

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

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

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

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Energie (BFE)

Autor: Dr. R. Frischknecht

Begleitgruppe: 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 Friotherm, Rothenburg

Zitiervorschlag: R. Frischknecht, 1999: Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel; Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen, Anhang zum Schlussbericht, Bundesamt für Energie, Bern

Bezugsquelle: ENET, Nr. 9933303, Fax: 031-352 77 56, E-Mail: n+1@email.ch

© BFE, Bern 1999

Inhalt

1	SACHBILANZDATEN KÄLTEMITTEL UND WEITERE GASE	1
1.1	Herstellung der Ausgangsrohstoffe.....	1
1.1.1	Ethylen (CH_2CH_2).....	1
1.1.2	Ethylen Dichlorid (1,2-Dichlorethan, $\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{Cl}$).....	1
1.1.3	Methylenchlorid (Methylendichlorid, Dichlormethan, CH_2Cl_2).....	2
1.1.4	Trichlormethan (Chloroform, CHCl_3) und Tetrachlormethan (CCl_4).....	3
1.1.5	Trichlorethylen (CHClCCl_2) und Perchlorethylen (CCl_2CCl_2).....	4
1.2	Herstellung Chlordifluormethan (CHF_2Cl , H-FCKW 22).....	5
1.3	Herstellung 1,1,1,2-Tetrafluorethan (CH_2FCF_3 , FKW 134a).....	7
1.3.1	Beschreibung des Herstellungsverfahrens.....	7
1.3.2	Bedarf und Anwendung.....	7
1.3.3	Sachbilanzdaten.....	7
1.3.4	Sachbilanzdaten eines Europäischen Herstellers.....	10
1.4	Herstellung Difluormethan (CH_2F_2 , FKW 32).....	11
1.5	Herstellung 1,1,1-Trifluorethan (CF_3CH_3 , FKW 143a).....	12
1.6	Herstellung Pentafluorethan (CF_3CHF_2 , FKW 125).....	13
1.7	Kältemittelgemische.....	13
1.7.1	Allgemeines.....	13
1.7.2	Herstellung Isceon 59.....	14
1.7.3	Herstellung R-404A.....	14
1.7.4	Herstellung R-407C.....	15
1.7.5	Herstellung R-410A.....	16
1.8	Herstellung Ammoniak (NH_3 , R-717).....	16
1.8.1	Ammoniak-Markt.....	16
1.8.2	Herstellungsverfahren.....	17
1.8.3	Diskussion der Datengrundlage.....	18
1.8.4	Zusammenstellung der Eingabedaten.....	23
1.9	Herstellung Kohlendioxid (CO_2 , R-744).....	26
1.10	Herstellung Propan ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$, R-290) und nButan (C_4H_{10}).....	27
1.11	Schweissgase.....	28
1.11.1	Acetylen.....	28
1.11.2	Sauerstoff, Stickstoff und Argon.....	29
1.11.3	Helium.....	29
2	SACHBILANZDATEN HERSTELLUNG DER ANLAGEKOMPONENTEN	30
2.1	Allgemeine Annahmen.....	30
2.2	Kompressoren (inkl. Motoren).....	30
2.2.1	Wärmepumpen.....	30
2.2.2	Kaltwasser- und Solesatz.....	32
2.2.3	Supermarkt-Kälteanlage.....	34
2.3	Verdampfer.....	34
2.3.1	Erdsonden für Sole/Wasser-Wärmepumpen.....	34
2.3.2	Verdampfer für Luft/Wasser-Wärmepumpen.....	35
2.4	Wärmetauscher.....	36
2.4.1	Wärmepumpen.....	36
2.4.2	Kaltwasser- und Solesatz.....	36

2.4.3	Supermarkt-Kälteanlage	38
2.5	Rückkühler und Rückkühlerkreislauf	38
2.5.1	Kaltwasser- und Solesatz	38
2.5.2	Supermarkt-Kälteanlage	39
2.6	Kältemittelsammler	40
2.6.1	Wärmepumpen	40
2.6.2	Kaltwasser- und Solesatz	41
2.6.3	Supermarkt-Kälteanlagen	41
2.7	Umwälzpumpen und Ventilatoren	41
2.7.1	Allgemeines	41
2.7.2	Pumpen	41
2.7.3	Ventilatoren	42
2.8	Verteilleitungen und Isolation	43
2.8.1	Kaltwasser- und Solesatz	43
2.8.2	Supermarkt-Kälteanlagen	43
2.9	Zusammenbau der Anlagen	45
2.9.1	Wärmepumpen	45
2.9.2	Kaltwasser- und Solesatz	51
2.9.3	Supermarkt Kälteanlagen	55
3	SACHBILANZDATEN BETRIEB DER ANLAGEN	60
3.1	Wärmepumpen	60
3.2	Kaltwasser- und Solesatz	65
3.2.1	Einleitung	65
3.2.2	Kaltwassersatz	66
3.2.3	Solesatz	68
3.3	Supermarkt-Kälteanlagen	70
4	SACHBILANZDATEN ENTSORGUNG DER ANLAGEN	74
4.1	Übersicht	74
4.2	Wärmepumpen	74
4.3	Kaltwasser- und Solesatz	78
4.4	Supermarkt-Kälteanlage	82
5	WEITERE SACHBILANZEN	84
5.1	Diverse Materialien und Komponenten	84
5.1.1	Isolation (Synthetischer Kautschuk, Armaflex®)	84
5.1.2	Schallschutzhaube Wärmepumpen	85
5.2	Strombereitstellung	86
5.2.1	Strommodelle	86
5.2.2	Strommix Schweiz unter Berücksichtigung des Stromhandels	89
5.2.3	Strommix UCPTe	90
5.2.4	Strombereitstellung mit Erdgas-Blockheizkraftwerk	90
5.2.5	Strombereitstellung mit GuD-Gaskraftwerk	93
6	LECKAGERATEN UND EMISSIONEN VON KÄLTEMITTELN	96
7	ABBAUPRODUKTE DER H-FCKWS UND FKWS	98
7.1	Einführung	98
7.2	Abbau von Kältemitteln zu Trifluoressigsäure (TFA), Fluss- und Salzsäure	98

7.3	Umweltwirkung von Trifluoressigsäure (TFA).....	100
7.4	Stoffdaten Trifluoressigsäure (TFA).....	101
8	BEWERTUNGSFAKTOREN	104
8.1	Einführende Bemerkung.....	104
8.2	Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie.....	104
8.3	Treibhauspotenzial.....	104
8.4	Ozonschichtabbauendes Potenzial.....	106
8.5	Versäuerungspotenzial.....	106
8.6	Sommersmogbildendes Potenzial.....	107
8.7	Ökotoxizität.....	109
8.8	Emission radioaktiver Isotope.....	112
9	KENNDATEN VON SUPERMARKT-KÄLTEANLAGEN	114

1 Sachbilanzdaten Kältemittel und weitere Gase

1.1 Herstellung der Ausgangsrohstoffe

Die Herstellung von Natriumchlorid (NaCl), Chlorgas (Cl₂) und Flusssäure (HF) wird gemäss den Angaben aus den Ökoinventaren von Energiesystemen (Frischknecht et al. 1996:Anhang A:S.18ff./102) abgebildet.

1.1.1 Ethylen (CH₂CH₂)

Die Herstellung von Ethylen wird gemäss Frischknecht et al. (1996:Anhang A:30ff.) modelliert. Grundlagen bilden dort CSG/ Tellus (1992) und PWMI (1993).

1.1.2 Ethylen Dichlorid (1,2-Dichlorethan, ClCH₂CH₂Cl)

Ethylen Dichlorid wird aus Ethylen und Chlor durch direkte Chlorierung oder aus Ethylen und Chlorwasserstoff durch Chlorierung und Oxychlorierung hergestellt. Die Reaktionen lauten:

$C_2H_4 + Cl_2 \rightarrow ClCH_2CH_2Cl$ (direkte Chlorierung), sowie

$C_2H_4 + 2HCl + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow C_2H_4Cl_2 + H_2O$ (Chlorierung und Oxychlorierung)

Bei der direkten Chlorierung mit einer Ausbeute von 96 bis 98% (Ethylen) resp. 89% (Chlor) werden für die Herstellung von 1000 kg Ethylen Dichlorid 315kg Ethylen und 800kg Chlor benötigt (direkte Chlorierung). Beim Verfahren mit Oxychlorierung werden bei Ausbeuten von 93 bis 97% (Ethylen) resp. 96 bis 99% (Chlorwasserstoff) 302kg Ethylen, 760kg Chlorwasserstoff und rund 170 kg Sauerstoff benötigt (Wells 1991:178ff.). Bei der Oxychlorierung fallen chlorierte Kohlenwasserstoffe wie Ethylchlorid, 1,1,2-Trichlorethan und Chloral an. Die mit Wasser gequenchte und von Chloral gereinigte Abluft wird entweder emittiert oder komprimiert und rezykliert (Wells 1991:180). Letzteres wird gemacht, wenn reiner Sauerstoff (anstelle von Luft) eingesetzt wird (Ullmann 1986b:269).

In Boustead & Hancock (1979:333) werden Angaben zum Energiebedarf nach verschiedenen Verfahren gemacht. Die dort aufgeführten Daten stammen aus Ayers et al. (1974). Die direkte Chlorierung (in der Dampfphase) benötigt gemäss dieser Quelle knapp 1.1MJ Strom und 21.4MJ Heizöl pro kg Ethylen Dichlorid (das Chemicals Economics Handbook von SRI consultants gibt gar eine Netto-Dampfproduktion von 0.07t an), die kombinierte Chlorierung/ Oxychlorierung in der Gasphase benötigt 3.6MJ Strom und 34.8MJ Heizöl pro kg Ethylen Dichlorid. In Campbell & McCulloch werden 9.5MJ pro kg eingesetzt und als Erdgas kategorisiert. Der dort verwendete Wert wurde aus Roberts (1976), einer ähnlich alten Quelle abgeleitet. In dieser Studie wird der Mittelwert der beiden Prozesse nach Angaben aus Boustead & Hancock verwendet, wobei hier Erdgas als Brennstoff angenommen wird. Oft werden beide Prozesse zusammen und parallel gefahren, weil die Herstellung von Ethylen Dichlorid oft mit der Vinyl Chlorid Produktion gekoppelt ist. Die Oxychlorierung wird gebraucht, um den Chlorwasserstoff aus der Vinyl Chlorid Monomer Produktion auszugleichen.

Im weiteren wird angenommen, dass 1% des produzierten Ethylen Dichlorids und zusätzlich 0.1% 1,1,2-Trichlorethan und Ethyl Chlorid durch Leckagen und mit der Abluft in die Atmosphäre emittiert werden (siehe [Tab. 1.1](#)). Als Ausgangsprodukt in der Herstellung von CFCs, H-CFCs und HFCs werden keine Transportdienstleistungen verbucht, da von einer integrierten Produktion ausgegangen wird.

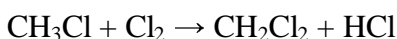
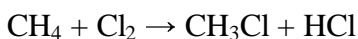
Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Ethylen Dichlorid (1,2-Dichlorethan) kg
Feedstock:		
Chlor	kg	0.4
Ethylen	kg	0.31
Chlorwasserstoff HCl (Salzsäure)	kg	0.38
Sauerstoff ab Luftzerlegung	kg	0.085
Energieträger:		
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	2.8E-5
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ	2.4E-6
Produkt:		
Ethylen Dichlorid (1,2-Dichlorethan)	kg	1
Wasser §	kg	0.095
Emissionen Luft:		
Ethylen Dichlorid	kg	0.01
Ethylen Chlorid p	kg	0.001
1,1,2-Trichlorethan p	kg	0.001

Tab. 1.1: Eingabedaten des Moduls 1kg "Ethylen Dichlorid (1,2-Dichlorethan)" (siehe Text).
§: Wird als Nebenprodukt betrachtet und nicht in eco^{mc} verbucht.

1.1.3 Methylenchlorid (Methylenchlorid, Dichlormethan, CH₂Cl₂)

Methylenchlorid wird durch Chlorierung aus Methan gewonnen (Wells 1991:251ff.). Eine Mischung aus Methan, Methyl Chlorid und Chlor wird in einen auf 350-400°C erhitzten Nickelreaktor geführt, wo sie zu einer Vielzahl von Chlormethan-Verbindungen reagiert (siehe auch Trichlormethan (Chloroform)). Danach werden die Gase gekühlt und mit Säure gewaschen. Nach der Verdichtung, Trocknung und Kühlung werden die einzelnen Verbindungen durch eine Destillation getrennt. Allfällige Säuren und Chlor werden mit Natronlauge ausgewaschen.

Nichtreagiertes Methan und Methylchlorid werden in den Reaktor zurückgeführt. Durch geschickte Wahl des Verhältnisses von Methan und Methylchlorid kann eine Methylenchloridausbeute von bis zu 70 Gew.-% erreicht werden. Daneben entsteht noch Chloroform (CHCl₃) und Tetrachlorkohlenstoff (CCl₄), die verwertet werden. Die Reaktion lautet:



Der Technische Reinheitsgrad beträgt 99%, wobei es mit Ethylalkohol oder Methylalkohol (0.1-0.2 Gew.-%) stabilisiert wird. Der Feedstockbedarf für 1'000 kg Methylenchlorid (und 860kg Salzsäure) beträgt theoretisch 190kg Methan und 1'670kg Cl₂. Die produzierte Salzsäure wird im Sinne einer konservativen Annahme als Nebenprodukt betrachtet und erhält keine Aufwendungen und Emissionen zugerechnet¹.

Angaben über den Energiebedarf bei der Herstellung liegen nicht vor. Da Di- und Trichlormethan in denselben Anlagen produziert werden, wird der Energiebedarf von Trichlormethan auch hier eingesetzt. Der Methan-Feedstock wird mit Erdgas angenähert, ohne das Abtrennen höherer Kohlenwasserstoffe zu berücksichtigen.

Es wird angenommen, dass 1% des Produktes durch Leckagen und Abluft emittiert wird.

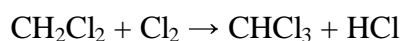
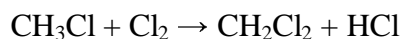
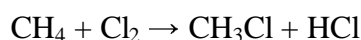
¹ Aufgrund des bescheidenen ökonomischen Wertes der Salzsäure (im Vergleich zu Dichlormethan) würde eine Allokation mit ökonomischen Parametern nahe bei den hier verwendeten Allokationsfaktoren (1 für Dichlormethan, 0 für Salzsäure) liegen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Methylenchlorid kg
Feedstock:		
Chlor	kg	1.67
Erdgas HD-Abnehmer Euro	TJ	8.8E-6
Energieträger:		
Erdgas in Industrieheizung >100kW Euro	TJ	1.1E-5
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTE	TJ	1.6E-6
Produkt:		
Methylenchlorid	kg	1
Salzsäure §	kg	0.86
Emissionen Luft:		
Dichlormethan p	kg	0.01

Tab. 1.2: Eingabedaten des Moduls 1kg "Methylenchlorid" (siehe Text).
§: Wird als Nebenprodukt betrachtet und nicht in eco^{mc} verbucht.

1.1.4 Trichlormethan (Chloroform, CHCl₃) und Tetrachlormethan (CCl₄)

Chloroform und Tetrachlormethan können durch Chlorierung von Methan oder durch Chlorierung/ Hydrochlorierung von Methyl Chlorid hergestellt werden. Zur Herstellung von CCl₄ stehen zudem CS₂ und Cl₂ als Ausgangsrohstoffe zur Verfügung, die hier aber nicht weiter betrachtet werden. Die Chlorierung von Methan erfolgt analog wie die Herstellung von Methylenchlorid (siehe Abschnitt 1.1.3), wobei hier das Molverhältnis auf 1:2.6 von Methan zu Chlor eingestellt wird. Die Reaktionen lauten:



Der Rohstoffeinsatz für die Chloroformproduktion beträgt theoretisch 140kg Methan und 1'780kg Chlor und für Tetrachlorkohlenstoff 110kg Methan und 1'845kg Chlor. Die Ausbeute von Methan beträgt bei Chloroform zwischen 70 und 85%, bei Tetrachlormethan 95%.

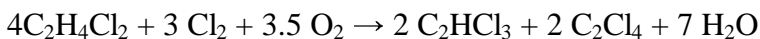
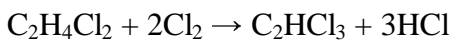
In Papasavva & Moomaw (1998) werden für Tetrachlormethan 0.538kWh pro Mol oder 12.6MJ pro kg Produkt basierend auf Literaturangaben verwendet. Dieser Energiebedarf wird - unter der Annahme 90% Erdgas, 10% Strom - für Tri- und Tetrachlormethan verwendet, da die Produkte gekoppelt produziert werden. Es wird angenommen, dass 1% des Produktes durch Leckagen und Abluft emittiert wird.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Chloroform kg	Tetrachlor- methan kg
Feedstock:			
Chlor	kg	1.78	1.845
Erdgas HD-Abnehmer Euro	TJ	6.5E-6	5.1E-6
Energieträger:			
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	1.1E-5	1.1E-5
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTTE	TJ	1.6E-6	1.6E-6
Produkt:			
Chloroform	kg	1	0
Tetrachlormethan	kg	0	1
Salzsäure §	kg	0.92	0.955
Emissionen Luft:			
Trichlormethan (Chloroform) p	kg	0.01	0.001
Tetrachlormethan p	kg	0.001	0.01

Tab. 1.3: Eingabedaten der Module 1kg "Chloroform" und 1kg "Tetrachlormethan" (siehe Text).
§: Wird als Nebenprodukt betrachtet und nicht in eco^{mc} verbucht.

1.1.5 Trichlorethylen (CHCl₂CCl₂) und Perchlorethylen (CCl₂CCl₂)

Trichlorethylen und Perchlorethylen werden zusammen durch Chlorierung und Oxychlorierung von Ethylen Dichlorid hergestellt (Wells 1991:355). Das Verhältnis von Trichlorethylen und Perchlorethylen kann durch die Wahl des Chlor - Ethylen Dichlorid - Verhältnisses variiert werden.



Andere Produktionswege sind die Chlorierung von Acetylen oder die Herstellung aus Kohlenwasserstoffen oder chlorierten Abfällen durch Chlorolysis. Diese Route wird hier nicht weiter berücksichtigt.

Die Herstellung von einer Tonne Perchlorethylen und 790 kg Trichlorethylen (sowie ca. 215kg Wasser) erfordert gemäss Wells (1991:278) 1'190kg Ethylen Dichlorid, 640kg Chlor und 385kg Sauerstoff. Die Ausbeute beträgt ca. 90%.

Nach Angaben des Stanford Research Institutes aus dem Jahre 1978, zitiert in Campbell & McCulloch (1998), beträgt der Energiebedarf zur Herstellung von Trichlorethylen und Perchlorethylen 31.6 resp. 32.6 MJ pro kg Produkt.

Die Feedstock-Aufwendungen werden aufgrund der stöchiometrischen Bedarfe zwischen Tri- und Perchlorethylen aufgeteilt². Der Energiebedarf wird gemäss den in Campbell & McCulloch (1998) zitierten Werten eingesetzt. Es wird angenommen, dass 10% des Energiebedarfs mit Strom, der Rest mit Erdgas gedeckt wird.

Analog zu den andern Modulen werden prozessspezifische Emissionen von 1 resp. 0.1% des Produktes resp. Kuppelproduktes angenommen.

² Trichlorethylen: $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2 + \frac{1}{2}\text{Cl}_2 + \frac{3}{4}\text{O}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{HCl}_3 + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$

Perchlorethylen: $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2 + 1\text{Cl}_2 + 1\text{O}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{Cl}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Diese arbiträre Aufteilung wird gewählt, da der von Herstellerseite bevorzugte Aufteilungsschlüssel nicht bekannt ist.

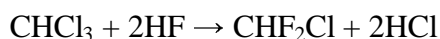
Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Trichlorethylen kg	Perchlorethylen kg
Feedstock:			
Chlor	kg	0.27	0.426
Ethylen Dichlorid (1,2-Dichlorethan)	kg	0.753	0.595
Sauerstoff ab Luftzerlegung	kg	0.209	0.22
Energieträger:			
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	2.8E-5	2.9E-5
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTE	TJ	3.6E-6	3.6E-6
Produkt:			
Trichlorethylen	kg	1	0
Perchlorethylen	kg	0	1
Wasser §	kg	0.116	0.123
Emissionen Luft:			
Trichlorethylen p	kg	0.01	0.001
Perchlorethylen p	kg	0.001	0.01

Tab. 1.4: Eingabedaten der Module 1kg "Trichlorethylen" und 1kg "Perchlorethylen" (siehe Text).
§: Wird als Nebenprodukt betrachtet und nicht in eco^{mc} verbucht.

1.2 Herstellung Chlordifluormethan (CHF₂Cl, H-FCKW 22)

Die Herstellung von Chlordifluormethan erfolgt normalerweise in flüssiger Phase entweder über Tetrachlormethan oder Chloroform (Trichlormethan) und Fluorwasserstoff mit einem Antimon-Halogenid-Katalysator. Die Ingenieur-Anforderungen für die Prozesse zur Herstellung von HCFC-22 und CFC-12 sind derart ähnlich, dass viele Hersteller sogenannte "Swing-Anlagen" betreiben resp. betrieben haben. Dabei kann durch Änderungen beim Feedstock und den Betriebsbedingungen des Reaktors und der Destillationskolonnen das eine oder andere Produkt hergestellt werden (Campbell & McCulloch 1998:240).

Die Reaktion lautet:



Der Feedstockbedarf für 1kg HCFC 22 (und 0.76kg koproduzierter Chlorwasserstoff) beträgt gemäss Campbell & McCulloch (1998) 1.54kg Trichlormethan und 0.5kg Fluorwasserstoff bei einer Ausbeute von 95%³.

Bei der Herstellung muss (zumindest) in Grossbritannien noch mit substanziellen Emissionen von Trifluormethan (HFC-23) gerechnet werden. March Consulting Group (1999:36) gibt eine Bandbreite von 3 bis 5 Gew.-% der produzierten Menge Chlordifluormethan (HCFC-22) an, währenddem im Werk von DuPont de Nemours im Jahr 1992 0.35 Gew.-% HFC-23 entwichen sind (Ros 1994). Zusätzlich sind bei Du Pont de Nemours auch noch 0.38 Gew.-% HCFC-22 und 0.0011 Gew.-% HCFC-21 entwichen, wobei sich diese Emissionsfaktoren jeweils auf die Anlagenkapazität von 35'000 Tonnen beziehen.

In dieser Studie werden in Analogie zu den andern Kältemitteln prozessspezifische Emissionen (Herstellung, Abfüllen, Lagerung, Logistik) von 2% HCFC-22 verbucht. Zudem werden in Anlehnung an March Consulting Group (1999:A.10) 1.5Gew.-% HFC-23 als prozessspezifische Emission verbucht⁴.

³ Aufgrund der Stöchiometrie sind bei 95% Ausbeute jedoch leicht abweichende Mengen zu gewärtigen: 1.45kg Chloroform und 0.49kg HF sowie 0.84kg Chlorwasserstoff als Nebenprodukt.

⁴ Durch Rückgewinnung/ Verbrennen und verbesserte Anlagekontrolle kann der Emissionsfaktor nach 1999 von durchschnittlich 4 auf 1.5Gew.-% gesenkt werden (March Consulting Group 1999:A.10).

Der spezifische Energiebedarf bei der Herstellung von H-CFC-22 (und CFC-12) aus Trichlor- resp. Tetrachlormethan wird in Campbell & McCulloch (1998) mit 2MJ thermisch und weniger als 1.8MJ Strom pro kg H-CFC-22 angegeben. In Weibel (1996) werden, basierend auf Herstellerangaben 2.7MJ thermisch und 0.37MJ Strom pro kg H-CFC-22 ausgewiesen. In Papasavva & Moomaw (1998) werden zur Herstellung von 1kg CFC-12 0.68kWh Strom und 4MJ Dampf bei 0.5bar und 4.7MJ Dampf bei 1.85bar ausgewiesen. Hier werden die Angaben aus Campbell & McCulloch weiterverwendet und eine Gasfeuerung unterstellt.

Die Transportdistanzen werden mit 1'000 resp. 200km (Transport in die Schweiz resp. zur Kälteanlage) angenommen. Für den Transport der Flusssäure ins Werk werden zusätzlich 500km Lkw 40t angenommen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kältemittel R22 frei Fabrik kg
Feedstock:		
Chloroform	kg	1.54
Fluorwasserstoff HF (Flusssäure)	kg	0.50
Energieträger:		
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	2.0E-6
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ	1.8E-7
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	0.25
Transport LKW 28 t	tkm	0.2
Produkt:		
Kältemittel R22 frei Fabrik	kg	1
Salzsäure §	kg	0.76
Emissionen Luft:		
R22 H-FCKW p	kg	0.02
R23 FKW p	kg	0.015
Trichlormethan (Chloroform) p	kg	1.0E-4
Emissionen Wasser:		
Chlor. Trichlormethan f	kg	1.1E-5
Kohlenwasserstoffe gesamt f ¹⁾	kg	1.0E-6
Ion Antimon Sb f	kg	3.6E-5
Ion Zink f	kg	4.3E-6
Entsorgungsdienstleistungen:		
Raffinereschlamm in SAVA ²⁾	kg	4.4E-3
Abfall CH95: in KVA ³⁾	kg	1.2E-3

Tab. 1.5: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kältemittel R22 frei Fabrik" (siehe Text).

§: Wird als Nebenprodukt betrachtet und nicht in eco^{mc} verbucht.

¹⁾: Fluorierte Kohlenwasserstoffe als Kohlenwasserstoffe allg. angenommen.

²⁾: Kohlenwasserstoffhaltige Abfälle als Raffinereschlamm angenommen (Zusammensetzung des Raffinereschlammes siehe Frischknecht et al. (1996:Anhang F:35).

³⁾: Betriebsabfall als durchschnittlicher schweizerischer Siedlungsabfall angenommen.

Gemäss Ros (1994) fallen bei der Herstellung von CFC-113 und CFC-114, HCFC-22, Tetrafluorethan und Hexafluorpropan noch Antimon- Zink- und Kohlenwasserstoffemissionen an (36, 4.3 resp. 1mg/kg Kapazität). Bei der HCFC-22-Produktion sind zudem 11mg Trichlormethan pro kg Anlagenkapazität zu gewärtigen.

Kohlenwasserstoffhaltige und übrige chemische Abfälle in der Grössenordnung von 4.4g pro kg Anlagenkapazität und 1.2g/kg Betriebsabfall werden in Ros (1994) für alle Produktionsprozesse ausgewiesen und in dieser Studie berücksichtigt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kältemittel R22 frei Lager Schweiz kg
Feedstock: Kältemittel R22 frei Fabrik	kg	1
Transportdienstleistungen: Transport LKW 40 t	tkm	1.0
Transport LKW 28 t	tkm	0.2
Produkt: Kältemittel R22 frei Lager Schweiz	kg	1

Tab. 1.6: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kältemittel R22 frei Lager Schweiz".

1.3 Herstellung 1,1,1,2-Tetrafluorethan (CH₂FCF₃, FKW 134a)

1.3.1 Beschreibung des Herstellungsverfahrens

Die Herstellung von teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffen erfolgt aus Acetylen oder Olefinen und Fluorwasserstoff oder von chlorierten Kohlenwasserstoffen und wasserfreiem Fluorwasserstoff bei Anwesenheit diverser Katalysatoren (Kirk-Othmer 1994:503). Hauptsächlich, kommerzielle Herstellungsprozesse sind (ECETOC 1995a:5):

- Hydrofluorierung von Trichlorethylen, via 1-Chlor-1,1,1-Trifluorethan (HCFC-133a)
- Isomerisation/Hydrofluorierung von 1,1,2-Trichlor-1,2,2-Trifluorethan (CFC 113) zu 1,1-Dichlor-1,2,2,2-Tetrafluorethan (CFC-114a), gefolgt von einer Dechlorierung von CFC 114a.
- Hydrofluorierung von Tetrachlorethylen (Perchlorethylen) zu 1-Chlor-1,2,2,2-Tetrafluorethan (HCFC-124) und anschliessender Hydrodechlorierung zu Tetrafluorethan.

Aus McCulloch & Campbell (1998:151) geht zusätzlich hervor, dass der Produktionsweg über Perchlorethylen (C₂Cl₄) auch über CFC 114a zu HFC 134a führen kann.

Es fällt auf, dass alle kommerziellen Produktionswege über Chlorfluorkohlenwasserstoffe (CFC-113, CFC-114a) oder teilhalogenierte Chlorfluorkohlenwasserstoffe (HCFC-133a, HCFC-123, HCFC-124) führen, die eine ozonabbauende Wirkung haben (siehe Unterkap. 8.4).

1.3.2 Bedarf und Anwendung

Der Bedarf wird im Jahre 2000 gemäss der Prognose von McCulloch (1994:172) bei ca. 150kt liegen und bis 320kt im Jahre 2025 steigen.

Neben Anwendungen in der Kältetechnik sind auch Anwendungen als Blähmittel für Polyuretanschäume und als Treibmittel in medizinischen Aerosolen in der Entwicklung.

1.3.3 Sachbilanzdaten

Der Feedstockbedarf beträgt gemäss Campbell & McCulloch (1998) 1.36kg Trichlorethylen und 0.83kg Fluorwasserstoff bei der Produktion aus Trichlorethylen (bei 95% Ausbeute) resp. 1.8kg Perchlorethylen, 0.77kg Chlor, 0.86kg Fluorwasserstoff und 0.041kg Wasserstoff mit Perchlorethylen als Ausgangsrohstoff (bei 90% Ausbeute). Neben dem Kältemittel entsteht dabei noch 1.07⁵ resp. 2.2kg Chlorwasserstoff. Der Chlorwasserstoff wird in diesem Projekt als Nebenpro-

⁵ In Campbell & McCulloch (1998) werden irrtümlicherweise 0.92kg ausgewiesen.

dukt betrachtet, welches keine Aufwendungen und Emissionen aus diesen Herstellungsprozessen zugeteilt erhält.

Gemäss McCulloch & Campbell (1998) und Campbell & McCulloch (1998) beträgt der Energiebedarf (inkl. Herstellung der Rohstoffe) je nach Route 64 GJ pro Tonne (über Perchlorethylen) resp. 105GJ pro Tonne (über Trichlorethylen), mit einem hohen Anteil Elektrizität⁶. Der Weg von Perchlorethylen bis HFC-134a benötigt 1.9MJ Strom, 3.8MJ Dampf und 5.3MJ Erdgas pro kg HFC-134a (Campbell & McCulloch 1998). Der Weg von Trichlorethylen bis HFC-134a braucht rund 38MJ thermische Energie und 5.4MJ Elektrizität pro kg HFC-134a.

Papasavva & Moomaw (1998) gehen, basierend auf Daten von Hoechst des Jahres 1992, von einem Prozessenergiebedarf von 23MJ pro kg HFC-134a aus (ausgehend vom Feedstock Trichlorethylen und Fluorwasserstoff). Für die gesamte Synthese weisen sie einen Energiebedarf von knapp 60MJ pro kg HFC-134a aus.

In McCulloch & Campbell (1998) werden Prozessemissionen in der Höhe von 77kg CO₂-Äquiv. pro kg HFC-134a ausgewiesen⁷. Dabei 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 Ozonschicht-abbauende Wirkung haben.

Wird angenommen, dass je 1 Gew.-% CFC-113 (Zwischenprodukt der Perchlorethylen-Route) und HCFC-124 (Zwischenprodukt der Trichlorethylen-Route) sowie 1.9 Gew.-% HFC-134a emittiert wird, so resultieren Emissionsfaktoren von 77.4kg CO₂-Äquivalenten und von 0.0082kg CFC-11-Äquivalenten⁸.

Banks & Sharratt (1996) basieren ihre Untersuchung auf den Informationen der Bewilligungen der britischen Umweltbehörde zur ICI-Produktion von Klea 134a, Fluothane, Arcton 133a, Arcton 22 und Arcton 114/115. Daraus haben sie die in Tab. 1.7 aufgelisteten Emissionsfaktoren abgeleitet (unter konservativen Annahmen wie 8000 Betriebsstunden bei Nennkapazität, Nichtberücksichtigen intermittierender Emissionen). Zudem werden die spezifischen Rohstoff- und Abfallmengen angegeben.

⁶ Es wird in McCulloch & Campbell (1998) ein CO₂-Emissionsfaktor von 90'000kg/TJ angenommen.

⁷ Durchschnitt der AFEAS-Mitgliedsfirmen.

⁸ Houghton et al. (1996) machen für CFC-114a und HCFC-133a keine Angaben über das Treibhauspotenzial. Wäre HFC-134a alleine für die 77kg CO₂-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).

	Einheit	Produktion von HFC-134a kg
Feedstock:		
Fluorwasserstoff	kg	0.9747
Trichlorethylen	kg	1.3351
Energieträger:		
Heizöl	MJ	11.5
Erdgas	MJ	11.5
Produkt:		
Kaeltemittel R134a frei Fabrik	kg	1
Salzsäure Produkt	kg	0.367
Emissionen Luft:		
Trichlorethylen	g	1.46
CO ₂	g	118
CO	g	9.94
Dichlorethylen	g	21.9
Chlorierte Kohlenwasserstoffe	g	4.35
Tetrachlorethylen	g	0.36
Ethylen	g	1.65
Vinyl Chlorid	g	10.1
HFC-1122 (Monochlorodifluorethylen, C ₂ HClF ₂)	g	0.0006
HCFC-133a	g	4.96
HFC-134a	g	1.86
HFC-143a	g	7.96
HFC-125	g	0.54
Zur Entsorgung:		
Gase zur Verbrennung	kg	0.022
Salzsäure-Abfall	kg	0.733
Flusssäure Abfall	kg	0.172
Spezial und Sonderabfälle (z.B. Katalysatoren)	kg	0.273

Tab. 1.7: Daten der ICI-Produktion von HFC-134a in Grossbritannien gemäss der Interpretation von Banks & Sharratt (1996).

Das Treibhauspotenzial der Prozessemissionen liegt etwa bei 34kg CO₂-Äquiv. was knapp der Hälfte des AFEAS-Wertes entspricht. Die gesamten Verluste liegen bei ca. 1.5 Gew.-%. Gemäss den hier gemachten Annahmen liegen sie mit knapp 4 Gew.-%, dem AFEAS-Durchschnitt, deutlich höher. Da aber die Daten von Banks & Sharratt nicht repräsentativ sind, und nur den Herstellungsprozess über Trichlorethylen berücksichtigt, werden sie in dieser Studie nicht weiter verwendet. Sie bestätigen jedoch in der Tendenz die erhöhten Emissionen halogener Substanzen.

Für diese Studie wird angenommen, dass HFC-134a zu je 50% über Per- und Trichlorethylen hergestellt wird. Für den Transport von Chlor und Flusssäure ins Werk werden 500km Lkw 40t verbucht. Der Transport zum Verbraucher wird im Modul "Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz" verbucht.

Angaben zu Emissionen ins Wasser oder zum Abfallaufkommen in der verfügbaren Literatur sind mit Ausnahme der zitierten keine zu finden.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaeltemittel R134a frei Fabrik kg
Feedstock:		
Trichlorethylen	kg	0.68
Perchlorethylen	kg	0.9
Fluorwasserstoff HF (Flusssaure)	kg	0.845
Chlor	kg	0.385
Wasserstoff H2	kg	0.02
Energieträger:		
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	2.4E-5
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ	3.7E-6
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	0.62
Produkt:		
Kaeltemittel R134a frei Fabrik	kg	1
Salzsäure §	kg	1.64
Emissionen Luft:		
R134a FKW p	kg	0.019
R113 FCKW p	kg	0.01
R124 H-FCKW p	kg	0.01

Tab. 1.8: Eingabedaten der Module 1kg " Kaeltemittel R134a frei Fabrik " (siehe Text).
§: Wird als Nebenprodukt betrachtet und nicht in eco^{mc} verbucht.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz kg
Feedstock:		
Kaeltemittel R134a frei Fabrik	kg	1
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	1.0
Transport LKW 28 t	tkm	0.2
Produkt:		
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz	kg	1

Tab. 1.9: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz".

1.3.4 Sachbilanzdaten eines Europäischen Herstellers

Als Variante zu den oben aufgeführten Sachbilanzdaten stehen die Ökobilanzdaten ("von der Wiege bis zum Fabrikator") eines westeuropäischen Herstellers zur Verfügung (HFC-134a 1999). Die Daten sind vertraulich und dürfen hier nicht im einzelnen veröffentlicht werden. Die Produktionsanlage verfügt über eine Nachverbrennung, weshalb die Kältemittlemissionen gegenüber dem Durchschnitt der Produktion der AFEAS⁹-Mitgliedsfirmen deutlich tiefer liegen.

⁹ AFEAS: Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study

1.4 Herstellung Difluormethan (CH₂F₂, FKW 32)

Prozesse zur Herstellung von Difluormethan sind immer noch in Entwicklung. Mögliche Wege sind die Hydrodechlorierung von Chlordifluormethan (HCFC-22) und die Hydrofluorierung von Dichlormethan (Methylenchlorid) (ECETOC 1995b:4). Der Bedarf an Difluormethan dürfte nach Prognosen von McCulloch (1994:172) von praktisch Null im Jahr 2'000 aus auf ca. 100'000t pro Jahr im Jahre 2025 steigen.

Der hauptsächliche Anwendungsbereich liegt in der Tieftemperaturkälte, wo es insbesondere in Mischungen mit andern Fluorkohlenwasserstoffen eingesetzt wird (z.B. R-407C, R-410A).

Die Reaktionen lauten:



Der Feedstockbedarf wird stöchiometrisch hergeleitet und eine Ausbeute von 95% unterstellt. Daraus resultiert für die Hydrodechlorierung ein Bedarf von 1.66kg HCFC-22 und 0.04kg Wasserstoff und für die Hydrofluorierung ein Bedarf von 1.72kg Methylenchlorid und 0.81kg Flusssäure. Als Nebenprodukte entstehen 1.4 resp. 0.7kg Chlorwasserstoff. Für dieses Projekt wird angenommen, dass 50% aus HCFC-22 und 50% aus Methylenchlorid hergestellt wird.

Als Energieaufwand werden in Ermangelung von belastbaren Angaben 10MJ thermisch und 2MJ Strom eingesetzt¹⁰. Schadstoffe, die während des Prozesses emittiert werden, sind das Produkt selbst (Annahme 2Gew.-%, inkl. Abfüllen und Lagerung), die Ausgangsstoffe sowie HCFC-31 als Zwischenprodukt (je 0.5Gew.-%).

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaeltemittel R32 frei Fabrik kg
Feedstock:		
Methylenchlorid	kg	0.86
Kaeltemittel R22 frei Fabrik	kg	0.83
Wasserstoff H2	kg	0.02
Fluorwasserstoff HF (Flusssaeure)	kg	0.405
Energieträger:		
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	1.0E-5
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ	2.0E-6
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	0.18
Produkt:		
Kaeltemittel R32 frei Fabrik	kg	1
Salzsäure §	kg	1.05
Emissionen Luft:		
Dichlormethan p	kg	0.005
R22 H-FCKW p	kg	0.005
R31 H-FCKW p	kg	0.005
R32 FKW p	kg	0.02

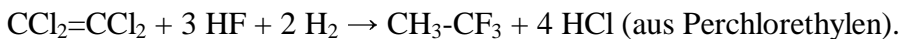
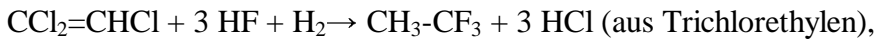
Tab. 1.10: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kaeltemittel R32 frei Fabrik" (siehe Text).
§: Wird als Nebenprodukt betrachtet und nicht in eco^{mc} verbucht.

¹⁰ Überlegung: Prozess einfacher als die Herstellung von HFC-134a aber aufwendiger als die Herstellung von HCFC-22.

Entsorgungsdienstleistungen oder Verbrauch an Prozesskatalysatoren werden mangels Daten nicht verbucht. Die Transportdienstleistungen (500km Lkw 40t) beschränken sich auf die Flusssäure, da angenommen wird, dass die chlorierten Kohlenwasserstoffe (HCFC-22 und Methylenchlorid) auf demselben Firmengelände hergestellt werden.

1.5 Herstellung 1,1,1-Trifluorethan (CF₃CH₃, FKW 143a)

Es stehen keine Unterlagen über Produktionswege von HFC-143a zur Verfügung. Es werden dieselben Ausgangsrohstoffe wie bei HFC-134a angenommen, nämlich Tri- und Perchlorethylen. Die Reaktionen lauten summarisch:



Der Feedstockbedarf ergibt sich aus der Stöchiometrie (bei Annahme von 95% Ausbeute). Bei der Hydrofluorierung von Trichlorethylen werden 1.64kg Trichlorethylen, 0.75kg Fluorwasserstoff und 0.025kg Wasserstoff benötigt. Bei der Herstellung aus Perchlorethylen sind es 2.08kg Perchlorethylen, 0.75kg Fluorwasserstoff und 0.05kg Wasserstoff. Als Nebenprodukt fallen 1.3 resp. 1.73kg Chlorwasserstoff an.

Der Energiebedarf wird analog der HFC-134a-Herstellung verbucht. Als prozessspezifische Emissionen werden in diesem Falle 2Gew.-% HFC-143a und in Analogie zur HFC-134a-Herstellung je 1% CFC-113 und HCFC-124 verbucht.

Für den Fluorwasserstoff werden 500km Lkw 40t verbucht, das Perchlorethylen wird direkt auf dem Firmenareal hergestellt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kältemittel R143a frei Fabrik kg
Feedstock:		
Trichlorethylen	kg	0.82
Perchlorethylen	kg	1.04
Fluorwasserstoff HF (Flusssäure)	kg	0.75
Wasserstoff H ₂	kg	0.038
Energieträger:		
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	2.4E-5
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ	3.7E-6
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	0.38
Produkt:		
Kältemittel R143a frei Fabrik	kg	1
Salzsäure §	kg	1.52
Emissionen Luft:		
R143a FKW p	kg	0.02
R113 FCKW p	kg	0.01
R124 H-FCKW p	kg	0.01

Tab. 1.11: Eingabedaten der Module 1kg " Kältemittel R143a frei Fabrik " (siehe Text). §: Wird als Nebenprodukt betrachtet und nicht in eco^{mc} verbucht.

1.6 Herstellung Pentafluorethan (CF₃CHF₂, FKW 125)

Es stehen keine Unterlagen über Produktionswege von HFC-125 zur Verfügung. Das Kältemittel HCFC-124 kann über Hydrofluorierung aus Perchlorethylen oder Hydrodechlorierung von CFC-114a hergestellt werden (ECETOC 1994b:5). Hier soll die Route vom Ausgangsrohstoff Perchlorethylen bilanziert werden. Die Reaktion lautet summarisch:



Der Feedstockbedarf ergibt sich aus der Stöchiometrie (bei Annahme von 95% Ausbeute). Es werden 1.45kg Perchlorethylen und 0.87kg Fluorwasserstoff benötigt. Als Nebenprodukt fallen 1.21kg Chlorwasserstoff an.

Der Energiebedarf wird analog der HFC-134a-Herstellung verbucht. Als prozessspezifische Emissionen werden in diesem Falle 2Gew.-% HFC-125 und in Analogie zur HFC-134a-Herstellung je 1% CFC-113 und HCFC-124 verbucht.

Für den Fluorwasserstoff werden 500km Lkw 40t verbucht, das Perchlorethylen wird direkt auf dem Firmenareal hergestellt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaeltemittel R125 frei Fabrik kg
Feedstock:		
Perchlorethylen	kg	1.45
Fluorwasserstoff HF (Flusssaure)	kg	0.87
Energieträger:		
Erdgas in Industrieheizung >100kW Euro	TJ	2.4E-5
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ	3.7E-6
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	0.42
Produkt:		
Kaeltemittel R125 frei Fabrik	kg	1
Salzsäure §	kg	1.21
Emissionen Luft:		
R125 FKW p	kg	0.02
R113 FCKW p	kg	0.01
R124 H-FCKW p	kg	0.01

Tab. 1.12: Eingabedaten der Module 1kg " Kaeltemittel R125 frei Fabrik " (siehe Text).
§: Wird als Nebenprodukt betrachtet und nicht in eco^{mc} verbucht.

1.7 Kältemittelgemische

1.7.1 Allgemeines

Für die Kältemittelgemische Isceon 59, R-404A, R-407C und R-410A werden hier lediglich die Mischungs- und Transportaufwendungen verbucht. Der Herstellungsaufwand der einzelnen Komponenten wird in je eigenen Unterkapiteln behandelt.

Es wird für alle vier hier betrachteten Gemische ein Strombedarf für das Mischen und Wägen der Komponenten von 10kWh pro Tonne Produkt und eine Emission bei Mischen und Verpacken von 1 Gew.-% des Gemisches angenommen. Diese Annahmen wurden durch einen englischen Hersteller bestätigt (Mulliss 1999).

1.7.2 Herstellung Isceon 59

ISCEON 59 ist ein zeotropes Gemisch von HFC-134a (50%), HFC-125 (46.5%) und Butan (R-600, 3.5%). Die Bilanzierung dieser Komponenten sind in den entsprechenden Unterkapiteln beschrieben. Da dieses Produkt durch nur einen Hersteller in Grossbritannien hergestellt wird, wird hier eine Distanz von 1'500km in ein Schweizer Regionallager und von dort 200km zur Kälteanlage angenommen. Der Transport erfolgt per Lkw 40 resp. 28 Tonnen. Zusätzlich werden die Komponenten zum britischen Hersteller transportiert (Annahme 500km per Lkw 40t).

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaeltemittel Isceon 59 frei Lager Schweiz kg
Feedstock:		
Kaeltemittel R134a frei Fabrik	kg	0.50
Kaeltemittel R125 frei Fabrik	kg	0.465
Butan ab Lager Schweiz	kg	0.035
Energieträger:		
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTTE	TJ	3.6E-8
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	2.0
Transport LKW 28 t	tkm	0.2
Produkt:		
Kaeltemittel Isceon 59 frei Lager Schweiz	kg	1
Emissionen Luft:		
R134a FKW p	kg	0.005
R32 FKW p	kg	0.0047
Butan p	kg	0.00035

Tab. 1.13: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kaeltemittel Isceon 59 frei Lager Schweiz" (siehe Text).

1.7.3 Herstellung R-404A

R-404A ist ein Gemisch von R-134a (4%), R-125 (44%) und R-143a (52%). Die Bilanzierung dieser Komponenten sind in den entsprechenden Unterkapiteln beschrieben. Hier werden lediglich die Mischungs- und Transportaufwendungen bilanziert. Die Transportdistanz wird hier mit 1'000 resp. 200km (Transport in die Schweiz resp. zur Kälteanlage) angenommen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kältemittel R404A frei Lager Schweiz kg
Feedstock:		
Kältemittel R134a frei Fabrik	kg	0.04
Kältemittel R125 frei Fabrik	kg	0.44
Kältemittel R143a frei Fabrik	kg	0.52
Energieträger:		
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTE	TJ	3.6E-8
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	1.0
Transport LKW 28 t	tkm	0.2
Produkt:		
Kältemittel R-404A frei Lager Schweiz	kg	1
Emissionen Luft:		
R134a FKW p	kg	0.0004
R32 FKW p	kg	0.0044
R143a FKW p	kg	0.0052

Tab. 1.14: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kältemittel R-404A frei Lager Schweiz" (siehe Text).

1.7.4 Herstellung R-407C

R-407C ist ein Gemisch von R-134a (52%), R-125 (25%) und R-32 (23%). Die Bilanzierung dieser Komponenten sind in den entsprechenden Unterkapiteln beschrieben. Hier werden lediglich die Mischungs- und Transportaufwendungen bilanziert. Die Transportdistanz wird hier mit 1'000 resp. 200km (Transport in die Schweiz resp. zur Kälteanlage) angenommen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kältemittel R407C frei Lager Schweiz kg
Feedstock:		
Kältemittel R134a frei Fabrik	kg	0.52
Kältemittel R125 frei Fabrik	kg	0.25
Kältemittel R32a frei Fabrik	kg	0.23
Energieträger:		
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTE	TJ	3.6E-8
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	1.0
Transport LKW 28 t	tkm	0.2
Produkt:		
Kältemittel R-407C frei Lager Schweiz	kg	1
Emissionen Luft:		
R134a FKW p	kg	0.0052
R32 FKW p	kg	0.0025
R143a FKW p	kg	0.0023

Tab. 1.15: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kältemittel R-407C frei Lager Schweiz" (siehe Text).

1.7.5 Herstellung R-410A

R-410A ist ein Gemisch von R-125 (50%) und R-32 (50%). Die Bilanzierung dieser Komponenten sind in den entsprechenden Unterkapiteln beschrieben. Hier werden lediglich die Mischungs- und Transportaufwendungen bilanziert. Die Transportdistanz wird analog zu den andern Kältemitteln mit 1'000 resp. 200km (Transport in die Schweiz resp. zur Kälteanlage) angenommen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaeltemittel R410A frei Lager Schweiz kg
Feedstock:		
Kaeltemittel R125 frei Fabrik	kg	0.50
Kaeltemittel R32a frei Fabrik	kg	0.50
Energieträger:		
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTTE	TJ	3.6E-8
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	1.0
Transport LKW 28 t	tkm	0.2
Produkt:		
Kaeltemittel R-410A frei Lager Schweiz	kg	1
Emissionen Luft:		
R32 FKW p	kg	0.0050
R143a FKW p	kg	0.0050

Tab. 1.16: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kaeltemittel R-410A frei Lager Schweiz" (siehe Text).

1.8 Herstellung Ammoniak (NH₃, R-717)

1.8.1 Ammoniak-Markt

Der Stickstoffverbrauch für Dünger weltweit betrug im Jahre 1996/1997 knapp 83 Mio. Tonnen (IFA 1999). In Westeuropa wurden im selben Zeitraum rund 10 Mio. Tonnen verbraucht. Inklusive technische Stickstoffanwendungen lag der Verbrauch an Stickstoff bei rund 11.5 Mio. Tonnen. Die Stickstoff-Produktion erreichte im selben Zeitraum in Westeuropa knapp 9 Mio. Tonnen. Da 99% des für Dünger verwendeten Stickstoffs aus Ammoniak gewonnen wird, werden hier für Ammoniak die Handelsverhältnisse des Düngerstickstoffs unterstellt.

Die weltweiten Produktionskapazitäten sind in den letzten Jahrzehnten von rund 50 Mio. Tonnen (1970) auf rund 120 Mio. Tonnen Stickstoff gestiegen. Über ein Drittel dieser Kapazitäten stehen in Asien, gut 20% in der ehemaligen UdSSR und gut 10% in Westeuropa (siehe Tab. 1.17).

in %	1970	1975	1980	1990
Afrika		2.1		3.0
Asien		25.9		35.4
Lateinamerika		3.9		5.3
Nordamerika		21.4		13.8
Osteuropa		12.8		9.7
Westeuropa		18.8		11.3
ehem. UdSSR		15.1		21.5
Produktionskapazität [Mio. Tonnen]	50.64		101.58	119.57

Tab. 1.17: Weltweite Ammoniumproduktions-Kapazität und deren geographische Verteilung (Kirk-Othmer 1992:677)

Die Europäische Handelsbilanz von Stickstoff verzeichnet nach zwei Jahrzehnten mit Exportüberschüssen seit 1988 einen Importsaldo zwischen 1 bis über 2.5 Mio. Tonnen (EFMA 1999). Demgegenüber verzeichnen die Stickstoffhandelsbilanzen von Nordamerika, dem Nahen Osten, der zentral- und osteuropäischen Staaten, der ehem. UdSSR und, weniger ausgeprägt, von Afrika Exportüberschüsse. Deshalb erstaunt es nicht, dass von den rund 2.7 Mio. Tonnen Stickstoff, die 1997/98 nach Westeuropa importiert wurden, über 70% aus zentral- und osteuropäischen Ländern sowie Norwegen, Libyen und Marokko stammen (EFMA 1999).

1.8.2 Herstellungsverfahren

Ammoniak wird mithilfe von Wasser, Luft und Energie hergestellt. Als Energiequelle werden in der Regel Kohlenwasserstoffe eingesetzt, welche gleichzeitig den Wasserstoff liefern. Teilweise kommt aber auch Elektrizität zum Einsatz. Rund 77% der weltweiten Ammoniak-Kapazität basiert auf Erdgas. In Europa sind derzeit hauptsächlich zwei Prozesstypen in Betrieb:

- Dampfpreformieren von Erdgas oder andern leichten Kohlenwasserstoffen (Flüssiggas (Natural Gas Liquids), verflüssigtes Erdölgas (Liquified Petroleum Gas), Naphtha).
- Partielle Oxidation von Schweröl oder Vakuumrückständen (auch Kunststoffabfälle).

Danach wird das Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid konvertiert und das Synthesegasgemisch von Schwefel und Kohlendioxid gereinigt. Anschliessend wird es komprimiert und zur Ammoniak-synthese geführt. Diese findet bei Temperaturen von über 350°C und Drücken zwischen 150 und 250 bar und unter Verwendung von Katalysatoren statt.

in %	1983	1987
Erdgas und Erdgas hybrid	73.9	75.6
Naphtha, Schweröl, Kondensat	12.4	10.5
Koksofengas, Raffineriegas, Wasserstoff	4.3	3.9
Steinkohle	10.8	10.0
Total	100.0	100.0

Tab. 1.18: Feedstocks der weltweiten Ammoniumproduktions-Kapazität (Kirk-Othmer 1992:651)

Partielle Oxidation wird in einer mit Gas betriebenen Ammoniakanlage eingesetzt. Kohlevergasung und Wasserelektrolyse werden in Europa nicht mehr eingesetzt (EFMA 1995a). Weltweit wurde im Jahre 1987 zu über 70% Erdgas als Feedstock eingesetzt, Steinkohle und Schweröl und Kondensate zu je 10%, und Koksofen- und Raffineriegas sowie Wasserstoff mit 4% (siehe [Tab. 1.18](#)). In Westeuropa wurden im Jahre 1982/1983 gemäss Ullmann (1985:176) 72% Erdgas und 13% Naphtha eingesetzt. In diesem Projekt wird von 85% Dampfpreformierung mit Erdgas und 15% partieller Oxidation von Schweröl ausgegangen.

Der Gesamtenergiebedarf liegt heute zwischen 40 und 50% oberhalb des thermodynamischen Minimums. Mehr als die Hälfte dieser Verluste wird durch Kompressionsverluste verursacht. Das praktisch erreichbare Minimum dürfte bei ca. 130% des theoretischen, thermodynamischen Minimums liegen (EFMA 1995).

Typische Anlagengrößen bewegen sich zwischen 1'000 bis 1'500 t pro Tag, bei neueren Anlagen sind 1'800t pro Tag üblich. Der Auslastungsgrad heutiger, grosser Ammoniak-Anlagen liegt üblicherweise bei über 90%.

1.8.3 Diskussion der Datengrundlage

In Frischknecht et al. (1996:Anhang A:83ff.), Weibel (1996:Anhang A) und Habersatter et al. (1998:462) liegen Prozessdaten zur Herstellung von Ammoniak vor. Die Daten in Frischknecht et al. (1996:Anhang A) wurden von Boustead & Hancock (1979) (Energiebedarf) und US-amerikanischen Quellen (prozessbedingte Emissionen) abgeleitet. In Weibel (1996: Anhang A) wurden zusätzlich zu den genannten Quellen die IDEA-Datenbank des IIASA (International Institute of Applied Systems Analysis, Laxenburg) und branchenspezifisches Wissen verwendet. Habersatter et al. (1998) stützen sich auf eine Diplomarbeit aus dem Jahre 1993 über die Entstehung mit Ammoniak, durchgeführt an der Liechtensteinischen Ingenieurschule und der Ingenieurschule Chur.

In diesem Projekt werden die Arbeiten der European Fertilizer Manufacturer Association (EFMA 1995) berücksichtigt.

Produkte:

Ammoniak wird in den drei Reinheitsgraden technisch (99.5%), kältetechnisch (99.98%) und metallurgisch (99.99%) hergestellt. Der maximale Wasseranteil beträgt entsprechend 0.5 Gew.-%, 0.015 und 0.0033 Gew.-%, der Ölgehalt maximal 5mg/kg, 3 resp. 2 mg/kg NH₃.

Kohlendioxid wird in Dampfreformier-Anlagen im Verhältnis von 1.15 bis 1.30kg CO₂ pro kg NH₃ produziert (EFMA 1995). Bei der partiellen Oxidation von Schwerölen liegt die Kohlendioxid-Produktion bei 2.0 bis 2.6 kg pro kg NH₃. In diesen Zahlen sind die Emissionen der Energiebereitstellung nicht inbegriffen.

Energiebedarf:

Der Energiebedarf zur Herstellung von Ammoniak ist abhängig vom Alter der Anlage und vom eingesetzten Feedstock (Erdgas, Schweröl, Kohle). Gemäss Kirk-Othmer (1992:655) beträgt der Gesamtenergiebedarf von Reformieranlagen zwischen 29 und knapp 40MJ pro kg NH₃, für Oxidationsanlagen aus den siebziger Jahren rund 41 MJ/kg und für Kohlevergasungsanlagen zwischen knapp 49 und 43 MJ/kg (siehe Tab. 1.19). Neue Vergasungstechnologien erreichen Werte knapp unter 40MJ/kg.

MJ/kg NH ₃	Erdgas Reformierung	Naphtha Reformierung	Partielle Oxidation Schweröl	Kohle Vergasung	Wasser Elektrolyse
1970er Anlagen	35.9	39.6	40.6	48.5	44.3
1980er Anlagen	29.0	32.0		43.2	

Tab. 1.19: Gesamtenergiebedarf der Ammoniak-Herstellung in Abhängigkeit des Feedstock (Kirk-Othmer 1992:655).

Mithilfe der Angaben aus EFMA (1995) lässt sich der Energiebedarf in in Feedstock und Brennstoff unterteilen.

Bedarf Feedstock:

Die Angaben über den Feedstockbedarf schwanken in den genannten Quellen zwischen 23.5 und 32 MJ/kg NH₃ (oberer Heizwert). In EFMA (1995) wird ein Feedstockbedarf von 24.5 bis 32 MJ pro kg NH₃ in Abhängigkeit der Technologie angegeben. In dieser Studie wird von 25MJ Erdgas pro kg NH₃ für Dampfreformieren und von 32MJ pro kg NH₃ für Partielle Oxidation ausgegangen (jeweils unterer Heizwert)¹¹.

Bedarf Brennstoff:

Der Energiebedarf liegt gemäss den zitierten Quellen zwischen 2.6 und knapp 13 MJ pro kg NH₃ (oberer Heizwert). EFMA gibt je nach Technologie Werte zwischen 4 und 10MJ pro kg NH₃ an für Anlagen, welche neben Feedstock und Brennstoff keinen Energieinput aufweisen (insb. keinen Strombezug). In dieser Studie wird angenommen, dass beim Dampfreformieren kein Strombezug (und kein Dampfverkauf) erfolgt und bei der Partiellen Oxidation 10% des Endenergiebedarfs durch Strom (aus dem Europäischen Verbundnetz) gedeckt wird.

MJ/kg NH ₃	EFMA 1995a (Angabe H ₀)				dieses Projekt (Angabe H _U)	
	Konventionelles Reformieren	Überschussluft-Reformieren	Autothermisches Reformieren	Partielle Oxidation	Erdgas Reformierung	Partielle Oxidation Schweröl
Feedstock	24.5	26.0	27.5	32.0	25	32
Brennstoff	8 – 10	6 – 8	4 – 8	6 - 10	6.0	8 ¹⁾
Gesamt	32.5 – 34.5	32.0 – 34.5	31.5 – 35.5	38.0 – 42.0	31.0	40.0

Tab. 1.20: Typischer Feedstock- und Brennstoffbedarf der Ammoniak-Herstellung in effizienten Anlagen, in Abhängigkeit des Verfahrens (EFMA 1995), sowie Werte für dieses Projekt.
¹⁾: davon 0.8MJ/kg Elektrizität

Bedarf Wasser:

Der Wasserbedarf wird in EFMA (1995) mit 1.5kg (Dampfreformieren) resp. 1.2kg (Partielle Oxidation) pro kg NH₃ angegeben. In Habersatter et al. (1998) werden 0.922kg pro kg NH₃ angegeben und Weibel (1996) weist nur unwesentlich mehr als den stöchiometrisch notwendigen Bedarf aus (0.76kg/kg NH₃). Die Daten aus EFMA (1995) werden weiter verwendet, wobei angenommen wird, dass es sich um entkarbonisiertes Wasser handelt.

Der Verlust innerhalb des Dampfkreislaufs wird nach Frischknecht et al. (1996:Anhang A:82) mit 2% angenommen. Der Bedarf an vollentsalztem Wasser beträgt in Analogie zum Speisewasserbedarf in Kraftwerken (6m³ pro TJ_{in}) rund 0.06kg pro kg NH₃.

¹¹ Da die Sachbilanzen der Energieträgerbereitstellung auf den unteren Heizwert bezogen sind, werden hier die diese Werte weiterverwendet.

Bedarf Luft:

Der Luftbedarf (insb. N₂-Bedarf) des Dampfreformierprozesses liegt bei ca. 1.1kg Luft pro kg NH₃ (EFMA 1995), derjenige der partiellen Oxidation bei rund 4kg Luft pro kg NH₃. Luft wird jedoch in dieser Studie nicht verbucht, da mit deren "Gewinnung" keine umweltrelevanten Aktivitäten verbunden sind.

Bedarf Lösungsmittel und Additive:

Die Art und Mengen der Additive für die Heizwasserkreisläufe unterscheidet sich nicht von denjenigen anderer Anlagen (EFMA 1995). Dementsprechend wird dieser Bedarf indirekt über den Bedarf an vollentsalztem Wasser berücksichtigt.

Der Lösungsmittel-Bedarf zur CO₂-Rückgewinnung wird mangels Angaben nicht berücksichtigt.

Bedarf Katalysatoren:

In konventionellen Reformierungsanlagen werden pro Jahr rund 57m³ Katalysatoren benötigt (Jahreskapazität 500'000t NH₃). Die Dichte der Katalysatoren liegt je nach Typ zwischen 2.1 und knapp 3kg pro Liter (Ullmann 1986a:164), woraus ein Katalysatorbedarf von ca. 0.35kg pro Tonne NH₃ resultiert. In den sechziger Jahren bestanden die Katalysatoren hauptsächlich aus FeO und Fe₂O₃ (Ullmann 1985:164) mit einem Eisenanteil von 60 bis 70 Gew.-% (bei vorreduzierten Katalysatoren bis 90 Gew.-%). Nach EFMA (1995) und Kirk-Othmer (1992:659) werden bei der Reformierung hochlegierte Chrom-Nickel-Rohre verwendet, die mit nickelhaltigen Katalysatoren gefüllt sind. Zudem kommen Kobalt/ Molybdän (Entschwefelung), Eisenoxid/ Chromoxid resp. Kupferoxid/ Zinkoxid (Konversion) Katalysatoren zum Einsatz.

In Anlehnung an die Zusammensetzung von Raffinerie-Katalysatoren (Frischknecht et al. 1996:Teil IV:291ff.) wird hier die in Tab. 1.21 aufgeführte Katalysatorzusammensetzung und mangels präziserer Sachbilanzdaten Roheisen als Trägermaterial angenommen (als Annäherung an Eisenoxid).

	Anteil [Gew.-%]
Kobalt	3
Molybdän	12
Nickel	5
Roheisen (als Trägermaterial) ¹⁾	80
Total	100

Tab. 1.21: Zusammensetzung des für die Ammoniak-Herstellung mittels Dampf-Reformierung verwendeten, durchschnittlichen Katalysators. Annahmen siehe Text.
¹⁾: eigentlich Magnetit.

Bedarf Transportdienstleistungen:

Durch den relativ hohen Importanteil von über 20% sind auch entsprechend zusätzliche Transporte erforderlich. Es werden zusätzliche 2'000km Lkw 40t für 25% der NH₃-Produktion verbucht (0.5tkm/kg NH₃). Für die Europäische Produktion und die Lieferung in Schweizerische Regionallager werden in Anlehnung an Frischknecht et al. (1996:Teil III:30) 600km Bahn und 50km Lkw 28t eingesetzt (0.6tkm resp. 0.05tkm pro kg NH₃). Die Transporte werden im Modul "Ammoniak frei Regionallager Schweiz" verbucht.

Bedarf Entsorgungsdienstleistungen:

Gemäss EFMA (1995:30) ist mit weniger als 0.2kg Abfall (v.a. gebrauchte Katalysatoren) pro Tonne NH₃ zu rechnen. In dieser Studie werden 0.15kg Trägermaterial (als Zeolithe angenommen) in Inertstoffdeponie verbucht.

Bedarf Infrastruktur:

Über die Infrastruktur von Ammoniak-Anlagen liegen keine Informationen vor. In einer ersten Abschätzung werden die Infrastrukturaufwendungen der Raffinerie gemäss Frischknecht et al. (1996:Teil IV:137ff.) eingesetzt.

Emissionen Luft:

Es treten Emissionen aus dem Primärreformer und/ oder den Heizkesseln, der Schwefelabscheidung und -rückgewinnung bei partieller Oxidation, und der CO₂-Abscheidung auf. Zudem sind nichtkontinuierliche und flüchtige Emissionen sowie NH₃ und Methanol in Prozesskondensaten zu gewärtigen, wobei letztere aber auch zurückgewonnen werden können.

Gemäss ECETOC (1994a:19) betragen die durchschnittlichen NH₃-Emissionen von Ammoniak-Anlagen in Westeuropa 0.005g pro kg NH₃. In INFRAS & econcept (1995) werden drei Quellen zitiert, die Werte zwischen 0.1 und 1.5 resp. 1.8 und 2.1g pro kg Ammoniak ausweisen. INFRAS & econcept (1995) verwendet für sein Emissionsinventar 1990 den Emissionsfaktor 1.8g pro kg NH₃.

Von den insgesamt anfallenden 1.15 bis 1.3 resp. 2.0 bis 2.6 kg CO₂ pro kg NH₃ wird nur ein Teil zurückgewonnen. Bei einer Produktionskapazität weltweit von ca. 120 Mio. Tonnen (siehe Tab. 1.17) werden rund 150 Mio. Tonnen CO₂ produziert. Der Bedarf an CO₂ liegt jedoch einiges tiefer. Der Bedarf der USA an festem, flüssigem und gasförmigem CO₂ betrug 1987 rund 7.6 Mio. Tonnen (Kirk-Othmer 1993:49). Davon stammt nur ein Teil aus Ammoniak-Anlagen. Somit muss davon ausgegangen werden, dass ein Grossteil des CO₂ emittiert wird. In dieser Studie nehmen wir an, dass 10% des CO₂ rückgewonnen wird. Der Rest wird emittiert.

Die CO₂-Emissionen aus der partiellen Oxidation lassen sich aus dem Feedstock (Annahme Schweröl, Zusammensetzung gemäss Frischknecht et al. 1996:Teil IV:18) errechnen. Aus dem Brennstoffbedarf ergibt sich ein Emissionsfaktor von 0.56kg CO₂ pro kg NH₃. Der Feedstock führt zu zusätzlich anfallenden 2.5kg CO₂ pro kg NH₃. Davon werden 90% oder 2.25kg emittiert.

pro kg NH ₃	Einheit	Dampfreformierung		Partielle Oxidation	
		Reformer	Entfernen CO ₂	Vergasung, Oxidation	Entfernen CO ₂
CO ₂	kg	0.5	1.15 – 1.3	k.A.	2.0 – 2.6
NO _x als NO ₂	g	0.6 – 1.3		k.A.	
SO ₂	g	0.33 - 6.5		k.A.	
CO	g	< 0.03		k.A.	
NMVOOC	g	k.A.		k.A.	
Partikel	g	k.A.		k.A.	
CH ₄	g	k.A.		k.A.	
NH ₃	g	k.A.		k.A.	
Mono-ethyl-amin	g	0	0.01 – 0.02	0	0.01 – 0.02

Tab. 1.22: Emissionen bei der Ammoniak-Herstellung gemäss EFMA (1995). k.A.: keine Angaben

Tab. 1.22 zeigt Emissionswerte verschiedener Quellen. Dabei fallen die recht grossen Unterschiede von z.T. mehr als einer Grössenordnung auf. In dieser Studie werden v.a. die Angaben von EFMA (1995) verwertet.

pro kg NH ₃	Einheit	Habersatter et al. (1998)	Weibel 1996	Frischknecht et al. 1996
		energie- und prozessbe- dingt	gemäss IDEA 1991, EPA 1988	gemäss EPA 1988
CO ₂	kg	0.436	1.21	1.223
NO _x als NO ₂	g	0.304	3.95	5.4
SO ₂	g	0.01	13	1.3
CO	g	0.025	0.55	8
NMVOC	g	0.928	4.9	4.9
Partikel	g	0	0.5	0.5
CH ₄	g	7.14	0.04	0.04
NH ₃	g	0	1.68	0
Mono-ethyl-amin ²⁾	g	0	0.17	0

Tab. 1.23: Emissionen bei der Ammoniak-Herstellung gemäss verschiedenen Quellen.

¹⁾: Abgasvolumen

²⁾: Wird mangels Bewertungsmöglichkeit nicht verbucht.

Die Emissionen werden einerseits durch die Energiebereitstellung (Erdgas- resp. Schwerölfeuerung) und durch Prozessemissionen verursacht. Die Feuerungsemissionen werden analog einer europäischen Schweröl- resp. einer Erdgas-Industriefeuerung abgebildet, wie sie in Frischknecht et al. (1996:Teil IV:219ff. resp. Teil V:66ff.) bilanziert worden sind. Dadurch ergeben sich u.a. die in Tab. 1.24 aufgeführten Emissionsfaktoren¹².

Um auf die in Tab. 1.22 aus EFMA (1995) übernommenen Emissionsfaktoren für CO₂ und NO_x zu gelangen, werden beim Dampfreformierungsprozess zusätzlich prozessbedingte Emissionen verbucht. Bei der Zusammenstellung der Eingabedaten (siehe unten) werden lediglich die prozessbedingten Emissionen separat ausgewiesen, da die restlichen, energiebedingten Schadstoffe wie erwähnt über die Prozesse Erdgas resp. Schweröl in Industriefeuerung berücksichtigt werden.

Zusätzlich zu diesen Emissionen kommen CO₂-Emissionen aus Separation von CO₂ resp. der unvollständigen CO₂-Rückgewinnung dazu. Es sind dies 0.96 kg CO₂ pro kg NH₃ bei der Dampfreformierung und 1.8 kg CO₂ pro kg NH₃ bei der partiellen Oxidation. Zudem werden weitere, prozessbedingte Emissionen bei der partiellen Oxidation gemäss EFMA (1995) berücksichtigt.

¹² In den erwähnten Feuerungsmoduln werden zusätzliche Schadstoffe, insbesondere Schwermetalle, berücksichtigt.

pro kg NH ₃	Einheit	Dampfreformierung			Partielle Oxidation		
		Energie ¹⁾	Prozess ²⁾	Total	Energie ¹⁾	Prozess ³⁾	Total
CO ₂	kg	0.35	0.15+0.96	1.46	0.56	1.8	2.34
NO _x als NO ₂	g	0.28	0.72	1.0	1.2		1.2
SO ₂	g	3.0E-3		3.0E-3	8.6	4.0	12.6
CO	g	8.4E-2		8.4E-2	0.11	0.11	0.22
NMVOG	g	1.8E-2		1.8E-2	0.022		0.022
Partikel	g	1.2E-3		1.2E-3	0.36	0.1	0.46
CH ₄	g	1.2E-2		1.2E-2	0.022		0.022
Methanol	g					0.4	0.4
H ₂ S	g					1.4E-3	1.4E-3

Tab. 1.24: Energie- und prozessbedingte Emissionen bei der Ammoniak-Herstellung.
¹⁾: Die energiebedingten Schadstoffe werden bei den entsprechenden Feuerungsmodulen verbucht. Dazu kommen weitere Schadstoffemissionsfaktoren gemäss Frischknecht et al. (1996:Teil IV:219ff. und V:66ff.).
²⁾: Aus Reformierung und CO₂-Abtrennung
³⁾: Aus Entschwefelung (basierend auf EFMA (1995:26) berechnet mit einem Abluftstrom von 3.1Nm³/kg NH₃ = 4kg Luft/kg NH₃) und CO₂-Abtrennung

Emissionen Wasser:

Als Wasseremissionen werden in EFMA (1995) insbesondere Ammonium und Methanol erwähnt, welche im Prozesskondensat mit je 1kg pro m³ vertreten sein können, teilweise aber zurückgewonnen werden. Hier werden gemäss EFMA 1995:30) 0.1kg NH₃ und in Analogie dazu auch 0.1kg Methanol pro kg NH₃ verbucht.

1.8.4 Zusammenstellung der Eingabedaten

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Ammoniak-Katalysator kg
Feedstock:		
Kobalt	kg	0.03
Molybdaen	kg	0.12
Nickel ab Anreicherung	kg	0.05
Roheisen	kg	0.80
Produkt:		
Ammoniak-Katalysator	kg	1.0

Tab. 1.25: Eingabedaten des Moduls 1kg "Ammoniak-Katalysator" basierend auf Analogieschluss Raffineriekatalysator.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Ammoniak Dampfreformierung	Bemerkungen, Quellen, Rohinformation
Feedstock:			
Erdgas HD-Abnehmer Euro	TJ	2.5E-5	Erdgas, Naphtha
Luft §	kg	1.1	EFMA 1995
Wasser entkarbonisiert	kg	1.5	EFMA 1995
Endenergieträger:			
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	6.0E-6	thermischer Energiebedarf ¹⁾
Betriebsstoffe:			
Wasser vollentsalzt	kg	0.06	Speisewasser
Ammoniak-Katalysator	kg	3.5E-4	EFMA 1995
Entsorgungsdienstleistungen:			
Zeolithe in Inertstoffdeponie	kg	1.5E-4	< 0.2kg/t NH ₃ verbrauchte Kat. etc.
Infrastruktur:			
Infra Raffinerie	Stk	0.1	Annahme siehe Text
Produkt:			
Ammoniak Dampfreformierung	kg	1.0	
Emissionen Luft:			
CO ₂ Kohlendioxid s	kg	0.35	Annahmen siehe Text
CO ₂ Kohlendioxid p	kg	1.11	Annahmen siehe Text
NO _x Stickoxide als NO ₂ p	kg	0.72	Annahmen siehe Text
NH ₃ Ammoniak p	kg	3.0E-6	ECETOC 1994a:19
Mono-ethyl-amin ²⁾	kg	0.008-0.018	EFMA 1995
Emissionen Wasser:			
Ammoniak als N f	kg	5.0E-5	EFMA 1995 ³⁾
Ammoniak als N s	kg	5.0E-5	EFMA 1995 ³⁾
Methanol in Wasser f	kg	5.0E-5	Annahme gem. EFMA 1995 ³⁾
Methanol in Wasser s	kg	5.0E-5	Annahme gem. EFMA 1995 ³⁾

Tab. 1.26: Eingabedaten des Moduls 1kg "Ammoniak Dampfreformierung".
 §: wird in eco^{mc} nicht verbucht.
¹⁾: Eigene Annahme zur Feuerungstechnologie
²⁾: Wird mangels Bewertungsmöglichkeiten nicht verbucht
³⁾: Annahme basierend auf Standortkarte (EFMA 1999): je 50% Einleitung in Binnengewässer resp. in Meere

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Ammoniak Partielle Oxidation	Bemerkungen, Quellen, Rohinformation
Feedstock:			
Heizöl S ab Regionallager Euro	t	0.8E-3	Fuel oil, Condensate
Luft §	kg	4.0	EFMA 1995
Wasser entkarbonisiert	kg	1.2	EFMA 1995
Endenergieträger:			
Heizöl S, Euro in Heizung 1 MW	TJ	7.2E-6	Energiebedarf ¹⁾
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ	0.8E-6	Energiebedarf ¹⁾
Betriebsstoffe:			
Wasser vollentsalzt	kg	0.06	Speisewasser
Infrastruktur:			
Infra Raffinerie	Stk	0.1	Annahme siehe Text
Produkt:			
Ammoniak Partielle Oxidation	kg	1.0	
Emissionen Luft:			
CO ₂ Kohlendioxid s	kg	0.56	Annahmen siehe Text
CO ₂ Kohlendioxid p	kg	1.8	Annahmen siehe Text
SO _x als SO ₂ p	kg	4.0E-3	Annahmen siehe Text
CO Kohlenmonoxid p	kg	1.1E-4	Annahmen siehe Text
Methanol p	kg	4.0E-4	Annahmen siehe Text
Partikel p	kg	1.0E-4	Annahmen siehe Text
H ₂ S Schwefelwasserstoff p	kg	1.4E-6	Annahmen siehe Text
NH ₃ Ammoniak p	kg	3.0E-6	ECETOC 1994a:19
Mono-ethyl-amin ²⁾	kg	0.008-0.018	EFMA 1995
Emissionen Wasser:			
Ammoniak als N f	kg	5.0E-5	EFMA 1995 ³⁾
Ammoniak als N s	kg	5.0E-5	EFMA 1995 ³⁾
Methanol in Wasser f	kg	5.0E-5	Annahme gem. EFMA 1995 ³⁾
Methanol in Wasser s	kg	5.0E-5	Annahme gem. EFMA 1995 ³⁾

Tab. 1.27: Eingabedaten des Moduls 1kg "Ammoniak Dampfreformierung".

§: wird in eco^{mc} nicht verbucht.¹⁾: Eigene Annahme zu Feuerungstechnologie und Energieträger²⁾: Wird mangels Bewertungsmöglichkeiten nicht verbucht³⁾: Annahme basierend auf Standortkarte (EFMA 1999): je 50% Einleitung in Binnengewässer resp. in Meere

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Ammoniak frei Regional- lager Schweiz kg
Feedstock:		
Ammoniak Partielle Oxidation	kg	0.15
Ammoniak Dampfreformierung	kg	0.85
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	0.5
Transport Schiene	tkm	0.6
Transport LKW 28 t	tkm	0.05
Produkt:		
Ammoniak frei Regionallager Schweiz	kg	1.0

Tab. 1.28: Eingabedaten des Moduls 1kg "Ammoniak frei Regionallager Schweiz". Annahmen siehe Text.

1.9 Herstellung Kohlendioxid (CO₂, R-744)

Kohlendioxid wird hauptsächlich mit Rückgewinnungsanlagen aus industriellen Abgasen gewonnen. Das Kohlendioxid stammt aus folgenden Quellen (Kirk-Othmer 1993:40ff.):

- Ammoniak- und Wasserstoff-Produktion,
- Abgase von Koks-, Kohle-, Heizöl- oder Gasfeuerungen,
- Fermentationsindustrie (sehr geringer Anteil am gesamten kommerziellen CO₂),
- Kalkbrennerei,
- Natriumphosphat-Produktion,
- Natürliche Gasvorkommen mit hohem CO₂-Gehalt.

Die am häufigsten angewendeten Prozesse der CO₂-Rückgewinnung sind der Natriumkarbonat- und der Kaliumkarbonat- sowie der Alkanolamin-Prozess. Früher wurde in Ammoniak-Anlagen eine 15 bis 20 Gew.-% wässrige Lösung von Monoethanolamin (MEA) verwendet mit dem Nachteil, dass diese Anlagen hohe Temperaturen erfordern, zu lokaler Überhitzung und damit zu korrosiven Zerfallsprodukten führen. Der Einsatz von Inhibitoren (wie z.B. Amine Guard entwickelt von Union Carbide) erlaubt es höhere Konzentrationen (25-30 Gew.-%) einzusetzen, die weniger oft regeneriert werden müssen.

Der Kaliumkarbonat-Prozess basiert auf der Absorption von CO₂ durch Kaliumkarbonat zu Kaliumbikarbonat. Wenn das Bikaliumkarbonat erhitzt wird, wird CO₂ wieder freigesetzt.

MEA-basierte Prozesse benötigen zwischen 2 und 4.75 MJ pro kg CO₂. Der Kaliumkarbonat-Prozess benötigt zwischen 1.4 und 2.4 MJ pro kg CO₂ (Kirk-Othmer 1992:666). In diesem Projekt gehen wir von einem thermischen Energiebedarf von 2MJ/kg CO₂ aus, der mit Ergas (90%) und Schweröl (10%) bereitgestellt wird.

Nach der Rückgewinnung müssen Verunreinigungen, die in der Grössenordnung von 1 bis 3 Gew.-% im Rohgas enthalten sind, abgetrennt werden. Dabei handelt es sich um Wasserstoff, Stickstoff, Methan, und Schwefelverbindungen. Gemäss Frederiksson (1999) werden dazu 0.72MJ Elektrizität benötigt. Die Distanz zwischen Rückgewinnung und CO₂-Reinigung beträgt nach derselben Quelle 150km und wird mit Lkw mit einer max. Zuladung von 15t zurückgelegt. Die Verteilung zu den Abnehmern erfolgt im Radius von durchschnittlich 100km¹³. Boustead & Hancock (1979:324) weisen für Kompression und Verflüssigung einen Wert von 0.71MJ pro kg CO₂ aus.

Durch die Rückgewinnung von CO₂ aus Abgasen der Ammoniak-, Wasserstoff- oder Kalkproduktion reduzieren sich deren spezifische CO₂-Emissionen. Dies ist insbesondere bei den Modulen der Ammoniak-Synthese (siehe Unterkap. 1.8) bereits berücksichtigt. Als Verteilschlüssel wird mangels besserer Alternativen das Gewicht der beiden Produkte verwendet. Unter der oben gemachten Annahmen, dass pro kg NH₃ 1.2 resp. 2.5kg CO₂ anfallen (siehe Abschnitt 1.8.3) und dass 10% des in der Ammoniak-Synthese anfallenden CO₂ rückgewonnen wird, lässt sich ein CO₂-Emissionsfaktor von 1.8kg CO₂ pro kg NH₃ resp. pro kg CO₂ für den Dampf-Reformierungsprozess und 0.96kg CO₂ pro kg NH₃ resp. pro kg CO₂ für die partielle Oxidation errechnen. Bei einem Anteil partieller Oxidation von 15% resultiert ein Emissionsfaktor von 1.1kg CO₂ pro kg CO₂.

Die Rückgewinnung und Reinigung von CO₂ wird in der Ökobilanz mit folgenden Daten abgebildet:

¹³ Diese Transportdistanz wird bei der Anwendung von CO₂ in Wärmepumpen berücksichtigt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kohlendioxid roh	Rohinformation
Feedstock			
CO2 aus Ammoniak-Synthese §	kg	2.1	Annahmen (Allokation) siehe Text
Endenergieträger			
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	1.7E-6	thermischer Energiebedarf ¹⁾
Heizöl S, Euro in Heizung 1 MW	TJ	0.3E-6	thermischer Energiebedarf ¹⁾
Produkt			
Kohlendioxid roh	kg	1.0	
Emissionen Luft:			
CO2 Kohlendioxid p	kg	1.1	Annahmen (Allokation) siehe Text
Mono-ethyl-amin §		0.008-0.018	Mono-ethyl-amin ²⁾

Tab. 1.29: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kohlendioxid roh" gemäss.
 §: wird in eco^{mc} nicht verbucht.
¹⁾: Aufteilung Erdgas/ Schweröl gemäss folgender Annahme für die Ammoniak-Synthese (siehe Unterkap. 1.8): 85% Dampf Reformierung mit Erdgas, 15% Partielle Oxidation mit Schweröl.
²⁾: Wird mangels Bewertungsmöglichkeiten nicht verbucht.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kohlendioxid flüssig ab Lager Schweiz kg	Rohinformation
Feedstock			
Kohlendioxid roh	kg	1.02	Verunreinigungen 1-3 Gew.-%
Endenergieträger			
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ	0.72E-6	Elektrizität
Transportdienstleistungen			
Transport LKW 28 t	tkm	0.15	Lkw, Zuladung 15t, 150km Distanz
Entsorgungsdienstleistungen:			
Wird nicht verbucht			Regenerierung Aktivkohlefilter und Zinkoxid
Produkt			
Kohlendioxid flüssig ab Lager Schweiz	kg	1.0	
Emissionen Luft:			
CO2 Kohlendioxid p	kg	0.005	Verunreinigungen 1-3% ¹⁾
CH4 Methan p	kg	0.01	Verunreinigungen 1-3% ¹⁾

Tab. 1.30: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kohlendioxid flüssig ab Lager Schweiz" gemäss Informationen der Firma AGA, Frederiksson (1999). ¹⁾: Eigene Annahmen: 25% N₂ und H₂, 25% CO₂, 50% Methan.

1.10 Herstellung Propan (CH₃CH₂CH₃, R-290) und nButan (C₄H₁₀)

Die Herstellung von Propan und nButan wird gemäss Frischknecht et al. (1996:Teil IV:169ff.) modelliert. Zusätzlich wird für die Reinigung ein Strombedarf analog zur Reinigung von CO₂ angenommen. Die Verluste bei Reinigung, innerbetrieblichem Transport und Abfüllen werden wie bei den synthetischen Kältemitteln mit 1 Gew.-% angenommen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Butan ab Lager Schweiz kg	Propan ab Lager Schweiz kg
Feedstock: Propan/ Butan ab Raffinerie Euro	t	0.001	0.001
Energieträger: Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTTE	TJ	0.72E-6	0.72E-6
Transportdienstleistungen: Transport LKW 28 t	tkm	0.5	0.5
Produkt: Butan ab Lager Schweiz Propan ab Lager Schweiz	kg kg	1	1
Emissionen Luft: Butan p Propan p	kg kg	0.01	0.01

Tab. 1.31: Eingabedaten des Moduls 1kg "Butan ab Lager Schweiz" und 1kg "Propan ab Lager Schweiz".

1.11 Schweissgase

1.11.1 Acetylen

Die Herstellung von Acetylen basiert in Westeuropa mehrheitlich auf Erdgas als Feedstock (Wells 1991:32). Es werden 5'950m³ Erdgas und 5'300kg Sauerstoff benötigt, um bei einer 30% Ausbeute 1'000kg Acetylen zu produzieren (Wells 1991:35). Die Reaktionsgase werden in einen Spezialofen gegeben, in welchem sie bei Temperaturen von 1'500°C zu Acetylen reagieren. Danach werden sie abgekühlt wobei meist Wasser verwendet wird. Russ wird teilweise durch das Kühlwasser entfernt, der Rest wird durch Elektrofilter zurückgehalten. Die gekühlten Gase enthalten etwa 8% Acetylen. In einer Absorptionseinheit wird es mit einem Lösungsmittel (z.B. N-Methylpyrrolidon) extrahiert. Die restlichen Gase, v.a. CO und Wasserstoff, werden entweder in eine Syntheseanlage gespiesen oder als Brennstoff verwendet.

In dieser Studie gehen wir davon aus, dass der Erdgasinput als Feedstock und als Energieträger verwendet wird. Von den 4'700kg Erdgas (Dichte 0.79kg/m³, 3'300kg C) werden 1'315kg als Feedstock benötigt. 3'385kg Erdgas stehen somit für die Energiebereitstellung zur Verfügung. Es wird angenommen, dass dies analog einer Erdgas-Industriefeuerung verbrannt wird. Aufgrund der wenigen Firmenstandorte mit Kapazitäten über 40'000t pro Jahr wird eine Transportdistanz von 600km mit Lkw der Analyse zugrunde gelegt. Es werden 1Gew.-% Verluste bei der Produktion bis und mit Abfüllen/ Lagern angenommen.

Daraus ergeben sich die Eingabedaten gemäss Tab. 1.32:

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Acetylen ab Regionallager Schweiz kg
Feedstock:		
Sauerstoff ab Luftzerlegung	kg	5.3
Erdgas HD-Abnehmer Euro	TJ	6.1E-5
Energieträger:		
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	1.6E-4
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	0.6
Produkt:		
Acetylen ab Regionallager Schweiz	kg	1
Emissionen Luft:		
Ethin p	kg	0.01

Tab. 1.32: Eingabedaten des Moduls 1kg "Acetylen frei Regionallager Schweiz" auf der Basis von Wells (1991:31ff.) und eigenen Annahmen (siehe Text).

1.11.2 Sauerstoff, Stickstoff und Argon

Diese Gase werden gemäss Frischknecht et al. (1996:Anhang A:106ff.) modelliert.

1.11.3 Helium

Mangels Daten und aufgrund der marginalen Bedeutung innerhalb dieses Projektes wird auf eine Bilanzierung dieses Gases verzichtet.

2 Sachbilanzdaten Herstellung der Anlagekomponenten

2.1 Allgemeine Annahmen

Die Bilanzierung der Komponenten erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Herstellern. Trotzdem war es in vielen Fällen nicht möglich, Angaben über den Energiebedarf bei der Herstellung oder gar über die bei der Herstellung zu gewärtigenden Emissionen zu erhalten. In denjenigen Fällen, in denen diese Angaben nicht verfügbar sind, wurde der thermische und elektrische Energiebedarf aus Analogieschlüssen abgeleitet. Prozessspezifische Emissionen konnten mit Ausnahme des Schweißens keine bilanziert werden.

Es wird davon ausgegangen, dass der Primärenergiebedarf der Fertigung der Komponenten (bei fehlenden Angaben) rund 50% des kumulierten Primärenergiebedarfs entspricht¹⁴ und durch zu 50% durch Erdgas, zu 40% durch Heizöl EL und zu 10%¹⁵ durch Elektrizität bereitgestellt werden muss.

2.2 Kompressoren (inkl. Motoren)

2.2.1 Wärmepumpen

Saurer (1997) macht Angaben über einen knapp 30kg schweren Wärmepumpen-Kompressor, der in einer 3.4kW_{th} Wärmepumpenanlage eingesetzt wird (siehe [Tab. 2.1](#)). In Frischknecht et al. (1996:TeilX:9ff.) wird eine 10.25kW_{th} Wärmepumpe der Firma Hoval bilanziert. Die Daten dieses Kompressors wurde auch in Weibel (1996) verwendet.

	Einheit	WP 3.4kW _{th} Stk	WP 10.25kW _{th} ¹⁾ Stk	WP 7.8kW _{th} Stk
Materialvektor:				
Grauguss	kg			7.9 (26.2%)
Stahl unlegiert	kg	25 (87.7%)	75 (57.8%)	15.5 (51.4%)
Stahl niedriglegiert	kg		20 (15.4%)	
Kupfer	kg	2 (7.0%)	22 (17.0%)	4.0 (13.1%)
Aluminium	kg			1.9 (6.3%)
Armaflex	kg		10 (7.7%)	
PVC	kg		1 (0.8%)	
Mineralöl	kg	1.5 (5.3%)	1.7 (1.3%)	0.9 (3.0%)
Total	TJ	28.5 (100%)	129.7 (100%)	30.2 (100%)
Quelle		Saurer (1997)	Frischknecht et al. (1996:Teil X:10)	Bauer et al. (1996:42)

Tab. 2.1: Materialvektoren verschiedener Kompressorenfabrikate.
¹⁾: inkl. Wärmetauscher, Verkabelung und Verrohrung sowie Isolation.

¹⁴ Die Berechnung des kumulierten Energieaufwandes erfolgt gemäss der Tabelle 8.1 in Unterkap. 8.2.

¹⁵ Nach der angenommenen therm. Umwandlung entspricht dies noch 3.3% des ursprünglichen Gesamtenergiebedarfs.

In diesem Projekt werden die Materialaufwendungen in Anlehnung an Bauer et al. (1996) bilanziert. Über die Herstellungsaufwendungen gibt der Umweltbericht der Firma Bitzer (1997) weitgehend Auskunft.

Das Firmengelände Sindelfingen beansprucht $15'327\text{m}^2$, wovon 3% Grünfläche sind. Bei einem Produktausstoss von rund 2'500 Tonnen pro Jahr ergibt dies eine Flächeninanspruchnahme pro kg Produkt von rund $0.006\text{m}^2\text{a}$. Es wird angenommen, dass es sich dabei um eine Inanspruchnahme der Klasse III-IV handelt¹⁶.

Der spezifische Energiebedarf (pro kg Produkt) betrug im Jahre 1997 im Werk Sindelfingen bei einer Produktionsmenge von 2'560t rund 5.6MJ Heizöl, 1.0MJ Erdgas und 5.3MJ Strom. Für die Kreislaufkühlung und für Reinigungszwecke werden rund 5.4kg Wasser pro kg Produkt benötigt.

An Hilfs- und Betriebsstoffen wurden 10g Wasserlacke, 1g Nitrolacke, 4g Rostschutz, Kühlschmiermittel und Maschinenöle und 64g Kältemaschinenöle pro kg Produkt benötigt. Mit 6.4% liegt der Anteil Kältemaschinenöl am Gesamtgewicht des Kompressors somit eher im oberen Bereich.

Abfallseitig fallen ölhaltige Betriebsmittel (1g/kg Produkt), Emulsionsgemische (24g/kg), Lack-schlämme (0.4g/kg) und Altöl (1.7g/kg) an, die einer besonderen Behandlung bedürfen. Zudem werden 17g/kg Hausmüll entsorgt. Zur Verwertung gelangen Mischschrott (24g/kg), Gusschrott (80g/kg), Gusspäne (118g/kg), Holz (31g/kg), Papier (23g/kg) und Styropor (0.3g/kg), wobei die Verwertungswege nicht bekannt sind.

Aufgrund der Informationen über den Abfall werden zusätzlich 20% Grauguss und 2% andere Metalle (Kupfer, Stahl, Aluminium) als Input berücksichtigt. Zudem werden Holz, Papier und Styropor als Materialbedarfe entsprechend der zu verwertenden Menge aufgenommen.

Quantitative Angaben über Abwasseremissionen liegen nicht vor. Ebenso wenig werden Emissionen von Luftschadstoffen ausgewiesen. Neben Feuerungsemissionen sind hierbei insbesondere Lösungsmitteldämpfe (Lackieranlagen), alkalische Dämpfe (Reinigungsanlagen) und Öl- und Ölemulsionsdämpfe (Spanabhebende Bearbeitungszentren, Vakuumpumpen) zu gewärtigen.

Für den Transport der Halbfabrikate und Betriebsstoffe (ohne Wasser) zur Fertigungsstätte der Kompressoren werden pauschal 500km Lkw 40t eingesetzt.

¹⁶ Betreffend Methodik der Bilanzierung von Flächeninanspruchnahme siehe (Frischknecht et al. 1996:Teil III:20ff).

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kompressor Bitzer kg
Ressourcen:		
Fläche III-IV	m ² a	0.006
Halbfabrikate:		
Gusseisen	kg	0.314
Stahl unlegiert	kg	0.524
Kupfer	kg	0.134
Aluminium 0% Rec.	kg	0.064
Heizöl Petro ab Raffinerie Euro	t	3.2E-5
Betriebsstoffe:		
Wasser entkarbonisiert	kg	5.4
Alkydharzlack ¹⁾	kg	0.011
Holzbaustoff massiv	kg	0.031
Papier	kg	0.023
Polystyrol EPS	kg	0.0003
Energieträger:		
Heizöl EL in Heizung 1 MW	TJ	5.6E-6
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	1.0E-6
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTTE	TJ	5.3E-6
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	0.57
Produkt:		
Kompressor Bitzer	kg	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Abfälle in SAVA	kg	0.0254
Altoel in SAVA	kg	0.0017
Abfall CH95: in KVA	kg	0.017
Grauguss in Recycling §	kg	0.052
Metallschrott in Recycling §	kg	0.014
Holz in Verwertung §	kg	0.031
Papier in Verwertung §	kg	0.023
Styropor in Verwertung §	kg	0.0003

Tab. 2.2: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kompressor Bitzer".
¹⁾: eigentlich Wasser- und Nitrolacke

2.2.2 Kaltwasser- und Solesatz

Bei den Kaltwasser- und Solesätzen sind Kompressor und Motor zwar getrennt, werden hier aber zusammen bilanziert. Der Materialvektor des verwendeten Aggregats der Firma Sabroe kann der [Tab. 2.3](#) entnommen werden.

Der spezifische Energiebedarf pro kg Verdichter liegt mit rund 110MJ Heizöl und 15MJ Strom, deutlich über den Werten der Bitzer-Kompressoren. Der Wasserbedarf liegt mit 62g pro kg hingegen deutlich tiefer als bei Bitzer (1997). Für die Motoren liegen keine spezifischen Angaben vor.

	Einheit	Verdichter	Motor NH ₃ -Anlage 110kW	Motor synth. KM 110kW	Kompressor Sabroe	
					110kW	kg
Halbfabrikate:						
Gusseisen	kg	194	113	113	307	0.47
Kupfer	kg		173	155	164	0.25
Aluminium	kg		109	109	109	0.17
Rest ¹⁾	kg		65	83	74	0.11
Betriebsstoffe:						
Wasser	kg	12	kA	kA	12	0.062
Energieträger						
Heizöl	MJ	21'500	kA	kA	21'500	110
Strom	MJ	2'900	kA	kA	2'900	15

Tab. 2.3: Materialvektor von Verdichter und Motor von in Kaltwassersätzen, Solesätzen und Gewerbekälte eingesetzten Aggregaten (Reiner 1999).

¹⁾: wird als Stahl unlegiert angenommen. Das Schmieröl wird separat verbucht.

Als Materialien werden von Sabroe Gusseisen (GG25 und GG70), Aluminium und Kupfer angegeben. Da neben dem Energie- und Wasserbedarf keine weiteren Angaben über Herstellungsaufwendungen vorliegen, werden die spezifischen Werte (Betriebsstoffe und Abfallaufkommen) des Werkes Sindelfingen der Firma Bitzer auch für diese Kompressoren (inkl. Motoren) verwendet. Die (geringen) Unterschiede zwischen den Motoren für synthetische Kältemittel und Ammoniak werden vernachlässigt. Auch der Materialmehrbedarf infolge der Bearbeitung und das Abfallaufkommen wird analog zum Kompressor Bitzer modelliert. Deshalb wird der Gusseisenbedarf um knapp 17% höher eingesetzt. Der Schmierölbedarf wird beim Zusammenbau der gesamten Anlage berücksichtigt.

Für den Transport der Halbfabrikate und Betriebsstoffe (ohne Wasser) zur Fertigungsstätte der Kompressoren werden pauschal 500km Lkw 40t eingesetzt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kompressor Sabroe kg
Halbfabrikate:		
Gusseisen	kg	0.55
Kupfer	kg	0.25
Aluminium 0% Rec.	kg	0.17
Stahl unlegiert	kg	0.11
Betriebsstoffe:		
Wasser entkarbonisiert	kg	0.062
Alkydharzlack ¹⁾	kg	0.011
Holzbaustoff massiv	kg	0.031
Papier	kg	0.023
Polystyrol EPS	kg	0.0003
Energieträger:		
Heizoel EL in Heizung 1 MW	TJ	1.1E-4
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTTE	TJ	1.5E-5
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	0.57
Produkt:		
Kompressor Sabroe	kg	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Abfaelle in SAVA	kg	0.0254
Altoel in SAVA	kg	0.0017
Siedlungsabfall in KVA	kg	0.017
Grauguss in Recycling §	kg	0.08
Metallschrott in Recycling §	kg	0.01
Holz in Verwertung §	kg	0.031
Papier in Verwertung §	kg	0.023
Styropor in Verwertung §	kg	0.0003

Tab. 2.4: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kompressor Sabroe".
¹⁾: eigentlich Wasser- und Nitrolacke

2.2.3 Supermarkt-Kälteanlage

Für die Verdichter von Supermarktkälteanlagen werden die Daten für Verdichter und Motoren für Kaltwasser- und Solesätze verwendet.

2.3 Verdampfer

2.3.1 Erdsonden für Sole/Wasser-Wärmepumpen

Für die 7kW Sole/Wasser-Wärmepumpe werden 130m Erdsonde benötigt. Die 50kW-Wärmepumpe braucht entsprechend 900m. Die Sonden bestehen aus Polyethylen mittlerer Dichte (0.94kg/dm^3). Für den Bau werden zusätzlich Bentonit (Stützflüssigkeit beim Bohren) und Zement benötigt. Die eingesetzte Bohrmaschine wird mit Diesel betrieben. Die Angaben stammen von KWT (1999).

Ein Vergleich mit den Daten in Frischknecht et al. (1996:Teil X:11) zeigt eine relativ gute Übereinstimmung des Kunststoff-, des Zement- und des Dieselbedarfs. Beim Bentonit wird ein Grossteil recycelt, was zu einer massiven Reduktion des Bedarfs führt (7 anstelle von 250kg).

Die Transportdienstleistungen werden wie folgt angenommen: PE (HD): 600km Bahn, 50km Lkw 28t, Bentonit 300km Lkw 28t, Zement 100km Bahn und 20km Lkw 28t. Dies ergibt

0.99tkm Bahn- und 0.1tkm Lkw-Transport. Der verwendete Bentonit wird in einer Inertstoffdeponie entsorgt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Erdsonde
		m
Halbfabrikate:		
PE (HD)	kg	1.58
Bentonit ab Verarbeitung	kg	0.055
Zement	kg	0.39
Energieträger:		
Diesel in Baumaschine	TJ	8.8E-5
Transportdienstleistungen:		
Transport Schiene	tkm	0.99
Transport LKW 28 t	tkm	0.1
Produkt:		
Erdsonde	m	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Abfaelle in Inertstoffdeponie	kg	0.055

Tab. 2.5: Eingabedaten des Moduls 1m "Erdsonde".

2.3.2 Verdampfer für Luft/Wasser-Wärmepumpen

Der Verdampfer für die 7kW Luft/Wasser-Wärmepumpe wiegt 50kg, derjenige für die 50kW-Wärmepumpe 148kg. Er besteht gemäss KWT (1999) zu 50 resp.54Gew.-% aus Kupfer, 27 resp. 19Gew.-% Chromstahl und aus Aluminium (23 resp. 27 Gew.-%). Es werden zusätzlich zu den Angaben von KWT (1999) noch 10% Verschnitt angenommen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Verdampfer 7kW Stk	Verdampfer 50kW Stk
Halbfabrikate:			
Kupfer	kg	27.5	87.9
Stahl hochlegiert	kg	15.0	31.4
Aluminium 0% Rec.	kg	12.6	43.1
Energieträger:			
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ	1.8E-4	5.3E-4
Transportdienstleistungen:			
Transport Schiene	tkm	33	97.7
Transport LKW 28 t	tkm	2.75	8.1
Produkt:			
Verdampfer 7kW	Stk	1	
Verdampfer 50kW	Stk		1
Entsorgungsdienstleistungen:			
Stahl, Kupfer und Aluminium ins Recycling §	kg	5.1	14.4

Tab. 2.6: Eingabedaten des Moduls 1Stk "Verdampfer 7kW" und "Verdampfer 50kW".
§: Wird in eco^{mc} nicht verbucht.

Als Energiebedarf bei der Herstellung der Verdampfer wird ein Stromverbrauch ausgewiesen. Für Transporte werden Standarddistanzen eingesetzt (600km Schiene und 50km Lkw 28t). Abfälle werden keine ausgewiesen.

2.4 Wärmetauscher

2.4.1 Wärmepumpen

Für die hier betrachteten Heizsysteme werden Edelstahl-Wärmetauscher eingesetzt. Aufgrund der Herstellerangaben können Edelstahl- und Kupferbedarf sowie der Stromverbrauch bei der Herstellung der Plattenwärmetauscher ausgewiesen werden (KWT 1999). Zusätzlich wird 10% Verschnitt angenommen, der recycelt wird. Weitere Angaben, insbesondere über die Metallentfettung sind nicht verfügbar. Die Transportleistungen werden mit Standarddistanzen (600km Schiene, 50km Lkw 28t) berechnet.

Der Bedarf an Schweissgas (Argon und Helium) wird der KEA-Bilanzierung in Bauer et al. (1996) entnommen. Dort wird ein Argon-Verbrauch von 0.92kg und ein Helium-Verbrauch von 0.03kg für rund 30kg schweren Edelstahl-Wärmetauscher verbucht. Bezogen auf das Gewicht ergibt sich ein Edelgasbedarf von 0.03kg Argon und 0.001kg Helium. Letzteres wird mangels Daten nicht verbucht.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Plattenwärmetauscher kg
Halbfabrikate:		
Kupfer	kg	0.11
Stahl hochlegiert	kg	0.99
Betriebsstoffe:		
Argon ab Luftzerlegung	kg	0.03
Helium §	kg	0.001
Energieträger:		
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTe	TJ	3.6E-6
Transportdienstleistungen:		
Transport Schiene	tkm	0.66
Transport LKW 28 t	tkm	0.055
Produkt:		
Plattenwärmetauscher	kg	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Stahl, Kupfer ins Recycling §	kg	0.1

Tab. 2.7: Eingabedaten des Moduls 1kg "Plattenwärmetauscher".
§: Wird in eco^{mc} nicht verbucht.

2.4.2 Kaltwasser- und Solesatz

Je nach Kältemittel werden zu dessen Verflüssigung resp. Verdampfung Platten- (Ammoniak) oder Bündelrohr-Wärmetauscher (synthetische Kältemittel und Kohlenwasserstoffe) eingesetzt. Während die Wärmetauscherplatten für Ammoniakanlagen aus rostfreiem Stahl gefertigt sind, sind die Rohrbündel aus Kupfer. Das Gehäuse besteht in beiden Fällen aus Stahlblech. Es wird 10% Verschnitt angenommen.

Neben dem Materialbedarf liegen für den Plattenwärmetauscher auch Angaben über den Energieverbrauch vor. Es werden 1'230 resp. 1'140MJ Erdgas pro Wärmetauscher benötigt, was einem spezifischen Bedarf von ca. 1.7 bis 1.85MJ pro kg Wärmetauscher entspricht.

Der Schweissgasbedarf und der Bedarf an Transportleistungen wird analog zum Plattenwärmetauscher der Wärmepumpen verbucht.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Plattenwärmetauscher NH ₃ kg
Halbfabrikate:		
Stahl hochlegiert	kg	0.30
Stahl unlegiert ¹⁾	kg	0.80
Betriebsstoffe:		
Argon ab Luftzerlegung	kg	0.03
Helium §	kg	0.001
Energieträger:		
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	1.8E-6
Transportdienstleistungen:		
Transport Schiene	tkm	0.66
Transport LKW 28 t	tkm	0.055
Produkt:		
Plattenwärmetauscher NH ₃	kg	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Stahl ins Recycling §	kg	0.1

Tab. 2.8: Eingabedaten des Moduls 1kg "Plattenwärmetauscher NH₃".

§: Wird in eco^{mc} nicht verbucht.

¹⁾: inkl. Übriges.

Die Rohrbündelwärmetauscher bestehen aus Kupfer und Stahlblech. In Ermangelung von Angaben zum Energie- und Betriebsmittelbedarf werden die Angaben für den Plattenwärmetauscher (Energie) resp. zum Kälteverteilnetz (Betriebsmittelbedarf¹⁷⁾ übernommen. Auch hier werden 10% Verschnitt verrechnet.

¹⁷ Pro kg Kupfer werden dort 0.012kg Acetylen, 0.014kg Sauerstoff und 0.02kg Stickstoff ausgewiesen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Rohrbündelwärmetauscher HFC kg
Halbfabrikate:		
Kupfer	kg	0.51
Stahl unlegiert	kg	0.59
Betriebsstoffe:		
Acetylen ab Regionallager Schweiz	kg	0.012
Stickstoff ab Luftzerlegung	kg	0.014
Sauerstoff ab Luftzerlegung	kg	0.02
Energieträger:		
Erdgas in Industrieheizung >100kW Euro	TJ	1.8E-6
Transportdienstleistungen:		
Transport Schiene	tkm	0.66
Transport LKW 28 t	tkm	0.055
Produkt:		
Rohrbündelwärmetauscher HFC	kg	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Stahl, Kupfer ins Recycling §	kg	0.1

Tab. 2.9: Eingabedaten des Moduls 1kg "Rohrbündelwärmetauscher HFC".
§: Wird in eco^{mc} nicht verbucht.

2.4.3 Supermarkt-Kälteanlage

Es werden Platten- und Rohrbündelwärmetauscher eingesetzt. Die Sachbilanzen der Wärmetauscher für Kaltwasser- und Solesätze werden übernommen.

2.5 Rückkühler und Rückkühlerkreislauf

2.5.1 Kaltwasser- und Solesatz

Der Rückkühlwasser-Kreislauf für den Kaltwasser- und den Solesatz besteht nach Angaben von (Reiner 1999) aus einem Kühlturm, einer Kühlwasserpumpe, Rohrleitungen, Absperrklappen, Wasserbecken und Übrigem. Der Materialbedarf wird auf 1kW Nennleistung bezogen und für den Kaltwasser- und den Solesatz separat ausgewiesen.

Auch hier wird 10% Verschnitt angenommen, und mit den Standarddistanzen die Transportleistungen errechnet. Glasfaserverstärkter Kunststoff wird mit 60% Glas und 40% Polyethylen HD angenähert. Für das Elektroschweißen werden gemäss (Reiner 1999) 30kWh resp. 18kWh Strom und 3.5Nm³ resp. 2.0Nm³ Argon als Schutzgas benötigt (Kaltwasser- resp. Solesatz). Die Daten sind auf das kW gelieferte Kälteleistung (400 resp. 120kW für Kaltwasser- resp. Solesatz) bezogen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Rueckkuehler Kaltwassersatz kW	Rueckkuehler Solesatz kW
Komponenten:			
Umwaelzpumpe ¹⁾	kg	0.22	0.73
Ventilator ¹⁾	kg	0.76	0.96
Halbfabrikate:			
Stahl unlegiert ²⁾	kg	3.36	5.2
PVC schlagfest	kg	0.37	0.69
Glas (Flach-) unbeschichtet	kg	0.78	1.05
PE (HD)	kg	0.52	0.70
Betriebsstoffe:			
Argon ab Luftzerlegung	kg	0.016	0.009
Energieträger:			
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	2.7E-7	1.6E-7
Transportdienstleistungen:			
Transport Schiene	tkm	3.6	2.2
Transport LKW 28 t	tkm	0.3	0.18
Produkt:			
Rueckkuehler Kaltwassersatz	kW	1	
Rueckkuehler Solesatz	kW		1
Entsorgungsdienstleistungen:			
Stahl ins Recycling §	kg	0.34	0.52
PVC in KVA	kg	0.037	0.07
Kunststoffe in KVA	kg	0.052	0.07

Tab. 2.10: Eingabedaten der Module 1kW "Rueckkuehler Kaltwassersatz" und 1 kW "Rueckkuehler Solesatz".

§: Wird in eco^{mc} nicht verbucht.

¹⁾: inkl. Motor.

²⁾: Kühlturmlamellen, Rohrleitungen, Absperrklappen, Gehäuse und Übriges.

2.5.2 Supermarkt-Kälteanlage

Bei den Supermarktkälteanlagen ist der Aufwand für das Rückkühlnetz bei den Verteilrohren berücksichtigt. Der Rückkühler für die hier bilanzierten Supermarkt-Kälteanlagen besteht aus Kupferrohren und Aluminiumlamellen. Das Gehäuse ist aus Stahlblech und die Konvektion wird durch Ventilatoren erzeugt. Über Fertigungsaufwände und Betriebsmittelverbräuche werden von Güntner (1999) keine Angaben gemacht. Deshalb werden hier die Herstellungsenergieaufwände gemäss den allgemeinen Annahmen verbucht. Metallentfettungsaufwendungen und -emissionen sowie Abfälle werden mangels Angaben nicht berücksichtigt.

Das spezifische Gesamtgewicht des Rückkühlers pro kW Nennkälteleistung der Anlage liegt zwischen 10 und 12kg. In dieser Studie werden 11kg/kW plus 6.5% Verschnitt angenommen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Rueckkuehler Supermarkt kW
Komponenten: Ventilator ¹⁾	kg	1.7
Halbfabrikate: Kupfer ²⁾	kg	1.6
Aluminium 0% Rec. ³⁾	kg	2.6
Stahl unlegiert ⁴⁾	kg	5.8
Energieträger: Heizöl EL in Heizung 1 MW	TJ	1.48E-04
Erdgas in Industrieheizung >100kW Euro	TJ	1.85E-04
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTÉ	TJ	1.24E-05
Transportdienstleistungen: Transport Schiene	tkm	7.0
Transport LKW 28 t	tkm	0.6
Produkt: Rueckkuehler Supermarkt	kW	1
Entsorgungsdienstleistungen: Stahl, Kupfer, Aluminium ins Recycling §	kg	0.8

Tab. 2.11: Eingabedaten des Moduls 1kW "Rueckkuehler Supermarkt".

§: Wird in eco^{mc} nicht verbucht.

¹⁾: inkl. Motor. und Schutzgitter

²⁾: Kupferrohre inkl. Kollektoren

³⁾: Alulamellen

⁴⁾: Gehäuse und Füße.

2.6 Kältemittelsammler

2.6.1 Wärmepumpen

Der Kältemittelsammler für die Wärmepumpen (7kW resp. 50kW) besteht aus 5.4 resp. 1.9kg Baustahl. Das Werk, in welchem die Sammler hergestellt werden, benötigt jährlich 126'000kWh Strom und 270'000kWh Erdgas. Bei der Metallentfettung in geschlossenem Kreislauf werden jährlich 20 Liter Perchloräthylen ersetzt. Zudem fallen monatlich 120 Liter Hausmüll und 120 Liter Papier und Pappen an. Bei einem angenommenen jährlichen Produktionsvolumen von 100'000kg (und einer Allokation der Aufwände auf Gewichtsbasis) ergeben sich die in Tab. 2.12 aufgeführten spezifischen Verbräuche und Emissionen.

	Einheit	Kaeltemittel- sammler kg
Halbfabrikate:		
Stahl unlegiert	kg	1.1
Energieträger:		
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT	TJ	4.54E-06
Erdgas in Industrieheizung >100kW Euro	TJ	9.72E-06
Betriebsstoffe:		
Perchlorethylen	kg	0.000325
Transportleistungen:		
Transport Schiene	tkm	0.66
Transport LKW 28 t	tkm	0.055
Produkt:		
Kaeltemittelsammler	kg	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Abfall CH95: in KVA	kg	0.0144
Karton in KVA	kg	0.0144
Emissionen Luft:		
Perchlorethylen p	kg	0.000325

Tab. 2.12: Eingabedaten des Moduls 1kg "Kaeltemittelsammler", auf der Basis von ESK Schultze (1999) unter Annahme eines Produktionsvolumens von 100'000kg pro Jahr.

2.6.2 Kaltwasser- und Solesatz

Die Aufwendungen für den Flüssigkeitsabscheider, den Ölabscheider etc. werden analog zum Kältemittelsammler der Wärmepumpe bilanziert.

2.6.3 Supermarkt-Kälteanlagen

Die Aufwendungen für den Kältemittelstehsammler werden analog zum Kältemittelsammler der Wärmepumpen bilanziert.

2.7 Umwälzpumpen und Ventilatoren

2.7.1 Allgemeines

Pumpen und Ventilatoren kommen bei allen hier untersuchten Anlagen zum Einsatz. Aus diesem Grund werden hier für alle drei Anwendungen (Industrie- und Gewerbekälte sowie Wärmepumpen) dieselben Sachbilanzdaten verwendet und auf das Pumpen- resp. Ventilatorengewicht bezogen.

2.7.2 Pumpen

Bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen wird im Solekreislauf eine Umwälzpumpe von 4.5kg Gewicht eingesetzt. Der Verdampfer der Luft/Wasser-Wärmepumpe ist mit einem 5kg schweren Ventilator zur Unterstützung des Wärmeaustausches bestückt.

Von Umwälzpumpen für Sonnenkollektoren wurde in Frischknecht et al. (1996:Teil XI:15) eine Materialbilanz erstellt. Mangels weiterer Angaben werden die dort ermittelten Materialanteile

auf die hier zu bilanzierenden Umwälzpumpen angewendet. Der Energiebedarf bei der Herstellung wird entsprechend den Angaben für den Ventilator angenommen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Umwaelzpumpe kg
Halbfabrikate:		
Gummi EPDM	kg	0.003
Kupfer	kg	0.11
Stahl hochlegiert	kg	0.41
Gusseisen	kg	0.54
Aluminium 0% Rec.	kg	0.0088
PVC schlagfest	kg	0.013
Elektronikbauteile §	kg	0.018
Energieträger:		
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	2.5E-7
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTTE	TJ	5.0E-7
Transportdienstleistungen:		
Transport Schiene	tkm	0.66
Transport LKW 28 t	tkm	0.55
Produkt:		
Umwaelzpumpe	kg	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Gusseisen, Stahl, Kupfer ins Recycling §	kg	0.1

Tab. 2.13: Eingabedaten des Moduls 1kg "Umwaelzpumpe". Nach Angaben aus Frischknecht et al. (1996:Teil XI:15) für eine 40W Umwälzpumpe (Gesamtgewicht von 2.47kg).
§: Wird in eco^{mc} nicht verbucht.

2.7.3 Ventilatoren

In Afjei et al. (1998) wird eine Luft/Wasser-Wärmepumpe bilanziert. Der Materialzusammensetzung und der Aufwand zur Herstellung des Ventilators wird aus den Rohdaten dieses Projektes (Saurer 1997) extrapoliert. In Saurer (1997) werden 500km Lkw Transport angegeben. Diese Distanz wird auch für den Ventilator verwendet.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Ventilator kg
Halbfabrikate:		
Gusseisen	kg	0.83
Aluminium 0% Rec.	kg	0.15
Kupfer	kg	0.12
Energieträger:		
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	2.5E-7
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTTE	TJ	5.0E-7
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 28 t	tkm	0.55
Produkt:		
Ventilator	kg	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Gusseisen, Aluminium, Kupfer ins Recycling §	kg	0.1

Tab. 2.14: Eingabedaten des Moduls 1kg "Ventilator". Nach Angaben von Saurer (1997) für zwei Ventilatoren à je 3.5kW extrapoliert.
§: Wird in eco^{mc} nicht verbucht.

2.8 Verteilungen und Isolation

2.8.1 Kaltwasser- und Solesatz

Der Kaltwasser- resp. Solekreislauf wird in Stahl 35.8 gefertigt und mit Vinylkautschuk isoliert (Armaflex[®], siehe Abschnitt 5.1.1). Der Solekreislauf wird mit einer Ethylenglykol-Wasser-Mischung befüllt. Die Modellanlage umfasst 20 Meter Rohrleitungen DN150. Beim Elektroschweißen werden 30kWh Strom und 3.5Nm³ Argon als Schutzgas benötigt (Reiner 1999). Die Module sind auf das kW gelieferte Kälteenergie (400 resp. 120kW für Kaltwasser- resp. Solesatz) bezogen. Als Transportdistanzen werden 600km Schiene und 50km Lkw 28t.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaltwasserkreislauf kW	Kaeltetraegerkreislauf kW
Komponenten: Umwaelpumpe ¹⁾	kg	0.22	0.62
Halbfabrikate: Stahl unlegiert ²⁾	kg	1.6	5.4
Armaflex	kg	0.075	0.25
Transportdienstleistungen: Transport Schiene	tkm	1.1	3.7
Transport LKW 28 t	tkm	0.09	0.31
Produkt: Kaltwasserkreislauf	kW	1	
Kaeltetraegerkreislauf	kW		1

Tab. 2.15: Eingabedaten der Module 1kW "Kaltwasserkreislauf" und 1 kW "Kaeltetraegerkreislauf".

¹⁾: inkl. Motor.

²⁾: Rohrleitungen und Absperrklappen.

2.8.2 Supermarkt-Kälteanlagen

In Supermärkten werden lange Verteilungen benötigt. Für dieses Projekt wurden drei Supermarkt-Kälteanlagen eingehend bilanziert. Die Kälteanlage in Supermarkt A (siehe [Tab. 2.16](#)) wird mit HFC-404A betrieben und basiert auf einer Direktverdampfung sowohl für den Minus- wie auch den Plusbereich. Die installierte Kälteleistung der Anlage beträgt 120 resp. 25kW für den Plus- resp. den Minusbereich. Die Kälteanlage des Supermarktes B (siehe [Tab. 2.17](#)) wird ebenfalls mit R404A betrieben. Der Pluskreislauf wird aber hier über ein Kälteerträgenetz gekühlt. Die installierte Leistung dieser Anlage liegt mit rund 80 resp. 20kW für den Plus- resp. den Minuskreislauf etwas tiefer. Der Supermarkt C (siehe [Tab. 2.18](#)) verfügt über eine Ammoniak-Anlage mit Kälteerträger-Kreislauf. Die Leistung beträgt 153 resp. 27.4kW für den Plus- resp. den Minuskreislauf.

Eine detaillierte Bilanzierung anhand unterschiedlicher Konfigurationen ergab die folgenden Kennwerte für Kupfer, rostfreien Stahl und Isolationsmaterial (Armaflex[®], synthetischer Kautschuk).

Supermarkt A	Einheit	Plus	Minus	Total
Konfiguration		Direktverdampfung HFC-404A	Direktverdampfung HFC-404A	
Kältemittel Kälteleistung	kW	120	25	
Halbfabrikate:				
Kupferrohre ¹⁾	kg			1'572
Armaflex ²⁾	kg			172
Betriebsstoffe:				
Acetylen C ₂ H ₂ ³⁾	kg			18
Stickstoff N ₂ ⁴⁾	kg			21
Sauerstoff O ₂ ⁵⁾	kg			30
Transportdienstleistungen:				
Transport Lieferwagen <3.5 t ⁶⁾	tkm			7'500

Tab. 2.16: Montage von Kälteverteilungen für Supermarkt A.
¹⁾: Basis bestellte Rohrlängen, ohne Krümmer, Ventile etc.
²⁾: Basis Bestellmengen
³⁾: Basis Umrechnung: Angabe in Liter bei 180 bar
⁴⁾: Basis Umrechnung: Angabe in Liter bei 200 bar.
⁵⁾: Basis Umrechnung: Angabe in Liter bei 200 bar.
⁶⁾: Basis 250 Personentage Montagearbeit, 4 Monteure, Arbeitsweg 60km, Beladung 1t.

Supermarkt B	Einheit	Plus	Minus	Total
Konfiguration		Kälteträger	Direktverdampfung	
Kältemittel Kälteleistung	kW	HFC-404A 80	HFC-404A 20	
Halbfabrikate:				
Kupferrohre ¹⁾	kg	556	195	751
Armaflex ²⁾	kg	8	4	12
Betriebsstoffe:				
Acetylen C ₂ H ₂ ³⁾	kg			12
Stickstoff N ₂ ⁴⁾	kg			14
Sauerstoff O ₂ ⁵⁾	kg			20

Tab. 2.17: Montage von Kälteverteilungen für Supermarkt B.
¹⁾: Basis bestellte Rohrlängen, ohne Krümmer, Ventile etc.
²⁾: Basis Bestellmengen, Daten fraglich.
³⁾: Basis Umrechnung: Angabe in Liter bei 180 bar
⁴⁾: Basis Umrechnung: Angabe in Liter bei 200 bar.
⁵⁾: Basis Umrechnung: Angabe in Liter bei 200 bar.

Supermarkt C	Einheit	Minus	Plus	Total
Konfiguration		Kälteträger	Kälteträger	
Kältemittel Kälteleistung	kW	Ammoniak 153	Ammoniak 27.4	
Halbfabrikate:				
Rohre rostsischerer Stahl, nahtlos ¹⁾	kg	1'732	866	3'228 ²⁾
Armaflex	kg	kA	kA	kA

Tab. 2.18: Montage von Kälteverteilungen für Supermarkt C.
¹⁾: Basis bestellte Rohrlängen, ohne Krümmer, Ventile etc.,
²⁾: Total inkl. 630kg Rohre für Rückkühlung

Aufgrund dieser Aufwandserhebungen werden je ein Modul für Verteilungen in Kupfer und in Edelstahl zusammengestellt und auf die Kälteleistung bezogen (siehe Tab. 2.19). Bei den Kupferleitungen werden 25% für das Rückkühlnetz dazugeschlagen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Verteilungen Kupfer kW	Verteilungen Edelstahl kW
Halbfabrikate:			
Kupfer	kg	12.5	0
Stahl hochlegiert	kg	0	18
Armaflex	kg	1.2	1.2
Betriebsstoffe:			
Acetylen ab Regionallager Schweiz	kg	0.12	0
Stickstoff ab Luftzerlegung	kg	0.14	0
Sauerstoff ab Luftzerlegung	kg	0.2	0
Transportdienstleistungen:			
Transport Lieferwagen <3.5 t	tkm	50	50
Produkt:			
Verteilungen Kupfer	kW	1	
Verteilungen Edelstahl	kW		1
Emissionen Luft:			
CO ₂ Kohlendioxid p ¹⁾	kg	0.41	

Tab. 2.19: Eingabedaten der Module 1kW "Verteilungen Kupfer resp. Edelstahl".

¹⁾: Aus der Anwendung von Acetylen.

2.9 Zusammenbau der Anlagen

2.9.1 Wärmepumpen

Der Zusammenbau der verschiedenen Komponenten der Wärmepumpe erfolgt teilweise auf dem Firmengelände, teilweise beim Kunden. Der Kompressor, der Kältemittelsammler, und der Kondensator werden auf Stahlträgern montiert. Das Schallschutzgehäuse aus sendzimirverzinktem Stahlblech mit PIR-Isolation wird mit Aluminiumträgern befestigt. Im weiteren werden Kupferleitungen zur Verbindung der Komponenten und Schwingungsdämpfer (Gummi) benötigt. Für den Zusammenbau werden Elektrizität, Schweißgase und Schweißdrähte eingesetzt. Es fallen nicht näher spezifizierte Abfälle an, welche in der KVA entsorgt werden.

Für den Zusammenbau und die Montage von Wärmepumpen werden firmenspezifische Angaben (KWT 1999) verwendet. Der dort ausgewiesene Strombedarf pro Wärmepumpe (zwischen 65 und 80kWh) liegt tiefer als der in Bauer et al. (1996:45) ausgewiesene Bedarf von 128kWh. In der dort bilanzierten Fabrik werden jedoch neben der Endmontage auch noch Wärmetauscher und Kaltwassersätze hergestellt.

Der Acetylenbedarf wird mit 0.67 resp. 0.89kg angegeben. Saurer (1997) gibt für die Montage einer 3.4kW_{th}-Wärmepumpe knapp 1.2kg an. Die in Bauer et al. (1996) bilanzierte Fertigung weist für eine 7.2kW_{th}-Wärmepumpe einen Bedarf von 0.12kg Acetylen und 0.21kg Sauerstoff aus.

Die Kältemittelfüllmengen werden aufgrund von Marktstatistiken grob abgeschätzt. Für die Luft/Wasser-Wärmepumpen wird bei synthetischen Kältemitteln 3.0 resp. 15kg (7 resp. 50kW_{th}), bei Propan und CO₂ 1.5 resp. 7.5kg eingesetzt. Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen sind die Füll-

mengen um einen Drittel kleiner, d.h. 2.0 resp. 10kg für die 7 resp. 50kW_{th}-Wärmepumpen mit synthetischen Kältemitteln und 1.0 resp. 5.0kg für die 7 resp. 50kW_{th}-Wärmepumpen mit Propan und CO₂.

Der spezifische Kältemittelbedarf (HFC-134a) liegt z.B. bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe kleiner Leistung mit 0.42kg pro kW_{th} deutlich höher als er z.B. in Kruse et al. (1995:42) angenommen (0.293kg/ kW_{th}; Daten dort übernommen aus der IKARUS-Studie) oder in Frischknecht et al. (1996:Teil X:9) eingesetzt wird (0.29kg/kW_{th}). Aus den Daten in Saurer (1997) resultiert für die dort bilanzierte Luft/Wasser-Wärmepumpe ein spezifischer Kältemittelbedarf (HFC-407C resp. HCFC-22) von 0.59kg pro kW_{th}.

Beim Befüllen der Anlage werden 3 resp. 1% der Füllmenge emittiert (Durchschnitt heute, Zielwert, siehe Kap. 9).

Die Transporte der Komponenten zum Hersteller der Wärmepumpe (ohne Erdsonde/ Verdampfer) werden mit durchschnittlich 300km angenommen. Als Transportmittel wird ein Lkw 28t unterstellt. Die Transportdistanz der gesamten Anlage zum Kunden wird mit 100km angenommen (Transportmittel Lkw 16t).

Für die Wärmepumpen-Anlage mit HFC-134a wird der gesamte Bedarf in [Tab. 2.20](#) gezeigt. Für die Wärmepumpen mit anderen Kältemitteln werden in den darauffolgenden Tabellen lediglich die im Vergleich zu HFC-134a unterschiedlichen Bedarfe und Emissionen ausgewiesen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW R134a Stk	S/W 50kW R134a Stk	L/W 7kW R134a Stk	L/W 50kW R134a Stk
Komponenten:					
Erdsonde	m	130	900		
Verdampfer 7kW	Stk			1	
Verdampfer 50kW	Stk				1
Kaeltemittelsammler	kg	2	7	2	7
Plattenwaermetauscher	kg	12	41	4.8	14
Kompressor Bitzer	kg	45	183	69	213
Umwaelzpumpe	kg	4.5	4.5		
Ventilator	kg			5	5
Gehaeusepaneel	m2	3.84	5.14	4.8	6.4
Armaflex	kg	0.11	0.14	0.11	0.14
Halbfabrikate:					
Stahl unlegiert ¹⁾	kg	14	21	14	21
Aluminium 0% Rec. ²⁾	kg	13	20	19	27
Kupfer	kg	1.6	3.8	2.5	5.6
Gummi EPDM ⁴⁾	kg	0.5	0.8	0.5	0.8
Cadmiumfreies Hartlot ⁵⁾	kg	0.1	0.14	0.11	0.15
Farbe Kaltverzinkung §	ml	200	300	200	300
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz	kg	2.06/2.02 ¹²⁾	10.3/10.1	3.09/3.03	15.5/15.2
Propylenglykol ⁶⁾	kg	83	571	0	0
Betriebsstoffe:					
Acetylen ab Regionallager Schweiz ⁷⁾	kg	0.67	0.89	0.67	0.89
Stickstoff ab Luftzerlegung ⁸⁾	kg	2.5	2.5	2.5	2.5
Sauerstoff ab Luftzerlegung ⁹⁾	kg	1	1.3	1	1.3
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	2.2E-4	2.7E-4	2.3E-4	2.9E-4
Transportdienstleistungen:					
Transport LKW 28 t	tkm	53	259	36	93
Transport LKW 16 t	tkm	18	86	12	31
Produkt:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW R134a	Stk	1			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW R134a	Stk		1		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW R134a	Stk			1	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW R134a	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Kunststoffe in KVA ¹⁰⁾	kg	5	7	5	7
Emissionen Luft:					
CO2 Kohlendioxid p ¹¹⁾	kg	1.13	1.51	1.13	1.51
R134a FKW p ⁷⁾	kg	0.06/0.02 ¹²⁾	0.3/0.1	0.09/0.03	0.45/0.15

Tab. 2.20: Eingabedaten der Herstellung von Sole/- und Luft/Wasser-Wärmepumpen mit HFC-134a, inkl. Verdampfer, Kältemittelsammler und Wärmetauscher. Thermische Leistung: 7 resp. 50kW (KWT 1999).

¹⁾: Stahl 37, U-Profile, Schrauben etc.

²⁾: Profile Schalldämmkiste

³⁾: für Verrohrungen

⁴⁾: Schwingungsdämpfer

⁵⁾: Phosphor Lot und Schweissdraht

⁶⁾: Wärmeträgerflüssigkeit Erdsonden, Dichte (20°C): 1.038kg/l

⁷⁾: Basis Umrechnung: Angabe in Liter bei 180 bar

⁸⁾: Basis Umrechnung: Angabe in Liter bei 200 bar.

⁹⁾: Basis Umrechnung: Angabe in Liter bei 200 bar.

¹⁰⁾: Mischabfall (Kunststoffe etc.)

¹¹⁾: Aus der Anwendung von Acetylen.

¹²⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

§: wird in eco^{mc} nicht verbucht.

Für die HCFC-22-, die HFC-404A-, die Isceon 59- und die Propan-Wärmepumpen werden die Komponenten und Halbfabrikatbedarfe (Ausnahme Kältemittel) analog der HFC-134a-Wärmepumpe verbucht. Der damit gemachte Fehler wird als vernachlässigbar eingeschätzt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW R22 Stk	S/W 50kW R22 Stk	L/W 7kW R22 Stk	L/W 50kW R22 Stk
Komponenten:					
Plattenwaermetauscher	kg	12	41	4.8	14
Kompressor	kg	45	183	69	213
Halbfabrikate:					
Kupfer	kg	1.6	3.8	2.5	5.6
Kaeltemittel R22 frei Lager Schweiz	kg	2.06/2.02 ¹⁾	10.3/10.1	3.09/3.03	15.5/15.2
Produkt:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW R22	Stk	1			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW R22	Stk		1		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW R22	Stk			1	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW R22	Stk				1
Emissionen Luft:					
R22 H-FCKW p	kg	0.06/0.02 ¹⁾	0.3/0.1	0.09/0.03	0.45/0.15

Tab. 2.21: Von Tab. 2.20 abweichende Eingabedaten der Herstellung von Sole/- und Luft/Wasser-Wärmepumpen mit HCFC-22. Thermische Leistung: 7 resp. 50kW (KWT 1999).
¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Für die HFC-407C-Wärmepumpen werden spezifische Werte für den Plattenwärmetauscher, den Kompressor und den Kupferbedarf ausgewiesen. Ansonsten werden die Angaben mit Ausnahme des Kältemittels von der HFC-134a-Wärmepumpe übernommen. Der damit gemachte Fehler wird als vernachlässigbar eingeschätzt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW R407C Stk	S/W 50kW R407C Stk	L/W 7kW R407C Stk	L/W 50kW R407C Stk
Komponenten:					
Plattenwaermetauscher	kg	14.4	27	7.2	27
Kompressor	kg	45	152	45	147
Halbfabrikate:					
Kupfer	kg	1.4	3.4	2.3	5.2
Kaeltemittel R407C frei Lager Schweiz	kg	2.06/2.02 ¹⁾	10.3/10.1	3.09/3.03	15.5/15.2
Produkt:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW R407C	Stk	1			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW R407C	Stk		1		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW R407C	Stk			1	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW R407C	Stk				1
Emissionen Luft:					
R407C FKW p	kg	0.06/0.02 ¹⁾	0.3/0.1	0.09/0.03	0.45/0.15

Tab. 2.22: Von Tab. 2.20 abweichende Eingabedaten der Herstellung von Sole/- und Luft/Wasser-Wärmepumpen mit HFC-407C. Thermische Leistung: 7 resp. 50kW (KWT 1999).
¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW R404A Stk	S/W 50kW R404A Stk	L/W 7kW R404A Stk	L/W 50kW R404A Stk
Komponenten:					
Plattenwaermetauscher	kg	12	41	4.8	14
Kompressor	kg	45	183	69	213
Halbfabrikate:					
Kupfer	kg	1.6	3.8	2.5	5.6
Kaeltemittel R404A frei Lager Schweiz	kg	2.06/2.02 ¹⁾	10.3/10.1	3.09/3.03	15.5/15.2
Produkt:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW R404A	Stk	1			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW R404A	Stk		1		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW R404A	Stk			1	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW R404A	Stk				1
Emissionen Luft:					
R404A FKW p	kg	0.06/0.02 ¹⁾	0.3/0.1	0.09/0.03	0.45/0.15

Tab. 2.23: Von Tab. 2.20 abweichende Eingabedaten der Herstellung von Sole/- und Luft/Wasser-Wärmepumpen mit HFC-404A. Thermische Leistung: 7 resp. 50kW (KWT 1999).
¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW Isceon 59 Stk	S/W 50kW Isceon 59 Stk	L/W 7kW Isceon 59 Stk	L/W 50kW Isceon 59 Stk
Komponenten:					
Plattenwaermetauscher	kg	12	41	4.8	14
Kompressor	kg	45	183	69	213
Halbfabrikate:					
Kupfer	kg	1.6	3.8	2.5	5.6
Kaeltemittel Isceon 59 frei Lager Schweiz	kg	2.06/2.02 ¹⁾	10.3/10.1	3.09/3.03	15.5/15.2
Produkt:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW Isceon 59	Stk	1			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW Isceon 59	Stk		1		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW Isceon 59	Stk			1	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW Isceon 59	Stk				1
Emissionen Luft:					
Isceon 59 FKW p	kg	0.06/0.02 ¹⁾	0.3/0.1	0.09/0.03	0.45/0.15

Tab. 2.24: Von Tab. 2.20 abweichende Eingabedaten der Herstellung von Sole/- und Luft/Wasser-Wärmepumpen mit Isceon 59. Thermische Leistung: 7 resp. 50kW (KWT 1999).
¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW Propan Stk	S/W 50kW Propan Stk	L/W 7kW Propan Stk	L/W 50kW Propan Stk
Komponenten:					
Plattenwaermetauscher	kg	12	41	4.8	14
Kompressor	kg	45	183	69	213
Halbfabrikate:					
Kupfer	kg	1.6	3.8	2.5	5.6
Propan ab Lager Schweiz	kg	1.03 /1.01 ¹⁾	5.15/5.05	1.55/1.52	7.73/7.58
Produkt:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW Propan	Stk	1			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW Propan	Stk		1		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW Propan	Stk			1	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW Propan	Stk				1
Emissionen Luft:					
Propan p	kg	0.03/0.01 ¹⁾	0.15/0.05	0.045/0.015	0.23/0.075

Tab. 2.25: Von Tab. 2.20 abweichende Eingabedaten der Herstellung von Sole/- und Luft/ Wasser-Wärmepumpen mit Propan. Thermische Leistung: 7 resp. 50kW (KWT 1999).
¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Es kann angenommen werden, dass CO₂-Wärmepumpen ähnliche Materialbedarfe aufweisen, wie Wärmepumpen mit synthetischen Kältemitteln. Bei den Kompressoren könnten höhere Gewichte resultieren, wobei hier durch Konstruktionsänderungen ähnliche spezifische Gewichte (kg pro kW) erzielt werden können. So ist ein CO₂-Kompressor für die Pkw-Klimatisierung gleich schwer wie ein HFC-134a-Kompressor (Neksa 1999).

Bei den Leitungen kann mit erheblich kleineren Volumina gearbeitet werden, weshalb hier Gewichtseinsparungen von vielleicht 40% gegenüber HFC-407C erreicht werden können (Neksa 1999). Aufgrund der unsicheren Gesamtsituation nehmen wir für diese Studie an, dass die Gewichte der CO₂-Wärmepumpenanlage und den Komponenten denjenigen der HFC-134a-Anlage entsprechen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW CO2 Stk	S/W 50kW CO2 Stk	L/W 7kW CO2 Stk	L/W 50kW CO2 Stk
Komponenten:					
Plattenwaermetauscher	kg	12	41	4.8	14
Kompressor	kg	45	183	69	213
Halbfabrikate:					
Kupfer	kg	1.6	3.8	2.5	5.6
Kohlendioxid fluessig ab Lager Schweiz	kg	1.03 /1.01 ¹⁾	5.15/5.05	1.55/1.52	7.73/7.58
Produkt:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW CO2	Stk	1			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW CO2	Stk		1		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW CO2	Stk			1	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW CO2	Stk				1
Emissionen Luft:					
CO2 Kohlendioxid p	kg	0.03/0.01 ¹⁾	0.15/0.05	0.045/0.015	0.23/0.075

Tab. 2.26: Von Tab. 2.20 abweichende Eingabedaten der Herstellung von Sole/- und Luft/ Wasser-Wärmepumpen mit CO₂. Thermische Leistung: 7 resp. 50kW (KWT 1999).
¹⁾: Von den Angaben zur 7kW_{th}-Wärmepumpe mit dem Faktor für HFC-134a-Anlagen extrapoliert.
¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

2.9.2 Kaltwasser- und Solesatz

Hier werden die vorstehend beschriebenen Komponenten plus weitere Anlageteile und Materialien zusammengeführt, die zur Herstellung von Kaltwasser- und Solesätzen benötigt werden. Der Materialaufwand für Flüssigkeits- und Ölabscheider sowie Leitungen und Grundrahmen der Kältemaschine wird hälftig den Abscheidern zugeordnet und hälftig direkt hier als Stahl unlegiert verbucht. Die gesamte Elektronik für die Steuerung der Anlagen wird als kältemittelunabhängig betrachtet und deshalb nicht berücksichtigt. Die Isolation wird mit 10% Verschnitt beaufschlagt. Die Massenbilanzen für die beiden Systeme stammen von Reiner (1999). Der Schaltschrank und nicht definierte übrige Komponenten wurden im Ausmass von ca. 600kg (Kaltwassersatz und Solesatz ohne Ammoniakanlage) resp. 750kg weggelassen.

Das Schmieröl wird als Heizöl Petro angenähert unabhängig davon, ob es sich um ein mineralisches oder vollsynthetisches Öl handelt.

Für die Aufwendungen für den Zusammenbau werden die Angaben über den Zusammenbau eine Ammoniakanlage von knapp 200kW Nennkälteleistung übernommen (Wettstein 1999). Demnach werden für den Zusammenbau 20kg Propan (Schweissgas), ca. 17kg Sauerstoff und ca. 70kg Stickstoff sowie 500kWh Strom benötigt. Die Transportdistanz zum Kunden wird mit 100km abgeschätzt. Neben den Materialtransporten werden die Transporte der Monteure verbucht (ebenfalls 100km, mit Lieferwagen), die während 15 Tagen vor Ort arbeiten.

Der Kältemittelverlust beim Erstbefüllen der Anlage wird für Ammoniak mit 2% (Durchschnitt heute) resp. 0.5% Zukunft angenommen, für HFCs und Propan werden 5% resp. 2% (heute resp. Zukunft) angenommen. Die Füllmengen betragen für beide Anwendungstypen 66kg (Ammoniak) resp. 65kg (alle anderen Kältemittel).

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Kalt- wassersatz NH3 Stk	Infra Kalt- wassersatz Propan Stk	Infra Kalt- wassersatz R134a Stk	Infra Kalt- wassersatz R404A Stk
Komponenten:					
Kompressor Sabroe	kg	654	700	751	677
Kaltwasserkreislauf	kW	400	400	400	400
Rueckkuehler Kaltwassersatz	kW	400	400	400	400
Plattenwaermetauscher NH3	kg	1330			
Rohrbuendelwaermetauscher HFC	kg		1494	1494	1494
Kaeltemittelsammler	kg	400	350	350	350
Halbfabrikate:					
Stahl unlegiert ¹⁾	kg	400	350	350	350
Ammoniak frei Regionallager Schweiz	kg	66.3/66.3 ²⁾			
Propan ab Lager Schweiz	kg		66.3/65.7		
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz	kg			66.3/65.7	
Kaeltemittel R404A frei Lager Schweiz	kg				66.3/65.7
Heizoel Petro ab Raffinerie Euro ¹⁾	t	0.08	0.09	0.09	0.09
Armaflex	kg	55	55	55	55
Betriebsstoffe:					
Propan ab Lager Schweiz	kg	20	20	20	20
Sauerstoff ab Luftzerlegung	kg	17	17	17	17
Stickstoff ab Luftzerlegung	kg	70	70	70	70
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	1.8E-3	1.8E-3	1.8E-3	1.8E-3
Transportdienstleistungen:					
Transport LKW 28 t	tkm	590	600	605	595
Transport Lieferwagen <3.5 t	tkm	1500	1500	1500	1500
Produkt:					
Infra Kaltwassersatz NH3	Stk	1			
Infra Kaltwassersatz Propan	Stk		1		
Infra Kaltwassersatz R134a	Stk			1	
Infra Kaltwassersatz R404A	Stk				1
Emissionen Luft:					
CO2 Kohlendioxid p ³⁾	kg	60	60	60	60
NH3 Ammoniak p	kg	0.33/0.33 ²⁾			
Propan p	kg		1.3/0.65		
R134a FKW p	kg			1.3/0.65	
R404A FKW p	kg				1.3/0.65

Tab. 2.27: Eingabedaten der Herstellung eines Kaltwassersatzes mit Ammoniak (NH₃), Propan, HFC-134a und HFC-404A, inkl. 20m Kälteverteilnetz, Rückkühler, Kältemittelsammler und Wärmetauscher. Nennkälteleistung: 400kW (Reiner 1999).

¹⁾: Schmieröl

²⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

³⁾: Aus dem Verbrennen von Propan.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Kalt- wassersatz R407C Stk	Infra Kalt- wassersatz R410A Stk	Infra Kalt- wassersatz Isceon 59 Stk	Infra Kalt- wassersatz R22 Stk
Komponenten:					
Kompressor Sabroe	kg	691	620	686	675
Kaltwasserkreislauf	kW	400	400	400	400
Rueckkuehler Kaltwassersatz	kW	400	400	400	400
Rohrbuendelwaermetauscher HFC	kg	1494	1494	1494	1494
Kaeltemittelsammler	kg	350	350	350	350
Halbfabrikate:					
Stahl unlegiert ¹⁾	kg	350	350	350	350
Kaeltemittel R407C frei Lager Schweiz	kg	66.3/65.7 ²⁾			
Kaeltemittel R410A frei Lager Schweiz	kg		66.3/65.7		
Kaeltemittel Isceon 59 frei Lager Schweiz	kg			66.3/65.7	
Kaeltemittel R22 frei Lager Schweiz	kg				66.3/65.7
Heizuel Petro ab Raffinerie Euro ¹⁾	t	0.09	0.09	0.09	0.09
Armaflex	kg	55	55	55	55
Betriebsstoffe:					
Propan ab Lager Schweiz	kg	20	20	20	20
Sauerstoff ab Luftzerlegung	kg	17	17	17	17
Stickstoff ab Luftzerlegung	kg	70	70	70	70
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	1.8E-3	1.8E-3	1.8E-3	1.8E-3
Transportdienstleistungen:					
Transport LKW 28 t	tkm	600	590	600	595
Transport Lieferwagen <3.5 t	tkm	1500	1500	1500	1500
Produkt:					
Infra Kaltwassersatz R407C	Stk	1			
Infra Kaltwassersatz R410A	Stk		1		
Infra Kaltwassersatz Isceon 59	Stk			1	
Infra Kaltwassersatz R22	Stk				1
Emissionen Luft:					
CO2 Kohlendioxid p ³⁾	kg	60	60	60	60
R407C FKW p	kg	1.3/0.65 ²⁾			
R410A FKW p	kg		1.3/0.65		
Isceon 59 FKW p	kg			1.3/0.65	
R22 H-FCKW p	kg				1.3/0.65

Tab. 2.28: Eingabedaten der Herstellung eines Kaltwassersatzes mit HFC-407C, HFC-410A, Isceon 59 und HCFC-22, inkl. 20m Kälteverteilnetz, Rückkühler, Kältemittelsammler und Wärmetauscher. Nennkälteleistung: 400kW (Reiner 1999).

¹⁾: Schmieröl

²⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

³⁾: Aus dem Verbrennen von Propan.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Solesatz NH3 Stk	Infra Solesatz Propan Stk	Infra Solesatz R134a Stk	Infra Solesatz R404A Stk
Komponenten:					
Kompressor Sabroe	kg	670	691	824	680
Kaeltetraegerkreislauf	kW	120	120	120	120
Rueckkuehler Solesatz	kW	120	120	120	120
Plattenwaermetauscher NH3	kg	585			
Rohrbuendelwaermetauscher HFC	kg		999	999	999
Kaeltemittelsammler	kg	400	350	350	350
Halbfabrikate:					
Stahl unlegiert ¹⁾	kg	400	350	350	350
Propylenglykol	kg	500	500	500	500
Ammoniak frei Regionallager Schweiz	kg	66.3/66.3 ²⁾			
Propan ab Lager Schweiz	kg		66.3/65.7		
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz	kg			66.3/65.7	
Kaeltemittel R404A frei Lager Schweiz	kg				66.3/65.7
Heizoel Petro ab Raffinerie Euro ¹⁾	t	0.08	0.09	0.09	0.09
Armaflex	kg	55	55	55	55
Betriebsstoffe:					
Propan ab Lager Schweiz	kg	20	20	20	20
Sauerstoff ab Luftzerlegung	kg	17	17	17	17
Stickstoff ab Luftzerlegung	kg	70	70	70	70
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	1.8E-3	1.8E-3	1.8E-3	1.8E-3
Transportdienstleistungen:					
Transport LKW 28 t	tkm	435	470	485	470
Transport LKW 16 t	tkm	1500	1500	1500	1500
Produkt:					
Infra Solesatz NH3	Stk	1			
Infra Solesatz Propan	Stk		1		
Infra Solesatz R134a	Stk			1	
Infra Solesatz R404A	Stk				1
Emissionen Luft:					
CO2 Kohlendioxid p ³⁾	kg	60	60	60	60
NH3 Ammoniak p	kg	0.33/0.33 ²⁾			
Propan p	kg		1.3/0.65		
R134a FKW p	kg			1.3/0.65	
R404A FKW p	kg				1.3/0.65

Tab. 2.29: Eingabedaten der Herstellung eines Solesatzes mit Ammoniak (NH₃), Propan, HFC-134a und HFC-404A, inkl. 20m Kälteverteilnetz, Rückkühler, Kältemittelsammler und Wärmetauscher. Nennkälteleistung: 400kW (Reiner 1999).

¹⁾: Schmieröl

²⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

³⁾: Aus dem Verbrennen von Propan.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Solesatz R407C	Infra Solesatz R410A	Infra Solesatz Isceon 59	Infra Solesatz R22
		Stk	Stk	Stk	Stk
Komponenten:					
Kompressor Sabroe	kg	733	649	735	686
Kaeltetraegerkreislauf	kW	120	120	120	120
Rueckkuehler Solesatz	kW	120	120	120	120
Rohrbuendelwaermetauscher HFC	kg	999	999	999	999
Kaeltemittelsammler	kg	350	350	350	350
Halbfabrikate:					
Stahl unlegiert ¹⁾	kg	350	350	350	350
Propylenglykol	kg	500	500	500	500
Kaeltemittel R407C frei Lager Schweiz	kg	66.3/65.7 ²⁾			
Kaeltemittel R410A frei Lager Schweiz	kg		66.3/65.7		
Kaeltemittel Isceon 59 frei Lager Schweiz	kg			66.3/65.7	
Kaeltemittel R22 frei Lager Schweiz	kg				66.3/65.7
Heizuel Petro ab Raffinerie Euro ¹⁾	t	0.09	0.09	0.09	0.09
Armaflex	kg	55	55	55	55
Betriebsstoffe:					
Propan ab Lager Schweiz	kg	20	20	20	20
Sauerstoff ab Luftzerlegung	kg	17	17	17	17
Stickstoff ab Luftzerlegung	kg	70	70	70	70
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	1.8E-3	1.8E-3	1.8E-3	1.8E-3
Transportdienstleistungen:					
Transport LKW 28 t	tkm	475	465	475	470
Transport LKW 16 t	tkm	1500	1500	1500	1500
Produkt:					
Infra Solesatz R407C	Stk	1			
Infra Solesatz R410A	Stk		1		
Infra Solesatz Isceon 59	Stk			1	
Infra Solesatz R22	Stk				1
Emissionen Luft:					
CO2 Kohlendioxid p ³⁾	kg	60	60	60	60
R407C FKW p	kg	1.3/0.65 ²⁾			
R410A FKW p	kg		1.3/0.65		
Isceon 59 FKW p	kg			1.3/0.65	
R22 H-FCKW p	kg				1.3/0.65

Tab. 2.30: Eingabedaten der Herstellung eines Solesatzes mit HFC-407C, HFC-410A, Isceon 59 und HCFC-22, inkl. 20m Kälteverteilnetz, Rückkühler, Kältemittelsammler und Wärmetauscher. Nennkälteleistung: 400kW (Reiner 1999).

¹⁾: Schmieröl

²⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

³⁾: Aus dem Verbrennen von Propan.

2.9.3 Supermarkt Kälteanlagen

Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Konzepten, wie Normal- und Tiefkühlung in Supermärkten bereitgestellt werden kann. Auf der Basis von 31 Supermarkt-Kälteanlagen unterschiedlicher Grösse (30 bis 300kW Kälteleistung) werden die in Tab. 2.31 aufgelisteten Systeme betrachtet.

Daneben existieren noch eine Vielzahl weiterer Konzepte und Kombinationen. Da von diesen Anlagekonzepten aber nur Daten zu einzelnen Anlagen vorliegen, wurde auf eine Bilanzierung verzichtet.

	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. 2.31: Die in dieser Studie untersuchten Supermarkt-Kälteanlagen-Konzepte.

Die Kühltruhen und Verdampfer für allfällig vorhandene Kühlräume werden in der Bilanz nicht berücksichtigt. Ebenso werden die für die Steuerung notwendige Elektronik und Verkabelung als gleich für alle Anlagen angenommen und weggelassen.

In Supermarkt-Kälteanlagen werden diverse Wärmetauscher eingesetzt (zwischen Tief- und Normalkühlkreislauf, zwischen Kühlkreislauf und Rückkühlung sowie bei Kälte-trägersystemen zwischen Kältemittel- und Kälte-trägerkreislauf). Die hier verwendeten Mengen wurden den Stücklisten und Lieferscheinen von drei Anlagen mittlerer Grösse (darunter auch eine Ammoniakanlage) entnommen (Schaller 1999, Wettstein 1999).

Die mittlere Kälteleistung der betrachteten Anlagen liegt bei 82.3kW für die Normalkühlung und 21.3kW für die Tiefkühlung (insgesamt knapp 104kW). Diese Werte werden für die Bestimmung des Materialaufwandes und der Kältemittelfüllmengen bei allen Anlagen verwendet.

Die Kältemittel-Erstfüllmengen wurden für 31 Supermarktanlagen verschiedener Konfigurationen erfragt. Bezogen auf die installierte Kälteleistung schwanken die Werte für die Normalkühlung je nach Kältemittel zwischen 0.16 und 1.0 kg pro kW bei Systemen mit Kälte-träger. Für die Tiefkühlung, bei der nur eine Ammoniak-Kälteanlage mit Sekundärkreislauf betrachtet wurde, 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 1.3, wobei Ammoniakanlagen eher tiefere Werte aufweisen. In Tab. 9.1 sind die Kältemittelfüllmengen, die Kälteleistungen und der spezifische Stromverbrauch aller 31 Anlagen angegeben.

Die Resultate der Analyse der Kältemittelmengen sind in Tab. 2.32 zusammengestellt. Diese Werte werden für die Sachbilanzen verwendet und auf eine Leistung von 82.3kW_{NK} resp. 21.3kW_{TK} hochgerechnet.

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

Tab. 2.32: Durchschnittliche, spezifische Kältemittelmengen in kg pro kW installierte Kälteleistung von 31 analysierten Supermarkt-Kälteanlagen in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration. In Klammern: Anzahl Anlagen dieses Typs
¹⁾: "-" bedeutet keine Anlage diesen Typs

Für alle Systeme mit einem oder zwei Sekundärkreisläufen wird pro Temperaturniveau dieselbe Menge Kälte-trägerflüssigkeit angenommen. Die Werte schwanken hier zwischen knapp 5.5 und mehr als 23kg (Normalkühlung) resp. zwischen 14 und 67.5kg (Tiefkühlung) jeweils pro installiertes kW Kälteleistung. Der Durchschnitt für die Normalkühlung liegt bei knapp 13kg/kW_{NK},

für die Tiefkühlung bei $44\text{kg/kW}_{\text{TK}}$. Nicht alle Anlagen sind mit einem Rückkühlsystem mit Kälte-träger ausgerüstet. Es werden bis zu 16.6 kg Kälte-träger pro installierte Gesamtkälteleistung benötigt. Der Durchschnitt über alle Anlagen (inkl. der Anlagen ohne Kälte-träger-Rückkühlung) liegt bei $5.6\text{ kg/kW}_{\text{tot}}$. In der Sachbilanz werden die verschiedenen als Kälte-träger eingesetzten Flüssigkeiten mit den Sachbilanzdaten von Propylenglykol angenähert.

Die Kältemittelverluste beim Befüllen der Anlage werden für beide Szenarien (Durchschnitt heute und Zukunft) mit 3% (synthetische Kältemittel) resp. 0.5% (Ammoniak) angenommen.

Die Halbfabrikate und Materialien (total 7.9t (NH_3), 5.75 (HCFC-22 DX/DX) resp. ca. 6.6t (übrige)) werden mit Lkw 28t (300km) zur Fertigungsstätte transportiert (Annahme). Zudem wird die gesamte Anlage mit einem Lkw 16t zum Kunden transportiert (100km). Die Transportaufwendungen für die Monteure sind bei den Verteilungen (siehe Abschnitt 2.8.2) berücksichtigt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Supermarkt NH3 KTS/ NH3 KTS Stk	Infra Supermarkt R134a KTS/ R404A DX Stk	Infra Supermarkt R404A KTS/ R404A DX Stk
Komponenten:				
Kompressor Bitzer	kg	840	840	840
Verteilleitungen Kupfer	kW		104	104
Verteilleitungen Edelstahl	kW	104		
Rueckkuehler Supermarkt	kW	104	104	104
Plattenwaermetauscher NH3 ¹⁾	kg	760	360	360
Rohrbuendelwaermetauscher HFC	kg		455	455
Kaeltemittelsammler ^{1), 2)}	kg	172	66	66
Halbfabrikate:				
Stahl unlegiert ^{1), 3)}	kg	660	515	515
Propylenglykol	kg	2580	1640	1640
Ammoniak frei Regionallager Schweiz	kg	36.6		
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz	kg		56.9	
Kaeltemittel R404A frei Lager Schweiz	kg		80.1	119
Heizuel Petro ab Raffinerie Euro ^{1), 2), 4)}	t	0.050	0.032	0.032
Armaflex ^{1), 5)}	kg	50	50	50
Betriebsstoffe:				
Propan ab Lager Schweiz ⁶⁾	kg	20	20	20
Sauerstoff ab Luftzerlegung ⁶⁾	kg	17	17	17
Stickstoff ab Luftzerlegung ⁶⁾	kg	70	70	70
Energieträger:				
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel ⁶⁾	TJ	1.8E-3	1.8E-3	1.8E-3
Transportdienstleistungen:				
Transport LKW 28 t	tkm	2370	1980	1980
Transport LKW 16 t	tkm	790	660	660
Produkt:				
Infra Supermarkt NH3 KTS/ NH3 KTS	Stk	1		
Infra Supermarkt R134a KTS/ R404A DX	Stk		1	
Infra Supermarkt R404A KTS/ R404A DX	Stk			1
Emissionen Luft:				
CO2 Kohlendioxid p ⁷⁾	kg	60	60	60
NH3 Ammoniak p	kg	0.18		
R134a FKW p	kg		1.66	
R404A FKW p	kg		2.33	3.47

Tab. 2.33: Eingabedaten der Herstellung von Supermarkt-Kälteanlagen mit Ammoniak (NH₃), HFC-134a resp. HFC-404A, (Berger 1999, Schaller 1999, Wettstein 1999).

¹⁾: Aus den Originalwerten für eine 193kW-Ammoniakanlage proportional zur Kälteleistung extrapoliert.

²⁾: Aus den Originalwerten für eine 145kW-R404A-Anlage proportional zur Kälteleistung extrapoliert.

³⁾: Tragstruktur und Kälteleitungen

⁴⁾: Schmieröl

⁵⁾: Isolation der Aggregate

⁶⁾: Betriebsstoff- und Energiebedarf für den Zusammenbau der Aggregate in der Firma, gemäss Angaben von Wettstein (1999) für eine 193kW Ammoniak-Anlage.

⁷⁾: Aus der Verbrennung von Propan.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infra Supermarkt R134a KTS/ R22 DX Stk	Infra Supermarkt R22 KTS/ R22 DX Stk	Infra Supermarkt R22 DX/ R22 DX Stk
Komponenten:				
Kompressor Bitzer	kg	840	840	840
Verteilungen Kupfer	kW	104	104	104
Rueckkuehler Supermarkt	kW	104	104	104
Plattenwaermetauscher NH3 ¹⁾	kg	360	360	360
Rohrbuendelwaermetauscher HFC	kg	455	455	455
Kaeltemittelsammler ^{1), 2)}	kg	66	66	66
Halbfabrikate:				
Stahl unlegiert ^{1), 3)}	kg	515	515	515
Propylenglykol	kg	1640	1640	580
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz	kg	56.9		
Kaeltemittel R22 frei Lager Schweiz	kg	93.5	148	332
Heizuel Petro ab Raffinerie Euro ^{1), 2), 4)}	t	0.032	0.032	0.032
Armafex ^{1), 5)}	kg	50	50	50
Betriebsstoffe:				
Propan ab Lager Schweiz ⁶⁾	kg	20	20	20
Sauerstoff ab Luftzerlegung ⁶⁾	kg	17	17	17
Stickstoff ab Luftzerlegung ⁶⁾	kg	70	70	70
Energieträger:				
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel ⁶⁾	TJ	1.8E-3	1.8E-3	1.8E-3
Transportdienstleistungen:				
Transport LKW 28 t	tkm	1980	1980	1725
Transport LKW 16 t	tkm	660	660	575
Transport Lieferwagen <3.5 t	tkm	1500	1500	1500
Produkt:				
Infra Supermarkt R134a KTS/ R22 DX	Stk	1		
Infra Supermarkt R22 KTS/ R22 DX	Stk		1	
Infra Supermarkt R22 DX/ R22 DX	Stk			1
Emissionen Luft:				
CO2 Kohlendioxid p ⁷⁾	kg	60	60	60
R134a FKW p	kg	1.66		
R22 H-FCKW p	kg	2.72	4.32	9.67

Tab. 2.34: Eingabedaten der Herstellung von Supermarkt-Kälteanlagen mit HFC-134a resp. HCFC-22, (Berger 1999, Schaller 1999, Wettstein 1999).

¹⁾: Aus den Originalwerten für eine 193kW-Ammoniakanlage proportional zur Kälteleistung extrapoliert.

²⁾: Aus den Originalwerten für eine 145kW-R404A-Anlage proportional zur Kälteleistung extrapoliert.

³⁾: Tragstruktur und Kälteleitungen

⁴⁾: Schmieröl

⁵⁾: Isolation der Aggregate

⁶⁾: Betriebsstoff- und Energiebedarf für den Zusammenbau der Aggregate in der Firma, gemäss Angaben von Wettstein (1999) für eine 193kW Ammoniak-Anlage.

⁷⁾: Aus der Verbrennung von Propan.

3 Sachbilanzdaten Betrieb der Anlagen

3.1 Wärmepumpen

Die Bilanzierung des Betriebs der Wärmepumpen umfasst den Energiebedarf, den anteiligen Bedarf an Herstellung und Entsorgung der Wärmepumpenanlagen und die Kältemittlemissionen und beruht grösstenteils auf Angaben von KWT (1999). Es wird mit einer Betriebsstundenanzahl bei Volllast von 1850h pro Jahr und einer Anlagenlebensdauer von 15 resp. 20 Jahren für die 7 resp. 50kW Anlagen gerechnet. Die maximale Vorlauftemperatur beträgt 45°C, die minimale Aussentemperatur -8°C. Die Jahresarbeitszahl entspricht einer Leistungszahl (coefficient of performance, COP) bei 3°C Aussentemperatur und einer Vorlauftemperatur von 36.8°C¹⁸.

Die jährliche an den Wärmetauscher des Wärmeverteilnetzes abgegebene Energieproduktion beträgt 46.6GJ (7kW-Anlage) resp. 333GJ (50kW-Anlage) und es werden pro TJ gelieferte Energie 1.43 resp. 0.15 Wärmepumpenanlagen benötigt.

Die Jahresarbeitszahlen (ohne Hilfsantriebe) der verschiedenen Wärmepumpen-Anlagen sind in Tab. 3.1 zusammengestellt.

	Sole/Wasser- Wärmepumpe 7kW	Sole/Wasser- Wärmepumpe 50kW	Luft/Wasser- Wärmepumpe 7kW	Luft/Wasser- Wärmepumpe 50kW
Kältemittel Propan	3.82	3.90	3.59	4.02
Kältemittel CO ₂	3.62	3.69	3.25	3.32
Kältemittel HFC-134a	4.16	4.20	3.59	3.63
Kältemittel HFC-404A	3.62	3.69	3.25	3.32
Kältemittel HFC-407C	3.70	3.77	3.48	3.95
Kältemittel Isceon 59	4.16	4.20	3.59	3.63
Kältemittel HCFC-22	3.82	3.90	3.59	4.02

Tab. 3.1: Jahresarbeitszahl in Abhängigkeit des Kältemittels gemäss Angaben von KWT (1999). Basis: Aussentemperatur 3°C, Vorlauftemperatur 36.8°C. System für minimale Aussentemperatur -8°C und maximale Vorlauftemperatur 45°C.
Kursiv: Werte basierend auf Annahmen (Isceon 59 = HFC-134a; CO₂ = HFC-404A).

Als Hilfsantriebe werden ein Ventilator resp. eine Sondenpumpe und eine Heizungspumpe benötigt. Deren Leistungen sind in Tab. 3.2 aufgeführt.

	Einheit	Sole/Wasser-Wärmepumpe		Luft/Wasser-Wärmepumpe	
		7kW	50kW	7kW	50kW
Ventilator	W			100	650
Sondenpumpe	W	50	250		
Heizungspumpe	W	50	300	50	300
Total	W	100	550	150	950
Stromverbrauch	kWh	185	1'018	278	1758

Tab. 3.2: Leistung der Hilfsantriebe in [W] und jährlicher Stromverbrauch in [kWh] bei 1'850 Vollbetriebsstunden (KWT 1999).

¹⁸ Die Jahresarbeitszahl errechnet sich aus dem Verhältnis der während eines Jahres erzeugten Wärme (resp. der entzogenen Kälte) zur im selben Zeitraum benötigten elektrischen (oder im Falle von Absorptions-Kältemaschinen thermischen) Energie.
Die Leistungszahl errechnet sich aus dem Verhältnis der Nutzwärme- (resp. Nutzkälteleistung) zur Gesamtleistungsaufnahme.

Die unter Berücksichtigung dieser Hilfsantriebe resultierenden Netto-Jahresarbeitszahlen sind in Tab. 3.3 zusammengestellt. Diese werden in den Sachbilanzen verwendet.

	Sole/Wasser- Wärmepumpe 7kW	Sole/Wasser- Wärmepumpe 50kW	Luft/Wasser- Wärmepumpe 7kW	Luft/Wasser- Wärmepumpe 50kW
Kältemittel Propan	3.62	3.74	3.33	3.81
Kältemittel CO ₂	3.44	3.55	3.04	3.17
Kältemittel HFC-134a	3.93	4.02	3.33	3.45
Kältemittel HFC-404A	3.44	3.55	3.04	3.17
Kältemittel HFC-407C	3.51	3.62	3.24	3.75
Kältemittel Isceon 59	3.93	4.02	3.33	3.45
Kältemittel HCFC-22	3.62	3.74	3.33	3.81

Tab. 3.3: Netto-Jahresarbeitszahl in Abhängigkeit des Kältemittels gemäss Angaben von KWT (1999).

Kursiv: Werte basierend auf Annahmen (Isceon 59 = HFC-134a; CO₂ = HFC-404A).

Die Kältemittelfüllmengen werden aufgrund von Marktstatistiken grob abgeschätzt (WPZ 1999). Für die Luft/Wasser-Wärmepumpen wird bei synthetischen Kältemitteln 3.0 resp. 15kg (7 resp. 50kW_{th}), bei Propan und CO₂ 1.5 resp. 7.5kg eingesetzt. Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen sind die Füllmengen um einen Drittel kleiner, d.h. 2.0 resp. 10kg für die 7 resp. 50kW_{th}-Wärmepumpen mit synthetischen Kältemitteln und 1.0 resp. 5.0kg für die 7 resp. 50kW_{th}-Wärmepumpen mit Propan und CO₂.

Die Kältemittel-Verlustrate des Basisfalls (Durchschnitt heute) wird mit 8% pro Jahr angenommen. Pro TJ an den Wärmetauscher des Wärmeverteilnetzes abgegebene Energiemenge werden 1.43 resp. 0.15 Wärmepumpenanlagen benötigt. Dies führt zu spezifischen Kältemittlemissionen während dem Betrieb von 171.6 resp. 24.0% der Füllmenge¹⁹.

Bei einer in Zukunft zu erwartenden Verlustrate von 2% pro Jahr reduziert sich die emittierte Menge auf 42.9 resp. 6% der Füllmenge pro TJ Wärme.

¹⁹ Leckage 7kW-Anlagen: $1.43[\text{Anlagen/TJ}] \times 15[\text{a}] \times 8[\%/a] = 171.6[\%/TJ]$
 Leckage 50kW-Anlagen: $0.15[\text{Anlagen/TJ}] \times 20[\text{a}] \times 8[\%/a] = 24.0[\%/TJ]$

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Waerme an Verteilnetz ab			
		S/W-WP 7kW R134a TJ	S/W-WP 50kW R134a TJ	L/W-WP 7kW R134a TJ	L/W-WP 50kW R134a TJ
Betriebsmittel:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW R134a	Stk	1.43			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW R134a	Stk		0.15		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW R134a	Stk			1.43	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW R134a	Stk				0.15
Betriebsstoffe:					
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz ¹⁾)	kg	3.43/0.858	2.40/0.60	5.15/1.29	3.60/0.90
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.255	0.249	0.300	0.29
Produkt:					
Waerme an Verteilnetz ab WP 7kW R134a	TJ	1			
Waerme an Verteilnetz ab S/W-WP 50kW R134a	TJ		1		
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 7kW R134a	TJ			1	
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 50kW R134a	TJ				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW R134a	Stk	1.43			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW R134a	Stk		0.15		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW R134a	Stk			1.43	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW R134a	Stk				0.15
Luftschadstoffe:					
R134a FKW p ¹⁾)	kg	3.43/0.858	2.40/0.60	5.15/1.29	3.60/0.90

Tab. 3.4: Eingabedaten des Moduls 1TJ "Waerme an Verteilnetz ab S/W-, L/W-WP 7, 50kW R134a". Annahmen siehe Text.
¹⁾): heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Waerme an Verteilnetz ab			
		S/W-WP 7kW R22 TJ	S/W-WP 50kW R22 TJ	L/W-WP 7kW R22 TJ	L/W-WP 50kW R22 TJ
Betriebsmittel:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW R22	Stk	1.43			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW R22	Stk		0.15		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW R22	Stk			1.43	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW R22	Stk				0.15
Betriebsstoffe:					
Kaeltemittel R22 frei Lager Schweiz ¹⁾)	kg	3.43/0.858	2.40/0.60	5.15/1.29	3.60/0.90
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.276	0.268	0.300	0.262
Produkt:					
Waerme an Verteilnetz ab WP 7kW R22	TJ	1			
Waerme an Verteilnetz ab S/W-WP 50kW R22	TJ		1		
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 7kW R22	TJ			1	
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 50kW R22	TJ				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW R22	Stk	1.43			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW R22	Stk		0.15		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW R22	Stk			1.43	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW R22	Stk				0.15
Luftschadstoffe:					
R22 H-FCKW p ¹⁾)	kg	3.43/0.858	2.40/0.60	5.15/1.29	3.60/0.90

Tab. 3.5: Eingabedaten des Moduls 1TJ "Waerme an Verteilnetz ab S/W-, L/W-WP 7, 50kW R22". Annahmen siehe Text.
¹⁾): heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Waerme an Verteilnetz ab			
		S/W-WP 7kW R404A TJ	S/W-WP 50kW R404A TJ	L/W-WP 7kW R404A TJ	L/W-WP 50kW R404A TJ
Betriebsmittel:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW R404A	Stk	1.43			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW R404A	Stk		0.15		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW R404A	Stk			1.43	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW R404A	Stk				0.15
Betriebsstoffe:					
Kaeltemittel R404A frei Lager Schweiz ¹⁾	kg	3.43/0.858	2.40/0.60	5.15/1.29	3.60/0.90
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.291	0.282	0.329	0.316
Produkt:					
Waerme an Verteilnetz ab WP 7kW R404A	TJ	1			
Waerme an Verteilnetz ab S/W-WP 50kW R404A	TJ		1		
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 7kW R404A	TJ			1	
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 50kW R404A	TJ				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW R404A	Stk	1.43			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW R404A	Stk		0.15		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW R404A	Stk			1.43	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW R404A	Stk				0.15
Luftschadstoffe:					
R404A FKW p ¹⁾	kg	3.43/0.858	2.40/0.60	5.15/1.29	3.60/0.90

Tab. 3.6: Eingabedaten des Moduls 1TJ "Waerme an Verteilnetz ab S/W-, L/W-WP 7, 50kW R404A". Annahmen siehe Text.

¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Waerme an Verteilnetz ab			
		S/W-WP 7kW R407C TJ	S/W-WP 50kW R407C TJ	L/W-WP 7kW R407C TJ	L/W-WP 50kW R407C TJ
Betriebsmittel:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW R407C	Stk	1.43			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW R407C	Stk		0.15		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW R407C	Stk			1.43	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW R407C	Stk				0.15
Betriebsstoffe:					
Kaeltemittel R407C frei Lager Schweiz ¹⁾	kg	3.43/0.858	2.40/0.60	5.15/1.29	3.60/0.90
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.285	0.276	0.309	0.267
Produkt:					
Waerme an Verteilnetz ab WP 7kW R407C	TJ	1			
Waerme an Verteilnetz ab S/W-WP 50kW R407C	TJ		1		
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 7kW R407C	TJ			1	
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 50kW R407C	TJ				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW R407C	Stk	1.43			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW R407C	Stk		0.15		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW R407C	Stk			1.43	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW R407C	Stk				0.15
Luftschadstoffe:					
R407c FKW p ¹⁾	kg	3.43/0.858	2.40/0.60	5.15/1.29	3.60/0.90

Tab. 3.7: Eingabedaten des Moduls 1TJ "Waerme an Verteilnetz ab S/W-, L/W-WP 7, 50kW R407C". Annahmen siehe Text.

¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Waerme an Verteilnetz ab			
		S/W-WP 7kW Isceon 59 TJ	S/W-WP 50kW Is- ceon 59 TJ	L/W-WP 7kW Isceon 59 TJ	L/W-WP 50kW Is- ceon 59 TJ
Betriebsmittel:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW Isceon 59	Stk	1.43			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW Isceon 59	Stk		0.15		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW Isceon 59	Stk			1.43	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW Isceon 59	Stk				0.15
Betriebsstoffe:					
Kaeltemittel Isceon 59 frei Lager Schweiz ¹⁾	kg	3.43/0.858	2.40/0.60	5.15/1.29	3.60/0.90
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.255	0.249	0.300	0.290
Produkt:					
Waerme an Verteilnetz ab WP 7kW Isceon 59	TJ	1			
Waerme an Verteilnetz ab S/W-WP 50kW Isceon 59	TJ		1		
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 7kW Isceon 59	TJ			1	
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 50kW Isceon 59	TJ				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW Isceon 59	Stk	1.43			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW Isceon 59	Stk		0.15		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW Isceon 59	Stk			1.43	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW Isceon 59	Stk				0.15
Luftschadstoffe:					
Isceon 59 FKW p ¹⁾	kg	3.43/0.858	2.40/0.60	5.15/1.29	3.60/0.90

Tab. 3.8: Eingabedaten des Moduls 1TJ "Waerme an Verteilnetz ab S/W-, L/W-WP 7, 50kW Isceon 59". Annahmen siehe Text.

¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Waerme an Verteilnetz ab			
		S/W-WP 7kW Propan TJ	S/W-WP 50kW Pro- pan TJ	L/W-WP 7kW Propan TJ	L/W-WP 50kW Pro- pan TJ
Betriebsmittel:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW Propan	Stk	1.43			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW Propan	Stk		0.15		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW Propan	Stk			1.43	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW Propan	Stk				0.15
Betriebsstoffe:					
Propan ab Raffinerie Europa ¹⁾	kg	1.72/0.429	1.20/0.30	2.57/0.644	1.80/0.45
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.276	0.268	0.300	0.262
Produkt:					
Waerme an Verteilnetz ab WP 7kW Propan	TJ	1			
Waerme an Verteilnetz ab S/W-WP 50kW Propan	TJ		1		
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 7kW Propan	TJ			1	
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 50kW Propan	TJ				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW Propan	Stk	1.43			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW Propan	Stk		0.15		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW Propan	Stk			1.43	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW Propan	Stk				0.15
Luftschadstoffe:					
Propan p ¹⁾	kg	1.72/0.429	1.20/0.30	2.57/0.644	1.80/0.45

Tab. 3.9: Eingabedaten des Moduls 1TJ "Waerme an Verteilnetz ab S/W-, L/W-WP 7, 50kW Propan". Annahmen siehe Text.

¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Waerme an Verteilnetz ab			
		S/W-WP 7kW CO2 TJ	S/W-WP 50kW CO2 TJ	L/W-WP 7kW CO2 TJ	L/W-WP 50kW CO2 TJ
Betriebsmittel:					
Infra Waermepumpenanlage S/W 7kW CO2	Stk	1.43			
Infra Waermepumpenanlage S/W 50kW CO2	Stk		0.15		
Infra Waermepumpenanlage L/W 7kW CO2	Stk			1.43	
Infra Waermepumpenanlage L/W 50kW CO2	Stk				0.15
Betriebsstoffe:					
Kohlendioxid fluessig ab Lager Schweiz ¹⁾	kg	1.72/0.429	1.20/0.30	2.57/0.644	1.80/0.45
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.291	0.282	0.329	0.316
Produkt:					
Waerme an Verteilnetz ab WP 7kW CO2	TJ	1			
Waerme an Verteilnetz ab S/W-WP 50kW CO2	TJ		1		
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 7kW CO2	TJ			1	
Waerme an Verteilnetz ab L/W-WP 50kW CO2	TJ				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW CO2	Stk	1.43			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW CO2	Stk		0.15		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW CO2	Stk			1.43	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW CO2	Stk				0.15
Luftschadstoffe:					
CO2 Kohlendioxid p ¹⁾	kg	1.72/0.429	1.20/0.30	2.57/0.644	1.80/0.45

Tab. 3.10: Eingabedaten des Moduls 1TJ "Waerme an Verteilnetz ab S/W-, L/W-WP 7, 50kW CO₂".
Annahmen siehe Text.

¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

3.2 Kaltwasser- und Solesatz

3.2.1 Einleitung

Die Bilanzierung des Betriebs des Kaltwasser- und Solesatzes umfasst den Energiebedarf, den anteiligen Bedarf an Herstellung und Entsorgung der Anlagen und die Kältemittlemissionen. Die Angaben beruhen auf Angaben von Reiner (1999). Es wird mit einer Betriebsstundenanzahl bei Vollast von 1500h (Kaltwassersatz) resp. 8000h (Solesatz) pro Jahr und einer Anlagenlebensdauer von 20 Jahren gerechnet. Die Kaltwassertemperaturen betragen 6/12°C, die Kälte-trägertemperaturen -25/-30°C und die Kühlwassertemperaturen in beiden Fällen 25/30°C.

Die Netto-Jahresarbeitszahlen der beiden Systeme sind in [Tab. 3.11](#) zusammengestellt. Sie wurden mit dem Simulationsprogramm des Kompressorenherstellers Sabroe berechnet. Die Leistungszahl (inkl. Hilfsantriebe) variiert für Kaltwassersatz je nach Kältemittel zwischen 3.3 (HFC-407C) und 4.3 (Ammoniak) und für Solesätze zwischen 1.0 (HFC-407C) und knapp 1.5 (Ammoniak).

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

Tab. 3.11: Jahresarbeitszahlen (inkl. Hilfsenergie für Pumpen und Ventilatoren) für Kaltwassersatz 6/12°C und Solesatz -25/-30°C in Abhängigkeit des Kältemittels gemäss Angaben von Reiner (1999). Kühlwassertemperatur 25/30°C. Berechnet mit Sabroe-Simulationsprogramm.

¹⁾: Kältemittel für den Einsatz im Tieftemperaturbereich nicht geeignet.

Die Kältemittlemissionen betragen heute im Durchschnitt 10% (Ammoniak 5%), in Zukunft sind 5% resp. 2% (Ammoniak) zu erwarten. Die Kältemittelfüllmenge beträgt 66kg (Ammoniak) resp. 65kg (alle anderen Kältemittel).

3.2.2 Kaltwassersatz

Mit einem Jahreskältebedarf von 2'160GJ pro Jahr (400kW während 1'500 Vollbetriebsstunden) und einer Anlagenlebensdauer von 20 Jahren werden pro TJ gelieferte Kälteenergie 0.023 Anlagen benötigt (resp. entsorgt). Für die Kühlung werden 1427m³ vorbehandeltes Wasser gebraucht. Dies entspricht einer Menge von 661'000kg pro TJ produzierter Kälte.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaelte ab Kaltwassersatz NH3 TJ	Kaelte ab Kaltwassersatz Propan TJ	Kaelte ab Kaltwassersatz R134a TJ	Kaelte ab Kaltwassersatz R404A TJ
Infrastruktur:					
Infra Kaltwassersatz NH3	Stk	0.023			
Infra Kaltwassersatz Propan	Stk		0.023		
Infra Kaltwassersatz R134a	Stk			0.023	
Infra Kaltwassersatz R404A	Stk				0.023
Betriebsstoffe:					
Wasser entkarbonisiert	kg	661'000	661'000	661'000	661'000
Ammoniak frei Regionallager Schweiz	kg	1.53/0.61 ¹⁾			
Propan ab Lager Schweiz	kg		3.0/1.5		
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz	kg			3.0/1.5	
Kaeltemittel R404A frei Lager Schweiz	kg				3.0/1.5
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.233	0.267	0.257	0.289
Produkt:					
Kaelte ab Kaltwassersatz NH3	TJ	1			
Kaelte ab Kaltwassersatz Propan	TJ		1		
Kaelte ab Kaltwassersatz R134a	TJ			1	
Kaelte ab Kaltwassersatz R404A	TJ				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Entsorgung Kaltwassersatz NH3	Stk	0.023			
Entsorgung Kaltwassersatz Propan	Stk		0.023		
Entsorgung Kaltwassersatz R134a	Stk			0.023	
Entsorgung Kaltwassersatz R404A	Stk				0.023
Luftschadstoffe:					
NH3 Ammoniak p	kg	1.53/0.61 ¹⁾			
Propan p	kg		3.0/1.5		
R134a FKW p	kg			3.0/1.5	
R404A FKW p	kg				3.0/1.5

Tab. 3.12: Eingabedaten der Module 1TJ "Kaelte ab Kaltwassersatz NH3, Propan, R134a resp. R404A".

¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaelte ab Kaltwassersatz R407C TJ	Kaelte ab Kaltwassersatz R410A TJ	Kaelte ab Kaltwassersatz Isceon 59 TJ	Kaelte ab Kaltwassersatz R22 TJ
Betriebsmittel: Infra Kaltwassersatz R407C Infra Kaltwassersatz R410A Infra Kaltwassersatz Isceon 59 Infra Kaltwassersatz R22	Stk Stk Stk Stk	0.023	0.023	0.023	0.023
Betriebsstoffe: Wasser entkarbonisiert Kaeltemittel R407C frei Lager Schweiz Kaeltemittel R410A frei Lager Schweiz Kaeltemittel Isceon 59 frei Lager Schweiz Kaeltemittel R22 frei Lager Schweiz	kg kg kg kg kg	661'000 3.0/1.5 ¹⁾	661'000 3.0/1.5	661'000 3.0/1.5	661'000 3.0/1.5
Energieträger: Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.301	0.258	0.256	0.248
Produkt: Kaelte ab Kaltwassersatz R407C Kaelte ab Kaltwassersatz R410A Kaelte ab Kaltwassersatz Isceon 59 Kaelte ab Kaltwassersatz R22	TJ TJ TJ TJ	1	1	1	1
Entsorgungsdienstleistungen: Entsorgung Kaltwassersatz R407C Entsorgung Kaltwassersatz R410A Entsorgung Kaltwassersatz Isceon 59 Entsorgung Kaltwassersatz R22	Stk Stk Stk Stk	0.023	0.023	0.023	0.023
Luftschadstoffe: R407C FKW p R410A FKW p Isceon 59 FKW p R22 H-FCKW p	kg kg kg kg	3.0/1.5 ¹⁾	3.0/1.5	3.0/1.5	3.0/1.5

Tab. 3.13: Eingabedaten der Module 1TJ "Kaelte ab Kaltwassersatz R407C, R410A, Isceon 59 resp. R22".

¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

3.2.3 Solesatz

Mit einem Jahreskältebedarf von 3'460GJ pro Jahr (120kW während 8'000 Vollbetriebsstunden) und einer Anlagenlebensdauer von 20 Jahren werden pro TJ gelieferte Kälteenergie 0.0145 Anlagen benötigt (resp. entsorgt). Der Kühlwasserbedarf beträgt hier 3'211m³ jährlich oder 929'000kg pro TJ Kälte.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaelte ab Solesatz NH3 TJ	Kaelte ab Solesatz Propan TJ	Kaelte ab Solesatz R134a TJ	Kaelte ab Solesatz R404A TJ
Betriebsmittel:					
Infra Solesatz NH3	Stk	0.0145			
Infra Solesatz Propan	Stk		0.0145		
Infra Solesatz R134a	Stk			0.0145	
Infra Solesatz R404A	Stk				0.0145
Betriebsstoffe:					
Wasser entkarbonisiert	kg	929'000	929'000	929'000	929'000
Ammoniak frei Regionallager Schweiz	kg	1.53/0.61 ¹⁾			
Propan ab Lager Schweiz	kg		3.0/1.5		
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz	kg			3.0/1.5	
Kaeltemittel R404A frei Lager Schweiz	kg				3.0/1.5
Energieträger:					
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.672	0.725	0.855	0.822
Produkt:					
Kaelte ab Solesatz NH3	TJ	1			
Kaelte ab Solesatz Propan	TJ		1		
Kaelte ab Solesatz R134a	TJ			1	
Kaelte ab Solesatz R404A	TJ				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Entsorgung Solesatz NH3	Stk	0.0145			
Entsorgung Solesatz Propan	Stk		0.0145		
Entsorgung Solesatz R134a	Stk			0.0145	
Entsorgung Solesatz R404A	Stk				0.0145
Luftschadstoffe:					
NH3 Ammoniak p	kg	1.53/0.61 ¹⁾			
Propan p	kg		3.0/1.5		
R134a FKW p	kg			3.0/1.5	
R404A FKW p	kg				3.0/1.5

Tab. 3.14: Eingabedaten der Module 1TJ "Kaelte ab Solesatz NH3, Propan, R134a resp. R404A".
¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kaelte ab Solesatz R407C TJ	Kaelte ab Solesatz R410A TJ	Kaelte ab Solesatz Isceon 59 TJ	Kaelte ab Solesatz R22 TJ
Betriebsmittel: Infra Solesatz R407C Infra Solesatz R410A Infra Solesatz Isceon 59 Infra Solesatz R22	Stk Stk Stk Stk	0.0145	0.0145	0.0145	0.0145
Betriebsstoffe: Wasser entkarbonisiert Kaeltemittel R407C frei Lager Schweiz Kaeltemittel R410A frei Lager Schweiz Kaeltemittel Isceon 59 frei Lager Schweiz Kaeltemittel R22 frei Lager Schweiz	kg kg kg kg kg	929'000 3.0/1.5 ¹⁾	929'000 3.0/1.5	929'000 3.0/1.5	929'000 3.0/1.5
Energieträger: Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.985	0.816	0.910	0.698
Produkt: Kaelte ab Solesatz R407C Kaelte ab Solesatz R410A Kaelte ab Solesatz Isceon 59 Kaelte ab Solesatz R22	TJ TJ TJ TJ	1	1	1	1
Entsorgungsdienstleistungen: Entsorgung Solesatz R407C Entsorgung Solesatz R410A Entsorgung Solesatz Isceon 59 Entsorgung Solesatz R22	Stk Stk Stk Stk	0.0145	0.0145	0.0145	0.0145
Luftschadstoffe: R407C FKW p R410A FKW p Isceon 59 FKW p R22 H-FCKW p	kg kg kg kg	3.0/1.5 ¹⁾	3.0/1.5	3.0/1.5	3.0/1.5

Tab. 3.15: Eingabedaten der Module 1TJ "Kaelte ab Solesatz R407C, R410A, Isceon 59 resp. R22".

¹⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen

3.3 Supermarkt-Kälteanlagen

Aus den Betriebsdaten und Kennziffern der knapp 30 untersuchten Supermarkt-Kälteanlagen (Inbetriebnahmen zwischen 1992 und 1998) geht hervor, dass pro Kühlmöbel-Laufmeter rund 1.41kW Kälteleistung (Normal- und Tiefkühlung) installiert sind. Der Wert schwankt zwischen 0.8 und 2.4kW pro Laufmeter. Die insgesamt installierte Leistung der Anlagen beträgt durchschnittlich 104kW (79.5% Normal- und 20.5% Tiefkühlung). Auch hier sind jedoch deutliche Abweichungen zu verzeichnen von 30 bis knapp über 300kW.

Unter Annahme einer Anlagenlebensdauer von 15 Jahren werden somit pro Laufmeter Kühlmöbel 0.0009 Anlagen mit einer Kälteleistung von 104kW benötigt²⁰.

Der Energieverbrauch wird bezogen auf die Laufmeter Kühlmöbel wobei je nach Geometrie und Aufbau der Möbel die Korrekturfaktoren von Tab. 3.16 eingesetzt werden.

²⁰ 1.41kW installierte Kälteleistung pro Laufmeter Kühlmöbel dividiert durch Kälteleistung 104kW und durch 15 Jahre Lebensdauer.

Kühlmöbelbeschreibung	Korr.-faktor
Kühlvitrinen (h = 2 m)	1
Kühlvitrinen (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. 3.16: Korrekturfaktoren für die Bestimmung der Bezugsgrösse "Laufmeter Kühlmöbel" (Berger 1999).

Der 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 (korr.) und Jahr. 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 (siehe [Tab. 3.17](#)).

[kWh/m'.a]	Anzahl Anlagen ¹⁾	Normalkühlung	Tiefkühlung	Total
NH3 KTS/ NH3 KTS	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. 3.17: Durchschnittlicher spezifischer Strombedarf in kWh pro Laufmeter Kühlmöbel und Jahr von 29 analysierten Supermarkt-Kälteanlagen in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration. In dieser Studie werden die Total-Werte verwendet.

¹⁾: Normalkühlung/ Tiefkühlung

Beim Stromverbrauch sind weit höhere aber auch deutlich tiefere Werte zu beobachten (von 3.9 bis knapp 7.4MWh pro Laufmeter und Jahr). Aus diesem Grund wird der Energiebedarf in der Sensitivitätsbetrachtung für alle Anlagekonzepte zwischen 4 und 7MWh pro Laufmeter und Jahr variiert.

Die Kältemittelfüllmengen, die in Tab. 2.32 in absoluten Zahlen angegeben sind (d.h. pro Anlage mit einer Kälteleistung von 104kW) müssen hier mit 0.01356 multipliziert werden, um den Käl-

temittelbedarf pro Laufmeter Kühlmöbel zu erhalten²¹. Damit können die Verlustmengen berechnet werden.

Die Kältemittelverluste während des Betriebs der Anlage werden mit 13.5% pro Jahr (Durchschnitt heute) und 6% pro Jahr (zukünftiger Zielwert) angenommen. Für Anlagen mit Sekundärkreislauf sind diese Werte somit um 20 bis 30% höher als diejenigen für Kaltwasser- und Solesätze.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kuehl- moebel Supermarkt NH3 KTS/ NH3 KTS m/a	Kuehl- moebel Supermarkt R134a KTS/ R404A DX m/a	Kuehl- moebel Supermarkt R404A KTS/ R404A DX m/a
Betriebsmittel:				
Infra Supermarkt NH3 KTS/ NH3 KTS	Stk	0.0009		
Infra Supermarkt R134a KTS/ R404A DX	Stk		0.0009	
Infra Supermarkt R404A KTS/ R404A DX	Stk			0.0009
Halbfabrikate:				
Ammoniak frei Regionallager Schweiz ¹⁾	kg	0.025/0.010		
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz	kg		0.101/0.045	
Kaeltemittel R404A frei Lager Schweiz	kg		0.142/0.063	0.212/0.094
Energieträger:				
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.0194	0.0164	0.0162
Produkt:				
Kuehlmoebel Supermarkt NH3 KTS/ NH3 KTS	m/a	1		
Kuehlmoebel Supermarkt R134a KTS/ R404A DX	m/a		1	
Kuehlmoebel Supermarkt R404A KTS/ R404A DX	m/a			1
Entsorgungsdienstleistungen:				
Entsorgung Supermarkt NH3 KTS/ NH3 KTS	Stk	0.0009		
Entsorgung Supermarkt R134a KTS/ R404A DX	Stk		0.0009	
Entsorgung Supermarkt R404A KTS/ R404A DX	Stk			0.0009
Emissionen Luft:				
NH3 Ammoniak p ¹⁾	kg	0.025/0.010		
R134a FKW p	kg		0.101/0.045	
R404A FKW p	kg		0.142/0.063	0.212/0.094

Tab. 3.18: Eingabedaten des Betriebs von Supermarkt-Kälteanlagen mit Ammoniak (NH3), HFC-134a resp. HFC-404A, (Berger 1999, Schaller 1999, Wettstein 1999). Bezugsgrösse: 1 Laufmeter Kühlmöbel (korrigiert).

¹⁾: heutige/ zukünftige Verlustmengen

²¹ 1.41kW installierte Kälteleistung pro Laufmeter Kühlmöbel dividiert durch Kälteleistung 104kW.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Kuehl- moebel Supermarkt R134a KTS/ R22 DX m/a	Kuehl- moebel Supermarkt R22 KTS/ R22 DX m/a	Kuehl- moebel Supermarkt R22 DX/ R22 DX m/a
Betriebsmittel:				
Infra Supermarkt R134a KTS/ R22 DX	Stk	0.0009		
Infra Supermarkt R22 KTS/ R22 DX	Stk		0.0009	
Infra Supermarkt R22 DX/ R22 DX	Stk			0.0009
Halbfabrikate:				
Kaeltemittel R134a frei Lager Schweiz ¹⁾	kg	0.101/0.045		
Kaeltemittel R22 frei Lager Schweiz	kg	0.166/0.074	0.264/0.117	0.59/0.262
Energieträger:				
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	0.0156	0.0181	0.0174
Produkt:				
Kuehlmoebel Supermarkt R134a KTS/ R22 DX	m/a	1		
Kuehlmoebel Supermarkt R22 KTS/ R22 DX	m/a		1	
Kuehlmoebel Supermarkt R22 DX/ R22 DX	m/a			1
Entsorgungsdienstleistungen:				
Entsorgung Supermarkt R134a KTS/ R22 DX	Stk	0.0009		
Entsorgung Supermarkt R22 KTS/ R22 DX	Stk		0.0009	
Entsorgung Supermarkt R22 DX/ R22 DX	Stk			0.0009
Emissionen Luft:				
R134a FKW p ¹⁾	kg	0.101/0.045		
R22 H-FCKW p	kg	0.166/0.074	0.264/0.117	0.59/0.262

Tab. 3.19: Eingabedaten des Betriebs von Supermarkt-Kälteanlagen mit HFC-134a resp. HCFC-22, (Berger 1999, Schaller 1999, Wettstein 1999). Bezugsgrösse: 1 Laufmeter Kühlmöbel (korrigiert).
¹⁾: heutige/ zukünftige Verlustmengen

4 Sachbilanzdaten Entsorgung der Anlagen

4.1 Übersicht

Über die Entsorgung der Anlagen liegen nur rudimentäre Informationen vor. Das Kältemittel wird abgesaugt, was je nach Komplexität der Anlage (insb. bei Supermarktanlagen mit Direktverdampfung) zu erhöhten Kältemittelverlusten führt. Das so zurückgewonnene Kältemittel wird entweder in Spezialanlagen verwertet (beispielsweise in Hannover bei Solvay Deutschland), andernorts zu Wartungszwecken wieder eingesetzt (falls die Reinheit dies noch zulässt) oder in Spezialanlagen vernichtet. In dieser Studie gehen wir von einer Aufbereitung gebrauchter Kältemittel aus. Die Aufwendungen zur Aufbereitung werden hier nicht verbucht, wären aber bei einer Ökobilanz aufbereiteter Kältemittel einzubeziehen.

Energie- und andere Aufwendungen bei der Entsorgung werden mangels Angaben nicht berücksichtigt.

Die Metalle werden in der Regel dem Schrottreycling zugeführt und deshalb hier nicht verbucht. Die Kunststoffe werden in der KVA entsorgt und mineralische Baustoffe auf Inertstoffdeponien abgelagert (Annahmen).

4.2 Wärmepumpen

Im Basisszenario (Istzustand heute) wird von einem durchschnittlichen Kältemittelverlust beim Rückbau von 20 resp. 5 Gew.-% ausgegangen (Durchschnitt heute resp. optimierte Neuanlagen). Für die CO₂-Wärmepumpen wird ein vollständiges Entweichen der Kältemittelmenge unterstellt (100 Gew.-% Verlust).

Aufgrund der Materialzusammensetzung und der Kältemittelfüllmenge von Wärmepumpenanlagen ergeben sich somit die folgenden Entsorgungsaufwendungen und -emissionen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW R134a TJ	S/W 50kW R134a TJ	L/W 7kW R134a TJ	L/W 50kW R134a TJ
Produkt:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW R134a	Stk	1			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW R134a	Stk		1		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW R134a	Stk			1	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW R134a	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	1.35	5.49	2.07	6.39
PE in KVA	kg	205.4	1422		
Beton in Inertstoffdeponie ¹⁾	kg	50.7	351		
Kunststoffe in KVA ²⁾	kg	0.514	0.814	0.5	0.8
PVC in KVA	kg	0.059	0.059		
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	0.081	0.081		
Propylenglykol in KVA	kg	83	571		
Aufbereitung Kaeltemittel R134a § ⁴⁾	kg	3.60/4.275	14.4/17.1	6.0/7.125	19.2/22.8
Luftschadstoffe:					
R134a FKW p ⁴⁾	kg	0.40/0.10	2.0/0.50	0.60/0.15	3.0/0.75

Tab. 4.1: Eingabedaten des Moduls 1Stk "Entsorgung Waermepumpenanlage S/W, L/W 7, 50kW R134a". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Zement der Erdsonden.

²⁾: Gummi der Umwälzpumpe und der Waermepumpenanlage.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW R22 TJ	S/W 50kW R22 TJ	L/W 7kW R22 TJ	L/W 50kW R22 TJ
Produkt:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW R22	Stk	1			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW R22	Stk		1		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW R22	Stk			1	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW R22	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	1.35	5.49	2.07	6.39
PE in KVA	kg	205.4	1422		
Beton in Inertstoffdeponie ¹⁾	kg	50.7	351		
Kunststoffe in KVA ²⁾	kg	0.514	0.814	0.5	0.8
PVC in KVA	kg	0.059	0.059		
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	0.081	0.081		
Propylenglykol in KVA	kg	83	571		
Aufbereitung Kaeltemittel R22 § ⁴⁾	kg	3.3/3.8	14.2/16.9	5.76/6.84	18.2/21.7
Luftschadstoffe:					
R22 H-FCKW p ⁴⁾	kg	0.40/0.10	2.0/0.50	0.60/0.15	3.0/0.75

Tab. 4.2: Eingabedaten des Moduls 1Stk "Entsorgung Waermepumpenanlage S/W, L/W 7, 50kW R22". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Zement der Erdsonden.

²⁾: Gummi der Umwälzpumpe und der Waermepumpenanlage.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW R404A TJ	S/W 50kW R404A TJ	L/W 7kW R404A TJ	L/W 50kW R404A TJ
Produkt:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW R404A	Stk	1			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW R404A	Stk		1		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW R404A	Stk			1	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW R404A	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	1.35	5.49	2.07	6.39
PE in KVA	kg	205.4	1422		
Beton in Inertstoffdeponie ¹⁾	kg	50.7	351		
Kunststoffe in KVA ²⁾	kg	0.514	0.814	0.5	0.8
PVC in KVA	kg	0.059	0.059		
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	0.081	0.081		
Propylenglykol in KVA	kg	83	571		
Aufbereitung Kaeltemittel R404A § ⁴⁾	kg	3.10/3.69	12.4/14.7	5.17/6.14	16.5/19.6
Luftschadstoffe:					
R404A FKW p ⁴⁾	kg	0.40/0.10	2.0/0.50	0.60/0.15	3.0/0.75

Tab. 4.3: Eingabedaten des Moduls 1Stk "Entsorgung Waermepumpenanlage S/W, L/W 7, 50kW R404A". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Zement der Erdsonden.

²⁾: Gummi der Umwälzpumpe und der Waermepumpenanlage.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW R407C TJ	S/W 50kW R407C TJ	L/W 7kW R407C TJ	L/W 50kW R407C TJ
Produkt:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW R407C	Stk	1			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW R407C	Stk		1		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW R407C	Stk			1	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW R407C	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	1.35	5.49	2.07	6.39
PE in KVA	kg	205.4	1422		
Beton in Inertstoffdeponie ¹⁾	kg	50.7	351		
Kunststoffe in KVA ²⁾	kg	0.514	0.814	0.5	0.8
PVC in KVA	kg	0.059	0.059		
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	0.081	0.081		
Propylenglykol in KVA	kg	83	571		
Aufbereitung Kaeltemittel R407C § ⁴⁾	kg	3.15/3.74	12.6/15.0	5.76/6.84	18.2/21.7
Luftschadstoffe:					
R407C FKW p ⁴⁾	kg	0.40/0.10	2.0/0.50	0.60/0.15	3.0/0.75

Tab. 4.4: Eingabedaten des Moduls 1Stk "Entsorgung Waermepumpenanlage S/W, L/W 7, 50kW R407C". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Zement der Erdsonden.

²⁾: Gummi der Umwälzpumpe und der Waermepumpenanlage.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW Isceon 59 TJ	S/W 50kW Isceon 59 TJ	L/W 7kW Isceon 59 TJ	L/W 50kW Isceon 59 TJ
Produkt:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW Isceon 59	Stk	1			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW Isceon 59	Stk		1		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW Isceon 59	Stk			1	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW Isceon 59	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	1.35	5.49	2.07	6.39
PE in KVA	kg	205.4	1422		
Beton in Inertstoffdeponie ¹⁾	kg	50.7	351		
Kunststoffe in KVA ²⁾	kg	0.514	0.814	0.5	0.8
PVC in KVA	kg	0.059	0.059		
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	0.081	0.081		
Propylenglykol in KVA	kg	83	571		
Aufbereitung Kaeltemittel Isceon 59 § ⁴⁾	kg	3.3/3.8	14.2/16.9	5.76/6.84	18.2/21.7
Luftschadstoffe:					
Isceon 59 FKW p ⁴⁾	kg	0.40/0.10	2.0/0.50	0.60/0.15	3.0/0.75

Tab. 4.5: Eingabedaten des Moduls 1Stk "Entsorgung Waermepumpenanlage S/W, L/W 7, 50kW Isceon 59". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Zement der Erdsonden.

²⁾: Gummi der Umwälzpumpe und der Waermepumpenanlage.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW Propan TJ	S/W 50kW Propan TJ	L/W 7kW Propan TJ	L/W 50kW Propan TJ
Produkt:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW Propan	Stk	1			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW Propan	Stk		1		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW Propan	Stk			1	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW Propan	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	1.35	5.49	2.07	6.39
PE in KVA	kg	205.4	1422		
Beton in Inertstoffdeponie ¹⁾	kg	50.7	351		
Kunststoffe in KVA ²⁾	kg	0.514	0.814	0.5	0.8
PVC in KVA	kg	0.059	0.059		
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	0.081	0.081		
Propylenglykol in KVA	kg	83	571		
Aufbereitung Kaeltemittel Propan § ⁴⁾	kg	1.98/2.35	7.90/9.39	3.2/3.8	10.1/12.0
Luftschadstoffe:					
Propan p ⁴⁾	kg	0.20/0.50	1.0/0.25	0.30/0.075	1.5/0.375

Tab. 4.6: Eingabedaten des Moduls 1Stk "Entsorgung Waermepumpenanlage S/W, L/W 7, 50kW Propan". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Zement der Erdsonden.

²⁾: Gummi der Umwälzpumpe und der Waermepumpenanlage.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Waermepumpenanlage			
		S/W 7kW CO2 TJ	S/W 50kW CO2 TJ	L/W 7kW CO2 TJ	L/W 50kW CO2 TJ
Produkt:					
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 7kW CO2	Stk	1			
Entsorgung Waermepumpenanlage S/W 50kW CO2	Stk		1		
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 7kW CO2	Stk			1	
Entsorgung Waermepumpenanlage L/W 50kW CO2	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	1.35	5.49	2.07	6.39
PE in KVA	kg	205.4	1422		
Beton in Inertstoffdeponie ¹⁾	kg	50.7	351		
Kunststoffe in KVA ²⁾	kg	0.514	0.814	0.5	0.8
PVC in KVA	kg	0.059	0.059		
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	0.081	0.081		
Propylenglykol in KVA	kg	83	571		
Aufbereitung Kaeltemittel CO2 § ⁴⁾	kg	0	0	0	0
Luftschadstoffe:					
CO2 Kohlendioxid p ⁴⁾	kg	1.0	5.0	1.5	7.5

Tab. 4.7: Eingabedaten des Moduls 1Stk "Entsorgung Waermepumpenanlage S/W, L/W 7, 50kW CO₂". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Zement der Erdsonden.

²⁾: Gummi der Umwälzpumpe und der Waermepumpenanlage.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

4.3 Kaltwasser- und Solesatz

Im Basisszenario (Istzustand heute) wird für Ammoniak von einem durchschnittlichen Kältemittelverlust beim Absaugen von 5 resp. 2 Gew.-% ausgegangen (Durchschnitt heute resp. optimierte Neuanlagen). Für alle andern Kältemittel werden 15 resp. 10 Gew.-% eingesetzt.

Aufgrund der Materialzusammensetzung und der Kältemittelfüllmenge von Waermepumpenanlagen ergeben sich somit die nachfolgend aufgeführten Entsorgungsaufwendungen und -emissionen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Kaltwasser- satz NH3 TJ	Entsorgung Kaltwasser- satz Propan TJ	Entsorgung Kaltwasser- satz R134a TJ	Entsorgung Kaltwasser- satz R404A TJ
Produkt:					
Entsorgung Kaltwassersatz NH3	Stk	1			
Entsorgung Kaltwassersatz Propan	Stk		1		
Entsorgung Kaltwassersatz R134a	Stk			1	
Entsorgung Kaltwassersatz R404A	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	80	90	90	90
Kunststoffe in KVA ¹⁾	kg	80.5	80.5	80.5	80.5
Kunststoffe in Reaktordeponie ²⁾	kg	473	473	473	473
PVC in KVA	kg	137	137	137	137
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	2.9	2.9	2.9	2.9
Metalle in Recycling §	kg	5151	5261	5312	5238
Aufbereitung Kaeltemittel Ammoniak § ⁴⁾	kg	62.7/64.7			
Aufbereitung Kaeltemittel Propan § ⁴⁾	kg		55.25/59.4		
Aufbereitung Kaeltemittel R134a § ⁴⁾	kg			55.25/59.4	
Aufbereitung Kaeltemittel R404A § ⁴⁾	kg				55.25/59.4
Luftschadstoffe:					
NH3 Ammoniak p ⁴⁾	kg	3.3/1.32			
Propan p ⁴⁾	kg		9.75/6.5		
R134a FKW p ⁴⁾	kg			9.75/6.5	
R404A FKW p ⁴⁾	kg				9.75/6.5

Tab. 4.8: Eingabedaten der Module 1Stk "Entsorgung Kaltwassersatz NH3, Propan, R134a resp. R404A". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Gummi der Umwälzpumpe und Armaflex-Isolation.

²⁾: Glasfaserverstärkte Kunststoffe des Rückkühlers.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Kaltwassersatz R407C	Entsorgung Kaltwassersatz R410A	Entsorgung Kaltwassersatz Isceon 59	Entsorgung Kaltwassersatz R22
		TJ	TJ	TJ	TJ
Produkt:					
Entsorgung Kaltwassersatz R407C	Stk	1			
Entsorgung Kaltwassersatz R410A	Stk		1		
Entsorgung Kaltwassersatz Isceon 59	Stk			1	
Entsorgung Kaltwassersatz R22	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	90	90	90	90
Kunststoffe in KVA ¹⁾	kg	80.5	80.5	80.5	80.5
Kunststoffe in Reaktordeponie ²⁾	kg	473	473	473	473
PVC in KVA	kg	137	137	137	137
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	2.9	2.9	2.9	2.9
Metalle in Recycling §	kg	5252	5181	5247	5236
Aufbereitung Kaeltemittel Ammoniak § ⁴⁾	kg	55.25/59.4			
Aufbereitung Kaeltemittel Propan § ⁴⁾	kg		55.25/59.4		
Aufbereitung Kaeltemittel R134a § ⁴⁾	kg			55.25/59.4	
Aufbereitung Kaeltemittel R404A § ⁴⁾	kg				55.25/59.4
Luftschadstoffe:					
R407C FKW p ⁴⁾	kg	9.75/6.5			
R410A FKW p ⁴⁾	kg		9.75/6.5		
Isceon 59 FKW p ⁴⁾	kg			9.75/6.5	
R22 H-FCKW p ⁴⁾	kg				9.75/6.5

Tab. 4.9: Eingabedaten der Module 1Stk "Entsorgung Kaltwassersatz R407C, R410A, Isceon 59 resp. R22". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Gummi der Umwälzpumpe und Armaflex-Isolation.

²⁾: Glasfaserverstärkte Kunststoffe des Rückkühlers.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Solesatz NH3 TJ	Entsorgung Solesatz Propan TJ	Entsorgung Solesatz R134a TJ	Entsorgung Solesatz R404A TJ
Produkt:					
Entsorgung Solesatz NH3	Stk	1			
Entsorgung Solesatz Propan	Stk		1		
Entsorgung Solesatz R134a	Stk			1	
Entsorgung Solesatz R404A	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	80	90	90	90
Kunststoffe in KVA ¹⁾	kg	157	157	157	157
Kunststoffe in Reaktordeponie ²⁾	kg	191	191	191	191
PVC in KVA	kg	77	77	77	77
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	2.7	2.7	2.7	2.7
Propylenglykol in KVA	kg	500	500	500	500
Metalle in Recycling §	kg	4299	4384	4517	4373
Aufbereitung Kaeltemittel Ammoniak § ⁴⁾	kg	62.7/64.7			
Aufbereitung Kaeltemittel Propan § ⁴⁾	kg		55.25/59.4		
Aufbereitung Kaeltemittel R134a § ⁴⁾	kg			55.25/59.4	
Aufbereitung Kaeltemittel R404A § ⁴⁾	kg				55.25/59.4
Luftschadstoffe:					
NH3 Ammoniak p ⁴⁾	kg	3.3/1.32			
Propan p ⁴⁾	kg		9.75/6.5		
R134a FKW p ⁴⁾	kg			9.75/6.5	
R404A FKW p ⁴⁾	kg				9.75/6.5

Tab. 4.10: Eingabedaten der Module 1Stk "Entsorgung Solesatz NH3, Propan, R134a resp. R404A". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Gummi der Umwälzpumpe und Armaflex-Isolation.

²⁾: Glasfaserverstärkte Kunststoffe des Rückkühlers.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Solesatz R407C TJ	Entsorgung Solesatz R410A TJ	Entsorgung Solesatz Isceon 59 TJ	Entsorgung Solesatz R22 TJ
Produkt:					
Entsorgung Solesatz R407C	Stk	1			
Entsorgung Solesatz R410A	Stk		1		
Entsorgung Solesatz Isceon 59	Stk			1	
Entsorgung Solesatz R22	Stk				1
Entsorgungsdienstleistungen:					
Altoel in SAVA	kg	90	90	90	90
Kunststoffe in KVA ¹⁾	kg	157	157	157	157
Kunststoffe in Reaktordeponie ²⁾	kg	191	191	191	191
PVC in KVA	kg	77	77	77	77
Energiesparlampe Plastic in KVA ³⁾	kg	2.7	2.7	2.7	2.7
Propylenglykol in KVA	kg	500	500	500	500
Metalle in Recycling §	kg	4426	4342	4428	4379
Aufbereitung Kaeltemittel Ammoniak § ⁴⁾	kg	55.25/59.4			
Aufbereitung Kaeltemittel Propan § ⁴⁾	kg		55.25/59.4		
Aufbereitung Kaeltemittel R134a § ⁴⁾	kg			55.25/59.4	
Aufbereitung Kaeltemittel R404A § ⁴⁾	kg				55.25/59.4
Luftschadstoffe:					
R407C FKW p ⁴⁾	kg	9.75/6.5			
R410A FKW p ⁴⁾	kg		9.75/6.5		
Isceon 59 FKW p ⁴⁾	kg			9.75/6.5	
R22 H-FCKW p ⁴⁾	kg				9.75/6.5

Tab. 4.11: Eingabedaten der Module 1Stk "Entsorgung Solesatz R407C, R410A, Isceon 59 resp. R22". Annahmen siehe Text.

¹⁾: Gummi der Umwälzpumpe und Armaflex-Isolation.

²⁾: Glasfaserverstärkte Kunststoffe des Rückkühlers.

³⁾: Elektronikbauteile der Umwälzpumpe.

⁴⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

§ Wird in eco^{mc} nicht verbucht, da Nebenprodukt.

4.4 Supermarkt-Kälteanlage

Beim Rückbau der Supermarkt-Kälteanlagen wird angenommen, dass die Metalle zu 100% recycelt werden. Von den Kältemittelmengen werden bei den Anlagen mit synthetischen Kältemitteln 15 % resp. 10 % emittiert (Durchschnitt heute resp. Zielwert). Bei der Ammoniakanlage wird 5 % resp. 2 % emittiert.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Supermarkt NH3 KTS/ NH3 KTS Stk	Entsorgung Supermarkt R134a KTS/ R404A DX Stk	Entsorgung Supermarkt R404A KTS/ R404A DX Stk
Produkt:				
Entsorgung Supermarkt NH3 KTS/ NH3 KTS	Stk	1		
Entsorgung Supermarkt R134a KTS/ R404A DX	Stk		1	
Entsorgung Supermarkt R404A KTS/ R404A DX	Stk			1
Entsorgungsdienstleistungen:				
Altoel in SAVA	kg	66.3	58.9	58.9
Kunststoffe in KVA ¹⁾	kg	175	175	175
Propylenglykol in KVA	kg	2580	1640	1640
Metalle in Recycling §	kg	5226	4800	4800
Aufbereitung Kaeltemittel Ammoniak § ²⁾	kg	34.7		
Aufbereitung Kaeltemittel R134a § ²⁾	kg		46.9	
Aufbereitung Kaeltemittel R404A § ²⁾	kg		66.0	98.3
Emissionen Luft:				
NH3 Ammoniak p ²⁾	kg	1.82/0.729		
R134a FKW p ²⁾	kg		8.3/5.5	
R404A FKW p ²⁾	kg		11.7/7.8	17.3/11.6

Tab. 4.12: Eingabedaten der Entsorgung von Supermarkt-Kälteanlagen mit Ammoniak (NH3), HFC-134a resp. HFC-404A, (Berger 1999, Schaller 1999, Wettstein 1999).

¹⁾: Gummi der Umwälzpumpe und Armaflex-Isolation.

²⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Entsorgung Supermarkt R134a KTS/ R22 DX Stk	Entsorgung Supermarkt R22 KTS/ R22 DX Stk	Entsorgung Supermarkt R22 DX/ R22 DX Stk
Produkt:				
Entsorgung Supermarkt R134a KTS/ R22 DX	Stk	1		
Entsorgung Supermarkt R22 KTS/ R22 DX	Stk		1	
Entsorgung Supermarkt R22 DX/ R22 DX	Stk			1
Entsorgungsdienstleistungen:				
Altoel in SAVA	kg	58.9	58.9	58.9
Kunststoffe in KVA ¹⁾	kg	175	175	175
Propylenglykol in KVA	kg	1640	1640	580
Metalle in Recycling §	kg	4800	4800	4800
Aufbereitung Kaeltemittel R134a § ²⁾	kg	46.9		
Aufbereitung Kaeltemittel R22 § ²⁾	kg	77.2	122.4	274.0
Emissionen Luft:				
R134a FKW p ²⁾	kg	8.3/5.5		
R22 H-FKW p ²⁾	kg	13.6/9.1	21.6/14.4	48.3/32.2

Tab. 4.13: Eingabedaten der Entsorgung von Supermarkt-Kälteanlagen mit HFC-134a resp. HCFC-22, (Berger 1999, Schaller 1999, Wettstein 1999).

¹⁾: Gummi der Umwälzpumpe und Armaflex-Isolation.

²⁾: heutige/zukünftige Verlustmengen.

5 Weitere Sachbilanzen

5.1 Diverse Materialien und Komponenten

5.1.1 Isolation (Synthetischer Kautschuk, Armaflex®)

Armaflex® ist ein in der Kältetechnik häufig eingesetztes Isolationsmaterial. AF/Armaflex® ist ein hochflexibles geschlossenzelliges Dämmmaterial auf der Basis synthetischen Kautschuks (Elastomer). Gemäss Firmenangaben ist das Isolationsmaterial FCKW-frei. Ausserdem gibt es eine Produktreihe (NH/Armaflex®), die komplett halogenfrei ist. Dabei wird auf den Einsatz von (halogenierten) Brandschutzmitteln und PVC verzichtet. Die Wärmeleitfähigkeit von NH/Armaflex® ist jedoch um rund 10% höher als derjenige von AF/Armaflex®.

Gemäss Ullmann (1993:410ff.) werden vorwiegend organische Blähmittel eingesetzt. Das häufigste Blähmittel ist Azodicarbonamide (ADC), das aus Hydrazine und Harnsäure hergestellt wird. In Kautschuk-Schaumstoffen zur Wärmedämmung kann der Anteil des Blähmittels bis zu 30 Gew.-% und mehr ausmachen (Ullmann 1993:413). Für das hier interessierende Produkt werden aber lediglich rund 6.5 Gew.-% eingesetzt. Das Blähmittel wird in fester Form zusammen mit den andern rund dreissig Komponenten in den Vulkanisierofen gegeben, wo es bei rund 170 bis 180°C austreibt (Chmielarski 1999).

Im Gegensatz zu Polyisocyanurat (PIR) Hartschaum-Rohrisolationen, die auch heute noch mit teilhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen geschäumt werden (insb. HCFC-141b, March Consulting Group 1999:21), werden bei der Produktion von Armaflex® keine direkt ozon-schichtabbauenden Stoffe eingesetzt.

In dieser Studie gehen wir davon aus, dass das Produkt mit Azodicarbonamid (ADC) geschäumt wird und das Blähmittel rund 6.5 Gew.-% der Ausgangsrohstoffe ausmacht. Zudem wird rund 5 bis 10 Gew.-% PVC als Rohstoff beigemischt (für diese Studie werden 7.5 Gew.-% eingesetzt). Das Brandschutzmittel wird mangels Angaben vernachlässigt. Der Energie- und Wasserbedarf und weitere Emissionen sind der Umweltdeklaration 1997 des Werkes Münster entnommen (Armstrong 1997). Dabei werden die Angaben des Jahres 1996 auf den Produktausstoss von ca. 12'400t bezogen²² (siehe Tab. 5.1).

Die Herstellung der Dämmstoffe für die Schweiz erfolgt in Münster/ Westfalen und Polen (95 resp. 5%). Die Transportleistungen werden entsprechend der Distanz und dem spezifischen Gewicht des Materials berechnet²³.

²² Rohmaterialbedarf 13'287 Tonnen minus ca. 7 Gew.-% Abfall (Chmielarski 1999).

²³ Bei einem spezifischen Gewicht von 65kg/m³, einem Hohlraumvolumen bei Schläuchen von 70% und einem Ladevolumen von ca. 50m³ eines 40t Lkw resultiert ein Ladegewicht von maximal 975kg. Unter der Annahme, dass der Lkw eine 50% Auslastung aufweist (voll hin, leer zurück) und der in Frischknecht et al. (1996:Anhang B:4) modellierte 40t Lkw eine Zuladung von 13.5t aufweist, müssen die gefahrenen km um den Faktor 14 erhöht werden, um dieselbe Transportleistung (in tkm) zu erbringen. Die Distanz von Münster und Polen in die Schweiz wird je mit 1'000km abgeschätzt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Armaflex kg
Feedstock:		
Gummi EPDM ¹⁾	kg	0.93
PVC schlagfest	kg	0.075
Blähmittel (Azodicarbonamide u.a.) §	kg	0.065
Betriebsstoffe:		
Wasser entkarbonisiert	kg	1.3
Energieträger:		
Strom Mittelspannung - Bezug in W-D Import	TJ	3.3E-6
Erdgas HD-Abnehmer Euro	TJ	3.4E-6
Transportdienstleistungen:		
Transport LKW 40 t	tkm	14
Produkt:		
Armaflex	kg	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Kunststoffe in Reaktordeponie	kg	0.07
Abfall CH95: in KVA ²⁾	kg	0.07
Emissionen Luft:		
Blähgase (u.a. Stickstoff) ³⁾ §	kg	0.065 (?)
NOx Stickoxide als NO ₂ s	kg	1.5E-4
CO Kohlenmonoxid s	kg	3.1E-5
CO ₂ Kohlendioxid s	kg	0.17
SOx als SO ₂ s	kg	9.1E-7

Tab. 5.1: Eingabedaten des Moduls 1kg "Armaflex"
¹⁾: Eigentlich Nitril Butadien Kautschuk
²⁾: KVA-Modul aus Zimmermann et al. (1998)
³⁾: Aus der Reaktion der Blähmittel.
 §: Wird in eco^{mc} nicht verbucht.

5.1.2 Schallschutzhaube Wärmepumpen

Als Gehäuse und Schalldämmung werden bei den hier betrachteten Wärmepumpen Gehäusepaneele aus sendzimirverzinktem Stahlblech mit Polyisocyanurat-Schaum verwendet. Es liegt eine Ökobilanz-Studie vor (Seven-Air 1994), aus welcher die nachfolgenden Daten stammen (siehe [Tab. 5.2](#)). Die Systemgrenzen der Bilanzierung umfassen die Herstellung der Halbfabrikate, das Zuschneiden, Stanzen Bohren und Biegen, das Entfetten, Phosphatieren, Spülen, Trocknen, Pulverbeschichten und Einbrennen. Zudem wird auch das Ausschäumen mit Seven-PIR (einem mit einem Kohlenwasserstoff geschäumten PIR) berücksichtigt.

Für die Strombereitstellung wird für Prozesse im Ausland der europäische, für Prozesse in der Schweiz der schweizerische Strommix eingesetzt.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Gehäusepaneel m ²
Luftschadstoffe:		
CO Kohlenmonoxid s	kg	0.034
CO ₂ Kohlendioxid s	kg	17.0
SO _x als SO ₂ s	kg	0.086
NO _x Stickoxide als NO ₂ s	kg	0.043
NH ₃ Ammoniak s	kg	0.0001
Phenol s ¹⁾	kg	0.0004
NMVOC s	kg	0.09
Aldehyde p	kg	0.0006
Partikel s ²⁾	kg	0.017
N ₂ O Lachgas s	kg	0.002
Wasserschadstoffe:		
Schwebstoffe f	kg	0.0032
Ion Eisen f ³⁾	kg	0.0011
Salze f	kg	0.17
Sulfate f	kg	0.0005
Fluoride f	kg	0.0009
Chloride f ⁴⁾	kg	0.0081
COD f ⁵⁾	kg	0.00009
Kohlenwasserstoffe gesamt f	kg	0.0001
Fette und Öle gesamt f	kg	0.0061
Ion Natrium f ⁴⁾	kg	0.0053

Tab. 5.2: Eingabedaten des Moduls 1m² "Gehäusepaneel" nach Angaben eines schweizerischen Herstellers auf der Basis einer firmeninternen Ökobilanz (Seven-Air 1994).

¹⁾: Org. Verbindungen (Phenole) als Phenol angenommen.

²⁾: Staub/ Russ als Partikel PM₁₀ angenommen.

³⁾: Metallionen, wie Fe als Ion Eisen angenommen.

⁴⁾: NaCl-Emissionen als Chlorid- und Ion Natrium-Emissionen angenommen.

⁵⁾: DOC-Emissionen auf COD umgerechnet (Faktor 3)

5.2 Strombereitstellung

5.2.1 Strommodelle

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 geeignet²⁴.

²⁴ 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 verträgliche gegenüber physikalischen Informationen bevorzugt werden sollten.

Die entscheidungsorientierte 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). Eine Übersicht möglicher Strommodelle zeigt Tab. 5.3.

Beschreibende Analysen	Entscheidungsorientierte Analysen
Schweizer Strommix (inkl. Stromhandel)	Steinkohle Deutschland
Westeuropäischer Strommix (UCPTE) ¹⁾	Kernkraftwerk Frankreich
	Wasserkraft Schweiz
	Gas und Dampf-Gaskraftwerk
	Gasmotor-Blockheizkraftwerk ²⁾

Tab. 5.3: Übersicht über Strommodelle zur Bereitstellung von Elektrizität in Ökobilanzen (z.B. der Betriebsenergie für elektrische Wärmepumpen).
¹⁾: Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité, siehe Text
²⁾: Die Umweltbelastung muss auf Strom und Wärme aufgeteilt werden (Allokation).

Beschreibende Analysen

Für eine Beschreibung der Istsituation (z.B. Betrieb bestehender Wärmepumpensysteme) kommen die folgenden Strommixe in Frage:

Schweizer Strommix (inkl. Stromhandel): Die schweizerische Inlandproduktion und der Handel mit Elektrizität der Jahre 1990 bis 1994 wird bei diesem Modell abgebildet. Der Durchschnitt mehrerer Jahre wurde gewählt, um den meteorologischen Schwankungen Rechnung zu tragen. Der Stromhandel wird auf der Basis der vertraglich abgemachten Stromlieferungen bestimmt. Dabei werden die Exporte mit dem Inlandproduktionsmix und die Importe mit dem Mix des Landes aus welchem importiert wird verknüpft. Es wird angenommen, dass der gesamte importierte Strom in der Schweiz nachgefragt wird. Dadurch resultiert ein (zeitlich nicht verschobener) Transitanteil beim importierten Strom von 0%. Andere Modelle gehen davon aus, dass lediglich die netto importierte Strommenge vom importierenden Land (z.B. der Schweiz) nachgefragt wird und die restliche importierte Elektrizität die Schweiz durchquert (siehe z.B. Ménard et al. 1998).

Westeuropäischer Strommix (UCPTE²⁵): Die durchschnittliche Stromproduktion der Länder Belgien, Deutschland, Frankreich, Griechenland, Italien, Kroatien/ Slowenien und Rest-Jugoslawien, Luxemburg, Niederlande, Österreich, Portugal, Schweiz und Spanien der Jahre 1990-1994 wird bei diesem Modell abgebildet. Handelsbeziehungen mit Ländern ausserhalb des UCPTE-Verbundes (z.B. Grossbritannien oder Dänemark) werden vernachlässigt. Es kann dann zur Anwendung gelangen, wenn ein Strombedarf irgendwo in Zentraleuropa auftreten kann. Für einen Strombedarf in der Schweiz sind die Handelsbeziehungen relativ genau bekannt, weshalb dazu (bei beschreibenden Ökobilanzen) der Schweizer Strommix angewendet werden kann.

²⁵ Union pour la coordination de la Production et du Transport de l'Electricité

Entscheidorientierte Analysen

Bei einer Reduktion oder einer Steigerung des Strombedarfs in der Schweiz infolge einer Entscheidung zugunsten einer elektrischen Wärmepumpe als Ersatz einer Elektrodirektheizung resp. einer Ölheizung können die folgenden Strommodelle angewendet werden:

Steinkohlekraftwerk Deutschland: Eine Veränderung der Strombedarfs kann z.B. durch eine Erhöhung oder Reduktion des Strombezugs aus deutschen Steinkohle-Kraftwerken erfolgen. Das in Frischknecht et al. (1996) bilanzierte deutsche Steinkohlekraftwerk repräsentiert den deutschen Technologiestand des Jahres 1994. Rund 98% der Steinkohle-Kraftwerke Deutschlands sind mit einer Rauchgasentschwefelungsanlage bestückt. Der Bruttowirkungsgrad des durchschnittlichen deutschen Kraftwerks beträgt 37.5%.

Kernkraftwerk Frankreich: Durch Abschliessen von zusätzlichen Verträgen oder Auslaufenlassen oder Aufkünden bestehender Verträge mit der Electricité de France kann eine Änderung im Strombedarf aufgefangen werden. Die Daten in Frischknecht et al. (1996) entsprechen dem Durchschnitt der französischen Kernkraftwerke mit deren spezifischen Emissionen und einer auf die französische Situation zugeschnittenen Brennstoffbereitstellung und Wiederaufarbeitung. Der Nettowirkungsgrad des durchschnittlichen französischen Kernkraftwerks beträgt 31%.

Wasserkraft Schweiz: Durch eine Steigerung des im Winter verfügbaren Stroms aus Wasserkraft könnte ein zusätzlicher Bedarf ebenfalls gedeckt werden. Dieses Szenario ist jedoch weniger realistisch, da eine Produktionssteigerung insbesondere auch durch die verschärften Gewässerschutzbestimmungen in der Schweiz nur noch begrenzt möglich sein wird.

Gas und Dampf-(GuD)-Gaskraftwerk: Ein gasbefeuertes GuD-Kraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 57% kann für den zusätzlich benötigten Strom eingesetzt werden. Bei einem langfristig abnehmenden Strombedarf kommt dieser Kraftwerkstyp kaum in Frage.

Gasmotor-Blockheizkraftwerk: Gemäss der Zielsetzungen von Energie 2000 sollen vermehrt auch wärmegeführte Wärmekraftkopplungs-(WKK)-Anlagen zum Einsatz kommen. In Frischknecht et al. (1996) wird eine Gasmotor-WKK-Anlage mit einem Ölspitzenkessel betrachtet. Der Systemwirkungsgrad der bilanzierten WKK-Anlage beträgt 87%. Rund 40% der jährlich benötigten Wärme wird durch die Spitzenkessel bereitgestellt. Die Allokation der Emissionen und Aufwendungen auf die beiden Produkte Strom und Wärme kann wie folgt vorgenommen werden:

- WKK 100% Strom: 100% der Emissionen und Aufwendungen werden dem Strom zugeschlagen.
- WKK 100% Wärme: 100% der Emissionen und Aufwendungen werden der vom Aggregat produzierten Wärme zugeschlagen.
- WKK (Ersatz Gasheizung): Es wird angenommen, dass die Wärme dieselben Emissionen und Aufwendungen aufweist wie die Nutzenergie einer Einzel-Gasheizung. Die restlichen Emissionen und Aufwendungen werden dem Strom angelastet.
- WKK Energie: Aufteilung der Emissionen und Aufwendungen gemäss Energieinhalt von Strom und Wärme.
- WKK Exergie: Aufteilung der Emissionen und Aufwendungen gemäss Exergieinhalt von Strom und Wärme.
- WKK Preis: Aufteilung der Emissionen und Aufwendungen gemäss erzielbarem Preis für Strom und Wärme.

Für diese Studie werden die folgenden Strommodelle eingesetzt:

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

Tab. 5.4: In dieser Studie verwendete Strommodelle zur Bereitstellung von Elektrizität.
Kursiv: Standard-Strommix in dieser Studie.
¹⁾: Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité, siehe Text
²⁾: Mit Exergie als Allokationsschlüssel und Gasheizung als Spitzenkessel (siehe Abschnitt 5.2.4).

5.2.2 Strommix Schweiz unter Berücksichtigung des Stromhandels

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. 5.5).

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	Von Ménard et al. (1998) empfohlen

Tab. 5.5: In Ménard et al. (1998) diskutierte Strommodelle.

Eine Umfrage bei sechs grossen 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 durchführt²⁶. 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 zu gelten haben.

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 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 wird somit wie folgt modelliert (siehe Tab. 5.6):

²⁶ 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 Energiestatistik.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Strom Hochspannung - Bezug in CH, Handel TJ	Strom Mittelspannung - Bezug in CH, Handel TJ	Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel TJ
Input:				
Strom Hochspannung - Bezug in CH	TJ	0.35		
Strom Hochspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.65		
Strom Mittelspannung - Bezug in CH	TJ		0.35	
Strom Mittelspannung - Bezug in CH Import	TJ		0.65	
Strom Niederspannung - Bezug in CH	TJ			0.35
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ			0.65
Produkt:				
Strom Hochspannung - Bezug in CH, Handel	TJ	1.0		
Strom Mittelspannung - Bezug in CH, Handel	TJ		1.0	
Strom Niederspannung - Bezug in CH, Handel	TJ			1.0

Tab. 5.6: Eingabedaten der Module 1TJ "Strom Hoch-, Mittel- resp. Niederspannung - Bezug in CH, Handel".

5.2.3 Strommix UCPTE

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 UCPTE-Ländern und die daraus bestimmten Anteile der verschiedenen Kraftwerkstechniken ist in Tab. 5.7 aufgeführt.

	Stromproduktion GWh	Anteil %
Steinkohle	280'217	17.5
Braunkohle	169'659	10.5
Erdöl	155'658	9.7
Erdgas ¹⁾	125'932	7.9
Andere Gase ¹⁾	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 ²⁾	6'553	0.4
Total Produktion	1'604'754	100.0

Tab. 5.7: Jährliche Nettostromproduktion in UCPTE-Europa als Durchschnitt der Jahre 1990-1994 und daraus resultierende Anteile verschiedener Energieträger. Der technische Stand der einzelnen Kraftwerkstypen wird weitgehend länderspezifisch modelliert.

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

²⁾: Umfasst geothermische Kraftwerke, Strom aus Kehrlichtverbrennungsanlagen u.ä.

5.2.4 Strombereitstellung mit Erdgas-Blockheizkraftwerk

Von insgesamt 341 in den Jahren 1996 bis 1998 in Betrieb genommenen WKK-Anlagen werden 153 mit Erdgas betrieben. Lediglich 48 Aggregate weisen eine Leistung über 100kW_{el} auf. 19 Aggregate sind mit einer internen Wärmepumpe ausgerüstet, 15 ohne und von den restlichen 14 sind keine Angaben vorhanden. Die Leistung der 48 Aggregate sind in Tab. 5.8 aufgeführt.

Erdgas-WKK; $P > 100 \text{kW}_{\text{el}}$	kW
Brennstoffleistung	30'379 (100%)
Elektrische Leistung	10'088 (33.2%)
Thermische Leistung	17'583 (57.9%)
Verluste	2'708 (8.9%)
Anzahl Aggregate (Stk.)	48
Durchschn. Brennstoffleistung	633

Tab. 5.8: Kenndaten der in den Jahren 1996 bis 1998 zugebauten Erdgas-WKK-Anlagen mit einer Leistung über $100 \text{kW}_{\text{el}}$, Herstellerangaben (Kaufmann 1999).

In der Praxis liegt der elektrische Wirkungsgrad 1%, der thermische Wirkungsgrad rund 3% tiefer als die Herstellerangaben (Kaufmann 1999), was hier berücksichtigt wird. Die Wirkungsgrade des Aggregats selbst betragen somit 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 0.182²⁷ resp. 1. Daraus ergeben sich die Allokationsfaktoren 0.238 und 0.762 für Wärme resp. Strom. Somit werden der Produktion von 0.322TJ Strom 0.762TJ Erdgas zugeordnet. 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 $192 \text{kW}_{\text{el}}$ -Blockheizkraftwerkes in Frischknecht et al. (1996:Teil XIV). 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 $250 \text{mg}/\text{Nm}^3$) 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 Gesamtstromproduktion beträgt bei einer elektrischen Leistung von $191 \text{kW}_{\text{el}}$ 68.9TJ, weshalb pro TJ_{el} rund 0.015 der strombedingten Infrastruktur notwendig sind. Für die strom- und wärmebedingten Infrastrukturteile wie Gasmotor, Schallschutzhaube, Schaltschrank, Wartung, Planung etc. werden bei 100'000 Betriebsstunden 212TJ Erdgas benötigt und 117TJ Wärme erzeugt. Somit beträgt der spezifische Infrastrukturbedarf 0.0047 Einheiten pro TJ_{In} und 0.0085 Einheiten pro TJ_{th} .

Das BHKW deckt 60% des Gesamtwärmebedarfs des Nahwärmeverbundes ab. Ein Erdgas-Low- NO_x -Spitzenkessel liefert die restlichen 40%. Die von Frischknecht et al. (1996:Teil XIV) abweichenden Eingabedaten sind in Tab. 5.9 auf der folgenden Seite aufgeführt.

²⁷ Vorlauftemperatur 85°C , Nutzttemperatur 20°C .

Name in eco ^{mc}	Unit	Erdgas in BHKW 191 kWel 1999	Strom ab Generator 191 kWel 1999	Strom ab BHKW 191 kWel 1999	Waerme ab BHKW 191 kWel 1999	Waerme ab System BHKW 191 kWel 1999	Waerme ab Nahverteilung (ab BHKW 191 kWel) 1999	Infra Strom BHKW 191 kWel 1999	Infra Waerme BHKW 191 kWel 1999	Infra Waerme+Strom BHKW 191 kWel 1999
	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ	TJ	Stk.	Stk.	Stk.
Erdgas ND-Abnehmer CH	TJ	1								
Transport Fernwaerme klein/neu	TJ							1		
Nutzwaerme ab Heizung atm. LowNOx <100 kW	TJ					0.4				
Abwaerme in Luft s	TJ	1.1		0.01						
CH4 Methan s	kg	22.5								
CO Kohlenmonoxid s	kg	49.5								
CO2 Kohlendioxid s	kg	56000								
NMVOc s	kg	2.5								
NOx Stickoxide als NO2 s	kg	78								
SOx als SO2 s	kg	0.55								
Bauarbeiten BHKW 160 kWel	Stk.									1
Elektrotechnik BHKW 160 kWel	Stk.							1		
Erdgas in BHKW 191 kWel 1999	TJ		2.35		0.427					
Gasmotor 206 kW	Stk.									1
Generator 200 kW	Stk.							1		
Heizung/Sanitaer BHKW 160 kWel	Stk.								1	
Inbetriebnahme BHKW 160 kWel	Stk.									1
Infra Strom BHKW 160 kWel	Stk.		0.015							
Infra Waerme BHKW 160 kWel	Stk.				0.0085					
Infra Waerme+Strom BHKW 160 kWel	Stk.	0.0047								
Katalysator 19.1 l	Stk.									0
Montage Modul BHKW 160 kWel	Stk.									1
Planung BHKW 160 kWel	Stk.									1
Schallschutzhaube BHKW 160 kWel	Stk.									1
Schaltschrank BHKW 191 kWel	Stk.									1
Speicher 10'000 l	Stk.								2	
Strom ab Generator 191 kWel 1999	TJ			1.01						
Waerme ab BHKW 191 kWel 1999	TJ					0.6				
Waerme ab System BHKW 191 kWel 1999	TJ						1.06			
Waermetauscherblock BHKW 191 kWel	Stk.								1	
Wartung BHKW 160 kWel	Stk.	0.0047								
Zu-/Abluft BHKW 160 kWel	Stk.									1
Zusammenbau Generator-Motor BHKW 160 kWel	Stk.							1		

Tab. 5.9: Eingabedaten der Strom- und Wärmebereitstellung mit einem Erdgas-Blockheizkraftwerk 160kW_{el}. Annahmen siehe Text und Frischknecht et al. (1996:Teil XIV)

5.2.5 Strombereitstellung mit GuD-Gaskraftwerk

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). Hier werden nun die kompletten, aktualisierten Datensätze dokumentiert.

Es handelt sich um ein standardisiertes Gas- und Dampf-Kraftwerk mit einer Nettoleistung von 271MW. Die Effizienz der Gasturbine wird gesteigert indem das Turbinenabgases 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% O₂ im Abgas), was einem spezifischen Emissionsfaktor von 14.5kg NO_x als NO₂ pro TJ Erdgas entspricht.

Die Emissionsfaktoren für CO₂ und SO₂ errechnen sich aus der Zusammensetzung des odorierten Erdgases.

Die Infrastrukturaufwendungen wurden für eine Jahresbetriebsdauer von 7'000 Stunden und eine Lebensdauer von 25 Jahren berechnet. Die Angaben stammen teilweise vom Hersteller ABB direkt, teilweise wurden Angaben aus den Ökoinventaren von Energiesystemen mittels Analogieschlüssen verwendet.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Infrastruktur GuD Kraftwerk marginal Stk
Flächeninanspruchnahme:		
Flaeche II-IV	m ² a	20
Konstruktionsmaterialien:		
Beton (ohne Armierungseisen)	kg	30
Stahl unlegiert	kg	20
Stahl hochlegiert	kg	4
Aluminium 0% Rec.	kg	1
Kupfer	kg	1
Mineralwolle	kg	1.5
PE (HD)	kg	3
Energieträger:		
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTe	TJ	0.000028
Diesel in Baumaschine	TJ	0.00028
Produkt:		
Infrastruktur GuD Kraftwerk marginal	Stk	1

Tab. 5.10: Eingabedaten des Moduls 1Stk "Infrastruktur GuD Kraftwerk marginal".

Die Betriebsemissionen sind einerseits aus den Brennstoffqualitäten errechnet. Andererseits stützen sie sich auf Firmendaten aus dem Jahre 1994 und 1999 (NO_x) ab. Teilweise mussten auch Literaturwerte verwendet werden. Aus der Originalquelle (Dones et al. 1996) ist leider nicht klar ersichtlich, welches spezifische Firmenwerte sind. Dasselbe gilt für die Betriebsstoffe.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Betrieb GuD Kraftwerk marginal TJ
Infrastruktur:		
Infrastruktur GuD Kraftwerk marginal	TJ	1
Betriebsstoffe:		
Chlorwasserstoff HCl (Salzsäure)	kg	2.5
Natronlauge NaOH	kg	2
Wasser entkarbonisiert	kg	500000
Wasser vollentsalzt	kg	4500
Emissionen Luft:		
CO ₂ Kohlendioxid s	kg	55000
CO Kohlenmonoxid s	kg	30
NO _x Stickoxide als NO ₂ s	kg	14.5
N ₂ O Lachgas s	kg	1
SO _x als SO ₂ s	kg	0.5
Partikel s	kg	0.3
CH ₄ Methan s	kg	6
Butan s	kg	0.6
Pentane s	kg	0.5
Formaldehyd s	kg	0.4
Propan s	kg	0.2
Benzol s	kg	0.2
Toluol s	kg	0.1
Aceton s	kg	0.1
Acetaldehyd s	kg	0.0007
Propionsäure s	kg	0.01
PAH Polyzyklische aromatische HC s	kg	0.005
BaP Benzo(a)pyren s	kg	0.00001
Hg Quecksilber s	kg	0.00005
TCDD-Äquivalente	ng	21
Abwärme in Luft s	TJ	0.53
Produkt:		
Betrieb GuD Kraftwerk marginal	TJ	1
Entsorgungsdienstleistungen:		
Rückstände aus Kühlturmtassen	kg	2.4

Tab. 5.11: Eingabedaten des Moduls 1TJ "Betrieb GuD Kraftwerk marginal".

Aufgrund der mittelfristigen Planung neuer Kraftwerke in den Ländern der Europäischen Union plus Norwegen und die Schweiz hat sich gezeigt, dass v.a. in Italien, den Niederlanden und Spanien neue Erdgaskombikraftwerke gebaut werden (sollen). Aus diesem Grund wurde die Brennstoffbereitstellung aus diesen Ländern anteilmässig verwendet. Damit stellt dieses Kraftwerk die europäische Variante eines Grenzkraftwerks dar. Auf das Berücksichtigen eines Anteils an Hochofen oder Koksofengas wird hier verzichtet, da diese beim Kraftwerkszubau eine untergeordnete Rolle spielen.

Modul-Namen eco ^{mc}	Einheit	Strom ab GuD Kraftwerk marginal TJ
Energieträger:		
Erdgas HD-Abnehmer Italien	TJ	0.79
Erdgas HD-Abnehmer Niederlande	TJ	0.61
Erdgas HD-Abnehmer Spanien	TJ	0.35
Bedarf Betrieb:		
Betrieb GuD Kraftwerk marginal	TJ	1.74
Produkt:		
Strom ab GuD Kraftwerk marginal	TJ	1

Tab. 5.12: Eingabedaten des Moduls 1TJ "Strom ab GuD Kraftwerk marginal".

6 Leckageraten und Emissionen von Kältemitteln

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über Literaturangaben und die in dieser Studie verwendeten Werte. Es zeigt sich, dass die Literaturangaben selbst eine grosse Streubreite aufweisen. Zudem haben eigene Nachforschungen ergeben, dass ein erhebliches Informationsdefizit bezüglich Kältemittelleckagen besteht.

Sofern verfügbar wurden diejenigen Werte gewählt, welche durch schweizerische Fachexperten angegeben worden sind (z.B. bei Kaltwassersätzen). Bei den Supermarktanlagen sind kaum Erfahrungswerte öffentlich zugänglich, weshalb hier die Werte der jüngsten AFEAS-Studie (Sand et al. (1997) verwendet werden.

Anwendungsbereich	Kältemittelherstellung %	Produktherstellung %	Produktnutzung %/a	Produktent-sorgung %	Anlagenlebensdauer a
Kaltwassersätze					
March Consulting Group 1999	0.5/ 3-5 ⁶⁾	1	10	5	25
Klaus & Dinkel 1999	nb	3	5	15	kA
Sand et al. 1997:62	nb	0	0.5 (1.0/2.0/4.0) ¹⁾	0	15
Reiner 1999 synth. Kältemittel und Propan	kA	kA	5 (ohne Unfälle) 10 (inkl. Unfälle)	10 - 20	
Reiner 1999 NH ₃	kA	kA	2 (ohne Unfälle) 5 (inkl. Unfälle)	kA	
Diese Studie, Zustand heute (ohne NH ₃)	1 bis 2	2	10	15	20
NH ₃	3·10 ⁻⁴	0.5	5	5	20
Diese Studie, Zustand optimiert (ohne NH ₃)	1 bis 2	1	5	10	20
NH ₃	3·10 ⁻⁴	0.5	2	2	20
Industrielle Kühlung					
March Consulting Group 1999	0.5/ 3-5 ⁶⁾	3	20	10	25
Klaus & Dinkel 1999	nb	3	12	10	kA
Forschungsrat Kältetechnik 1997:36	kA	kA	5-10	kA	kA
Reiner 1999 synth. Kältemittel und Propan	kA	kA	5 (ohne Unfälle) 10 (inkl. Unfälle)	10 - 20	
Reiner 1999 NH ₃	kA	kA	2 (ohne Unfälle) 5 (inkl. Unfälle)	kA	
Diese Studie, Zustand heute (ohne NH ₃)	1 bis 2	2	10	15	20
NH ₃	3·10 ⁻⁴	0.5	5	5	20
Diese Studie, Zustand optimiert (ohne NH ₃)	1 bis 2	1	5	5	20
NH ₃	3·10 ⁻⁴	0.5	2	2	20
Gewerbekühlung (Supermärkte)					
FKT 1999	kA	kA	2.3, ohne Havarien 9.3, mit Havarien	kA	kA
March Consulting Group 1999	0.5/ 3-5 ⁶⁾	3	25	10	13
Klaus & Dinkel 1999	nb	3	12	10	kA
Sand et al. 1997:77 Direktverdampfung	nb	0	10 ²⁾ 12 - 15 ³⁾ 4 bis 8 ⁴⁾ 13.5/ 6 ⁵⁾	0	15
Sand et al. 1997:77 Sekundärkreislauf	nb	0	4%	0	15
Sand et al. 1997:77 Dezentrale Systeme	nb	0	5%	0	

Anwendungsbereich	Kältemittelherstellung %	Produktherstellung %	Produktnutzung %/a	Produktentsorgung %	Anlagenlebensdauer a
Forschungsrat Kältetechnik 1997:36	kA	kA	10-15	kA	kA
Diese Studie, Zustand heute (ohne NH ₃)	1 bis 2	3	13.5	15	15
NH ₃	3·10 ⁻⁴	0.5	5	5	15
Diese Studie, Zustand optimiert (ohne NH ₃)	1 bis 2	3	6	5	15
NH ₃	3·10 ⁻⁴	0.5	2	2	15
Wärmepumpen					
Kruse et al. 1995:41	nb	nb	6.7	nb	nb
Bauer et al. 1996	nb	nb	nb	nb	20
Weibel 1996, R22/ R134a	0/1.15·10 ⁻⁶	10/ 12	20/ 24		15
Weibel 1996, R290 und R600a	kA	2	7	5	20
Fischedick et al. 1997	nb	nb	nb	nb	15
Sand et al. 1997:155	nb	kA (0)	5	15	15
Klaus & Dinkel 1999	nb	3	8	20	15
Forschungsrat Kältetechnik 1997:36 ⁷⁾	kA	kA	1-4	kA	kA
Diese Studie, Zustand heute	1 bis 2	3	8	20	15/ 20
Diese Studie, Zustand optimiert	1 bis 2	1	2	5	15/ 20
Transportkälte					
March Consulting Group 1999	0.5/ 3-5 ⁶⁾	1	15	15	kA
Klaus & Dinkel 1999, Bahn/ Lwk	nb	3	15	10/40	kA
Forschungsrat Kältetechnik 1997:36 ⁸⁾	kA	kA	25 bis 30	kA	kA
Pkw-/Lkw-Klima					
March Consulting Group 1999	0.5/ 3-5 ⁶⁾	1	15	50	kA
Klaus & Dinkel 1999, R12/R134a	nb	1	15/8	100	kA
Bahn Klima					
Klaus & Dinkel 1999	nb	3	5	10	kA

Tab. 6.1: Verluste bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung kältetechnischer Anlagen nach verschiedenen Quellen. nb: Nicht berücksichtigt. kA: keine Angabe

¹⁾: Szenarien für höhere jährliche Verluste durch Versagen und Routineservice.
²⁾: Bei aggressiven präventiven Wartungsprogrammen.
³⁾: Bandbreite heute (1997) gemäss ARI (Air Conditioning and Refrigeration Institute).
⁴⁾: Voraussage für in 5 bis 10 Jahren gemäss ARI.
⁵⁾: In Sand et al. (1997) verwendete Werte für heute und nahe Zukunft.
⁶⁾: Annahme für alle HCFCs und HFCs sowie die Emission von HFC-23 bei der Produktion von HCFC-22.
⁷⁾: basierend auf Fischer et al. (1991).
⁸⁾: basierend auf Arbeiten des UBA Berlin.
⁹⁾: Wärmepumpenanlage mit 7kW_{th}/ 50kW_{th}.

7 Abbauprodukte der H-FCKWs und FKWs

7.1 Einführung

Die Abbauprodukte der als CFC und HCFC-Ersatzstoffe eingesetzten Fluorkohlenwasserstoffe (HFC) können zu neuen Umweltbeeinträchtigungen führen. Als Abbauprodukt steht hierbei v.a. die praktisch nicht abbaubare Trifluoressigsäure (TFA; CF_3COOH) im Vordergrund. Um dieses Abbauprodukt in eine Ökobilanz einbauen zu können, sind Abschätzungen über die pro kg emittiertem Fluorkohlenwasserstoff entstehenden Mengen und Informationen zu deren Wirkungen notwendig.

7.2 Abbau von Kältemitteln zu Trifluoressigsäure (TFA), Fluss- und Salzsäure

In David (1993) sind Abschätzungen über den mittels HCFC und HFC erfolgten Eintrag an HF, HCl und TFA publiziert (siehe Tab. 7.1). Dort wird angenommen, dass die in HCFC-141b, HCFC-142b, und HCFC-22, enthaltenen Halogene zu 100% zu HF und HCl abgebaut werden. HCFC-123, HCFC-124 und HFC-134a bilden, neben HF resp. HCl zu einem beachtlichen Teil Trifluoressigsäure.

emittiertes Kältemittel	Emission ¹⁾ [kt/a] / [Gew.- %]	HF [kt/a] / [Gew.- %]	HCl [kt/a] / [Gew.- %]	TFA [kt/a] / [Gew.- %]
HCFC-141b	527 / 100	90 / 17.1	330 / 62.6	/ 0
HCFC-142b	330 / 100	130 / 39.4	120 / 36.4	/ 0
HFC-134a	663 / 100	400 / 60.3	/ 0	240 / 36.2
HFC-152a	330 / 100	200 / 60.6	/ 0	/ 0
HCFC-22	237 / 100	110 / 46.4	100 / 42.2	/ 0
HCFC-124	330 / 100	50 / 15.2	90 / 27.3	280 / 84.8
HCFC-123	857 / 100	/ 0	410 / 47.8	640 / 74.7
HFC-32	237 / 100	180 / 75.9	/ 0	/ 0
HFC-125	237 / 100	200 / 84.4	/ 0	/ 0

Tab. 7.1: Emissionsmengen von Kältemitteln und Abschätzungen der Mengen entstehender Abbauprodukte, aus David (1993). Daraus abgeleitet die Anteile in Gew.-%.

¹⁾: Die Emissionen sind eine obere Abschätzung. Auf den prozentualen Anteil der Abbauprodukte hat dies jedoch gemäss David (1993) keinen Einfluss.

Tromp et al. (1995) gehen für HCFC-123 und HCFC-124 von einer höheren Abbaurate zu TFA aus, nämlich je 100 Gew.-%. Die Abbaurate von HFC-134a stimmt mit 37 Gew.-% gut mit dem Wert aus David (1993) überein. Kotamarthi et al. (1998) verwenden ähnliche Konversionsraten von 36.5, 83.5 resp. 70.0 Gew.-% TFA pro kg emittiertes HFC-134a, HCFC-124 resp. HCFC-123. In ihrem Modell wird mit einer Ozean- und Oberflächendeposition von TFA von 25% gerechnet, sodass 75% des TFA mit dem Regenwasser ausgewaschen wird. Die Umwelt-Risikoanalyse über TFA (Boutonnet et al. 1999) geht von Depositionsraten von 40, 30.4 resp. 13.9 Gew.-% pro Jahr für HFC-134a, HCFC-123 resp. HCFC-124 aus. Kanakidou et al. (1995) geben die in ihrem dreidimensionalen Modell verwendeten Abbauraten nicht explizit an. In ECETOC (1995a) wird angenommen, dass 40% des Kältemittels HFC-134a zu TFA und HF abgebaut werden, in ECETOC (1994b) unterstellt man einen 100% Abbau von HCFC-124 zu HCl, HF und TFA.

In der vorliegenden Studie gehen wir von den in Tab. 7.1 aufgeführten Konversionsraten aus, da es für die Bewertung innerhalb der Ökobilanz keine Rolle spielt, ob der Abbau innerhalb eines oder über mehrere Jahre erfolgt.

	Nomenklatur USES-LCA	Einheit	Wert
<i>Effektbewertung:</i>			
Maximal tolerierbare Konzentration für Gewässer	MPCwater	kg/m ³	1.2·10 ⁻⁵
Maximal tolerierbare Konzentration für Sediment	MPCsediment	kg/kg(wwt)	EP ¹⁾
Maximal tolerierbare Konzentration für Boden	MPCsoil	kg/kg(dwt)	5.7·10 ⁻⁹
Anorganische Substanz aber kein Metall	Inorganic?	ja/nein	nein
<i>Chemisch-physikalische Eigenschaften:</i>			
Molgewicht	MW	g/mol	114
Oktanol/Wasser Koeffizient	Kow	-	0.16 ²⁾
Schmelzpunkt	TEMPmelt	°C	-15.3
Dampfdruck (25)	VP	Pa	1.50·10 ⁴ ³⁾
Löslichkeit	SOL	mg/l	1.6·10 ⁸ ⁴⁾
Säurekonstante	pKa	-	0.23
Ist die Substanz ein Metall	Metal_x?	ja/nein	nein
<i>Verteilungskoeffizienten:</i>			
Henry-Konstante	HENRY25	Pa·m ³ /mol	0.011
Verteilungskoeffizient organ. Kohlenstoff	Koc	l/kg	0.29 ⁵⁾
<i>Abauraten:</i>			
Reaktions-Halbwertszeit in Luft	DT50air	d	kein Wert
Hydroxyl Radikale Reaktion in Luft (-10°C)	OH rad	cm ³ /molec-sec	1.148·10 ⁻¹³
Hydroxyl Radikale Reaktion in Luft (12°C)	OH rad	cm ³ /molec-sec	1.1983·10 ⁻¹³
Hydroxyl Radikale Reaktion in Luft (25°C)	OH rad	cm ³ /molec-sec	1.2253·10 ⁻¹³
Hydrolyse in Oberflächengewässern (PH=6, 20°C)	DT50 hydro water (PH=6)	d	28800
Hydrolyse in Oberflächengewässern (PH=7, 20°C)	DT50 hydro water (PH=7)	d	28800
Hydrolyse in Oberflächengewässern (PH=8, 20°C)	DT50 hydro water (PH=8)	d	28800
Biol. Abbau in Oberflächengewässern (20°C)	DT50soil bio (20C)	d	kein Wert
Abiotischer Abbau im Boden (PH=6, 20°C)	DT50soil abio (PH=6)	d	28800
Abiotischer Abbau im Boden (PH=7, 20°C)	DT50soil abio (PH=7)	d	28800
Biol. Abbau im Boden (20°C)	DT50soil bio (20C)	d	kein Wert
Abiotischer Abbau im Sediment (PH=7, 20°C)	DT50sed abio (PH=7)	d	28800
Abiotischer Abbau im Sediment (PH=8, 20°C)	DT50sed abio (PH=8)	d	28800
Aerober biol. Abbau im Sediment (20°C)	DT50sed areobic (20C)	d	kein Wert
Anaerober biol. Abbau im Sediment (20°C)	DT50sed anearobic (20C)	d	kein Wert
Metabolismus in Pflanzen	DT50plantmetabolism	d	kein Wert
Photodegradation auf Pflanzen	DT50plantphoto	d	kein Wert

Tab. 7.2: Modellparameter zur Berechnung der Ökotoxizitätsfaktoren von Trifluoressigsäure (TFA) mithilfe von USES-LCA gemäss Huijbregts (1999a,1999b,1999c).

¹⁾: EP=PNEC_{soil} mittels "Equilibrium Partition"-Methode (Huijbregts (1999b:7).

²⁾: geometrisches Mittel der Werte -2.1 und 0.5.

³⁾: berechnet aus Dampfdruck bei 20°C

⁴⁾: berechnet mit: Löslichkeit = Dampfdruck mal Molgewicht durch Henry-Konstante

⁵⁾: Annahme

In Huijbregts (1999a), in welchem Human- und Ökotoxizitätsfaktoren einer Vielzahl von Substanzen ausgewiesen werden, ist TFA nicht modelliert worden. Im Rahmen dieses Projektes wurden nun die erforderlichen physikalisch-chemischen und toxikologischen Stoffdaten recherchiert (siehe Unterkapitel 7.4) und durch Huijbregts (1999c) nachträglich mit den gleichen substanzunabhängigen Modellparametern in USES-LCA modelliert²⁸. Dabei wurde der sehr geringen

²⁸ USES 2.0 resp. EUSES wird verwendet, um die Umweltkonzentrationen neu einzuführender chemischer Substanzen zu modellieren und damit eine Risikoabschätzung durchzuführen. Huijbregts (1999a) hat es für Ökobilanzzwecke angepasst. Mit USES-LCA hat er Human- und drei verschiedene Ökotoxizitätsfaktoren einer Viel-

Abbaubarkeit der Säure Rechnung getragen. Die wichtigsten substanzabhängigen Modellparameter für TFA sind in Tab. 7.2 aufgeführt, die substanzunabhängigen Parameter sind in Huijbregts (1999a,b) beschrieben.

Für Versäuerung und Ökotoxizität ergeben sich aufgrund der angenommenen Abbauvorgänge und der USES-LCA-Modellierung die folgenden zusätzlichen Charakterisierungs- resp. Bewertungsfaktoren für ausgewählte teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe (siehe Tab. 7.3):

emittiertes Kältemittel	Versäuerung ¹⁾ [kg SO ₂ -Äquiv.]	Ökotoxizität aquatisch [kg 1,4-DCB- Äquiv.]	Ökotoxizität terrestrisch [kg 1,4-DCB- Äquiv.]	Ökotoxizität Sediment [kg 1,4-DCB- Äquiv.]
HCFC-141b	0.82	0	0	0
HCFC-142b	0.95	0	0	0
HFC-134a	0.96	1.3 · 10 ⁴	2.1	1.3 · 10 ³
HFC-152a	0.97	0	0	0
HCFC-22	1.11	0	0	0
HCFC-124	0.48	3.1 · 10 ⁴	4.9	3.1 · 10 ³
HCFC-123	0.42	2.7 · 10 ⁴	4.3	2.7 · 10 ³
HFC-32	1.21	0	0	0
HFC-125	1.35	0	0	0

Tab. 7.3: Charakterisierungswerte teilhalogenerter Kohlenwasserstoffe, die zu HF, HCl und TFA abgebaut werden. Siehe auch Tab. 7.1.

¹⁾: Versäuerungspotenzial HF: 1.6 kg SO₂-Äquiv.; HCl: 0.88 kg SO₂-Äquiv.; das Versäuerungspotenzial von TFA ist hier nicht berücksichtigt.

7.3 Umweltwirkung von Trifluoressigsäure (TFA)

In den letzten Jahren wurden etliche Laborversuche mit Pflanzen aber auch mit Ratten und Mäusen durchgeführt, um die schädlichen Wirkungen der Trifluoressigsäure mit den dazugehörigen Konzentrationen in Luft, Wasser oder Boden zu eruieren. Es zeigt sich, dass TFA eher selektiv wirkt und bei einigen Spezies (z.B. Süßwasser Grünalgen) resp. gewissen Anwendungen (insbesondere Wurzelexposition und Bodenanwendungen) die Grenzkonzentration, bei welcher keine Effekte mehr beobachtet werden bei 1mg pro Liter oder darunter liegt.

TFA muss als sehr persistente Substanz betrachtet werden. Ob es in saisonalen Feuchtgebieten (seasonal wetlands) zu einer starken Aufkonzentration von TFA kommen kann resp. kommen wird, ist umstritten. Tromp et al. (1995) haben auf diese Möglichkeit hingewiesen und durch Modellrechnungen belegt. Boutonnet et al. (1999) ziehen jedoch die in den Modellen gemachten Annahmen in Zweifel.

Eine Anreicherung persistenter organischer Schadstoffe (wie Dioxine und Furane, Polychlorierte Biphenyle PCB, bromierte Flammschutzmittel oder Organozinnverbindungen, siehe z.B. Allsop et al. 1999:8) kann aber beispielsweise in der Arktis beobachtet werden. Durch eine sogenannte globale Destillation erfolgt eine Anreicherung von Schadstoffen an den beiden Polen. Dem Problem globaler Verfrachtungen und der Anreicherung in ökologisch sensiblen Gebieten wie der Arktis oder auch saisonalen Feuchtgebieten muss deshalb genügend Beachtung geschenkt werden.

zahl von organischen und anorganischen Substanzen sowie von Metallen berechnet. Das Modell wurde an die Anforderungen der Ökobilanzierung angepasst. Insbesondere wurden die Annahmen so abgeändert, dass ein "best estimate" Szenario resultiert. EUSES, das im Eco-indicator 99 eingesetzt wird, basiert demgegenüber auf einem "reasonable worst case" Szenario.

Berg et al. (1999) haben zudem festgestellt, dass sich die Konzentrationen von TFA im Regenwasser in der Schweiz und dem benachbarten Ausland im Zeitraum von 1996 bis 1997 knapp verdoppelt haben. Sie verteten die These, dass sich darin der vermehrte Verbrauch von HFCs und HCFCs manifestiert, möchten diese These aber mit künftigen Messungen erhärten. Die Autoren erachten es zudem als sehr wahrscheinlich, dass TFA sich im Boden und in Grundwasser akkumulieren wird.

7.4 Stoffdaten Trifluoressigsäure (TFA)

Die folgenden Stoffdaten stammen aus Boutonnet et al. (1999:64).

Name:	Trifluoressigsäure
CAS Nummer:	76-05-1
Synonym:	HTFA, Trifluoroacetic acid
Chemische Formel:	CF ₃ CO ₂ H
Molekulargewicht:	114

Physikalisch-chemische Eigenschaften

HTFA

Physikalischer Zustand:	Farblose, nebelnde (hygroskopische) Flüssigkeit
Spezifisches Gewicht:	1'484 kg/m ³ bei 25°C
Schmelzpunkt:	-15.3°C
Siedepunkt:	72°C
Dampfdruck:	105.7hPa bei 20°C
Wasserlöslichkeit:	in allen Mischverhältnissen löslich
n-Oktanol/Wasser-Koeffizient (log):	gemäss verschiedenen Quellen: -2.1 (Feenstra-Bieders & Olthof, 1992, a Solvay report) -0.2(calculated according to Rekker) 0.325 (ClogP for Windows V 1.0.0) 0.5 (SRC's KOWWIN v1.52)
pKa:	0.23
pH (1% Lösung):	1
pH (100mg/l dest. Wasser):	3.1
pH (10mg/l dest. Wasser):	7.4-7.75
pH (100mg/l gepuffertes ISO Wasser):	4
pH (10mg/l gepuffertes ISO Wasser):	7.4
Henry Konstante K _H :	1.1 x 10 ⁻² Pa/m ³ .mol bei 25°C
UV/vis Absorption:	Keine Absorption bei λ > 250nm
Konversionsfaktoren:	1mg/l = 214ppm; 1ppm = 4.66 mg/m ³

Toxikologische Eigenschaften, NOEC-Werte von Natrium Trifluoracetat

<i>Aquatische Organismen</i>	<i>EC₅₀/LC₅₀</i>	<i>LOEC</i>	<i>NOEC</i>
<i>Selenastrum capricornutum</i> (Grünalge, Süßwasser)	4.8mg/l	0.36mg/l	0.12mg/l
<i>Raphidocelis subcapitata</i>	1.5mg/l		0.15mg/l
<i>Anabaena flos-aquae</i> (Blaugrüne Alge)	2'400mg/l	1'200mg/l	600mg/l
<i>Navicula pelliculosa</i> (Kieselalge, Süßwasser)	1'200mg/l	1'200mg/l	600mg/l
<i>Skeletonema subspicatus</i> (Kieselalge, Meerwasser)	>2'400mg/l	-	2'400mg/l
<i>Chlorella vulgaris</i> (Grünalge, Süßwasser)	>1'200mg/l	-	1'200mg/l
<i>Scenedesmus subspicatus</i> (Grünalge, Süßwasser)	>120mg/l	-	-
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	>120mg/l		>120mg/l
<i>Mycrocystis aeruginosa</i>	>117mg/l		>117mg/l
<i>Phaeodactylum tricornutum</i> (Meeralge)	>117mg/l		>117mg/l
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	>124mg/l		>124mg/l
<i>Euglena gracilis</i> (Süßwasser-alge)	>112mg/l		>112mg/l
<i>Daphnia magna</i> (Krustacea)	>1'200mg/l	-	1'200mg/l
<i>Brachydanio rerio</i> (Zebrafisch)	>1'200mg/l	-	1'200mg/l
<i>Lemna gibba</i> (Wasserlinse) vegetatives Wachstum	1'100mg/l	600mg/l	300mg/l
<i>Terrestrische Pflanzen</i>	<i>EC₅₀/LC₅₀</i>	<i>LOEC</i>	<i>NOEC</i>
<i>Mehrere Spezies</i> (Ein- und Zweikeimblättrige Pflanzen)	+1'000mg/l		1'000mg/l Keimen
Bohnen (mung bean)	5.7mg/kg	10mg/kg	1mg/kg *) Boden-anwendung (soil application)
Sonnenblumen (<i>Helianthus annuus</i>)	12mg/kg	1mg/kg	<1mg/kg *) Boden-anwendung
Weizen (<i>Triticum aestivum</i>)	-	-	100mg/l Blätter-anwendung (foliar application)
	12mg/kg	10mg/kg	1mg/kg *) Boden-anwendung
	-	10mg/l	1mg/l Wurzelexposition (root exposure)
	-	5mg/l	1mg/l Var. Katepwa
	-	10mg/l	5mg/l Var. Hanno
	-	100mg/l	50mg/l Blätter-anwendung
Wegerich (Plantain, <i>Plantago major</i>)	-	100mg/l	32mg/l Wurzelexposition
Mais, Reis, Wegerich, Sonnenblume, Raps (oilseed rape)	-	-	100mg/l Blätter-anwendung
Soya	-	10mg/l	1mg/l Wurzelexposition
	-	100mg/l	10mg/l Blätter-anwendung

*): kg trockener Boden

Säugetiere

Akute Toxizität

LD50-Wert einer 2 bis 5% Lösung TFA (orale Aufnahme, Ratten und Mäuse): 200 bis 400mg/kg Körpergewicht.

Schwellenwert für Irritationen bei Ratten (Inhalation) von TFA: 4mg/l (Temperaturreaktion des Körpers).

Schwellenwert für Irritationen bei Ratten (Inhalation) von TFA: 1.5mg/l (Neuromuskuläre Reizbarkeit).

Schwellenwert für Irritationen bei Menschen (Inhalation) von TFA: 0.25mg/l.

Toxizität wiederholter Dosen

Hauptsächlich geschädigtes Organ bei Ratten: Leber.

Effekte bei Aufnahme von 150mg/kg Körpergewicht pro Tag während fünf Tagen: erhöhtes Organgewicht (bis 43%), Hypertrophie und Induktion von Peroxisomen.

8 Bewertungsfaktoren

8.1 Einführende Bemerkung

Die in dieser Studie verwendeten Charakterisierungsfaktoren basieren pro Umweltwirkung auf den jeweils als adäquat eingeschätzten Originalquellen. Da auf eine Gesamtagggregation verzichtet wird, wird davon abgesehen z.B. die Umweltwirkklassen z.B. eines Eco-indicator 95 (Goedkoop 1995) integral zu übernehmen.

Weitere Informationen und Begründungen finden sich in Kap. 3 des Schlussberichtes.

8.2 Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie

Die einzige ressourcenorientierte Umweltwirkkategorie erfasst den Verbrauch nicht erneuerbarer Primärenergieträger und gewichtet sie gemäss ihres oberen Heizwertes. Für Uran wurde der Heizwert so gewählt, dass der Primärenergieverbrauch etwa dem in Energiestatistiken ausgewiesenen Primärenergiewert entspricht. Würde dem Uran der effektive Heizwert zugeordnet (ca. 900'000MJ pro kg U-235), so würden die Ergebnisse insgesamt höher ausfallen, die Relationen würden sich jedoch kaum ändern. Die Heizwerte stammen aus Frischknecht et al. (1996:Teil III:S. 18).

	Einheit	Bedarf nicht erneuerbare Primärenergie MJ
Erdoelgas	Nm3	45
Grubengas (Methan)	kg	39.8
Rohbraunkohle vor Foerderung	kg	9.5
Rohfoerdersteinkohle vor Aufbereitung	kg	19
Rohgas (Erdgas)	Nm3	39
Rohoel ab Bohrloch	t	45600
Uran ab Erz	kg	460000 ¹⁾

Tab. 8.1: Charakterisierungsfaktoren "Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf".

¹⁾: 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.

8.3 Treibhauspotenzial

Die Werte für die Treibhauspotenziale der Luftschadstoffe stammen soweit verfügbar aus Houghton et al. (1996). Für Substanzen, bei denen keine Angaben gemacht werden, wird auf Houghton et al. (1994) zurückgegriffen und, bei ozonschichtabbauenden Substanzen, der indirekte Anteil abgeschätzt. Dies gilt für CFC-114, CFC-115 und CFC-13, die aus Houghton et al. (1994) entnommen wurden. 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.

Emission in		Einheit	Treibhauspotenzial 100a 1996 kg CO ₂ -equiv.
Luft ⁵⁾	1,1,1-Trichlorethan p	kg	-204
	C2F6 p	kg	9200
	CF4 p	kg	6500
	CH4 Methan m	kg	21
	CH4 Methan p	kg	21
	CH4 Methan s	kg	21
	CO Kohlenmonoxid m	kg	1.58
	CO Kohlenmonoxid p	kg	1.58
	CO Kohlenmonoxid s	kg	1.58
	CO ₂ Kohlendioxid m	kg	1
	CO ₂ Kohlendioxid p	kg	1
	CO ₂ Kohlendioxid s	kg	1
	Dichlormethan p	kg	9
	H 1301 Halon p	kg	-34700 ¹⁾
	Isceon 59 FKW p	kg	1950 ³⁾
	N ₂ O Lachgas m	kg	310
	N ₂ O Lachgas p	kg	310
	N ₂ O Lachgas s	kg	310
	R11 FCKW p	kg	1070 ¹⁾
	R113 FCKW p	kg	3060 ¹⁾
	R114 FCKW p	kg	5690 ⁴⁾
	R115 FCKW p	kg	5690 ⁴⁾
	R12 FCKW p	kg	6640 ¹⁾
	R123 H-FCKW p	kg	32 ¹⁾
	R124 H-FCKW p	kg	410 ¹⁾
	R125 FKW p	kg	2800
	R13 FCKW p	kg	9130 ⁴⁾
	R134a FKW p	kg	1300
	R141b H-FCKW p	kg	250 ¹⁾
	R142b H-FCKW p	kg	1650 ¹⁾
	R143a FKW p	kg	3800
	R152a FKW p	kg	140
	R22 H-FCKW p	kg	1350 ¹⁾
	R23 FKW p	kg	11700
	R32 FKW p	kg	650
	R404A FKW p	kg	3260 ³⁾
	R407C FKW p	kg	1530 ³⁾
	R410A FKW p	kg	1730 ³⁾
	R502 FCKW p	kg	3570 ²⁾
	SF6 p	kg	23900
	Tetrachlormethan p	kg	-1530
Trichlormethan (Chloroform) p	kg	4	

Tab. 8.2: Charakterisierungsfaktoren "Treibhauspotenzial" gemäss Houghton et al. (1996) und (1994).

¹⁾: Geometrisches Mittel des indirekten Effektes infolge Ozonschichtabbau berücksichtigt.

²⁾: Houghton et al. 1994

³⁾: Eigene Berechnung aufgrund der Zusammensetzung

⁴⁾: Direktes Treibhauspotenzial aus Houghton et al. 1994; indirekter Effekt infolge Ozonschichtabbau analog zu HCFC-113 (HCFC-114 &-115) resp. CFC-12 (CFC-13) berücksichtigt.

⁵⁾: m: Emissionen aus mobilen Quellen.

p: Prozessspezifische Emissionen stationärer Quellen (ohne Verbrennungsemissionen).

s: Verbrennungsemissionen stationärer Quellen.

8.4 Ozonschichtabbauendes Potenzial

Für die Charakterisierung der ozonschichtabbauenden Wirkung wurde das Handbuch über die Gesetzgebung ozonschichtabbauender Substanzen verwendet (UNEP 1998).

Emission in		Einheit	Ozonschichtabbauendes Potenzial kg CFC11-Äquiv.
Luft ¹⁾	1,1,1-Trichlorethan p	kg	0.1
	CH3Br p	kg	0.6
	Dichlormonofluormethan p	kg	0.04
	H 1211 Halon p	kg	3
	H 1301 Halon p	kg	10
	R11 FCKW p	kg	1
	R113 FCKW p	kg	0.8
	R114 FCKW p	kg	1
	R115 FCKW p	kg	0.5
	R12 FCKW p	kg	1
	R13 FCKW p	kg	1
	R141b H-FCKW p	kg	0.11
	R142b H-FCKW p	kg	0.065
	R22 H-FCKW p	kg	0.055
	R31 H-FCKW p	kg	0.02
	R502 FCKW p	kg	0.283
Tetrachlormethan p	kg	1.1	

Tab. 8.3: Charakterisierungsfaktoren "Ozonschichtabbauendes Potenzial" gemäss UNEP (1998)
¹⁾: p: Prozessspezifische Emissionen stationärer Quellen (ohne Verbrennungsemissionen).

8.5 Versäuerungspotenzial

Die Charakterisierungsfaktoren für das Versäuerungspotenzial basieren auf der dänische Publikation "Environmental Assessments of Products" (Hauschild & Wenzel 1997). Hier wurden die in Heijungs (1992a&b) erstmals publizierte Faktoren übernommen und um Schwefelwasserstoff ergänzt. Bei den chlorierten und/ oder fluorierten Kohlenwasserstoffe wurden für diese Studie Charakterisierungsfaktoren für die erwarteten Abbauprodukte, Salz- und Flusssäure, bestimmt. Die Abbauprodukte werden in Unterkap. 7.2 beschrieben und quantifiziert.

		Einheit	Versäuerungspotenzial kg SOx-equiv.
Luft ¹⁾	H2S Schwefelwasserstoff p	kg	1.88
	H2S Schwefelwasserstoff s	kg	1.88
	HCl Salzsäure p	kg	0.88
	HCl Salzsäure s	kg	0.88
	HF Fluorwasserstoff p	kg	1.6
	HF Fluorwasserstoff s	kg	1.6
	Isceon 59 FKW p	kg	1.11
	NH3 Ammoniak p	kg	1.88
	NH3 Ammoniak s	kg	1.88
	NOx Stickoxide als NO2 m	kg	0.7
	NOx Stickoxide als NO2 p	kg	0.7
	NOx Stickoxide als NO2 s	kg	0.7

	Einheit	Versäuerungspotenzial kg SO _x -equiv.
R123 H-FCKW p	kg	0.42
R124 H-FCKW p	kg	0.48
R125 FKW p	kg	1.35
R134a FKW p	kg	0.96
R141b H-FCKW p	kg	0.82
R142b H-FCKW p	kg	0.95
R152a FKW p	kg	0.97
R22 H-FCKW p	kg	1.11
R32 FKW p	kg	1.21
R404A FKW p	kg	0.632
R407C FKW p	kg	1.12
R410A FKW p	kg	1.28
R502 FCKW p	kg	0.542
SO _x als SO ₂ m	kg	1
SO _x als SO ₂ p	kg	1
SO _x als SO ₂ s	kg	1

Tab. 8.4: Charakterisierungsfaktoren "Versäuerungspotenzial" gemäss Hauschild & Wenzel (1997) und eigenen Ergänzungen.
¹): m: Emissionen aus mobilen Quellen.
p: Prozessspezifische Emissionen stationärer Quellen (ohne Verbrennungsemissionen).
s: Verbrennungsemissionen stationärer Quellen.

8.6 Sommersmogbildendes Potenzial

Die Charakterisierungsfaktoren für die sommersmogbildenden Kohlenwasserstoffe stammen aus UN-ECE (1994). Für die Schweizerische Situation werden die Stickoxide als ebenfalls relevant betrachtet. Auf der Basis der jährlichen Emissionsfrachten in der Schweiz im Jahre 199X und der Annahme, dass die Kohlenwasserstoffe insgesamt und die Stickoxide je denselben Beitrag zur Ozonbildung beisteuern, ergibt sich ein Charakterisierungsfaktor von 0.645kg Ethylen-Äquiv. pro kg Stickoxid²⁹.

Emission in	Einheit	Sommersmogbildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.
Luft ¹)		
1,1,1-Trichlorethan p	kg	0.021
Acetaldehyd s	kg	0.527
Aceton s	kg	0.178
Aldehyde p	kg	0.443
Alkane p	kg	0.398
Alkane s	kg	0.398
Alkene p	kg	0.906
Alkene s	kg	0.906
Aromaten p	kg	0.761
Aromaten s	kg	0.761
Benzaldehyd s	kg	-0.334
Benzol m	kg	0.189

²⁹ NMVOC-Emissionen: 211'000t; NO_x-Emissionen: 136'000; Charakterisierungsfaktor NMVOC: 0.416kg Ethylen-Äquiv. Daraus errechnet sich der Faktor für NO_x zu 0.645kg Ethylen-Äquiv.

Emission in	Einheit	Sommersmog-bildendes Potenzial kg Ethylen-Äquiv.
Benzol p	kg	0.189
Benzol s	kg	0.189
Butan p	kg	0.41
Butan s	kg	0.41
Buten p	kg	0.959
CH4 Methan m	kg	0.007
CH4 Methan p	kg	0.007
CH4 Methan s	kg	0.007
Chlorierte Kohlenwasserstoffe p	kg	0.021
Dichlormethan p	kg	0.01
Epichlorohydrin p	kg	0.021
Ethan p	kg	0.082
Ethan s	kg	0.082
Ethanol p	kg	0.268
Ethanol s	kg	0.268
Ethen p	kg	1
Ethen s	kg	1
Ethylbenzol p	kg	0.593
Ethylbenzol s	kg	0.593
Formaldehyd p	kg	0.421
Formaldehyd s	kg	0.421
Heptan p	kg	0.529
Hexan p	kg	0.421
Methanol s	kg	0.123
NMVOc m	kg	0.416
NMVOc p	kg	0.416
NMVOc s	kg	0.416
NOx Stickoxide als NO2 m	kg	0.645
NOx Stickoxide als NO2 p	kg	0.645
NOx Stickoxide als NO2 s	kg	0.645
Pentan p	kg	0.408
Pentane s	kg	0.408
Propan p	kg	0.42
Propan s	kg	0.42
Propen p	kg	1.03
Propen s	kg	1.03
Propionaldehyd s	kg	0.603
Styrol p	kg	0.761
Tetrachlormethan p	kg	0.021
Toluol p	kg	0.563
Toluol s	kg	0.563
Xylol p	kg	0.849
Xylol s	kg	0.849

Tab. 8.5: Charakterisierungsfaktoren "Sommersmogbildendes Potenzial" gemäss UN-ECE (1994) und eigenen Ergänzungen (NO_x).

¹): m: Emissionen aus mobilen Quellen.

p: Prozessspezifische Emissionen stationärer Quellen (ohne Verbrennungsemissionen).

s: Verbrennungsemissionen stationärer Quellen.

8.7 Ökotoxizität

Die hier aufgeführten Charakterisierungsfaktoren stammen alle aus Huijbregts (1999a, b & c). Die im Vergleich zum terrestrischen Ökotoxizitätspotenzial hohen Werte des aquatischen Ökotoxizitätspotenzial rühren daher, dass die ökotoxische Wirkung auf Böden der Referenzsubstanz 1,4-Dichlorbenzol ungleich höher ist als deren Wirkung auf Gewässer.

Die Werte für Trifluoressigsäure, ein persistentes Abbauprodukt von HFC-123, HFC-124 und HFC-134a, wurden mit Angaben aus Kap. 7 dieses Anhangbandes von Huijbregts (1999c) gerechnet. Damit können auch in dieser Kategorie bekannte und möglicherweise relevante Abbauprodukte berücksichtigt werden.

Emission in		Einheit	Ökotoxizität aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizität terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.
Luft ¹⁾	1,1,1-Trichlorethan p	kg	0.44	0.00018
	Acrolein s	kg	770	16
	As Arsen m	kg	290000	130
	As Arsen p	kg	290000	130
	As Arsen s	kg	290000	130
	Ba Barium p	kg	1000000	4.9
	Ba Barium s	kg	1000000	4.9
	BaP Benzo(a)pyren m	kg	1800	0.24
	BaP Benzo(a)pyren p	kg	1800	0.24
	BaP Benzo(a)pyren s	kg	1800	0.24
	Be Beryllium p	kg	620000000	1800
	Be Beryllium s	kg	620000000	1800
	Benzol m	kg	0.0037	0.000016
	Benzol p	kg	0.0037	0.000016
	Benzol s	kg	0.0037	0.000016
	Cd Cadmium m	kg	1500000	110
	Cd Cadmium p	kg	1500000	110
	Cd Cadmium s	kg	1500000	110
	Co Cobalt m	kg	7200000	110
	Co Cobalt p	kg	7200000	110
	Co Cobalt s	kg	7200000	110
	Cr Chrom m	kg	6500	82
	Cr Chrom p	kg	6500	82
	Cr Chrom s	kg	6500	82
	Cr Chrom VI m	kg	26000	82
	Cr Chrom VI p	kg	26000	82
	Cr Chrom VI s	kg	26000	82
	Cu Kupfer m	kg	1200000	29
	Cu Kupfer p	kg	1200000	29
	Cu Kupfer s	kg	1200000	29
	Dichlormethan p	kg	0.0051	0.0000043
	Ethen p	kg	1.1E-10	1.3E-12
	Ethen s	kg	1.1E-10	1.3E-12
	Ethylbenzol p	kg	0.0011	0.0000014
	Formaldehyd p	kg	2.4	0.94
	Formaldehyd s	kg	2.4	0.94
	Hexachlorbenzol HCB s	kg	3200	0.26
	Hg Quecksilber m	kg	1600000	28000
	Hg Quecksilber p	kg	1600000	28000
	Hg Quecksilber s	kg	1600000	28000
	Isceon 59 FKW p	kg	6500	1.05
	Mo Molybdaen m	kg	2600000	18
	Mo Molybdaen p	kg	2600000	18

Emission in	Einheit	Ökotoxizität aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizität terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.
Mo Molybdaen s	kg	2600000	18
Ni Nickel m	kg	5000000	40
Ni Nickel p	kg	5000000	40
Ni Nickel s	kg	5000000	40
PAH Polyzyklische aromatische HC p	kg	5700	1
Pb Blei m	kg	9000	9.1
Pb Blei p	kg	9000	9.1
Pb Blei s	kg	9000	9.1
Pentachlorbenzol s	kg	230	0.039
Pentachlorphenol PCP s	kg	53	2.3
Phenol p	kg	0.77	0.0033
Phenol s	kg	0.77	0.0033
R123 H-FCKW p	kg	27000	4.3
R124 H-FCKW p	kg	31000	4.9
R134a FKW p	kg	13000	2.1
R404A FKW p	kg	520	0.084
R407C FKW p	kg	6760	1.09
Sb Antimon p	kg	44000	0.61
Sb Antimon s	kg	44000	0.61
Se Selen m	kg	28000000	54
Se Selen p	kg	28000000	54
Se Selen s	kg	28000000	54
Sn Zinn p	kg	9600	26
Sn Zinn s	kg	9600	26
Styrol p	kg	0.00068	0.00000014
TCDD-Aequivalente	ng	0.00039	1.2E-08
Tetrachlormethan p	kg	1.5	0.00047
Tl Thallium p	kg	34000000	170
Tl Thallium s	kg	34000000	170
Toluol p	kg	0.00093	0.000016
Toluol s	kg	0.00093	0.000016
Trichlormethan (Chloroform) p	kg	0.079	0.00004
V Vanadium m	kg	16000000	670
V Vanadium p	kg	16000000	670
V Vanadium s	kg	16000000	670
Vinyl Chlorid p	kg	0.00017	0.00000026
Xylol-m p	kg	0.00052	0.00000065
Xylol-m s	kg	0.00052	0.00000065
Xylol-o p	kg	0.0012	0.0000013
Xylol-o s	kg	0.0012	0.0000013
Xylol p	kg	0.00082	0.00000053
Xylol s	kg	0.00082	0.00000053
Zn Zink m	kg	89000	5.8
Zn Zink p	kg	89000	5.8
Zn Zink s	kg	89000	5.8
Wasser ²⁾			
Acrilonitrile f	kg	2.8	0.0039
Acrilonitrile s	kg	4.2	0.00012
Benzol in Wasser f	kg	0.0059	0.000014
Benzol in Wasser s	kg	0.02	0.0000017
bis(2-ethylhexyl) Phtalat f	kg	2.5	0.0000066
bis(2-ethylhexyl) Phtalat s	kg	20	0.00000096
Chlor. 1,1,1-Trichlorethan f	kg	0.44	0.00018
Chlor. 1,1,1-Trichlorethan s	kg	0.38	0.00011
Chlor. Chlorbenzol f	kg	0.16	0.00072
Chlor. Chlorbenzol s	kg	0.47	0.00041
Chlor. Tetrachlorethylen f	kg	0.47	0.0079
Chlor. Tetrachlorethylen s	kg	0.86	0.004

Emission in	Ein- heit	Ökotoxizität aqua- tisch	Ökotoxizität terre- strisch
		kg 1,4-DCB-Äquiv.	kg 1,4-DCB-Äquiv.
Chlor. Tetrachlormethan f	kg	1.5	0.00047
Chlor. Tetrachlormethan s	kg	1.5	0.00036
Chlor. Trichlorethylen f	kg	0.0069	0.000046
Chlor. Trichlorethylen s	kg	0.075	0.000019
Chlor. Trichlormethan f	kg	0.078	0.000039
Chlor. Trichlormethan s	kg	0.075	0.000019
Dibutyl p-phthalat f	kg	2.2	0.000013
Dibutyl p-phthalat s	kg	2.2	0.0000021
Dimethyl p-phthalat f	kg	0.082	0.00037
Dimethyl p-phthalat s	kg	0.069	0.000047
Ethylbenzol in Wasser f	kg	0.016	0.000012
Ethylbenzol in Wasser s	kg	0.082	0.000001
Formaldehyd in Wasser f	kg	7.5	0.0016
Formaldehyd in Wasser s	kg	7.5	0.000024
Ion Antimon Sb f	kg	36000	1.70E-20
Ion Antimon Sb s	kg	65000	3.00E-20
Ion Arsen f	kg	160000	8.20E-19
Ion Arsen s	kg	460000	2.30E-18
Ion Barium f	kg	1100000	5.10E-19
Ion Barium s	kg	1400000	6.70E-19
Ion Berillium f	kg	72000000	3.30E-16
Ion Berillium s	kg	86000000	3.90E-16
Ion Blei f	kg	1500	2.90E-22
Ion Blei s	kg	15000	2.80E-21
Ion Cadmium f	kg	290000	1.90E-20
Ion Cadmium s	kg	2500000	1.50E-19
Ion Chrom-III f	kg	1100	5.80E-21
Ion Chrom-III s	kg	11000	5.20E-20
Ion Chrom-VI f	kg	4600	5.80E-21
Ion Chrom-VI s	kg	44000	5.20E-20
Ion Kobalt f	kg	5800000	2.70E-18
Ion Kobalt s	kg	11000000	4.90E-18
Ion Kupfer f	kg	310000	1.80E-20
Ion Kupfer s	kg	2000000	1.10E-19
Ion Molybdaen f	kg	2800000	2.50E-18
Ion Molybdaen s	kg	3500000	3.10E-18
Ion Nickel f	kg	3000000	3.60E-19
Ion Nickel s	kg	7700000	9.10E-19
Ion Quecksilber f	kg	280000	940
Ion Quecksilber s	kg	2500000	7700
Ion Selen f	kg	34000000	1.60E-17
Ion Selen s	kg	38000000	1.80E-17
Ion Vanadium f	kg	11000000	1.10E-17
Ion Vanadium s	kg	24000000	2.20E-17
Ion Zink f	kg	18000	1.20E-21
Ion Zink s	kg	150000	9.60E-21
Ion Zinn f	kg	1600	1.50E-21
Ion Zinn s	kg	16000	1.40E-20
PAH Polycyclische arom. KWe in Wasser f	kg	8000	0.0021
PAH Polycyclische arom. KWe in Wasser s	kg	32000	0.00081
Phenole f	kg	6.2	0.0000025
Phenole s	kg	6.2	3.8E-08
Styrol in Wasser f	kg	0.014	0.00000013
Styrol in Wasser s	kg	0.17	2.7E-08
Toluol in Wasser f	kg	0.0092	0.000014
Toluol in Wasser s	kg	0.068	0.0000019
Tributylzinn TBT f	kg	290000	0.11

Emission in	Einheit	Ökotoxizität aquatisch kg 1,4-DCB-Äquiv.	Ökotoxizität terrestrisch kg 1,4-DCB-Äquiv.
Tributylzinn TBT s	kg	760000	0.0069
Vinyl Chlorid in Wasser f	kg	0.0013	0.00000026
Vinyl Chlorid in Wasser s	kg	0.026	0.00000013
Xylol in Wasser f	kg	0.017	0.00000049
Xylol in Wasser s	kg	0.17	8.9E-08
Xylol-m in Wasser f	kg	0.018	0.0000006
Xylol-m in Wasser s	kg	0.19	0.00000011
Xylol-o in Wasser f	kg	0.018	0.0000012
Xylol-o in Wasser s	kg	0.17	0.00000021
Boden			
As in Boden	kg	81000	270
Cd in Boden	kg	150000	220
Co in Boden	kg	2900000	220
Cr in Boden	kg	580	170
Cr VI in Boden	kg	2300	170
Cu in Boden	kg	170000	60
Hg in Boden	kg	220000	56000
Ni in Boden	kg	1500000	82
Pb in Boden	kg	880	18
Sn in Boden	kg	980	52
Zn in Boden	kg	9400	12

Tab. 8.6: Charakterisierungsfaktoren aquatische und terrestrische Ökotoxizität nach Huijbregts (1999a, 1999b & 1999c).

¹): m: Emissionen aus mobilen Quellen.

p: Prozessspezifische Emissionen stationärer Quellen (ohne Verbrennungsemissionen).

s: Verbrennungsemissionen stationärer Quellen.

²): f: Einleitung in Oberflächengewässer (freshwater);

s: Einleitung in Ozeane (seawater).

8.8 Emission radioaktiver Isotope

Die Emissionen radioaktiver Isotope werden bezüglich der karzinogenen und erbgutverändernden Wirkungen beim Menschen charakterisiert. Die Herleitung der Werte wird in Frischknecht et al. (2000) beschrieben.

Emission in	Einheit	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
Luft ¹)		
Radio. C14 p	kBq	10
Radio. Co58 p	kBq	0.0205
Radio. Co60 p	kBq	0.762
Radio. Cs134 p	kBq	0.571
Radio. Cs137 p	kBq	0.619
Radio. H3 p	kBq	0.000667
Radio. I129 p	kBq	44.8
Radio. I131 p	kBq	0.00762
Radio. I133 p	kBq	0.000448
Radio. Kr85 p	kBq	0.00000667
Radio. Pb210 s	kBq	0.0714
Radio. Po 210 s	kBq	0.0714
Radio. Pu alpha p	kBq	3.95
Radio. Pu238 p	kBq	3.19
Radio. Ra226 p	kBq	0.0433
Radio. Ra226 s	kBq	0.0433

Emission in	Einheit	Emission radioaktiver Isotope kBq-U-235-Äquiv.
Radio. Rn222 p	kBq	0.00114
Radio. Rn222 s	kBq	0.00114
Radio. Th230 p	kBq	2.14
Radio. Th232 s	kBq	2.14
Radio. U234 p	kBq	4.62
Radio. U235 p	kBq	1
Radio. U238 p	kBq	0.39
Radio. U238 s	kBq	0.39
Radio. Xe133 p	kBq	0.00000667
Wasser ²⁾		
Rad. Ag110m f	kBq	0.0243
Rad. Am241 s	kBq	1.48
Rad. C14 s	kBq	0.0571
Rad. Cm alpha s	kBq	2.71
Rad. Co58 f	kBq	0.00195
Rad. Co60 f	kBq	2.1
Rad. Co60 s	kBq	0.0186
Rad. Cs134 f	kBq	6.67
Rad. Cs134 s	kBq	0.00376
Rad. Cs137 f	kBq	8.1
Rad. Cs137 s	kBq	0.00376
Rad. H3 f	kBq	0.0000214
Rad. H3 s	kBq	0.00000329
Rad. I129 s	kBq	4.76
Rad. I131 f	kBq	0.0238
Rad. Mn54 f	kBq	0.0148
Rad. Pu alpha s	kBq	0.352
Rad. Ra 226 f	kBq	0.00619
Rad. Ru106 s	kBq	0.00667
Rad. Sb124 f	kBq	0.039
Rad. Sb125 s	kBq	0.000714
Rad. Sr90 s	kBq	0.00019
Rad. U 238 f	kBq	0.11
Rad. U 238 s	kBq	0.0011
Rad. U234 f	kBq	0.114
Rad. U234 s	kBq	0.0011
Rad. U235 f	kBq	0.11
Rad. U235 s	kBq	0.00119

Tab. 8.7: Charakterisierungsfaktoren der Emission radioaktiver Isotope gemäss Frischknecht et al. (2000).

¹⁾: m: Emissionen aus mobilen Quellen.

p: Prozessspezifische Emissionen stationärer Quellen (ohne Verbrennungsemissionen).

s: Verbrennungsemissionen stationärer Quellen.

²⁾: f: Einleitung in Oberflächengewässer (freshwater); s: Einleitung in Ozeane (seawater).

9 Kenndaten von Supermarkt-Kälteanlagen

Anlage	Kältesystem		Kälteleistung			Energiebedarf			Erstfüllmenge Kältemittel	
	Normal Kältemittel ¹⁾	Tief Kältemittel ¹⁾	Normal kW	Tief kW	Total kW	Normal kWh/m	Tief kWh/m	Total kWh/m	Normal kg	Tief kg
Supermarkt 1	NH3:KT	NH3:KT	43.7	21.4	65.1	2813	5963	4046	30	15
Supermarkt 2	NH3:KT	NH3:KT	250	56	306	kA	kA	6723	60	34
Supermarkt 3	NH3:KT	NH3:KT	153	28	181	kA	kA	kA	25	13
Supermarkt 4	NH3:KT	R404A:DX	88.5	12.4	100.9	6245	6977	6469	22	35
Supermarkt 5	NH3:KT	R22:DX	78	16.8	94.8	kA	kA	6335	30	35
Supermarkt 6	NH3:KT	R22:DX	100	19.2	119.2	7040	8204	7359	40	80
Supermarkt 7	R134a:KT	R404A:DX	50	13.5	63.5	3392	7813	4807	50	40
Supermarkt 8	R134a:KT	R404A:DX	149.2	34.4	183.6	5079	7359	5682	65	165
Supermarkt 9	R134a:KT	R404A:DX	86.2	18.6	104.8	2962	7117	4051	72	51
Supermarkt 10	R134a:KT	R404A:DX	70	12.6	82.6	3532	5678	4098	70	50
Supermarkt 11	R134a:KT	R404A:DX	94.4	17.8	112.2	4174	4758	4387	45	72
Supermarkt 12	R404A:KT	R404A:DX	105.4	30.03	135.43	4962	4224	4748	40	90
Supermarkt 13	R404A:KT	R404A:KT	42.33	18.98	61.31	6744	7912	7199	30	20
Supermarkt 14	R404A:KT	R404A:DX	85.6	24.4	110	4037	4655	4253	32	75
Supermarkt 15	R404A:KT	R404A:DX	118.5	25.2	143.7	kA	kA	kA	60	110
Supermarkt 16	R134a:KT	R22:DX	96	19.3	115.3	3728	5915	4302	55	60
Supermarkt 17	R134a:KT	R22:DX	69.15	30.28	99.43	4049	4669	4317	48.4	95.2
Supermarkt 18	R134a:KT	R22:DX	56.12	15.16	71.28	4129	4781	4380	45	120
Supermarkt 19	R22:KT	R22:DX	43.51	10.08	53.59	4135	5289	4539	35.7	83.3
Supermarkt 20	R22:KT	R22:DX	72.3	24.2	96.5	4232	6736	5117	40	80
Supermarkt 21	R22:KT	R22:DX	21.96	8.04	30	kA	kA	5230	20	30
Supermarkt 22	R22:KT	R22:DX	61.77	28.38	90.15	4858	6390	5252	40	80
Supermarkt 23	R22:KT	R22:KT	47.26	17.76	65.02	kA	kA	4607	23.8	23.8
Supermarkt 24	R22:DX	R22:DX	92.8	22.76	115.56	4556	7255	5367	260	95
Supermarkt 25	R22:DX	R22:DX	66.7	17.6	84.3	2413	6679	3858	142.8	95.2
Supermarkt 26	R22:DX	R22:DX	106	17.6	123.6	3400	6590	4212	261.8	83.3
Supermarkt 27	R22:DX	R22:DX	63.55	23.76	87.31	3290	6956	4558	357	178.5
Supermarkt 28	R22:DX	R22:DX	48.38	14.98	63.36	3587	7804	5199	150	80
Supermarkt 29	R22:DX	R22:DX	63.29	17.8	81.09	4559	7706	5611	297.5	71.4
Supermarkt 30	R22:DX	R22:DX	61.5	26	87.5	kA	kA	5016	90	60
Supermarkt 31	R22:DX	R404A:DX	66.45	18.64	85.09	4609	6456	5323	40	kA

Tab. 9.1: Kälteleistung, jährlicher spezifischer Stromverbrauch und Kältemittelfüllmengen von 31 Supermarkt-Kälteanlagen (Berger 1999, Schaller 1999, Wettstein 1999). kA: keine Angaben.
¹⁾: DX: Direktverdampfung; KT: Kälteträger

Begriffe und Abkürzungen

a	Jahr (annum)
AFEAS	Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study
ARI	Air Conditioning and Refrigeration Institute
Bq	1 Bequerel (Bq) = 1 s^{-1} ; 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 ₂	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 ^{mc}	LCA-Software der Firma ESU-services
EMPA	Eidg. Materialprüf- und Forschungsanstalt
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
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 = Treibhauspotential
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
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 ₃	Ammoniak
NK	Normalkühlung
Nm ³	Normkubikmeter
NMVOC	<u>N</u> on- <u>M</u> ethane <u>V</u> olatile <u>O</u> rganic <u>C</u> ompounds = Flüchtige organische Verbindungen (ohne Methan)
NO _x	Stickoxide
ODP	Ozone Depletion Potential = Ozon-Zerstörungs-Potential
PJ	Petajoule (1PJ = 10 ⁹ MJ)
PM10	Partikel <10 µm
PSI	Paul Scherrer Institut, Villigen
SO _x	Schwefeloxide
Sv	1 Sievert (Sv) = 1 J kg ⁻¹ .
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 ⁶ 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

- ALLSOP M., D. SANTILLO, P. JOHNSTON, R. STRINGER 1999:** *The Tip of the Iceberg; State of knowledge on Persistent Organic Pollutants in Europe and the Arctic*, Greenpeace Research Laboratories, Department of Biological Science, University of Exeter, Greenpeace International Publications
- ARMSTRONG 1997:** *Environmental Declaration 1997*, Armstrong Insulation Products GmbH, Münster
- ATEL 1998:** *104. Geschäftsbericht 1998*, Aare-Tessin AG für Elektrizität, Olten
- AYRES R., J. SAXTON, M. STERN 1974:** *Materials - Process - Product Model*, International Research and Technology Corporation, Arlington, Va.
- BACHMANN R. & R. SCHULZ 1999:** KA24-1 ICS™ - market success for a standardized power plant, in *ABB Review* 3/1999, S. 4-11
- BANKS R.E. & P.N. SHARRATT 1996:** *Environmental Impacts of the Manufacture of HFC-134a*, Department of Chemistry & Department of Chemical Engineering, UMIST, Manchester
- BAUER H., G. BRESSLER, C. GÜNTHER-POMHOFF 1996:** *Ganzheitliche Bilanzierung von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen als Basis einer Ökobilanz*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, im Auftrag der RWE Energie AG
- BERG M., J. MÜHLEMANN, A. WIEDMER, R.P. SCHWARZENBACH, S.R. MÜLLER 1999:** Concentrations and Mass Fluxes of Chloroacetic Acids and Trifluoroacetic Acid in Rain and Natural Waters in Switzerland, paper submitted to *Environment, Science and Technology*
- BERGER U. 1999:** *Sachbilanzdaten Supermarkt-Kälteanlagen*, persönliche Mitteilungen von U. Berger, Migros Genossenschaftsbund, September 1999
- BITZER 1997:** *Umwelterklärung 1997*, Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, Werk Sindelfingen, Werk Hailfingen, Sindelfingen
- BOUSTEAD I. 1997A:** *Ecoprofile of Chloromethanes*, European Chlorinated Solvent Association (ECSA), Brüssel
- BOUSTEAD I. 1997B:** *Ecoprofile of Chloroethenes*, European Chlorinated Solvent Association (ECSA), Brüssel
- BOUSTEAD I., G.F. HANCOCK 1979:** *Handbook of Industrial Energy Analysis*, The Open University, Milton Keynes, Ellis Horwood Limited Publishers, John Wiley & Sons, New York and other places
- BOUTONNET J.C. (HRSG.), ETAL. 1999:** Environmental Risk Assessment of Trifluoroacetic Acid, in *Human and Ecological Risk Assessment*, Vol. 5, No. 1, S. 59-124
- CAMPBELL N.J., A. MCCULLOCH 1998:** The Climate Change Implications of Manufacturing Refrigerants; A Calculation of 'Production' Energy Contents of Some Common Refrigerants, in *Trans IChemE*, Vol. 76, Part B, August 1998, S. 239-244.
- CHMIELARSKI J. 1999:** *Persönliche Mitteilung*, von Herrn J. Chmielarski, Supervisor Technical Service CH, A, DE/CIS, Armstrong Insulation Products Sp. z.o.o., November 1999
- CSG/ TELLUS 1992:** *Assessing the Impact of Production and Disposal of Packaging and Public Policy Measures to Alter its Mix*, CSG/ Tellus packaging study, Boston
- 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
- ECETOC (HRSG.) 1995A:** *Tetrafluoroethane (HFC-134a) CAS No. 811-97-2*, Joint Assessment of Commodity Chemicals (JACC) No. 31, European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals, Brussels
- ECETOC (HRSG.) 1995B:** *Difluoromethane (HFC-32) CAS No. 75-10-5*, Joint Assessment of Commodity Chemicals (JACC) No. 32, European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals, Brussels
- ECETOC (HRSG.) 1994A:** *Ammonia Emissions to Air in Western Europe*, Technical Report No. 62, European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals, Brussels
- ECETOC (HRSG.) 1994B:** *1-Chloro-1,2,2,2-tetrafluoroethane (HCFC 124) CAS No. 2837-89-0*, Joint Assessment of Commodity Chemicals No. 25, European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals, Brussels

- EFMA 1999:** *Industry Statistics*, <http://www.efma.org/statistics/>
- 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
- EPA 1988:** *Compilation of Air pollutant emission factors: Volume I. Stationary point and Area Sources, AP 42*, U.S. Environmental Protection Agency (EPA, Hrsg.), South Carolina
- ESK SCHULTZE 1999:** *Sachbilanzdaten Kältemittelsammler*, persönliche Mitteilung, von ESK Schultze, September 1999
- FISCHEDICK M., T. SCHMUTZLER, D. WOLTERS 1997:** *Elektrische Wärmepumpen - Eine Analyse aus ökologischer Sicht*, Wuppertal Papers Nr. 77, Wuppertal
- FISCHER S.K., P.J. HUGHES, P.D. FAIRCHILD (1991):** *Energy and Global Warming Impacts of CFC Alternative Technologies*, Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (AFEAS) and U.S. Department of Energy (DoE), Washington, Oak Ridge
- FKT (HRSG.) 1999:** *Dichtheit von Kälteanlagen*, Vorabzug, Forschungsrat Kältetechnik, Frankfurt
- FORSCHUNGSRAT KÄLTETECHNIK E.V. (HRSG.) (1997):** *Aktueller Überblick zum Ersatz des Kältemittels R22*, Bearbeiter: Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH, Hannover
- FREDERIKSSON L. 1999:** *Persönliche Mitteilung*, von Herrn L. Frederiksson, Manager of Safety, Environment and Quality, AGA Group, August 1999
- 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., 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.; HISCHIER, 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., 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
- GÜNTNER 1999:** *Persönliche Mitteilung*, von Herrn G. Peter, Jäggi/ Güntner Schweiz AG, 17. September 1999
- HABERSATTER K., I. FECKER ET AL. 1998:** *Ökoinventare für Verpackungen*, 2. korrigierte und aktualisierte Auflage, Schriftenreihe Umwelt Nr. 250, Abfälle, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Schweizerisches Verpackungsinstitut (SVI), Bern
- 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
- IDEA 1991:** *IDEA – an International database for ecoprofile analysis; a tool for decision-makers*, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg
- IFA 1999:** *Fertilizer Indicators*, <http://www.fertilizer.org/STATSIND/>
- INFRAS & ECONCEPT 1995:** *Handbuch Emissionsfaktoren für stationäre Quellen; Ausgabe 1995*, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Vollzug Umwelt, Bern
- KANAKIDOU M., F.J. DENTENER, P.J. CRUTZEN 1995:** A global three-dimensional study of the fate of HCFCs and HFC-134a in the troposphere, in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, D9, S. 18'781-18'801.
- KAUFMANN U. 1999:** *Auszug WKK-Statistik 1996-1998*, persönliche Mitteilungen, Dr. Eicher & Pauli AG, Liestal, Oktober 1999
- KAUFMANN U. 1998:** *Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz 1990-1997*, Dr. Eicher & Pauli AG, Liestal, Bundesamt für Energie (BFE, Hrsg.), Bern
- KIRK-OTHMER (HRSG.), 1992:** *Encyclopedia of Chemical Technology, Fourth Edition, Volume 2: Alkanolamines to Antibiotics (Glycopeptides)*, John Wiley & Sons, New York and other places
- KIRK-OTHMER (HRSG.), 1993:** *Encyclopedia of Chemical Technology, Fourth Edition, Volume 5: Carbon and Graphite Fibers to Chlorocarbons and Chlorohydrocarbons-C₁*, John Wiley & Sons, New York and other places, S. 1028-1072
- KIRK-OTHMER (HRSG.), 1994:** *Encyclopedia of Chemical Technology, Fourth Edition, Volume 11, Flavor Characterization to Fuel Cells*, John Wiley & Sons, New York and other places, S. 499-521
- KIRK-OTHMER (HRSG.), 1995:** *Encyclopedia of Chemical Technology, Fourth Edition, Volume 14, Imaging Technology to Lanthanides*, John Wiley & Sons, New York and other places, S. 648-662
- KLAUS T. & F. DINKEL 1999:** *Stoffflussanalyse Schweiz: Fluorkohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid*, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Vorabdruck 26.5.99
- KOTAMARTHI V.R., J.M. RODRÍGUEZ, K.W. KO, T.K. TROMP, N.D. SZE 1998:** Trifluoroacetic acid from degradation of HCFCs and HFCs: A three-dimensional modeling study, in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, D5, S. 5747-5758.
- KRUSE H., H.J. LAUE, TH. ENKEMANN 1995:** *Bewertung des Primärenergiebedarfs und der Treibhausgas-Emissionen von Wärmepumpensystemen*, DKV-Statusbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins Nr. 16, Stuttgart
- KWT 1999:** *Sachbilanzdaten Herstellung Wärmepumpen*, persönliche Mitteilungen, KWT AG Belp, Sept. 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. 1994:** Sources of Hydrochlorofluorocarbons, Hydrofluorocarbons and Fluorocarbons and their Potential Emissions During the Next Twenty Five Years, in *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 31, S. 167-174.
- MCCULLOCH A., N.J. CAMPBELL 1998:** The Climate Change Implications of Producing Refrigerants, in *Preprints 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*, PSI-Bericht Nr. 98-17, Paul Scherrer Institut, Villigen
- MULLISS C. 1999:** persönliche Mitteilung von C. Mulliss, Rhodia Organique Fine Limited, Bristol, 23. September 1999
- NEKSA 1999:** *CO₂ heat pumps*, persönliche Mitteilung, von Petter Neksa, Sintef, Norwegen, Oktober 1999

- PAPASAVVA S., W.R. MOOMAW 1998:** Life-Cycle Global Warming Impact of CFCs and CFC-substitutes for Refrigeration, in *Journal of Industrial Ecology, Volume 1 Number 4*, S. 71-91
- PWMI (HRSG.) 1993:** *Olefin Feedstock Sources*, Eco-profiles of the European plastics industry, Report 2, written by Dr. I. Boustead for The European Centre for Plastics in the Environment (PWMI), Brussels
- REINER 1999:** *Sachbilanzdaten Herstellung Kaltwassersatz und Solekühlsatz*, persönliche Mitteilungen von G. Reiner, Sulzer Fritherm, Rothenburg, Sept. 1999
- ROBERTS H.L. 1976:** *Energy Efficient Processes for the Chemical Industry*, Special Publication No. 27, The Chemical Society, London, UK
- ROS J. 1994:** DuPont de Nemours, in *Samenwerkingsproject Procesbeschrijvingen Industrie Nederland (SPIN)*, Nr. 169
- 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
- SAURER 1997:** *Ökoinventardaten Wärmepumpe*, persönliche Mitteilungen von H. Hohl, Saurer Thermotechnik, Arbon, 22. April 1997
- SCHALLER 1999:** *Sachbilanzdaten Supermarkt-Kälteanlagen*, Stücklisten und Ausschreibungsunterlagen von Anlagen erstellt durch SchallerUto Bern, in den Jahren 1996 bis 1999
- SEVEN-AIR 1994:** *Ökobilanz für Monobloc-Verschaltungsbleche*, der Firma Klima-Gerätebau Seven-Air, Grobanalyse ausgeführt durch Roos + Partner AG, Oberkirch
- TROMP T.K., M.K.W. KO, J.M. RODRÍGUEZ, N.D. SZE 1995:** Potential accumulation of a CFC-replacement degradation product in seasonal wetlands, in *Nature, Vol. 376, 27. July 1995*, S. 327-330
- ULLMANN 1985:** *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Fifth, Completely Revised Edition, Volume A 2, Amines, Aliphatic to Antibiotics*, S. 143-239
- ULLMANN 1986A:** *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Fifth, Completely Revised Edition, Volume A 5, Cancer Chemotherapy to Ceramic Colorants*, S. 165-183
- ULLMANN 1986B:** *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Fifth, Completely Revised Edition, Volume A 6, Ceramics to Chlorohydrins*, S. 233ff.
- ULLMANN 1988:** *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Fifth, Completely Revised Edition, Volume A 11, Fibers, 5. Synthetic Inorganic, to Formaldehyde*, S. 435ff.
- ULLMANN 1993:** *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Fifth, Completely Revised Edition, Volume A 23, Refractory Ceramics to Silicon Carbide*, S. 241ff
- 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>; 9.11.1999)
- 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 NH₃-Aggregat*, persönliche Mitteilungen von A. Steiner, Wettstein AG Gümli-Gen, September 1999
- WPZ 1999:** *WPZ-Bulletin Nr. 20; Juni 1999*, Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Winterthur-Töss, Winterthur
- 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