



Swiss Centre
for Life Cycle
Inventories

A joint initiative
of the ETH domain and
Swiss Federal Offices

ETH

EPFL

PSI

EMPA

ART

Teil X

Wärmepumpen

Data v2.0 (2007)



Thomas Heck
Paul Scherrer Institut, Villigen

ecoinvent report No. 6-X

Villigen, Dezember 2007

Project "ecoinvent data v2.0"

Commissioners:	Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf Swiss Federal Office for the Environment (BAFU - FOEN), Bern Swiss Federal Office for Energy (BFE), Bern Swiss Federal Office for Agriculture (BLW), Bern
ecoinvent Board:	Alexander Wokaun (Chair) PSI, Villigen Gérard Gaillard, Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station, ART, Zürich Lorenz Hilty, Empa, St. Gallen Konrad Hungerbühler, ETHZ, Zürich François Maréchal, EPFL, Lausanne
ecoinvent Advisory Council:	Norbert Egli, BAFU, Bern Mark Goedkoop, PRé Consultants B.V. Patrick Hofstetter, WWF, Zürich Roland Högger, öbu / Geberit AG, Rapperswil Christoph Rentsch, BAFU (until January 2006) Mark Zimmermann, BFE (until July 2007)
Institutes of the ecoinvent Centre:	Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ) Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL) Paul Scherrer Institute (PSI) Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (Empa) Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station (ART)
Participating consultants:	Basler & Hofmann, Zürich Bau- und Umweltchemie, Zürich Carbotech AG, Basel Chudacoff Oekoscience, Zürich Doka Life Cycle Assessments, Zürich Dr. Werner Environment & Development, Zürich Ecointesys - Life Cycle Systems Sarl. ENERS Energy Concept, Lausanne ESU-services Ltd., Uster Infras AG, Bern
Software Support:	ifu Hamburg GmbH
Project leader:	Rolf Frischknecht, ecoinvent Centre, Empa, Dübendorf
Marketing and Sales:	Annette Köhler, ecoinvent Centre, Empa, Dübendorf

Wärmepumpen

Author 2007, v2.0:	Thomas Heck
Author 2004, v1.1:	Thomas Heck
Authors 1996:	Ursula Bollens
Authors 1996:	Nicole Attinger, Ernst Walder
Reviewer:	Gerald Rebitzer, EPFL; Roberto Dones, PSI
Contact address:	ecoinvent Centre Empa P.O. Box CH-8600 Dübendorf http://www.ecoinvent.org/ frischknecht@ecoinvent.org
Responsibility:	This report has been prepared on behalf of one or several Federal Offices listed on the opposite page (see commissioners) and / or the ecoinvent Centre. The final responsibility for contents and conclusions remains with the authors of this report.
Terms of Use:	Data published in this report are subject to the ecoinvent terms of use, in particular paragraphs 4 and 8. The ecoinvent terms of use (Version 2.0) can be downloaded via the Internet (www.ecoinvent.org).
Liability:	Information contained herein have been compiled or arrived from sources believed to be reliable. Nevertheless, the authors or their organizations do not accept liability for any loss or damage arising from the use thereof. Using the given information is strictly your own responsibility.

Citation:

Heck T. (2007) Wärmepumpen. In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-X, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. Online: www.ecoinvent.ch.

Vorwort zur Überarbeitung

Grundlage für den Text dieser Überarbeitung ist der entsprechende Teil aus den „Ökoinventaren von Energiesystemen“ (Frischknecht et al. 1996).

Verdankung

Ein Dank geht an das IEA Heat Pump Centre, insbesondere Frau Ria Bastiaens, für die Übersendung neuer Informationen zu Wärmepumpen.

Version 1996: Für die wertvolle Unterstützung durch die Herren Rohner sen. und jun., Firma Grundag AG (Erdwärmesonde) und Herrn Hess, Firma Polydynamics Ltd. (Wärmepumpe) möchten wir herzlich danken. Die Informationen aus der Praxis waren eine wichtige Grundlage.

Zusammenfassung

Heutzutage werden in der Schweiz ungefähr 40% aller Neubauten mit Wärmepumpen ausgerüstet. Von den im Jahr 2002 in der Schweiz verkauften Wärmepumpen nutzten 52% die Umgebungsluft, 43% das Erdreich und 5% Wasser als Wärmequelle. Zwei der in der Schweiz gebräuchlichsten Wärmepumpentypen werden hier modelliert: eine Luft-Wasser-Wärmepumpe und eine Sole-Wasser-Wärmepumpe. Bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe dient die Umgebungsluft als Wärmereservoir. Die Wärme wird anschliessend an einen Wasserkreislauf zur Verteilung der Wärme im Haus abgegeben. Bei einer Sole-Wasser-Wärmepumpe wird dem Erdreich mit Hilfe einer Erdwärmesonde Wärme entnommen, die Wärme wird ebenfalls über einen Wasserkreislauf im Haus verteilt. In beiden Fällen wird hier eine 10-kW-Wärmepumpe für ein Einfamilienhaus angenommen. Es wird des Weiteren angenommen, dass die Wärme über eine Niedertemperaturfussbodenheizung im Haus verteilt wird. Es werden jeweils Datensätze ab Wärmepumpe (d.h. ohne Wärmeverteilung) und ab Fussbodenheizung (d.h. einschliesslich Wärmeverteilung) zur Verfügung gestellt.

Zwei Standorte werden betrachtet: Schweiz und Europa. Es wurde angenommen, dass die Schweiz klimatisch und geologisch einen mittleren Standort in Europa repräsentiert. Für den Standort Schweiz wurde der schweizerische Stromversorgungsmix eingesetzt, für den Standort Europa der UCTE-Stromversorgungsmix. Die Ergebnisse unterscheiden sich je nach Standort deutlich aufgrund der unterschiedlichen Stromversorgung.

Eine entscheidende Grösse für die Bilanz von Wärmepumpen ist die Jahresarbeitszahl. Nach der hier verwendeten Definition ist die Jahresarbeitszahl das Verhältnis zwischen der Wärmemenge ab Wärmepumpe resp. ab Speicher, sofern vorhanden, und dem spezifischen Elektrizitätsbedarf der Wärmepumpe (inklusive aller Hilfsaggregate). Zur Abschätzung der Jahresarbeitszahlen wurde eine Feldstudie zu Schweizer Wärmepumpeninstallationen berücksichtigt. Demnach wiesen Wärmepumpen, die im Jahr 1998 in Neubauten in der Schweiz installiert wurden, Jahresarbeitszahlen von 2.8 (Luft-Wasser-Wärmepumpe) bzw. 3.9 (Sole-Wasser-Wärmepumpe) auf. Die Jahresarbeitszahlen wurden auch für den durchschnittlichen Standort Europa verwendet. Studien zur Lebensdauer von Wärmepumpen wurden ebenfalls berücksichtigt.

Obwohl beim Betrieb einer Erdwärmesonde, abgesehen von Kältemittelverlusten, direkt keine Emissionen entstehen, werden auch bei diesem Energiesystem über vorgelagerte Prozesse Luftschadstoffe freigesetzt. Die kumulierten CO₂-Emissionen für in der Schweiz betriebene Wärmepumpen ohne Berücksichtigung der Wärmeverteilung im Haus liegen zwischen 10 g/MJ (Sole-Wasser-Wärmepumpe) und 13 g/MJ (Luft-Wasser-Wärmepumpe). Die gleichen Wärmepumpen unter gleichen Temperaturbedingungen jedoch mit UCTE-Durchschnittselektrizität betrieben haben kumulierte CO₂-Emissionen zwischen 37 g/MJ (Sole-Wasser-Wärmepumpe) und 51 g/MJ (Luft-Wasser-Wärmepumpe).

In dieser Studie werden Unsicherheiten zu allen Eingabedaten für die ecoinvent-Datenbank in quantitativer Weise abgeschätzt. Die Unsicherheitsfaktoren werden ebenfalls über die Datenbank zur Verfügung gestellt

und dienen als Grundlage für die Berechnung der Unsicherheiten der kumulierten Resultate. Im vorliegenden Bericht werden die Unsicherheiten der kumulierten Resultate nicht diskutiert. Dieser Bericht dient in erster Linie der Dokumentation der Eingabedaten.

Abkürzungen und Begriffe

BEW	Bundesamt für Energiewirtschaft
COP	Coefficient of Performance
EFH	Einfamilienhaus
EJ	Exajoule, 10^{18} Joules
EWS	Erdwärmesonde
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoff
GJ	Gigajoule, 10^9 Joules
GWP	Treibhauspotential (Global Warming Potential)
HFC	Hydrofluorocarbon
HFCKW	teilhalogenerter Fluorchlorkohlenwasserstoff
Jahresarbeitszahl	Verhältnis von Nutzenergie (Wärme) zu eingesetzter Energie (Strom)
JAZ	Jahresarbeitszahl (engl.: SPF, Seasonal Performance Factor)
JAZ 2	Jahresarbeitszahl inkl. Hilfsenergien
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
MFH	Mehrfamilienhaus
MJ	Megajoule, 10^6 Joules
monovalent	Wärmepumpe als einziges Heizsystem
NT	Niedertemperatur (z.B. NT-Heizung)
ODP	Ozonabbaupotential (Ozone Depletion Potential)
PE (LD)	Polyethylene low density
PE (MD)	Polyethylene medium density
SD_g^2	Quadrat der geometrischen Standardabweichung
SPF	Seasonal Performance Factor (deutsch: JAZ, Jahresarbeitszahl)
SPF 2	SPF inkl. Hilfsenergien
TJ	Terajoule, 10^{12} Joules
tkm	Tonnenkilometer
VPE	Vernetztes Polyethylen
WP	Wärmepumpe
WVS	Wärmeverteilsystem

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE	2
2.1	Wärmepumpe.....	2
2.2	Jahresarbeitszahl (JAZ) und Leistungszahl (COP).....	3
2.3	Kältemittel	5
2.4	Nutzung von geothermischer Energie	6
2.4.1	Nutzungsarten.....	6
2.4.2	Nutzung der untiefen Geothermie mittels Erdwärmesonde.....	7
3	ANWENDUNG	10
3.1	Übersicht Bestand Wärmepumpen	10
3.1.1	Bestand Wärmepumpen Schweiz	10
3.1.2	Bestand Wärmepumpen weltweit	10
3.2	Erdwärmenutzung.....	11
3.2.1	Erdwärmenutzung in der Schweiz	11
3.2.2	Erdwärmenutzung weltweit	11
4	SYSTEMCHARAKTERISIERUNG	14
4.1	Wärmeleistungsbedarf	14
4.2	Sondenlänge für Erdwärmesonde	14
4.3	Kältemittel	14
4.4	Definition der Prozessschritte.....	14
4.5	Übersicht über die wesentlichen Datensätze	15
5	SACHBILANZ DER WÄRMEPUMPEN.....	16
5.1	Infrastruktur.....	16
5.1.1	Sole-Wasser- und Luft-Wasser-Wärmepumpe.....	16
5.1.2	Erdwärmesonde	17
5.1.3	Wärmeverteilsystem	20
5.2	Lebensdauern.....	21
5.2.1	Lebensdauer der Wärmepumpe	21
5.2.2	Lebensdauer der Erdwärmesonde.....	21
5.2.3	Lebensdauer des Wärmeverteilsystems	21
5.3	Betrieb	21
5.3.1	Gemessene Jahresarbeitszahlen	21
5.3.2	Kältemittlemissionen	23
5.3.3	Nutzwärme.....	23
5.4	Eingabedaten Wärmepumpen.....	25
5.5	Kältemittel R134a.....	27
6	KRITIK, VERBESSERUNGSWÜRDIGE PUNKTE	29
7	RESULTATE	30
8	LITERATURVERZEICHNIS	32

1 Einleitung

Heutzutage werden in der Schweiz ungefähr 40% aller Neubauten mit Wärmepumpen ausgerüstet (WPZ 2002). Durch die Entwicklung von so genannten Retrofit-Wärmepumpen soll auch die Nachrüstung in Altbauten gefördert werden (Zogg 2002b). Die Nutzung der Umgebungswärme zur Gebäudeheizung spielt also eine wesentliche Rolle.

In Abhängigkeit vom genutzten Wärmereservoir werden üblicherweise folgende Typen von Wärmepumpen unterschieden:

Typ	Wärmereservoir
Luft-Wasser-Wärmepumpe	Umgebungsluft
Sole-Wasser-Wärmepumpe	Erdwärme
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Gewässer/Grundwasser

Bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe wird die Umgebungsluft als Wärmequelle genutzt. "Wasser" steht für den Heizwasserkreislauf. Solche Anlagen kommen auch bei Heizungssanierungen oft zum Einsatz. Der monovalente Betrieb (d.h. der Betrieb der Wärmepumpe ohne Zusatzheizung) ist mit gut wärmegeämmten Neubauten mit Niedertemperatur-Heizsystem möglich.

Bei Sole-Wasser-Wärmepumpen wird Erdwärme mit Hilfe einer Erdwärmesonde genutzt. Erdwärmesonden sind vertikale Erdreichwärmetauscher (meist U-Rohre aus Polyethylen), die typischerweise bis in eine Tiefe von 50 m bis 250 m installiert werden und in denen im geschlossenen Kreislauf Wärmeträgerflüssigkeit zirkuliert (Brunner&Gorhan 1999). Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdwärmesonden erfordern zwar höhere Investitionskosten als Luft-Wasser-Anlagen, sie haben jedoch eine höhere Jahresarbeitszahl (JAZ) d.h. die hochwertige elektrische Energie wird effizienter genutzt.

Wasser-Wasser-Wärmepumpenanlagen können dort realisiert werden, wo ein geeignetes Gewässer in der Nähe ist. Diese Systeme zeichnen sich durch eine hohe Jahresarbeitszahl aus. Dank hohen und ausgeglichenen Jahrestemperaturen von 8 bis 10 °C eignet sich Grundwasser besonders gut als Wärmequelle. Da die Kosten für das nötige Bewilligungsverfahren, die baulichen Massnahmen und den Betrieb relativ hoch sind, lohnt sich die Nutzung hauptsächlich bei grossem Wärmebedarf (BfK 1996).

Bei den genannten Typen wurde vorausgesetzt, dass zur Wärmeverteilung im Gebäude ein Heizwasserkreislauf eingesetzt wird. In Passivhäusern bzw. MINERGIE-P-Häusern (MINERGIE 2003) können Luft-Luft-Wärmepumpen eingesetzt werden, mit denen die angesaugte Aussenluft im Bedarfsfall direkt im Belüftungskreislauf aufgeheizt wird. Daneben gibt es weitere spezielle Kombinationen wie etwa ein Wärmepumpenkompaktaggregat für die kombinierte Lüftung, Heizung und Warmwasserbereitung im Passivhaus (Feist&Peper 2002). Auf diese Typen wird hier nicht eingegangen.

Im Folgenden werden eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdwärmesonde und eine Luft-Wasser-Wärmepumpe betrachtet. Dies sind die in der Schweiz am häufigsten genutzten Typen (siehe übernächstes Kapitel).

2 Grundlagen und Begriffe

2.1 Wärmepumpe

Die Wärmepumpe besteht grundsätzlich aus vier Teilen (Fig. 2.1):

- dem Verdampfer,
- dem Verdichter,
- dem Verflüssiger (Kondensator) und
- dem Expansionsventil (Drosselorgan).

Im *Wärmepumpenkreislauf* zirkuliert ein *Arbeitsmittel* (*Kältemittel* wie z.B. R134a), dessen Siedepunkt niedriger ist als die Temperatur im Wärmequellenkreislauf (Sole im Fall der Erdwärmesonde). Das flüssige Arbeitsmittel erwärmt sich und wird gasförmig. Gasförmig gelangt es in den *Verdichter* und wird komprimiert. Durch die Erhöhung des Drucks wird das Gas erhitzt, die Temperatur steigt von der Quellen- auf die Nutzungstemperatur an. Das Arbeitsmittel wird darauf zum *Verflüssiger* geleitet, auf dessen sekundärer Seite der *Heizkreislauf* angeschlossen ist. Der Heizkreislauf kühlt das Arbeitsmittel ab, wobei das Wasser im Heizkreislauf erwärmt wird. Das Arbeitsmittel wird dabei wieder flüssig und gelangt zum *Expansionsventil*, wo der Druck nun verringert wird. Darauf ist es erneut in der Lage, beim *Verdampfer* Wärme aufzunehmen.

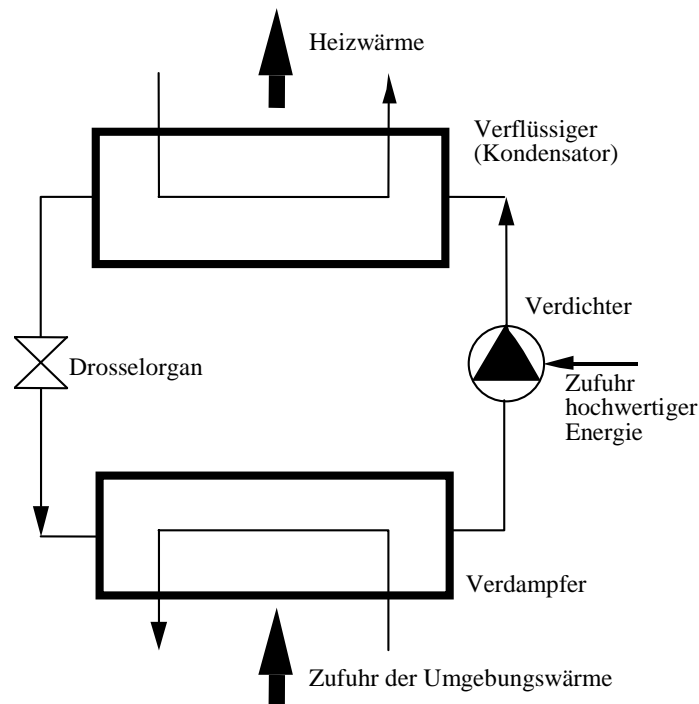


Fig. 2.1 Grundprinzip einer Wärmepumpe.

2.2 Jahresarbeitszahl (JAZ) und Leistungszahl (COP)

Die entscheidende Grösse für den praktischen Betrieb ist die so genannte Jahresarbeitszahl (JAZ, engl.: SPF, Seasonal Performance Factor). Sie ist definiert als das Verhältnis der während des ganzen Jahres erzeugten Nutzwärme Q_N zu der von der Wärmepumpe benötigten elektrischen Energie E_{el} :

$$JAZ = \frac{Q_N}{E_{el}}$$

Es gibt unterschiedliche Definitionen für die JAZ je nachdem, wie die Systemgrenzen definiert werden. Hier wird die so genannte „JAZ 2“ benutzt; sie beschreibt das Verhältnis zwischen der Wärmemenge ab Wärmepumpe resp. ab Speicher, sofern vorhanden, und dem spezifischen Elektrizitätsbedarf der Wärmepumpe (inklusive aller Hilfsaggregate wie Umwälzpumpen und Carterheizung, jedoch ohne Umwälzpumpe für den Abgabekreislauf) (Erb&Hubacher 2001b).

Die benötigte Nutzwärme und die Temperatur der Wärmequelle unterliegen zeitlichen Schwankungen. Die Leistungszahl - gebräuchlicher ist hierfür der englische Begriff „Coefficient of Performance“ (COP) - gibt das Verhältnis des momentan unter gegebenen Temperaturbedingungen von der Wärmepumpe erzeugten Nutzwärmestroms J_N (d.h. Nutzwärme pro Zeiteinheit) zu der von der Wärmepumpe benötigten elektrischen Leistung P_{el} an:

$$COP = \frac{J_N}{P_{el}}$$

Das theoretische Maximum des COP, also der COP einer idealen Wärmepumpe, lässt sich aus der Temperatur der Wärmequelle (T_U in Kelvin) und der Temperatur des von der Wärmepumpe erzeugten Nutzwärmestroms (T_N in Kelvin) berechnen:

$$COP_{\max, id} = \frac{T_N}{T_N - T_U} = \left(1 - \frac{T_U}{T_N}\right)^{-1}$$

Daraus folgt, dass eine Wärmepumpe bei gegebener Wärmequellentemperatur (z.B. Temperatur des Erdreichs) umso effizienter arbeitet, je niedriger die Temperatur der Nutzwärme ist (Fig. 2.2). D.h. ein Wärmeverteilsystem im Haus mit einer Temperatur von 35-40°C (Niedertemperaturheizung) ermöglicht einen besseren COP als ein Wärmeverteilsystem mit höheren Temperaturen.

Der Gütegrad η einer Wärmepumpe ist das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen und dem theoretisch maximalen COP-Wert:

$$\eta = \frac{COP}{COP_{\max, id}}$$

Heutige Wärmepumpen erreichen je nach Wärmequelle Gütegrade zwischen 0.4 und 0.5 (Zogg 2002a), wobei alle Hilfsantriebe in realen Anlagen mit eingerechnet sind. Den höchsten Gütegrad (0.5) erreichen Wärmepumpen, die Wasser als Wärmequelle nutzen. Den relativ niedrigsten Gütegrad (0.4) erhält man bei Wärmequelle Umgebungsluft. Erdwärmepumpen liegen mit 0.45 dazwischen.

Streng genommen ist der Gütegrad einer gegebenen Wärmepumpe nicht über den gesamten Betriebsbereich konstant. Die Schwankungen des Gütegrads sind jedoch relativ gering (bis ca. 15%), so dass die Annahme eines konstanten Gütegrads bereits zu brauchbaren Abschätzungen des COP-Werts bei gegebenen Temperaturen T_U und T_N führen.

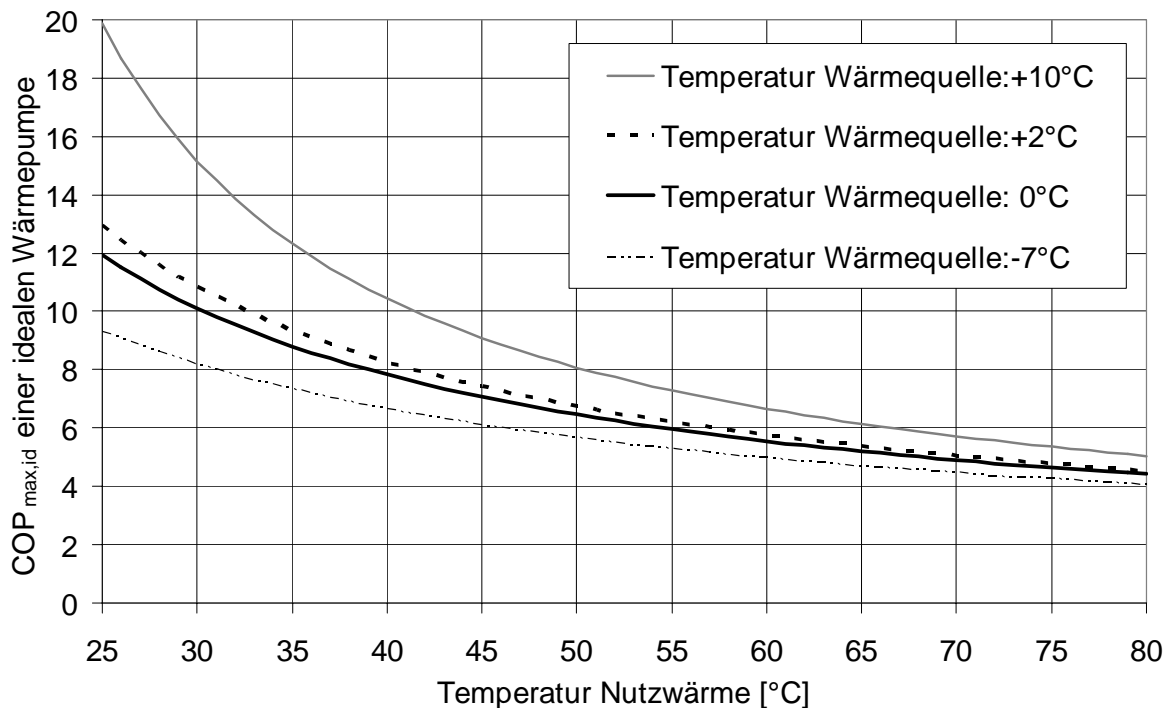


Fig. 2.2 COP (Coefficient of Performance) bzw. Leistungszahl einer idealen Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Temperatur der Nutzwärme bei verschiedenen Wärmequellentemperaturen. Um den COP einer realen Wärmepumpe nach heutigem Stand der Technik zu erhalten, ist $COP_{max,id}$ mit einem Faktor 0.4 bis 0.5 (d.h. dem Gütegrad) zu multiplizieren.

Zur Spezifizierung der Temperaturbedingungen für den COP sind die in Tab. 2.1 angegebenen Abkürzungen gebräuchlich.

Tab. 2.1 Bezeichnung der Temperaturbedingungen für Wärmepumpen.

Typ	Bezeichnung	Quellenseite		Nutzerseite	
		Quelle	Temperatur	Wasser	Temperatur
Luft-Wasser-Wärmepumpe	Ax/Wy	Ax	Aussenluft mit der Temperatur x°C (Air)	Wy	Wasser mit der Temperatur y°C (Water)
Sole-Wasser-Wärmepumpe	Bx/Wy	Bx	Sole aus der Erdwärmesonde mit der Temperatur x°C (Brine)	Wy	"
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Wx/Wy	Wx	Wasser mit der Temperatur x°C (Water)	Wy	"

Als Referenzwerte für Zentraleuropa werden häufig die Temperaturkombinationen A2/W35 für Luft-Wasser-Wärmepumpen, B0/W35 für Sole-Wasser-Wärmepumpen und W10/W35 für Wasser-Wasser-Wärmepumpen angegeben. Im Jahr 2000 galten folgende Mindestwerte für die Erteilung des internationalen Gütesiegels für Wärmepumpen der D-A-CH-Kommission (Roth 2000). Das Gütesiegel für Wärmepumpen-Anlagen ist ein

gemeinsames Werk der Wärmepumpen-Förderer aus Deutschland (D), Österreich (A) und der Schweiz (CH) und gilt in allen drei Ländern (D-A-CH).

- COP = 3.0 für Luft-Wasser-WP (A2/W35)
- COP = 3.5 für Sole-Wasser-WP (B0/W35)
- COP = 4.1 für Wasser-Wasser-WP (W10/W35).

Im Laufe des Jahres 2000 wurden die Kriterien der technischen Entwicklung angepasst und mit Wirkung ab 1.1.2001 wie folgt geändert:

- COP = 4.0 für Sole-Wasser-WP (B0/W35)
- COP = 4.5 für Wasser-Wasser-WP (W10/W35).

2.3 Kältemittel

Im Interesse des Umweltschutzes ist für den Umgang mit FCKWs (ozonabbauendes Potential in der Stratosphäre, treibhausverstärkendes Potential) äusserste Sorgfalt vorzusetzen. Obwohl die Wärmepumpe einen hermetisch abgeschlossenen Kreislauf aufweist, ist im Fall einer Panne ein Entweichen des Arbeitsmittels in die Umwelt nicht auszuschliessen. Darum sollte die Arbeitsmittelfüllmenge möglichst gering gehalten werden. Die Verordnung über umweltgefährdende Stoffe vom 14. August 1991 sah ein generelles Verbot der stark ozonschichtabbauenden Stoffe ab 1994 vor. R22 (HFCKW) war der Nachfolger der seit 1. 1. 1994 verbotenen vollhalogenierten FCKW (z.B. Dichlordifluormethan R12). Seit 2001 ist auch R22 für Neuanlagen in der Schweiz nicht mehr zugelassen. Im Jahr 1996 arbeiteten in der Schweiz fast alle Wärmepumpen mit R22 als Kältemittel (Wärmepumpe 1996). Heute werden in der Schweiz in neuen Wärmepumpen hauptsächlich die Kältemittel R134a (1,1,1,2-Tetrafluorethan), R404A, R407C, R407D, R410A, R417A und R290 (Propan) eingesetzt (WPZ 2003).

In der Schweiz gelten folgende Regelungen für den Einsatz von Kältemitteln (Roth 2003):

- Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) werden ab dem 1.1.2004 gänzlich verboten.
- Die halogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (HFCKW) sind für Neuanlagen bereits seit Anfang 2002 verboten, für Nachfüllungen werden sie ab 2010, rezyklierte HFCKW ab 2015 verboten sein.
- Der Einsatz von halogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (HFKW) in Systemen mit über 3 kg Füllmenge ist ab 2004 bewilligungspflichtig. Darunter fallen namentlich die Kältemittel R134a, R404A und R407C.

In dieser Studie wird als Kältemittel R134a angenommen. Zum Vergleich zeigt Tab. 2.2 das Ozonabbaupotential und das Treibhauspotential verschiedener Kältemittel.

Tab. 2.2 Ozonabbaupotential (ODP, Ozone Depletion Potential) und Treibhauspotential mit Zeithorizont 100 Jahre (GWP₁₀₀, Global Warming Potential) verschiedener Kältemittel (Roth 2002; EPA 2002; IPCC 2001).

Kältemittel	ODP	GWP ₁₀₀
R744 (CO ₂)	0	1
R12 (CF ₂ Cl ₂)	1	10600
R22 (CHF ₂ Cl)	0.05	1700
R134a (CH ₂ FCF ₃)	0	1300
R404A	0	3780 ^{a)}
R407C	0	1650 ^{a)}
R410A	0	1975 ^{a)}
R717 (Ammoniak NH ₃)	0	0

^{a)}GWP₁₀₀ von R404A, R407C und R410A berechnet nach Tab. 2.3

Tab. 2.3 Zusammensetzung der gebräuchlichen Kältemittelmischungen R404A, R407C und R410A (EPA 2002) und Treibhausgaspotentiale (GWP₁₀₀) der HFC-Komponenten (IPCC 2001).

	HFC-32 (R32)	HFC-125 (R125)	HFC-134a (R134a)	HFC-143a (R143a)
	CH ₂ F ₂	CHF ₂ CF ₃	CH ₂ FCF ₃	CF ₃ CH ₃
(GWP ₁₀₀)	(550)	(3400)	(1300)	(4300)
R404A		44%	4%	52%
R407C	23%	25%	52%	
R410A	50%	50%		

2.4 Nutzung von geothermischer Energie

2.4.1 Nutzungsarten

Seit Urzeiten gibt die Erde Wärme ans Weltall ab. Doch erst in neuerer Zeit nutzt der Mensch diesen Vorrat in geringem Masse. In geothermischen Anomalien, wo hohe Temperaturen in geringen Tiefen herrschen, wird Wärme in Form von Heisswasser und Dampf extrahiert.

Verschiedene Technologien werden eingesetzt, um die geothermische Energie dem Menschen verfügbar zu machen:

Dampf- und Heisswassersysteme zur Elektrizitätserzeugung. Diese Technik ist an geologische Gegebenheiten gebunden (z.B. in der Toskana, Italien). Um aus Heisswasser (175 °C) elektrischen Strom zu erzeugen, müsste in Mitteleuropa – mit wenigen Ausnahmen – mindestens 4000 bis 5000 m tief gebohrt werden. Damit wächst natürlich das Bohrrisiko, d.h. es kann nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden, ob eine wasserführende Schicht (Aquifer) angebohrt wird, die eine hinreichend grosse Ergiebigkeit hat. Diese Nutzungsart ist noch im Forschungsstadium.

Hot-Dry-Rock Verfahren (HDR). Mit diesem Verfahren, auch als Deep Heat Mining bezeichnet, wird die im heissen und trockenen Gestein gespeicherte Energie genutzt. In einer ersten Tiefenbohrung wird das Grundgestein aufgebrochen, um neue Fliesswege zu erzeugen. Eine zweite Bohrung muss diesen

aufgebrochenen Bereich durchteufen. Im Betrieb wird dann kaltes Oberflächenwasser durch die erste Bohrung in die Fließwege gepresst, dort erhitzt und über die zweite Bohrung (Doublettenbetrieb) Heisswasser gefördert. Durch die Anwendung von ORC-Maschinen (Organic Rankine Cycle) sind für eine wirtschaftliche Stromproduktion schon Temperaturen am Bohrkopf ab etwa 100 °C ausreichend (SVG-SSG 2004). Erwähnenswert ist das deutsch-französische Gemeinschaftsprojekt in Soultz-sous-Forêts im Elsass. Dort ist 1987 eine Bohrung auf 2000 m niedergebracht worden. Zurzeit wird in Soultz-sous-Forêts eine neue Pilotanlage errichtet mit einer Tiefenbohrung auf 5000 m, wo Temperaturen über 200 °C herrschen.

Warmwassernutzung. Die klassische Art von Erdwärmennutzung ist das Erschließen von Warmwasservorkommen in den Temperaturbereichen von 40 °C bis etwa 150 °C. Die Temperaturen sind i. a. nicht ausreichend, um elektrische Energie zu gewinnen, jedoch decken sie praktisch den gesamten Bereich der direkten Anwendungen ab. Die bekanntesten Beispiele werden in Island angetroffen (Gebäude, Gewächshäuser).

Wärme aus dem flachen Untergrund ("untiefe" Geothermie). Neben den drei genannten Techniken zur direkten Nutzung von warmem und heissem Wasser aus dem Untergrund kann Wärme aus dem flachen Untergrund indirekt, d.h. mit Hilfe von Wärmepumpen genutzt werden. Die Wärme wird dabei über Grundwasserbohrungen, Erdkollektoren oder Erdwärmesonden dem Boden entzogen. Bei all diesen Anlagen ist der Einsatz einer Wärmepumpe (WP) erforderlich. Vorteile gegenüber einer konventionellen WP-Anlage im Bereich der Niedertemperaturversorgung eines Wohngebäudes liegen in der ganzjährig etwa konstanten Energiequellentemperatur. Zusätzlich können anthropogene Temperaturerhöhungen, die vor allem in Ballungsgebieten in den ersten zehn Metern im Untergrund auftreten, ausgenützt werden.

Hier wird nur die untiefe Geothermie näher betrachtet. Diese Nutzungsart wird im folgenden Abschnitt näher dargestellt.

2.4.2 Nutzung der untiefen Geothermie mittels Erdwärmesonde

Bezüglich der Tiefenauslotung umfasst die *untiefe Geothermie* einen Bereich von ca. 10-20 m Tiefe. In der Schicht zwischen Erdoberfläche und etwa 10-20 m Tiefe schwanken die Temperaturen zeitlich mit der Temperatur der Atmosphäre. In dieser oberflächennahen Schicht kann die Temperatur je nach Jahreszeit mit der Tiefe zu- oder abnehmen. Unterhalb der Grenze von ungefähr 10-20 m Tiefe bleibt die Temperatur (unter natürlichen Bedingungen, d.h. ohne Betrieb einer Erdwärmesonde) das ganze Jahr über praktisch konstant. Den Grenzbereich bezeichnet man als "neutrale Zone". Unterhalb der neutralen Zone nimmt die Temperatur im Allgemeinen mit der Tiefe zu, nach einer Faustregel für Europa mit ungefähr drei Grad Kelvin pro 100 m Tiefe. Die genaue Lage der neutralen Zone hängt von der Bodenbeschaffenheit und von den lokalen Wärmequellen ab.

Erdwärmesonde

Die Erdwärmesonden (EWS) oder Erdsonden, im Wesentlichen bestehend aus koaxialen oder U-förmigen Polyethylenrohren, werden mittels Bohrungen senkrecht ins Erdreich eingebracht. Das Erdreich dient als *Wärmequelle*. Die Wärme wird dem Erdreich über einen geschlossenen Kreislauf in der Sonde – dem *Wärmequellenkreislauf* – entzogen und der Wärmepumpe (WP) zugeführt. Als Wärmetransportmedium dient die so genannte *Sole*, meistens Wasser mit einem Zusatz von 25 bis 35% Frostschutzmittel. Die Wärmepumpe hebt die aus dem Erdreich gewonnene Wärme über einen zweiten Kreislauf auf ein für Niedertemperaturheizsysteme nutzbares Niveau.

Durch die EWS wird dem Boden dauernd Wärme entzogen. Da das Erdreich dieses Wärmedefizit nicht schnell genug kompensieren kann, bildet sich um die EWS ein Kältetrichter aus. Etwa 2.5 m von der Sonde entfernt fällt die Temperaturdifferenz (Bodentemperatur ohne EWS – Bodentemperatur mit EWS im Dauerbetrieb) auf weniger als 1 °C zusammen. Da die WP während der Heizperiode nur kurze Ruhephasen hat, kommt es während dieser Zeit zu einer Auskühlung des Erdreichs. Daher ist es wichtig, dass die

Entzugsleistung während dem Dauerbetrieb den Erfahrungswert von 40-60 Watt pro Sondenmeter nicht übersteigt. Es stellt sich über mehrere Betriebsjahre hinweg ein neuer Gleichgewichtszustand EWS-Erdreich ein, der sich auf tieferem Temperaturniveau als dem des unbeeinflussten Erdreichs befindet.

Die Wärme, die zur Sonde hin fließt, stammt aus dem Erdinneren und nicht aus den atmosphärischen Temperaturschwankungen. Sie tritt auch ohne menschliches Zutun an die Erdoberfläche – durch Erdwärmesysteme wird dieser Prozess jedoch beschleunigt. Der aus dem Erdinneren strömende Wärmefluss von 60 bis 80 W/m² stammt zu 80 % auf den Zerfall radioaktiver Isotope in den Gesteinen (U238, Th232 und K40) und ist zu 20 % auf die bei der Entstehung der Erde verursachte Ursprungswärme zurückzuführen (Heckenberger 1989).

Wichtige Vorgänge beim Betrieb von Erdwärmesondenanlagen

Für die optimale Funktion einer WP-Anlage (siehe Fig. 2.1) sind die verschiedenen Temperaturniveaus im Wärmequellen- und im Wärmenutzungskreislauf entscheidend. Damit wird eine hohe Jahresarbeitszahl erreicht. Die entsprechenden Temperaturniveaus sind in Fig. 2.3 ersichtlich. (Nach (BEW 1989).)

Wärmenutzkreislauf: Der Heizbedarf, der durch das Heizsystem gedeckt werden muss, variiert mit der schwankenden Aussentemperatur. Je massiver und besser isoliert ein Haus gebaut ist, desto träger reagiert der Heizbedarf. Daher genügt ein langsam alternierender Ein/Aus-Betrieb der Heizanlage. Bei einer Fussbodenheizung dient der Baukörper selber als Energiespeicher, wogegen bei anderen Heizungssystemen ein spezieller Speicher eingesetzt werden muss.

Wärmepumpenkreislauf (Arbeitsmittelkreislauf): Der Einsatz von hochwertiger Energie im Verdichter gestattet es, Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau (Verdampfer) auf ein hohes Temperaturniveau (Verflüssiger) zu transportieren. Dabei ist die Art des Arbeitsmittels von grosser Bedeutung.

Wärmequellenkreislauf: Auf dieser Seite ist die EWS angeschlossen. Sie ist eine (weitere) Wärmeaustauschfläche, die dem Erdreich Wärme entzieht. Der Wärmeträger (Sole) gibt dem Verdampfer Wärme ab, wobei er sich abkühlt. Temperaturen von weniger als 0 °C können auftreten. Auf dem Weg durch die EWS nimmt der Wärmeträger Wärme aus dem Erdreich auf.

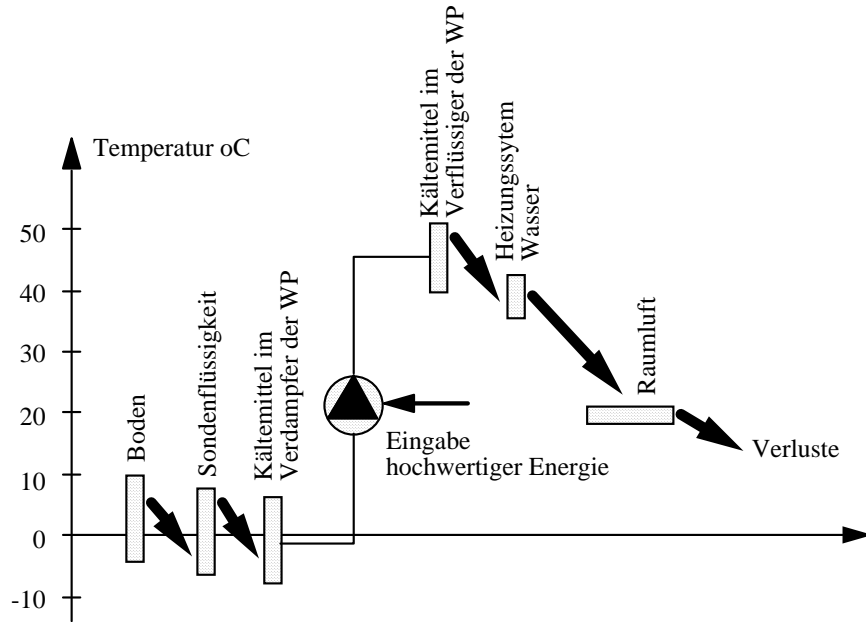


Fig. 2.3 Typische Temperaturbereiche im EWS-WP-Heizsystem.

3 Anwendung

3.1 Übersicht Bestand Wärmepumpen

3.1.1 Bestand Wärmepumpen Schweiz

Die überwiegende Anzahl von Wärmepumpen in der Schweiz nutzt einen Elektromotor als Antrieb. Die Zahl der Elektromotorwärmepumpen in der Schweiz ist von 47'684 im Jahr 1996 auf 64'050 im Jahr 2000 angestiegen (Tab. 3.1). Die installierte Heizleistung hat dabei von 979 MW auf 1'113 MW zugenommen (Kaufmann 2002) (Tab. 3.1). Die Zahl (resp. installierte Heizleistung) der Gas- und Dieselmotorwärmepumpen ist leicht zurückgegangen, von 57 (25.4 MW) im Jahr 1996 auf 54 (24.3 MW) im Jahr 2000 (Kaufmann 2002). Von den im Jahr 2000 in der Schweiz verkauften Wärmepumpen mit einer Leistung unter 25 kW nutzten 55% Luft, 39% das Erdreich und 5% Wasser als Wärmequelle (Zogg 2002b). Im Jahr 2002 wurden in der Schweiz insgesamt 7554 Wärmepumpen verkauft. Davon waren 52% Luft-Wasser-, 43% Sole-Wasser- und 5% Wasser-Wasser-Wärmepumpen (Beyeler 2003).

Tab. 3.1 Bestand an Elektromotorwärmepumpen in der Schweiz (einschliesslich Geothermienutzung mit Wärmepumpe) (Kaufmann 2002).

		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Anzahl	-	34'769	36'677	38'211	39'692	42'446	45'064	47'684	50'988	55'209	59'288	64'050	68'996
Wärmepumpen													
Elektrische Anschlussleistung	MW	273	281	286	290	298	302	307	311	320	324	329	335
Installierte Heizleistung	MW	823	853	874	894	929	952	979	1'006	1'050	1'080	1'113	1'153
Klimanormiert:													
Verbrauch Elektrizität	GWh	548	569	584	596	610	625	635	645	661	677	686	697
Wärmeproduktion	GWh	1'393	1'455	1'509	1'551	1'606	1'661	1'707	1'756	1'828	1'900	1'954	2'015
JAZ		2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8	2.8	2.9
Nicht klimanormiert:													
Verbrauch	GWh	501	585	562	573	542	598	658	601	633	635	610	646
Wärmeproduktion	GWh	1'288	1'491	1'459	1'500	1'447	1'600	1'762	1'651	1'760	1'798	1'761	1'884
JAZ		2.6	2.5	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9

3.1.2 Bestand Wärmepumpen weltweit

Die Anzahl der weltweit betriebenen Wärmepumpen wird auf ca. 130 bis 140 Millionen im Jahr 2001 geschätzt (Halozan 2002). Davon sind laut (Halozan 2002) ca. 67 Millionen Wärmepumpen in Japan installiert, ca. 25 Millionen in China und 13-14 Millionen in USA. Der Wärme-Output der Wärmepumpen betrug 2001 global ca. 1300 TWh/a, davon 750 TWh/a im Bereich Haushalte, 350 TWh/a in kommerziell genutzten Gebäuden und 200 TWh/a in der Industrie (Halozan 2002). Die durch Wärmepumpen gewonnene erneuerbare Wärmeenergie (d.h. Wärme-Output abzüglich der benötigten nicht-erneuerbaren Energie) wird auf ca. 870 TWh/a geschätzt (Holozan 2002). In Europa gab es im Jahr 1997 ca. 4.3 Millionen Wärmepumpen (Holozan 2002). Die meisten davon sind reversible (d.h. sowohl zur Wärmeerzeugung als auch zur Kühlung nutzbare) Luft-Luft-Systeme in Südeuropa, zumeist aus USA oder Japan importiert. Die Anzahl der ausschliesslich zur Wärmeerzeugung und Wärmerückgewinnung dienenden Wärmepumpen in Europa wird auf ca. 1.5 Millionen geschätzt. Der Anteil der durch Wärmepumpen gedeckten Heizenergie in Gebäuden beträgt in Japan 20%, in Schweden 9.4%, in den USA 6.9%, in Spanien 5%, in der Schweiz 1.7% (Halozan 2002). Die durch Wärmepumpen erzeugte Wärme in Wohngebäuden in Europa (EU-15) beläuft sich auf ca. 40 TWh/a (Rose 2002).

Die durchschnittliche Wärmeleistungskapazität von Wärmepumpen in Europa liegt bei ca. 4 kW (Rose 2002). In Südeuropa ist der Durchschnitt etwas niedriger, ca. 3 kW, in den anderen Ländern liegt der Durchschnitt bei 5 bis 12 kW (Rose 2002).

3.2 Erdwärmenutzung

3.2.1 Erdwärmenutzung in der Schweiz

Mit einem Wärmestrom von etwa 63 mW/m^2 und einer Temperaturzunahme von ca. 3 K pro 100 m Tiefe entspricht die Schweiz hinsichtlich der geothermischen Verhältnisse den mitteleuropäischen Ländern. Geologisch können drei verschiedene Zonen unterschieden werden:

- Unter dem Mittelland und Jura gibt es bis zu fünf ausgedehnte wasserführende Schichten. Diese Schicht-Aquifere liegen bis zu 3000 m tief, wo Temperaturen um $100 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erwarten sind.
- Im Oberrheingraben um Basel sowie im unteren Aaretal gibt es "positive Anomalien", wo die Untergrundtemperaturen deutlich erhöht sind.
- In den Alpen sind keine Schicht-Aquifere bekannt, doch weisen Thermalquellen wie in Leukerbad auf Kluft-Aquifere hin.

In diesen drei Zonen wird auch der leichteste Zugriff zur Erdwärme erwartet. Da in der Schweiz vulkanische Gebiete fehlen, können Dampfplagerstätten ausgeschlossen werden. Als praktikable Wege bleiben zwei Möglichkeiten:

- die etwa 100 m tiefen Erdwärmesonden (EWS) zur dezentralen Beheizung von Einfamilienhäusern (EFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) und
- bis zu 3000 m tiefe Bohrungen zur Warmwassererfassung für die zentrale Beheizung grosser Siedlungen.

Da die Bohrkosten mit der Tiefe stark überproportional steigen, ist die maximale Tiefe durch finanzielle Grenzen bestimmt. 3000 m scheinen eine vernünftige Grenze darzustellen. Hier können aber kaum mehr als $100 \text{ }^\circ\text{C}$ erwartet werden, d.h. man muss sich auf die Warmwasserzubereitung und auf Beheizungen beschränken. Das klassische (ausländische) Beispiel stellt die Stadt Creil im Pariserbecken dar, wo seit 1974/83 etwa $10'000$ Wohnungen auf diese Art beheizt werden. Als weiteres Beispiel kann das Projekt von Riehen bei Basel erwähnt werden. Die Bohrung reicht in $1'500 \text{ m}$ Tiefe, von wo 20 Liter Wasser pro Sekunde mit einer Temperatur von 67 Grad Celsius gefördert werden, die mehr als 1000 Wohnungen beheizen.

Während der Bau einer Erdwärmesonde meist kein Wagnis darstellt, muss bei Tiefbohrungen – trotz allen geologischen Vorabklärungen – immer damit gerechnet werden, *nicht* auf die erhoffte Warmwasserquelle zu stossen.

Im Jahr 1998 betrug die Wärmeproduktion durch Erdwärmesonden in der Schweiz ca. 440 GWh (Brunner&Gorhan 1999). Die gesamte mit Geothermie verbundene Wärmeproduktion im Jahr 1998 in der Schweiz lag bei 588.9 GWh , wobei der geothermische Wärmeanteil 396 GWh betrug (Brunner&Gorhan 1999). Die entsprechenden Zahlen für 1990 sind 316 und 211 GWh (Brunner&Gorhan 1999).

In der Schweiz sind bereits mehr als $20'000$ Erdwärmesonden zur Beheizung von Ein- und Mehrfamilienhäusern in Betrieb, die Gesamtlänge dieser Erdwärmesonden beträgt ca. $4'000 \text{ km}$ (Brunner&Gorhan 1999). Derzeit besteht die Tendenz, mit Erdwärmesonden in immer grössere Tiefen (ca. 500 m) vorzudringen um von den dort vorhandenen höheren Temperaturen zu profitieren. Eine Erdwärmesonde in der Schweiz wurde sogar in eine Tiefe von $2'280 \text{ m}$ verlegt. (Brunner&Gorhan 1999).

3.2.2 Erdwärmenutzung weltweit

Tab. 3.2 zeigt die Stromproduktion durch geothermale Anlagen und die installierte Leistung im Jahr 2000 für verschiedene Länder der Welt. Die USA und die Philippinen sind derzeit die Hauptproduzenten von elektrischem Strom aus Erdwärme.

Tab. 3.2 Installierte Leistung und Stromproduktion aus geothermaler Energie im Jahr 2000 (Huttrer 2001).

	Installierte Leistung	Stromproduktion
	MW _e	GWh/a
Australia	0.2	0.9
China	29.2	100.0
Costa Rica	142.5	592.0
El Salvador	161.0	800.0
Ethiopia	8.5	30.1
France	4.2	24.6
Guatemala	33.4	215.9
Iceland	170.0	1138.0
Indonesia	589.5	4575.0
Italy	785.0	4403.0
Japan	546.9	3532.0
Kenya	45.0	366.5
Mexico	755.0	5681.0
New Zealand	437.0	2268.0
Nicaragua	70.0	583.0
Philippines	1909.0	9181.0
Portugal	16.0	94.0
Russia	23.0	85.0
Thailand	0.3	1.8
Turkey	20.4	119.7
USA	2228.0	15470.0
Total	7974.1	49261.5

In Tab. 3.3 sind Angaben zur globalen direkten Nutzung von Erdwärme ohne Stromproduktion zusammengestellt. Die Verteilung der weltweiten Nutzung wurde wie folgt abgeschätzt: 42% für Bäder und Swimming Pools, 23% für Raumheizung, 12% für geothermale Wärmepumpen, 9% zur Beheizung von Gewächshäusern, 6% für Aquakultur und Fischzucht, 5% für industrielle Anwendungen, 3% für sonstige Anwendungen (Lund & Freeston 2001). Der hohe Anteil für Bäder und Swimming Pools im globalen Durchschnitt ist teilweise darauf zurückzuführen, dass in vielen Fällen das Heisswasser permanent durch die Anlagen läuft und der gesamte Durchfluss in den Statistiken angegeben ist (Lund & Freeston 2001). Die genaue Definition der Nutzung ist daher schwierig. Die Angaben sind als entsprechend unsicher zu betrachten.

Tab. 3.3 Direkte Nutzung von Erdwärme weltweit (ohne Stromproduktion) im Jahr 2000 (Lund & Freeston 2001).

	TJ/a	GWh/a		TJ/a	GWh/a
Algeria	1586	441	Japan	26933	7482
Argentina	449	125	Jordan	1540	428
Armenia	15	4	Kenya	10	3
Australia	351	98	Korea	753	209
Austria	1609	447	Lithuania	599	166
Belgium	107	30	Macedonia	510	142
Bulgaria	1637	455	Mexico	3919	1089
Canada	1023	284	Nepal	22	6
Caribbean Islands	1	0	Netherlands	57	16
Chile	7	2	New Zealand	7081	1967
China	37908	10531	Norway	32	9
Colombia	266	74	Peru	49	14
Croatia	555	154	Philippines	25	7
Czech Republic	128	36	Poland	275	76
Denmark	75	21	Portugal	35	10
Egypt	15	4	Romania	2871	797
Finland	484	134	Russia	6144	1707
France	4895	1360	Serbia	2375	660
Georgia	6307	1752	Slovak Republic	2118	588
Germany	1568	436	Slovenia	705	196
Greece	385	107	Sweden	4128	1147
Guatemala	117	33	Switzerland	2386	663
Honduras	17	5	Thailand	15	4
Hungary	4086	1135	Tunisia	201	56
Iceland	20170	5603	Turkey	15756	4377
India	2517	699	United Kingdom	21	6
Indonesia	43	12	United States	20302	5640
Israel	1713	476	Venezuela	14	4
Italy	3774	1048	Yemen	15	4
Total				190699	52976

4 Systemcharakterisierung

4.1 Wärmeleistungsbedarf

Als zugrunde liegende Grösse wird ein Einfamilienhaus im Schweizer Mittelland mit folgenden Kennzahlen angenommen (AWP 1991):

-	Wärmeleistungsbedarf	10 kW
-	Wärmeverteilsystem (Niedertemperaturheizung)	50/40 °C
-	approximative Wärmeabgabe der Wärmepumpe (2'000 h)	20'000 kWh
-	ausgewählte Heizleistung der Wärmepumpe bei 40 °C Vorlauftemperatur ¹	10.25 kW
-	mittlere Kühlleistung für die Dimensionierung der Erdsonde	8.25 kW
-	Entzugsleistung	55 W/m

Das System werde monovalent betrieben (d.h. es wird keine Zusatzheizung betrachtet).

4.2 Sondenlänge für Erdwärmesonde

Aus den Angaben in Abschnitt 3.2.1 ergibt sich für die in der Schweiz zurzeit installierten Erwärmsonden eine mittlere Sondenlänge von ca. 200 m. Hier wird jedoch eine Sonde entsprechend dem oben angegebenen Wärmeleistungsbedarf des betrachteten Einfamilienhauses angenommen. Die typischerweise notwendige Sondenlänge lässt sich nach folgender Faustformel abschätzen: Pro kW erforderliche Wärmeleistung kann mit ca. 15 m Sondenlänge gerechnet werden (AWP 1991). Aus der mittleren Kühlleistung und der Entzugsleistung ergibt sich für das hier angenommene Einfamilienhaus eine erforderliche Erdwärmesondenlänge von 150 m. (Es sind auch zwei Sonden à 75 m möglich.)

4.3 Kältemittel

Laut der Liste des Wärmepumpen-Testzentrums Winterthur-Töss (WPZ 2003) kommen in heutigen Wärmepumpen verschiedene Kältemittel zum Einsatz. Da hier nicht die gesamte Vielfalt von Kältemitteln bilanziert werden kann, beschränkt sich diese Studie auf das Kältemittel R134a. R134a (d.h. HFC-134a bzw. 1,1,1,2-Tetrafluorethan) wird in heutigen Wärmepumpen sowohl in reiner Form als auch in weit verbreiteten Kältemittelmischungen verwendet (z.B. R407C besteht zu über der Hälfte aus HFC-134a, siehe Tab. 2.3).

4.4 Definition der Prozessschritte

Die Infrastrukturaufwendungen werden drei Prozessschritten zugeteilt:

- Infrastruktur Wärmepumpe,
- Infrastruktur Wärmeverteilsystem (Niedertemperatur-Fussbodenheizung),
- Für Sole-Wasser-Wärmepumpe: Infrastruktur Erdwärmesonde (Bohrprozess und Sonde).

¹ B-5/W40 (-5: Wärmequelleneintrittstemperatur oder Temperatur der Sole (Brine), 40: Austrittstemperatur am Verflüssiger oder Temperatur Wasser)

Die Bezugsgrösse der Sole-Wasser-Wärmepumpe ohne Wärmeverteilung im Haus heisst "Nutzwärme, Erdwärmesonde, ab Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW" („heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW“) und verknüpft die Infrastrukturmodule mit den Betriebsemissionen und dem Strombezug. Die Nutzwärme im Raum unter Berücksichtigung der Wärmeverteilung wird in den Modulen "Nutzwärme, Erdwärmesonde, Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW, ab Raumheizung" („heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator“) berechnet. Die entsprechenden Bezugsgrössen für die Luft-Wasser-Wärmepumpe sind „Nutzwärme, ab Luft-Wasser-Wärmepumpe 10kW“ („heat, at air-water heat pump 10kW“) ohne Wärmeverteilung und „Nutzwärme, Luft-Wasser-Wärmepumpe 10kW, ab Raumheizung“ („heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator“) mit Wärmeverteilung.

4.5 Übersicht über die wesentlichen Datensätze

Tab. 4.1 zeigt die Namen der verfügbaren Datensätze zur Nutzwärme aus Wärmepumpen im Überblick. Daneben existieren auch Datensätze zur Infrastruktur.

Tab. 4.1 Namen der Datensätze zur Nutzwärme aus Wärmepumpen.

Englischer Name	Deutscher Name	Einheit	Land/Region
heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	Nutzwärme, Erdwärmesonde, ab Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW	MJ	CH
heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	Nutzwärme, Erdwärmesonde, ab Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW	MJ	RER
heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator	Nutzwärme, Erdwärmesonde, Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW, ab Raumheizung	MJ	RER
heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator	Nutzwärme, Erdwärmesonde, Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW, ab Raumheizung	MJ	CH
heat, at air-water heat pump 10kW	Nutzwärme, ab Luft-Wasser-Wärmepumpe 10kW	MJ	RER
heat, at air-water heat pump 10kW	Nutzwärme, ab Luft-Wasser-Wärmepumpe 10kW	MJ	CH
heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator	Nutzwärme, Luft-Wasser-Wärmepumpe 10kW, ab Raumheizung	MJ	RER
heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator	Nutzwärme, Luft-Wasser-Wärmepumpe 10kW, ab Raumheizung	MJ	CH

5 Sachbilanz der Wärmepumpen

5.1 Infrastruktur

5.1.1 Sole-Wasser- und Luft-Wasser-Wärmepumpe

Für die Materialbilanz wird eine Wärmepumpe der Firma Hoval betrachtet, die im Betriebszustand B-5/W40 eine Heizleistung von 10.25 kW bietet. Die Kältemittelmenge wird mit Mittelwerten verschiedener Angaben abgeschätzt.

Material Einsatz für Sole-Wasser-Wärmepumpe

Der Kompressor und das Gehäuse der Wärmepumpe bestehen aus 75 kg unlegiertem Stahl. Aus 20 kg niedriglegiertem Stahl werden Verdampfer und Verflüssiger hergestellt. Für den Kompressor, die Leitungen der Wärmepumpe und die Elektrokabeln der Steuerung werden insgesamt 22 kg Kupfer verwendet. Als Isolationsmaterial werden in der Wärmepumpe 10 kg Armaflex verwendet (Modul "Rohrisolierung, Elastomere, ab Werk" bzw. "tube insulation, elastomere, at plant"). 1 kg PVC stammt aus der Isolation der elektrischen Kabel. Zum Schmieren des Kompressors wird 1.7 kg weisses Kältemaschinenöl verwendet (Hinden 1993), (Hess 1993).

Für die Kältemittelfüllmenge von vier mit R134a gefüllten Sole-Wasser-Wärmepumpen sind in (WPZ 2003) Werte zwischen 0.17 und 0.43 kg/kW (B0/W35) angegeben mit einem Mittelwert von ca. 0.3 kg/kW(B0/W35). Hier wird für die 10kW-Sole-Wasserwärmepumpe eine Füllmenge von 3 kg R134a angenommen. In der vorigen Version der Studie wurde mit einer Füllmenge von 3 kg R22 gerechnet.

Zur Herstellung wird pro Wärmepumpe 5.6 GJ Energie aufgewendet. 50 % dieser grauen Energie wird für Konstruktion und Installation aufgewendet (2.8 GJ pro Wärmepumpe) (Jensch 1988). Davon ist 50 % Strom und 50 % Erdgas. Der Strombezug hat eine Abwärme mit gleichem Energieinhalt zur Folge.

In (Frischknecht 1999) ist ein Wasserverbrauch von 5.4 kg Wasser pro kg Produkt bei der Produktion von Kompressoren und Motoren für Wärmepumpen angegeben. Dieser Wert wird hier für die Produktion der Wärmepumpe angenommen.

Als Standard-Transportdistanzen werden in diesem Projekt für den Verbrauch in der Schweiz folgende Werte verwendet: 600 km Schiene, 50 km LKW 28t. Aus dem transportiertem Material (130 kg pro Wärmepumpe) und Standarddistanzen ergeben sich die Tonnenkilometer.

Es wird angenommen, dass die Stoffe Stahl, Kupfer und das verbleibende R134a rezykliert werden. Die restlichen Materialien werden auf einer Reaktordeponie abgelagert (Isolation, PVC).

Während der Herstellung der Wärmepumpe entstehen Kältemittlemissionen durch Verluste von ca. 3% der Füllmenge (Frischknecht 1999), während der Verschrottung werden ca. 20% der Füllmenge emittiert (Frischknecht 1999). Daher werden 23% der Füllmenge als Emissionen in die Luft verbucht. (In (Hofstetter 1990) wurden Emissionen von 10% durch unvorsichtiges Arbeiten und 10% der noch verbleibenden 85% beim Abbau der intakten Anlage angenommen.) Die Emissionen durch Leckagen während des Betriebs der Wärmepumpe sind darin nicht berücksichtigt, sie werden später in die Bilanz der Nutzwärme aufgenommen.

Die Unsicherheit der Kältemittelfüllmenge wird anhand der genannten Bandbreiten mit einem Faktor $SD_g^2=1.7$ abgeschätzt. Die Unsicherheit zu den Materialmengen setzt sich zusammen aus der Bandbreite des Gesamtgewichts und der Unsicherheit der eingesetzten Materialien. Die Unsicherheit des Gesamtgewichts ist geringer als die Unsicherheit der im Einzelnen verwendeten Materialien, jedoch sind im ecoinvent-Datenmodell Einzelunsicherheiten für die Materialmengen einzusetzen. Eine Berücksichtigung von Nebenbedingungen (vorgegebene Gesamtsumme bei unsicheren Anteilen) ist derzeit nicht vorgesehen. Die Unsicherheiten der Materialmengen werden daher mit einer Basisunsicherheit von $SD_g^2=2$ abgeschätzt (ohne Berücksichtigung der Lebensdauer; diese wird bei der Verknüpfung mit dem Nutzwärmemodul berücksichtigt).

In Tab. 5.1 sind die Infrastrukturdaten der Wärmepumpe zusammengestellt.

Tab. 5.1 Eingabedaten des Moduls "Wärmepumpe 10 kW".

Wärmepumpe 10 kW	[Stk]	
INPUT		
Basismaterialien:		
Stahl unlegiert	75	kg
Stahl niedriglegiert	20	kg
Kupfer	22	kg
Armaflex (Rohrisolierung, Elastomere)	10	kg
PVC	1	kg
R134a	3.09	kg
Ressourcen:		
Wasser	0.7	m ³
Transporte:		
Transport Schiene	78	tkm
Transport LKW 28 t	6.5	tkm
Energieträger:		
Schmieröl	1.7	kg
Erdgas in Industrieheizung	1'400	MJ
Strom Mittelspannung - Bezug in CH	140	kWh
OUTPUT		
Abfälle:		
Kunststoff in Verbrennungsanlage	11	kg
Emissionen Luft:		
R134a	3.69	kg
Abwärme in Luft	504	MJ

Übertragung auf Luft-Wasser-Wärmepumpe

Die obige Materialbilanz bezieht sich auf eine Sole-Wasser-Wärmepumpe. Luft-Wasser-Wärmepumpen haben eine etwas höhere Füllmenge an Kältemittel und ein höheres Gesamtgewicht (Frischknecht 1999, WPZ 2003). Die Kältemittelmenge einer Luft-Wärmepumpe mit R134a liegt bei etwa 0.49 kg/kW (A2/W35) (WPZ 2003), also rund einen Faktor 1.6 höher als bei der Sole-Wasser-Wärmepumpe. Das stimmt im Verhältnis ungefähr mit Angaben in (Frischknecht 1999) überein, wo für eine 7-kW-Sole-Wasser-Wärmepumpe 2kg und für eine 7-kW-Luft-Wasser-Wärmepumpe 3 kg Kältemittel angenommen werden. Für die 7-kW-Luft-Wärmepumpe wird in (Frischknecht 1999) ein Gewicht von ca. 173 kg angenommen, was umgerechnet auf 10 kW knapp 250 kg entsprechen würde (verglichen mit 130 kg der hier bilanzierten Sole-Wasser-Wärmepumpe). Zum höheren Gesamtgewicht trägt vor allem der Verdampfer bei. Das Gewicht einer Luft-Wasser-Wärmepumpe der 10-kW-Klasse kann auch über 300 kg betragen (ELCOPLUS 2002).

Die Hauptunterschiede zwischen Heizsystemen mit Sole-Wasser- und Luft-Wasser-Wärmepumpe liegen in den Jahresarbeitszahlen und in den Aufwendungen für die Erdwärmesonde, die im Fall der Luft-Wasser-Wärmepumpe nicht vorhanden ist. Die Infrastrukturunterschiede zwischen den Wärmepumpen selbst werden hier durch eine Skalierung vereinfacht behandelt. In der ecoinvent Datenbank wird für 10-kW-Hausheizungen nur ein Infrastrukturmodul einer Sole-Wasser-Wärmepumpe bereitgestellt. Die höhere Kältemittelfüllmenge und die höhere Materialmenge der Luft-Wasser-Wärmepumpe gegenüber der Sole-Wasser-Wärmepumpe werden beim Bezug des Infrastrukturmoduls mit einem Faktor 1.6 berücksichtigt.

5.1.2 Erdwärmesonde

In eine Bohrung im Erdreich von bis zu 150 m und einem Durchmesser von ca. 12 cm werden zwei U-Rohre aus Polyethylen eingebracht. Bis zu einer Tiefe von 75 m wird ein Rohr mit einem Durchmesser von 25 mm

(0.172 kg/m) eingebracht, für tiefere Sonden wird ein Rohr mit einem Durchmesser von 32 mm (0.273 kg/m) verwendet (HAKA 1993). Für eine Endlänge der Sonde von 150 m werden in etwa 30 % der Fälle zwei Sonden à 75 m installiert, zu 70 % eine Sonde à 150 m (Schlander 1993). Die Erdwärmesonden werden mit einer Bentonit-Zement-Suspension hinterfüllt, um einen satten Kontakt zwischen Erdwärmesonde und Erdreich zu gewährleisten und so den Wärmeübergang zu erhöhen. Die wärmetransportierende Sole (Wasser mit 25-35 % Frostschutzmittel) im Wärmequellenkreislauf nimmt die Wärme auf und führt sie zur Wärmepumpe.

Materialeinsatz und Bauaufwand

Beim Stahl wird aufgrund der Lebensdauer und der Anzahl Einsätze der Verschleiss von Bohrgestüt, -gestänge, -köpfen und provisorischem Verrohrungsgestänge verrechnet. Es handelt sich dabei meist um unlegierten Baustahl 52/2 (DIN 17100).

Die Berechnung des Soleinhalts und der damit verbundenen Menge Ethylenglykol basiert auf der prozentualen Gewichtung der installierten Sondengrößen von 25 mm (Wandstärke 2.3 mm) resp. 32 mm (Wandstärke 3 mm) Sondendurchmesser. Zu 30 % werden Sonden mit 25 mm Durchmesser (Soleinhalt: 3.27 dl/m Rohr) eingesetzt, zu 70 % solche mit 32 mm Durchmesser (Soleinhalt: 5.31 dl/m Rohr). Mit dieser Gewichtung ergibt sich ein Sondeninhalt von 300 Liter. Ein Frostschutzmittelanteil von 30 % entspricht somit 90 l (102 kg) Ethylenglykol pro Sonde. Die Dichte von Ethylenglykol beträgt 1.14 kg/dm³. Der Wasseranteil der Sole beträgt 210 kg.

Für die Sondenrohre PE (MD) wird als Näherung in ecoinvent das Modul "Polyethylen-Granulat, LDPE, ab Werk" benutzt. Bei zwei U-Rohren (Doppel-U-Rohr) liegen im Querschnitt der Bohrung vier Rohre, also bei 150 m Sondenlänge insgesamt 600 m Polyethylen-Rohr. Nimmt man inklusive Verluste einen Materialbedarf von rund 0.3 kg/m an, so ergibt sich für die Sonde eine Polyethylenmenge von ca. 180 kg.

Beim Bentonit handelt es sich um einen Kalziumbentonit, welcher in Süddeutschland abgebaut wird. Bentonit wird einerseits dem Spülwasser (im Mittel 10 m³) während dem Bohrprozess beigemischt, andererseits wird damit auch die Sonde hinterfüllt. Die Bentonitspülung verhindert das Zusammenstürzen der Bohrwand und gibt dem Bohrklein einen besseren Auftrieb. Für den Bohrprozess werden 250 kg Bentonit pro Sonde benötigt, für die Hinterfüllung 80 kg. Der Grossteil des Bentonits wird rezykliert, so dass für die Sonde bei einem Einsatz von 330 kg nur ca. 8 kg Bentonit verbraucht werden (Frischknecht 1999). Das rezyklierte Material wird hier nicht weiter verfolgt.

Das für den Bohrprozess verwendete Bohrgestüt wird als ganzes auf einem Unimog 1300 transportiert und an der Bohrstelle mit dem Lastwagen positioniert. Der hydraulische Antrieb des Bohrgestänges erfolgt über den Motor der Unimogs. Ebenso wird die Pumpe, die während dem Bohrprozess zum Spülen dient und mit der auch die Bentonit-Zement-Suspension hinuntergepumpt wird, durch den Lastwagenmotor angetrieben. Angaben zum Dieserverbrauch einer Sondenbohrung stammen von der Firma Grundag. Danach beläuft sich der Dieserverbrauch bei Spülbohrungen auf 2.5 Liter pro Sondenmeter, bei Hammerbohrungen auf 3.5 Liter (40 % der Sonden werden mit Spülbohrungen verlegt, 60 % mit Hammerbohrungen) (Rohner 1996). Im Durchschnitt werden somit bei der Bohrung ca. $2.5 \cdot 0.4 + 3.5 \cdot 0.6 = 3.1$ Liter Diesel pro Meter verbraucht.

Dies ergibt einen mittleren Dieserverbrauch von ca. 465 l (17'700 MJ) für eine 150m-Sonde. In ecoinvent wird das Modul "Diesel in Baumaschine" (in MJ) bilanziert. In diesem Modul sind die Emissionen während des Bauprozesses miteinbezogen.

Während des Baus der Sondenanlage werden drei Lastwagen eingesetzt. Diese transportieren die Bohrgeräte und Halbprodukte vom Standort der Bohrfirma zum Bohrort. Im Durchschnitt legen die Lastwagen folgende Distanzen während dem Bau einer Sondenanlage zurück (Rohner 1993):

1. Lastwagen (8.5 t Gesamtgewicht): 80 km
Modul: Transport LKW 16 t
durchschnittliche Zuladung: 3.4 t

2. Lastwagen (11 t Gesamtgewicht): 100 km
 Modul: Transport LKW 16 t
 durchschnittliche Zuladung: 3.4 t
3. Lastwagen (3.5 t Gesamtgewicht): 160 km
 Modul: Transport Lieferwagen < 3.5 t
 durchschnittliche Zuladung 0.63 t

Aus der durchschnittlichen Zuladung in Tonnen und der zurückgelegten Distanz lassen sich die tkm (Tonnen*Kilometer) errechnen.

Da der Kalziumbentonit in Süddeutschland abgebaut wird, muss der Transport dieses Materials separat berücksichtigt werden. Als mittlere Transportdistanz werden 300 km angenommen. Der Transport erfolgt mit Lastwagen bis zu 16 t (Rasch 1993).

Als Abfall fallen während des Bohrprozesses (Spülung) ca. 1 m³ Gesteinsmaterial und Bentonitsuspension an. Die durchschnittliche Dichte dieses Materials beträgt 2500 kg/m³. Es wird auf einer Inertstoffdeponie abgelagert. Nach Ende des Betriebes wird die Erdwärmesonde im Boden belassen. Die Wasser-Ethylenglykalmischung aus dem Wärmequellenkreislauf wird nach Rückgabe an den Lieferanten speziell behandelt, dies wird durch das Modul "Behandlung, Wärmeträgerflüssigkeit, 40% C3H8O2, in Abwasserreinigung, Gr.Kl. 2" berücksichtigt.

In Tab. 5.2 sind die Eingabedaten für den Bau der Erdsonde zusammengestellt.

Tab. 5.2 Eingabedaten des Moduls "Erdwärmesonde 150 m".

Erdwärmesonde 150 m		[Stk]
INPUT		
Basismaterialien:		
Stahl unlegiert	33	kg
Polyethylen (LD) ¹⁾	180	kg
Bentonit	8	kg
Zement	33	kg
Ethylenglykol	102	kg
Ressourcen:		
Wasser	10.2	m ³
Allg. Dienstleistung/Energie:		
Diesel in Baumaschine	5'900	MJ
Transporte:		
Transport Lieferwagen < 3.5 t	100	tkm
Transport LKW 16 t	712	tkm
OUTPUT		
Abfälle:		
Abfälle in Inertstoffdeponie	2'500	kg
Behandlung, Wärmeträgerflüssigkeit, 40% C3H8O2, in Abwasserreinigung, Gr.Kl. 2 ²⁾	0.3	m ³

¹⁾ eigentlich PE (MD)

5.1.3 Wärmeverteilsystem

Als Wärmeverteilsystem (WVS) wird eine Fussbodenheizung (Niedertemperatur) mit 40 °C Vorlauf-temperatur und 30-35 °C Rücklauf-temperatur angenommen. Die Energiebezugsfläche misst 165 m², die zu beheizende Nettogeschossfläche 150 m².

Materialeinsatz und Bauaufwand

Von den 150 m² Nettogeschossfläche sind 75 m² von unten beheizt, 75 m² sind von unten nicht beheizt (Kellergeschoss). Die Isolation besteht aus 2 cm Polystyrol (Toschi 1993). Die Dichte von Polystyrol beträgt 22 kg/m³ (Recknagel et al. 1988/89). Als Fussbodenheizung wird ein System mit Kunststoffrohren und Aluminiumwärmeleitlamellen zur besseren Wärmeübertragung gewählt. Bei diesem System werden die Heizrohre (VPE-Rohr, Durchmesser 20 mm, Wandstärke 2 mm) auf die Isolation verlegt. Die Rohrabstände betragen 30 cm. Die verlegten Rohre und Wärmeleitlamellen werden mit einem Bauplastik (PE (LD) 0.2 mm) abgedeckt, bevor der Zementstrich mit einer Dicke von 8 cm (6 cm über dem Rohr) aufgetragen wird. Der Zementstrich besteht aus etwa 300 kg Zement, 1550 kg Sand und 150 kg Wasser pro m³ Frischmörtel (2000 kg/m³) (Toschi 1993). Für ecoinvent wird lediglich der Unterschied zum Aufbau eines gewöhnlichen Bodens (Dicke 6 cm) aufgeführt.

Auf den Einbau eines Pufferspeichers wird bei Einfamilienhäusern, meist aus Kostengründen, verzichtet. In diesem Fall ist es jedoch sehr wichtig, dass die drei Kreisläufe mit Hilfe der Drosselorgane so aufeinander abgestimmt werden, dass eine optimale Wärmeübertragung jederzeit möglich ist (Keel 1993).

Aus transportiertem Material (5900 kg pro Wärmeverteilsystem) und Standardabständen ergeben sich folgende Transportleistungen: 160 tkm Schiene, 128 tkm LKW 28 t.

Beim Abbruch des Wärmeverteilnetzes wird davon ausgegangen, dass ein grosser Teil der Materialien auf einer Inertstoffdeponie abgelagert wird. Es wird angenommen, dass Kunststoff in einer Verbrennungsanlage verbrannt wird.

Die Daten der Infrastruktur für die Wärmeverteilung sind in Tab. 5.3 zusammengestellt.

Tab. 5.3 Eingabedaten des Moduls "Wärmeverteilung, Fussbodenheizung, 150 m²".

Wärmeverteilung, Fussbodenheizung, 150 m ²	[Stk]	
INPUT		
Basismaterialien:		
Aluminium, Produktionsmix, ab Werk	126	kg
Polystyrol schlagfest	66	kg
Polyethylen (LD)	101	kg
Zement	900	kg
Sand für Bau	4'650	kg
Ressourcen:		
Wasser	0.45	m ³
Transporte:		
Transport Schiene	160	tkm
Transport LKW 28 t	128	tkm
OUTPUT		
Abfälle:		
Abfall in Inertstoffdeponie	5'730	kg
Kunststoff in Verbrennungsanlage	167	kg

5.2 Lebensdauern

Zur Verknüpfung der Infrastrukturmodule mit den Nutzwärmemodulen wird eine Abschätzung der Lebensdauern benötigt.

5.2.1 Lebensdauer der Wärmepumpe

Eine aktuelle amerikanische Studie zur Lebensdauer von Wärmepumpen kommt zu folgenden Ergebnissen (Lovvorn, 2001a; Lovvorn, 2001b):

- Der Median der Lebensdauer („Median service life“) liegt bei ungefähr 20 Jahren. Dies stimmt mit den Ergebnissen einer älteren Studie aus dem Jahr 1984 überein (Lovvorn 2001a).
- Mehr als die Hälfte der Wärmepumpen war zum Zeitpunkt der Auswechslung noch funktionsfähig.

Der Austausch der WP erfolgte laut der genannten Studie nicht nur deshalb, weil die alte WP defekt war, sondern auch aus vorsorglichen Gründen wegen Alterung und auf Empfehlung von Anbietern. Für die Umlegung der Aufwendungen zur Herstellung auf ein MJ erzeugter Wärme kommt es auf die reale Nutzungsdauer an. Es spielt im Prinzip keine Rolle, aus welchen Gründen das Gerät ausser Betrieb genommen und durch ein neues ersetzt wird. Allerdings beeinflusst der Unterschied zwischen „technisch möglicher Lebensdauer“ und „realer Betriebsdauer“ die Übertragbarkeit der Lebensdauerergebnisse auf andere Länder. Bei gleicher Technologie kann die reale Lebensdauer aufgrund unterschiedlicher Gewohnheiten je nach Land oder Kulturkreis variieren.

Für die Wärmepumpen wird hier gemäss den genannten Studien (Lovvorn, 2001a; Lovvorn, 2001b) eine Lebensdauer von 20 Jahren angenommen. Dies stimmt auch mit anderen Quellen überein (Hess 1993).

Unsicherheit: Als Bereich für die Lebensdauer wird 16 bis mehr als 20 Jahre angegeben (Lovvorn 2001b). Die Bereichsangabe beruht auf einer älteren Studie, neuere Werte sind nicht angegeben. In Anlehnung daran wird hier ein Unsicherheitsfaktor von 1.5 für die Lebensdauer der Wärmepumpe abgeschätzt.

5.2.2 Lebensdauer der Erdwärmesonde

Für die Lebensdauer der Erdwärmesonde schwanken die Angaben zwischen 30 Jahren (Rohner 1993) und 100 Jahren (für Sonden aus Polyethylen PE 100, (Luder 2003)).

In Anlehnung an diese Spanne wird hier eine Lebensdauer von 50 Jahren mit einer Unsicherheit von $SD_g^2=2$ angenommen.

5.2.3 Lebensdauer des Wärmeverteilsystems

Für die übrigen Komponenten werden die gleichen Annahmen wie für die Wärmepumpe gemacht, d.h. die Lebensdauer wird mit 20 Jahren angenommen.

5.3 Betrieb

5.3.1 Gemessene Jahresarbeitszahlen

Für Wärmepumpenanlagen in der Schweiz liegt eine umfangreiche Feldanalyse vor (Erb et al. 2000). Demnach ergaben Hochrechnungen aus Messungen im Schweizer Durchschnitt eine Jahresarbeitszahl (JAZ 2) von 3.2 für 1998 erstellte Anlagen. 1994/1995 lag die Jahresarbeitszahl im Schweizer Durchschnitt erst bei 2.6 (Erb&Hubacher 2001a). Bei Messungen über mehrere Jahre konnte keine signifikante Verschlechterung der Jahresarbeitszahl mit zunehmendem Alter der Wärmepumpe festgestellt werden. Es

kann also von einer zeitlich konstant bleibenden Jahresarbeitszahl für eine Anlage ausgegangen werden (Erb et al. 2000).

Die Differenz zwischen Schweizer JAZ laut (Erb et al. 2000) und COP-Messresultaten des WPZ liegt bei unter 10% (Erb et al. 2000).

Die meisten Luft-Wasser-Anlagen in der Schweiz laufen monovalent, d.h. die Wärmepumpe liefert auch bei niedrigen Aussentemperaturen genügend Wärme, eine Zusatzheizung ist nicht erforderlich (Erb et al. 2000).

Tab. 5.4 Durchschnittliche Jahresarbeitszahlen (JAZ 2 bzw. SPF2) von Wärmepumpen in der Schweiz in Abhängigkeit vom Baujahr, nach (Erb et al. 2000).

JAZ 2	1994/ 1995	1998	Diese Studie
L/W (Luft-Wasser)	2.4	2.8	2.8
S/W (Sole-Wasser)	2.9	3.9	3.9
L/W und S/W gewichtet nach Verkaufszahlen	2.6	3.2	

Die Hälfte der untersuchten Anlagen in (Erb et al. 2000) wird zumindest teilweise auch für die Erwärmung von Brauchwarmwasser eingesetzt.

Bei der Umrüstung der Heizungsanlagen in älteren Gebäuden sind spezielle Bedingungen zu beachten. Normalerweise sind hierbei höhere Temperaturen für die Wärmeverteilung im Haus notwendig als bei neuen Gebäuden. Zu diesem Zweck wurden in der Schweiz spezielle Retrofit-Wärmepumpen entwickelt, die ab 2003 auf den Markt kommen sollen (Zogg 2002b). Die Jahresarbeitszahlen von Retrofit-Anlagen (Luft-Wasser) für Schweizer Bedingungen werden auf 2.5 bis 2.7 geschätzt (Zogg 2002b).

Neue geothermale Wärmepumpen in Europa erreichen eine JAZ von 4 oder höher (Halozan 2002). Neben verbesserten Komponenten tragen auch die durch bessere Wärmedämmung der Gebäude möglichen niedrigen Verteil-Temperaturen von unter 35°C zur Verbesserung der Jahresarbeitszahlen bei (Halozan 2002).

Während die durchschnittliche Jahresarbeitszahl in der Untersuchung von (Erb&Hubacher 2001a) bis 1998 noch einen ansteigenden Trend aufweist, sind laut Messungen des Wärmepumpentestzentrums Winterthur-Tölz die COP-Werte bei Neuanlagen nur bis 1995 kontinuierlich gestiegen, danach hingegen mehr oder weniger konstant geblieben (Roth 2001). Dies spricht ebenfalls dafür, dass eine Kombination aus Wärmepumpen- und Gebäudetechnologie wesentlich für eine gute JAZ ist (vgl. die Argumentation in (Halozan 2002)).

Zur Abschätzung der JAZ ist der COP-Wert bei B0/W35 als grobe Näherung geeignet; er spiegelt durchschnittliche Betriebsbedingungen wider. Die bis zum 22. Januar 1996 geprüften Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Leistungen zwischen 9 und 11 kW bei B0/W35 hatten bei diesem Temperaturniveau COP-Werte zwischen 3.47 und 4.84, gemittelt 3.83 (WPZ 1996). Die Hersteller von Sole-Wasser-Wärmepumpen gaben im Jahr 1996 als Jahresarbeitszahl 3-3.5 an (Multi-Energie 1996), (Grünenwald 1996), die zuständigen Ämter in Zürich und Solothurn 3.2-3.5 für Neuanlagen, für Sanierungen wurde 3 angegeben (Energiefachstelle Solothurn 1996), (BfK 1996). Messungen an bestehenden Anlagen ergaben Arbeitszahlen von 2.2 bis 3.9 (Mittelwert 2.6) (Hubacher 1996). In der vorigen Version dieser Studie wurde mit einer Jahresarbeitszahl von 3.5 gerechnet (nur Sole-Wasser-WP mit Erdwärmesonde).

In dieser Studie werden die in Tab. 5.4 aufgeführten Jahresarbeitszahlen für 1998 verwendet.

Unsicherheit: Bei einem Vergleich zwischen erstem und zweiten Betriebsjahr wurde festgestellt, dass die Abweichungen der JAZ für mehr als 80% der Anlagen weniger als 4% betragen (Erb et al. 2000), die

Abweichung nach fünf Jahren ist ebenfalls gering. COP-Werte für Sole-Wasserpumpen im Betrieb B0/W35 liegen zwischen 3.7 und 5.0 (WPZ 2003), für Luft-Wärmepumpen bei A2/W35 zwischen 2.7 und 3.9. Daraus wird eine Unsicherheit von $SD_g^2=1.2$ für den COP-Wert grob abgeschätzt und auf die Jahresarbeitszahl einer zufällig herausgegriffenen Wärmepumpe übertragen.

5.3.2 Kältemittlemissionen

Durch den Leckageverlust entstehen Kältemittlemissionen in die Luft, andererseits muss die verlorene Kältemittelmenge nachgefüllt werden.

Laut der Aufstellung in (Frischknecht 1999, Anhang Tab. 6.1) geben vier von fünf Quellen Kältemittelverluste von 5% bis 8% der Füllmenge pro Jahr an, eine Quelle gibt 1-4% an.

Hier werden Verluste von 6% pro Jahr angenommen mit einer geschätzten Unsicherheit SD_g^2 von 1.7 aufgrund der genannten Bandbreite der Angaben. Bei einer Betriebsstundenzahl von 2000 h/a produziert die 10kW-Wärmepumpe 72'000 MJ/a Wärme. Bei einer Füllmenge von 3 kg für die Sole-Wasser-Wärmepumpe entstehen so während des Betriebs Kältemittlemissionen von ca. 2.5E-6 kg/MJ. Über die Lebensdauer der Wärmepumpe von 20 Jahren summieren sich die Verluste auf ca. 3.6 kg, d.h. es geht demnach im Durchschnitt mehr als die Füllmenge während der Betriebszeit verloren.

5.3.3 Nutzwärme

Bei einer Heizleistung von 10 kW und 2000 h/a Betrieb erzeugt die Wärmepumpe ca. 1.44E6 MJ Wärme in der Lebensdauer von 20 Jahren. Der Kehrwert gibt die Anzahl Wärmepumpen an, die pro MJ Nutzwärme gebraucht werden. Für die Erdwärmesonde wird eine Lebensdauer von 50 Jahren angenommen, also ist der entsprechende Infrastrukturbezug um einen Faktor 2.5 kleiner.

Der Kehrwert der Jahresarbeitszahl gibt die benötigte Elektrizitätsmenge in MJ pro MJ Wärme ab Wärmepumpe an (zur Umrechnung auf kWh ist noch durch den Faktor 3.6 zu dividieren). Die restliche Wärme wird im Fall der Sole-Wasser-Wärmepumpe dem Boden entzogen und als "Geothermische Energie" bilanziert. Die erzeugte Nutzwärme wird als "Abwärme in Luft" freigesetzt.

Mit den Verknüpfungsfaktoren für die Infrastrukturmodule und den beim Betrieb freigesetzten Kältemittlemissionen geben sich für den Prozessschritt "Nutzwärme, Erdwärmesonde, ab Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW" („heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW“) die in Tab. 5.5 gezeigten Bezüge (ohne Wärmeverteilung).

Tab. 5.5 Verknüpfungen des Moduls "Nutzwärme, Erdwärmesonde, ab Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW" (ohne Wärmeverteilung im Haus).

Nutzwärme, Erdwärmesonde, ab Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW		[MJ]
INPUT		
Infrastruktur:		
Infra Erdwärmesonde 150 m	2.78E-7	Stk
Infra Wärmepumpe 10 kW	6.94E-7	Stk
Basismaterialien:		
R134a	2.50E-6	kg
Energieträger:		
Strom Niederspannung - Bezug in CH	0.0712	kWh
Ressourcen:		
Geothermische Energie	0.744	MJ
OUTPUT		
Emissionen Luft:		
Abwärme in Luft	1	MJ
R134a	2.50E-6	kg

Für die Verluste bei der Wärmeverteilung wird in einer neuen Quelle 6% angenommen (Jakob et al. 2002). Ältere Quellen geben 2 bis 3 % (Jung 1987) oder rund 5% für Niedertemperaturheizungen (Maier 1986) an. Hier werden 5% Verluste angenommen mit einem Unsicherheitsfaktor von 2. Bei einem Bezug von 1.05 MJ Nutzwärme ab Wärmepumpe pro MJ Nutzwärme im Raum führt dies lediglich zu einer Unsicherheit von ca. $SD_g^2=1.05$. Der Elektrizitätsverbrauch für die Umwälzpumpe des Wärmeverteilsystems wird gegenüber dem bereits berücksichtigten Elektrizitätsverbrauch der Wärmepumpe vernachlässigt.

Die Verluste werden zusammen mit der Infrastruktur für die Wärmeverteilung im Modul "Nutzwärme, Erdwärmesonde, Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW, ab Raumheizung" berücksichtigt.

Tab. 5.6 Eingabedaten für Nutzwärme nach Wärmeverteilung

Nutzwärme, Erdwärmesonde, Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW, ab Raumheizung		[MJ]
INPUT		
Infrastruktur:		
Wärmeverteilung, Fussbodenheizung, 150 m ²	7.29E-7	Stk
Wärme:		
Nutzwärme, Erdwärmesonde, ab Sole-Wasser-Wärmepumpe 10kW	1.05	MJ

Für die Luft-Wasser-Wärmepumpe erfolgt die Berechnung analog mit entsprechend höherem Infrastrukturfaktor für die Wärmepumpe und entsprechender Jahresarbeitszahl. Die aus der Umgebungsluft entnommene Wärme wird anschliessend wieder in die Umgebungsluft abgegeben und taucht daher bei der Luft-Wasser-Wärmepumpe nicht in der Bilanz auf.

Für den Betrieb der Wärmepumpe werden zwei Standorte betrachtet: Schweiz und Europa. Es wird angenommen, dass die Schweiz klimatisch und geologisch einen mittleren Standort in Europa repräsentiert. Die Jahresarbeitszahlen aus den schweizerischen Messungen werden daher auch für die europäischen Datensätze angenommen. Für den Standort Schweiz wird der schweizerische Stromversorgungsmix eingesetzt, für den Standort Europa der UCTE-Stromversorgungsmix. Ansonsten sind die angenommenen Parameter gleichnamiger Datensätze für beide Standorte gleich.

5.4 Eingabedaten Wärmepumpen

In folgenden Tabellen sind die Eingabedaten für die Datenbank zusammengestellt.

Tab. 5.7 Eingabedaten der Sachbilanz zur Infrastruktur der Wärmepumpe, der Erdwärmesonde und der Wärmeverteilung.

	Name	Location InfrastructureProcess	Unit	borehole heat exchanger 150 m	heat pump, brine-water, 10kW	heat distribution, hydronic radiant floor heating, 150m2	Uncertainty Type	StandardDeviation95%	GeneralComment
				CH 1 unit	CH 1 unit	CH 1 unit			
resource, in water technosphere	Water, unspecified natural origin	-	m3	1.02E+1	7.08E-1	4.50E-1	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	electricity, medium voltage, at grid	CH	kWh	0	1.40E+2	0	1	1.55	basic uncertainty:1.05;(3,3,3,3,4,3);
	aluminium, production mix, at plant	RER	kg	0	0	1.26E+2	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	bentonite, at processing	DE	kg	8.00E+0	0	0	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	tube insulation, elastomere, at plant	DE	kg	0	1.00E+1	0	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	refrigerant R134a, at plant	RER	kg	0	3.09E+0	0	1	1.70	estimated from range of values
	copper, at regional storage	RER	kg	0	2.20E+1	0	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	polyethylene, LDPE, granulate, at plant	RER	kg	1.80E+2	0	1.01E+2	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	polystyrene, high impact, HIPS, at plant	RER	kg	0	0	6.60E+1	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	ethylene glycol, at plant	RER	kg	1.02E+2	0	0	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	polyvinylchloride, bulk polymerised, at plant	RER	kg	0	1.00E+0	0	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	sand, at mine	CH	kg	0	0	4.65E+3	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	steel, low-alloyed, at plant	RER	kg	0	2.00E+1	0	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	reinforcing steel, at plant	RER	kg	3.30E+1	7.50E+1	0	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	cement, unspecified, at plant	CH	kg	3.30E+1	0	9.00E+2	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	transport, van <3.5t	CH	tkm	1.00E+2	0	0	1	2.49	uncertainty of transport distance and amount of material
	transport, lorry 16t	CH	tkm	7.12E+2	0	0	1	2.49	uncertainty of transport distance and amount of material
	transport, lorry 28t	CH	tkm	0	6.50E+0	1.28E+2	1	2.49	uncertainty of transport distance and amount of material
	transport, freight, rail	RER	tkm	0	7.80E+1	1.60E+2	1	2.49	uncertainty of transport distance and amount of material
	diesel, burned in building machine	GLO	MJ	1.77E+4	0	0	1	1.55	basic uncertainty:1.05;(3,3,3,3,4,3);
	lubricating oil, at plant	RER	kg	0	1.70E+0	0	1	1.55	basic uncertainty:1.05;(3,3,3,3,4,3);
	natural gas, burned in industrial furnace >100KW	RER	MJ	0	1.40E+3	0	1	1.55	basic uncertainty:1.05;(3,3,3,3,4,3);
	disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill	CH	kg	2.50E+3	0	5.73E+3	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration	CH	kg	0	1.10E+1	1.67E+2	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);	
treatment, heat carrier liquid, 40% C3H8O2, to wastewater treatment, class 2	CH	m3	3.00E-1	0	0	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);	
emission air, high population density	Heat, waste	-	MJ	0	5.04E+2	0	1	2.06	basic uncertainty:2;(4,na,3,1,1,na);
	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	-	kg	0	6.90E-1	0	1	1.60	estimate based on literature values
reference products	borehole heat exchanger 150 m	CH	unit	1.00E+0	0	0			
	heat pump, brine-water, 10kW	CH	unit	0	1.00E+0	0			
	heat distribution, hydronic radiant floor heating, 150m2	CH	unit	0	0	1.00E+0			

Tab. 5.8 Eingabedaten der Sachbilanz zur Wärme von Wärmepumpen in der Schweiz.

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	heat, at air-water heat pump 10kW	heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator	heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator	UncertaintyType	StandardDeviations%	GeneralComment
					CH 0 MJ	CH 0 MJ	CH 0 MJ	CH 0 MJ			
technosphere	electricity, low voltage, production UCTE, at grid	UCTE	0	kWh					1	1.2	Seasonal Performance Factor measured in Switzerland 1998; uncertainty from range of Coefficient of Performance.
	electricity, low voltage, at grid	CH	0	kWh	7.12E-2	9.92E-2			1	1.2	Seasonal Performance Factor measured in Switzerland 1998; uncertainty from range of Coefficient of Performance.
	refrigerant R134a, at plant	RER	0	kg	2.50E-6	4.00E-6			1	1.7	uncertainty estimated from range of values in literature
	borehole heat exchanger 150 m	CH	1	unit	2.78E-7	0			1	2	uncertainty of life time
	heat pump, brine-water, 10kW	CH	1	unit	6.94E-7	1.11E-6			1	1.5	uncertainty of life time
emission air, high population density	heat distribution, hydronic radiant floor heating, 150m2	CH	1	unit			7.29E-7	7.29E-7	1	1.5	uncertainty of life time
	Heat, waste	-	-	MJ	1.00E+0	3.57E-1			1	1	
resource	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	-	-	kg	2.50E-6	4.00E-6			1	1.7	estimated from range of values in literature
	Energy, geothermal	-	-	MJ	7.44E-1				1	1.1	Seasonal Performance Factor measured in Switzerland 1998; uncertainty from range of Coefficient of Performance.
reference products	heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	RER	0	MJ					1	1.05	uncertainty estimated from range of values in literature
	heat, at air-water heat pump 10kW	RER	0	MJ					1	1.05	uncertainty estimated from range of values in literature
	heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	CH	0	MJ			1.05		1	1.05	uncertainty estimated from range of values in literature
	heat, at air-water heat pump 10kW	CH	0	MJ				1.05	1	1.05	uncertainty estimated from range of values in literature
	heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	RER	0	MJ							
	heat, at air-water heat pump 10kW	RER	0	MJ							
	heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator	RER	0	MJ							
	heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator	RER	0	MJ							
	heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	CH	0	MJ	1						
	heat, at air-water heat pump 10kW	CH	0	MJ		1					
heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator	CH	0	MJ			1					
heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator	CH	0	MJ				1				

Tab. 5.9 Eingabedaten der Sachbilanz zur Wärme von Wärmepumpen in Europa.

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	heat, at air-water heat pump 10kW	heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator	heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator	UncertaintyType	StandardDeviation5%	GeneralComment
					RER	RER	RER	RER			
	Location InfrastructureProcess Unit				MJ	MJ	MJ	MJ			
technosphere	electricity, low voltage, production UCTE, at grid	UCTE	0	kWh	7.12E-2	9.92E-2			1	1.2	Seasonal Performance Factor measured in Switzerland 1998; uncertainty from range of Coefficient of Performance.
	electricity, low voltage, at grid	CH	0	kWh					1	1.2	Seasonal Performance Factor measured in Switzerland 1998; uncertainty from range of Coefficient of Performance.
	refrigerant R134a, at plant	RER	0	kg	2.50E-6	4.00E-6			1	1.7	uncertainty estimated from range of values in literature
	borehole heat exchanger 150 m heat pump, brine-water, 10kW	CH	1	unit	2.78E-7	0			1	2	uncertainty of life time
emission air, high population density	heat distribution, hydronic radiant floor heating, 150m2	CH	1	unit	6.94E-7	1.11E-6			1	1.5	uncertainty of life time
	Heat, waste	-	-	MJ	1.00E+0	3.57E-1			1	1	0
resource	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	-	-	kg	2.50E-6	4.00E-6			1	1.7	estimated from range of values in literature
	Energy, geothermal	-	-	MJ	7.44E-1				1	1.1	Seasonal Performance Factor measured in Switzerland 1998; uncertainty from range of Coefficient of Performance.
reference products	heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	RER	0	MJ			1.05		1	1.05	uncertainty estimated from range of values in literature
	heat, at air-water heat pump 10kW	RER	0	MJ				1.05	1	1.05	uncertainty estimated from range of values in literature
	heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	CH	0	MJ					1	1.05	uncertainty estimated from range of values in literature
	heat, at air-water heat pump 10kW	CH	0	MJ					1	1.05	uncertainty estimated from range of values in literature
reference products	heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	RER	0	MJ	1						
	heat, at air-water heat pump 10kW	RER	0	MJ		1					
	heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator	RER	0	MJ			1				
	heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator	RER	0	MJ				1			
	heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10kW	CH	0	MJ							
	heat, at air-water heat pump 10kW	CH	0	MJ							
	heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator	CH	0	MJ							
	heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator	CH	0	MJ							

5.5 Kältemittel R134a

Hier wird die Herstellung des chlorfreien Kältemittels R134a bilanziert. R134a ist die technische Bezeichnung für 1,1,1,2-Tetrafluorethan (CH_2FCF_3). R134a wird auch als HFC-134a bezeichnet.

Zur kommerziellen Herstellung von R134a gibt es mehrere Verfahren. Gebräuchlich sind die Hydrofluorierung von Trichlorethylen oder die Hydrofluorierung von Tetrachlorethylen (=Perchlorethylen). Daneben kommt auch die Isomerisation/Hydrofluorierung von 1,1,2-Trichlor-1,2,2-Trifluorethan in Frage. Die hier verwendete Sachbilanz für die Herstellung von R134a folgt den Angaben in (Frisknecht 1999). Es wird angenommen, dass die bilanzierte Menge R134a zu 50% aus Trichlorethylen und zu 50% aus Tetrachlorethylen hergestellt wird (Frisknecht 1999). Die Vorprodukte Trichlorethylen und Tetrachlorethylen sowie die übrigen eingesetzten Chemikalien werden im Chemikalienteil von ecoinvent (Althaus et al. 2004) bilanziert.

Für die Herstellung von 1 kg R134a über den Trichlorethylen-Weg werden 1.36 kg Trichlorethylen, 0.83 kg Fluorwasserstoff (Flusssäure), 38 MJ thermische Energie und 1.5 kWh Elektrizität benötigt (Frisknecht 1999). Für die Herstellung von 1 kg R134a über den Tetrachlorethylen-Weg kommen 1.8 kg Tetrachlorethylen, 0.86 kg Fluorwasserstoff, 0.77 kg Chlor, 0.041 kg Wasserstoff, 3.8 MJ Dampf, 5.3 MJ Erdgas und 0.53 kWh Elektrizität zum Einsatz (Frisknecht 1999). Bei beiden Herstellungswegen entstehen auch 1.07 bzw. 2.2 kg Chlorwasserstoff (Salzsäure). Die Salzsäure wird hier als Nebenprodukt behandelt und gegenüber der Gesamtproduktion von Salzsäure vernachlässigt. Die Salzsäure geht daher nicht in die Bilanz ein.

Bei der Herstellung entstehen als Zwischenprodukte beim Trichlorethylen-Weg HCFC-124 und beim Tetrachlorethylen-Weg CFC-113. Diese chlorhaltigen Kohlewasserstoffe haben neben einer klimarelevanten auch eine Ozonschicht-abbauende Wirkung. Die Emissionen während des Herstellungsprozesses wurden mit 0.02 kg HCFC-124 pro kg R134a beim Trichlorethylen-Weg und 0.02 kg CFC-113 pro kg R134a beim Tetrachlorethylen-Weg abgeschätzt (Frischknecht 1999). Des Weiteren werden Verluste von ca. 1.9 Gew.-% R134a angenommen.

Unter der Annahme, dass der Trichlorethylen-Weg und der Tetrachlorethylen-Weg je zur Hälfte zur R134a-Produktion beitragen und dass Chlor und Fluorssäure ca. 500 km per LKW zu transportieren sind (Frischknecht 1999), ergeben sich die in Tab. 5.10 gezeigten Eingabedaten.

Tab. 5.10 Eingabedaten der Sachbilanz zur Herstellung des Kältemittels R134a.

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	refrigerant R134a, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment
technosphere	trichlorethylene, at plant	WEU	0	kg	6.80E-1	1	1.1	basic uncertainty:1.1;(1,1,1,1,1,1);
	tetrachloroethylene, at plant	WEU	0	kg	9.00E-1	1	1.1	basic uncertainty:1.1;(1,1,1,1,1,1);
	hydrogen fluoride, at plant	GLO	0	kg	8.45E-1	1	1.1	basic uncertainty:1.1;(1,1,1,1,1,1);
	chlorine, liquid, production mix, at plant	RER	0	kg	3.85E-1	1	1.1	basic uncertainty:1.1;(1,1,1,1,1,1);
	hydrogen, liquid, at plant	RER	0	kg	2.00E-2	1	1.1	basic uncertainty:1.1;(1,1,1,1,1,1);
	natural gas, burned in industrial furnace >100kW	RER	0	MJ	2.40E+1	1	1.22	basic uncertainty:1.05;(1,3,1,3,1,5);
	electricity, medium voltage, production UCTE, at grid	UCTE	0	kWh	1.03E+0	1	1.22	basic uncertainty:1.05;(1,3,1,3,1,5);
	transport, lorry 32t	RER	0	tkm	6.20E-1	1	1.7	basic uncertainty of transport
emission air, unspecified	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	-	-	kg	1.90E-2	1	2	basic uncertainty
	Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	-	-	kg	1.00E-2	1	2	basic uncertainty
	Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetra-fluoro-, HCFC-124	-	-	kg	1.00E-2	1	2	basic uncertainty
reference products	refrigerant R134a, at plant	RER	0	kg	1.00E+0			

6 Kritik, verbesserungswürdige Punkte

Die Daten wurden meist in Gesprächen mit Fachleuten aus den Gebieten Erdwärmesonden, Wärmepumpen oder Wärmeverteilsysteme ermittelt. Dabei handelt es sich oft um grobe Abschätzungen. Weiterführende Auskünfte wurden bei einzelnen Firmen direkt eingeholt, wobei meist mündliche Auskünfte oder Abschätzungen weiterverwendet wurden.

Als zugrunde liegende Einheit wurde ein fiktives Einfamilienhaus im Schweizer Mittelland betrachtet. Bei Annahmen zu Grössen oder verwendeten Systemen handelt es sich um Abschätzungen bezüglich dieses fiktiven Hauses.

Die europäischen Datensätze wurden durch Extrapolation schweizerischer Bedingungen (Wärmebedarf, Jahresarbeitszahlen) gewonnen.

Leckagen der Erdwärmesonde, die zu einem eventuellen Austritt der Sole führen, wurden mangels Information nicht berücksichtigt. Für das Bentonit der Erdwärmesonde wurde ein hoher Recyclinganteil angenommen ohne Bilanzierung des Recyclings. Recycling sollte genauer untersucht werden.

Hier wurden nur Wärmepumpen mit dem Kältemittel R-134a betrachtet. Eine Bilanzierung weiterer marktüblicher Kältemittel wäre eine nahe liegende Erweiterung.

7 Resultate

In diesem Kapitel werden ausgewählte Sachbilanzergebnisse sowie Werte für den kumulierten Energieaufwand zur Nutzwärme von Wärmepumpen gezeigt und diskutiert. Aus der Liste von etwa 1000 Elementarflüssen wird nur ein kleiner Teil dargestellt. Die Auswahl der Elementarflüsse erfolgte nicht aufgrund der Umwelrelevanz, sondern erlaubt es, die Beiträge der einzelnen Teilprozesse beispielhaft aufzuzeigen. Die vollständigen Resultate können der Datenbank entnommen werden.

Die hier gezeigte Auswahl ist nicht zur ökologischen Beurteilung der untersuchten Prozesse geeignet. Für eigene Berechnungen und Bewertungen sollten nur die vollständigen Daten aus der Datenbank verwendet werden, unter anderem auch deshalb, weil diese unter Umständen kleine Abweichungen zu den hier dargestellten Ergebnissen aufweisen können. Diese Abweichungen wurden durch letzte Korrekturen und Anpassungen bei den Daten der bezogenen Vorprodukte verursacht.

In der ecoinvent Datenbank sind auch bewertete Ergebnisse enthalten. Um die Bewertungsmethoden auf die ecoinvent Sachbilanzdaten anwenden zu können, waren einige Annahmen und Interpretationen erforderlich. Diese sind in (Frischknecht et al. 2003) beschrieben. Es wird dringend empfohlen, vor der Anwendung von bewerteten Ergebnissen die entsprechenden Kapitel des Implementierungsberichts und die zugehörige Grundlagenliteratur zu lesen.

Tab. 7.1 zeigt die Berechnungsergebnisse für Wärme ab Wärmepumpe vor der Wärmeverteilung im Haus, Tab. 7.2 zeigt die entsprechenden Ergebnisse unter Berücksichtigung der Wärmeverteilung. Die Ergebnisse wurden jeweils für zwei Gebiete berechnet, für die Schweiz (CH) und für Europa (RER). Für gleiche Wärmepumpentypen wurde für die Schweiz und für Europa jeweils die gleiche Jahresarbeitszahl angenommen, d.h. es wurde angenommen, dass die Schweiz klimatisch und geologisch einen mittleren Standort in Europa repräsentiert. Für den Standort Schweiz (CH) wurde der schweizerische Stromversorgungsmix eingesetzt, für den Standort Europa (RER) der UCTE-Stromversorgungsmix. Ansonsten sind die Parameter gleichnamiger Module für beide Standorte gleich. Die Ergebnisse unterscheiden sich dennoch je nach Standort deutlich aufgrund der unterschiedlichen Stromversorgung.

Eine in der Schweiz betriebene Wärmepumpe hat einen deutlich niedrigeren fossilen kumulierten Energieaufwand als eine am durchschnittlichen UCTE-Stromnetz betriebene Wärmepumpe gleichen Typs. Dafür ist für den Standort Schweiz aufgrund der hohen Anteile von Wasserkraft und Kernkraft an der Stromversorgung der kumulierte Energieaufwand an nuklearem Brennstoff und an erneuerbarer Energie grösser als im Durchschnitt im UCTE-Gebiet. Im Fall der Sole-Wasser-Wärmepumpe stellt der relativ hohe kumulierte Energieaufwand in der Kategorie „wind, solar, geothermal“ im Wesentlichen die Entnahme der Wärme aus dem Boden dar. Im Gegensatz dazu taucht für die Luft-Wasser-Wärmepumpe die Entnahme der Wärme aus der Luft nicht unter dem kumulierten Energieaufwand auf, da diese Wärme anschliessend wieder an die Luft abgegeben wird.

Die kumulierten CO₂-Emissionen für in der Schweiz betriebene Wärmepumpen ohne Berücksichtigung der Wärmeverteilung im Haus liegen zwischen 10 g/MJ (Sole-Wasser-Wärmepumpe) und 13 g/MJ (Luft-Wasser-Wärmepumpe). Die gleichen Wärmepumpen unter gleichen Temperaturbedingungen jedoch mit UCTE-Durchschnittsleistung betrieben haben kumulierte CO₂-Emissionen zwischen 37 g/MJ (Sole-Wasser-Wärmepumpe) und 51 g/MJ (Luft-Wasser-Wärmepumpe).

Tab. 7.1 Ausgewählte Resultate der kumulierten Sachbilanz und kumulierter Energieaufwand für Wärme ab 10-kW-Wärmepumpen (ohne Wärmeverteilung im Haus), v1.1.

Name	Location	Unit	Unit	heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW	heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW	heat, at air-water heat pump 10kW	heat, at air-water heat pump 10kW
				CH MJ	RER MJ	CH MJ	RER MJ
Infrastructure				0	0	0	0
LCIA results							
cumulative energy demand	non-renewable energy resources, fossil	MJ-Eq		0.14	0.48	0.17	0.65
cumulative energy demand	non-renewable energy resources, nuclear	MJ-Eq		0.47	0.38	0.66	0.53
cumulative energy demand	renewable energy resources, water	MJ-Eq		0.15	0.06	0.21	0.08
cumulative energy demand	renewable energy resources, wind, solar, geothermal	MJ-Eq		0.75	0.75	0.00	0.01
cumulative energy demand	renewable energy resources, biomass	MJ-Eq		0.00	0.01	0.00	0.01
LCI results							
resource	Land occupation	total	m2a	6.5E-4	8.9E-4	9.0E-4	1.2E-3
air	Carbon dioxide, fossil	total	kg	1.0E-2	3.7E-2	1.3E-2	5.1E-2
air	NM VOC	total	kg	9.4E-6	1.5E-5	9.7E-6	1.8E-5
air	Nitrogen oxides	total	kg	3.6E-5	8.8E-5	2.4E-5	9.6E-5
air	Sulphur dioxide	total	kg	2.5E-5	1.5E-4	3.3E-5	2.1E-4
air	Particulates, < 2.5 um	total	kg	4.8E-6	1.2E-5	4.0E-6	1.4E-5
water	BOD	total	kg	1.9E-5	3.8E-5	1.2E-5	3.8E-5
soil	Cadmium	total	kg	4.8E-12	1.0E-11	5.8E-12	1.3E-11

Tab. 7.2 Ausgewählte Resultate der kumulierten Sachbilanz und kumulierter Energieaufwand für Wärme ab Raumheizung von 10-kW-Wärmepumpen (d.h. inkl. Wärmeverteilung im Haus), v1.1.

Name	Location	Unit	Unit	heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator	heat, borehole heat exchanger, brine-water heat pump 10kW, at heat radiator	heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator	heat, air-water heat pump 10kW, at heat radiator
				CH MJ	RER MJ	CH MJ	RER MJ
Infrastructure				0	0	0	0
LCIA results							
cumulative energy demand	non-renewable energy resources, fossil	MJ-Eq		0.16	0.53	0.20	0.71
cumulative energy demand	non-renewable energy resources, nuclear	MJ-Eq		0.50	0.40	0.69	0.56
cumulative energy demand	renewable energy resources, water	MJ-Eq		0.16	0.06	0.23	0.08
cumulative energy demand	renewable energy resources, wind, solar, geothermal	MJ-Eq		0.78	0.79	0.00	0.01
cumulative energy demand	renewable energy resources, biomass	MJ-Eq		0.00	0.01	0.00	0.01
LCI results							
resource	Land occupation	total	m2a	7.2E-4	9.8E-4	9.8E-4	1.3E-3
air	Carbon dioxide, fossil	total	kg	1.3E-2	4.1E-2	1.6E-2	5.5E-2
air	NM VOC	total	kg	1.1E-5	1.7E-5	1.1E-5	2.0E-5
air	Nitrogen oxides	total	kg	4.3E-5	9.7E-5	3.0E-5	1.1E-4
air	Sulphur dioxide	total	kg	3.0E-5	1.6E-4	3.8E-5	2.3E-4
air	Particulates, < 2.5 um	total	kg	6.0E-6	1.4E-5	5.2E-6	1.6E-5
water	BOD	total	kg	2.2E-5	4.2E-5	1.5E-5	4.2E-5
soil	Cadmium	total	kg	5.6E-12	1.1E-11	6.6E-12	1.4E-11

8 Literaturverzeichnis

- Althaus et al. 2004 Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischier R., Jungbluth N., Osses M. and Primas A. (2004) Life Cycle Inventories of Chemicals. Final report ecoinvent 2000 No. 8. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, retrieved from: www.ecoinvent.ch.
- AWP 1991 Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen, "Allgemeine Information über Wärmepumpenheizungsanlagen – Merkblatt A 1 und A 8", 1991.
- BEW 1989 Bundesamt für Energiewirtschaft, "Erdwärmesonden-Heizanlagen", Studie Nr. 46, Burkart, Hopkirk, Eugster, Rybach. Bern, 1989.
- BEW 1990 Bundesamt für Energiewirtschaft, "Erdwärme in der Schweiz" Vorkommen und Nutzungsmöglichkeiten, Bern, 1990.
- Beyeler 2003 Beyeler F.: Medienmitteilung 10. April 2003. Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS). Informationsstelle Wärmepumpen. Bern. http://www.fws.ch/dateien/Verkaufszahlen_02.pdf
- BfK 1996 Bundesamt für Konjunkturfragen, "Umweltwärme effizient nutzen – Heizen mit Elektro-Wärmepumpen", PACER, Bern, 1996.
- Brunner&Gorhan 1999 Brunner M. und Gorhan L.: GEOTHERMIE - DIE UMWELTSCHONENDE ENERGIE. <http://www.geothermal-energy.ch/downloads/umweltsch-dt.PDF>.
- Bussmann 1991 Bussmann, Kabus, Seibdt (Hrsg.) "Geothermie: Wärme aus der Erde", Technologie – Konzepte – Projekte. Verlag C.F.Müller Karlsruhe, 1991.
- ELCOPLUS 2002 ELCOPLUS. Technische Dokumentation Wärmepumpen aerotop. März 2002.
- EPA 2002 U.S. Environmental Protection Agency (2002), Composition of Refrigerant Blends. <http://www.epa.gov/ozone/snap/refrigerants/refblend.html>
- Erb et al. 2000 Erb M., Eicher H., Hubacher P.: Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen. In: 11. Schweizerisches Status-Seminar. 14./15. September 2000, ETH Zürich. ZEN (Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen). Tagungsband. EMPA ZEN. Dübendorf. September 2000.
- Erb&Hubacher 2001a Erb M and Hubacher P: Field analysis of Swiss heat pump installations. IEA Heat Pump Centre Newsletter. Volume 19 - No. 1/2001. Available from: www.heatpumpcentre.org
- Erb&Hubacher 2001b Erb M and Hubacher P: Erfahrungen an Retrofit-Anlagen im Betrieb. http://www.waermepumpe.ch/fe/pdf_uaw8/UAW8_Erb_Hubacher.pdf. Retrieved 10 Okt 2002.
- Eugster 1992 W.J. Eugster, Vortrag "Erdwärmesonden-Wechselwirkung mit Boden und Grundwasser", 3. Informationstagung des SGV, ETHZ, 1992.
- Feist&Peper 2002 W. Feist; S. Peper. Vom Niedrigenergiehaus zum Passivhaus, Entwicklungstendenzen und praktische Beispiele. Passivhaus Institut; Darmstadt; http://www.solvis.de/1forum/1-imgforum/1f_zih_feist-peper.pdf; accessed 25 June 2002.
- Freestone 1990 D.H. Freestone "Direct Use of Geothermal Energy in 1990", GRC Bulletin 19(7), 188, 1990.
- Frischknecht et al. 1996 Frischknecht R., Bollens U., Bosshart S., Ciot M., Ciseri L., Doka G., Dones R., Gantner U., Hischier R. and Martin A. (1996) Ökoinventare von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. 3. Gruppe Energie - Stoffe - Umwelt (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich und Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, Paul Scherrer Institut, Villigen, Bundesamt für Energie (Hrsg.), Bern, CH, retrieved from: www.energieforschung.ch.
- Frischknecht 1999 R. Frischknecht, 1999: Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel; Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen, Bundesamt für Energie, Bern. Online erhältlich bei <http://www.waermepumpe.ch/>.
- Frischknecht et al. 2003 Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Hischier R., Hellweg S., Kellenberger D., Nemecek T., Humbert S. and Spielmann M. (2003a) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent 2000 No. 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online: www.ecoinvent.ch.
- Grünenwald 1996 Persönliche Mitteilung der Firma Grünenwald AG, Affoltern a/A, April 1996.
- GtV 1992 Geothermische Fachtagung, Erding Deutschland, 1992.
- Halozan 2002 Holozan H. (2002): Heat pumps and the environment. Proceedings of the 7th International Energy Agency Conference on Heat Pumping Technologies, Beijing, China, May 19-22, 2002.
- HAKA 1993 Persönliche Mitteilung einer Mitarbeiterin, Firma: HAKA, Gossau, Juli 1993.

- Heckenberger 1989 M.Heckenberger, K.O. Luik, N.Scheirle, K.Wachter "Erdwärme in Oberschwaben", Energiewirtschaftliche Tagesfragen 39(3), 116, 1989.
- Hess 1993 Persönliche Mitteilung Herr Hess, Firma: Polydynamics Ltd., Zürich, Juli 1993.
- Hinden 1993 Persönliche Mitteilung Herr Hinden, Firma: Hoval Herzog AG, Feldmeilen, Juli 1993.
- Hofstetter 1990 P. Hofstetter "FCKW-Einsatz und Entsorgung in der Kälte- und Klimatechnik mit ökologischem Vergleich heutiger Kältschranksysteme und Ausblick auf alternative Kältesysteme", Zürich, 1990.
- Hopkirk 1993 Persönliche Mitteilung Herr Hopkirk, Firma: Polydynamics Ltd., Zürich, 1993.
- Hoval 1993 Technische Unterlagen Wärmepumpen, Firma: Hoval Herzog AG, Feldmeilen, 1993.
- Hubacher 1996 Messdaten der Firma Hubacher Engeneering, Engelburg, Juli 1996.
- Huttrer 2001 Huttrer G.W. (2001). The status of world geothermal power generation 1995-2000. Geothermics 30, pp. 1-27.
- IPCC 2001 IPCC (2001). J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jakob et al. 2002 Jakob M., Jochem E., Christen K. (2002). Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen bei Wohngebäuden, CEPE und HBT, ETH Zürich, Studie im Auftrag des Forschungsprogramms EWG des Bundesamts für Energie (BFE), September 2002. <http://www.cepe.ethz.ch/research/projects/grenzkosten.htm>.
- Jensch 1988 W. Jensch, "Vergleich von Energieversorgungssystemen unterschiedlicher Zentralisierung", IfE-Schriftenreihe Heft 22, München, 1988.
- Jung 1987 Jung J., "Zukünftige Heizungssysteme; Nutzungsketten - Verluste - Emissionen", Energiewirtschaftliche Tagesfragen 37.Jg (1987) Heft 2, s.166-171.
- Kaufmann 2002 Urs Kaufmann, 2002: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2001. Vorabzug der provisorischen Zahlen. Dr.EICHER+PAULI AG, Liestal. Juni 2002. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie. <http://www.eicher-pauli.ch/download/Stat-erneuerbar-2001-Zahlen.pdf>
- Keel 1993 Persönliche Mitteilung Herr Keel, Zürcher Energieberatung, Zürich, August 1993.
- Lovvorn, 2001a Lovvorn, N.C. (2001). Reliability and Lifetime of Residential Heat Pumps. Paper. Proceedings of Joint HPC and IPUHPC Workshop "Hands-On Experience with Heat Pumps for Buildings," 10-11 October 2001. Arnhem, The Netherlands. CD-ROM: "Hands-On Experience with Heat Pumps for Buildings," Workshop Report HPC-WR-23. IEA Heat Pump Centre. Sittard, The Netherlands.
- Lovvorn, 2001b Lovvorn, N.C. (2001). Reliability and Lifetime of Residential Heat Pumps. Power Point Presentation. CD-ROM: "Hands-On Experience with Heat Pumps for Buildings," Workshop Report HPC-WR-23. IEA Heat Pump Centre. Sittard, The Netherlands.
- Luder 2003 Luder F.: Materialien für Erdwärmesonden. <http://www.geothermie.de/>. Retrieved 04 Mar 2003.
- Lund & Freeston 2001 Lund J.W., Freeston D.H. (2001). World-wide direct uses of geothermal energy 2000. Geothermics 30, pp. 29-68.
- Maier 1986 Maier , "Umweltvergleich von elektrischen mit anderen Heizsystemen Teil II: Bewertung ausgewählter Systeme zur Hausheizung unter dem Aspekt der Schadstoffabgabe, Fichtner-Studie im Auftrag der FTA, Stuttgart 1986.
- MINERGIE 2003 Verein MINERGIE (AMI). www.minergie.ch. Retrieved 24 Jul 2003.
- Multi-Energie 1996 Persönliche Mitteilung der Firma Multi Energie AG, Aadorf, April 1996.
- Rasch 1993 Persönliche Mitteilung Frau Rasch, Firma: Süd-Chemie AG, München, August 1993.
- Recknagel et al. 88/89 Recknagel, Sprenger, Hönnmann, "Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik", Oldenbourg, 1988/89.
- Rohner 1993 Persönliche Mitteilung Herr Rohner sen., Firma: Grundag AG, Gossau, Juli 1993.
- Rohner 1996 Persönliche Mitteilung Herr Rohner jun., Firma: Grundag AG, Gossau, Juni 1996.
- Rose 2002 Rose, Roar (2002): Heat Pumps in Europe – an Overview. Proceedings of the 7th International Energy Agency Conference on Heat Pumping Technologies, Beijing, China, May 19-22, 2002.
- Roth 2000 Roth S., WPZ-Bulletin Nr. 24. Wärmepumpen-Testzentrum Winterthur Töss (WPZ).
- Roth 2001 Roth S., WPZ-Bulletin Nr. 28. Wärmepumpen-Testzentrum Winterthur Töss (WPZ).
- Roth 2002 Roth S., WPZ-Bulletin Nr. 30. Wärmepumpen-Testzentrum Winterthur Töss (WPZ). Januar 2002.

- Roth 2003 Stefan Roth. WPZ-Bulletin Nr. 34. Wärmepumpen-Testzentrum Winterthur Töss (WPZ). Januar 2003. <http://www.wpz.ch/>.
- Schlander 1993 Persönliche Mitteilung Herr Schlander, Firma: Grundag AG, Gossau, August 1993.
- SVG 1992 Schweizerische Vereinigung für Geothermie. Dritte technische Informationstagung "Nutzen der untiefen Geothermie", ETHZ, 1992.
- SVG-SSG 2004 Schweizerische Vereinigung für Geothermie - Société Suisse pour la Géothermie (2004). <http://www.geothermal-energy.ch/>. Retrieved Jan 2004.
- Toschi 1993 Persönliche Mitteilung Herr Toschi, Firma: Architektur Werkstatt, Uitikon, August 1993.
- Wärmepumpe 1996 Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz. Wärmepumpe 1/96.
- WPZ 1996 WPZ-Bulletin Nr. 7, Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Winterthur-Töss, 1996.
- WPZ 2002 Wärmepumpen-Testzentrum Winterthur-Töss. Internetseite <http://www.wpz.ch/>. Retrieved 3 May 2002.
- WPZ 2003 Wärmepumpen-Testzentrum Winterthur-Töss. Testliste. Stand April 2003. <http://www.wpz.ch/>
- Wunderlich 1993 D.Wunderlich "Zur Erfassung der klimarelevanten Umweltbelastung durch Kältesysteme", Ki Klima-Kälte-Heizung 6(238) 1993.
- Zogg 2002a Martin Zogg (2002): Wärmepumpen - Ausbildungsmodul Geothermie der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie. <http://www.waermepumpe.ch>. Retrieved 25 July 2002.
- Zogg 2002b Zogg, Martin (2002b): The Swiss Retrofit Heat Pump Programme. Proceedings of the 7th International Energy Agency Conference on Heat Pumping Technologies, Beijing, China, May 19-22, 2002.