegt bei knapp 2.6.

Wie wir im vorangegangenen Unterkapitel gesehen haben, wird das terrestrische Ökotoxizitätspotenzial bei den hier untersuchten kältetechnischen Systemen durch die Strombereitstellung (Kohlekraftwerke, Erdölgewinnung) und die Emission der Kältemittel HFC-134a, HCFC-123 und HCFC-124 (resp. deren persistentes Abbauprodukt Trifluoressigsäure) bestimmt. Die Kältemittlemissionen haben zur Folge, dass das System mit HFC-134a als Kältemittel deutlich höhere Werte aufweist als aufgrund seiner Energieeffizienz zu erwarten wäre. Ähnliches gilt für Isceon 59 und HFC-407C, welche beide über 50 Gew.-% HFC-134a enthalten. Die Relationen bei den andern Systemen sind wiederum durch die hier unterstellten Verhältnisse der Energieeffizienz geprägt.

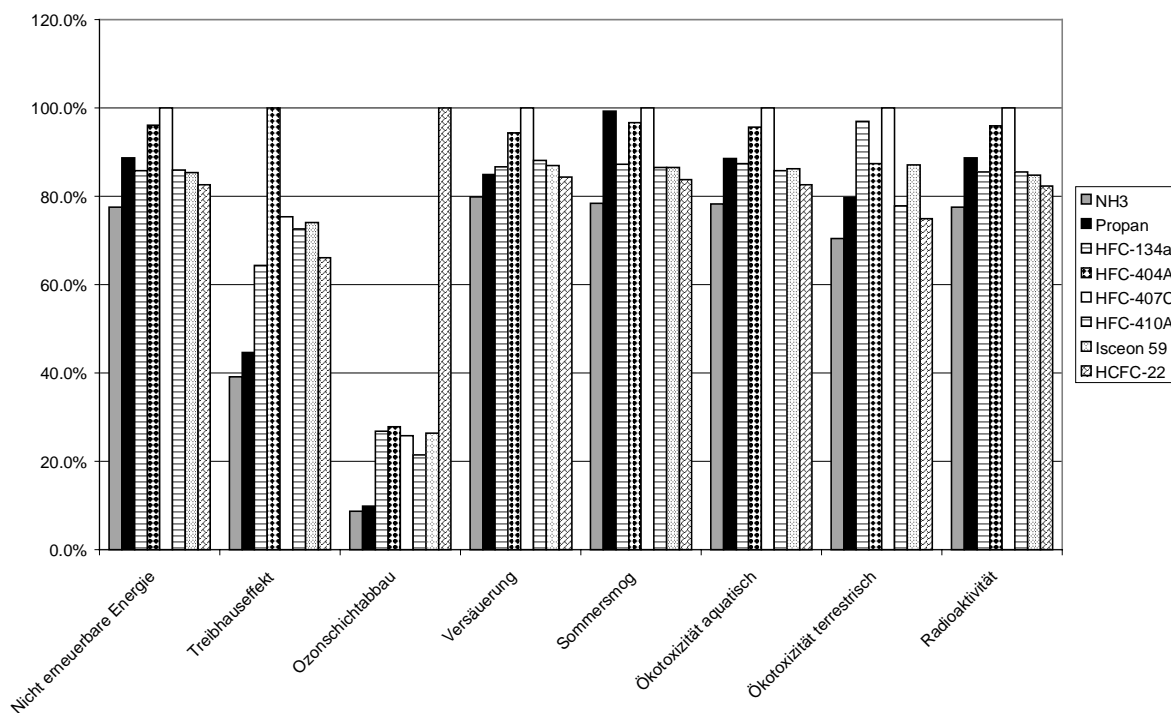


Fig. 5.36: Vergleich der Umweltwirkungen der acht untersuchten Kaltwassersätze (6/12°C) unter der Annahme heute durchschnittlicher Verlustmengen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Basis: 1TJ dem Verteilnetz entzogene Energie. Die jeweils höchsten Werte pro Umweltwirkung (siehe Tab. 5.7) wurden zu 100% gesetzt.

Unter der Annahme verminderter Verlustmengen bei Anlagenbau, Betrieb und Anlagenrückbau (siehe Tab. 5.8 und Fig. 5.37) verringern sich die Unterschiede in den Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Ozonschichtabbau und terrestrische Ökotoxizität. In der Tendenz bleiben jedoch die Verhältnisse erhalten und der Einfluss der Energieeffizienz bleibt bei diesen drei Kategorien untergeordnet.

Kaltwassersatz mit	Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie MJ PE-Äquiv.	Treibhauspotenzial kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Ozonschichtabbauendes Potenzial kg CFC-11-Äquiv.	Versäuerungspotenzial kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Sommersmogbildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
Ammoniak	5.41E+05	8.46E+03	0.0186	60.3	11.7	1.99E+06	26.5	9.69E+03
Propan	6.20E+05	9.65E+03	0.0211	66	14.1	2.25E+06	29.9	1.11E+04
HFC-134a	5.98E+05	1.17E+04	0.0445	65.8	13	2.20E+06	32.9	1.07E+04
HFC-404A	6.70E+05	1.62E+04	0.0468	72.2	14.4	2.42E+06	32.6	1.20E+04
HFC-407C	6.98E+05	1.37E+04	0.0442	75.7	14.9	2.53E+06	35.6	1.25E+04
HFC-410A	5.99E+05	1.27E+04	0.037	66.3	12.9	2.18E+06	29.2	1.07E+04
Isceon 59	5.95E+05	1.28E+04	0.0438	65.7	12.9	2.18E+06	30.9	1.06E+04
HCFC-22	5.77E+05	1.19E+04	0.12	63.7	12.5	2.10E+06	28.1	1.03E+04

Tab. 5.8: Wirkungsindikatorergebnisse der Ökobilanz von Kaltwassersätzen 6/12°C mit 400kW Nennkälteleistung und verschiedenen Kältemitteln bezogen auf 1TJ dem Verteilnetz entzogene Energie. Die Verlustmengen entsprechen den zukünftigen Zielwerten.

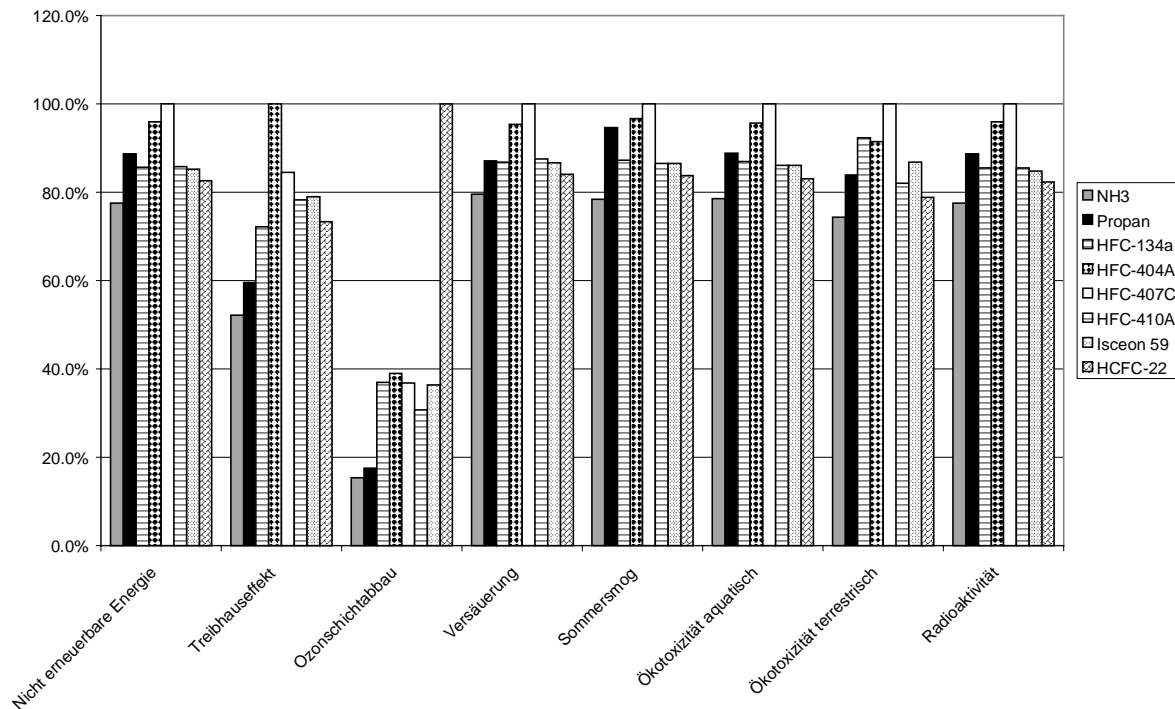


Fig. 5.37: Vergleich der Umweltwirkungen der acht untersuchten Kaltwassersätze (6/12°C) unter der Annahme zukünftig zu erwartenden Verlustmengen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Basis: 1TJ dem Verteilnetz entzogene Energie. Die jeweils höchsten Werte pro Umweltwirkung (siehe Tab. 5.8) wurden zu 100% gesetzt.

## 5.4.2 Vergleich der Solesätze

Die Verhältnisse bei den hier untersuchten Solesätzen (-25/-30°C) unterscheiden sich in manchen Punkten deutlich von denjenigen der Kaltwassersätze. Mit Ausnahme der Umweltwirkungen Treibhauseffekt und Ozonschichtabbau ist die Energieeffizienz das ausschlaggebende Kriterium (siehe Tab. 5.9 und Fig. 5.38). Die Kältemittlemissionen von Ammoniak, Propan



resp. HFC-134a beeinflussen die Wirkungsindikatorergebnisse von Versäuerung, Sommersmog resp. terrestrischer Ökotoxizität nur noch marginal.

Solesatz mit	Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie MJ PE-Äquiv.	Treibhauspotenzial kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Ozonschichtabbauendes Potenzial kg CFC-11-Äquiv.	Versäuerungspotenzial kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Sommersmogbildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
Ammoniak	1.53E+06	2.28E+04	0.0492	156	30.8	5.29E+06	70.5	2.79E+04
Propan	1.66E+06	2.46E+04	0.0531	165	34.6	5.71E+06	76	3.01E+04
HFC-134a	1.95E+06	3.34E+04	0.0942	197	39.2	6.77E+06	96.7	3.55E+04
HFC-404A	1.88E+06	3.87E+04	0.0918	189	37.6	6.47E+06	86.7	3.41E+04
HFC-407C	2.25E+06	3.87E+04	0.099	227	44.9	7.75E+06	107	4.09E+04
HFC-410A	1.86E+06	3.38E+04	0.0814	189	37.3	6.41E+06	85.7	3.39E+04
Isceon 59	2.08E+06	3.74E+04	0.0974	210	41.6	7.17E+06	98.9	3.77E+04
HCFC-22	1.60E+06	2.88E+04	0.236	162	32	5.50E+06	73.4	2.90E+04

Tab. 5.9: Wirkungsindikatorergebnisse der Ökobilanz von Solesätzen -25/-30°C mit 120kW Nennkälteleistung und verschiedenen Kältemitteln bezogen auf 1TJ dem Verteilnetz entzogene Energie. Die Verlustmengen entsprechen dem Durchschnitt heute.

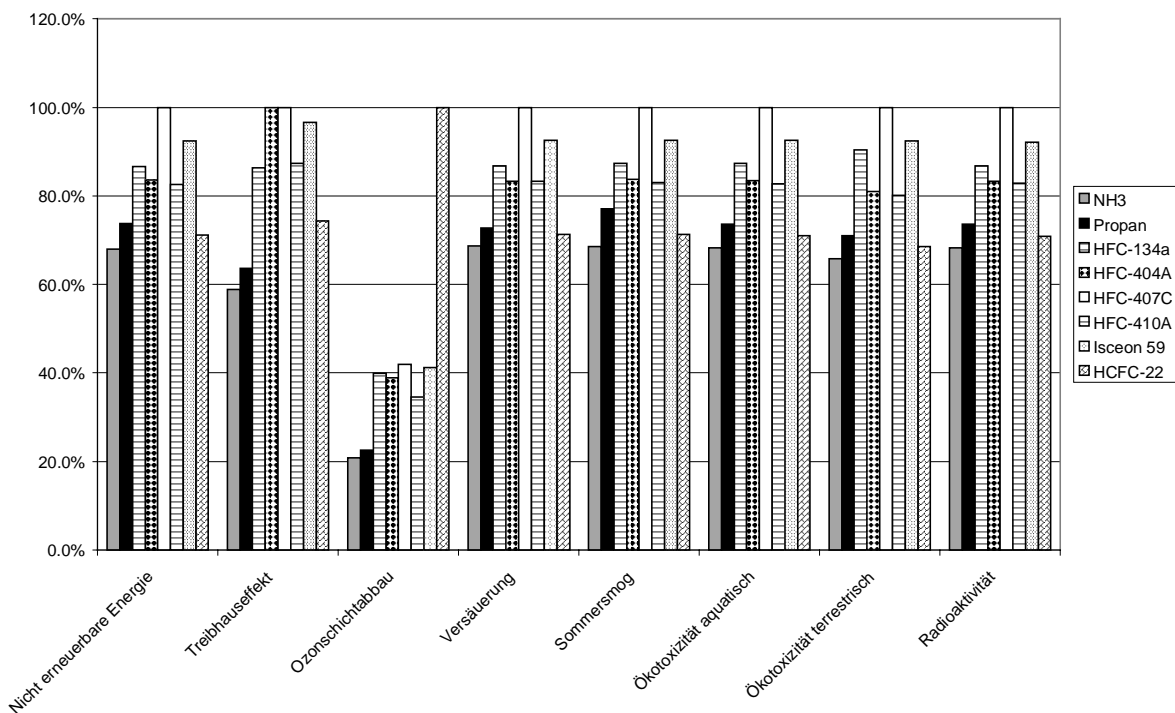


Fig. 5.38: Vergleich der Umweltwirkungen der acht untersuchten Solesätze (-25/-30°C) unter der Annahme heute durchschnittlicher Verlustmengen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Basis: 1TJ dem Verteilnetz entzogene Energie. Die jeweils höchsten Werte pro Umweltwirkung (siehe Tab. 5.9) wurden zu 100% gesetzt.

Der Grund der Dominanz der Jahresarbeitszahl liegt in dem im Vergleich zu den Kaltwassersätzen dreimal höheren Strombedarf pro TJ entzogener Energie. Damit reduziert sich der Einfluss der (gleich hohen) Kältemittlemissionen auf die Gesamtergebnisse ebenfalls um einen Faktor drei.

Beim Treibhauseffekt sind die erhöhten Wirkungen der teilhalogenierten Kältemittel noch spürbar und beim Ozonschichtabbau können die drei Kategorien HCFC-22, HFC und natürliche Kältemittel noch deutlich unterschieden werden.

Unter der Annahme zukünftiger tieferer Verlustmengen reduziert sich der Einfluss der Umweltwirkung der Kältemittlemissionen weiter (siehe Tab. 5.10 und Fig. 5.39). Er bleibt jedoch bei den Kategorien Treibhauseffekt und insbesondere Ozonschichtabbau trotzdem noch deutlich erkennbar.

Kaltwassersatz mit	Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie MJ PE-Äquiv.	Treibhauspotenzial kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Ozonschichtabbauendes Potenzial kg CFC-11-Äquiv.	Versäuerungspotenzial kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Sommersmogbildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
Ammoniak	1.53E+06	2.28E+04	0.0492	154	30.8	5.29E+06	70.5	2.79E+04
Propan	1.66E+06	2.46E+04	0.0531	165	33.9	5.71E+06	76	3.01E+04
HFC-134a	1.95E+06	3.13E+04	0.0821	196	39.1	6.74E+06	93.2	3.55E+04
HFC-404A	1.88E+06	3.34E+04	0.0797	188	37.6	6.46E+06	86.4	3.41E+04
HFC-407C	2.25E+06	3.61E+04	0.0887	225	44.9	7.74E+06	105	4.09E+04
HFC-410A	1.86E+06	3.09E+04	0.0731	187	37.3	6.41E+06	85.5	3.38E+04
Isceon 59	2.08E+06	3.42E+04	0.0856	208	41.5	7.16E+06	97.1	3.77E+04
HCFC-22	1.59E+06	2.64E+04	0.146	161	32	5.50E+06	73.3	2.90E+04

Tab. 5.10: Wirkungsindikatorergebnisse der Ökobilanz von Solesätzen -25/-30°C mit 120kW Nennkälteleistung und verschiedenen Kältemitteln bezogen auf 1TJ dem Verteilnetz entzogene Energie. Die Verlustmengen entsprechen den zukünftigen Zielwerten.

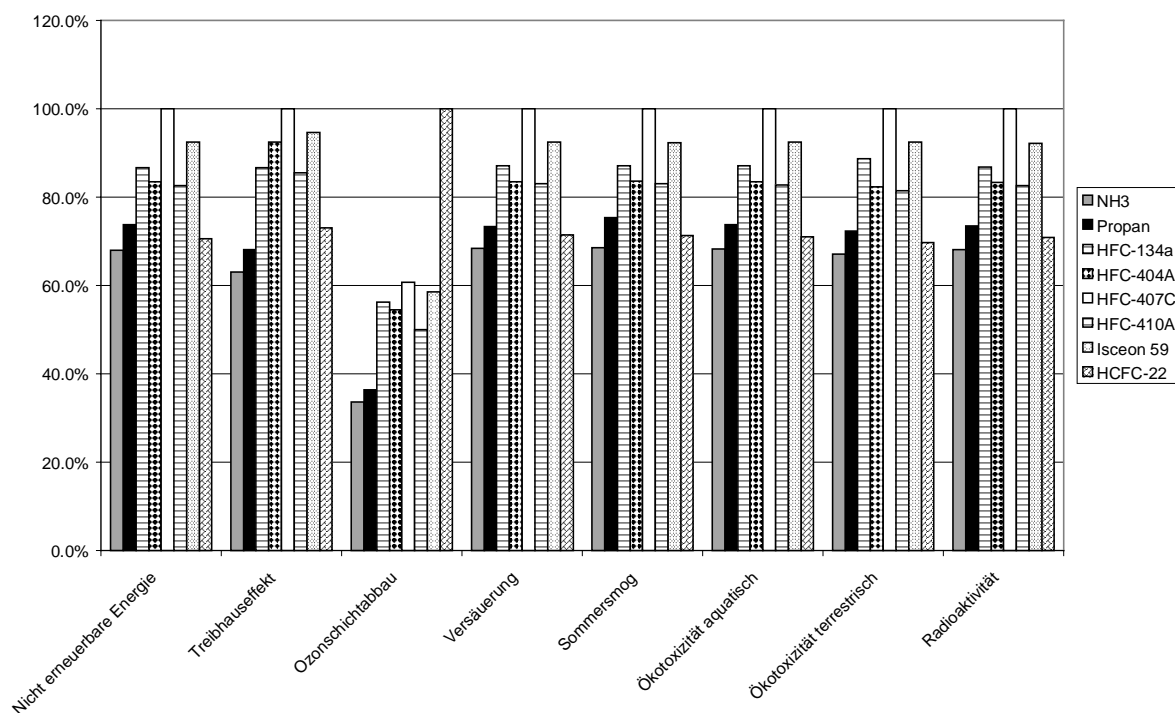


Fig. 5.39: Vergleich der Umweltwirkungen der acht untersuchten Solesätze (-25/-30°C) unter der Annahme zukünftig zu erwartenden Verlustmengen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Basis: 1TJ dem Verteilnetz entzogene Energie. Die jeweils höchsten Werte pro Umweltwirkung (siehe Tab. 5.10) wurden zu 100% gesetzt.

### 5.5 Supermarkt-Kälteanlagen

Die den Supermarkt-Kälteanlagen zugrundeliegenden Kenngrössen und Annahmen sind in Unterkap. 4.5 dokumentiert. Pro Laufmeter Kühlmöbel und Jahr werden gemäss den hier zugrunde liegenden Annahmen zwischen 36 und 45GJ Primärenergie (entspricht rund 840 bis 1'050kg Rohöl-Äquivalenten) benötigt (siehe Tab. 5.11). Es werden 1.5 bis knapp 40g CFC-11-Äquiv. ozonschichtabbauende Substanzen und knapp 700 bis 1'670kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. Treibhausgase emittiert (Ammoniak- resp. HCFC-22-Anlage mit Direktverdampfung).

Die Emissionen sommersmogverursachender Substanzen liegen zwischen 0.8 und knapp 1.0kg Ethylen-Äquiv., diejenigen versäuernder Substanzen bei 4.2 bis 5.2kg SO<sub>2</sub>-Äquiv. pro Laufmeter Kühlmöbel. Das höchste Wirkpotenzial wird jeweils durch die Ammoniakanlage (höchster Betriebsstromverbrauch) verursacht.

Supermarkt-Kälteanlage mit	Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie MJ PE-Äquiv.	Treibhauspotenzial kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Ozonschichtabbauendes Potenzial kg CFC-11-Äquiv.	Versäuerungspotenzial kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Sommersmogbildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
NH3 KTS/ NH3 KTS	4.48E+04	6.92E+02	0.00144	5.21	0.978	1.61E+05	2.19	8.06E+02
R134a KTS/ R404A DX	3.80E+04	1.27E+03	0.00415	4.3	0.842	1.37E+05	2.11	6.82E+02
R404A KTS/ R404A DX	3.76E+04	1.38E+03	0.00376	4.19	0.832	1.34E+05	1.85	6.73E+02
R134a KTS/ R22 DX	3.62E+04	1.01E+03	0.013	4.22	0.804	1.30E+05	2	6.49E+02
R22 KTS/ R22 DX	4.19E+04	1.11E+03	0.0183	4.78	0.915	1.48E+05	2.02	7.52E+02
R22 DX/ R22 DX	4.03E+04	1.67E+03	0.0391	5.04	0.88	1.42E+05	1.96	7.23E+02

Tab. 5.11: Wirkungsindikatorergebnisse der Ökobilanz von sechs Supermarkt-Kälteanlage-Konzepten mit 104kW Nennkälteleistung und verschiedenen Kältemitteln bezogen auf den Betrieb von einem Laufmeter Kühlmöbel pro Jahr. Die Verlustmengen entsprechen den heutigen Durchschnittswerten. KTS: Kälteträgersystem; DX: Direktverdampfung

Auch bei der Supermarktkälte spielt die Energieeffizienz der Kälteanlage bei einigen Umweltwirkungen die entscheidende Rolle. Die Umweltwirkungskategorien "Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergie", "Sommersmog", "Aquatische Ökotoxizität", und "Radioaktivität" widerspiegeln die Relationen des Betriebsstromverbrauchs praktisch unverfälscht (siehe Fig. 5.40).

Bei der Versäuerung erkennen wir leichte bis deutliche Verschiebungen (insb. die Anlage mit HCFC-22 und reiner Direktverdampfung). Die Ammoniakanlage weist u.a. auch aufgrund der eingesetzten Edelstahl-Verteilleitungen den höchsten Wert auf. Die Mehremissionen gegenüber Kupferrohren beträgt rund 0.4kg SO<sub>2</sub>-Äquiv. pro Laufmeter Kühlmöbel und Jahr. Bei der terrestrischen Ökotoxizität sehen wir den Einfluss der Emissionen von HFC-134a relativ deutlich. Der aufgrund der vorliegenden Daten bestehende Vorteil der HFC-134a/HFC-404A-Anlage bezüglich Energieeffizienz gegenüber den HCFC-22-Anlagen wird durch die Kältemittlemission deutlich überkompensiert. Der effizienzbedingte Vorteil gegenüber der Ammoniak-Anlage wird praktisch kompensiert.

Beim Treibhauseffekt sind hingegen die Kältemittlemissionen deutlich resultatbestimmend. Die HCFC-22-Kälteanlage mit Direktverdampfung auch in der Normalkühlung weist infolge der höheren Kältemittlemissionen deutlich das höchste Treibhauspotenzial auf. Bei den übrigen Systemen auf Basis teilhalogenierter Kältemittel stellt sich eine Reihenfolge entsprechend dem Treibhauspotenzial der verwendeten Kältemittel ein. Trotz der schlechtesten Energieeffizienz weist die Ammoniak-Anlage das deutlich geringste Treibhauspotenzial auf.

Beim Ozonschichtabbaupotenzial schliesslich werden die in den anderen Anwendungen gemachten Aussagen bestätigt. Durch einen Wechsel von HCFC-22 Direktverdampfungsanlagen auf chlorfreie teilhalogenierte Kältemittel und Kälte-trägersysteme auch in der Normalkühlung kann eine Reduktion des ozonschichtabbaudenden Potenzials um rund einen Faktor 10 erreicht werden. Bei Verwendung von Ammoniak anstelle der HFCs kann eine weitere Reduktion um 60 bis 65% erreicht werden. Gleiche Energieeffizienz vorausgesetzt erhöht sich das Reduktionspotenzial auf rund 70 bis 75%.

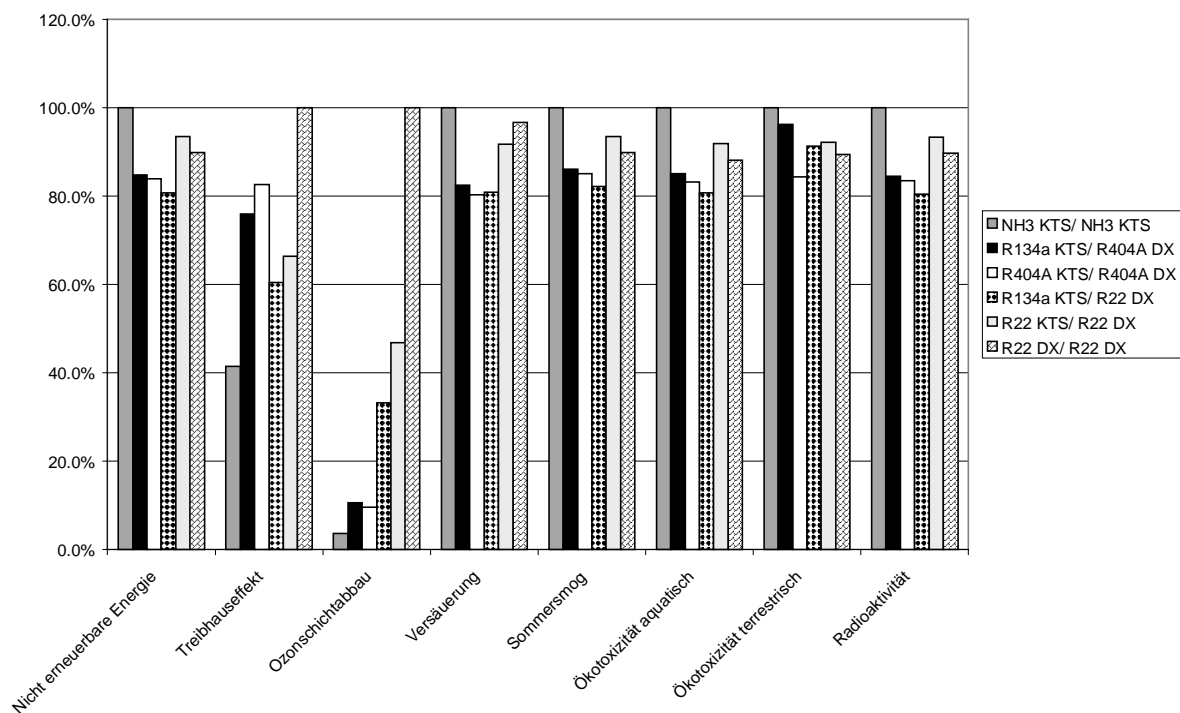


Fig. 5.40: Vergleich der Umweltwirkungen von sechs Supermarkt-Kälteanlage-Konzepten unter der Annahme heute durchschnittlicher Verlustmengen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Basis: Betrieb von 1 Laufmeter (korr.) Kühlmeter pro Jahr. Die jeweils höchsten Werte pro Umweltwirkung (siehe Tab. 5.11) wurden zu 100% gesetzt. KTS: Kälte-trägersystem; DX: Direktverdampfung.

Bei Annahme geringerer Kältemittelverluste insbesondere während des Betriebs werden die Maximalwerte der Umweltwirkungen "Treibhauseffekt" resp. "Ozonschichtabbau" um ein Drittel auf 1'140kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. resp. um knapp die Hälfte auf knapp 20g CFC-11-Äquiv. reduziert (siehe Tab. 5.12). Da die tiefsten Werte (jeweils die Ammoniak-Anlage) praktisch unverändert bleiben, reduziert sich der relative Unterschied zwischen der HCFC-22- und der Ammoniak-Anlage in gleichem Masse. Bei den andern Umweltwirkungen sind die Veränderungen deutlich geringer.

Supermarkt mit	Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie MJ PE-Äquiv.	Treibhauspotenzial kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Ozonschichtabbauendes Potenzial kg CFC-11-Äquiv.	Versäuerungspotenzial kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Sommersmogbildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
NH3 KTS/ NH3 KTS	4.48E+04	6.92E+02	0.00144	5.18	0.978	1.61E+05	2.19	8.06E+02
R134a KTS/ R404A DX	3.80E+04	9.14E+02	0.00307	4.18	0.839	1.36E+05	1.96	6.82E+02
R404A KTS/ R404A DX	3.75E+04	9.58E+02	0.00281	4.1	0.83	1.33E+05	1.83	6.73E+02
R134a KTS/ R22 DX	3.62E+04	7.81E+02	0.00703	4.05	0.802	1.29E+05	1.87	6.48E+02
R22 KTS/ R22 DX	4.18E+04	8.76E+02	0.0094	4.6	0.913	1.48E+05	2.01	7.52E+02
R22 DX/ R22 DX	4.02E+04	1.14E+03	0.0193	4.64	0.878	1.42E+05	1.94	7.23E+02

Tab. 5.12: Wirkungsindikatorergebnisse der Ökobilanz von sechs Supermarkt-Kälteanlage-Konzepten mit 104kW Nennkälteleistung und verschiedenen Kältemitteln bezogen auf den Betrieb von einem Laufmeter Kühlmöbel pro Jahr. Die Verlustmengen entsprechen den zukünftigen Zielwerten. KTS: Kälte-trägersystem; DX: Direktverdampfung

Der Einfluss der Kältemittlemissionen auf die Umweltwirkungen "Versäuerung" und "Terrestrische Ökotoxizität" ist deutlich geringer. Trotzdem gibt es im Vergleich zur Reihenfolge in der Energieeffizienz Positionsverschiebungen zwischen den Anlagen mit HFC-134a als Kältemittel in der Normalkühlung und den reinen HCFC-22- resp. HFC-404A-Anlagen (siehe [Fig. 5.41](#)).

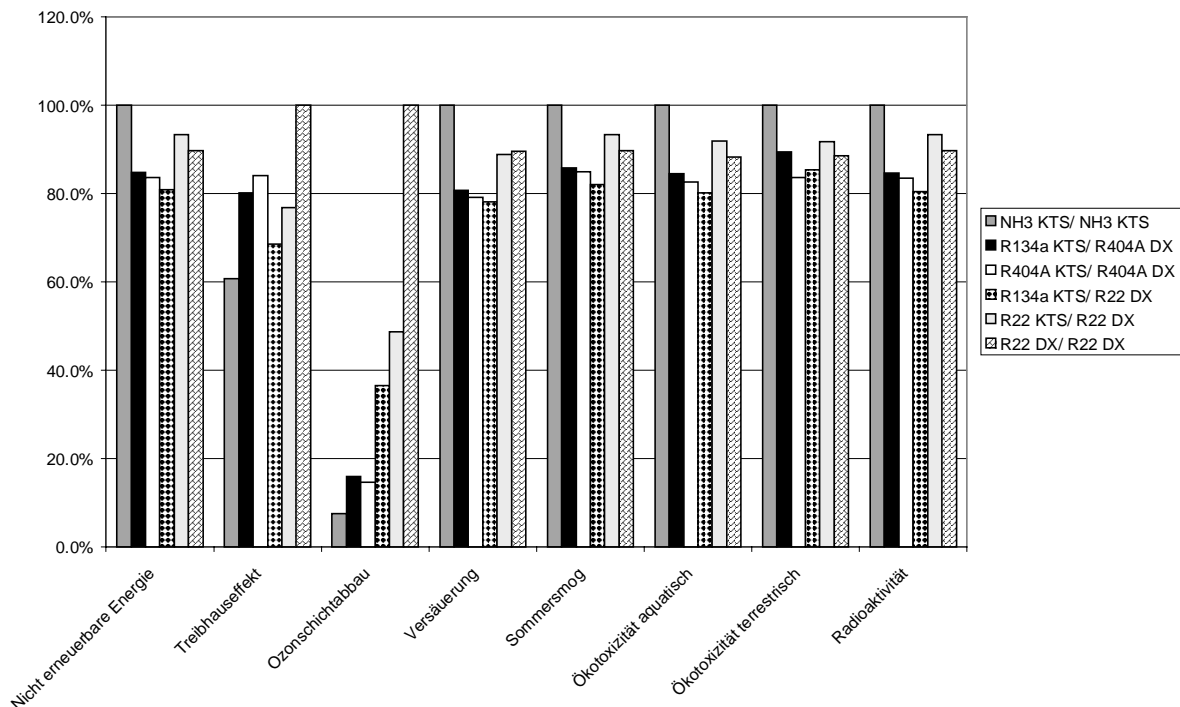


Fig. 5.41: Vergleich der Umweltwirkungen von sechs Supermarkt-Kälteanlage-Konzepten unter der Annahme zukünftig zu erwartender Verlustmengen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung. Basis: Betrieb von 1 Laufmeter (korr.) Kühlmeter pro Jahr. Die jeweils höchsten Werte pro Umweltwirkung (siehe Tab. 5.12) wurden zu 100% gesetzt. KTS: Kälte-trägersystem; DX: Direktverdampfung.

Trotz ihrer teilweise deutlich tieferen Energieeffizienz erweisen sich Ammoniak-Anlagen unter den in dieser Studie gemachten Annahmen bezüglich "Treibhauseffekt" und "Ozonschichtabbau" als die eindeutig vorteilhaftesten. Bei den übrigen Kategorien ist einmal mehr die Energieeffizienz der entscheidende Parameter. Bei den Supermarkt-Kälteanlagen, deren Betriebsdaten für diese Studie ausgewertet werden konnten, hat sich gezeigt, dass die Ammoniak-Anlagen die schlechteste durchschnittliche Energieeffizienz aufweisen. Die Kombination von HFC-134a (Normalkühlung mit Sekundärkreislauf) und HCFC-22 (Tiefkühlung mit Direktverdampfung) benötigt pro Laufmeter Kühlmöbel am wenigsten Betriebsenergie.

Würden für alle Anlagen die in den Niederlanden erreichten, tiefen Verlustraten von 3% pro Jahr angenommen (Van Gerwen & Verwoerd 1998), so würden die Unterschiede bei den Umweltwirkungen *Treibhauseffekt* und *Ozonschichtabbau* weiter reduziert. Bei den übrigen Umweltwirkungen würde die Energieeffizienz noch weiter an Bedeutung gewinnen.

Ob diese Ergebnisse durch eine grossflächigen Untersuchung bestätigt würden, kann nicht prognostiziert werden. Die Datenlage bezüglich Verlustraten ist sehr dürftig. Die relativ ungünstige Energieeffizienz der Ammoniak-Anlagen hat überrascht. Hier könnten andere, kältemittelunabhängige Gründe wie Betrieb in Teillast mit deutlich tieferer Leistungszahl eine Rolle spielen. Im nachfolgenden Unterkap. 5.6 werden darum die Ergebnisse noch in Abhängigkeit der Energieeffizienz aufgezeigt.

## 5.6 Sensitivitätsanalyse Jahresarbeitszahl

### 5.6.1 Einführung

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse pro Wirkungskategorie in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl in Diagrammform gezeigt. Damit ist es möglich, für spezifische Anlagenkonfigurationen mit bekannter Energieeffizienz die Umweltwirkungen zu eruieren und untereinander zu vergleichen. Auch kann daraus abgelesen werden, um wieviel die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe, eines Kaltwasser- oder Solesatzes besser sein muss (oder schlechter sein darf), um gegenüber einer Wärmepumpe mit einem anderen Kältemittel gleichwertig zu sein.

Die Systeme basieren auf heute durchschnittlichen Leckageraten (siehe Abschnitt 5.3.1, 5.4.1 resp. 5.5.1) und beziehen Elektrizität aus dem Schweizerischen Stromnetz (Stromhandel mit dem Ausland berücksichtigt).

### 5.6.2 Wärmepumpen

*Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (siehe Fig. 5.42):*

Beim Energiebedarf bestätigt sich die in früheren Arbeiten bereits gemachte Feststellung. Es sind bei gleicher Jahresarbeitszahl keine signifikanten Unterschiede auszumachen.

*Treibhauseffekt (siehe Fig. 5.43):*

Die Variation der Jahresarbeitszahl kann den Unterschied infolge der HFC- und HCFC-Emissionen nicht wettmachen. Die Abhängigkeit des Treibhauspotenzials von der Jahresarbeitszahl ist deutlich unterproportional.

*Ozonschichtabbau (siehe Fig. 5.44):*

Hier sind es im wesentlichen prozessspezifische Emissionen der Kälteanlagen und Kältemittelherstellung, die zu einer Indifferenz gegenüber der Jahresarbeitszahl führen. Die drei Gruppen natürliche Kältemittel (Propan, CO<sub>2</sub>), HFCs und HCFC-22 unterscheiden sich deutlich.

*Versäuerung (siehe Fig. 5.45):*

Bei dieser Umweltwirkung lassen sich die Unterschiede im Stoffschicksal der Kältemittel deutlich erkennen. Da die teilhalogenierten Kältemittel - teilweise erst nach Jahren - zu Salz- und Flusssäure abgebaut werden, ergibt sich ein höheres versäuerndes Potenzial bei gleicher Jahresarbeitszahl (maximal ca. 10% höher). HFC-404A nimmt hier eine Zwischenstellung zwischen den teilhalogenierten und den natürlichen Kältemitteln ein.

*Sommersmog (siehe Fig. 5.46):*

Da beim Sommersmog die Bereitstellung der Infrastruktur (Herstellen der Wärmepumpe, Bohren der Erdsonden etc.) eine wichtige Rolle spielt, sind auch die Unterschiede bei dieser Umweltwirkung eher gering. Die Ausnahme bildet die Propan-Wärmepumpe, welche durch die Leckagen ein um rund 2 bis 5% höheres sommersmogbildendes Potenzial aufweist.

*Aquatische Ökotoxizität (siehe Fig. 5.47):*

Die Ökotoxizitätspotenziale der verschiedenen Wärmepumpen liegen nahe beieinander. Hier ist die Strombereitstellung und damit die Energieeffizienz der Wärmepumpe massgebend.

*Terrestrische Ökotoxizität (siehe Fig. 5.48):*

Im Gegensatz zur aquatischen Ökotoxizität liegen die Verhältnisse bei der terrestrischen Ökotoxizität deutlich anders. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Kältemitteln sind im Verhältnis zur Abhängigkeit von der Jahresarbeitszahl so gross, dass sie nur durch eine sehr viel höhere Jahresarbeitszahl kompensiert werden könnten. Dies gilt vor allem für HFC-134a, aber auch für Isceon 59 und HFC-407C. Die übrigen Kältemittel liegen alle etwa in demselben Bereich.

*Emission radioaktiver Isotope (siehe Fig. 5.49):*

Da die radioaktiven Isotope ausschliesslich in der Kernenergie-Prozesskette in relevanten Mengen emittiert werden, zeigt sich hier die Kältemittel-Unabhängigkeit besonders deutlich. Die einzelnen Punkte sind die Werte der kältemittelspezifischen Auslegung der bilanzierten Wärmepumpe. Die leichten Abweichungen sind durch Rundungsungenauigkeiten verursacht.

*Fazit:*

Für die hier im Detail betrachtete Sole/Wasser-Wärmepumpe mit  $7\text{kW}_{\text{th}}$  Wärmeleistung sind bei vergleichbarer Jahresarbeitszahl die Umweltwirkungen "Ozonschichtabbau", "Treibhaus-effekt" und "Terrestrische Ökotoxizität" mit in dieser Reihenfolge abnehmender Deutlichkeit von der Wahl des Kältemittels abhängig. Beim "Sommersmog" resp. der "Versäuerung" sind leichte Nach- resp. Vorteile der Propan-Wärmepumpe zu beobachten. Die restlichen Umweltwirkungen werden durch die Energieeffizienz der Systeme geprägt und können als kältemittlemissions-unabhängig bezeichnet werden.

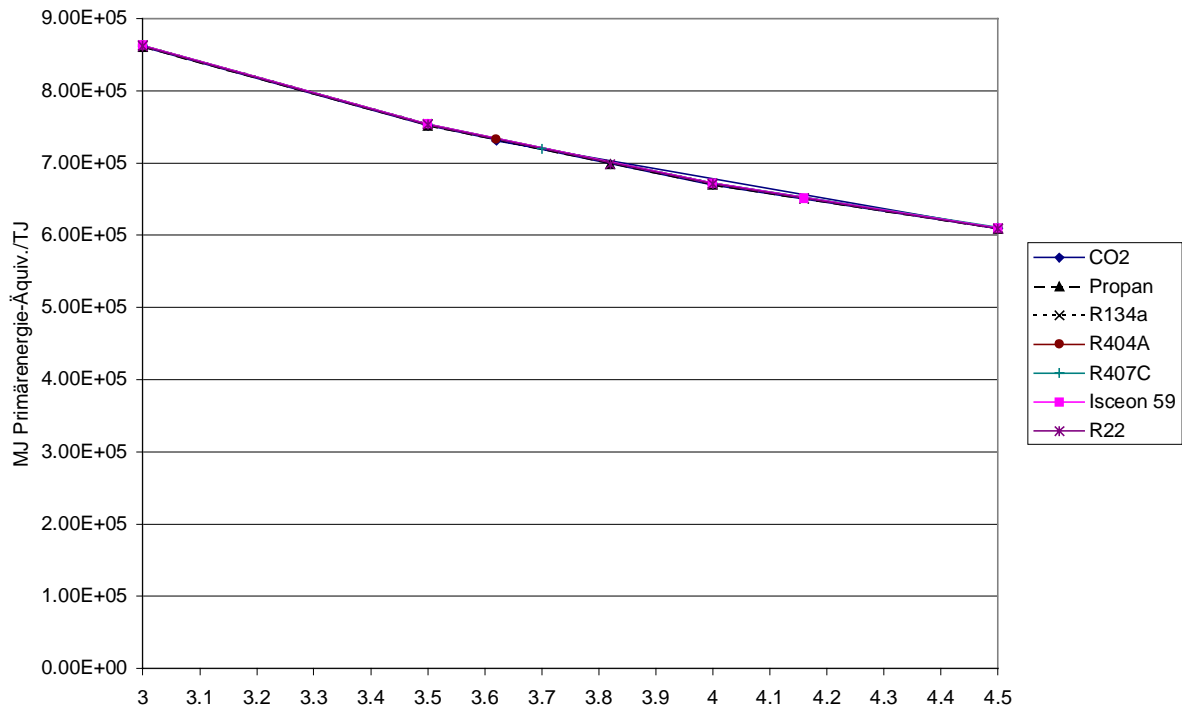


Fig. 5.42: Vergleich des Bedarfs nicht erneuerbarer Primärenergie von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.0 bis 4.5) auf der Basis von 1TJ an das Verteilnetz abgegebener Heizenergie.

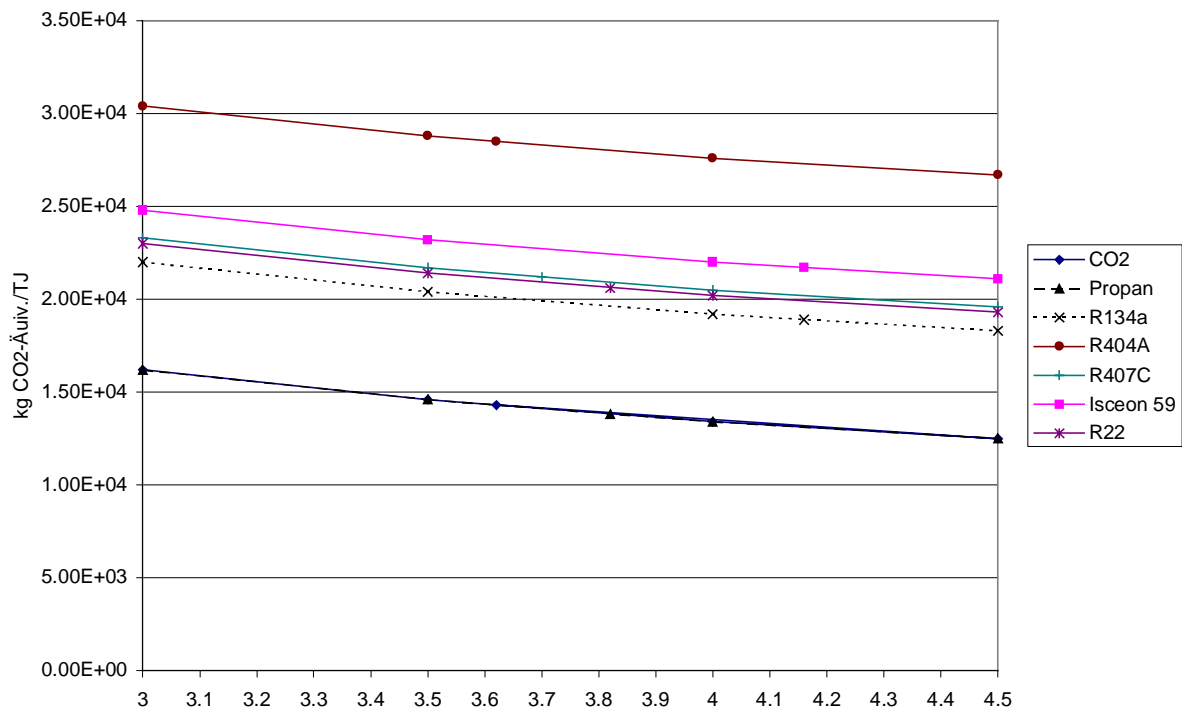


Fig. 5.43: Vergleich des Treibhauspotenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.0 bis 4.5) auf der Basis von 1TJ an das Verteilnetz abgegebener Heizenergie.



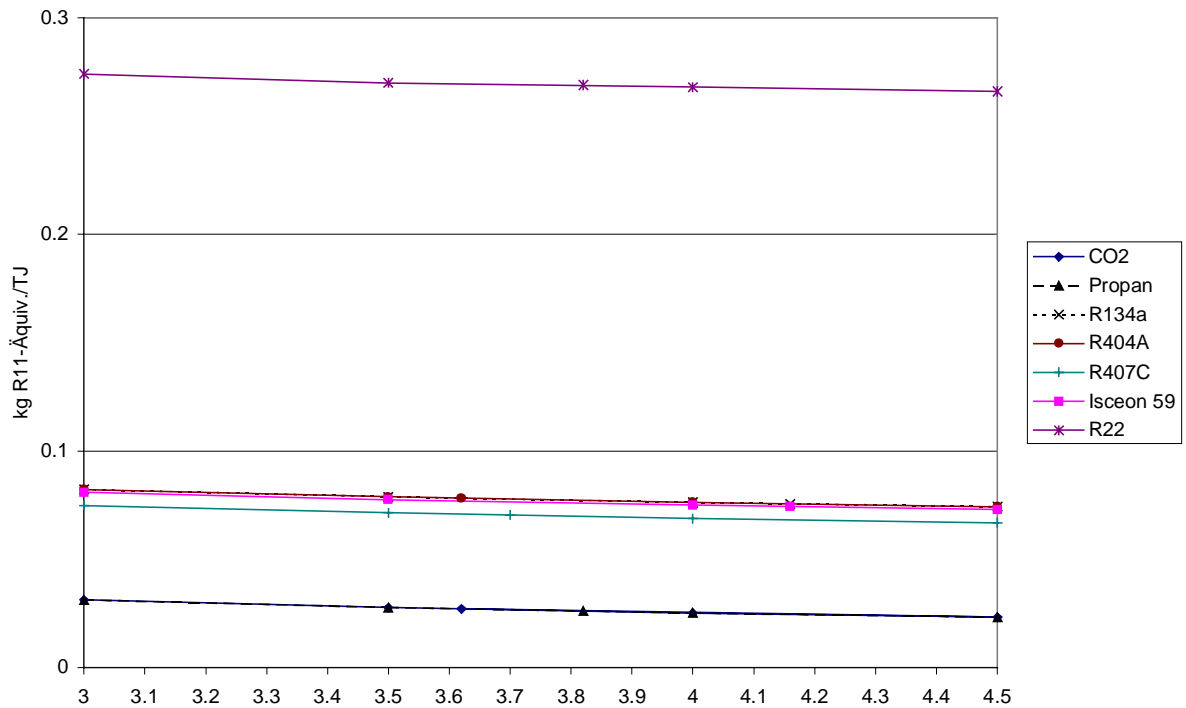


Fig. 5.44: Vergleich des ozonschichtabbauenden Potenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.0 bis 4.5) auf der Basis von 1TJ an das Verteilnetz abgegebener Heizenergie.

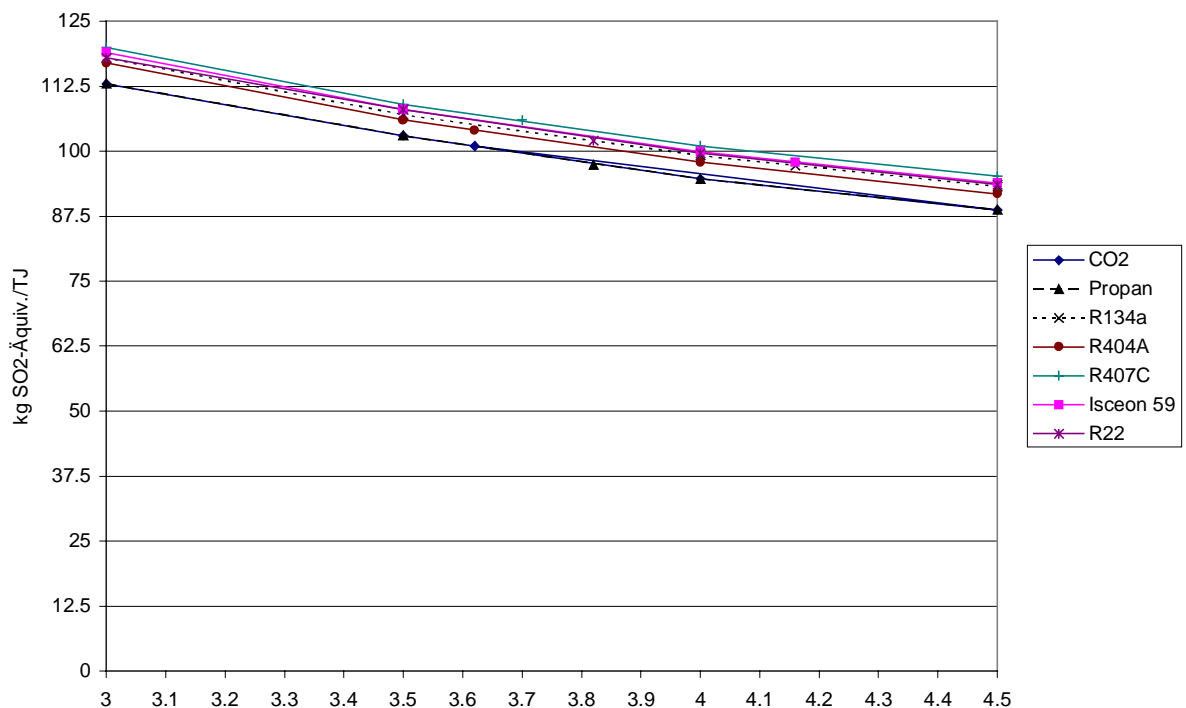


Fig. 5.45: Vergleich des Versäuerungspotenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.0 bis 4.5) auf der Basis von 1TJ an das Verteilnetz abgegebener Heizenergie.

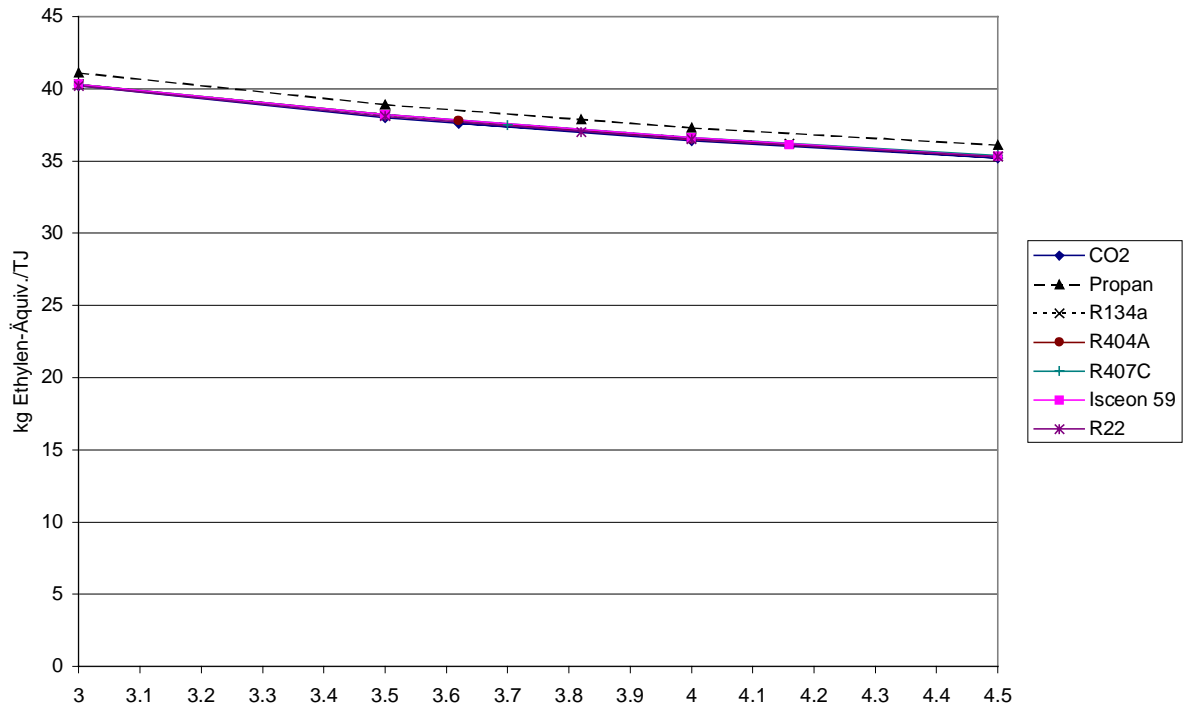


Fig. 5.46: Vergleich des sommersmogbildenden Potenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.0 bis 4.5) auf der Basis von 1TJ an das Verteilnetz abgegebener Heizenergie.

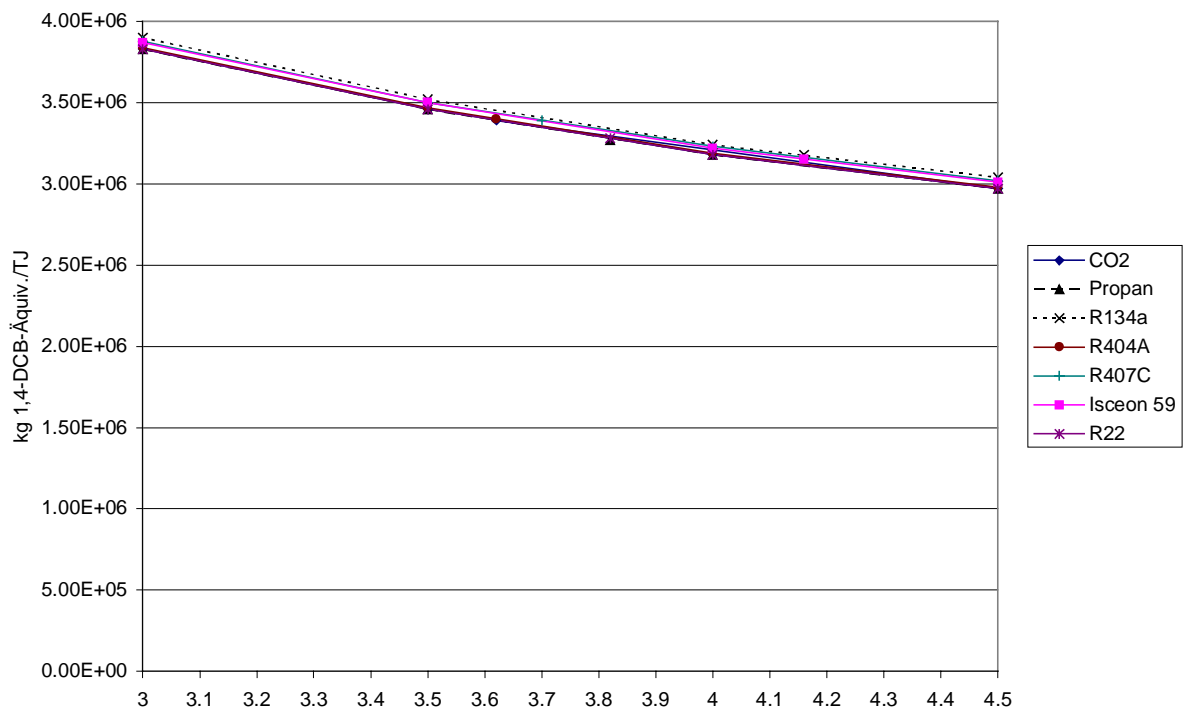


Fig. 5.47: Vergleich des aquatischen Ökotoxizitätspotenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.0 bis 4.5) auf der Basis von 1TJ an das Verteilnetz abgegebener Heizenergie.

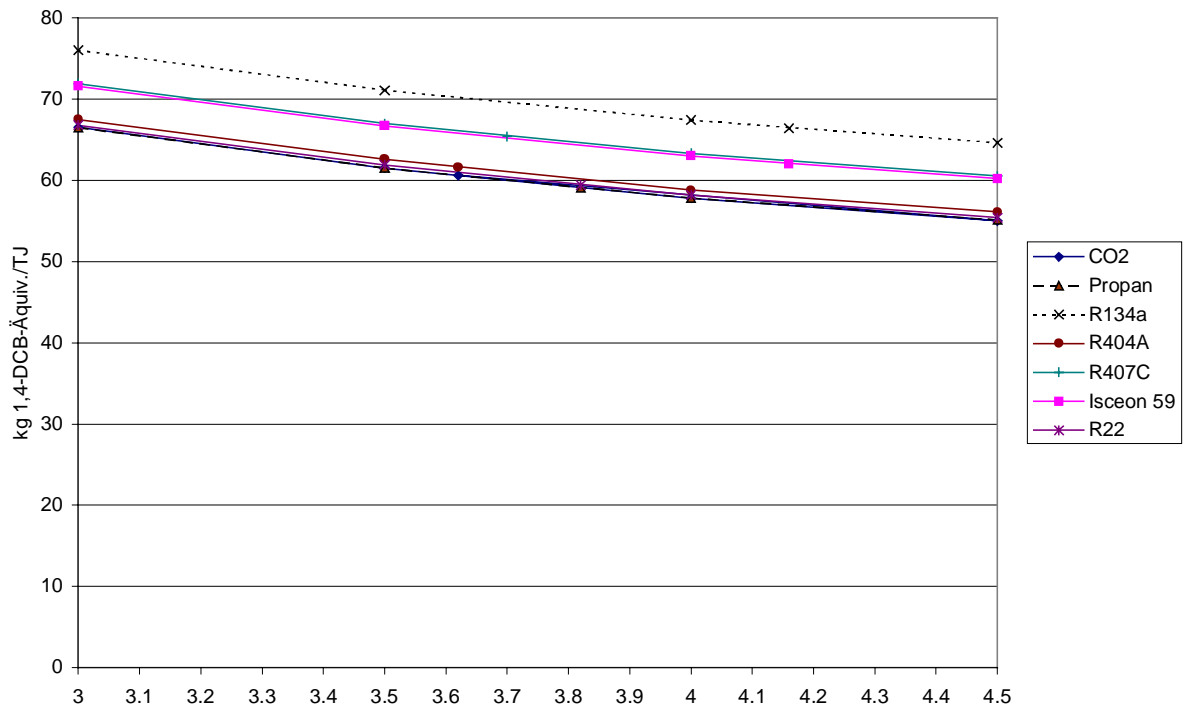


Fig. 5.48: Vergleich des terrestrischen Ökotoxizitätspotenzials von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.0 bis 4.5) auf der Basis von 1TJ an das Verteilnetz abgegebener Heizenergie.

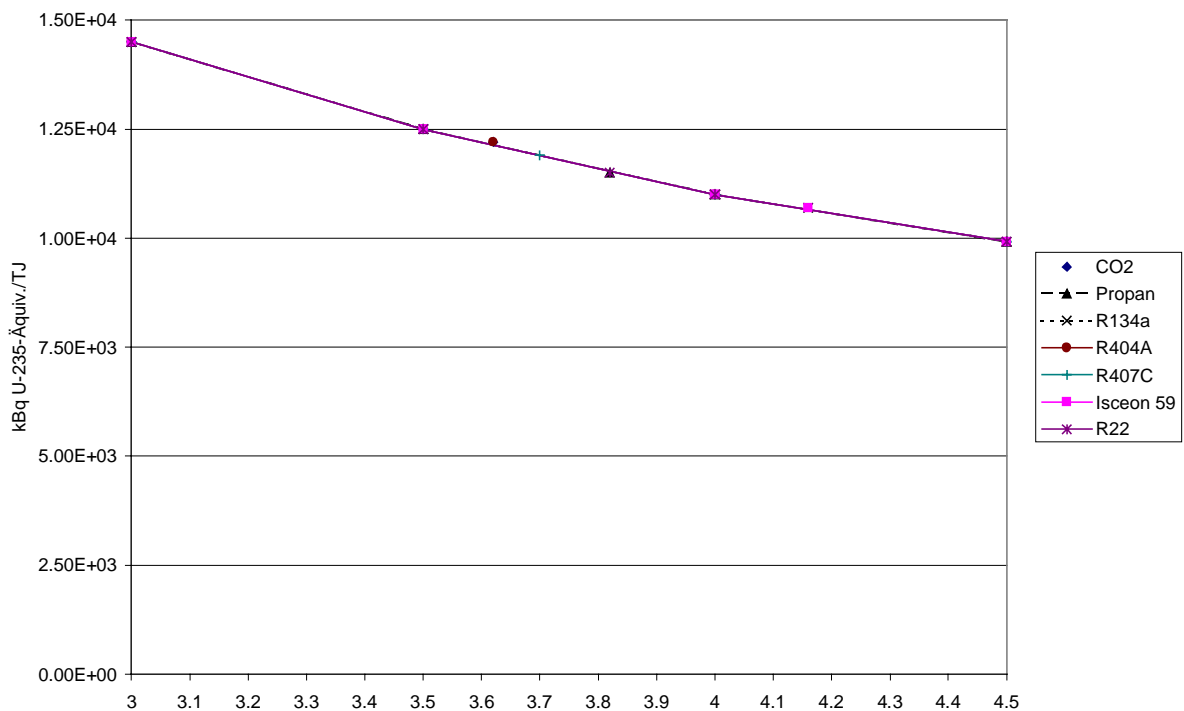


Fig. 5.49: Vergleich der Emissionen radioaktiver Isotope von Sole/Wasser-Wärmepumpen ( $7kW_{th}$ ) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.0 bis 4.5) auf der Basis von 1TJ an das Verteilnetz abgegebener Heizenergie.

### 5.6.3 Kaltwassersätze

Die Kaltwassersätze (6/12°C) werden zur Raumklimatisierung verwendet und sind während 1'500 Stunden jährlich im Betrieb. Wegen der hohen Nutztemperatur sind hohe Jahresarbeitszahlen erreichbar, was zusammen mit der relativ geringen Laufzeit zu einem erhöhten Einfluss der Kältemittlemissionen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung der Anlage führt (siehe Fig. 5.50 bis 5.57).

Ähnlich wie bei den Wärmepumpen sind bei den Indikatoren "Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf", "Emission radioaktiver Isotope" und "Aquatische Ökotoxizität" die Unterschiede sehr gering, weshalb für diese Umweltwirkungen die Jahresarbeitszahl die entscheidende Grösse darstellt (siehe Fig. 5.50, 5.55 und 5.57). Bei "Versäuerung" sind die Emissionen säurebildender Kältemittel (Ammoniak und teilhalogenierte Kältemittel, siehe Fig. 5.53), bei der Photooxidantenbildung ("Sommersmog") die Propanemissionen erkennbar (siehe Fig. 5.54). Der Unterschied zwischen Kaltwassersätzen mit Propan und denjenigen mit andern Kältemitteln liegt jeweils unter 10%.

Grössere Unterschiede sind beim Treibhauseffekt (Fig. 5.51) und dem Ozonschichtabbau (Fig. 5.52) zu erkennen. Das relativ gesehen höchste direkte Treibhauspotenzial weist das Kältemittel HFC-404A auf. Auch bei einer lebenszyklusbezogenen Betrachtung weist - bei vergleichbarer Jahresarbeitszahl - der mit HFC-404A betriebene Kaltwassersatz das höchste Treibhauspotenzial auf. Da die Kältemittlemission in dieser Betrachtung den praktisch einzigen Unterschied ausmacht (die Herstellungsaufwendungen der Kältemittel und der Anlagen unterscheiden sich bezüglich Treibhauseffekt kaum), zeigt sich die Reihenfolge gemäss den direkten Treibhauspotenzialen der Kältemittel.

Beim Ozonschichtabbau sind die drei Kategorien HCFC-22, HFC, natürliche Kältemittel erkennbar. Der Unterschied zwischen Propan und Ammoniak einerseits und den HFCs und HFC-Gemischen andererseits ist ähnlich deutlich wie bei den Wärmepumpen.

Auch bei der terrestrischen Ökotoxizität lässt sich die erhöhte Umweltwirkung von HFC-134a resp. dessen Abbauprodukt Trifluoressigsäure (TFA) beobachten (siehe Fig. 5.56). Mit einem Anteil von ca. 50% von HFC-134a in den Kältemittelgemischen Isceon 59 und HFC-407C liegen diese zwischen den natürlichen und den HFC-134a-freien Kältemitteln einerseits und dem reinen HFC-134a andererseits. Der Unterschied beträgt bei den hier zugrundegelegten Annahmen gut 17 bis knapp 24%.

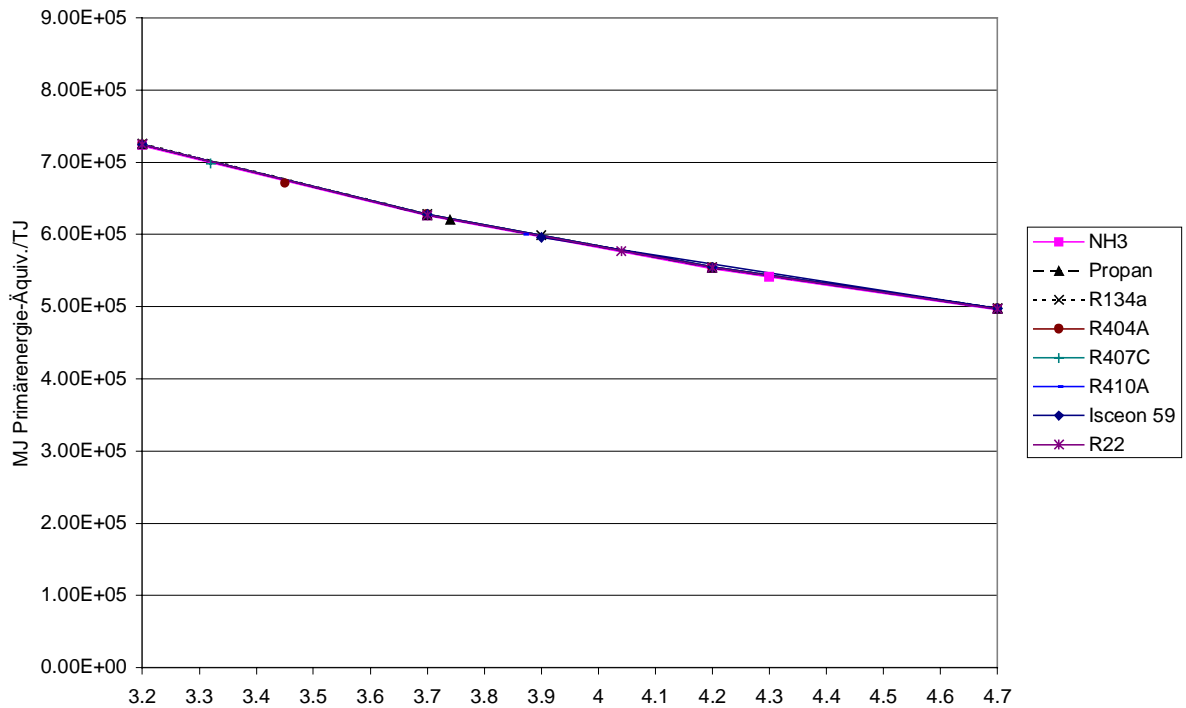


Fig. 5.50: Vergleich des Bedarfs nicht erneuerbarer Primärenergie von Kaltwassersätzen (6/12°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.2 bis 4.7) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

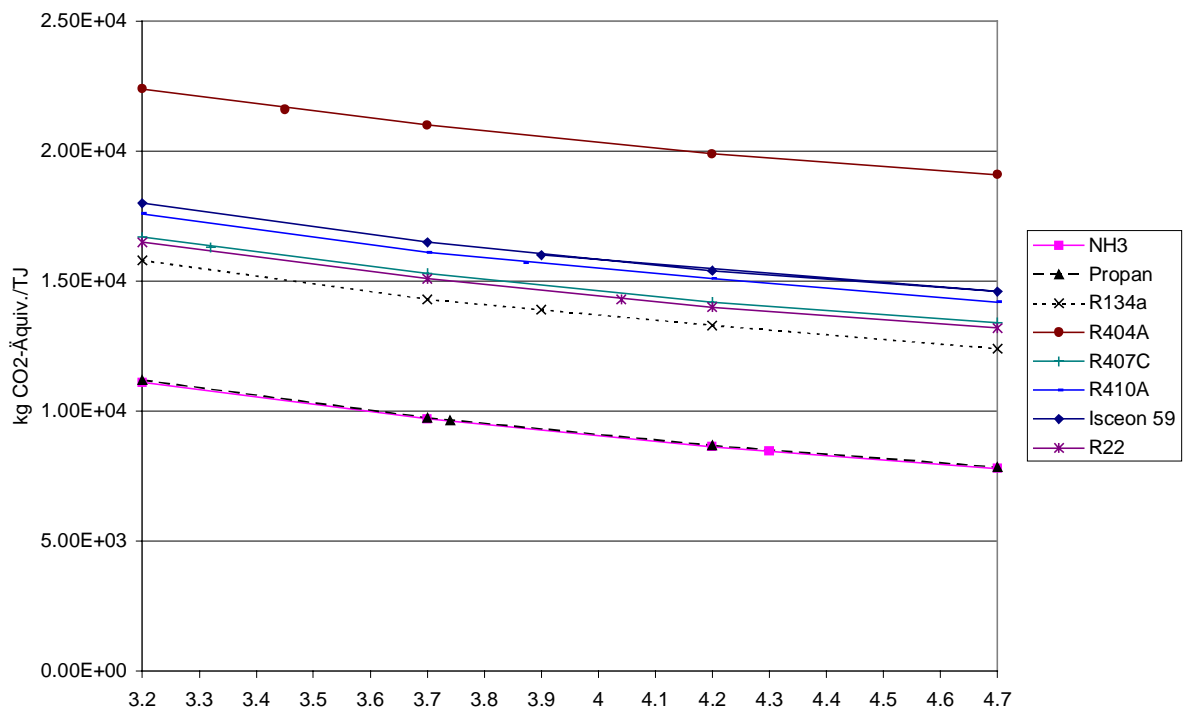


Fig. 5.51: Vergleich des Treibhauspotenzials von Kaltwassersätzen (6/12°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.2 bis 4.7) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

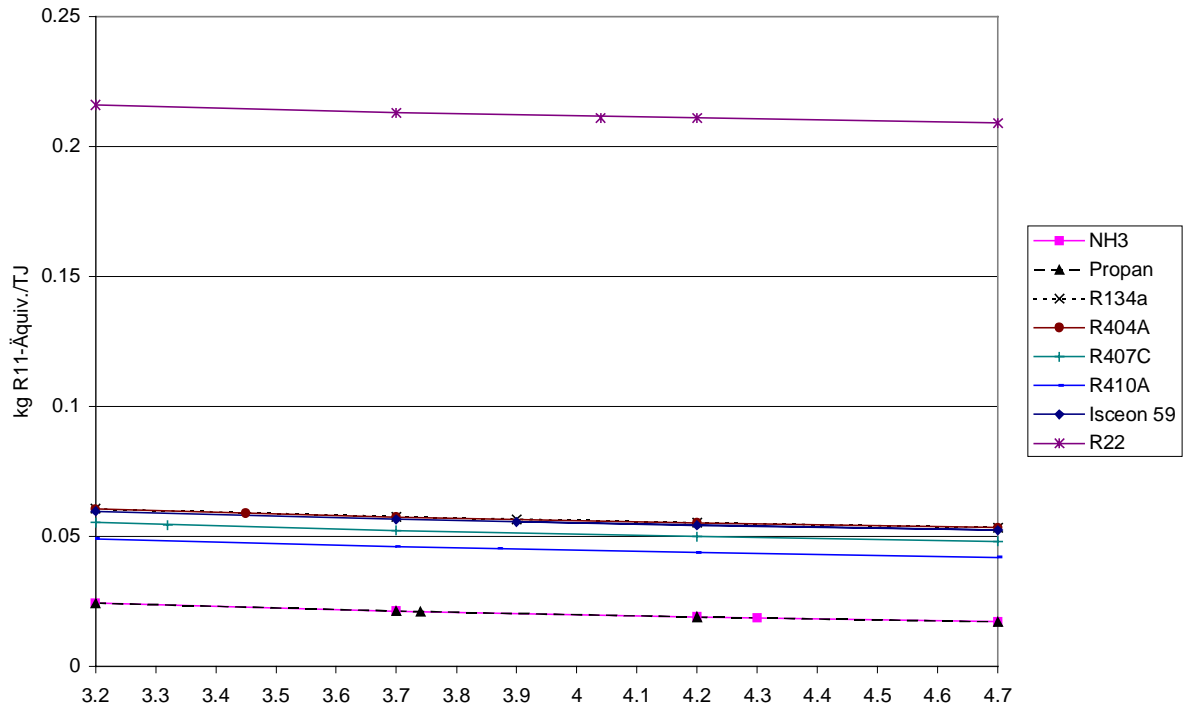


Fig. 5.52: Vergleich des Ozonschichtabbaupotenzials von Kaltwassersätzen (6/12°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.2 bis 4.7) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

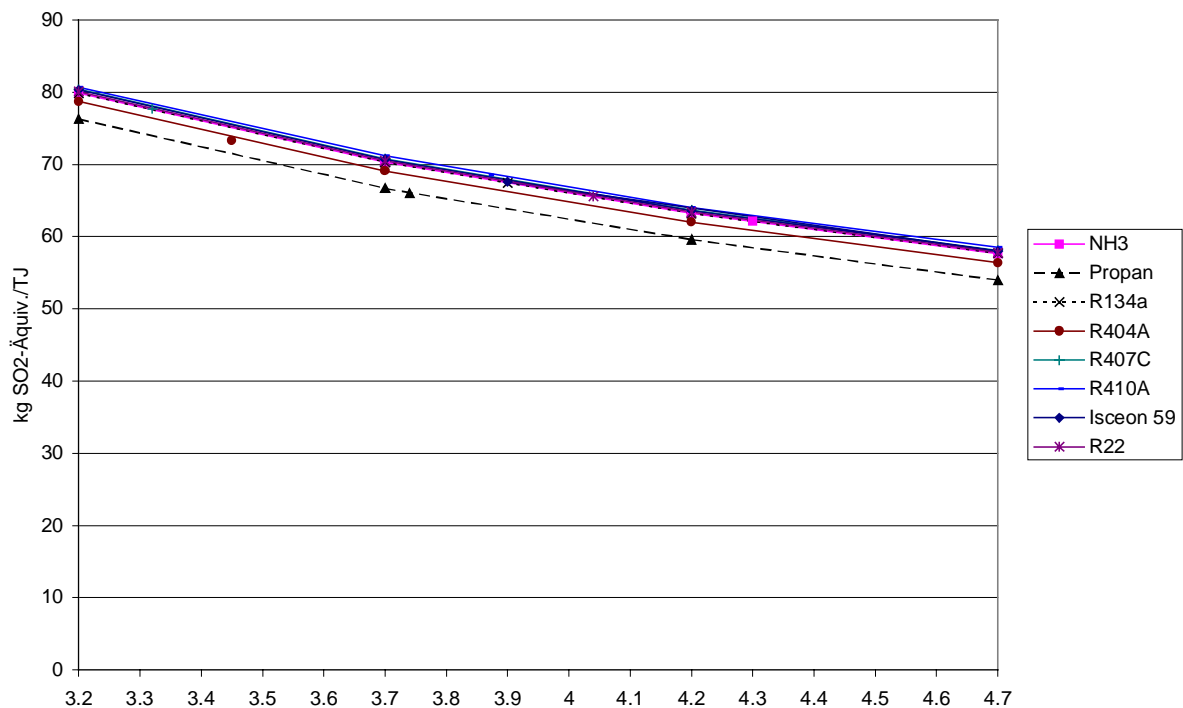


Fig. 5.53: Vergleich des Versäuerungspotenzials von Kaltwassersätzen (6/12°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.2 bis 4.7) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

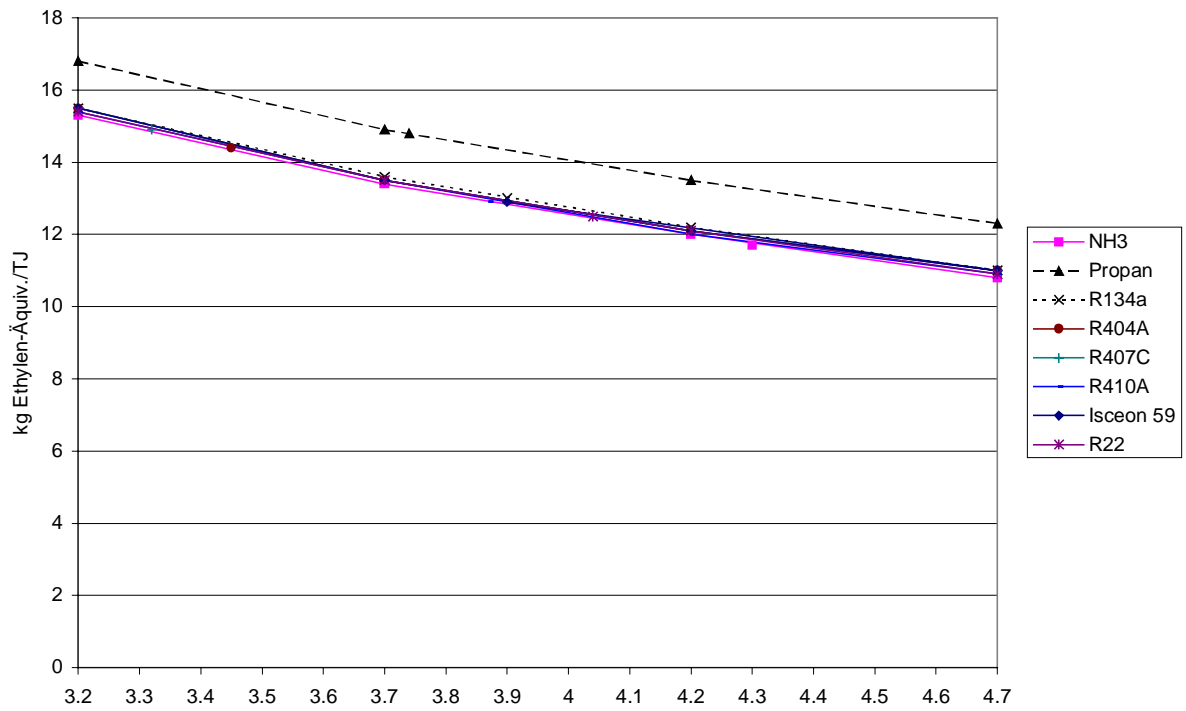


Fig. 5.54: Vergleich des Sommersmog bildenden Potenzials von Kaltwassersätzen (6/12°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.2 bis 4.7) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

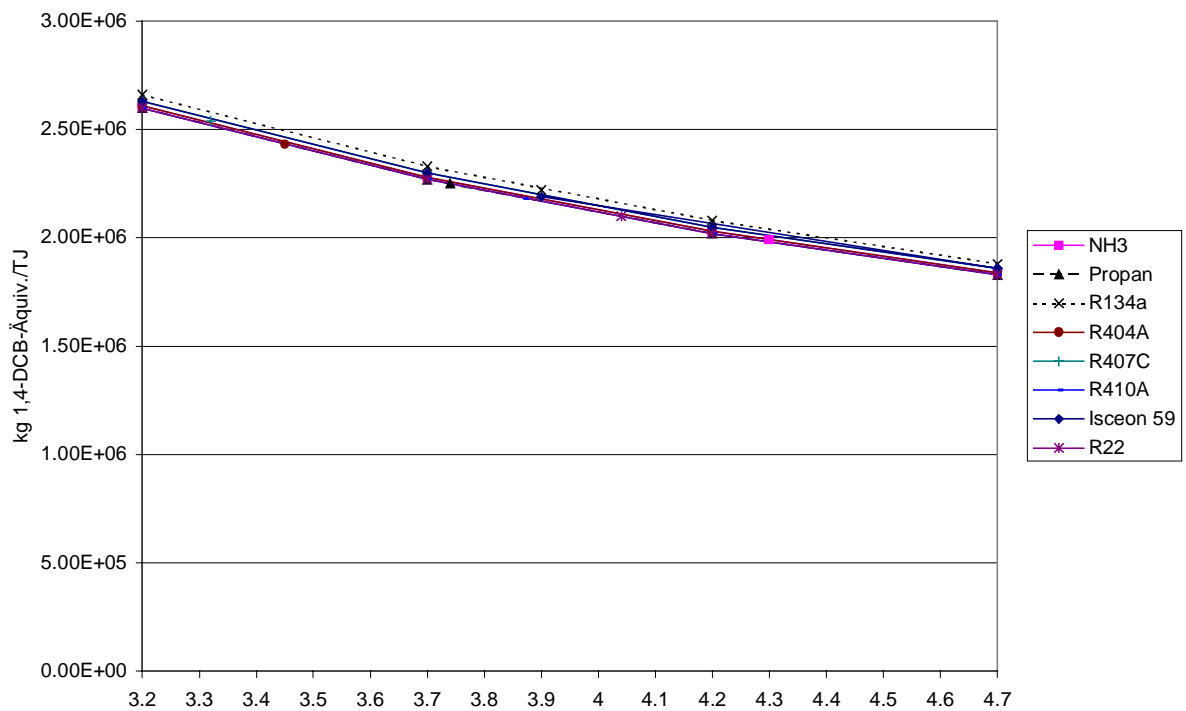


Fig. 5.55: Vergleich des aquatischen Ökotoxizitätspotenzials von Kaltwassersätzen (6/12°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.2 bis 4.7) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

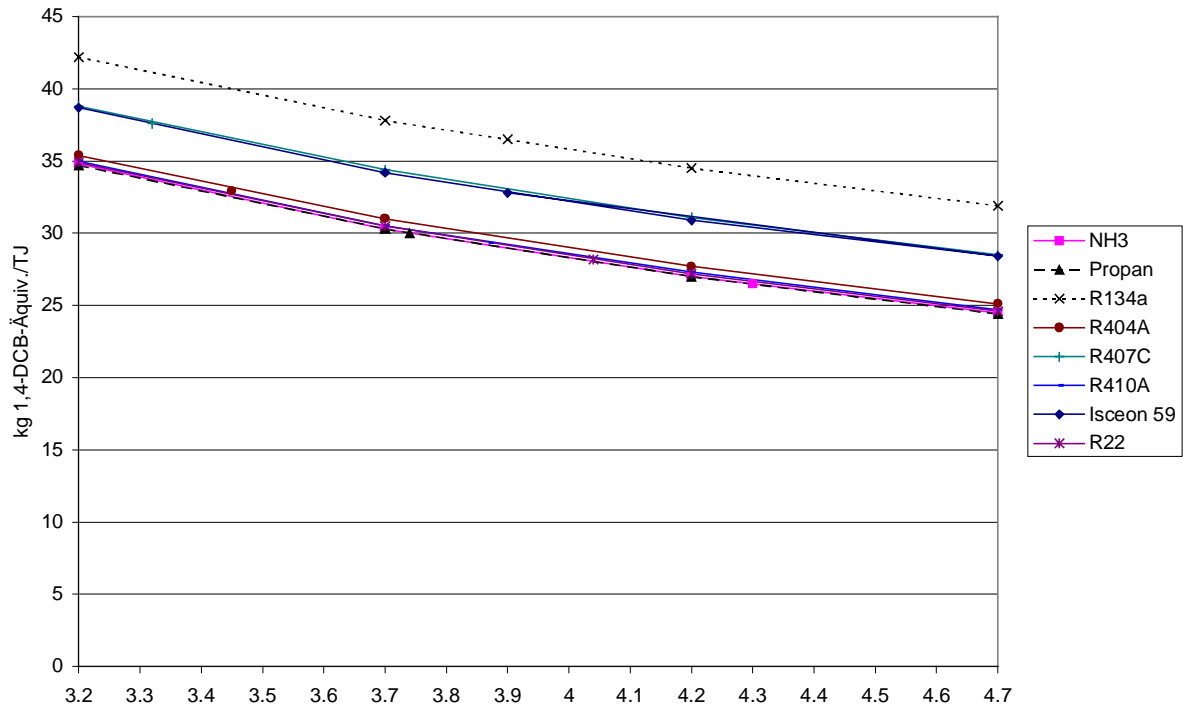


Fig. 5.56: Vergleich des terrestrischen Ökotoxizitätspotenzials von Kaltwassersätzen (6/12°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.2 bis 4.7) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

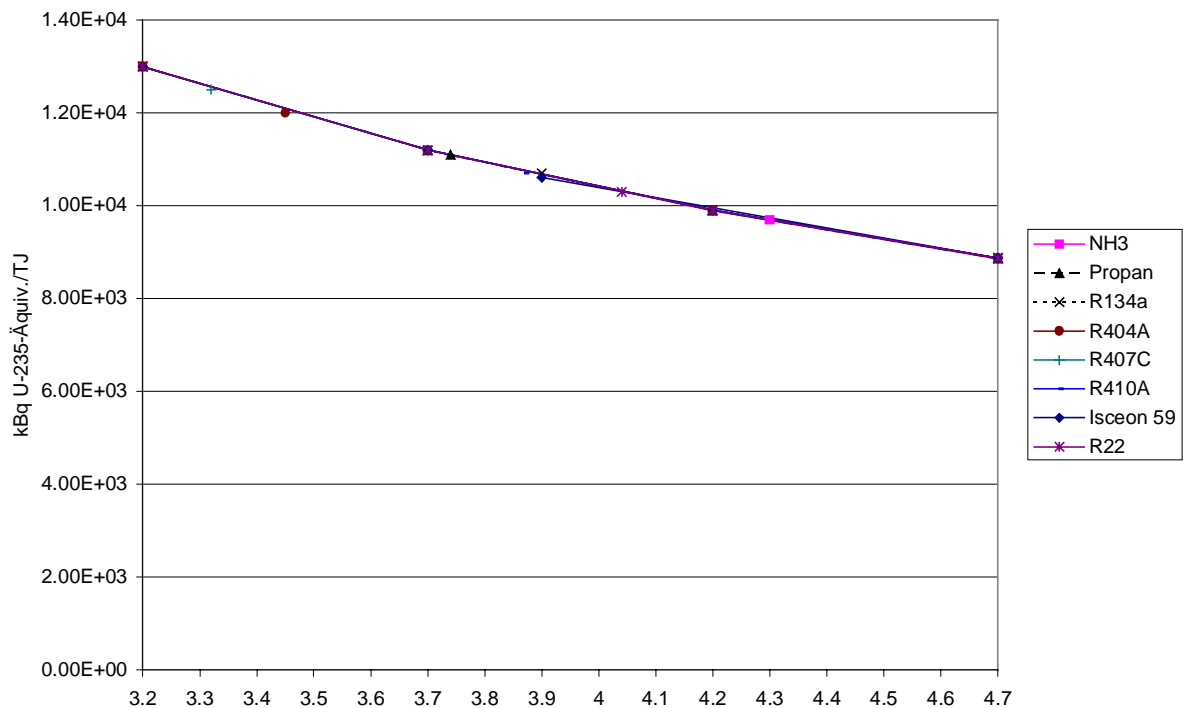


Fig. 5.57: Vergleich der Emission radioaktiver Isotope von Kaltwassersätzen (6/12°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 3.2 bis 4.7) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.



### 5.6.4 Solesätze

Durch die bedeutend höheren Laufzeiten (8'000 Stunden pro Jahr) und die deutlich tieferen Jahresarbeitszahlen (zwischen 1 und knapp 1.5) spielen die Kältemittlemissionen eine deutlich weniger prägnante Rolle (siehe Fig. 5.58 bis 5.65).

Insbesondere die bei den Kaltwassersätzen noch erkennbaren Unterschiede zwischen Propan und den übrigen Kältemitteln bei Versäuerung und Sommersmog sind praktisch vernachlässigbar (siehe Fig. 5.61 und 5.62). Auch die (relativen) Unterschiede in der terrestrischen Ökotoxizität sind gegenüber den Kaltwassersätzen mehr als halbiert und betragen noch rund 7 bis 11% (siehe Fig. 5.64).

Mit Ausnahme der Umweltwirkungen "Treibhauseffekt" und "Ozonschichtabbau", bei welchen die teilhalogenierten Kältemittel immer noch deutlich höhere Werte aufweisen, ist somit die Effizienz der Kälteanlage der die Höhe der meisten Umweltwirkungen bestimmende Parameter.

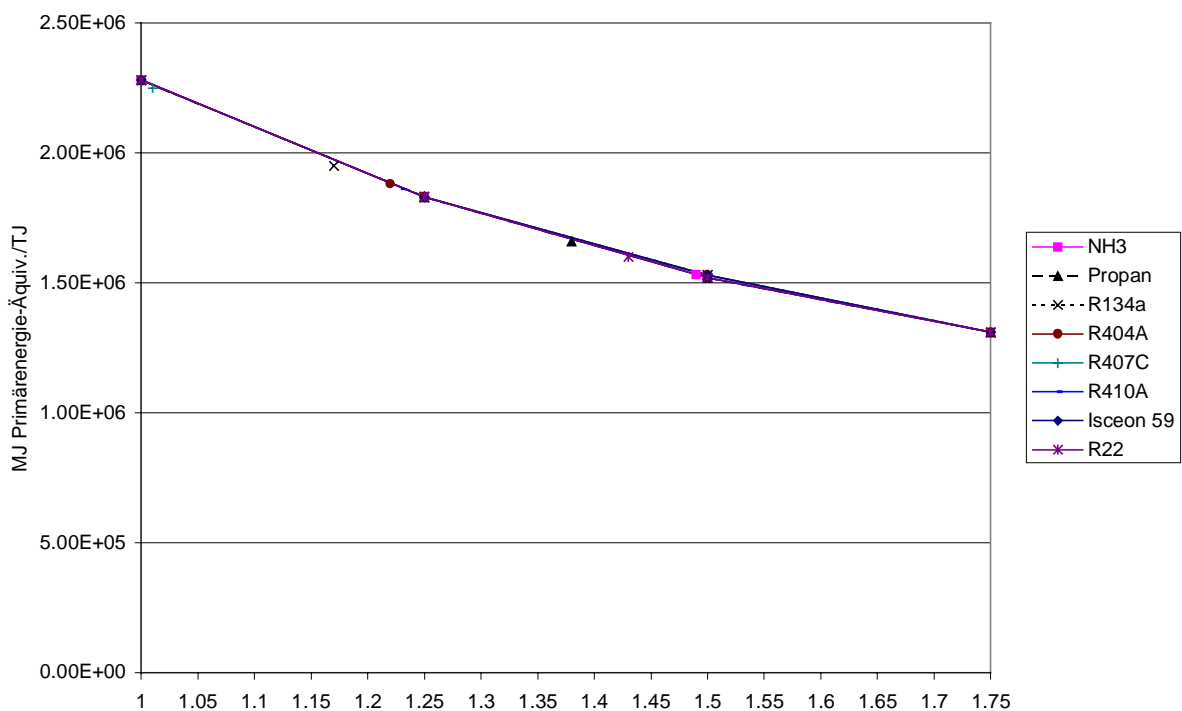


Fig. 5.58: Vergleich des Bedarfs nicht erneuerbarer Primärenergie von Solesätzen (-25/-30°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 1.0 bis 1.75) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

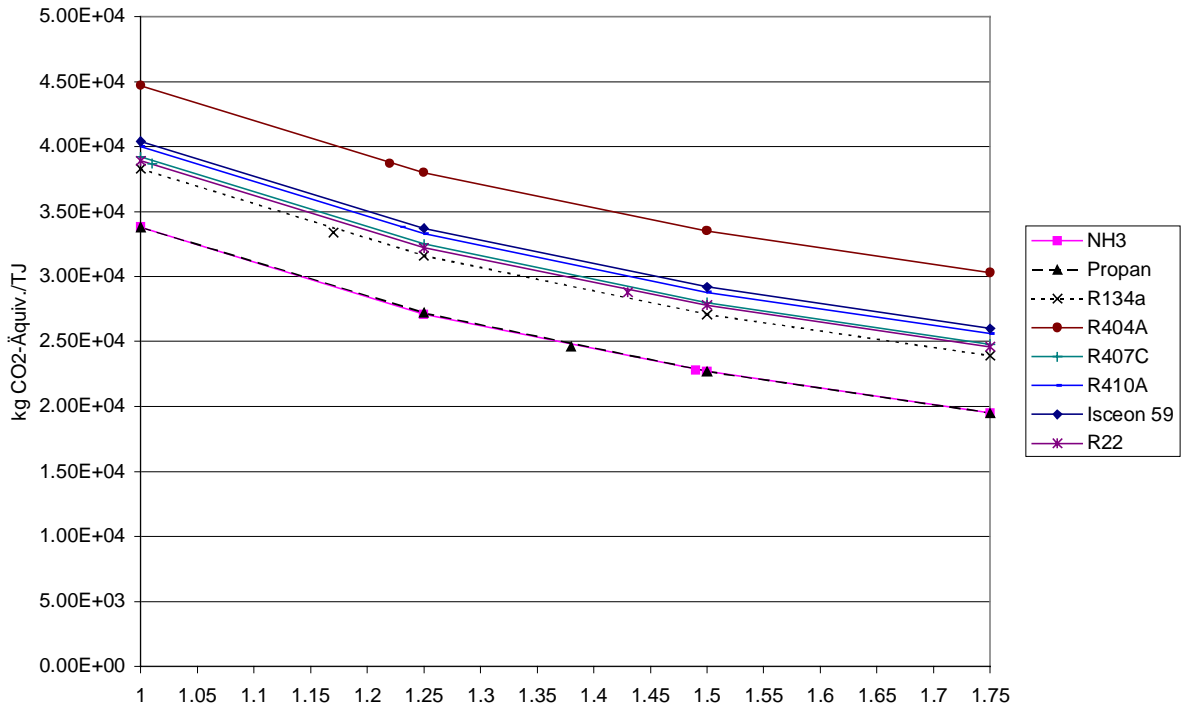


Fig. 5.59: Vergleich des Treibhauspotenzials von Solesätzen (-25/-30°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 1.0 bis 1.75) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

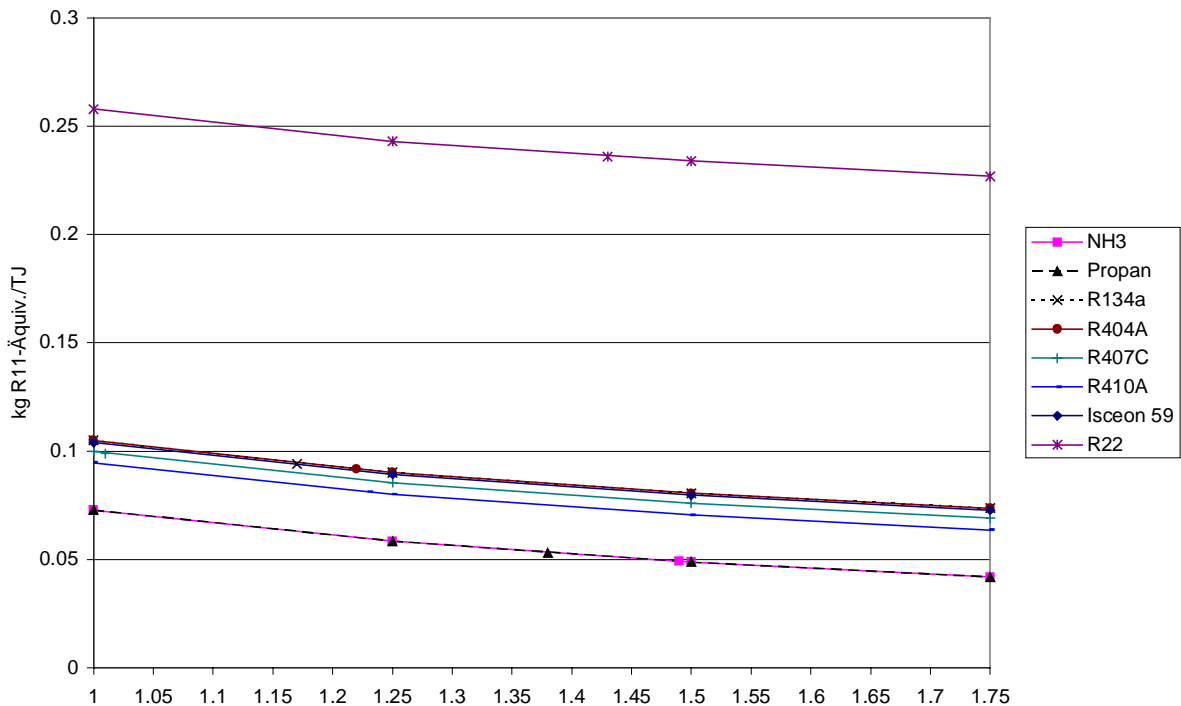


Fig. 5.60: Vergleich des Ozonschichtabbaupotenzials von Solesätzen (-25/-30°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 1.0 bis 1.75) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

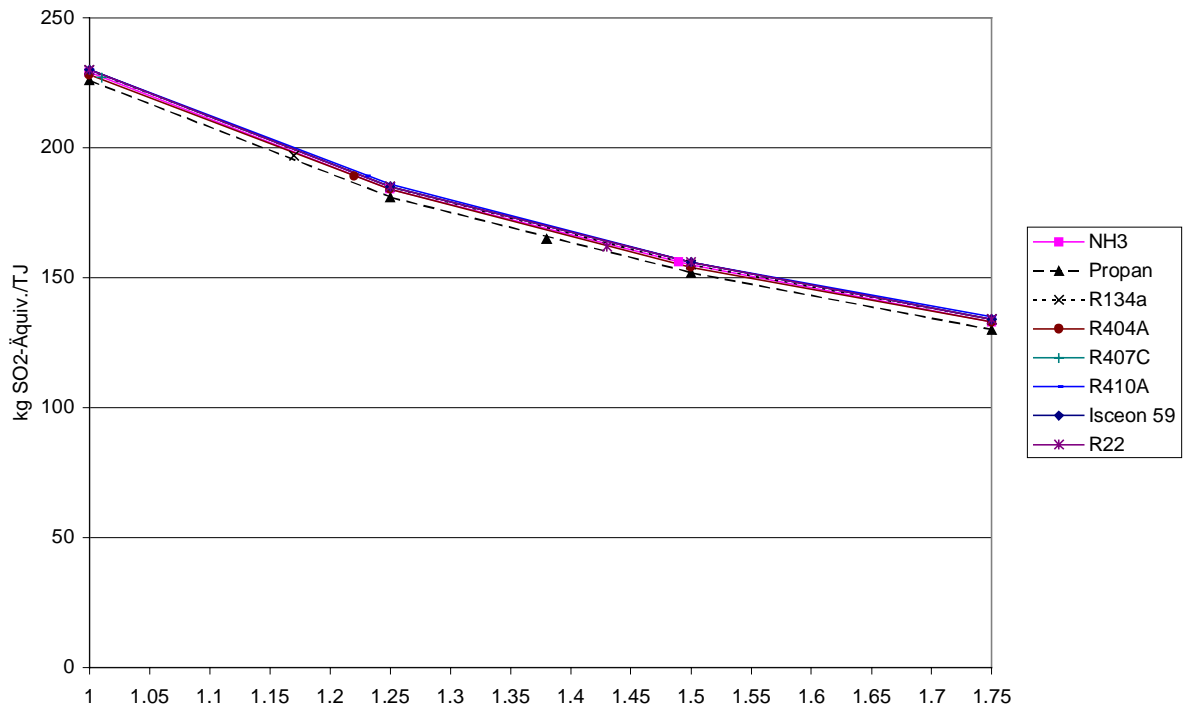


Fig. 5.61: Vergleich des Versäuerungspotenzials von Solesätzen (-25/-30°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 1.0 bis 1.75) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

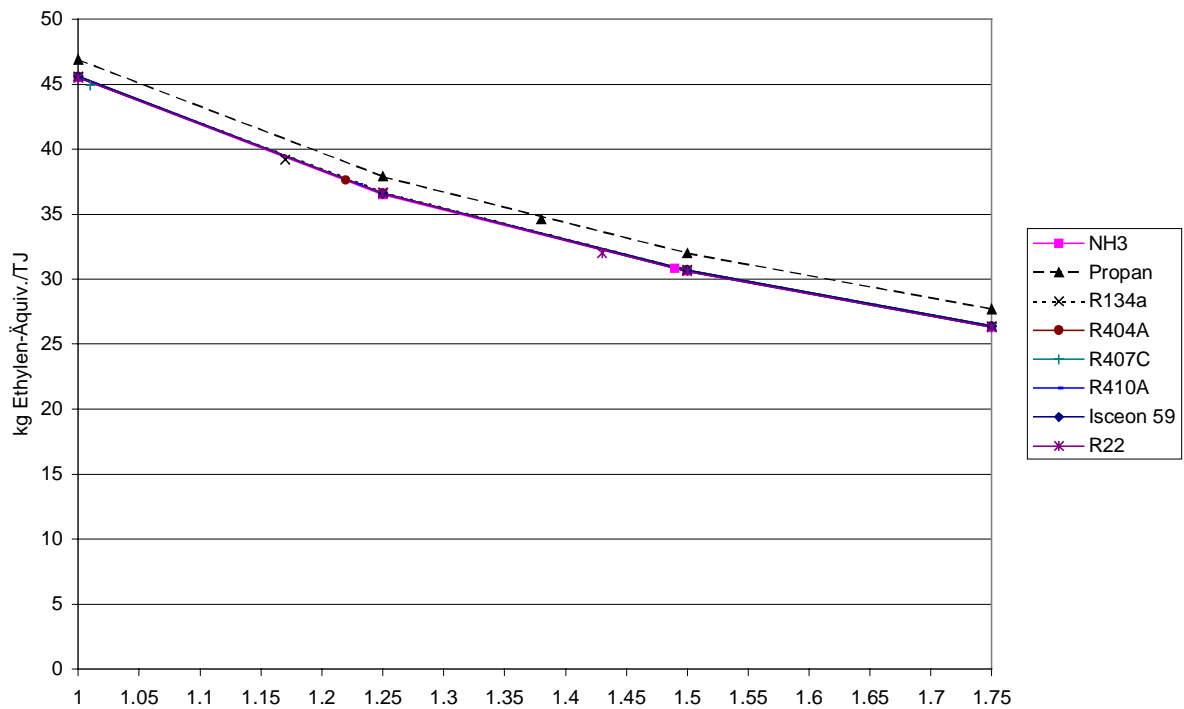


Fig. 5.62: Vergleich des Sommersmog bildenden Potenzials von Solesätzen (-25/-30°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 1.0 bis 1.75) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

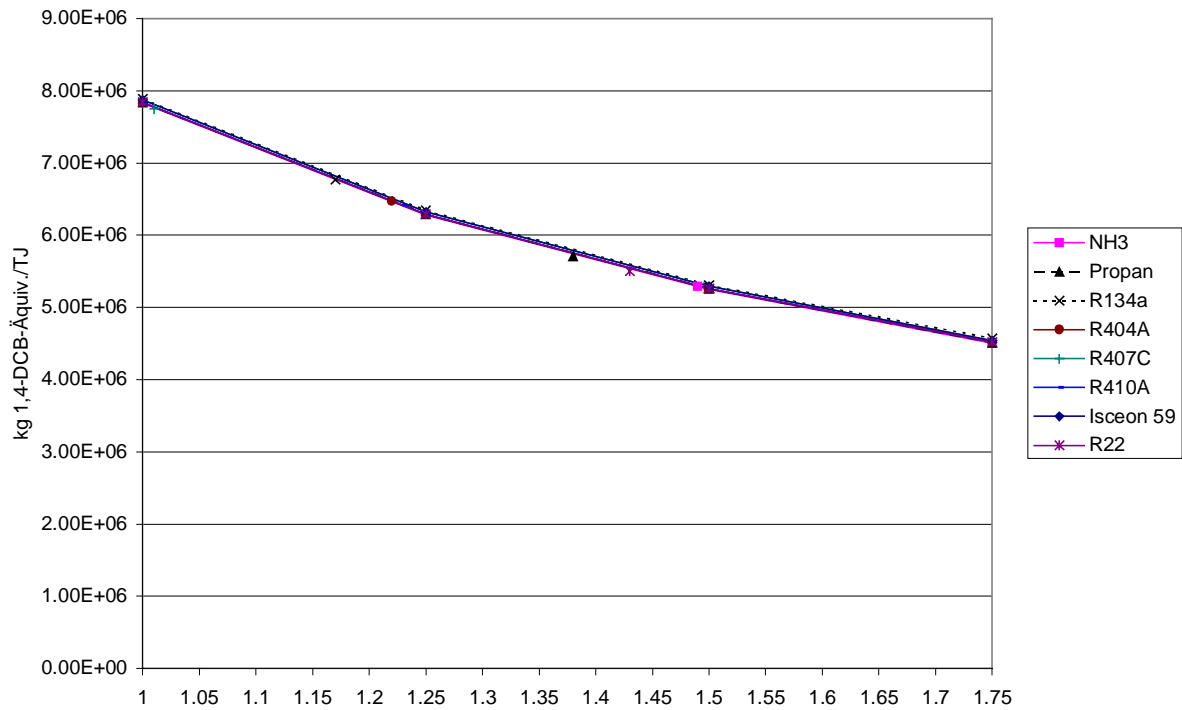


Fig. 5.63: Vergleich des aquatischen Ökotoxizitätspotenzials von Solesätzen (-25/-30°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 1.0 bis 1.75) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

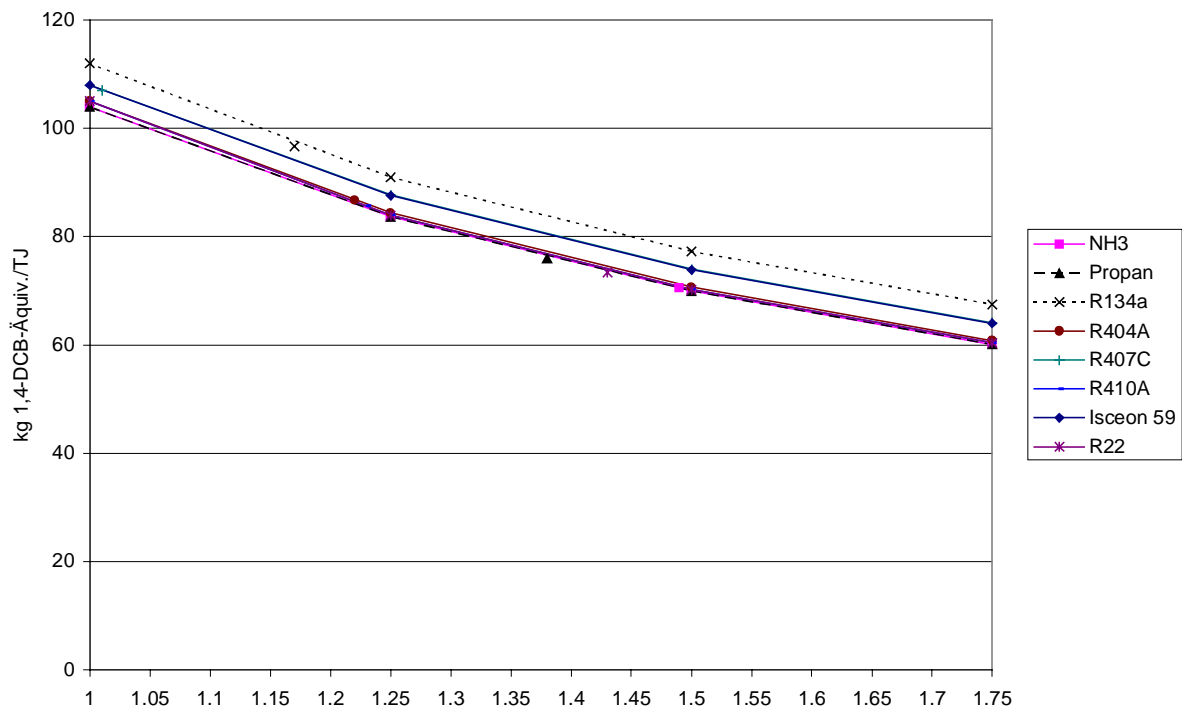


Fig. 5.64: Vergleich des terrestrischen Ökotoxizitätspotenzials von Solesätzen (-25/-30°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 1.0 bis 1.75) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

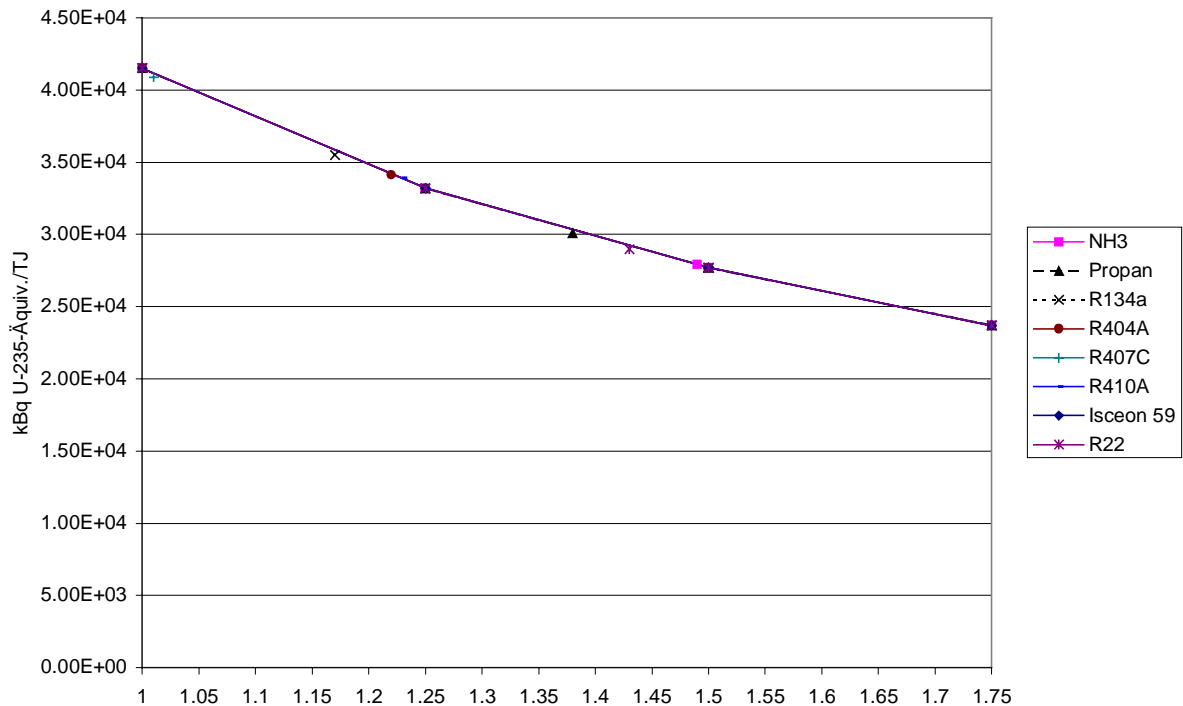


Fig. 5.65: Vergleich der Emission radioaktiver Isotope von Solesätzen (-25/-30°C) mit verschiedenen Kältemitteln in Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (von 1.0 bis 1.75) auf der Basis von 1TJ dem Verteilnetz entzogener Energie.

### 5.6.5 Supermarkt-Kälteanlagen

Bei den Supermarkt-Kälteanlagen wird direkt die Abhängigkeit der Umweltwirkungen vom Betriebsenergiebedarf aufgezeigt (und nicht in Abhängigkeit einer i.d.R. nicht bekannten Jahresarbeitszahl). Dementsprechend unterscheidet sich der Verlauf der Kurven von denjenigen der anderen Systeme (hier nach rechts steigend, siehe Fig. 5.66 bis 5.73).

Bei gleichem Jahresstrombedarf pro korrigiertem Laufmeter Kühlmöbel weisen die sechs betrachteten Anlagen-Kozeptre bei den Umweltwirkungen "Nicht erneuerbare Primärenergie", "Sommersmog", "aquatische Ökotoxizität" und "Emission radioaktiver Isotope" praktisch identische Werte auf (siehe Fig. 5.66, Fig. 5.70, Fig. 5.71 und Fig. 5.73).

Beim Versäuerungspotenzial sind die Unterschiede innerhalb der Systeme gering (siehe Fig. 5.69). Der Unterschied zwischen der Anlage mit dem höchsten Wert (HCFC-22 DX/DX) zu demjenigen mit dem geringsten (HFC-404A KTS/DX) kann durch einen um rund 700kWh tieferen Strombedarf pro Laufmeter Kühlmöbel und Jahr kompensiert werden<sup>23</sup>.

Das durch die Emission von HFC-134a verursachte erhöhte terrestrische Ökotoxizitätspotenzial kann gegenüber den reinen Ammoniak-, HFC-404A- und HCFC-22-Anlagen mit einem um ca. 500kWh reduzierten Jahresstrombedarf pro Laufmeter Kühlmöbel auf das Niveau der anderen Systeme gesenkt werden (siehe Fig. 5.72).

Die Ammoniak-Anlage weist das geringste Treibhauspotenzial auf. Aber auch innerhalb der Anlagen mit halogenierten Kältemitteln sind deutliche Unterschiede erkennbar (mind. 33 bis 45% Unterschied im Vergleich zur besten Anlage mit teilhalogenierten Kältemitteln, siehe Fig. 5.67). Die Abhängigkeit vom Strombedarf ist bei dem hier zugrunde gelegten Strommix

<sup>23</sup> Zum Vergleich: Der jährliche Strombedarf liegt zwischen 4'000 und 7'000kWh pro Laufmeter.

(Schweiz plus 65% des importierten Stroms) eher gering, weshalb hier teilweise grosse energetische Einsparungen realisiert werden müssten, um das erhöhte Treibhauspotenzial des (emittierten) Kältemittels kompensieren zu können.

Beim ozonschichtabbauenden Potenzial schliesslich zeigt sich die erhöhte Füllmenge des einzigen hier betrachteten Systems mit Direktverdampfung bei der Normalkühlung (siehe Fig. 5.68). Mit einem Sekundärkreislauf kann diese Umweltwirkung auch unter Inkaufnahme eines erhöhten Strombedarfs halbiert werden. Bei einem Wechsel von HCFC-22 auf reine HFC-Systeme (HFC-134a und/oder HFC-404A) kann eine Reduktion des ozonschichtabbauenden Potenzials um rund 75% erreicht werden. Wird statt teilhalogenierten Kältemitteln Ammoniak eingesetzt, so lässt sich das ozonschichtabbauende Potenzial nochmals um über 70% reduzieren.

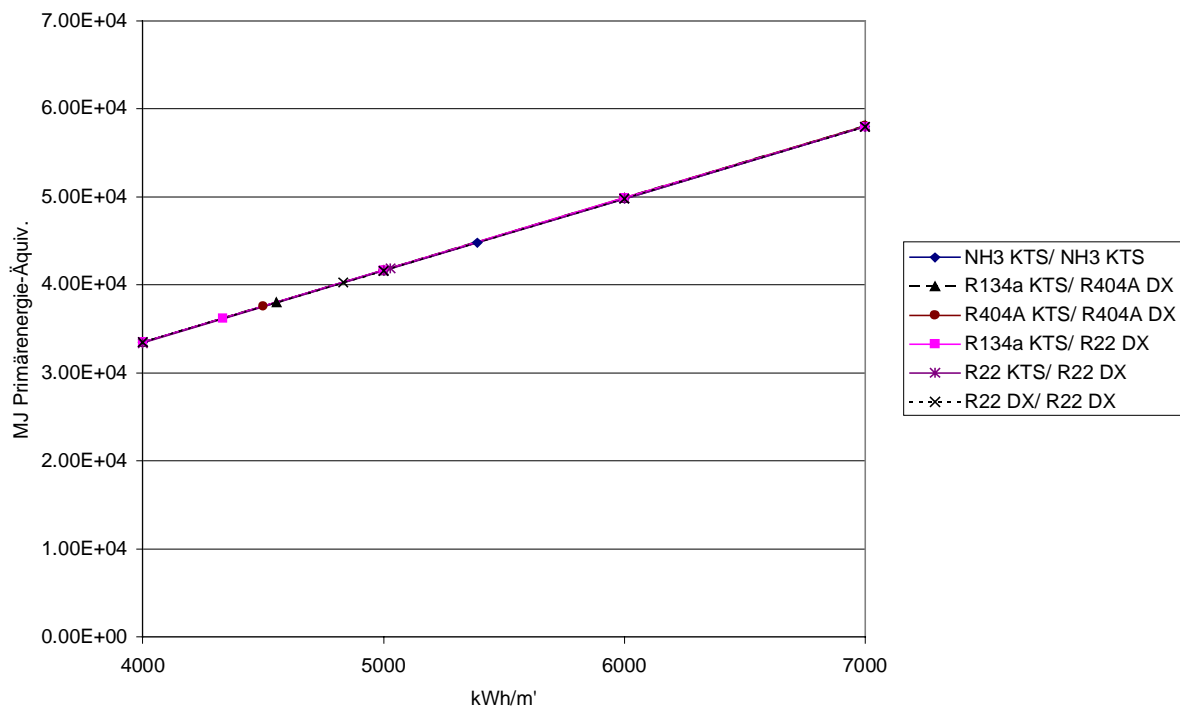


Fig. 5.66: Vergleich des Bedarfs nicht erneuerbarer Primärenergie verschiedener Supermarkt-Kälteanlagen-Konzepte in Abhängigkeit des Jahresenergiebedarfs pro Laufmeter Kühlmöbel. Kälteleistung: 82.3kW Normalkühlung; 21.3kW Tiefkühlung. KTS: Kälte-trägersystem; DX: Direktverdampfung.

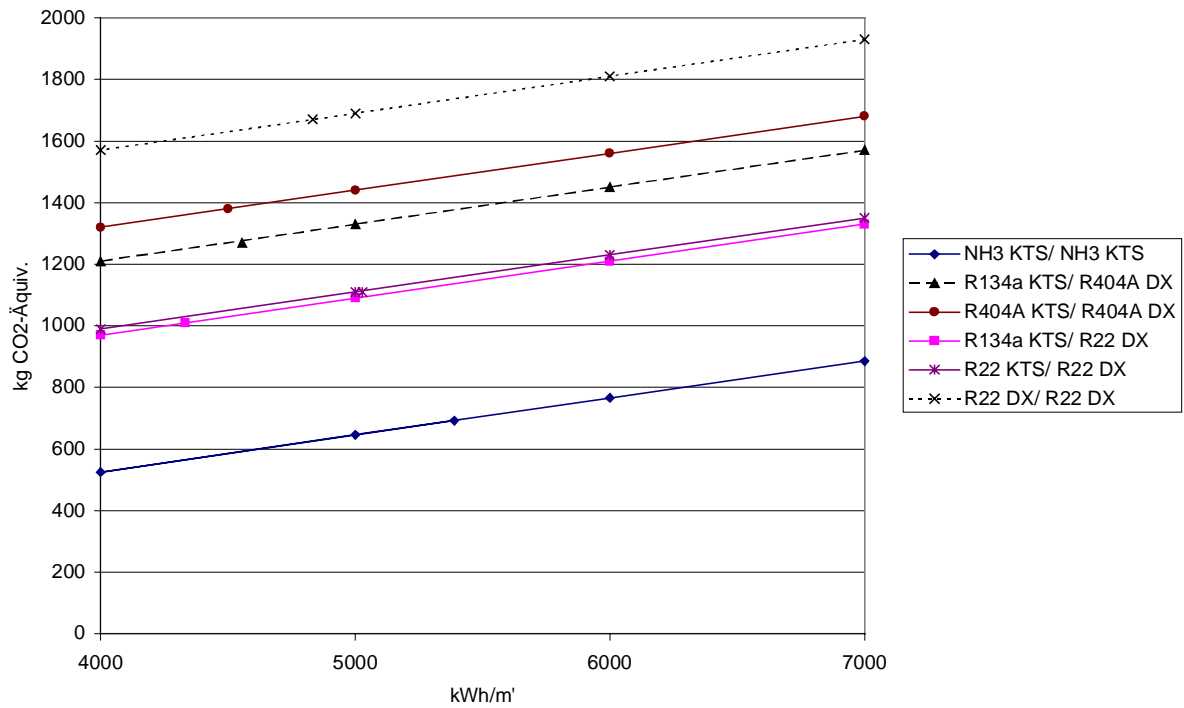


Fig. 5.67: Vergleich des Treibhauspotenzials verschiedener Supermarkt-Kälteanlagen-Konzepte in Abhängigkeit des Jahresenergiebedarfs pro Laufmeter Kühlmöbel. Kälteleistung: 82.3kW Normalkühlung; 21.3kW Tiefkühlung. KTS: Kälteträgersystem; DX: Direktverdampfung.

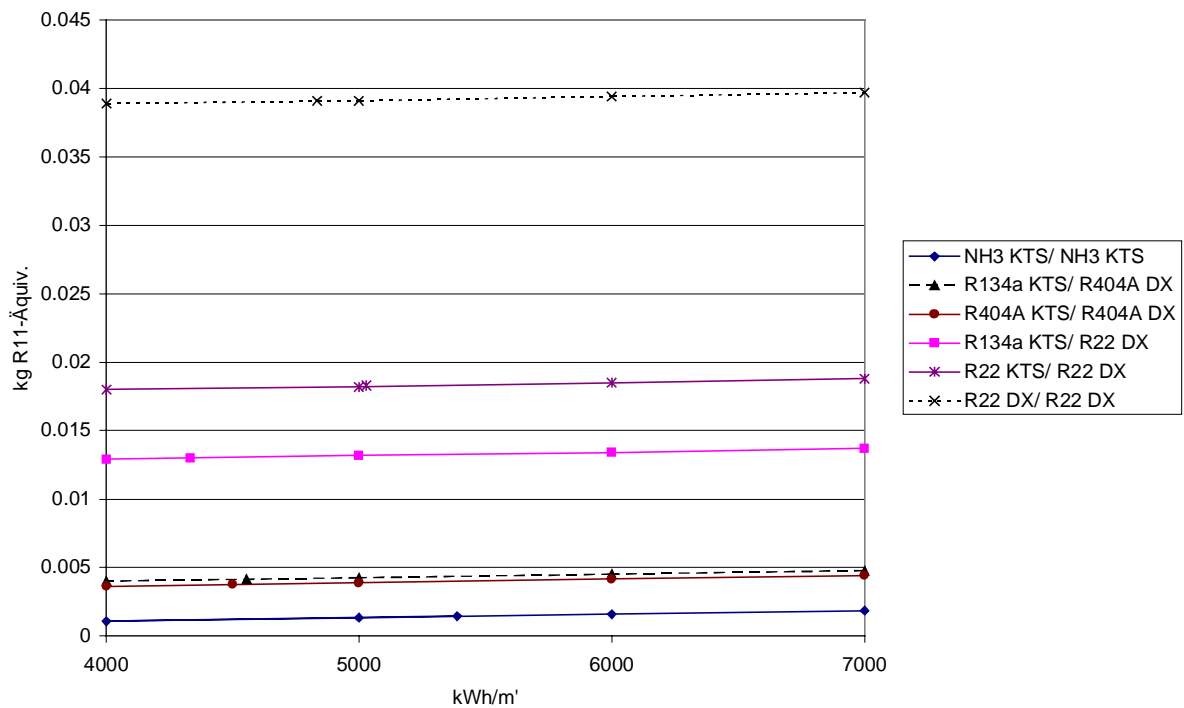


Fig. 5.68: Vergleich des ozonschichtabbauenden Potenzials verschiedener Supermarkt-Kälteanlagen-Konzepte in Abhängigkeit des Jahresenergiebedarfs pro Laufmeter Kühlmöbel. Kälteleistung: 82.3kW Normalkühlung; 21.3kW Tiefkühlung. KTS: Kälteträgersystem; DX: Direktverdampfung.

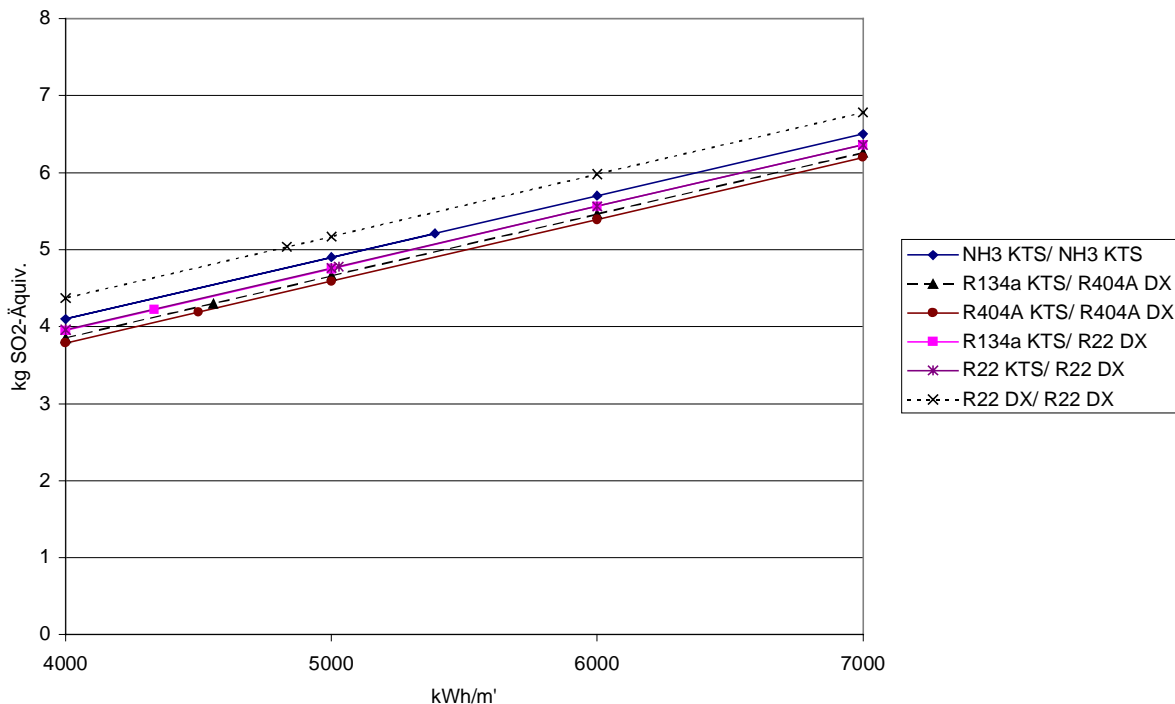


Fig. 5.69: Vergleich des Versäuerungspotenzials verschiedener Supermarkt-Kälteanlagen-Konzepte in Abhängigkeit des Jahresenergiebedarfs pro Laufmeter Kühlmöbel. Kälteleistung: 82.3kW Normalkühlung; 21.3kW Tiefkühlung. KTS: Kälteträgersystem; DX: Direktverdampfung.

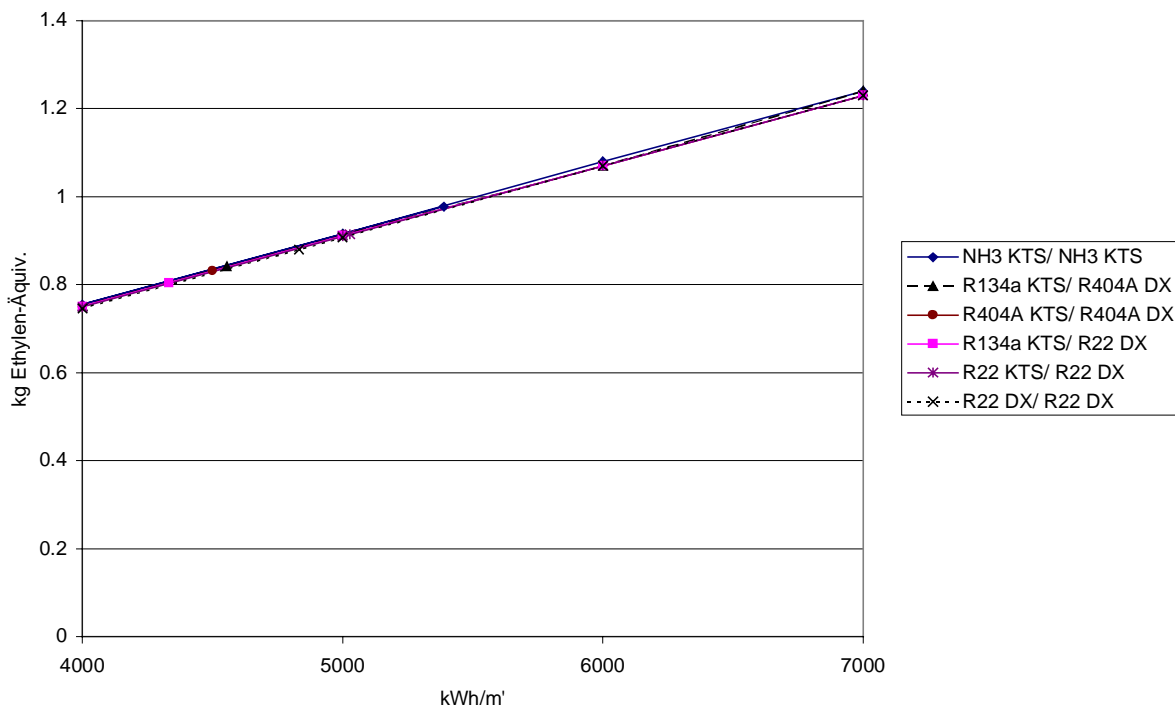


Fig. 5.70: Vergleich des sommersmogbildenden Potenzials verschiedener Supermarkt-Kälteanlagen-Konzepte in Abhängigkeit des Jahresenergiebedarfs pro Laufmeter Kühlmöbel. Kälteleistung: 82.3kW Normalkühlung; 21.3kW Tiefkühlung. KTS: Kälteträgersystem; DX: Direktverdampfung.



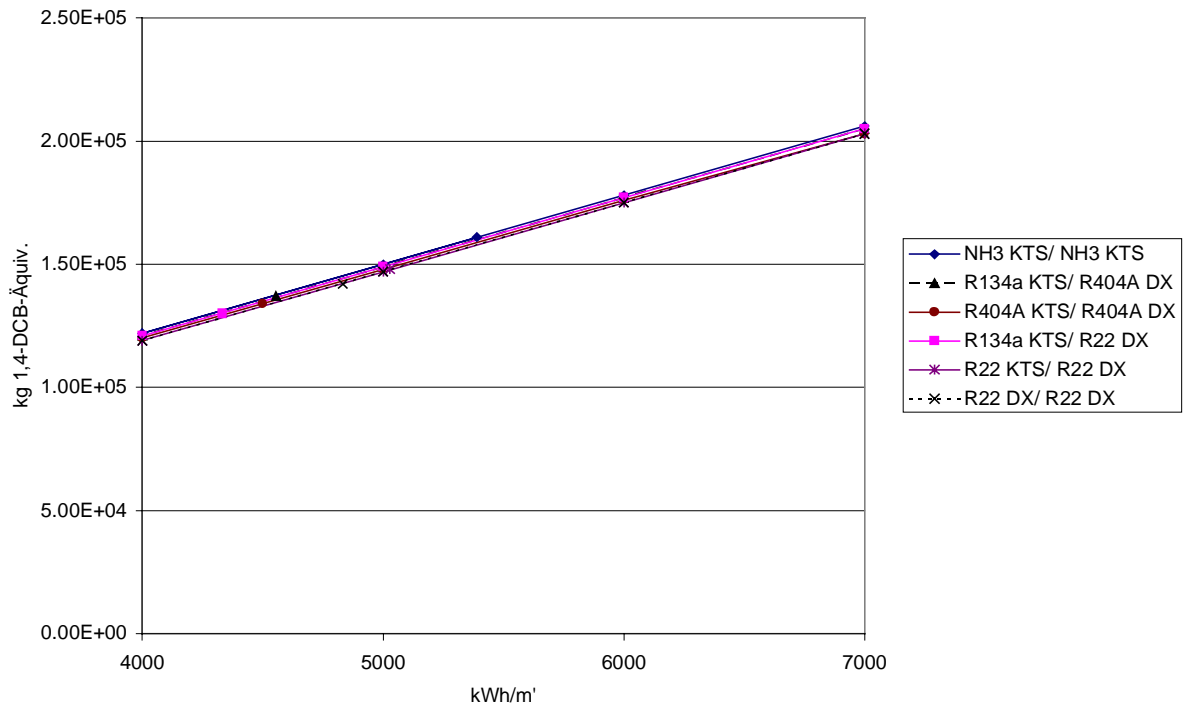


Fig. 5.71: Vergleich des Potenzials aquatischer Ökotoxizität verschiedener Supermarkt-Kälteanlagen-Konzepte in Abhängigkeit des Jahresenergiebedarfs pro Laufmeter Kühlmöbel. Kälteleistung: 82.3kW Normalkühlung; 21.3kW Tiefkühlung. KTS: Kälteträgersystem; DX: Direktverdampfung.

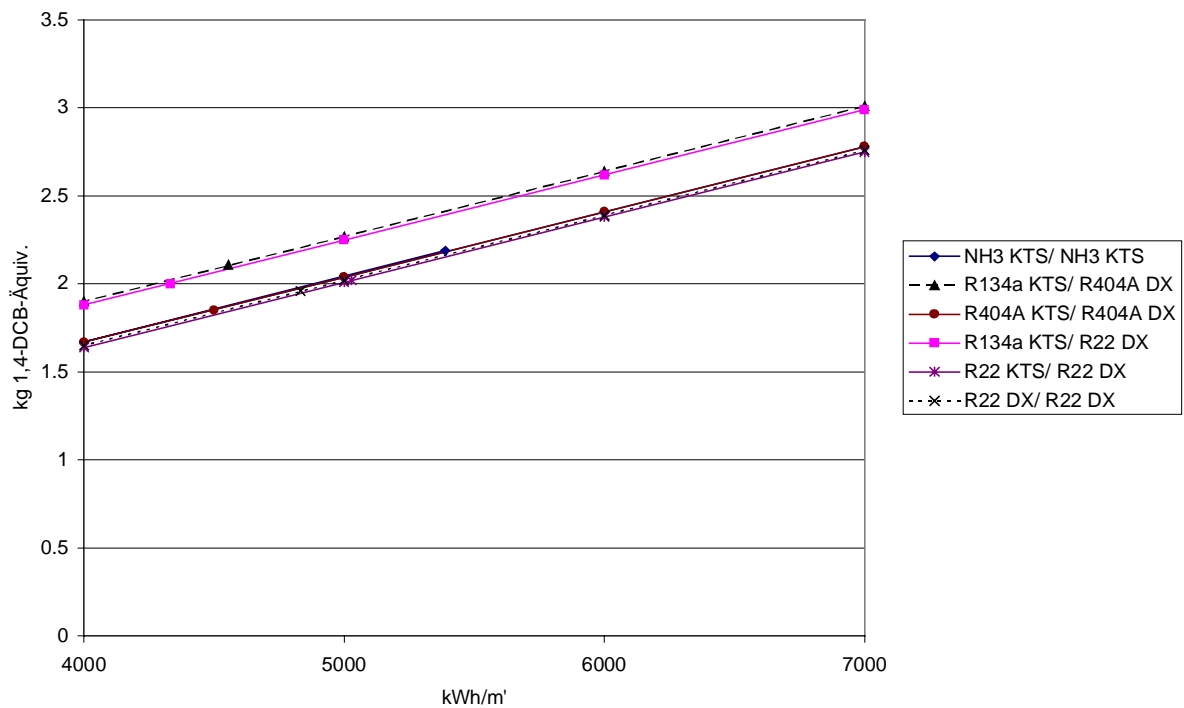


Fig. 5.72: Vergleich des Potenzials terrestrischer Ökotoxizität verschiedener Supermarkt-Kälteanlagen-Konzepte in Abhängigkeit des Jahresenergiebedarfs pro Laufmeter Kühlmöbel. Kälteleistung: 82.3kW Normalkühlung; 21.3kW Tiefkühlung. KTS: Kälteträgersystem; DX: Direktverdampfung.

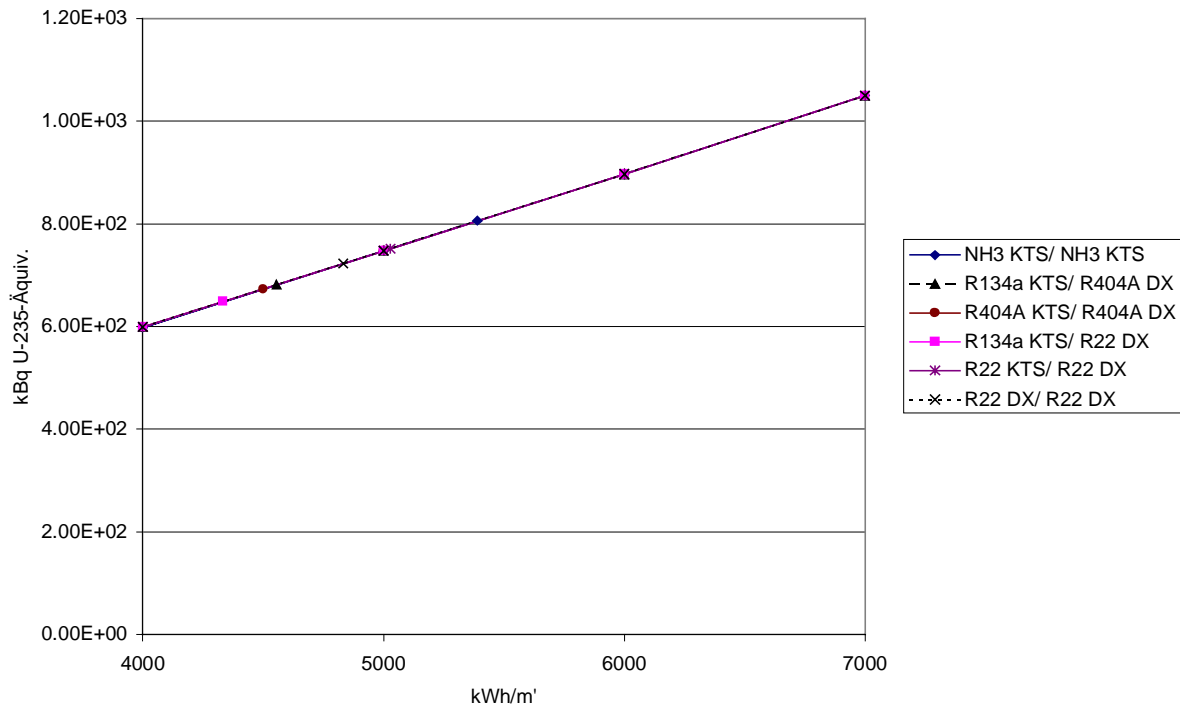


Fig. 5.73: Vergleich der Emission radioaktiver Isotope verschiedener Supermarkt-Kälteanlagen-Konzepte in Abhängigkeit des Jahresenergiebedarfs pro Laufmeter Kühlmöbel. Kälteleistung: 82.3kW Normalkühlung; 21.3kW Tiefkühlung. KTS: Kälteträgersystem; DX: Direktverdampfung.

## 5.7 Systemübergreifende Beurteilung

Bei allen vier hier betrachteten Anwendungsfällen hat sich die Energieeffizienz als ein zentraler, die Umweltwirkungen "Nicht erneuerbare Primärenergie", "Emission radioaktiver Isotope", "Aquatische Ökotoxizität" ausschliesslich und die Umweltwirkungen "Versäuerung" und "Sommersmog" massgeblich beeinflussender Parameter erwiesen.

Beim Treibhauseffekt sind - bei vergleichbaren Betriebsenergie-Verbrauchswerten - die Treibhauspotenziale der Kältemittel gemäss IPCC resultatbestimmend. Die durch die Kältemittelherstellung zusätzlich emittierten Treibhausgase sind nicht ergebnisrelevant. Dies im Gegensatz zum ozonschichtabbauenden Potenzial, bei welchem die Fluorkohlenwasserstoffe (mit einem direkten ODP von 0) infolge der CFC- und HCFC-Emissionen bei deren Herstellung<sup>24</sup> ein deutlich höheres ozonschichtabbauendes Potenzial aufweisen als die hier untersuchten natürlichen Kältemittel Ammoniak, Kohlendioxid und Propan.

Da in der Produktion dieser Kältemittel sehr grosse Unterschiede bestehen, kann das ozonschichtabbauende Potenzial bei Produktion mit nachgeschalteter Verbrennung von allfälligen CFC- und HCFC-Verbindungen auf das Niveau der natürlichen Kältemittel sinken. Es kann aber auch durchaus noch um einiges höher liegen, da bei den vorliegenden Daten mit einem Durchschnitt aller AFEAS-Produktionsanlagen gerechnet wurde.

Das persistente und herbizid wirkende Abbauprodukt von HFC-134a, HCFC-123 und HCFC-124, Trifluoressigsäure, bewirkt bei den entsprechenden Anlagen ein um einige Prozente höheres terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial. Bei Anlagen mit hoher Laufzeit und niederen Jah-

<sup>24</sup> Siehe dazu Abschnitt 4.6.1.

resarbeitszahlen (z.B. Tieftemperaturanwendungen in der Industrie) reduziert sich dieser relative Unterschied durch die deutlichere Dominanz der Strombereitstellung.

Beim Versäuerungspotenzial wie auch beim sommersmogbildenden Potenzial sind die Kältemittlemissionen verglichen mit den Emissionen aus der Betriebsstrombereitstellung und/oder der Anlagenherstellung nur wenig spürbar.

Aus diesen allgemeinen Erkenntnissen können die folgenden vereinfachenden Überlegungen für eine umweltbezogene Auswahl einer Kälteanlage abgeleitet werden.

## 5.8 Vereinfachte umweltbezogene Auswahl einer Kälteanlage

Die Ergebnisse der Ökobilanzierung der kältetechnischen Systeme haben gezeigt, dass Kältemittlemissionen und die Energieeffizienz die beiden Schlüsselgrößen darstellen. Die Herstellung von Komponenten und die Montage der Anlagen haben sich als entweder nicht relevant oder nicht kältemittelspezifisch erwiesen und können in einer vereinfachenden Betrachtung ausser acht gelassen werden.

Aus diesem Grund konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf die beiden Aspekte "Umweltbelastung durch die Strombereitstellung" und "Umweltbelastung durch Herstellung und Emission von Kältemitteln". Wie wir gesehen haben, können wir durch die Wahl eines natürlichen anstelle eines teilhalogenierten Kältemittels bei den Umweltwirkungskategorien "Treibhauseffekt", "Ozonschichtabbau" und "Terrestrische Ökotoxizität" eine gewisse Einbuße der Energieeffizienz akzeptieren, ohne die Gesamtbelastung bezüglich dieser Umweltwirkung zu erhöhen. Werden die anderen Umweltwirkungen, nämlich "Nicht erneuerbare Primärenergie", "Versäuerungspotenzial", "Sommersmogbildendes Potenzial", "aquatische Ökotoxizität" oder "Emission radioaktiver Isotope" als deutlich relevanter betrachtet, so kann sich die umweltliche Präferenz vereinfachend auf die Energieeffizienz der Anlagen abstützen.

Die folgenden Tabellen (Tab. 5.13 bis Tab. 5.15) zeigen die maximal tolerierbaren Kältemittel-Emissionen der entsprechenden teilhalogenierten Kältemittel, wenn anstelle von Ammoniak, Propan resp. Kohlendioxid ein teilhalogeniertes Kältemittel eingesetzt wird und damit gleichzeitig ein Stromminderbedarf von 1MWh resultieren würde. Bei diesen maximal tolerierbaren Verlustmengen teilhalogenerter Kältemittel weist eine Anlage mit Ammoniak, Propan resp. Kohlendioxid dieselben Umweltwirkungen auf wie eine um 1MWh energieeffizientere Anlage mit einem teilhalogenierten Kältemittel<sup>25</sup>.

Als kritische Größen müssen wie bereits mehrfach erwähnt die Umweltwirkungen "Treibhauspotenzial" und "Ozonschichtabbauendes Potenzial" und, für die Kältemittel HFC-134a, HFC-407C und Isceon 59, die "Terrestrische Ökotoxizität" besonders beachtet werden. Hier betragen die tolerierbaren Emissionen zwischen 0.14 und 0.35kg (Treibhauspotenzial), zwischen 0.002 und 0.021kg (ozonschichtabbauendes Potenzial) und zwischen 0.07 und 0.13kg (terrestrische Ökotoxizität).

Bei den übrigen Wirkkategorien sind die maximal emittierbaren Mengen leicht ("Versäuerungspotenzial") resp. deutlich höher. Dort spielt die Energieeffizienz die hauptsächlich bestimmende Rolle. Bei einzelnen Kategorien sind negative Werte zu verzeichnen ("Versäuerungspotenzial" bei Ammoniak, "Sommersmogbildendes Potenzial" bei Propan). In diesen

<sup>25</sup> Fiktives Lesebeispiel: Es stehen eine Propan- und eine HFC-407C-Wärmepumpe (Jahresarbeitszahl 3.1 resp. 3.5, Kältemittelfüllmenge 1 resp. 2kg) zur Auswahl. Die HFC-407C-Wärmepumpe benötige pro Jahr mit 3.7MWh rund 0.5MWh weniger Strom als die Propan-Wärmepumpe (Annahme: Strommix Schweiz plus Handel). Damit die HFC-407C-Wärmepumpe bezüglich Treibhauspotenzial der Propan-Wärmepumpe mindestens ebenbürtig ist, dürfen die jährlichen Kältemittel-Verlustmengen 36.5g pro Jahr nicht übersteigen (siehe Tab. 5.14). Dies entspricht einer Verlustrate von 1.8% pro Jahr.

Fällen führt die Produktion und Emission von Ammoniak resp. Propan zu höheren Werten gegenüber teilhalogenierten Kältemitteln, was mit einer höheren Energieeffizienz kompensiert werden muss. Aber auch hier ist an den hohen maximalen Emissionswerten erkennbar, dass die Energieeffizienz der bestimmende Faktor ist.

Ammoniak		Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie	Treibhauspotenzial	Ozonschichtabbauendes Potenzial	Versäuerungspotenzial	Sommer-smogbildendes Potenzial	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch	Emission radioaktiver Isotope
<i>Strommix CH</i>									
HFC-134a	kg	38.0	<b>0.088</b>	<b>0.032</b>	-0.97	11.9	<b>1.87</b>	<b>0.16</b>	208
HFC-404A	kg	38.2	<b>0.035</b>	<b>0.032</b>	-0.69	12.3	13.2	1.98	217
HFC-407C	kg	43.0	<b>0.073</b>	<b>0.038</b>	-1.23	13.6	3.31	<b>0.30</b>	211
HFC-410A	kg	69.2	<b>0.063</b>	<b>0.047</b>	-0.34	22.1	25.3	4.43	220
Isceon 59	kg	41.1	<b>0.059</b>	<b>0.033</b>	-1.20	11.9	3.39	<b>0.31</b>	225
HCFC-22	kg	114	<b>0.077</b>	<b>0.004</b>	-1.13	33.0	42.0	6.59	295
<i>GuD-Kraftwerk</i>									
HFC-134a	kg	41.5	<b>0.35</b>	<b>0.014</b>	-0.54	17.2	<b>0.37</b>	<b>0.07</b>	1.34
HFC-404A	kg	41.7	<b>0.14</b>	<b>0.014</b>	-0.39	17.8	2.57	0.82	1.40
HFC-407C	kg	47.0	<b>0.29</b>	<b>0.017</b>	-0.69	19.8	0.65	<b>0.13</b>	1.36
HFC-410A	kg	75.6	<b>0.25</b>	<b>0.021</b>	-0.19	32.2	4.94	1.84	1.42
Isceon 59	kg	44.9	<b>0.24</b>	<b>0.015</b>	-0.67	17.2	0.66	<b>0.13</b>	1.45
HCFC-22	kg	125	<b>0.31</b>	<b>0.002</b>	-0.63	48.0	8.19	2.73	1.90

Tab. 5.13: Maximale Emissionsmengen teilhalogenerter Kältemittel, bei welchen die Umweltwirkung von 1MWh Strom (bereitgestellt mit dem schweizerischen Kraftwerkspark resp. mit einem modernen Erdgas GuD-Kraftwerk) gerade kompensiert werden, wenn statt *Ammoniak* das entsprechende teilhalogenierte Kältemittel verwendet wird.

Propan		Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie	Treibhauspotenzial	Ozonschichtabbauendes Potenzial	Versäuerungspotenzial	Sommer-smogbildendes Potenzial	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch	Emission radioaktiver Isotope
<i>Strommix CH</i>									
HFC-134a	kg	35.8	<b>0.088</b>	<b>0.032</b>	0.76	-0.93	<b>1.88</b>	<b>0.16</b>	207
HFC-404A	kg	35.9	<b>0.035</b>	<b>0.032</b>	1.11	-0.92	13.4	1.97	217
HFC-407C	kg	40.1	<b>0.073</b>	<b>0.038</b>	0.65	-0.92	3.33	<b>0.30</b>	211
HFC-410A	kg	56.2	<b>0.063</b>	<b>0.047</b>	0.58	-0.44	27.2	4.38	219
Isceon 59	kg	38.4	<b>0.059</b>	<b>0.033</b>	0.66	-0.93	3.41	<b>0.31</b>	225
HCFC-22	kg	96.0	<b>0.077</b>	<b>0.004</b>	0.68	-0.88	44.6	6.54	295
<i>GuD-Kraftwerk</i>									
HFC-134a	kg	39.1	<b>0.35</b>	<b>0.014</b>	0.43	-1.35	<b>0.37</b>	<b>0.07</b>	1.33
HFC-404A	kg	39.2	<b>0.14</b>	<b>0.014</b>	0.62	-1.34	2.62	0.82	1.40
HFC-407C	kg	43.8	<b>0.29</b>	<b>0.017</b>	0.37	-1.33	0.65	<b>0.13</b>	1.36
HFC-410A	kg	61.4	<b>0.25</b>	<b>0.021</b>	0.32	-0.64	5.31	1.82	1.41
Isceon 59	kg	42.0	<b>0.24</b>	<b>0.015</b>	0.37	-1.35	0.66	<b>0.13</b>	1.45
HCFC-22	kg	104.8	<b>0.31</b>	<b>0.002</b>	0.38	-1.28	8.70	2.71	1.90

Tab. 5.14: Maximale Emissionsmengen teilhalogenerter Kältemittel, bei welchen die Umweltwirkung von 1MWh Strom (bereitgestellt mit dem schweizerischen Kraftwerkspark resp. mit einem modernen Erdgas GuD-Kraftwerk) gerade kompensiert werden, wenn statt *Propan* das entsprechende teilhalogenierte Kältemittel verwendet wird.

Kohlendioxid		Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie	Treibhauspotenzial	Ozonschichtabbauendes Potenzial	Versäuerungspotenzial	Sommersmogbildendes Potenzial	Ökotoxizitätspotenzial aquatisch	Ökotoxizitätspotenzial terrestrisch	Emission radioaktiver Isotope
<i>Strommix CH</i>									
HFC-134a	kg	31.9	<b>0.088</b>	<b>0.032</b>	0.76	10.1	<b>1.86</b>	<b>0.16</b>	206
HFC-404A	kg	32.0	<b>0.035</b>	<b>0.032</b>	1.10	10.4	12.4	1.95	215
HFC-407C	kg	35.3	<b>0.073</b>	<b>0.038</b>	0.65	11.3	3.26	<b>0.30</b>	209
HFC-410A	kg	40.7	<b>0.063</b>	<b>0.047</b>	0.57	13.3	20.4	4.13	216
Isceon 59	kg	34.0	<b>0.059</b>	<b>0.033</b>	0.66	10.1	3.34	<b>0.31</b>	223
HCFC-22	kg	72.5	<b>0.077</b>	<b>0.004</b>	0.68	22.2	35.0	6.25	291
<i>GuD-Kraftwerk</i>									
HFC-134a	kg	34.8	<b>0.35</b>	<b>0.014</b>	0.43	14.7	<b>0.36</b>	<b>0.07</b>	1.32
HFC-404A	kg	35.0	<b>0.14</b>	<b>0.014</b>	0.62	15.1	2.42	0.81	1.38
HFC-407C	kg	38.6	<b>0.29</b>	<b>0.017</b>	0.37	16.5	0.64	<b>0.13</b>	1.34
HFC-410A	kg	44.5	<b>0.25</b>	<b>0.021</b>	0.32	19.4	3.98	1.71	1.39
Isceon 59	kg	37.2	<b>0.24</b>	<b>0.015</b>	0.37	14.7	0.65	<b>0.13</b>	1.43
HCFC-22	kg	79.1	<b>0.31</b>	<b>0.002</b>	0.38	32.2	6.83	2.59	1.87

Tab. 5.15: Maximale Emissionsmengen teilhalogenerter Kältemittel, bei welchen die Umweltwirkung von 1MWh Strom (bereitgestellt mit dem schweizerischen Kraftwerkspark resp. mit einem modernen Erdgas GuD-Kraftwerk) gerade kompensiert werden, wenn statt *Kohlendioxid* das entsprechende teilhalogenierte Kältemittel verwendet wird.

Grundsätzlich ist in Fällen unterschiedlicher Jahresarbeitszahlen ein Abwägen zwischen verschiedenen Umwelteffekten notwendig. Ein höherer Energiebedarf bei Systemen mit *natürlichen* Kältemitteln führt zu höheren Umweltwirkungen bezüglich *Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergie*, *Versäuerungspotenzial*, *sommersmogbildendem Potenzial*, *aquatischer Ökotoxizität* und bezüglich der *Emission radioaktiver Isotope* (und den damit verbundenen Krebserkrankungen und Erbgutschädigungen). Diesen stehen tiefere Umweltwirkungen bezüglich *Treibhauspotenzial*, *ozonschichtabbauendem Potenzial* und *terrestrischer Ökotoxizität* gegenüber.

Weisen Anlagen mit *teilhalogenierten* Kältemitteln höhere Energiebedarfe auf, so muss insbesondere das *sommersmogbildende Potenzial* (bei Propan-Anlagen als Alternative) und allenfalls das *Versäuerungspotenzial* (bei Ammoniak-Anlagen als Alternativen zu Anlagen mit HFC-404A) gegen die anderen Umweltwirkungen aufgewogen werden.

## 5.9 Datenqualität

Die hier gezeigten Ergebnisse beruhen auf Sachbilanzen, die nur teilweise auf Firmen- und andere Primärdaten basieren. Insbesondere in den Bereichen Kältemittelherstellung waren Annahmen notwendig, die nicht immer auf ihren Realitätsgehalt überprüft werden konnten. Die oftmals gemachten konservativen Schätzungen betreffend Prozessemissionen und Allokationsschlüssel beeinflussen die Gesamtergebnisse jedoch nur in sehr beschränktem Masse. Eine Ausnahme bildet die Annahme betreffend ozonschichtabbauender Stoffe während der Produktion von HFC-134a. Diese Annahme bestimmt die Höhe der Ergebnisse beim ozonschichtabbauenden Potenzial für den Fall der Produktion ohne Nachverbrennung. Sie wurde aber von einem Vertreter eines europäischen Herstellers als plausibel eingestuft.

Es zeigt sich zudem, dass vorgelagerte Prozesse der Energie- und Strombereitstellung eine teilweise dominante oder zumindest wichtige Rolle spielen. Auch bei der Erhebung der Daten für die Ökoinventare von Energiesystemen und Entsorgungsprozessen war man aber teilweise auf qualifizierte Schätzungen und Annahmen angewiesen.

Die Daten zu den Herstelleraufwänden der Wärmepumpen basieren auf teilweise detaillierten Bilanzen von Lieferanten und Herstellern, die zusätzlich noch mit Informationen anderer Hersteller und mit Literaturdaten verglichen werden konnten. Bei den Kaltwassersätzen wurden Prospekt- und rudimentäre Firmenangaben verwertet. Die Materialbilanz der Supermarkt-Kälteanlagen beruhen auf der Analyse der Stücklisten und Lieferscheine von drei unterschiedlichen Anlagekonzepten neuerer Bauart (darunter eine Ammoniakanlage). Bei Kältemittelfüllmengen und Energiebedarf konnte auf die Informationen von rund 30 Anlagen zurückgegriffen werden.

Demgegenüber fehlen verlässliche Statistiken über Kältemittel-Verlusten fast vollständig. Hier mussten ausschliesslich Literaturdaten verwendet werden, die ebenfalls häufig auf Schätzungen beruhen. Eine vom Forschungsrat Kältetechnik in Auftrag gegebene Studie zum Thema Kältemittelverluste in Supermarkt-Anlagen weist für 19 untersuchte Anlagen tiefere Werte aus, nämlich 9.3% anstelle der hier für den heutigen Durchschnitt verwendeten 13.5% pro Jahr von HFC- und HCFC-Anlagen (FKT 1999:130).

Der Vergleich von Wärmepumpen mit verschiedenen Kältemitteln sollte nicht überbewertet werden, da dies auf der Basis einer für das Kältemittel HFC-134a optimierten Anlage erfolgt ist und damit andere Kältemittel auf dieser Konfiguration tendenziell eher ungünstigere Jahresarbeitszahlen erreichen. Dementsprechend sind die Diagramme mit variabler Jahresarbeitszahl für den eigenen Gebrauch aussagekräftiger. Dasselbe gilt auch für die anderen betrachteten Systeme.

Über die Höhe zukünftiger Verlustmengen bei Wärmepumpen, Kaltwasser- und Solesätzen, und insbesondere bei Supermarkt-Kälteanlagen können zwar Voraussagen gemacht werden. Ob diese aber tatsächlich in der täglichen und verbreiteten Anwendung erreicht werden können, lässt sich erst (vielleicht) im Nachhinein überprüfen. Solange eine entsprechende Selbstverpflichtung der Branche oder eine Regulierung mit verbindlichen spezifischen Emissionsraten und effizienten Kontrollmechanismen fehlen, ist es fraglich, ob die für die Zukunft prognostizierten, tiefen Verlusten erreicht werden können.

Die verwendeten Charakterisierungsgrößen (Umweltwirkungskategorien) sind mit Ausnahme des Bedarfs nicht erneuerbarer Primärenergie, des Treibhauspotenzials und des ozonschichtabbauenden Potenzials als Umweltwirkungs*potenziale* zu begreifen. Mit den verwendeten Indikatoren wird lediglich das Potenzial ausgewiesen, Schäden verursachen zu können. Ob diese tatsächlich auftreten ist davon abhängig, ob z.B. versäuernde Substanzen auf ein Gebiet treffen, wo das Pufferungspotenzial erschöpft ist oder ob für sommersmogbildende Substanzen die Bedingungen für die Bildung troposphärischen Ozons gegeben sind.

Die Berechnung der Indikatoren "Nicht erneuerbare Primärenergie", "Ökotoxizität aquatisch und terrestrisch" und "Emission radioaktiver Isotope" werden kontrovers diskutiert (Primärenergie) oder sind Neuentwicklungen, über die in den einschlägigen wissenschaftlichen Gremien noch nicht ausführlich diskutiert worden ist. Da die drei letztgenannten Umweltwirkungskategorien aber mithilfe von in der Europäischen Union verbreiteten Simulationsmodellen erarbeitet worden sind und die umweltrelevanten Kriterien Giftigkeit, Persistenz und Akkumulierbarkeit berücksichtigen (Ökotoxizität) resp. von breit angelegten Europäischen Studien und deren Ergebnissen profitieren konnten (Emission radioaktiver Isotope), werden diese Kategorien als für die vorliegende Studie durchaus genügend und geeignet betrachtet.

## 6 Praktische Hinweise und Ausblick

### 6.1 Praktische Hinweise

Neben der Wahl des umweltlich besten Kältemittels können Anlageplaner und -ersteller noch eine Vielzahl weiterer Entscheide beeinflussen, die eine Auswirkung auf die Gesamtumweltbelastung von kältetechnischen Anlagen haben.

Werden teilhalogenierte Kältemittel eingesetzt, so sollte der Kältemittel-Hersteller sorgfältig ausgesucht werden. Neben dem Preis sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass das Kältemittel aus einer Produktion stammt, die mit einer Nachverbrennung der dabei entstehenden Zwischenprodukte ausgerüstet ist.

Zudem sollen die Monteure, das Wartungs- und Entsorgungspersonal über die umweltlichen Konsequenzen der neuen fluorierten Kältemittel (HFC-134a etc.) unterrichtet und auf einen sorgfältigen Umgang mit diesen Stoffen geschult sein. Nur dadurch können die angestrebten tiefen Emissionsraten auch tatsächlich erreicht werden.

Die Materialwahl insbesondere der Verteilungen in Supermärkten soll bewusst erfolgen. Rostfreie Chrom-Nickel Stähle sollen nur dort eingesetzt werden, wo sie aus technischen Gründen benötigt werden. Die Nickelgewinnung in der russischen Mine "Noril'sk-Talnakh" (27% der Weltproduktion) stellt mit 3.6 Mio. Tonnen SO<sub>2</sub> pro Jahr die weltgrösste Punktquelle atmosphärischer Schwefelemissionen dar (siehe auch Frischknecht et al. 1996:Anhang A:S.96ff.). Damit beeinflusst Nickel die Umweltbilanz von Chrom-Nickel-Stählen sehr stark.

Bei der Wahl der Isolation soll darauf geachtet werden, dass sie ohne CFCs oder HCFCs geschäumt worden ist. Die in der Kältetechnik gängigen PIR-Isolationen werden häufig noch mit HCFC-141b geschäumt. Gewisse Produzenten klimatechnischer Apparate haben aber bereits auf Kohlenwasserstoffe als Blähmittel umgestellt (siehe z.B. Seven-Air 1994).

### 6.2 Ausblick

Die vorliegende Studie behandelt die Frage nach der Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel im Vergleich mit den neuen fluorierten Kältemitteln. Anhand der Anwendungen Wärmepumpe, Kaltwassersatz, Solesatz und Supermarkt-Kälteanlage wurden die Umweltwirkungen des Einsatzes verschiedener Kältemittel untersucht. Verschiedene Aspekte konnten nur annäherungsweise behandelt werden. Hier werden einige Themen aufgeführt, die durch künftige Arbeiten geklärt werden könnten:

- Die Prozessemissionen bei der durchschnittlichen HFC-Produktion mussten basierend auf summarischen Angaben (in kg CO<sub>2</sub>-Äquiv.) abgeschätzt werden. Hier bedarf es einer offenen Informationspolitik der AFEAS-Mitglieder, damit die getroffenen, ergebnisrelevanten Annahmen den tatsächlichen Gegebenheiten angepasst werden können.
- Die Aufwendungen zur Reinigung der Kohlenwasserstoffe und von Ammoniak konnten ebenfalls nur grob (Propan) resp. nicht bilanziert werden (Ammoniak). Auch hier besteht ein Informationsdefizit, das allerdings als weniger resultatbeeinflussend eingeschätzt wird.
- Die Umweltbeeinträchtigung durch die Reinigung von Metallen, durch Phosphatieren etc. konnte nicht systematisch erfasst werden. Aufgrund der teilweise immer noch eingesetzten chlorierten Lösungsmittel besteht hier eine grössere Unsicherheit bezüglich der Ergebnisrelevanz dieses Informationsdefizits.

- Allgemein soll den Lösungsmitteln eine höhere Aufmerksamkeit zukommen. Die bisher vorliegenden Ökobilanzen über Lösungsmittel leiden an mangelnder Transparenz. Das BFE-Projekt "Waste Solvent Management in Chemical Industry" am Laboratorium für Technische Chemie der ETH Zürich, kann hier die Informationslage deutlich verbessern helfen.
- Der stark wachsende Bereich der Pkw-Klimatisierung wurde hier ausgeklammert, da in der Schweiz keine Autoklimaanlagen hergestellt werden. Da es sich aber um eine ausgesprochen umweltrelevante Aktivität mit derzeit grossen Wachstumsraten handelt, sollte diesem Bereich ein erhöhtes Augenmerk zukommen.
- Die Frage ob die klassische Kälteanlagen-Lösung energetisch oder umweltlich die optimalste ist, wurde hier nicht gestellt. Ein Gegenüberstellen alternativer Kühlsysteme (wie Nachtauskühlung, Verdunstungskühlung, Vorkühlen durch den Untergrund etc.), von Energiesparmassnahmen und von klassischen Kälteanlagen-Lösungen mithilfe der Ökobilanzierung würde hier zur Klärung beitragen.
- Parallel zum Abschluss dieser Arbeit wurde der lang erwartete Eco-indicator 99 publiziert (Goedkoop & Spriensma 1999). Damit wird eine Vollaggregation in Abhängigkeit der Werthaltungen der Entscheidungsträger möglich. Ob die Anwendung dieser Methode in diesem Fall zu ähnlichen Schlüssen kommen wird, bleibt zum Beispiel im Rahmen eines Umsetzungsprojektes zu überprüfen.



**Dr. Rolf Bretz**

Life Cycle Assessment CA5.4

E-mail: rolf.bretz@cibasc.com

Tel.: +41/61/636 38 86

Fax: +41/61/636 31 83



Herrn

Dr. Rolf Frischknecht

ESU-services

Zentralstrasse 8

**8610 Uster**

Basel, 07.12.1999

**Review - Bericht über**

**Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel  
Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen**

Ausgearbeitet durch  
Rolf Bretz  
Life Cycle Assessment  
Consumer Care Division  
Ciba Specialty Chemicals  
Postfach  
CH-4002 Basel / Schweiz

**Zusammenfassung**

Dieses Review beurteilt den Abschlussbericht der Studie "Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel - Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen" von Rolf Frischknecht, im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Ziel dieser Ökobilanz war es, die lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen des Einsatzes natürlicher Kältemittel und teilhalogener Kohlenwasserstoffe in Wärmepumpen und Kälteanlagen zu quantifizieren und zu vergleichen

Die begutachtete Studie macht einen ausgezeichneten Eindruck: Die verwendeten wissenschaftlichen und technischen Methoden entsprechen dem heutigen Stand, und die Vorgaben der einschlägigen ISO-Normen werden eingehalten. Die verwendeten Daten sind gut dokumentiert und entsprechen dem Zweck der Studie. Entsprechend den Vorgaben wurde eine teilaggregierende Wirkungsabschätzung vorgenommen; die Resultate werden anhand der 8 untersuchten Wirkkategorien präsentiert.

Die Publikation der vorliegenden Studie erachte ich als sehr empfehlenswert.

Im Verlauf der Studie ergaben sich die folgenden Verbesserungsvorschläge, welche den Wert und die Anwendbarkeit der Arbeit allenfalls noch erhöhen können:

- Der Gegensatz “natürliche/synthetische”. Kältemittel sollte besser durch “halogenfreie /halogenhaltige” Kältemittel beschrieben werden.
- Die untersuchten Systeme und -Alternativen können durch einige einfache Massnahmen noch übersichtlicher dargestellt werden, insbesondere in den Zusammenfassungen.
- Der Einfluss der Energieeffizienz / Jahresarbeitszahl ist in den Ergebnissen recht dominant und sollte dort, aber auch schon in der einleitenden Prozessdefinition, stärker herausgearbeitet werden.
- Technische Daten von tatsächlichen Anlagen im Markt sollten klar von Annahmen und Bezugswerten unterscheidbar werden; gleiches gilt für thermodynamische / technisch bedingte / lediglich angenommene Unterschiede in der Energieeffizienz.
- Die gewählte Allokation zwischen Ammoniak und CO<sub>2</sub> sollte mit einer Sensitivitätsrechnung überprüft werden.
- Die Wirkungskategorie “Überdüngungspotenzial” dürfte angesichts der Verwendung von Ammoniak wichtig sein und aufgenommen werden.
- Die Wirkungskategorien “Ökotoxizität” (aquatisch und terrestrisch) müssen wegen der Unsicherheit in einigen Bewertungsfaktoren mit Vorsicht interpretiert werden.
- Die beobachteten Unterschiede in den Resultaten sollten klarer nach ihren Hauptursachen (Chemie des Kältemittels / Energieeffizienz) gegliedert werden.
- Übersichtlichere Darstellungen (z.B. Radar-Diagramme) anstelle oder zusätzlich zu den Balkendiagrammen erhöhen die Lesbarkeit.

## 1. Einführung, Ablauf des Reviews

Die Studie “Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel; Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen” wurde in der zweiten Jahreshälfte 1999 von Dr. Rolf Frischknecht, ESU-services, Uster, im Auftrag des Bundesamtes für Energie durchgeführt.

Der Verfasser dieses Reviews wurde Anfang September 1999 beigezogen, konnte allerdings aus Verfügbarkeitsgründen seine Arbeit erst Mitte Oktober 1999 aufnehmen. Der Review-Prozess begleitete daher *nicht* die Phasen der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen sowie der Datenerhebung für das Inventar, sondern basiert auf verschiedenen Versionen der Auswertungen und des Schlussberichtes, die dem Verfasser am 13.10.99, 11.11.99 und 18.11.99 zugestellt wurden. Ebenfalls vorgelegt wurden der Kommentar eines europäischen Herstellers halogener Kältemittel (in diesem Review berücksichtigt), sowie eine teilweise vertrauliche Liste von Experten aus dem Kreis der Kältemittel- und Rohstoff-Hersteller, Anlagen- und Komponentenbauer,

sowie der Betreiber; diese waren zwar nicht formell in das Projekt eingebettet, lieferten aber gleichwohl Daten und/oder kritische Anmerkungen.

Die Begutachtung erfolgte in zwei Stufen: In einem ersten Schritt wurden - in enger Zusammenarbeit mit dem Autor der Studie - Fehler identifiziert und Unklarheiten beseitigt, bei denen eine Übereinstimmung zwischen Autor und Reviewer erzielt werden konnte. Dies betrifft die grosse Mehrzahl der von mir angemerkten Punkte. In einem zweiten Schritt wurden dann die verbleibenden Anmerkungen des Gutachters diskutiert und in diesem Bericht zusammengefasst.

Dieses Gutachten folgt den Vorgaben für ein *peer review* im SETAC 'Code of Practice' <SETAC 1993>, sowie den Anforderungen der ISO-Normen 14040 <ISO 1997> und 14041 <ISO 1998>.

## 2. Allgemeine Bemerkungen

Der allgemeine Eindruck dieser Studie ist ausgesprochen positiv. Das angestrebte Untersuchungsziel wurde erreicht, die Umweltwirkungen der Wärme- und Kältebereitstellung mit verschiedenen Kältemitteln zu quantifizieren und zu vergleichen (also *nicht*, die verschiedenen Kältemittel zu *werten*).

Die verwendeten wissenschaftlichen und technischen Methoden entsprechen dem heutigen Wissensstand, und der Autor folgt den Vorgaben der ISO-Normen (bzw. Normentwürfen) für die Ökobilanzierung. Allfällige Abweichungen werden in einem eigenen Kapitel des Berichtes diskutiert und begründet.

Die verwendeten Datenquellen für die Sachbilanz entsprechen der vorgesehenen Qualität der Studie und dem heutigen Stand der Technik:

- Publierte Ökobilanz-Studien von anerkannter Qualität (vielfach mit peer review).
- Angaben von Herstellern, welche vom Autor der Studie kritisch überprüft und z.T. mit den Herstellern verifiziert wurden.
- Schätzungen des Autors auf der Grundlage der wissenschaftlichen Literatur, welche korrekt dokumentiert und detailliert erläutert werden. Die *chemischen* Prozesse zur Herstellung der Kältemittel (soweit es sich nicht um Originaldaten von Herstellern handelt) wurden vom Autor im Einzelnen gemeinsam mit dem Reviewer verifiziert.
- Annahmen (über Systemauswahl, technische Auslegung, Betriebsbedingungen etc.), welche mit der Projektbegleitgruppe festgelegt, begründet und dokumentiert wurden.

Ein einheitliches Mass für die Datenqualität konnte (dem heutigen Wissensstand entsprechend) nicht gegeben werden; hingegen werden in allen relevanten Fällen Qualitätsüberlegungen dokumentiert und zum Teil durch Sensitivitätsanalysen erhärtet.

Die Wirkungsabschätzung (LCIA) wurde nach den Regeln des ISO-Normentwurfes 14042 <ISO 1998a> durchgeführt; entsprechend wurde auf eine (wertende) Vollaggregation der Wirkungskategorien verzichtet. Bei den Charakterisierungsfaktoren stützt sich die Studie auf die neueste verfügbare

Literatur. In einigen Fällen musste die Techniken zur Aggregation innerhalb der Kategorien erweitert/vervollständigt werden (insbesondere bei den Abbauprodukten der halogenierten Kältemittel und der Emission radioaktiver Isotope); dies erfolgte in Zusammenarbeit mit Experten im entsprechenden Gebiet (insbesondere M. Huijbregts, Universität Amsterdam).

Sowohl die verwendete Datenbasis als auch die Bewertungsmethoden sind meiner Meinung nach dem Ziel der Studie angemessen. Der vorliegende Ökobilanz-Report liefert sachliche Grundlagen für die Wahl und den Vergleich von Kältemitteln und die Konzeption von entsprechenden Anlagen. Es bleibt dahingestellt, wieweit der simultane Vergleich der resultierenden 7-8 verschiedenen Umwelt-Wirkungskategorien einem praktischen Anwender ohne Ökobilanz-Erfahrung eine sinnvolle Entscheidungshilfe bieten kann; jedenfalls gibt es für eine weitere Aggregation der Resultate durch (wertende) Gewichtung bis heute weder eine Norm noch anerkannte wissenschaftliche Methoden.

### **3. Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie**

#### **3.1 Ziel**

Der Titel der Untersuchung verspricht "natürliche" Kältemittel und vergleicht diese in der Folge mit "synthetischen". Es scheint mir fragwürdig, z.B. Ammoniak (trotz seines Vorkommens in der Natur) zu den "natürlichen" Kältemitteln zu rechnen, da es im grossen Stil industriell hergestellt wird und toxikologisch und ökologisch nicht unbedenklich ist. Objektiver wäre meines Erachtens eine Trennung in halogenfreie und halogenhaltige Kältemittel.

Die Studie verzichtet (richtigerweise) bewusst auf die Wertung der einzelnen Kältemittel (ebenso wie auf die Analyse von Alternativen zur Erfüllung ähnlicher Funktionen ohne Einsatz von Kältemitteln). Sie beschränkt sich auf die Bereitstellung von Daten zur Entscheidungsunterstützung bei der Konzeption von Anlagen und der Wahl von Kältemitteln. Naturgemäss muss hierbei eine Auswahl der untersuchten Kombinationen Anlage/Kältemittel getroffen werden. Man kann davon ausgehen, dass diese Auswahl mit der Projektbegleitgruppe gemeinsam getroffen wurde und sinnvoll ist. Für den nicht direkt beteiligten Leser ist diese Wahl allerdings nicht offenkundig; die Auslassungen in der Liste möglicher Kombinationen sollten kurz begründet werden, obwohl sie vielleicht für den Praktiker in diesem Gebiet augenfällig sind.

Ebenso fehlt in der Zieldefinition eine Diskussion der Frage, ob alle untersuchten Kombinationen in gleicher Weise technisch optimiert sind. Damit wird es schwierig zu entscheiden, ob allfällige unterschiedliche Resultate tatsächlich auf die Wahl des Kältemittels oder auf zufällige Unterschiede in der Energieeffizienz zurückzuführen sind, die im besseren Fall eine ungleiche technische Reife der Systeme, im schlechteren einfach Unzulänglichkeiten in der Datenlage reflektieren.

Notwendigerweise müssen bei den untersuchten Anlagen Mittelwerte gebildet oder praxisrelevante Szenarien entwickelt werden. Dieser Vorgang ist in der Zieldefinition (wie auch im deskriptiven Anhang) in der Regel beschrieben, aber oft nicht gut nachvollziehbar / begründet. Klare Hinweise auf Herkunft und Typ der verwendeten Kenngrössen sollten die Unterscheidung erlauben zwischen:

- tatsächlichen Mittelwerten bestehender/bekannter Anlagen
- “typischen” (repräsentativen) Grössen, die aus der Kenntnis des realen Marktes hergeleitet wurden
- Referenzwerten (wie den Leistungen 7 und 50 kWh Leistung), die von der Projektbegleitgruppe (arbiträr) gewählt wurden, und die eine Interpolation auf reale Anlagen erlauben.

Manche Mittelwertbildungen (z.B. über Normalkühlung und Tiefkühlung, Anlagen mit Direktverdampfung oder Kälte-träger, verschiedene Technologien unterschiedlicher Effizienz) erscheinen mir nicht selbstverständlich und unzureichend begründet.

In vielen Fällen lösen sich die genannten Unklarheiten, wenn der Leser die Resultatdiskussion am Ende des Hauptteiles (und die dortigen Sensitivitätsbetrachtungen) beizieht; daher erscheint mir die Wahl der untersuchten Systeme für das Ziel dieser Studie geeignet, trotz der genannten Mängel (die allerdings die Lesbarkeit erschweren).

### 3.2 System-Definition und Grenzen

Die Wahl der funktionellen Einheit für Wärmepumpen und Gebäude-/Industriekühlung (gelieferte resp. entzogene thermische Energie) ist sinnvoll; jedoch wird im Verlauf der Resultatdiskussion deutlich, dass der zusätzliche Parameter “Jahresarbeitszahl” eine erhebliche Rolle spielt und mitberücksichtigt werden muss. Das Konzept der Jahresarbeitszahl sollte bereits bei der System-Definition erläutert werden, so dass der Zusammenhang mit der Energieeffizienz (und der Spielraum des tatsächlich thermodynamisch und technisch Möglichen) nicht erst in der Resultat-Interpretation sichtbar wird.

Die funktionelle Einheit “Laufmeter Kühlmöbel” ist zwar weniger üblich, erscheint aber dank klarer Definition und der Einführung von Korrekturfaktoren dem Studienziel angemessen. Problematisch bleibt die Mischung von Normal- und Tiefkühlung innerhalb dieser funktionellen Einheit; die Arbeit zeigt, dass das Verhältnis der elektrischen Energieaufwendungen (Normalkühlung/Tiefkühlung) keineswegs konstant ist, sondern je nach Kältemittel und System zwischen 1.1 und 1.8 schwankt (Tabelle 4.4).

Richtigerweise umfassen die Systemgrenzen nicht nur den Betrieb der Anlagen (obwohl dieser vielfach den grössten Einfluss hat), sondern auch die Herstellung und Entsorgung, insbesondere der Kältemittel. Der Vergleich der klassischen TEWI-Werte mit dem gefundenen Ökobilanz-Treibhauspotenzial beweist die Richtigkeit dieser (sachlich anspruchsvollen) Grenzziehung, ebenso die Auswirkungen der chlor- und fluorhaltigen Zwischenprodukte (*mit* Ozon-Zerstörungs-Potenzial ODP) bei der Synthese chlorfreier Fluorkohlenwasserstoffe (selbst *ohne* ODP).

Die Systemgrenzen sind generell sehr umfassend gesetzt, was die Qualität der Studie positiv beeinflusst (und den nötigen Aufwand entsprechend vergrössert hat). Der Einbezug der Investitionsgüter bei der Energiebereitstellung kontrastiert mit deren Auslassung in den anderen Prozessen (z.B. Chemie-Produktion). Dies stellt eine kleine Inkonsistenz dar, die aber nach meiner Erfahrung vernachlässigbare Konsequenzen hat. Einige Prozesse (wie die Her-

stellung der Kühlmöbel) werden bewusst weggelassen, wenn sie für alle untersuchten Varianten gleich (ununterscheidbar) oder irrelevant sind; die Abschneidekriterien in diesen Fällen sind klar definiert.

### 3.3 Daten-Verfügbarkeit und Qualität

Grundsätzlich vermeidet es der Autor, Prozesse im Inventar auszulassen oder mittels Systemgrenzen "abzuschneiden", wenn Daten nicht leicht zugänglich sind oder ganz fehlen<sup>26</sup>. Vielmehr bemüht er sich in diesen Fällen wenigstens um eine qualifizierte Schätzung, was die Aussagekraft der Studie wesentlich erhöht und Sensitivitätsbetrachtungen recht eigentlich erst ermöglicht. Die verwendeten Schätzprozesse sind gut beschrieben und beruhen normalerweise auf verlässlichen Literaturangaben und nachvollziehbaren Annahmen.

Im Kommentar des europäischen Herstellers wurde eine deutliche Angabe der Belastbarkeit / Relevanz der Resultate gefordert, um Miss-/Überinterpretationen zu vermeiden. Dies würde idealerweise durch die Angabe von Qualitätsindikatoren bewerkstelligt, die durchgängig alle Zahlen von den einzelnen Inventar-Elementen bis zum Schlussresultat begleiten. Hierfür fehlen heute sowohl die theoretischen Grundlagen als auch die praktischen Möglichkeiten. Der Autor hat so weit als möglich versucht, die Anforderungen der ISO-Norm 14041 (5.2.5) durch verbale Beschreibung zu erfüllen, und bietet in ausgewählten Fällen zudem Sensitivitätsanalysen an. Eine weitergehende Quantifizierung der Unsicherheit scheint mir zur Zeit nicht machbar.

### 3.4 Wahl der Parameter

#### 3.4.1 Inventarparameter

Für die verwendeten Energiesysteme orientiert sich die Liste der verwendeten Inventarparameter an den früheren Arbeiten des Autors <Frischknecht 1994>; sie dürfte damit detaillierter und vollständiger sein als diejenigen der meisten bekannten Ökobilanzen. Für andere Prozesse (z.B. Chemie) stehen mehrheitlich nur die viel kürzeren Messparameter-Listen der Betreiber zur Verfügung; es ist zu hoffen, dass die Hersteller - in Kenntnis ihrer eigenen Prozesse und Behördenauflagen - tatsächlich die relevanten Grössen messen. Bei den Schätzungen anhand von Prozessen aus der Literatur ist die Vollständigkeit naturgemäss noch viel geringer. Immerhin hat der Autor im Anhang versucht, wenigstens für die ökologisch kritischsten Zwischenprodukte Annahmen über Verlustraten (und daraus resultierende Emissionen) zu treffen; deren Auswirkungen wurden allerdings nicht durch Sensitivitätsanalysen quantifiziert.

#### 3.4.2 Wirkungskategorien

Die Auswahl der acht verwendeten Wirkungskategorien ist hinreichend gut begründet und auf das Ziel der Untersuchung abgestellt. Auf die Probleme bei den Kategorien "Ökotoxizitätspotenzial" (aquatisch und terrestrisch) und "Emission radioaktiver Isotope" wird im Folgenden noch eingegangen.

---

<sup>26</sup> Wie dies leider häufig in anderen Ökobilanzen üblich ist.

Die Auslassung der Kategorie "Wintersmog" wird mit ihrer Redundanz erklärt; tatsächlich besteht (bei Verwendung eines einheitlichen Energiemodells) ein klarer Zusammenhang z.B. mit dem Treibhauspotenzial. Die Studie vergleicht jedoch verschiedene Energiemodelle, darunter solche mit relativ hohen Wintersmog-Auswirkungen (UCPTE-Elektrizitätsmodell) und andere mit kleinen Beiträgen (zwei Erdgas-Kraftwerke). Deshalb wäre es m.E. vorteilhaft (und mit geringem Zusatzaufwand machbar) gewesen, die Kategorie "Wintersmog" mitzuführen, auch zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Studien, die diese enthalten.

Die Wirkungskategorie "Überdüngungspotenzial" wird direkt und in starkem Ausmass beeinflusst durch die Emissionen *eines* untersuchten Kältemittels (Ammoniak), während bei den anderen Kältemitteln die Zusammenhänge weniger offensichtlich sind. Einen starken Einfluss hat weiterhin  $\text{NO}_x$ , welches als eine der "Leitemissionen" bei der Energiebereitstellung betrachtet werden muss, und deshalb direkt von der Energieeffizienz der Anlagen abhängt. Daher scheint es mir angezeigt, das Überdüngungspotenzial als relevante Auswirkung mitzuuntersuchen, da es unter Umständen zwischen den Varianten entscheiden kann. Das Argument, dass die Hauptquelle für die Eutrophierung ausserhalb des Untersuchungsrahmens liegt (Landwirtschaft), lässt sich sinn gemäss auf andere Kategorien übertragen. Ohne einen Normalisierungsschritt (der explizit nicht Teil dieser Studie sein sollte) lässt sich über die Relevanz einer einzelnen Wirkungskategorie für das Gesamtbild nichts aussagen.

## **4. Sachbilanz (Inventar)**

### **4.1 Prozess-Beschreibungen, Methodologie**

Die untersuchten Prozesse sind adäquat und ausführlich beschrieben, auch wenn auf die Darstellung als Flussdiagramme verzichtet wurde.

Die Methodik der Ökobilanzierung orientiert sich an den einschlägigen ISO-Normen. Das eigentliche Vorgehen bei der Erstellung und Berechnung der Inventare ist allerdings nicht beschrieben; man kann davon ausgehen, dass der Autor seiner eigenen, an der ETH Zürich entwickelten Methode <Frischknecht 1994> gefolgt ist, und auch die gleiche Berechnungs-Software benutzt hat. Diese Werkzeuge sind im Lauf der Jahre in diversen Studien von verschiedenen Wissenschaftlern validiert worden.

### **4.2 Datenerhebung, Literatur, Validierung, Transformationen**

Soweit ersichtlich entspricht die Datenerhebung und die Auswertung von Literaturquellen dem Stand der Technik. Eigene Messungen wurden nicht durchgeführt, insofern liegt die Verantwortung für die Richtigkeit der Angaben bei den Herstellern / Datenlieferanten und kann vom Reviewer nicht überprüft werden, zumal viele der Daten vertraulich und daher nicht einsehbar sind.

Eine Verbesserung dieser Situation ist denkbar: Das Vorwort enthält eine Liste von Fachleuten, die die Studie unterstützten, also Daten lieferten, und die vermutlich auch deren richtige Einbindung in die Studie überprüfen können (oder dies bereits getan haben). Eine gemeinsame Stellungnahme dieser Ex-

perten (als Anhang parallel zu diesem Review) könnte die Glaubwürdigkeit der Datensätze (und damit die Validität der Studie) erhöhen.

Die Umrechnungen von Daten auf der Stufe der Einzelprozesse ist im Bericht beschrieben, die Aggregation über die Prozessketten dürfte mit dem obengenannten validierten Software-System erfolgt sein (eine entsprechende Aussage fehlt allerdings).

### 4.3 Allokationen, Wahl des CO<sub>2</sub>-Prozesses

Die Allokationen von Kuppelprozess-Emissionen auf die Co-Produkte sind beschrieben und klar begründet. Wie üblich könnte man in einigen Fällen auch andere Zuweisungen vornehmen, so beim häufigen Nebenprodukt HCl. Dieses besitzt zwar einen geringen ökonomischen Wert, wird aber in aller Regel doch weiterverwendet, so dass die erheblichen Energieaufwendungen für die Chloralkali-Elektrolyse teilweise anderen Prozessen zugute kommen und nicht zu 100% dem Hauptprodukt angelastet werden müssen<sup>27</sup>.

Der Herstellprozess für CO<sub>2</sub> als Co-Produkt der Ammoniakherstellung ist nur eine von mehreren technisch eingesetzten Varianten; allerdings wohl die häufigste. Ammoniak ist sicher das "wertvollere" Produkt; es liegt aber nicht im Interesse des Untersuchungsziels, das CO<sub>2</sub> als ökologisch lastfreies Nebenprodukt zu behandeln (wie oben die Salzsäure). Die Entscheidung, den Feedstock (der zu >75% aus Kohlenstoff besteht) dem NH<sub>3</sub> anzulasten, während die Energieaufwendungen zur Abtrennung dem CO<sub>2</sub> zugerechnet werden, ist diskutabel.

### 4.4 Datenverfügbarkeit

Die Studie zeigt die Resultate nur in Form von Wirkungsabschätzungen und nicht als Sachbilanz-Ergebnisse. Eigenartigerweise enthält auch die Norm ISO 14041 keine Aussage darüber, ob Sachbilanz-Daten als solche im Bericht vorzulegen sind.

Selbstverständlich können aus Platz- und Vertraulichkeitsgründen nicht sämtliche Daten aller Einzelprozesse offengelegt werden. Jedoch erscheint mir die Verfügbarkeit der Inventare für diejenigen Prozesse angezeigt, die am Schluss der Studie diskutiert und verglichen werden, da dann diese Daten

- in Erweiterung der Fragestellung evtl. anderen Verfahren zur Wirkungsabschätzung unterzogen werden können, z.B. zur Ergänzung der fehlenden Wirkungskategorien, oder mit dem am Schluss des Berichtes erwähnten Eco-indicator 99 <Goedkoop 1999>
- in anderen Ökobilanzen (übergeordneter Prozessketten) als Input dienen können.

Nach meiner Erfahrung verletzt die Weitergabe vertikal (und evtl. horizontal) hochaggrierter "cradle-to-gate/grave" Inventardaten in der Regel keine schutzwürdigen Geheimhaltungsinteressen<sup>28</sup>.

<sup>27</sup> Der Autor hat diese Konsequenz in (nicht gezeigten) Sensitivitätsrechnungen überprüft und für irrelevant befunden.

<sup>28</sup> Im Gegensatz zu Daten von Einzelprozessen, die Betriebsgeheimnisse offenlegen können.



Auf Rückfrage hat sich der Autor der Studie bereiterklärt, derartige Inventardaten (gegebenenfalls nach Freigabe durch den Prozess-Eigner) an interessierte Dritte abzugeben.

## 5. Wirkungsabschätzung

Auf die Auswahl der Wirkungskategorien wurde bereits eingegangen.

Die verwendeten Charakterisierungsfaktoren in den meisten Wirkungskategorien wurden aus der anerkannten Literatur entnommen oder mit klar beschriebenen Verfahren daraus berechnet. Die Berücksichtigung des indirekten Effekts ozonabbauender Substanzen auf deren Treibhauspotenzial ist allerdings neueren Datums und in älteren Quellen so nicht zu finden. Ausserdem sind einige Faktoren "auffällig" und schlecht erklärbar, so das negative (vermindernde?) Sommersmog-Potenzial beim Benzaldehyd, welches aus UN-ECE <UN-ECE 1994> entnommen wurde.

Weniger etabliert sind die Charakterisierungsfaktoren für die aquatische und terrestrische Ökotoxizität, welche von <Huijbregts 1999b> übernommen wurden. Diese basieren nicht nur auf den bekannten Toxizitätswerten (z.B. von Schwermetallen), sondern auch noch auf der Modellierung des Schicksals der emittierten Schadstoffe in den einzelnen Kompartimenten. Die Rangordnung der einzelnen Emissionen bezüglich ihrer ökotoxikologischen Wirkung weicht in vielen Fällen von den Erwartungen einer ersten Näherung ab. Nach Aussage von Mark Huijbregts <Huijbregts 1999d> sind die verwendeten Faktoren extrem sensitiv auf die Modellierung ihrer Verweilzeit im verwendeten Programm USES-LCA <Huijbregts 1999a>; bei einer (geplanten) Anpassung des Modells und der Einführung von Eliminationsvorgängen können sich hier markante Änderungen ergeben. Dies muss bei einer Bewertung auf der Basis der Ökotoxizität im Auge behalten werden.

## 6. Resultate und Diskussion

Die Resultatbetrachtungen geben die Befunde der Studie in einem sehr grossen Detaillierungsgrad wieder. Dies entspricht dem Ziel der Studie, sämtliche untersuchten Prozessvarianten einander gegenüberzustellen und die Daten für eine weitere Auswertung bereitzustellen, kommt aber naturgemäss der Lesbarkeit nicht sehr entgegen. Dementsprechend schwierig erscheint es, die Ergebnisse in der Zusammenfassung zu kondensieren und auf einen einfachen Nenner zu bringen.

Es sprengt den Rahmen dieses Reviews, hierzu eine einfache Lösung vorzuschlagen. Immerhin wären einige Verbesserungen denkbar, um die Vielfalt der Daten überschaubarer zu machen:

### 6.1 Gruppierung der Effekte nach Ursachen

Die beobachteten Effekte (und Unterschiede) lassen eine klare Gliederung nach Ursachen erkennen:

- Chemie: Umweltverhalten und Herstellung des Kältemittels

- **Physikalische Effizienz:** Thermodynamische Eigenschaften der Kältemittel, welche unterschiedliche Energieausbeuten / Effizienzen zwingend verursachen
- **Technische Effizienz:** Eigenschaften der verwendeten Anlagen, Adaptation an das jeweilige Kältemittel, welche die Energieausbeuten / Effizienzen beeinflussen, ohne unveränderlich zu sein. Hiermit ist die tatsächlich heute erzielbare "technische Reife" der Anlagen (als relativ zwingendes Kriterium) gemeint.
- **Bilanzierungsannahmen:** Verallgemeinerungen und technische Annahmen aufgrund schlechter Datenlage, wie die Bilanzierung von Szenarien und Anlagen, die für ein bestimmtes Kältemittel suboptimal sind, Mittelung von Daten für technisch grundverschiedene Systeme, willkürliche Annahme von Leckage-Raten, etc. (eher zufälliges Kriterium).
- **Energiemodell:** Verschiebung der Gewichte der "chemischen" Einträge in der Relativdarstellung, durch die Wahl von Erdgas als Energieträger und Reduktion der Emissionen der Energiebereitstellung, worauf die anderen relativ viel deutlicher hervortreten, ohne ihre absolute Grösse zu verändern.

Es wäre begrüssenswert, die Effekte noch deutlicher nach den chemischen Auswirkungen einerseits, denjenigen der Energiebereitstellung und -Ausbeute andererseits zu gruppieren. Hierbei nützlich wäre auch eine vertiefte Diskussion der Jahresarbeitszahl und der Faktoren, welche sie beeinflussen.

## 6.2 Graphische Resultatdarstellung

Es war nicht Ziel der Studie, simple Kennzahlen (wie z.B. Ökopunkte) für die einzelnen Varianten zu generieren. Der Vergleich von Alternativen in einem "acht-dimensionalen" Raum (mit den 8 Wirkungskategorien) ist aber anhand der gezeigten Säulendiagramme äusserst schwierig. Gegebenenfalls wäre die Darstellung als "Radardiagramm" leichter lesbar (8 Kategorien auf 8 sternförmigen Achsen, Referenzsubstanz HCFC-22 überall als 100% gesetzt).

## 6.3 Vergleiche auf der Basis Jahresarbeitszahl / Energieverbrauch

Sehr instruktiv sind die Vergleiche nach dem Muster

- "wieviel mehr Strom darf eine Anlage mit halogenfreiem Kältemittel verbrauchen, bevor sich die Vorteile gegenüber der halogenhaltigen Variante aufheben?"

Diese Art Argumentation gibt vor allem dem Praktiker eine Entscheidungshilfe; sie sollte nicht nur im entsprechenden Kapitel der Auswertung, sondern vor allem in den Zusammenfassungen deutlich hervorgehoben werden.

## 7. Schlussbemerkung

Es ist eine generelle Eigenschaft von Critical Reviews, dass sie leichter auf vereinzelte Schwachstellen als auf die gute Gesamtleistung einer Studie fokussiert werden können.

In diesem Sinne sollen meine Kritikpunkte nicht als eine Ablehnung der vorliegenden Arbeit verstanden werden, sondern als Versuch, die Resultate noch nützlicher, belastbarer und verständlicher zu machen. Die Publikation der vorliegenden Studie erachte ich als sehr empfehlenswert.

## 8. Literatur

<Frischknecht 1994> R. Frischknecht, P. Hofstetter, I. Knöpfel, R. Dones, E. Zollinger: Environmental Life-Cycle Inventories of Energy Systems: Methods and Selected Results (Ökoinventare für Energiesysteme), ETH Zürich (ESU) / PSI Villigen / Swiss Bundesamt für Energiewirtschaft, Zürich/Schweiz (August 1994), und nachfolgende korrigierte/verbesserte Versionen

<Goedkoop 1999> M. Goedkoop: The Eco-indicator 99, Available on the Internet: <http://www.pre.nl/eco-indicator99/index.html> (1999)

<Huijbregts 1999a>: Huijbregts M.A.J.: Priority Assessment of Toxic Substances in the frame of LCA; Development and application of the multi-media fate, exposure and effect model USES-LCA, Interfaculty Department of Environmental Science, Faculty of Environmental Science, University of Amsterdam

<Huijbregts 1999b> M.A.J. Huijbregts: Ecotoxicological effect factors for the terrestrial environment in the frame of LCA, Interfaculty Department of Environmental Science, Faculty of Environmental Science, University of Amsterdam

<Huijbregts 1999d> M.A.J. Huijbregts: Personal Communication to the Reviewer, SETAC Workgroup on Impact Assessment, 3.12.1999

<ISO 1997> International Standard ISO 14040, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, 1<sup>st</sup> edition 1997-06-15, International Organization for Standardization, Geneva (1997)

<ISO 1998> International Standard ISO 14041, Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis, 1<sup>st</sup> edition 1998-10-01, International Organization for Standardization, Geneva (1998)

<ISO 1998a> Draft International Standard ISO 14043, Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment, (voting begins 1998-11-12), International Organization for Standardization, Geneva (1998)

<ISO 1998b> Draft International Standard ISO 14043, Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle interpretation, (voting begins 1998-11-05), International Organization for Standardization, Geneva (1998)

<SETAC, 1993> Society for Environmental Toxicology and Chemistry - Europe (SETAC): Guidelines for Life Cycle Assessment: "A Code of Practice". From the SETAC Workshop held at Sesimbra, Portugal, March 31 - April 3, 1993. SETAC Europe, Brussels, Edition 1, (August 1993)

<UN-ECE 1994> UN-ECE : Protocol concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes, Economic Commission for Europe, United Nations, New York & Geneva (1994)

## Begriffe und Abkürzungen

a	Jahr (annum)
AFEAS	Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study
ARI	Air Conditioning and Refrigeration Institute
Bq	Bequerel (Bq) = Anzahl radioaktiver Zerfälle pro Sekunde
BFE	Bundesamt für Energie, Bern (früher BEW)
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
CFC	Chlorofluorocarbon (siehe auch FCKW)
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
COD	Chemical oxygen demand (Chemischer Sauerstoffbedarf)
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
1,4-DCB	1,4-Dichlorbenzol
DOC	dissolved organic carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
DX	Direktverdampfung
eco <sup>mc</sup>	LCA-Software der Firma ESU-services
EMPA	Eidg. Materialprüf- und Forschungsanstalt
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
EU	Europäische Union
ExternE	Externalities of Energy, Forschungsprogramm der Europäischen Kommission
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (siehe auch CFC)
FKW	Fluor-Kohlenwasserstoffe (siehe auch HFC)
GWP	Global Warming Potential = Treibhauspotenzial
HCFC	Hydrochlorofluorocarbon (siehe auch H-FCKW)
Heizöl EL	Heizöl extraleicht
HFC	Hydrofluorocarbon (siehe auch FKW)
H-FCKW	Teilhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (siehe auch HCFC)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
JAZ	Jahresarbeitszahl
KTS	Kälteträgersystem
kWh	Kilowattstunde (1kWh = 3.6MJ)
LCA	Life Cycle Assessment (=Ökobilanz)
LCI	Life Cycle Inventory Analysis (=Sachbilanz)
LCWI	Life Cycle Warming Impact
LRV	Luftreinhalteverordnung
man.Sv	Mansievert (Einheit für die Kollektivdosis radioaktiver Strahlung)
MJ	Megajoule (1MJ = 0.278kWh)
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NK	Normalkühlung
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
NMVO	<u>N</u> on- <u>M</u> ethane <u>V</u> olatile <u>O</u> rganic <u>C</u> ompounds = Flüchtige organische Verbindungen (ohne CH <sub>4</sub> )
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
ODP	Ozone Depletion Potential = Ozonschichtabbauendes Potenzial
PJ	Petajoule (1PJ = 10 <sup>9</sup> MJ)
PM10	Partikel <10 µm
PSI	Paul Scherrer Institut, Villigen
SO <sub>x</sub>	Schwefeloxide
TCDD-Äquiv.	2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin-Äquivalent (vgl. Frischknecht et al. 1996:III:27)
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
TFA	Trifluoroacetic acid (Trifluoressigsäure)
TJ	Terajoule (1TJ = 10 <sup>6</sup> MJ)
TK	Tiefkühlung
TOC	total organic carbon (Totaler organischer Kohlenstoff)
UCPTE	Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité
vppm	volume parts per million

## Literatur

- ADEME 1996:** *La climatisation automobile; Impacts énergétiques et environnementaux: premier constat*, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Direction des Transports, Paris
- ATEL 1998:** 104. *Geschäftsbericht 1998*, Aare-Tessin AG für Elektrizität, Olten
- BACHMANN R., R. SCHULZ 1999:** KA24-1 ICS<sup>TM</sup> - market success for a standardized power plant, in *ABB Review* 3/1999, S. 4-11
- BAUMGARTNER 1999:** *Sachbilanzdaten Supermarkt-Kälteanlagen*, persönliche Mitteilungen von Hr. Nussbaum, Baumgartner Kühlanlagen AG, Uster, November 1999
- BERGER U. 1999:** *Sachbilanzdaten Supermarkt-Kälteanlagen*, persönliche Mitteilungen von U. Berger, Migros Genossenschaftsbund, September 1999
- BOUSTEAD I. 1997A:** *Ecoprofile of Chloromethanes*, European Chlorinated Solvent Association (ECSA), Brüssel
- BOUSTEAD I. 1997B:** *Ecoprofile of Chloroethenes*, European Chlorinated Solvent Association (ECSA), Brüssel
- BRAND, G.; SCHEIDEGGER, A.; SCHWANK, O. (1998):** *Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren 1997. Methode für die Gewichtung in Ökobilanzen*. BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 297. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- DAVID M. 1993:** *Estimation of the Yields of Tropospheric Degradation Products of Hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) and Hydrofluorocarbons (HFCs)*, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, (EAWAG), Dübendorf
- DONES R., U. GANTNER, S. HIRSCHBERG, G. DOKA, I. KNOEPFEL 1996:** Environmental Inventories for Future Electricity Supply Systems for Switzerland, Projekt GaBE, PSI- Bericht Nr. 96-07, Paul Scherrer Institut Villigen
- EFMA (HRSG.) 1995:** *Production of Ammonia, Booklet No. 1 of 8, Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry*, European Fertilizer Manufacturers' Association, Brüssel
- EURAMMON (HRSG.) 1996A:** *Evaluation of the Environmentally Friendly Refrigerant Ammonia According to the TEWI-Concept*, eurammon-Information 4, Frankfurt
- EURAMMON (HRSG.) 1996B:** *Ecological and Chemical Evaluation of the Refrigerant Ammonia*, eurammon-Information 8, Frankfurt
- EXTERNE 1995:** *ExternE, Externalities of Energy; Vol. 1. Summary*, European Commission DGXII, Science, Research and Development JOULE, Luxembourg.
- FKT (HRSG.) 1999:** *Dichtheit von Kälteanlagen*, Vorabzug, Forschungsrat Kältetechnik, Frankfurt
- FRISCHKNECHT R. 1998:** *Life Cycle Inventory Analysis for Decision-making; Scope-dependent Inventory System Models and Context-specific Joint Product Allocation*. ETH-Dissertation No. 12599, Zürich.
- FRISCHKNECHT R., A. BRAUNSCHWEIG, P. HOFSTETTER, P. SUTER 2000:** Human health damages of ionising radiation in life cycle impact assessment, accepted for publication in *Environmental Impact Assessment Review*, No. 2, 2000
- FRISCHKNECHT R., R. HEIJUNGS, P. HOFSTETTER (1998):** Einstein's Lessons for Energy Accounting in LCA, in *Int. J. LCA* 3 (5), S. 266-272.
- FRISCHKNECHT, R. (Hrsg.); BOLLENS, U.; BOSSHART, S.; CIOT, M.; CISERI, L.; DOKA, G.; DONES, R.; GANTNER, U.; HISCHE, R.; MARTIN, A. 1996:** *Ökoinventare von Energiesystemen. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. 3., überarbeitete Auflage, Gruppe Energie – Stoffe - Umwelt, ETH Zürich, Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, PSI Villigen, ENET-Verlag, Bern
- FRISCHKNECHT R., P. HOFSTETTER, I. KNOEPFEL, M. MÉNARD 1995:** *Relevanz der Infrastruktur in Ökobilanzen: Untersuchung anhand der Ökoinventare für Energiesysteme*; Bericht im Auftrag der EMPA St. Gallen und des IVUK ETH Zürich, ESU-Reihe Nr. 3/95, Zürich 1995
- GOEDKOOP, M. 1995:** *The Eco-indicator 95: Weighting method for environmental effects that damage ecosystems or human health on a European scale*, Final Report. Pré Consultants, Amersfoort, The Netherlands

- GOEDKOOP M., P. HOFSTETTER, R. MÜLLER-WENK, R. SPRIENSMA 1998:** The Eco-indicator 98 Explained, in *Int.J.LCA* 3 (6), p. 352-360
- GOEDKOOP M. & R. SPRIENSMA 1999:** *The Eco-indicator 99; A damage-oriented method for Life Cycle Impact Assessment*, Methodology Report, PRé Consultants B.V., Amersfoort
- HAUSCHILD M., H. WENZEL 1997:** *Environmental Assessment of Products; Volume 2, Scientific background*, Chapman & Hall, London/ Weinheim/ New York/ Tokyo/ Melbourne/ Madras
- HEIJUNGS R. (FINAL ED.) ET AL. 1992A:** *Environmental Life Cycle Assessment of Products*, Backgrounds – October 1992, Centre of Environmental Science, Leiden
- HEIJUNGS R. (FINAL ED.) ET AL. 1992B:** *Environmental Life Cycle Assessment of Products*, Guide – October 1992, Centre of Environmental Science, Leiden
- HFC-134A, (1999):** *Ökoprofildaten für das Produkt R134a - Stand September 1999*, vertrauliche Unterlagen eines westeuropäischen Herstellers
- HOFSTETTER P., (1998):** *Perspectives in Life Cycle Impact Assessment; A structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere and valuesphere*, working title, Ph.D. thesis, ETH Zürich, Kluwers Academic Publishers, Boston/ Dordrecht/ London
- HOUGHTON J.T. ET AL. 1996:** *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University press
- HOUGHTON J.T. ET AL. 1995:** *Climate Change 1994. Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*, Cambridge University press
- HUIJBREGTS M.A.J. 1999A:** *Priority Assessment of Toxic Substances in the frame of LCA; Development and application of the multi-media fate, exposure and effect model USES-LCA*, Interfaculty Department of Environmental Science, Faculty of Environmental Science, University of Amsterdam
- HUIJBREGTS M.A.J. 1999B:** *Ecotoxicological effect factors for the terrestrial environment in the frame of LCA*, Interfaculty Department of Environmental Science, Faculty of Environmental Science, University of Amsterdam
- HUIJBREGTS M.A.J. 1999C:** *Assessment of Trifluoroacetic Acid*, persönliche Mitteilung, August 1999
- ISO (1997):** *Environmental management – Life cycle assessment - Principles and framework*. European Standard EN ISO 14040, International Organization for Standardization (ISO), Genf.
- ISO (1998A):** *Environmental management - Life cycle assessment – Goal and scope definition and life cycle inventory analysis*. European Standard EN ISO 14041, Deutsche Fassung, International Organization for Standardization (ISO), Genf.
- ISO (1998B):** *Environmental Management - Life Cycle Assessment – Life cycle impact assessment*. Draft International Standard ISO DIS 14042 (prEN ISO 14042), 12.11.1998, International Organization for Standardization (ISO), Genf.
- ISO (1998C):** *Environmental Management - Life Cycle Assessment – Life cycle interpretation*. Draft International Standard ISO DIS 14043, 1.9.1998, International Organization for Standardization (ISO), Genf.
- KASSER U. & M. PÖLL (1999):** *Ökologische Bewertung mit Hilfe der Grauen Energie*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 307, Ökobilanzen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- KAUFMANN U. 1998:** *Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz 1990-1997*, Dr. Eicher & Pauli AG, Liestal, Bundesamt für Energie (BFE, Hrsg.), Bern
- KWT 1999:** *Sachbilanzdaten Herstellung Wärmepumpen*, persönliche Mitteilungen, KWT AG Belp, September 1999
- LINDE 1999:** *Sachbilanzdaten Supermarkt-Kälteanlagen*, persönliche Mitteilungen von Hr. C. Schneider, LKS KälteSchweiz AG/ Linde, Pratteln, Oktober 1999
- MARCH CONSULTING GROUP 1999:** *UK Emissions of HFCs, PFCs and SF6 and Potential Emission Reduction Options*, Department of the Environment, Transport and the Regions, London
- MCCULLOCH A., N.J. CAMPBELL 1998:** The Climate Change Implications of Producing Refrigerants, in *Pre-prints of the IIR Gustav Lorentzen Conference, Natural Working Fluids '98, Joint Meeting of the International Institute of Refrigeration Sections B and E, June 2-5, 1998 Oslo Norway*, S. 148-155.
- MÉNARD M., R. DONES, U. GANTNER 1998:** *Strommix in Ökobilanzen; Auswirkungen der Strommodellwahl für Produkt- und Betriebs-Ökobilanzen*, Projekt GaBE, PSI-Bericht Nr. 98-17, PSI Villigen

- REINER 1999:** *Sachbilanzdaten Herstellung Kaltwassersatz und Solekühlsatz*, persönliche Mitteilungen von G. Reiner, Sulzer Fríoherm, Rothenburg, Sept. 1999
- SAND J.R., S.K. FISCHER, V.D. BAXTER 1997:** *Energy and Global Warming Impacts of HFC Refrigerants and Emerging Technologies*, Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (AFEAS), U.S. Department of Energy (DOE), Hrsg., Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
- SCHALLER 1999:** *Sachbilanzdaten Supermarkt-Kälteanlagen*, Stücklisten und Ausschreibungsunterlagen von Anlagen erstellt durch SchallerUto Bern, in den Jahren 1996 bis 1999
- SCHINDLER 1999:** *Sachbilanzdaten Supermarkt-Kälteanlagen*, persönliche Mitteilungen von Hr. D. Schindler, Schindler AG Kühl- und Energietechnik, Münchenstein, September 1999
- SEVEN-AIR 1994:** *Ökobilanz für Monobloc-Verschaltungsbleche*, der Firma Klima-Gerätebau Seven-Air, Grobanalyse ausgeführt durch Roos + Partner AG, Oberkirch
- SCHMITZ S., H.-J. OELS, A. TIEDEMANN 1994:** *Ökobilanz für Getränkeverpackungen*, Fassung vom 7. Juni 1994 mit Ergänzungen vom 10. August für den Workshop vom 22./23.9.1994
- TASSOU S.A., K.M. LAU (1998):** *Low energy cooling technologies*, in S.A. Tassou (Hrsg.), *Low-energy Cooling Technologies for Buildings*, ImechE Seminar Publication 1998-7, Professional Engineering Publishing Limited, Bury St. Edmunds and London, p. 1-22
- TRUTTMANN 1999:** *Sachbilanzdaten Supermarkt-Kälteanlagen*, persönliche Mitteilungen von Hr. R. Kälin, Truttmann Kühlanlagen AG, Oftringen, November 1999
- UN-ECE 1994:** *Protocol concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes*, Economic Commission for Europe, United Nations, New York & Geneva
- UNEP 1998:** *1997 Update of the Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer*, The Ozone Secretariat, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya (<http://www.unep.ch/ozone/handbook-update.htm>; 9.11.99)
- UNIVERSAL 1999:** *Sachbilanzdaten Supermarkt-Kälteanlagen*, persönliche Mitteilungen von Hr. Hüftli, Kühlanlagen Universal AG Zürich, Volketswil, September 1999
- VAN GERWEN R.J.M. & M. VERWOERD 1998:** *Dutch Regulations for Reduction of Refrigerant Emissions: Experiences with a Unique Approach over the period 1993-1998*, paper presented at *Refrigeration/ Air conditioning and Regulations for Environmental Protection - A Ten Years Outlook for Europe*, Symposium organisiert durch ASERCOM, anlässlich der IKK, Nürnberg
- WEBB G. & J. WINFIELD 1992:** *New routes to alternative halocarbons*, in *Chemistry in Britain, November 1992*, S. 996-997,1002
- WEIBEL T. 1996:** *Vergleichende Umweltrelevanz des Einsatzes alternativer Kältemittel in Kompressions-Wärmepumpen und -Kälteanlagen*, Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW), Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW, Hrsg.), Bern
- WELLS G.M. 1991:** *Handbook of Petrochemicals and Processes*, Gower Publishing Company Limited, Brookfield, Vermont, USA
- WETTSTEIN 1999:** *Sachbilanzdaten NH<sub>3</sub>-Aggregat*, persönliche Mitteilungen von A. Steiner, Wettstein AG Gümmligen, September 1999
- WOLFER M. & H. SEILER 1999:** *Brennbare Kältemittel: Risikoanalyse, Produkthaftpflicht und Strafrecht*, Bundesamt für Energie, Bern
- WPZ 1999A:** *Prüfresultate*, <http://www.wpz.ch/deutsch/fram-d13.htm>, Zugriff im November 1999.
- WPZ 1999B:** *WPZ-Bulletin Nr. 20; Juni 1999*, Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Winterthur-Töss, Winterthur
- ZEHAG 1999:** *Sachbilanzdaten Supermarkt-Kälteanlagen*, persönliche Mitteilungen von Hr. H. Eicher, LKS KälteSchweiz AG/ Zehag, Buchs, Oktober 1999
- ZIMMERMANN P., G. DOKA, F. HUBER, A. LABHARDT, M. MÉNARD 1998:** *Ökoinventare von Entsorgungsprozessen; Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen*, 2., revidierte Auflage, Gruppe Energie – Stoffe - Umwelt, ETH Zürich, ENET-Verlag, Bern
- ZOGG M. 1998:** *Wärme-Kraft-Kopplung in Kombination mit Kompressionswärmepumpen*, in M. Zogg (Hrsg.) *Wärme-Kraft-Kopplung - heute und morgen*, Tagungsband zur 5. UAW-Tagung, 12. Mai 1998, Ingenieurschule Burgdorf, Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW), Bundesamt für Energie (BFE), Bern, S. 7-17