

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

Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe

Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich des Gesamtsystems, Systemoptimierung, Konzeption einer intelligenten Regelung und Versuche an Testanlagen

ausgearbeitet durch

Dr. Th. Afjei	INFEL (Projektleitung)
Prof. W. Betschart	HTA Luzern
R. Bircher	Bircher+Keller AG
G. Doka	Ingenieurbüro Doka
Prof. Dr. H.P. Geering	IMRT-ETHZ
Th. Giger	HTA Luzern
S. Ginsburg	IMRT-ETHZ
Dr. A. Glass	HTA Luzern
A. Huber	Huber Energietechnik
Dr. E. Shafai	IMRT-ETHZ
M. Wetter	HTA Luzern
D. Wittwer	INFEL
G. Zweifel	HTA Luzern

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

Impressum

Auftraggeber:	Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)	
Prof. Dr. M. Zogg	Projektbegleiter	
Leiter Forschungsprogramm UAW	Email:	
Kirchstutz 3	martin.zogg@bluewin.ch	
3414 Oberburg	Fax.	034 / 422 69 10
Beauftragter:	Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung	
Dr. Th. Afjei	Projektleiter	
D. Wittwer	stv. Projektleiter	
INFEL	Email:	
Lagerstrasse 1, Postfach	afjei@infel.ch	
8021 Zürich	Fax.	01 / 299 41 40
Projektgruppe:	Fussbodenheizung	
R. Bircher	Email:	
Weidenbodenweg 2	bircherkeller@bluewin.ch	
4450 Sissach	Fax.	061 / 971 61 16
G. Doka	Ökobilanzen	
Stationsstrasse 32	Email:	doka@logon.ch
8003 Zürich	Fax.	01 / 463 16 08
ETH-Zürich	Regler	
Institut für Mess.- und Regeltechnik		
Prof. Dr. H.P. Geering		
Dr. E. Shafai, S. Ginsburg	Email:	
ETH-Zentrum, ML K39	ginsburg@imrt.mavt.ethz.ch	
8092 Zürich	Fax.	01 / 632 11 39
Huber Energietechnik, A. Huber	Erdsonde	
Jupiterstrasse 26	Email:	huber@igjzh.com
8032 Zürich	Fax.	01 / 422 79 53
HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz		
Prof. W. Betschart, G. Zweifel,		
M. Wetter, Th Giger	Simulation mit TRNSYS	
Dr. A. Glass	Zweistufige Wärmepumpe	
Abteilung HLK	Email:	wbetschart@ztl.ch
6048 Horw	Fax.	041 / 349 39 55

Inhaltsverzeichnis

1 ANHANG	1
1.1 HANDELSCHEINMETHODE ZUR BESTIMMUNG DER JAHRESARBEITSZAHL VON WÄRMEPUMPENANLAGEN FÜR HEIZ- UND WARMWASSERBETRIEB	1
1.2 TRNSYS-TYPE FÜR EINE ZWEISTUFIG DREHAHNGEREGLTE WÄRMEPUMPE	16
1.3 TRNSYS-TYPE FÜR EINE ERDWÄRMESONDE	25
1.4 TRNSYS-TYPE FÜR BESCHATTUNGSEINRICHTUNG	36
1.5 ZUSAMMENSTELLUNG DER VERWENDETEN ÖKOINVENTARDATEN	39
1.5.1 <i>Inventardaten für die betrachteten Teilsysteme</i>	39
1.5.2 <i>Bewertung von Materialien und Prozessen</i>	52
1.5.3 <i>Bilanzierung von neuen Materialien und Prozessen</i>	53
1.6 MESSEINRICHTUNGEN	61
<i>Messeinrichtung für WP-Wassererwärmer gemäss EN 255-6</i>	61
1.7 ANNAHMEN FÜR DEN KOSTENVERGLEICH	62
1.7.1 <i>Kostenzusammenstellung Luft/Wasser-WP-Heizung mit Abluft-Wärmepumpe zur Wasserwärmung</i>	62
1.7.2 <i>Kostenzusammenstellung Ölheizung mit WRG</i>	63
1.7.3 <i>Kostenzusammenstellung Gasheizung mit WRG</i>	64
1.7.4 <i>Kostenzusammenstellung Holzheizung mit WRG Eco Confort</i>	65
1.7.5 <i>Kostenzusammenstellung Luft/Luft-WP mit WRG HTM200</i>	66
1.7.6 <i>Kostenzusammenstellung Sole/Wasser-WP-Heizung mit Beistellboiler und WRG</i>	67
1.8 PROJEKTBESCHRIEB „MINERGIE-WÄRMEPUMPE“: ERARBEITUNG VON MARKETING-GRUNDLAGEN FÜR WÄRMEPUMPEN IN NIEDRIGENERGIEHÄUSERN“	68
1.8.1 <i>Titel: Marketing-Projekt „MINERGIE-Wärmepumpe“</i>	68
1.8.2 <i>Projektbeschreibung</i>	68
1.8.3 <i>Zielsetzung</i>	68
1.8.4 <i>Projektteam/Auftragnehmer</i>	68
1.8.5 <i>Termine</i>	68
1.8.6 <i>Erfolgskriterien</i>	68
1.9 ÜBERSICHT TECHNISCHES HANDBUCH FÜR PLANER UND ENERGIEBERATER	69

1 ANHANG

1.1 Handrechenmethode zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen für Heiz- und Warmwasserbetrieb

Zweck

Das vorgestellte Verfahren erlaubt mit einer einfachen Handrechnung, die Jahresarbeitszahl JAZ von monovalenten Wärmepumpenheizungen mit oder ohne Brauchwarmwasseraufbereitung zu bestimmen. Die Berechnung erfolgt auf Grund der von Wärmepumpenherstellern gelieferten Leistungszahlen (Coefficient of Performance, COP). Die Leistungszahlen müssen an wenigen normierten Betriebspunkten (Euronorm EN 255) vorliegen.

Die Abschätzung ist ohne EDV-Rechenprogramme durchführbar. Vergleichsrechnungen der Handmethode mit Jahresarbeitszahlen, die mittels Simulationsrechnungen ermittelt wurden, ergeben eine Genauigkeit der Methode von etwa $\pm 10\%$.

Vorgehen

Das Vorgehen ist aufgeteilt in die getrennte Bestimmung der Jahresarbeitszahl für die Raumheizung und die Jahresarbeitszahl für die Warmwasseraufbereitung.

Diese beiden Werte können für die Bestimmung der gesamten Jahresarbeitszahl (Raumheizung und Warmwasser) kombiniert werden.

Für die Berücksichtigung der Wärmeverluste des Warmwassersystems wie auch für Betriebstemperaturen, die von den Normtemperaturen abweichen, können einfach bestimmbare Korrekturfaktoren angewendet werden.

Korrekturfaktor für von Normtemperatur abweichende Wärmequellen- und Wärme senktemperatur

Die Leistungszahl von Wärmepumpen sind sehr stark von der Wärmequellen- und Wärmesenken temperatur abhängig. Da das hier vorgestellte Verfahren auf den Leistungszahlen bei wenigen normierten Temperaturen beruht, muss für davon abweichende Temperaturen eine Korrektur der Leistungszahl vorgenommen werden. Die Korrektur erfolgt über einen Temperaturumrechnungsfaktor, der über die Änderung der Carnotleistungszahl bestimmt wird. Dabei wird der Gütegrad des Carnot prozesses als konstant angenommen.

Die Carnotleistungszahl ist definiert als:

$$e_{car} = \frac{T_S}{T_S - T_Q}$$

Gl. 1

Für die Carnotleistungszahl am Normpunkt gilt demzufolge

$$e_{car,norm} = \frac{T_{VL,norm}}{T_{VL,norm} - T_{Ver,ein,norm}}$$

Gl. 2

und für die im Betrieb effektiven Temperaturen

$$e_{car,eff} = \frac{T_{VL,eff}}{T_{VL,eff} - T_{Ver,ein,eff}}$$

Gl. 3

Der Temperaturumrechnungsfaktor, mit dem die Leistungszahl am Normpunkt auf die effektive Leistungszahl umgerechnet werden kann, erhält man durch Division von Gl. 3 durch Gl. 2:

$$f_T = \frac{e_{car,eff}}{e_{car,norm}} = \frac{T_{VL,eff} (T_{VL,norm} - T_{Ver,ein,norm})}{T_{VL,norm} (T_{VL,eff} - T_{Ver,ein,eff})}$$

Gl. 4

Mit der Temperatur in Celsius anstelle der absoluten Temperatur ergibt sich für Gl. 4:

$$f_T = \frac{(\mathbf{J}_{VL,eff} + 273)(\mathbf{J}_{VL,norm} - \mathbf{J}_{Ver,ein,norm})}{(\mathbf{J}_{VL,norm} + 273)(\mathbf{J}_{VL,eff} - \mathbf{J}_{Ver,ein,eff})}$$

Gl. 5

Für die gebräuchlichsten Temperaturkombinationen sind die Temperaturumrechnungsfaktoren f im Anhang aufgelistet. Dabei muss von der Normtemperatur, die am nächsten beim Betriebspunkt liegt, ausgegangen werden.

JAZ Raumheizung

Bei der Raumheizung wird zwischen den gebräuchlichsten Systemen Luft/Wasser-Wärmepumpe und Sole/Wasser-Wärmepumpe unterschieden.

Bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe wird die Variation der Quellentemperatur berücksichtigt. Vereisungs- und Abtauverluste müssen in den COP-Werten bereits enthalten sein.

Bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe wird eine mittlere Quellentemperatur angenommen, da ohne Simulationsrechnungen in der Regel keine genaue Kenntnis über den jahreszeitlichen Quellentemperaturverlauf herrscht.

Luft/Wasser-Wärmepumpe

Bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe variiert die Leistungszahl über den Betriebsbereich sehr stark. Die massgebendste Einflussgröße ist die Außenlufttemperatur. Die Jahresarbeitszahl wird in diesem Verfahren über 3 Stützpunkte bestimmt. Es sind dies die Leistungszahlen bei den in der Euronorm EN 255 definierten Betriebspunkten A-7/W35, A2W35 und A+7/W35. Für Anlagen mit wesentlich höheren Vorlauftemperaturen sind allenfalls die Normpunkte A-7/W50, A2W50 und A+7/W50 zu verwenden.

Die Jahresarbeitszahl des Heizsystems (ohne Warmwasser) ist definiert als Verhältnis zwischen der während der Heizsaison von der Wärmepumpe abgegebenen Heizenergie und der aufgenommenen elektrischen Energie:

$$JAZ_h = \frac{Q_{h,HS}}{E_{e,HS}} = \frac{\int \dot{Q}_h dt}{\int P_h dt}$$

Gl. 6

Die elektrische Leistung lässt sich über die mit dem Temperaturfaktor korrigierte Leistungszahl bestimmen nach:

$$P_h = \frac{\dot{Q}_h}{f_T \text{COP}_h}$$

Gl. 7

Somit wird die Jahresarbeitszahl

$$JAZ_h = \frac{\int_{HS}^{\dot{Q}_h} dt}{\int_{HS}^{\dot{Q}_h} \frac{1}{f_T \text{COP}_h} dt}$$

Gl. 8

Die Jahresarbeitszahl wird mit Hilfe der drei von den Herstellern angegebenen Leistungszahlen berechnet. Dabei wird folgende Vereinfachungen getroffen: Die Leistungszahl soll im Temperaturbereich in der Umgebung der normierten Temperatur, bei der die Messung durchgeführt wurde, konstant sein.

Wenn nun mit $Q_{h,i}$ die Wärmeenergie bezeichnet wird, die im Bereich um die Temperatur i benötigt wird, so lässt sich Gl. 8 vereinfachen zu:

$$JAZ_h = \frac{Q_{h,-7} + Q_{h,+2} + Q_{h,+7}}{\frac{Q_{h,-7}}{f_{T,-7} \text{COP}_{h,-7}} + \frac{Q_{h,+2}}{f_{T,+2} \text{COP}_{h,+2}} + \frac{Q_{h,+7}}{f_{T,+7} \text{COP}_{h,+7}}}$$

Gl. 9

oder nach Division des Zählers und Nenners durch die jährliche Heizenergiemenge:

$$JAZ_h = \frac{1}{\frac{w_{-7}}{f_{T,-7} \text{COP}_{h,-7}} + \frac{w_{+2}}{f_{T,+2} \text{COP}_{h,+2}} + \frac{w_{+7}}{f_{T,+7} \text{COP}_{h,+7}}}$$

Gl. 10

wobei mit w der Wärmeanteil, bei dem die entsprechende Leistungszahl gilt, bezeichnet wird.

Der Wärmeanteil w lässt sich über das Summenhäufigkeitsdiagramm der Außenlufttemperatur bestimmen.

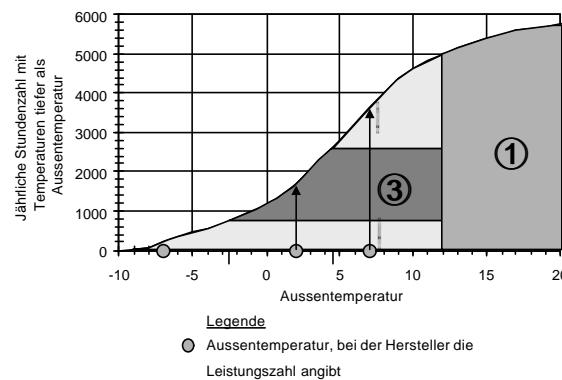


Abb. 1: Summenhäufigkeitsdiagramm für Zürich Kloten, 1. Oktober bis 31. Mai

Hierzu werden die Außentemperaturen, zu denen der Hersteller die Leistungszahlen angibt (in unserem Fall -7°C , $+2^\circ\text{C}$ und $+7^\circ\text{C}$), auf der Abszisse eingetragen. Diese Leistungszahlen werden nun in-

nerhalb des Intervalls, das um die Normaussentemperatur gelegt wird, als konstant angenommen. Die Intervalle werden derart festgelegt, dass die Intervallgrenze in der Mitte zwischen zwei Normpunkten liegt. Die Grenze des untersten Intervalls ist durch die tiefste vorkommende Aussenlufttemperatur, die Grenze des obersten Intervalls durch die Heizgrenze festgelegt.

Geht man davon aus, dass die freie Wärme unabhängig von der Aussentemperatur konstant ist, so entspricht die Fläche ① zwischen der Raumtemperatur (+20°C) und der Heizgrenze (+12°C) dem Energieanteil, der durch die internen und externen Wärmegewinne abgedeckt wird (Personen, Elektro, Sonne).

Die Summe der Flächen ②, ③ und ④ entsprechen nun der Heizenergie, die dem Gebäude zugeführt werden muss. Ihr Verhältnis zueinander entspricht dem Wärmeanteil w , der mit der zugehörigen Leistungszahl erzeugt werden muss. Dieser Wärmeanteil lässt sich einfach über die Heizgradstunden bestimmen. Die Heizgradstunden von der minimalen Aussentemperatur bis zu der gewünschten Aussentemperatur ϑ_i lässt sich bestimmen über

$$HGH_i = \sum_{\substack{J_{h,m} = J_{\min} \\ HS}}^{J_i} p_{h,m} (J_{HG} - J_{h,m})$$

Gl. 11

wenn mit $p_{h,m}$ die Anzahl Stunden bezeichnet wird, bei der die Stundenmitteltemperatur $\vartheta_{h,m}$ beträgt. Abb. 2 zeigt die Summe der Heizgradstunden (Gl. 11) für Zürich Kloten bei einer Heizgrenze von 12°C.

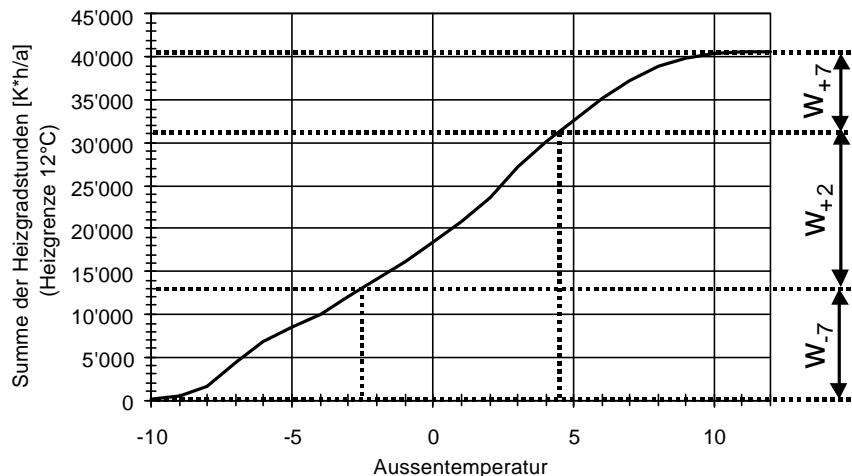


Abb. 2: Summe der Heizgradstunden für Zürich Kloten, 1. Oktober bis 31. Mai, Heizgrenze 12°C

Die Wärmeverhältnisse lassen der einzelnen Temperaturbereiche lassen sich nun wie folgt bestimmen:

$$w_{-7} = \frac{HGH_{-2.5}}{HGH_{+12}}$$

$$w_{+2} = \frac{HGH_{+4.5} - HGH_{-2.5}}{HGH_{+12}}$$

$$w_{+7} = \frac{HGH_{+12} - HGH_{+4.5}}{HGH_{+12}}$$

Gl. 12

Die Gewichtsfaktoren w für die Klimaregion Zürich sind in Tab. 1 aufgeführt. Für andere Klimaregionen oder Heizgrenzen sind die Werte in Tab. 1 neu zu berechnen (nach Gl. 11 und Gl. 12.)

COP Normtemperatur	Gewichtsfaktor w
-7	0.33
+2	0.45
+7	0.22

Tab. 1: Gewichtsfaktoren für Temperaturbereiche für Klimaregion Zürich

Sole/Wasser-Wärmepumpe

Bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe wird die Soletemperatur vereinfachend über den Jahresverlauf als konstant angenommen. Von den Herstellern wird in der Regel die Leistungszahl bei der Soletemperatur -5°C, 0°C und +5°C und bei Vorlauftemperaturen 35°C resp. 50°C angegeben.

Für abweichende Sole- oder Vorlauftemperaturen kann die ausgewiesene Leistungszahl mit dem Temperaturfaktor $f_{h,T}$ nach Gl. 5 (oder Tabellen im Anhang) umgerechnet werden. Die Jahresarbeitszahl der Raumheizung wird dann:

$$SPF_h = f_{h,T} \ COP_h$$

Gl. 13

JAZ Warmwasser

Korrekturfaktor für Speicher- und Verteilverluste

Die Wärmeverluste des Warmwasserspeichers und der Verteilleitungen fallen bei Warmwasseranlagen recht stark ins Gewicht. Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, wird ein Korrekturfaktor definiert, der diese Verluste erfasst.

Die Jahresarbeitszahl ist definiert als

$$JAZ_{ww} = \frac{Q_{ww,n}}{E_{e,ww}}$$

Gl. 14

wobei mit $Q_{ww,n}$ die effektiv genutzte Warmwasserenergie (Energiebedarf Warmwasser) bezeichnet ist.

Zusätzlich zum Energiebedarf Warmwasser sind die Speicher- und Verteilverluste zu decken. Der effektiv benötigte Wärmebedarf für die Warmwasserdeckung setzt sich also zusammen aus

- dem Energiebedarf Warmwasser
- den Wärmeverlusten der Verteilleitung
- den Speicherverlusten, falls diese nicht bereits in der Leistungszahl beinhaltet sind.

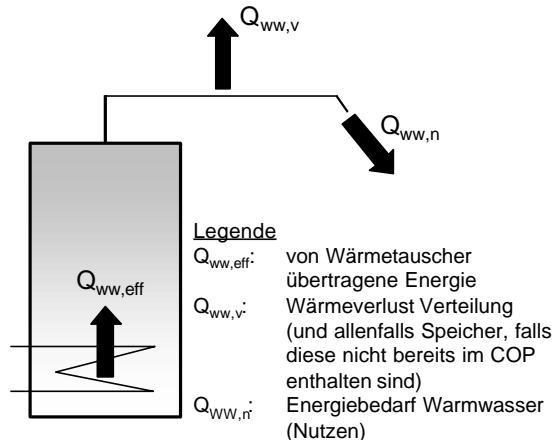


Abb. 3: Wärmeströme im Warmwassersystem

Nach Abb. 3 gilt für die dem Warmwasser zugeführte Wärmeenergie

$$Q_{ww,eff} = Q_{ww,n} + Q_{ww,v} \quad \text{Gl. 15}$$

Somit lässt sich Gl. 14 schreiben als

$$\begin{aligned} JAZ_{ww} &= \frac{Q_{ww,eff} - Q_{ww,v}}{E_{e,ww}} \\ &= \frac{Q_{ww,eff}}{E_{e,ww}} - \frac{Q_{ww,v}}{E_{e,ww}} \end{aligned} \quad \text{Gl. 16}$$

Der Elektrizitätsverbrauch kann über die Leistungszahl bestimmt werden:

$$E_{e,ww} = \frac{Q_{ww,eff}}{COP_{ww}} \quad \text{Gl. 17}$$

Gl. 17 in Gl. 16 eingesetzt ergibt für die Jahresarbeitszahl des Warmwassersystems

$$\begin{aligned} JAZ_{ww} &= COP_{ww} - \frac{COP_{ww} Q_{ww,v}}{Q_{ww,eff}} \\ &= COP_{ww} \left(1 - \frac{Q_{ww,v}}{Q_{ww,eff}} \right) \end{aligned} \quad \text{Gl. 18}$$

Mit Gl. 15 für $Q_{ww,eff}$ lässt sich die Jahresarbeitszahl bestimmen mit

$$JAZ_{ww} = COP_{ww} \left(1 - \frac{Q_{ww,v}}{Q_{ww,n} + Q_{ww,v}} \right) \quad \text{Gl. 19}$$

Der Faktor, mit dem der COP-Wert des Herstellers multipliziert werden muss, um die darin nicht erfassten Wärmeverlusten mit zu berücksichtigen, lautet folglich

$$f_{ww,v} = \frac{JAZ_{ww}}{COP_{ww}} = \left(1 - \frac{Q_{ww,v}}{Q_{ww,n} + Q_{ww,v}} \right)$$

Gl. 20

Da die Speicherverluste äusserst stark ins Gewicht fallen, ist abzuklären, ob die Deckung der Speicherstillstandsverluste bereits in der Leistungszahl des Herstellers enthalten ist. Ansonsten sind sie zu den Verlusten der Verteilleitungen $Q_{ww,v}$ zu addieren.

JAZ Abluftwärmepumpe

Bei der Abluftwärmepumpe wird die Temperaturschwankung der Eintrittsluft in den Verdampfer vernachlässigt. Die Jahresarbeitszahl wird also direkt über die vom Hersteller angegebene Leistungszahl bestimmt.

Falls die Warmwasser- oder Ablufttemperatur nicht den Herstellerdaten entspricht, so muss die Leistungszahl mit dem Temperaturumrechnungsfaktor nach Gl. 5 (oder Anhang) umgerechnet werden.

Die Jahresarbeitszahl für die Warmwasseraufbereitung lautet demzufolge

$$JAZ_{ww} = f_{ww,T} f_{ww,v} COP_{ww}$$

Gl. 21

JAZ Warmwasser über Sole/Wasser-WP

Die Bestimmung der Jahresarbeitszahl der Warmwasseraufbereitung erfolgt analog der Jahresarbeitszahl der Raumheizung. Wie bei der Raumheizung wird eine konstante Wärmequellentemperatur angenommen. Als Vorlauftemperatur ist ein Mittelwert von 55°C sinnvoll, falls von einer Warmwassertemperatur von 45°C mit einmaliger Aufheizung pro Tag auf 55°C ausgegangen wird. Die Jahresarbeitszahl lässt sich demzufolge bestimmen mit

$$JAZ_{ww} = f_{ww,T} f_{ww,v} COP_{ww}$$

Gl. 22

Raumheizung und Warmwasser

Die gesamte Jahresarbeitszahl der Raumheizung und der Warmwasseraufbereitung erfolgt durch die Gewichtung der beiden Energieanteile.

Die gesamte Jahresarbeitszahl ist definiert als

$$JAZ_{h+ww} = \frac{Q_h + Q_{ww,n}}{E_{e,h} + E_{e,ww}}$$

Gl. 23

Der Elektrizitätsverbrauch für die Raumheizung und die Warmwasseraufbereitung kann über die einzelnen Jahresarbeitszahlen bestimmt werden:

$$E_{e,h} = \frac{Q_h}{JAZ_h}$$

$$E_{e,ww} = \frac{Q_{ww,n}}{JAZ_{ww}}$$

Gl. 24

Setzt man Gl. 24 in Gl. 23 ein, so erhält man

$$JAZ_{h+ww} = \frac{\frac{Q_h + Q_{ww,n}}{Q_h + Q_{ww,n}}}{\frac{Q_h}{JAZ_h} + \frac{Q_{ww,n}}{JAZ_{ww}}}$$

Gl. 25

Dividiert man in Gl. 25 Zähler und Nenner durch den gesamten Wärmebedarf ($Q_h + Q_{ww,n}$) und führt die Wärmeanteile w für Raumheizung und Warmwasser

$$w_h = \frac{Q_h}{Q_h + Q_{ww,n}}$$

$$w_{ww} = \frac{Q_{ww,n}}{Q_h + Q_{ww,n}}$$

Gl. 26

ein, so vereinfacht sich Gl. 25 zu

$$JAZ_{h+ww} = \frac{1}{\frac{w_h}{JAZ_h} + \frac{w_{ww}}{JAZ_{ww}}}$$

Gl. 27

Formelzeichen

Variablen

ε	Leistungszahl Vergleichsprozess
ϑ	CelsiusTemperatur
COP	Leistungszahl (Coefficient of Performance)
E	elektrische Energie
f	Umrechnungsfaktor
HGH	Heizgradstunden
P	elektrische Leistung
p	Häufigkeit
Q	Energie
\dot{Q}	Leistung
JAZ	Jahresarbeitszahl (Seasonal Performance Factor)
T	absolute Temperatur
w	Wärmeanteil

Indizes

car	Carnot
e	Elektrizität
eff	effektiv
ein	Eintritt
h	Raumheizung
HG	Heizgrenze
HS	Heizsaison
m	mittel
min	minimal
norm	Normpunkt
n	Nutzen
Q	Quelle
S	Senke
T	Temperatur
v	Verlust
Ver	Verdampfer
VL	Heizungsvorlauf
ww	Warmwasser

Temperaturumrechnungsfaktoren

Normpunkt A-7/W35

	Quelle	Senke
Normtemperatur	-7	35

	Quellentemperatur											
	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	
25	1.10	1.13	1.16	1.20	1.23	1.27	1.31	1.35	1.40	1.45	1.51	
26	1.07	1.10	1.13	1.16	1.20	1.24	1.27	1.32	1.36	1.41	1.46	
27	1.05	1.08	1.11	1.14	1.17	1.20	1.24	1.28	1.32	1.36	1.41	
28	1.03	1.05	1.08	1.11	1.14	1.17	1.21	1.24	1.28	1.32	1.37	
29	1.00	1.03	1.06	1.08	1.11	1.14	1.18	1.21	1.25	1.29	1.33	
30	0.98	1.01	1.03	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.22	1.25	1.29	
31	0.96	0.99	1.01	1.04	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.22	1.26	
32	0.95	0.97	0.99	1.01	1.04	1.07	1.09	1.12	1.16	1.19	1.22	
33	0.93	0.95	0.97	0.99	1.02	1.04	1.07	1.10	1.13	1.16	1.19	
34	0.91	0.93	0.95	0.97	1.00	1.02	1.05	1.07	1.10	1.13	1.16	
35	0.89	0.91	0.93	0.95	0.98	1.00	1.02	1.05	1.08	1.11	1.14	
36	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	1.03	1.05	1.08	1.11	
37	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.01	1.03	1.06	1.08	
38	0.85	0.87	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.99	1.01	1.03	1.06	
39	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91	0.92	0.95	0.97	0.99	1.01	1.04	
40	0.82	0.84	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97	0.99	1.02	
41	0.81	0.82	0.84	0.86	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97	1.00	
42	0.80	0.81	0.83	0.84	0.86	0.88	0.89	0.91	0.93	0.95	0.98	
43	0.78	0.80	0.81	0.83	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	
44	0.77	0.79	0.80	0.82	0.83	0.85	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	
45	0.76	0.77	0.79	0.80	0.82	0.83	0.85	0.87	0.88	0.90	0.92	

Normpunkt A+2/W35

	Quelle	Senke
Normtemperatur	2	35

	Quellentemperatur											
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	
25	1.14	1.18	1.23	1.28	1.33	1.39	1.45	1.52	1.60	1.68	1.77	
26	1.10	1.14	1.19	1.23	1.28	1.33	1.39	1.46	1.53	1.60	1.69	
27	1.07	1.11	1.15	1.19	1.24	1.29	1.34	1.40	1.46	1.53	1.61	
28	1.04	1.08	1.11	1.15	1.19	1.24	1.29	1.34	1.40	1.47	1.54	
29	1.01	1.04	1.08	1.12	1.16	1.20	1.24	1.29	1.35	1.41	1.47	
30	0.98	1.01	1.05	1.08	1.12	1.16	1.20	1.25	1.30	1.35	1.41	
31	0.96	0.99	1.02	1.05	1.09	1.12	1.16	1.21	1.25	1.30	1.36	
32	0.93	0.96	0.99	1.02	1.05	1.09	1.13	1.17	1.21	1.26	1.31	
33	0.91	0.94	0.96	0.99	1.02	1.06	1.09	1.13	1.17	1.21	1.26	
34	0.89	0.91	0.94	0.97	1.00	1.03	1.06	1.10	1.13	1.17	1.22	
35	0.87	0.89	0.92	0.94	0.97	1.00	1.03	1.06	1.10	1.14	1.18	
36	0.85	0.87	0.89	0.92	0.95	0.97	1.00	1.03	1.07	1.10	1.14	
37	0.83	0.85	0.87	0.90	0.92	0.95	0.98	1.01	1.04	1.07	1.11	
38	0.81	0.83	0.85	0.88	0.90	0.93	0.95	0.98	1.01	1.04	1.07	
39	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.93	0.96	0.98	1.01	1.04	
40	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88	0.91	0.93	0.96	0.99	1.02	
41	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86	0.89	0.91	0.93	0.96	0.99	
42	0.75	0.77	0.78	0.80	0.82	0.84	0.87	0.89	0.91	0.94	0.96	
43	0.74	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89	0.92	0.94	
44	0.72	0.74	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89	0.92	
45	0.71	0.72	0.74	0.76	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85	0.87	0.90	

Normpunkt A+7/W35

	Quelle	Senke
Normtemperatur	7	35

	Quellentemperatur											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
25	1.18	1.23	1.29	1.35	1.43	1.51	1.59	1.69	1.81	1.94	2.08	
26	1.13	1.18	1.24	1.29	1.36	1.43	1.51	1.60	1.70	1.81	1.94	
27	1.09	1.14	1.19	1.24	1.30	1.36	1.44	1.52	1.60	1.70	1.82	
28	1.05	1.09	1.14	1.19	1.24	1.30	1.37	1.44	1.52	1.61	1.71	
29	1.02	1.06	1.10	1.14	1.19	1.25	1.31	1.37	1.44	1.53	1.61	
30	0.98	1.02	1.06	1.10	1.15	1.20	1.25	1.31	1.38	1.45	1.53	
31	0.95	0.99	1.02	1.06	1.11	1.15	1.20	1.26	1.32	1.38	1.45	
32	0.92	0.96	0.99	1.03	1.07	1.11	1.16	1.21	1.26	1.32	1.39	
33	0.90	0.93	0.96	0.99	1.03	1.07	1.11	1.16	1.21	1.26	1.32	
34	0.87	0.90	0.93	0.96	1.00	1.03	1.07	1.12	1.16	1.21	1.27	
35	0.85	0.88	0.90	0.93	0.97	1.00	1.04	1.08	1.12	1.17	1.22	
36	0.83	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97	1.00	1.04	1.08	1.12	1.17	
37	0.81	0.83	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97	1.01	1.04	1.08	1.13	
38	0.79	0.81	0.83	0.86	0.88	0.91	0.94	0.97	1.01	1.05	1.09	
39	0.77	0.79	0.81	0.83	0.86	0.89	0.91	0.95	0.98	1.01	1.05	
40	0.75	0.77	0.79	0.81	0.84	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	1.02	
41	0.73	0.75	0.77	0.79	0.82	0.84	0.87	0.89	0.92	0.95	0.98	
42	0.72	0.73	0.75	0.77	0.80	0.82	0.84	0.87	0.89	0.92	0.95	
43	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84	0.87	0.90	0.93	
44	0.69	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	
45	0.67	0.69	0.71	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	0.83	0.85	0.88	

Normpunkt A-7/W50

	Quelle	Senke
Normtemperatur	-7	50

	Quellentemperatur											
	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	
40	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.18	1.20	1.23	1.26	1.28	1.32	
41	1.05	1.07	1.09	1.11	1.13	1.15	1.18	1.20	1.23	1.26	1.29	
42	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11	1.13	1.16	1.18	1.21	1.24	1.26	
43	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.12	1.14	1.16	1.19	1.21	1.24	
44	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.17	1.19	1.22	
45	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.15	1.17	1.19	
46	0.97	0.99	1.01	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	
47	0.96	0.97	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11	1.13	1.15	
48	0.94	0.96	0.98	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11	1.13	
49	0.93	0.95	0.96	0.98	1.00	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11	
50	0.92	0.93	0.95	0.97	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	
51	0.91	0.92	0.94	0.95	0.97	0.99	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	
52	0.90	0.91	0.93	0.94	0.96	0.97	0.99	1.01	1.02	1.04	1.06	
53	0.89	0.90	0.91	0.93	0.94	0.96	0.98	0.99	1.01	1.03	1.05	
54	0.87	0.89	0.90	0.92	0.93	0.95	0.96	0.98	0.99	1.01	1.03	
55	0.86	0.88	0.89	0.90	0.92	0.93	0.95	0.96	0.98	1.00	1.02	
56	0.85	0.87	0.88	0.89	0.91	0.92	0.94	0.95	0.97	0.98	1.00	
57	0.84	0.86	0.87	0.88	0.90	0.91	0.92	0.94	0.95	0.97	0.99	
58	0.83	0.85	0.86	0.87	0.89	0.90	0.91	0.93	0.94	0.96	0.97	
59	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.89	0.90	0.92	0.93	0.94	0.96	
60	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.88	0.89	0.90	0.92	0.93	0.95	

Normpunkt A+2/W50

	Quelle	Senke
Normtemperatur	2	50

	Quellentemperatur											
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	
Vorlauftemperatur	40	1.08	1.11	1.13	1.16	1.19	1.22	1.26	1.29	1.33	1.37	1.41
41	1.06	1.09	1.11	1.14	1.17	1.20	1.23	1.26	1.30	1.33	1.37	
42	1.04	1.06	1.09	1.11	1.14	1.17	1.20	1.23	1.27	1.30	1.34	
43	1.02	1.04	1.07	1.09	1.12	1.15	1.17	1.20	1.24	1.27	1.30	
44	1.00	1.02	1.05	1.07	1.10	1.12	1.15	1.18	1.21	1.24	1.27	
45	0.98	1.01	1.03	1.05	1.07	1.10	1.13	1.15	1.18	1.21	1.24	
46	0.97	0.99	1.01	1.03	1.05	1.08	1.10	1.13	1.16	1.19	1.22	
47	0.95	0.97	0.99	1.01	1.03	1.06	1.08	1.11	1.13	1.16	1.19	
48	0.94	0.95	0.97	0.99	1.01	1.04	1.06	1.08	1.11	1.14	1.16	
49	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.09	1.11	1.14	
50	0.91	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.07	1.09	1.12	
51	0.89	0.91	0.93	0.94	0.96	0.98	1.00	1.02	1.05	1.07	1.09	
52	0.88	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07	
53	0.87	0.88	0.90	0.91	0.93	0.95	0.97	0.99	1.01	1.03	1.05	
54	0.85	0.87	0.88	0.90	0.92	0.93	0.95	0.97	0.99	1.01	1.03	
55	0.84	0.86	0.87	0.89	0.90	0.92	0.94	0.96	0.97	0.99	1.02	
56	0.83	0.84	0.86	0.87	0.89	0.91	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	
57	0.82	0.83	0.85	0.86	0.88	0.89	0.91	0.93	0.94	0.96	0.98	
58	0.81	0.82	0.83	0.85	0.86	0.88	0.89	0.91	0.93	0.95	0.96	
59	0.80	0.81	0.82	0.84	0.85	0.87	0.88	0.90	0.91	0.93	0.95	
60	0.79	0.80	0.81	0.82	0.84	0.85	0.87	0.88	0.90	0.92	0.93	

Normpunkt A+7/W50

	Quelle	Senke
Normtemperatur	7	50

	Quellentemperatur											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Vorlauftemperatur	40	1.10	1.13	1.16	1.19	1.23	1.26	1.30	1.34	1.39	1.44	1.49
41	1.07	1.10	1.13	1.16	1.19	1.23	1.27	1.31	1.35	1.39	1.44	
42	1.05	1.08	1.10	1.13	1.16	1.20	1.23	1.27	1.31	1.35	1.40	
43	1.03	1.05	1.08	1.11	1.14	1.17	1.20	1.24	1.27	1.31	1.36	
44	1.00	1.03	1.06	1.08	1.11	1.14	1.17	1.21	1.24	1.28	1.32	
45	0.98	1.01	1.03	1.06	1.09	1.11	1.14	1.18	1.21	1.25	1.28	
46	0.97	0.99	1.01	1.04	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.21	1.25	
47	0.95	0.97	0.99	1.01	1.04	1.07	1.09	1.12	1.15	1.18	1.22	
48	0.93	0.95	0.97	0.99	1.02	1.04	1.07	1.10	1.12	1.15	1.19	
49	0.91	0.93	0.95	0.97	1.00	1.02	1.05	1.07	1.10	1.13	1.16	
50	0.90	0.91	0.93	0.96	0.98	1.00	1.02	1.05	1.08	1.10	1.13	
51	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	1.03	1.05	1.08	1.11	
52	0.87	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.01	1.03	1.06	1.08	
53	0.85	0.87	0.89	0.90	0.92	0.94	0.96	0.99	1.01	1.03	1.06	
54	0.84	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97	0.99	1.01	1.04	
55	0.82	0.84	0.86	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97	0.99	1.02	
56	0.81	0.83	0.84	0.86	0.88	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97	1.00	
57	0.80	0.81	0.83	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.93	0.96	0.98	
58	0.79	0.80	0.82	0.83	0.85	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	
59	0.78	0.79	0.80	0.82	0.83	0.85	0.87	0.88	0.90	0.92	0.94	
60	0.76	0.78	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.87	0.89	0.90	0.92	

Normpunkt B-5/W35

	Quelle	Senke	Quellentemperatur						
	-5	35	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2
25	1.17	1.21	1.25	1.29	1.33	1.38	1.43		
26	1.14	1.18	1.21	1.25	1.29	1.34	1.39		
27	1.11	1.15	1.18	1.22	1.26	1.30	1.34		
28	1.09	1.12	1.15	1.18	1.22	1.26	1.30		
29	1.06	1.09	1.12	1.15	1.19	1.23	1.27		
30	1.04	1.06	1.09	1.12	1.16	1.19	1.23		
31	1.01	1.04	1.07	1.10	1.13	1.16	1.20		
32	0.99	1.02	1.04	1.07	1.10	1.13	1.17		
33	0.97	0.99	1.02	1.05	1.07	1.10	1.14		
34	0.95	0.97	1.00	1.02	1.05	1.08	1.11		
35	0.93	0.95	0.98	1.00	1.03	1.05	1.08		
36	0.91	0.93	0.96	0.98	1.00	1.03	1.06		
37	0.89	0.91	0.94	0.96	0.98	1.01	1.03		
38	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.99	1.01		
39	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.99		
40	0.85	0.86	0.88	0.90	0.92	0.95	0.97		
41	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95		
42	0.82	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93		
43	0.80	0.82	0.84	0.85	0.87	0.89	0.91		
44	0.79	0.81	0.82	0.84	0.86	0.88	0.89		
45	0.78	0.79	0.81	0.83	0.84	0.86	0.88		

Normpunkt B0/W35

	Quelle	Senke	Quellentemperatur						
	0	35	-3	-2	-1	0	1	2	3
25	1.21	1.25	1.30	1.35	1.41	1.47	1.54		
26	1.17	1.21	1.26	1.31	1.36	1.42	1.48		
27	1.14	1.18	1.22	1.26	1.31	1.36	1.42		
28	1.10	1.14	1.18	1.22	1.27	1.32	1.37		
29	1.07	1.11	1.14	1.18	1.23	1.27	1.32		
30	1.04	1.08	1.11	1.15	1.19	1.23	1.28		
31	1.02	1.05	1.08	1.11	1.15	1.19	1.23		
32	0.99	1.02	1.05	1.08	1.12	1.16	1.20		
33	0.97	0.99	1.02	1.05	1.09	1.12	1.16		
34	0.94	0.97	1.00	1.03	1.06	1.09	1.13		
35	0.92	0.95	0.97	1.00	1.03	1.06	1.09		
36	0.90	0.92	0.95	0.98	1.00	1.03	1.06		
37	0.88	0.90	0.93	0.95	0.98	1.01	1.04		
38	0.86	0.88	0.91	0.93	0.96	0.98	1.01		
39	0.84	0.86	0.89	0.91	0.93	0.96	0.98		
40	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91	0.94	0.96		
41	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91	0.94		
42	0.80	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89	0.92		
43	0.78	0.80	0.82	0.84	0.85	0.88	0.90		
44	0.77	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88		
45	0.75	0.77	0.79	0.80	0.82	0.84	0.86		

Normpunkt B+5/W35

	Quelle	Senke
Normtemperatur	5	35

	Quellentemperatur						
	2	3	4	5	6	7	8
25	1.26	1.32	1.38	1.45	1.53	1.61	1.71
26	1.21	1.27	1.32	1.39	1.46	1.53	1.62
27	1.17	1.22	1.27	1.33	1.39	1.46	1.54
28	1.13	1.17	1.22	1.27	1.33	1.40	1.47
29	1.09	1.13	1.18	1.23	1.28	1.34	1.40
30	1.05	1.09	1.14	1.18	1.23	1.28	1.34
31	1.02	1.06	1.10	1.14	1.18	1.23	1.29
32	0.99	1.02	1.06	1.10	1.14	1.19	1.24
33	0.96	0.99	1.03	1.06	1.10	1.15	1.19
34	0.93	0.96	1.00	1.03	1.07	1.11	1.15
35	0.91	0.94	0.97	1.00	1.03	1.07	1.11
36	0.89	0.91	0.94	0.97	1.00	1.04	1.07
37	0.86	0.89	0.91	0.94	0.97	1.01	1.04
38	0.84	0.87	0.89	0.92	0.95	0.98	1.01
39	0.82	0.84	0.87	0.89	0.92	0.95	0.98
40	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.92	0.95
41	0.78	0.80	0.83	0.85	0.87	0.90	0.93
42	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85	0.88	0.90
43	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85	0.88
44	0.74	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.86
45	0.72	0.74	0.76	0.77	0.79	0.82	0.84

Normpunkt B-5/W50

	Quelle	Senke
Normtemperatur	-5	50

	Quellentemperatur						
	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2
40	1.11	1.13	1.16	1.18	1.21	1.24	1.27
41	1.09	1.11	1.14	1.16	1.19	1.22	1.24
42	1.07	1.09	1.12	1.14	1.17	1.19	1.22
43	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.17	1.20
44	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.15	1.17
45	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	1.13	1.15
46	1.01	1.02	1.04	1.07	1.09	1.11	1.13
47	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11
48	0.98	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09
49	0.96	0.98	1.00	1.02	1.03	1.05	1.08
50	0.95	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06
51	0.94	0.95	0.97	0.99	1.00	1.02	1.04
52	0.92	0.94	0.95	0.97	0.99	1.01	1.02
53	0.91	0.93	0.94	0.96	0.97	0.99	1.01
54	0.90	0.91	0.93	0.94	0.96	0.98	0.99
55	0.89	0.90	0.92	0.93	0.95	0.96	0.98
56	0.88	0.89	0.90	0.92	0.93	0.95	0.97
57	0.86	0.88	0.89	0.91	0.92	0.94	0.95
58	0.85	0.87	0.88	0.89	0.91	0.92	0.94
59	0.84	0.86	0.87	0.88	0.90	0.91	0.93
60	0.83	0.85	0.86	0.87	0.89	0.90	0.91

Normpunkt B0/W50

	Quelle	Senke					
Normtemperatur	0	50					
	Quellentemperatur						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
40	1.13	1.15	1.18	1.21	1.24	1.28	1.31
41	1.10	1.13	1.16	1.19	1.22	1.25	1.28
42	1.08	1.11	1.13	1.16	1.19	1.22	1.25
43	1.06	1.09	1.11	1.14	1.16	1.19	1.22
44	1.04	1.07	1.09	1.12	1.14	1.17	1.20
45	1.03	1.05	1.07	1.09	1.12	1.14	1.17
46	1.01	1.03	1.05	1.07	1.10	1.12	1.15
47	0.99	1.01	1.03	1.05	1.08	1.10	1.13
48	0.97	0.99	1.01	1.04	1.06	1.08	1.10
49	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08
50	0.94	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06
51	0.93	0.95	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04
52	0.91	0.93	0.95	0.97	0.99	1.01	1.03
53	0.90	0.92	0.93	0.95	0.97	0.99	1.01
54	0.89	0.90	0.92	0.94	0.96	0.97	0.99
55	0.88	0.89	0.91	0.92	0.94	0.96	0.98
56	0.86	0.88	0.89	0.91	0.93	0.94	0.96
57	0.85	0.87	0.88	0.90	0.91	0.93	0.95
58	0.84	0.85	0.87	0.88	0.90	0.91	0.93
59	0.83	0.84	0.86	0.87	0.89	0.90	0.92
60	0.82	0.83	0.85	0.86	0.87	0.89	0.90

Normpunkt B+5/W50

	Quelle	Senke					
Normtemperatur	5	50					
	Quellentemperatur						
	2	3	4	5	6	7	8
40	1.15	1.18	1.21	1.25	1.28	1.32	1.36
41	1.12	1.15	1.18	1.22	1.25	1.29	1.33
42	1.10	1.13	1.15	1.19	1.22	1.25	1.29
43	1.07	1.10	1.13	1.16	1.19	1.22	1.26
44	1.05	1.08	1.10	1.13	1.16	1.19	1.23
45	1.03	1.05	1.08	1.11	1.14	1.17	1.20
46	1.01	1.03	1.06	1.08	1.11	1.14	1.17
47	0.99	1.01	1.04	1.06	1.09	1.11	1.14
48	0.97	0.99	1.02	1.04	1.06	1.09	1.12
49	0.95	0.98	1.00	1.02	1.04	1.07	1.09
50	0.94	0.96	0.98	1.00	1.02	1.05	1.07
51	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	1.03	1.05
52	0.91	0.92	0.94	0.96	0.98	1.01	1.03
53	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97	0.99	1.01
54	0.88	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97	0.99
55	0.86	0.88	0.90	0.91	0.93	0.95	0.97
56	0.85	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.95
57	0.84	0.85	0.87	0.88	0.90	0.92	0.94
58	0.82	0.84	0.85	0.87	0.89	0.90	0.92
59	0.81	0.83	0.84	0.86	0.87	0.89	0.91
60	0.80	0.81	0.83	0.84	0.86	0.88	0.89

1.2 TRNSYS-Type für eine zweistufig drehzahlgeregelte Wärme

TRNSYS Type

**Dual-stage compressor heat pump
including frost and cycle losses**

Version 2.1

Model description and implementation in TRNSYS

Developed in the project

Low Temperature Low Cost Heat Pump Heating System

carried out by the Information Center for Electricity Applications
under contract of the Swiss Federal Office of Energy

Dr. Thomas Afjei, INFEL Zürich

Michael Wetter, ZTL Luzern

Dr. Andrew Glass, ZTL Luzern

November 16, 1997

Type204: Dual-stage compressor heat pump

General description

The heat pump is modelled as a black-box. The model is based on the one used in the YUM simulation program [1, 2]. The boundary conditions are the evaporator and condenser inlet temperature, the evaporator and condenser mass flow and the control signal of an external simulated controller. The model allows both steady-state and transient behaviour to be simulated for dual-stage heat pumps. In addition, single-stage units can also be simulated by treating them as dual-stage heat pumps whose operation is restricted to the first level.

This mathematical model extends to multi-stage compressor heat pumps and its implementation would only require altering the number of operating levels specified in the TRNSYS module.

The power of the condenser and the evaporator is calculated based on characteristic power curves which are usually supplied by the manufacturer of the heat pump. The curves show the condenser power and the electric power as a function of the evaporator inlet temperature, the condenser outlet temperature and the operating level (see Fig. 1 for a single-stage heat pump). These values are used to calculate coefficients of biquadratic polynomials. The calculation of these coefficients has to be carried out with either the YUM simulation program or the program 'Polynom' which is an extracted part of YUM. To increase the power of the heat pump by keeping the coefficient of performance (COP) constant, the condenser and the compressor power can be linearly scaled with a constant factor.

These polynomials are valid only for steady-state conditions. To take the cycle losses of the heat pump into account, the computed power must be corrected using the solution of a first order differential equation, known in the control theory as a PT_1 -element.

Power reduction due to icing and defrosting, if not already taken into account in the manufacturer's specifications, can be computed using a semi-empiric approach. However, with this model, it is not possible to determine at which timestep the ice will be melted.

Based on validation of the YUM algorithm with measurement data the expected accuracy of the model is:

	Relative error
Condenser energy	6.6%
Compressor energy	12.5%
COP	2.7%

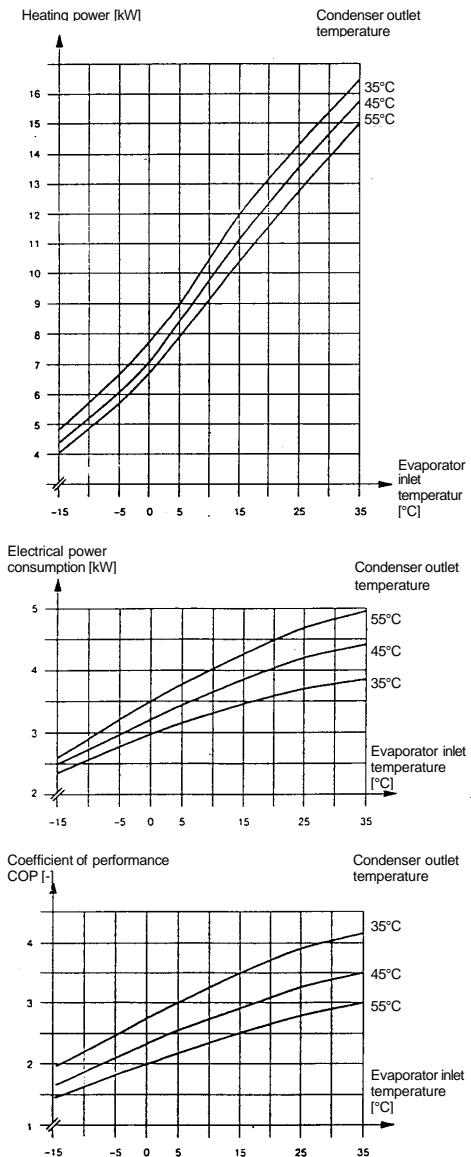


Fig. 1: Power characteristics of a single-stage heat pump.

Symbols

Variables

τ	Time constant
Δ	Difference
A	Constant for frost/defrost loss
B	Constant for frost/defrost loss
bp	Polynomial coefficient for compressor power
bq	Polynomial coefficient for condenser power
C	Constant for frost/defrost loss
c	Specific heat capacity
COP	Coefficient of performance
D	Constant for frost/defrost loss
E	Constant for frost/defrost loss
f	Scaling factor for heat pump power
m	Mass flow
P	Electrical power
Q	Heating power
T	Temperature
t	time

Indices

c	Condenser
$corr$	Corrected
e	Evaporator
f	Fictitious
hp	Heat pump
ice	Icing/defrosting
$icy\text{-}cycle$	Including cycle losses
in	Inlet
$init$	Initial
lb	Lower boundary
m	Mean value
n	Normalized
nom	Nominal value
off	Off
ol	operating level
on	On
out	Outlet
$plug$	Power at the electrical terminals
ss	Steady state
ub	Upper boundary
wol	Without losses

Mathematical description

Sign convention: added power or energy is always positive, emitted always negative.

Steady state condenser and compressor power

The biquadratic polynomial coefficients corresponding to each operating level of the heat pump must be determined in advance, using the external program 'Polynom' or YUM. After reading in each set of coefficients, they are multiplied by a scaling factor:

$$bq_{ol,i} = f \cdot bq_{ol,i}$$

$$bp_{ol,i} = f \cdot bp_{ol,i}$$

for $ol=1, 2$ and $i=1\dots6$

Eq. 1

The steady-state power is then computed with the appropriate biquadratic polynomials for the current operating level:

$$\begin{aligned} Q_{ss,c,wol} = & bq_{ol,1} + bq_{ol,2}T_{n,e,in} + bq_{ol,3}T_{n,c,out} \\ & + bq_{ol,4}T_{n,e,in}T_{n,c,out} + bq_{ol,5}T_{n,e,in}^2 + bq_{ol,6}T_{n,c,out}^2 \end{aligned}$$

Eq. 2

$$\begin{aligned} P_{ss,plug} = & bp_{ol,1} + bp_{ol,2}T_{n,e,in} + bp_{ol,3}T_{n,c,out} \\ & + bp_{ol,4}T_{n,e,in}T_{n,c,out} + bp_{ol,5}T_{n,e,in}^2 + bp_{ol,6}T_{n,c,out}^2 \end{aligned}$$

Eq. 3

In the polynomial, normalized temperatures according to the formula

$$T_n = \frac{T [^{\circ}C]}{273.15} + 1.0$$

Eq. 4

are used.

Iteration of condenser outlet temperature

The condenser outlet temperature is used as an independent variable in Eq. 2 and Eq. 3. Since the condenser outlet temperature is also dependent of the result of Eq. 2 and Eq. 3, it must be calculated iteratively. The iteration is carried out with the Van Wijngaarden-Decker-Brent algorithm [3]. This algorithm combines the stability of the bisection with the calculation speed of the inverse quadratic interpolation.

Cycling losses

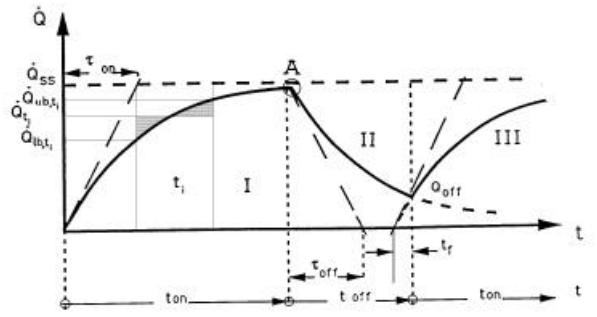


Fig. 2: Cycling losses shown with an example of a discrete time step.

After the heat pump is switched on, the machine has to be heated up and the pressure difference between the evaporator and the condenser must be built up, resulting in a power reduction during start-up. The transient power reduction during the heating-up process of an initially cold heat pump (area I) can be described using an exponential transient

$$\Delta \dot{Q}_{on,c} = \dot{Q}_{ss,c} e^{-\frac{t_{on}}{\tau_{on,ol}}} \quad \text{Eq. 5}$$

where the time constant $\tau_{on,ol}$ may depend on the operating level of the heat pump. The resulting effective condenser power (without icing and defrosting losses) is then:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_c &= \dot{Q}_{ss,c} - \Delta \dot{Q}_{on,c} \\ &= \dot{Q}_{ss,c} \left(1 - e^{-\frac{t_{on}}{\tau_{on,ol}}} \right) \end{aligned} \quad \text{Eq. 6}$$

In the event that the heat pump has not cooled down completely, the switch-on time can be offset by a time shift t_f according to Fig. 2 (area III), and Eq. 6 can therefore be written as:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_c &= \dot{Q}_{ss,c} - \Delta \dot{Q}_{on,c} \\ &= \dot{Q}_{ss,c} \left(1 - e^{-\frac{t_f + t_{on}}{\tau_{on,ol}}} \right) \end{aligned} \quad \text{Eq. 6}$$

In terms of the time shift t_f , the effective condenser power at the moment the heat pump is switched on is given by:

$$\dot{Q}_{lb,c} = \dot{Q}_{ss,c} \left(1 - e^{-\frac{t_f}{t_{on,ol}}} \right)$$

Eq. 7

Eq. 7 can be solved to obtain the time shift t_f in terms of the condenser power $\dot{Q}_{lb,c}$:

$$t_f = -\tau_{on,ol} \ln \left(1 - \frac{\dot{Q}_{lb,c}}{\dot{Q}_{ss,c}} \right)$$

Eq. 8

The condenser power (Eq. 6) can be specified using the time shift t_f from Eq. 8, or, alternatively, it can be specified directly in terms of $\dot{Q}_{lb,c}$:

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_{ss,c} - (\dot{Q}_{ss,c} - \dot{Q}_{lb,c,init}) e^{-\frac{t_{on}}{t_{on,ol}}}$$

Eq. 9

where $\dot{Q}_{lb,c,init}$ denotes the initial value of $\dot{Q}_{lb,c}$ at the moment the heat pump is changing its operating level (border of area II and area III). In contrast to Eq. 8, this expression remains valid even if $\dot{Q}_{ss,c} < \dot{Q}_{lb,c}$.

Whenever the heat pump is switched off, its energy is assumed to decrease exponentially, and the initial value of the cooling-down function needs to be known (Fig. 2, point A). Consequently, the power at the upper boundary of the current time interval must be continually recalculated during the operating phase using the expression

$$\dot{Q}_{ub,c} = \dot{Q}_{ss,c} + (\dot{Q}_{lb,c,init} - \dot{Q}_{ss,c}) e^{-\frac{t_{on}}{t_{on,ol}}}$$

Eq. 10

In the event that the heat pump is switched off, the corresponding cooling-down curve in Fig. 2 (area II) is calculated analogously to the start-up transient previously described:

$$\dot{Q}_{loss,c} = \dot{Q}_{ss,c,nom} e^{-\frac{t_f + t_{off}}{t_{off}}}$$

Eq. 9

The cooling-down process is assumed to be proportional to the nominal power of the heat pump (at 7°C evaporator inlet temperature,

35°C condenser outlet temperature and the maximum operating level). Therefore, the time constant for the cooling-down process which is derived from measurement data has to be based on this nominal power.

The time shift t_f is calculated analogously to that in Eq. 8, but with a decreasing exponential function:

$$\dot{Q}_{lb,c} = \dot{Q}_{ss,c,nom} e^{-\frac{t_f}{t_{off}}}$$

Eq. 10

$$t_f = -t_{off} \ln \left(1 - \frac{\dot{Q}_{lb,c}}{\dot{Q}_{ss,c,nom}} \right)$$

Eq. 11

The power at the lower boundary of the interval of the current time step t is equal to the power at the upper boundary of the last time step $t \Delta t$. The latter is already computed with Eq. 9.

Therefore, the cycle loss at the upper boundary of the current time interval is given by

$$\dot{Q}_{ub,c} = \dot{Q}_{ss,c,nom} e^{-\frac{t_f + t_{ub}}{t_{off}}}$$

Eq. 12

where t_{ub} is the difference between the upper boundary of the current time interval and the shut-down time.

This value will be used if the heat pump is switched on again in the next time step.

The mean condenser power over the current time step is calculated using the integral of the power (Eq. 13) over the time step

$$\dot{Q}_{m,c} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{lb}}^{t_{ub}} \dot{Q}_c dt$$

$$= \dot{Q}_{ss,c} + \frac{t_{on,ol}}{\Delta t} (\dot{Q}_{ss,c} - \dot{Q}_{lb,c,init}) \left(e^{-\frac{t_{ub}}{t_{on,ol}}} - e^{-\frac{t_{lb}}{t_{on,ol}}} \right)$$

Eq. 13

The COP is therefore, taking the cycling losses into account:

$$COP_{cycle} = \frac{-\dot{Q}_{m,c}}{P_{plug}}$$

Eq. 14

Icing and defrosting of the evaporator

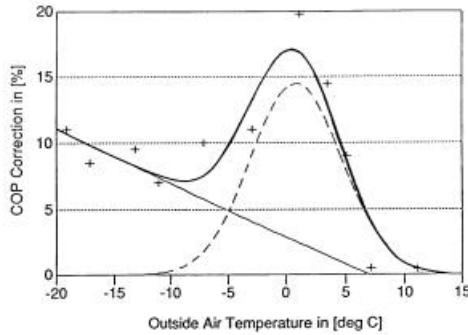


Fig. 3: COP reduction due to icing and defrosting of the evaporator. (Dots indicate measurement data)

The relative variation of the COP due to frosting and defrosting of the evaporator is described by a modified Gauss curve [4] (see Fig. 3).

The curve results from a superposition of a Gauss curve with a straight line. The Gauss approximation represents the maximal frost occurrence between 0°C and +5°C (high absolute air humidity). The straight line stands for the energy input for defrosting, which increases with decreasing outside air temperature. This energy is used for heating up the metal of the evaporator, the refrigeration in the evaporator and the heating up and melting of the ice.

The relative variation of the COP can therefore be calculated according to:

For $A + BT_{e,in} > 0$:

$$\Delta COP_{ice} = A + BT_{e,in} + Ce^{-\frac{(T_{e,in}-D)^2}{E}}$$

For $A + BT_{e,in} \leq 0$

$$\Delta COP_{ice} = Ce^{-\frac{(T_{e,in}-D)^2}{E}}$$

Eq. 15

The COP in consideration of all losses (cycle loss, icing and defrosting) can be computed with:

$$COP_{corr} = COP_{icyle} \left(1 - \Delta COP_{ice} \right)$$

Eq. 16

Condenser and evaporator power

With the corrected coefficient of performance COP_{corr} , the condenser and evaporator power can be calculated according to

$$\dot{Q}_{m,c} = -COP_{corr} P_{plug}$$

Eq. 17

$$For -(\dot{Q}_{m,c} + P_{comp}) > 0$$

$$\dot{Q}_{m,e} = -(\dot{Q}_{m,c} + P_{comp})$$

$$For -(\dot{Q}_{m,c} + P_{comp}) \leq 0$$

$$\dot{Q}_{m,e} = 0$$

Eq. 18

Finally, the outlet temperature of the condenser and evaporator can be computed with:

$$T_{c,out,corr} = T_{c,in} - \frac{\dot{Q}_{m,c}}{\dot{m}_c c_c}$$

Eq. 19

$$T_{e,out,corr} = T_{e,in} - \frac{\dot{Q}_{m,e}}{\dot{m}_e c_e}$$

Eq. 20

Heat pump mode

The variable hpmode is set on the output #12. It is an indicator that shows in which mode the heat pump is currently operating. The following modes are possible:

hpmode	Description
100 + ol	Heat pump on, usual operation on operating level 'ol'
200	Heat pump switched off due to signal from external controller (yhp=0)
210	Low-pressure error. Evaporator inlet temperature lower than low-pressure thermostat
220	Low-pressure error. Evaporator outlet temperature lower than low-pressure thermostat
230	Low-pressure error. No mass flow through evaporator
250	High-pressure error. Condenser inlet temperature higher than high-pressure thermostat
260	High-pressure error. Condenser outlet temperature higher than high-pressure thermostat
270	High-pressure error. No mass flow through condenser

Component configuration

Parameter	Fortran variable	Description			
1	scale	Scale factor for heat pump power, uniformly applied to both operating levels	18	nchange-max	evaporator inlet temp. +7°C, condenser outlet temp. +35°C, max. operating level
2	ce	specific heat of evap. fluid	19	LUNbq(1)	Maximal number of changes of the heat pump mode during a TRNSYS timestep
3	cc	specific heat of cond. fluid			
4	Pcar	power of carter heating	19	LUNbq(1)	Logical unit number of file containing the polynomial coefficients of the condenser power corresponding to operating level 1
5	loprth	Set point of low-pressure thermostat (temperature)	20	LUNbq(2)	Logical unit number of file containing the polynomial coefficients of the condenser power corresponding to operating level 2
6	hiprth	Set point of high-pressure thermostat (temperature)	21	LUNbp(1)	Logical unit number of file containing the polynomial coefficients of the compressor power corresponding to operating level 1
7	airhp	Flag for evaporator icing/defrosting (0: No icing/defrosting is calculated, 1: Icing/defrosting is calculated)	22	LUNbp(2)	Logical unit number of file containing the polynomial coefficients of the compressor power corresponding to operating level 2
8	COPcorr1	1 st COP correction value on straight line of frost curve			assign filename LUNbq(1)
9	COPcorr2	2 nd COP correction value on straight line of frost curve			assign filename LUNbq(2)
10	COPcorr3	Maximum COP correction on Gauss curve (not on the superposition of the Gauss curve and the straight line!)			assign filename LUNbp(1)
11	Tdbcrr1	Outside air temperature at 1 st COP correction value			assign filename LUNbp(2)
12	Tdbcrr2	Outside air temperature at 2 nd COP correction value			
13	Tdbcrr3	Outside air temperature at maximum of Gauss curve			
14	Tdbcrr4	Width (temperature) of the gauss curve on the half height of the Gauss maximum			
15	tauon(1)	Heat-up time constant for operating level 1, related to the mean operation power			
16	tauon(2)	Heat-up time constant for operating level 2			
17	tauoff	Cool-down constant, related to			
					All files must be generated with one of the two programs YUM or Polynom. If the YUM-files are used, the first 10 rows have to be expanded to 80 character (fill in blanks).
Input	Fortran variable	Description			
1	mdote	Mass flow evaporator			
2	Tein	Inlet temperature evaporator			
3	mdotc	Mass flow condenser			
4	Tcin	Inlet temperature condenser			
5	yhp	Control signal for heat pump operating level (0: off, 1: level 1, 2: level 2)			
6	ycar	Control signal for carter heating (0: off, 1: on)			

Output	Fortran variable	Description	Literature
1	mdote	Mass flow evaporator	1
2	Teout	Outlet temperature evaporator	
3	mdotc	Mass flow condenser	
4	Tcoutc	Outlet temperature condenser	
5	Qdotmc	Mean condenser power over the time step	2
6	Qdotme	Mean evaporator power over the time step	
7	Pcomp	Compressor power	
8	Pcar	Carter heating power	
9	(Pcomp+Pcar)	Sum of compressor and carter heating power	3
10	COPc	Coefficient of performance, including cycling and icing/defrost losses	
11	deltCOP	Relative COP reduction due to icing/defrost losses	
12	hpmode	Operation mode of heat pump	
13	switch	Number of heat pump switch-ons since start of simulation	
14	timeint	If the heat pump is changed from not running to running in the <i>current</i> time step: Timedifference between the last switch on signal and the current time step, otherwise: timeint = 0.	4

1.3 TRNSYS-Type für eine Erdwärmesonde

TRNSYS Type

**Vertical Borehole Heat Exchanger
EWS Model**

Version 2.4

Model description and implementing into TRNSYS

Developed in the project
Low Temperature Low Cost Heat Pump Heating System

carried out by the Information Center for Electricity Applications
under contract of the Swiss Federal Office of Energy

Michael Wetter, ZTL Luzern
Arthur Huber, Huber Energietechnik, Zürich

November 7, 1997

Type250: Vertical Borehole Heat Exchanger, EWS Model

General description

With this TRNSYS type, vertical borehole heat exchangers with double-U-pipes can be simulated. They are normally used as heat sources for ground coupled heat pumps. But it is also possible to use them directly (without a heat pump) in air-conditioning systems for cooling purposes.

To simulate heating systems with heat pumps, it is very important, that short time steps can be simulated and the transient behavior is calculated properly, since most of these heat pumps are controlled by turning the pump on and off. Measurements have shown that the start up losses (cycling losses) of heat pumps normally cannot be neglected. Therefore it is also important that the model of the heat source is able to predict the transient behavior correctly. Furthermore, a PC should take not more than a few minutes of computational time for the simulation of a whole year.

The problem can be solved by a simulation of the transient heat flux in the earth within a radius of about 2 m around the borehole with the Crank-Nicholson algorithm. In the vertical direction, the earth is divided into several, horizontal layers. Each layer can have thermal properties of its own. The brine is simulated dynamically to take into account the transient behavior when starting up. For the outer boundary condition, the analytical formula of Werner [5] for constant heat extraction could be adapted for the present problem. This formula belongs to a group of analytical solutions first described by Kelvin in his line source theory. By superposing constant heat extractions, starting at different time steps, it is possible to calculate the temperature profile at the outer boundaries of the simulation area and even to predict properly the refilling of the temperature sink in the summer.

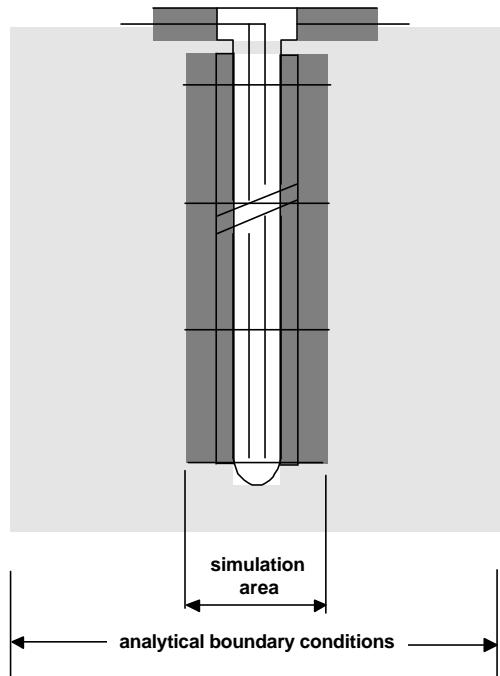


Fig. 4: Simulation of the earth next to the borehole with Crank-Nicholson schema and analytical outer boundary conditions with an adaptation of the formula of Werner [5]

A more comprehensive description of the used models and a comparison of calculations with measurements can be found in [2]. In these comparisons the transient behavior was investigated as well as the long term behavior over a period of 4½ years. They showed very good correspondence between calculation and measurement. To get such a good result, though, it is crucial to know the thermal properties of the ground and the temperature profile at the beginning of the simulation period. The best model cannot help, if they are not known. Usually a good guess for the thermal properties can be found in [4].

Symbols

Variables

α_0	Heat transfer coefficient from the brine to the pipes at no operation	R_a	Internal thermal resistance
α_1	Heat transfer coefficient from the brine to the pipes with running pump	R_b	Borehole thermal resistance
Δ	Difference	t	time
λ	Thermal conductivity	T	Temperature
ν	Kinematic viscosity	T_b	Borehole temperature
ρ	Density	T_{Earth}	Temperature of the earth
ξ	Friction factor	T_{Down}	Temperature of the downward flowing brine
C	Heat capacity	T_{Up}	Temperature of the upward flowing brine
c	specific heat capacity	T_{Source}	Source temperature (brine coming out of the vertical borehole heat exchanger)
D_b	Borehole diameter	T_{Sink}	Brine temperature at the inlet of the vertical borehole heat exchanger
D_i	Inner diameter of the pipes	v	Brine velocity in the pipes
dl	Length of a borehole element	Indices	
dt	Internal time step to calculate the earth	DimAxi	Number of grid points axial direction
$dt2$	Internal time step to calculate the brine	DimRad	Number of grid points radial direction
f	grid factor in radial direction	i	Axial coordinate
L	Thermal conductance	j	Radial coordinate
L_0	Thermal conductance of the flowing brine in vertical direction	k	time coordinate
L_1	Thermal conductance between the brine and the filling material	lam	Laminar
m	mass of the brine in the element dl in 2 pipes	p	constant pressure
\dot{q}	Specific heat extraction	turb	Turbulent
r	Radial distance from the borehole axis	Erde	Earth
r_o	Inner radius of the pipes	Fill	Filling material
r_1	Radius of the borehole	Sole	Brine
r_m	Radius of the outer boundary of the simulation area	t	Time
r_z	Radial center of gravity	Woche	week of focus for the outer boundary conditions
R	Thermal resistance	Dimensionless Numbers	
		Nu	Nusselt Number
		Pr	Prandtl Number
		Re	Reynolds Number

Mathematical description

The Crank - Nicholson schema

In radial direction the one-dimensional heat equation or Fourier equation has to be solved:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad \text{with } T = T(t, r)$$

Eq. 21

As an implicit equation of differences it is written as:

$$T_{k+1,j} - \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (T_{k+1,j-1} - T_{k+1,j}) - \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (T_{k+1,j+1} - T_{k+1,j}) =$$

$$T_{k,j} + \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (T_{k,j-1} - T_{k,j}) + \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (T_{k,j+1} - T_{k,j})$$

Eq. 22

Index k belongs to the time coordinate and index j to the radial coordinate. C is the capacity which is described below. L is the conductance, the reciprocal of a resistance:

$$L = \frac{1}{R} = \frac{Q}{\Delta T}$$

Eq. 23

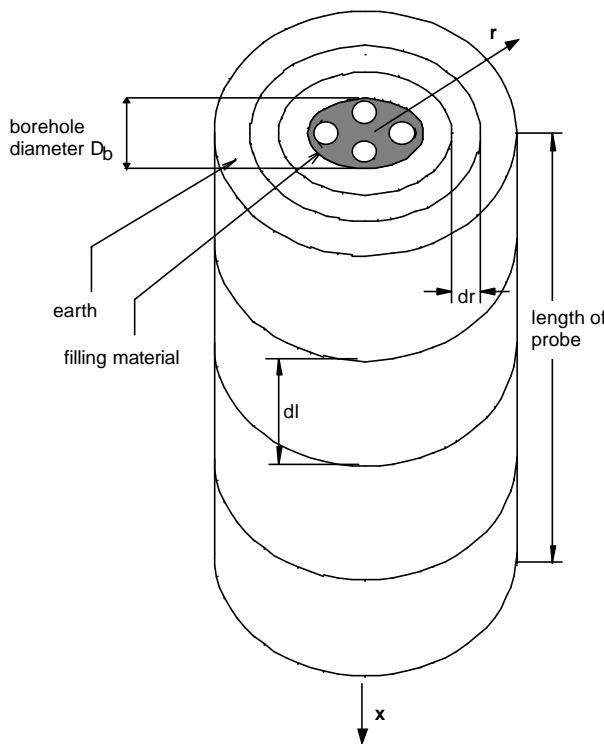


Fig. 5: Cylindrical coordinate system to solve the one-dimensional heat equation for each axial layer, with thermal properties of its own in each layer.

Arithmetical grid

In axial (vertical) direction, the borehole heat exchanger and the adjacent earth are divided into equidistant layers of length

$$dl = \frac{\text{borehole length}}{\text{DimAxi}}$$

Eq. 24

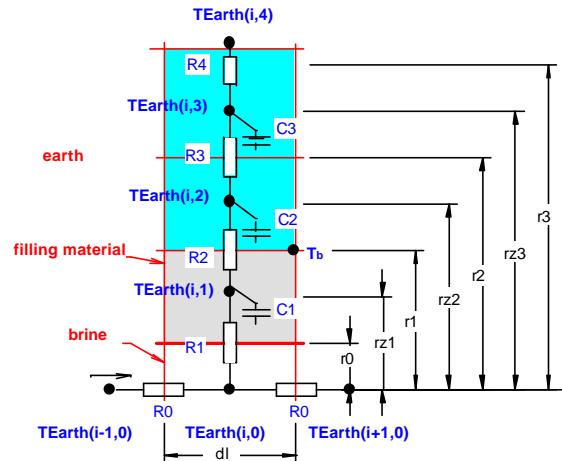


Fig. 6: Overview of the naming in a vertical layer

The grid in radial direction is variable. It is defined by the grid factor

$$\text{grid factor } f = \frac{r_{j+1} - r_j}{r_j - r_{j-1}}$$

Eq. 25

A grid factor 2 doubles the difference of the radii of two neighboring calculation volumes.

The simulation area is defined by pre-setting a maximum radius. The grid is given then by the following expression:

$$r_0 = D_i/2 = \text{inner radius of the pipes}$$

$$r_1 = D_b/2 = \text{radius of the borehole}$$

$$r_m = \text{maximum radius of the simulation area}$$

$$j \geq 2: r_j = r_{j-1} + (r_m - r_1) \frac{1-f}{1-f^{m-1}} f^{j-2}$$

Eq. 26

Definition of capacities and resistances

Heat capacities

Heat capacities are defined for the filling material and for all layers of the surrounding ground. The heat capacity of the pipe wall is ignored:

$$C_1 = c_{p, \text{Fill}} \mathbf{r}_{\text{Fill}} \mathbf{p} (r_1^2 - 4 r_0^2) dl$$

$$C_2 = c_{p, \text{Erde}} \mathbf{r}_{\text{Erde}} \mathbf{p} (r_2^2 - r_1^2) dl$$

$$C_3 = c_{p, \text{Erde}} \mathbf{r}_{\text{Erde}} \mathbf{p} (r_3^2 - r_2^2) dl$$

Eq. 27

Thermal resistances

The heat resistances of the filling and the ground are:

$$R_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2 \mathbf{p} \mathbf{a} r_0 dl} + \frac{1}{2 \mathbf{p} \mathbf{I}_{\text{Fill}} dl} \ln \frac{r_1 - rz_1}{r_0} \right)$$

Eq. 28

$$R_2 = \frac{1}{2 \mathbf{p} dl} \left(\frac{1}{\mathbf{I}_{\text{Fill}}} \ln \frac{r_1}{rz_1} + \frac{1}{\mathbf{I}_{\text{Erde}}} \ln \frac{rz_2}{r_1} \right)$$

Eq. 29

$$R_3 = \frac{1}{2 \mathbf{p} dl} \frac{1}{\mathbf{I}_{\text{Erde}}} \ln \frac{rz_3}{rz_2}$$

Eq. 30

$$R_4 = \frac{1}{2 \mathbf{p} \mathbf{I}_{\text{Erde}} dl} \ln \frac{r_3}{rz_3}$$

Eq. 31

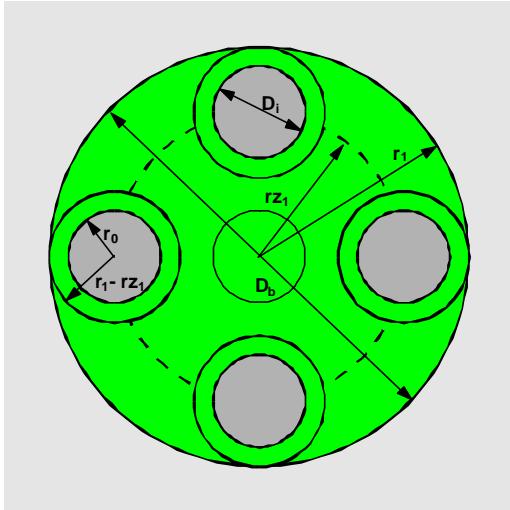


Fig. 7: Double-U-pipe borehole system

R_3 and R_4 can be obtained analytically. With R_1 and R_2 this is not possible, since we do not know the precise location of the pipes in the borehole. So far, we assumed that they are rather peripherally located. But the user of the present TRNSYS-Type is free to use any other value for R_1 , since R_1 can optionally be set as an input parameter. As a third possibility, we can use the internal thermal resistance

$$R_a = 4 dl R_1$$

Eq. 32

and the borehole thermal resistance

$$R_b = \frac{dl (T_{\text{Sole}} - T_b)}{\dot{Q}}$$

Eq. 33

as they were defined by Hellström [1].

If only R_b is given instead of R_1 , then R_1 can be calculated with the following equation:

$$R_1 = \frac{R_b}{dl} - \frac{1}{2 \mathbf{p} \mathbf{I}_{\text{Fill}} dl} \ln \frac{r_1}{rz_1}$$

Eq. 34

If R_a and R_b are given as parameters, then R_1 can be calculated with

$$R_1 = \frac{R_a}{4 dl}$$

Eq. 35

and R_2 with

$$R_2 = \frac{(R_b - \frac{R_a}{4})}{dl} + \frac{1}{2 \mathbf{p} dl} \frac{1}{\mathbf{I}_{\text{Erde}}} \ln \frac{rz_2}{r_1}$$

Eq. 36

With the input parameter calcBTR the preferred option can be chosen by the user :

calcBTR	R_1	R_2
1	Eq. 28	Eq. 29
2	R_1 given as input	Eq. 29
3	Eq. 34	Eq. 29
4	Eq. 35	Eq. 36

Solving the equations

Eq. 22 can be rewritten as a matrix equation:

$$[A] \cdot \{T\}_i^{k+1} = [F] \cdot \{T\}_i^k$$

Eq. 37

To find the new temperature field, the Matrix A has to be inverted

$$\{T\}_i^{k+1} = [B] \cdot \{T\}_i^k$$

Eq. 38

where B is defined by:

$$[B] = [A]^{-1} \cdot [F]$$

Eq. 39

Non steady-state calculation of the brine

The brine temperature is used as the inner boundary condition for the simulation of the earth with the Crank-Nicholson schema. If we set the flag *Stationaer* = 0 then the brine temperature is calculated with an explicit, non steady-state time-step method.

The velocity of the brine in the pipes can be calculated with the mass flow rate:

$$v = \frac{\dot{m}}{2 \mathbf{p} r_0^2 \mathbf{r}_{Sole}}$$

Eq. 40

As in the radial direction, we can define a thermal conductance in axial direction:

$$L_0 = c_{p,Sole} \dot{m} = 2 \mathbf{p} r_0^2 v \mathbf{r}_{Sole} c_{p,Sole}$$

Eq. 41

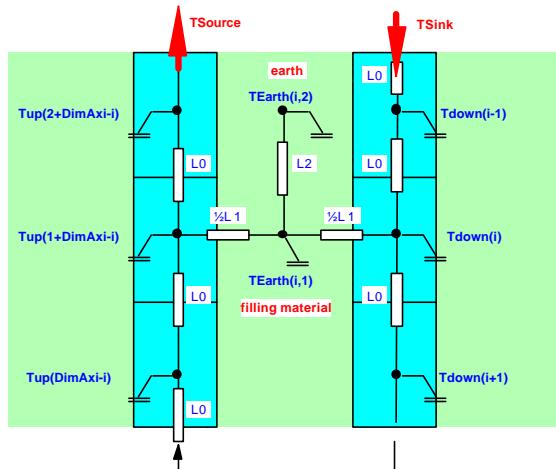


Fig. 8 Non steady-state simulation of the brine with an explicit time-step method

Now we calculate the energy balance for the upward and the downward flowing brine in a vertical layer. To simplify the calculations, we combine the two pipes in which the brine flows in the same direction and treat them as a single element for computational purposes. The mass of this element is then

$$m = 2 \mathbf{p} r_0^2 dl \mathbf{r}_{Sole}$$

Eq. 42

The energy balance for such an element gives:

$$T_{down_{k+1,i}} = T_{down_{k,i}} + (T_{down_{k+1,i-1}} - T_{down_{k,i}}) \frac{L_0 dt}{m cp}$$

$$+ (T_{Earth_{k,i,1}} - T_{down_{k,i}}) \frac{L_1 dt}{2 m cp}$$

Eq. 43

and in the upward direction

$$T_{up_{k+1,i}} = T_{up_{k,i}} + (T_{up_{k+1,i-1}} - T_{up_{k,i}}) \frac{L_0 dt}{m cp}$$

$$+ (T_{Earth_{k,1+DimAxi-i,1}} - T_{up_{k,i}}) \frac{L_1 dt}{2 m cp}$$

Eq. 44

with the boundary condition

$$T_{down_{k+1,0}} = TSink$$

Eq. 45

$$T_{up_{k+1,0}} = T_{down_{k+1,DimAxi}}$$

Eq. 46

These equations have to be solved in direction of the flowing brine.

Steady-state calculation of the brine

As an option, a steady-state calculation can be carried out for the brine. To do so, we set the input parameter *Stationaer* = 1. Then the energy balance gives us

$$T_{down_i} = \frac{\left(L_0 T_{down_{i-1}} + \frac{L_1}{2} T_{Earth_{i,1}} \right)}{\left(L_0 + \frac{L_1}{2} \right)} \text{ and}$$

Eq. 47

$$T_{up_i} = \frac{\left(L_0 T_{up_{i-1}} + \frac{L_1}{2} T_{Earth_{1+DimAxi-i,1}} \right)}{\left(L_0 + \frac{L_1}{2} \right)}$$

Eq. 48

Outer boundary condition

For the outer boundary condition, the analytical formula of Werner [5] for constant heat extraction can be adapted for the present problem. This formula belongs to a group of analytical solutions first described by Kelvin in his line source theory. By superposing constant heat extractions, starting at different time steps, it is possible to calculate the temperature profile at the outer boundaries of the simulation area and even to predict the refilling of the temperature sink in the summer properly.

The temperature drop in the earth in function of the distance from the borehole and time can be written as:

$$\Delta T(r, t) = \frac{\dot{q}}{4 \mathbf{p} \mathbf{I}} W(u) \quad \text{Eq. 49}$$

with

$$W(u) = \left[-0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \right] \quad \text{Eq. 50}$$

and

$$u(r, t) = \frac{c_{p, Erde} r_{Erde}}{4 t \mathbf{I}_{Erde}} r^2 \quad \text{Eq. 51}$$

In these formulas, the specific heat extraction

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{\text{borehole length}} \quad \text{Eq. 52}$$

has to be constant. Since in real boreholes the heat extraction is not constant, we must superpose different constant heat extractions q , starting at different time steps to get a variable heat extraction:

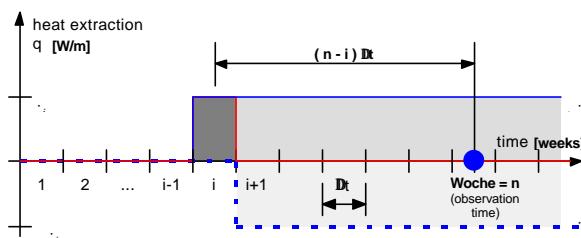


Fig. 9: To get a discrete heat extraction q_i we superpose q and $-q$, starting at different time steps.

To get the temperature drop at the time $(n \cdot \Delta t)$ we have to add all the effects of this constant heat extractions in the following way:

$$\Delta T(r, t = n \cdot \Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{W(u(r, t = i \cdot \Delta t))}{4 \mathbf{p} \mathbf{I}} [\dot{q}_{n-i+1} - \dot{q}_{n-i}] \quad \text{Eq. 53}$$

with

$$\dot{q}_0 = 0 \quad \text{Eq. 54}$$

Thus the temperature at the outer boundary of the simulation area can be written as:

$$T_{Earth}(DimRad + 1) = T_0(i) - \Delta T(r = r_{DimRad}) \quad \text{Eq. 55}$$

Of course this has to be calculated for each vertical layer with its own specific heat extraction rate.

These outer boundary conditions are calculated weekly and then held constant during the whole week.

Heat transfer coefficient

The heat transfer coefficient from the brine to the pipes can be calculated from the Nusselt Number:

$$a_1 = \frac{Nu(\text{Re}, \text{Pr}) \mathbf{I}_{Sole}}{D_i} \quad \text{Eq. 56}$$

When we have laminar flow ($\text{Re} < 2'300$), the Nusselt Number is taken constant:

$$Nu_{lam} = 4.36 \quad \text{Eq. 57}$$

With turbulent flow ($\text{Re} > 10'000$), the Petukhov Formula [3] is used:

$$Nu_{turb} = \frac{\frac{x}{8}}{K_1 + K_2 \sqrt{\frac{x}{8}} \left(\text{Pr}^{2/3} - 1 \right)} \text{Re} \text{Pr} \quad \text{Eq. 58}$$

with

$$K_1 = 1 + 27.2 \left(\frac{x}{8} \right) \quad \text{Eq. 59}$$

$$K_2 = 11.7 + 1.8 \text{ Pr}^{-1/3}$$

Eq. 60

According to the recommendations of Merker [3], the friction factor ξ for turbulent flow can be calculated with

$$\xi = \frac{1}{(1.82 \log(\text{Re}) - 1.64)^2}$$

Eq. 61

In the transition laminar - turbulent ($2'300 < \text{Re} < 10'000$) we use

$$Nu = Nu_{lam} \exp \left[\ln \left(\frac{Nu_0}{Nu_{lam}} \right) - \frac{\ln \left(\frac{\text{Re}}{2'300} \right)}{\ln \left(\frac{10'000}{2'300} \right)} \right]$$

Eq. 62

with

$$Nu_0 (\text{Re} = 10'000) = \frac{\frac{x_0}{8}}{1.107 + K_2 \sqrt{\frac{x_0}{8}} \left(\text{Pr}^{2/3} - 1 \right)} \text{ Re } \text{ Pr}$$

Eq. 63

$$x_0 = 0.031437$$

Eq. 64

When the pump is not running, we use the following heat transfer coefficient:

$$a_0 = \frac{I_{Sole}}{\frac{D_i}{2} (1 - \sqrt{0.5})}$$

Eq. 65

The heat transfer coefficient is only used, when R_1 is calculated internally. Otherwise it is already included in the first thermal resistance.

Flow chart

The present model is calculating internally with smaller timesteps. These are optimized in the code, so the user does not have to be concerned with them.

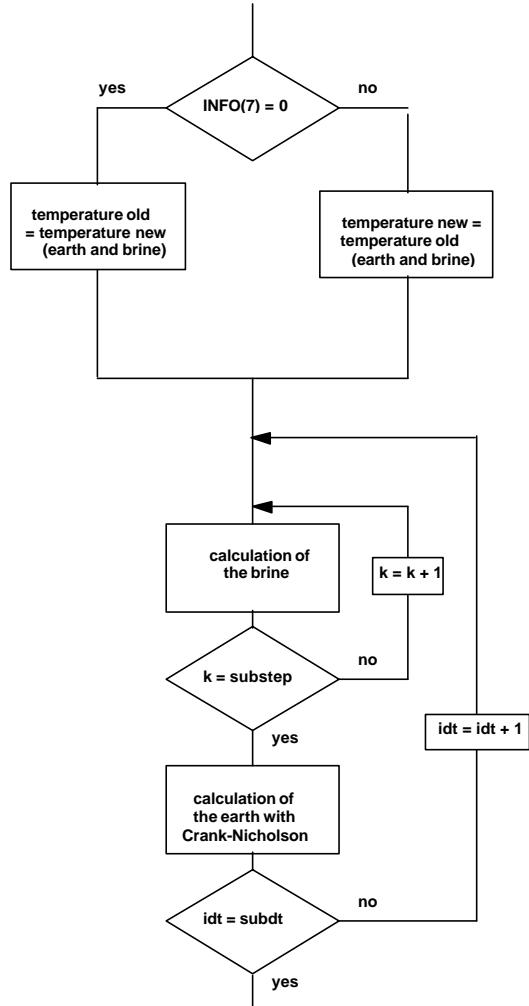


Fig. 10: Flow chart of the code.

Component configuration

Parameter	Fortran variable	Description				
1	Stationaer	Flag to set the calculation mode of the brine (1: steady-state, 0: non steady-state)	15	cpSole	Specific heat capacity of the brine	
2	calcBTR	Flag to specify the means of calculating the thermal resistances of the borehole: 1: calculate R_1 and R_2 internally 2: R_1 is an input parameter R_2 is calculated internally 3: $R_1=f(R_b)$, R_2 is calculated internally 4: $R_1=f(R_a)$, $R_2=f(R_a, R_b)$	16	rhoSole	Density of the brine	
			17	lambdaSole	Heat conductivity of the brine	
			18	nueSole	Kinematic viscosity of the brine	
			19	MonitorAxi1	Axial coordinate of the 1st monitor temperature	
			20	MonitorRad1	Radial coordinate of the 1st monitor temperature	
			21	MonitorAxi2	Axial coordinate of the 2nd monitor temp.	
3	Auslegungsmassenstrom	Mass flow rate of the brine, used to calculate the heat transfer coefficient α_1	22	MonitorRad2	Radial coordinate of the 2nd monitor temp.	
4	Rechenradius	Radius of the outer boundary r_m of the simulation area	23	MonitorAxi3	Axial coordinate of the 3rd monitor temperature	
5	Gitterfaktor	Grid factor f	24	MonitorRad3	Radial coordinate of the 3rd monitor temperature	
6	Sondenlaenge	Length of the borehole	25	MonitorAxi4	Axial coordinate of the 4th monitor temperature	
7	Sonden-durchmesser	Inner diameter of the pipes D_i	26	MonitorRad4	Radial coordinate of the 4th monitor temperature	
8	Bohrdurchmesser	Borehole Diameter D_b	27	MonitorAxi5	Axial coordinate of the 5th monitor temperature	
9	TGrad	Axial temperature gradient in the earth at the start of the simulation	28	MonitorRad5	Radial coordinate of the 5th monitor temperature	
10	Jahresmitteltemp	Average annual air temperature	29	MonitorAxi6	Axial coordinate of the 6th monitor temperature	
11	Bodenerwaermung	Average yearly temperature difference between the soil surface and the air	30	MonitorRad6	Radial coordinate of the 6th monitor temperature	
12	cpFill	Specific heat capacity of the filling material	31	MonitorAxi7	Axial coordinate of the 7th monitor temper.	
13	rhoFill	Density of the filling material				
14	lambdaFill	Heat conductivity of the filling material				

			Input	Fortran variable	Description
32	MonitorRad7	Radial coordinate of the 7th monitor temperature	1	Massenstrom	Total mass flow rate for both pipes together
33	MonitorAxi8	Axial coordinate of the 8th monitor temperature	2	TSink	Inlet temperature to the borehole (evaporator outlet temperature)
34	MonitorRad8	Radial coordinate of the 8th monitor temperature			
35	DimRad	Number of simulation points in radial direction	Out-put	Fortran variable	Description
36	DimAxi	Number of simulation points in axial direction	1	Massenstrom	Total mass flow rate for both pipes together
36 + i	cpErde(i)	Specific heat capacity of the earth in the axial layer i	2	TSource	Source temperature of the brine
36 + i + Di-mAxi	rhoErde(i)	Density of the earth in the axial layer i	3	Massenstrom*cpSol e*3.6*(TSou rce - TSink)	Heat transfer rate out of the borehole
36+i+2*Di-mAxi	lambdaErde(i)	Heat conductivity of the earth in the axial layer i	4	TEarth (monitor1)	1st monitor temperature
37 + 3*Di-mAxi	R1 or Ra or Rb	R ₁ if calcBTR = 2 R _b if calcBTR = 3 R _a if calcBTR = 4	5	TEarth (monitor2)	2nd monitor temperature
38 + 3*Di-mAxi	Rb	R _b if calcBTR = 4	6	TEarth (monitor3)	3rd monitor temperature
			7	TEarth (monitor4)	4th monitor temperature
			8	TEarth (monitor5)	5th monitor temperature
			9	TEarth (monitor6)	6th monitor temperature
			10	TEarth (monitor7)	7th monitor temperature
			11	TEarth (monitor8)	8th monitor temperature

Literature

- 1 Hellström, Göran (1991): Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Theory. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- 2 Huber, Arthur; Schuler, Othmar (1997): Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Forschungsprogramm UAW des BEW, Bern, ENET-Nr. 9658807
- 3 Merker, Günter (1987): Konvektive Wärmeübertragung. Springer-Verlag.
- 4 Sanner, Burkhard (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. in: IZW-Berichte 2/92. Karlsruhe: Fachinformationszentrum.
- 5 Werner, Alfred; Bigler, Roland; Niederhauser, Arthur et. al. (1996): Grundlagen für die Nutzung von Wärme aus Boden und Grundwasser im Kanton Bern. Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf. Schlussbericht. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kt. Bern (WEA).

1.4 TRNSYS-Type für Beschattungseinrichtung

TRNSYS Type

Storensteuerung

Modellbeschreibung und Implementation in TRNSYS

**Erstellt im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft:
Kostengünstige Niedertemperaturheizungen
mit Wärmepumpe**

Michael Wetter, ZTL Luzern

1. Februar 1997

Type219: Storensteuerung

Allgemeine Beschreibung

Mit der Storensteuerung kann eine Beschattungsvorrichtung angesteuert werden, die eine Überhitzung verhindern soll. Das Ausgangssignal ist 0 oder 1, Zwischenstellungen sind nicht möglich.

Das Ausgangssignal wird von 0 auf 1 geändert, sobald die Sonnenstrahlung und die Raumtemperatur frei wählbare Grenzwerte überschritten haben. Fällt die Sonnenstrahlung unter ihren Grenzwert, so wird das Ausgangssignal wieder auf 0 zurückgesetzt.

Formelzeichen

Variablen

I Strahlung

INFO(7) Nummer des Iterationsschrittes

ncmax Maximalbegrenzung für Anzahl Änderungen des Ausgangssignal y

T Temperatur

y Stellsignal

Indizes

air Raumluft

beam direkt

last letzter Zeitschritt

mean Mittelwert über aktuellen Zeitschritt

set Sollwert

Flussdiagramm

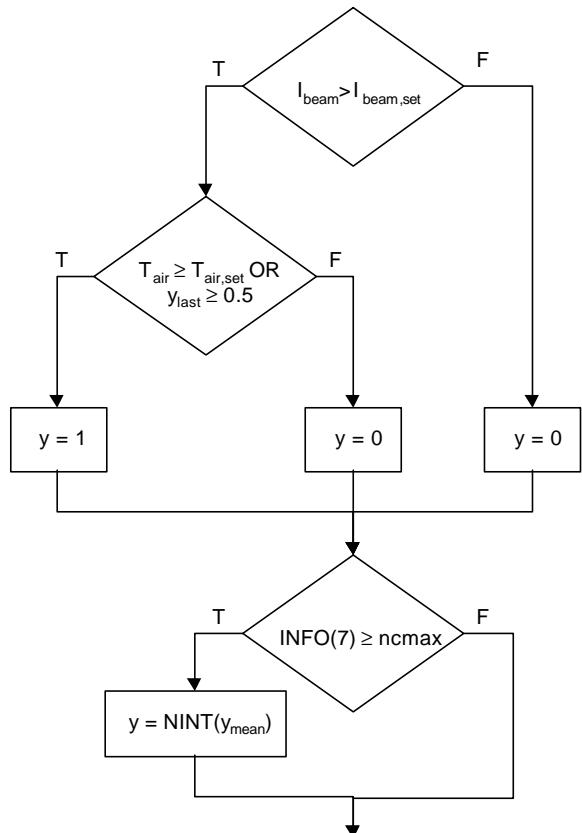


Abb. 4: Flussdiagramm Storensteuerung

Komponenten Konfiguration

Para- me- ter	Fortran Variable	Beschreibung
1	ncmax	Maximalbegrenzung für Anzahl Änderungen des Ausgangssignal y
2	lbset	Grenzwert für Direktstrahlung, ab der die Storen geschlossen oder wieder geöffnet werden
Input	Fortran Variable	Beschreibung
1	Tairset	Grenzwert für Raumtemperatur, ab der die Storen geschlossen werden
2	Tair	Raumtemperatur
3	lb	Direktstrahlung
Out- put	Fortran Variable	Beschreibung
1	y	Stellsignal für Storen

1.5 Zusammenstellung der verwendeten Ökoinventardaten

In diesem Teil werden die Art und Menge der bilanzierten Materialien und Prozesse ausgewiesen, wie sie in der Ökobilanzierung berücksichtigt wurden. Die Ökobilanzdaten der allermeisten Materialien und Prozesse (sogenannte Datenmodule) wurden aus den Standardwerken [ESU 96] und [ESU 95] übernommen, welche gemeinsam in der Datenbank ECOINVENT der ETH Zürich abgelegt sind. Die Bezeichnungen und die physikalischen Einheiten (kg, tkm, TJ etc.) der Module werden aus Gründen der Transparenz unverändert aus den Standardwerken übernommen und wiedergegeben. Die genauen Randbedingungen der Bilanzierungen in [ESU 96] und [ESU 95] sind dort nachzuschlagen. Einige Bilanzen für bisher unbeschriebene Materialien wurden neu erstellt und werden unten beschrieben.

1.5.1 Inventardaten für die betrachteten Teilsysteme

Alle Werte sind auf drei Stellen gerundet.

1.5.1.1 Approximationen

Die Herstellung von Acetylen¹ (Schweissgas) und Propan² (Kältemittel) wurden als Ethan³ bilanziert, da alle drei Stoffe bei der Erdölraffinierung im gleichen Prozess gewonnen werden [ESU 96, p.IV.130]. Das Allokationskriterium für die verschiedenen Produkte ab Raffinerie ist das Gewicht [ESU 96, p.III.7]. Daher kann 1 kg Ethan an Stelle von 1 kg Acetylen oder 1 kg Propan bilanziert werden.

Die Herstellung von R407c wird gemäss der Herstellung von R134a bilanziert (vergl. Kap. Bilanzierung von neuen Materialien und Prozessen). Messing wird als 65% Kupfer und 35% Zink bilanziert. Zink wird mit dem Modul "Zink fuer Verzinkung" verbucht. Gewisse Länder-Strommixe für Herstellungsenergien von Wärmepumpenkomponenten wurden durch ähnliche Strommixe anderer Länder approximiert. Mineralöl und Korrosionsschutzöl werden als "Heizoel Petro ab Raffinerie Euro" bilanziert. Brennstoffe für die Wärmepumpenherstellung werden als "Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro" bilanziert (ausser Acetylen).

Beim Gebäude werden relativ kleine Mengen von Parkettkleber und Keramikkleber als PUR-Kunststoff bilanziert. Fugenspachtel wird als PET-Kunststoff bilanziert.

¹Chemische Bezeichnung Ethin, H-C≡C-H

²H₃C-CH₂-CH₃

³H₃C-CH₃

1.5.1.2 Inventare Heizungssysteme: L/W-Wärmepumpe

Infrastruktur L/W-Wärmepumpe pro Betriebsjahr Datenmodule aus [ESU 96]		bilanzierte Mengen
Zink fuer Verzinkung	kg	0.0582
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.0000014
Strom Mittespannung - Bezug in B Import	TJ	0.000000495
Strom Mittespannung - Bezug in CH Import	TJ	0.000000432
Strom Mittespannung - Bezug in I	TJ	0.000000315
Strom Mittespannung - Bezug in W-D	TJ	0.000000315
Strom Mittespannung - Bezug in W-D Import	TJ	0.000000315
Strom Mittespannung - Bezug in UCPTE	TJ	0.000000221
Wasser entkarbonisiert	kg	10
Stahl niedriglegiert	kg	2.96
Kupfer	kg	1.72
Aluminium 0% Rec.	kg	0.49
PVC schlagfest	kg	0.446
Kaeltemittel R134a	kg	0.166
Gummi EPDM	kg	0.123
Karton (Verpackungs-)	kg	0.118
Polystyrol schlagfest	kg	0.0963
PUR-Hartschaum	kg	0.07
Ethylen	kg	0.0603
PET 0% Rec.	kg	0.0562
Nickel ab Anreicherung	kg	0.0525
Chemikalien organisch	kg	0.0438
Stahl unlegiert	kg	0.0175
Papier	kg	0.0131
Cadmiumfreies Hartlot	kg	0.00875
PE (HD)	kg	0.00875
Transport Frachter Uebersee	tkm	8.33
Transport LKW 28 t	tkm	2.04
Transport LKW 16 t	tkm	1.84
Transport Schiene	tkm	1.64
Heizoel Petro ab Raffinerie Euro	t	0.000128
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	0.0000011
Afaelle in Inertstoffdeponie	kg	0.875
PVC in KVA	kg	0.368
PE in KVA	kg	0.298
Elektronikafaelle	kg	0.193
Toluol p	kg	0.000263
Stahlblech verzinkt	kg	2.79
Glasfaser	kg	0.00508
Elektronikmaterial	kg	0.035
R 407c FKW p	kg	0.166

Tab. 2: Bilanzierte Materialien und Prozesse für die Infrastruktur der L/W-Wärmepumpe pro Jahr.

Betriebsenergie L/W-Wärmepumpe pro Betriebsjahr Gebäudevarianten		Strom Niederspannung - Bezug in CH Import
NOAH Leichtbau	TJ	0.0078
NOAH Massivbau	TJ	0.0078
SIA2010 Leichtbau	TJ	0.00634
SIA2010 Massivbau	TJ	0.00554

Tab. 3: Bilanzierte jährliche Betriebsenergien der L/W-Wärmepumpe für verschiedenen Gebäudevarianten.

1.5.1.3 Inventare Heizungssysteme: S/W-Wärmepumpe

Infrastruktur S/W-Wärmepumpe pro Betriebsjahr		bilanzierte Mengen
Datenmodule aus [ESU 96]		
Zink fuer Verzinkung	kg	0.00333
Strom Mittelspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.0000357
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.00000048
PE (HD)	kg	3.17
Stahl unlegiert	kg	3.75
Kupfer	kg	0.5
Stahl niedriglegiert	kg	1.1
PET 0% Rec.	kg	0.056
Kaeltemittel R134a	kg	0.0453
PVC schlagfest	kg	0.0133
Transport LKW 16 t	tkm	22.6
Transport Lieferwagen	tkm	3.59
Transport Schiene	tkm	9.35
Transport LKW 28 t	tkm	0.253
Diesel in Baumaschine	TJ	0.000277
Heizoel Petro ab Raffinerie Euro	t	0.0001
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	0.0000129
PE in KVA	kg	0.133
PVC in KVA	kg	0.0133
Zement PC-CH	kg	0.55
R 407c FKW p	kg	0.0453

Tab. 4: Bilanzierte Materialien und Prozesse für die Infrastruktur der S/W-Wärmepumpe pro Jahr.

Betriebsenergie S/W-Wärmepumpe pro Betriebsjahr		Strom Niederspannung - Bezug in CH Import
Gebäudevarianten		
NOAH Leichtbau	TJ	0.00623
NOAH Massivbau	TJ	0.00623
SIA2010 Leichtbau	TJ	0.00506
SIA2010 Massivbau	TJ	0.00442

Tab. 5: Bilanzierte jährliche Betriebsenergien der S/W-Wärmepumpe für verschiedene Gebäudevarianten.

1.5.1.4 Inventare Heizungssysteme: Ölheizung

Infrastruktur und Betrieb Ölheizung pro Betriebsjahr		bilanzierte Mengen
Datenmodule aus [ESU 96]		
Gebäudevariante NOAH LB und NOAH MB		
Stahl unlegiert °	kg	-2.59
Nutzwaerme ab Heizung 10 kW Brennwert	TJ	0.0228
Heizoel EL 2000 ab Regionallager CH °°	t	0.568
Heizoel EL ab Regionallager CH °°	t	-0.568
Gebäudevariante SIA2010 LB		
Stahl unlegiert °	kg	-2.11
Nutzwaerme ab Heizung 10 kW Brennwert	TJ	0.0185
Heizoel EL 2000 ab Regionallager CH °°	t	0.462
Heizoel EL ab Regionallager CH °°	t	-0.462
Gebäudevariante SIA2010 MB		
Stahl unlegiert °	kg	-1.84
Nutzwaerme ab Heizung 10 kW Brennwert	TJ	0.0162
Heizoel EL 2000 ab Regionallager CH °°	t	0.403
Heizoel EL ab Regionallager CH °°	t	-0.403

Tab. 6: Bilanzierte Materialien und Prozesse für Infrastruktur und Betrieb der Ölheizung pro Jahr.

°: Abzug für die in [ESU 96] bilanzierte Wärmeverteilung

°°: Ersatz des in [ESU 96] bilanzierten Heizöls Stand1990 mit Heizöl Stand 2000.

Nutzwärme ab Heizung 10kW Brennwert pro TJ Datenmodule aus [ESU 96]		bilanzierte Mengen
Abwärme in Luft s	TJ	1.17
Acetaldehyd s	kg	0.0872
Aceton s	kg	0.213
Acrolein s	kg	0.0489
Alkane s	kg	1.06
Alkene s	kg	0.0851
Aromaten s	kg	0.0851
Benzaldehyd s	kg	0.0255
Benzol s	kg	0.0851
Butan s	kg	0.638
CH4 Methan s	kg	0.851
CO Kohlenmonoxid s	kg	5.32
CO2 Kohlendioxid s	kg	78700
Cu Kupfer s	kg	0.000745
Ethan s	kg	0.0851
Ethen s	kg	0.213
Ethin s	kg	0.0426
Formaldehyd s	kg	0.0255
HCl Salzsäure s	kg	0.1
HF Fluorwasserstoff s	kg	0.00958
Hg Quecksilber s	kg	0.000532
N2O Lachgas s	kg	0.745
NOx Stickoxide als NO2 s	kg	26.6
PAH Polzyklische aromatische HC s	kg	0.000489
Partikel s	kg	0.106
Pentane s	kg	0.426
Propan s	kg	0.128
Propen s	kg	0.0851
Propionaldehyd s	kg	0.0255
SOx als SO2 s	kg	69.2
TCDD-Aequivalente	ng	60.6
Toluol s	kg	0.0426
Zn Zink s	kg	0.000745
Aluminium 0% Rec.	kg	14.4
Beton (ohne Armierungseisen)	ka	263
Beton in Inertstoffdeponie	kg	133
Cadmiumfreies Hartlot	kg	2.81
Deckfarbe	kg	3.51
Erdgas in Industr.f. Low-NOx>100kW Euro	TJ	0.00176
Gusseisen	kg	8.43
Heizöl EL ab Regionallager CH	t	24.9
Karton (Verpackungs-)	kg	3.51
Karton in KVA	kg	3.51
Kunststoffe in KVA	kg	7.37
Kupfer	kg	13.3
Kupfer in Inertstoffdeponie	kg	2.11
Mineralwolle	kg	6.32
Mineralwolle in Inertstoffdeponie	kg	6.32
PE (HD)	kg	7.37
Schweissstaub in Sonderabfallbehandlung	kg	0.14
Stahl hochlegiert	kg	3.51
Stahl unlegiert	kg	355
Strom Mittelspannung - Bezug in CH	TJ	0.0000983
Strom Niederspannung - Bezug in CH	TJ	0.0351
Transport Lieferwagen <3.5 t	tkm	26
Transport LKW 28 t	tkm	26
Transport Schiene	tkm	249
Wasser	kg	70.2
Flaechen IV-IV	m2a	74.4

Tab. 7: Bilanzierte Materialien und Prozesse im Modul "Nutzwärme ab Heizung 10 kW Brennwert" (bzw. der darin bezogenen Module "Heizöl EL in Heizung 10 kW Brennwert" und "Infra Heizkessel Öl 10 kW") pro TJ Nutzwärme.

1.5.1.5 Inventare Heizungssysteme: Gasheizung

Infrastuktur und Betrieb Gasheizung pro Betriebsjahr Datenmodule aus [ESU 96]	bilanzierte Mengen	
Gehäudevariante NOAH I R und NOAH MR		
Stahl unlegiert °	kg	-2.33
Nutzwaerme ab Heizung LowNOx KOND.<100 kW	TJ	0.0228
Gehäudevariante SIA2010 I R		
Stahl unlegiert °	kg	-1.89
Nutzwaerme ab Heizung LowNOx KOND.<100 kW	TJ	0.0185
Gehäudevariante SIA2010 MR		
Stahl unlegiert °	kg	-1.65
Nutzwaerme ab Heizung LowNOx KOND.<100 kW	TJ	0.0162

Tab. 8: Bilanzierte Materialien und Prozesse für Infrastruktur und Betrieb der Gasheizung pro Jahr.

°: Abzug für die in [ESU 96] bilanzierte Wärmeverteilung

Nutzwaerme ab Heizung LowNOx KOND.<100 kW pro TJ Datenmodule aus [ESU 96]	bilanzierte Mengen	
Nitrate f	kg	0.134
Nitrite f	kg	0.00309
Sulfate f	kg	0.0516
Sulfite f	kg	0.0516
Abwaerme in Luft p	TJ	0.0000949
Abwaerme in Luft s	TJ	1.14
Acetaldehyd s	kg	0.00103
BaP Benzo(a)pyren s	kg	0.0000103
Benzol s	kg	0.412
Butan s	kg	0.722
CH4 Methan s	kg	2.06
CO Kohlenmonoxid s	kg	30.9
CO2 Kohlendioxid s	kg	57700
Essigsaeure s	kg	0.155
Formaldehyd s	kg	0.103
Ha Quecksilber s	kg	0.0000567
N2O Lachgas s	kg	0.516
NOx Stickoxide als NO2 s	kg	20.6
PAH Polyzyklische aromatische HC s	kg	0.0103
Partikel s	kg	0.103
Pentane s	kg	1.24
Propan s	kg	0.206
Propionsaeure s	kg	0.0206
SOx als SO2 s	kg	0.516
TCDD-Aequivalente	na	30.9
Toluol s	kg	0.206
Beton in Inertstoffdeponie	kg	130
Deckfarbe in Inertstoffdeponie	kg	0.68
Karton in KVA	kg	3.41
Kupfer in Inertstoffdeponie	kg	4.09
Mineralwolle in Inertstoffdeponie	kg	6.13
PE in KVA	kg	2.38
Schweissstaub in Sonderabfallbehandlung	kg	0.134
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	0.00175
Leckage Erdgas Schweiz Hochdruck	m3	56.7
Deckfarbe	kg	0.68
Transport LKW 28 t	tkm	13.6
Transport Schiene	tkm	205
Aluminium 0% Rec.	kg	4.64
Aluminium 100% Rec.	kg	9.28
Beton (ohne Armierungseisen)	kg	130
Gusseisen	kg	8.19
Karton (Verpackungs-)	kg	3.41
Kupfer	kg	4.09
Mineralwolle	kg	6.13
PE (HD)	kg	2.38
Stahl hochlegiert	kg	3.4
Stahl unlegiert	kg	140
Wasser entkarbonisiert	kg	68.2
Erdgas ND-Abnehmer CH	TJ	1.03
Strom Mittespannung - Bezug in UCPTE	TJ	0.0000949
Strom Niederspannung - Bezug in CH	TJ	0.0206

Tab. 9: Bilanzierte Materialien und Prozesse im Modul "Nutzwaerme ab Heizung LowNOx KOND.<100 kW" (bzw. der darin bezogenen Module "Erdgas in Heizung LowNOx KOND.<100 kW" und "Infra Heizungen") pro TJ Nutzwärme.

1.5.1.6 Inventare Heizungssysteme: Elektroheizung

Infrastruktur Elektroheizung pro Betriebsjahr Datenmodule aus [ESU96]		bilanzierte Mengen
Stahl unlegiert	kg	9.19
Alkydharzlack	kg	0.19
PVC schlagfest	kg	0.0453
PE (HD)	kg	0.19
Kupfer	kg	0.0473
Transport Schiene	tkm	7.58
Transport LKW 28 t	tkm	0.947

Tab. 10: Bilanzierte Materialien und Prozesse für die Infrastruktur der Elektroheizung pro Jahr.

Betriebsenergie Elektroheizung pro Betriebsjahr		Strom Niederspannung
NOAH Leichtbau	TJ	0.0230
NOAH Massivbau	TJ	0.0230
SIA2010 Leichtbau	TJ	0.0187
SIA2010 Massivbau	TJ	0.0163

Tab. 11: Bilanzierte jährliche Betriebsenergien der Elektroheizung für verschiedenen Gebäudevarianten.

1.5.1.7 Inventare Strommixe

Der verwendete Schweizerische Strommix inkl. Importstromanteil wurde in [ESU 96] unter der Bezeichnung "Strom Niederspannung - Bezug in CH Import" bilanziert. Dieser Strommix betrachtet die Importströme mit 0% Transitanteil. Für Sensitivitätsanalysen des Betriebsstroms der Wärmepumpen werden auch Stromixe mit 100% Transitanteil (reine Inlandproduktion) benötigt. Dieser Strommix wurde in [ESU 96] unter dem Namen "Strom Niederspannung - Bezug in CH Import" bilanziert. Beide Strommixe werden unverändert übernommen.

Als Marginaltechnologien der Stromerzeugung werden daneben auch GuD und BHKW betrachtet. Die Inventare dieser Technologien werden im Kapitel "Bilanzierung von neuen Materialien und Prozessen" erläutert.

1.5.1.8 Inventare Brauchwarmwassersysteme: BWW-Wärmepumpe

Warmwasser ab BWW-Wärmepumpe pro Betriebsjahr Datenmodule aus [ESU96] und [ESU 95]		bilanzierte Mengen
Zink fuer Verzinkung	kg	0.00233
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.00438
Strom Mittelspannung - Bezug in W-D Import	TJ	7.55E-07
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTE	TJ	2.65E-07
Stahl niedriglegiert	kg	10.8
PUR-Hartschaum	kg	0.667
Aluminium 0% Rec.	kg	0.213
Kupfer	kg	0.184
Ethylen	kg	0.0908
PE (HD)	kg	0.0367
PVC schlagfest	kg	0.0167
Cadmiumfreies Hartlot	kg	0.0139
Alkydharzlack	kg	0.01
Stahl hochlegiert	kg	0.00667
Transport Schiene	tkm	8.08
Transport LKW 16 t	tkm	1.18
Transport LKW 28 t	tkm	0.799
Propan/ Butan ab Raffinerie CH	t	0.00003
Heizoel Petro ab Raffinerie Euro	t	0.00002
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	2.17E-07
PE in KVA	kg	0.667
Elektronikabfaelle	kg	0.0167
PVC in KVA	kg	0.0133
Propan p	kg	0.03
Stahlblech verzinkt	kg	1
Schnittholz kant-	kg	0.333

Tab. 12: Bilanzierte Materialien und Prozesse für die Infrastruktur und Betrieb des separaten Brauchwarmwasser-Wärmepumpe zur L/W-Heizwärmepumpe pro Jahr.

Warmwasser ab Beistellboiler pro Betriebsjahr Datenmodule aus [ESU 96]		bilanzierte Mengen
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.00365
Strom Mittespannung - Bezug in UCPTE	TJ	9.92E-07
Stahl hochlegiert	kg	1.58
Stahl unlegiert	kg	7.97
PVC schlagfest	kg	0.0687
Alkydharzlack	kg	0.0343
Transport Lieferwagen	tkm	0.517
Transport LKW 28 t	tkm	1.03
Transport Schiene	tkm	2.34
Glaswolle	kg	0.687

Tab. 13: Bilanzierte Materialien und Prozesse für die Infrastruktur und Betrieb des Beistellboilers zur SW-Heizwärmepumpe pro Jahr.

1.5.1.9 Inventare Brauchwarmwassersysteme: Ölheizung

Warmwasser bei Ölheizungsvariante pro Betriebsjahr Datenmodule gemäss [ESU 96]		Einheit	bilanzierte Mengen
Strom Mittespannung - Bezug in CH Import	TJ	0.00000126	
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.00668	
Alkydharzlack	kg	0.0343	
Cadmiumfreies Hartlot	kg	0.0015	
Gusseisen	kg	0.015	
Keramik	kg	0.01	
PVC schlagfest	kg	0.0687	
Stahl hochlegiert	kg	1.64	
Stahl unlegiert	kg	7.97	
Transport Lieferwagen	tkm	0.521	
Transport LKW 28 t	tkm	0.521	
Transport Schiene	tkm	6.22	
Heizoel EL 2000 ab Regionallager CH	t	0.167°	
Heizoel EL ab Regionallager CH	t	-0.167°	
Nutzwaerme ab Heizung 10 kW Brennwert	TJ	0.00668 °°	
MG-Silizium	kg	0.000228	
Glaswolle	kg	0.687	

Tab. 14: Bilanzierte Materialien und Prozesse für die Infrastruktur und Betrieb der Warmwasserbereitstellung der Ölheizungsvariante (50% Öl/50% Elektro) pro Jahr. °) Ersatz von Heizöl Stand 1990 durch Heizöl Stand 2000. °°) Inventar siehe Ölheizung.

1.5.1.10 Inventare Brauchwarmwassersysteme: Gasdurchlauferhitzer

Warmwasser ab Gaserhitzer pro Betriebsjahr Datenmodule gemäss [ESU 96]		Einheit	Bilanzierte Mengen
Nutzwärme ab Heizung atm. LowNOx <100kW			0.00997 ⁴

Tab. 15: Bilanzierte Materialien und Prozesse für die Infrastruktur und Betrieb des Gasdurchlauferhitzers bei Gasheizungsvariante pro Jahr.

⁴ Die Zahl errechnet sich aus: 9169 MJ Nutzenergiebedarf \div 80% Gesamtwirkungsgrad ergibt 11'461 MJ Endenergiebezug. Zur korrekten Bilanzierung der bezogenen Gasmenge müssen die unterschiedlichen Wirkungsgrade betrachtet werden. Da die als Approximationen bilanzierte Gasfeuerung einen Wirkungsgrad von 87% hat und deren Nutzenergie verbucht wird, entsprechen die 11'461 MJ Endenergiebezug für den Gasdurchlauferhitzer 9971 MJ bzw. 0.00997 TJ Nutzwärme ab Gasfeuerung.

Nutzwärme ab Heizung atm. LowNOx <100kW pro TJ Datenmodule gemäss [ESU 96]	Einheit	Bilanzierte Mengen
Abwaerme in Luft p	TJ	0.000106
Abwaerme in Luft s	TJ	1.28
Acetaldehyd s	kg	0.00115
BaP Benzo(a)pyren s	kg	0.0000115
Benzol s	kg	0.46
Butan s	kg	0.804
CH4 Methan s	kg	2.3
CO Kohlenmonoxid s	kg	34.5
CO2 Kohlendioxid s	kg	64300
Essigsaeure s	kg	0.172
Formaldehyd s	kg	0.115
Hg Quecksilber s	kg	0.0000632
N2O Lachgas s	kg	0.575
NOx Stickoxide als NO2 s	kg	23
PAH Polyzyklische aromatische HC s	kg	0.0115
Partikel s	kg	0.115
Pentane s	kg	1.38
Propan s	kg	0.23
Propionsaeure s	kg	0.023
SOx als SO2 s	kg	0.575
TCDD-Aequivalente	ng	34.5
Toluol s	kg	0.23
Beton in Inertstoffdeponie	kg	144
Deckfarbe in Inertstoffdeponie	kg	0.758
Karton in KVA	kg	3.8
Kupfer in Inertstoffdeponie	kg	4.56
Mineralwolle in Inertstoffdeponie	kg	6.84
PE in KVA	kg	2.65
Schweissstaub in Sonderabfallbehandlung	kg	0.149
Erdgas in Industriefeuerung >100kW Euro	TJ	0.00195
Leckage Erdgas Schweiz Hochdruck	m3	63.2
Deckfarbe	kg	0.758
Transport LKW 28 t	tkm	15.2
Transport Schiene	tkm	228
Aluminium 0% Rec.	kg	5.17
Aluminium 100% Rec.	kg	10.3
Beton (ohne Armierungseisen)	kg	144
Gusseisen	kg	9.12
Karton (Verpackungs-)	kg	3.8
Kupfer	kg	4.56
Mineralwolle	kg	6.84
PE (HD)	kg	2.65
Stahl hochlegiert	kg	3.79
Stahl unlegiert	kg	156
Wasser entkarbonisiert	kg	76
Erdgas ND-Abnehmer CH	TJ	1.15
Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTE	TJ	0.000106
Strom Niederspannung - Bezug in CH	TJ	0.023

Tab. 16: Bilanzierte Materialien und Prozesse im Modul "Nutzwaerme ab Heizung atm. LowNOx <100kW" (bzw. der darin bezogenen Module "Erdgas in Heizung atm. LowNOx <100 kW" und "Infra Heizungen") pro TJ Nutzwärme.

1.5.1.11 Inventare Brauchwarmwassersysteme: Elektroboiler

Brauchwarmwasser ab Elektroboiler pro Betriebsjahr		Bilanzierte Mengen
Datenmodule aus [ESU96]		
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.0134
Strom Mittelspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.00000126
Stahl hochlegiert	kg	1.64
Stahl unlegiert	kg	7.97
PVC schlagfest	kg	0.0687
Alkydharzlack	kg	0.0343
Gusseisen	kg	0.015
Cadmiumfreies Hartlot	kg	0.0015
Keramik	kg	0.01
Transport Lieferwagen	tkm	0.521
Transport Schiene	tkm	6.22
Transport LKW 28 t	tkm	0.521
MG-Silizium	kg	0.000228
Glaswolle	kg	0.687

Tab. 17: Bilanzierte Materialien und Prozesse für die Infrastruktur und Betrieb des Elektroboilers pro Jahr.

1.5.1.12 Inventare Gebäudevarianten: NOAH-Leichtbau

Gebäude NOAH Leichtbau pro Betriebsjahr Datenmodule aus [ESU96] und [ESU95]		Bilanzierte Mengen
Strom Mittelspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.000045
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.0000439
Alkydharzlack	kg	2.55
Betonkies	kg	415
Chemikalien organisch	kg	0.125
Glas (Flach-) beschichtet	kg	17
Gummi EPDM	kg	0.0384
Keramik	kg	6
Kupfer	kg	4.03
PE (HD)	kg	14.3
PET 0% Rec.	kg	0.9
Polypropylen	kg	0.00653
Polystyrol schlagfest	kg	2.33
PUR-Hartschaum	kg	1.42
PVC schlagfest	kg	1.61
Stahl hochlegiert	kg	0.000375
Stahl niedriglegiert	kg	3.96
Stahl unlegiert	kg	3.79
Transport Lieferwagen	tkm	1.33
Transport LKW 28 t	tkm	106
Transport Schiene	tkm	231
Aushub Frontladerraupe	m3	1.56
Aushub Hydraulikbagger	m3	2.51
Diesel in Baumaschine	TJ	0.0000412
Heizoel EL in Heizung 1 MW	TJ	0.00000703
MG-Silizium	kg	0.2
Abfaelle in Inertstoffdeponie	kg	3040
Abfaelle in SAVA	kg	0.592
Holz unbehandelt in KVA	kg	368
Kunststoffe in KVA	kg	5.91
PVC in KVA	kg	0.933
Siedlungsabfall in KVA	kg	0.00128
Stahl in KVA	kg	3.45
NMVOC p	kg	0.5
Anhydrit Unterlagsboden	kg	107
Armierungsstahl	kg	17.5
Beton pc150	kg	75
Bitumendichtungsbahn	kg	0.0255
Brettschichtholz	kg	161
Glasfaser	kg	1.5
Glaswolle	kg	0.03
Holzfaserplatte	kg	6
Papierflocken	kg	13.6
PVC-Dichtungsbahn	kg	0.149
Schieferplatte klein	kg	0.875
Schnittholz brett-	kg	110
Schnittholz kant-	kg	21
Spanplatte	kg	17.4
Stahlblech verzinkt	kg	3.41
Steinwolle	kg	41.3
Vlies (PE)	kg	0.0161
Weichfaserplatte	kg	35.4
Zement PC-CH	kg	74.7
Zementstein	kg	7.45
Ziegel	kg	37.5
Papier95: in KVA	kg	13.6
Gipsfaserplatte	kg	242
Holzzementplatte	kg	5.4

Tab. 18: Bilanzierte Materialien und Prozesse für das NOAH Leichtbaugebäude pro Jahr.

1.5.1.13 Inventare Gebäudevarianten: NOAH-Massivbau

Gebäude NOAH Massivbau pro Betriebsjahr Datenmodule aus [ESU 96] und [ESU 95]		bilanzierte Mengen
Strom Mittelspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.000045
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.0000439
Alkydharzlack	kg	2.55
Betonkies	kg	628
Chemikalien organisch	kg	0.125
Glas (Flach-) beschichtet	kg	17
Gummi EPDM	kg	0.000625
Keramik	kg	6
Kupfer	kg	4.03
PE (HD)	kg	14.3
PET 0% Rec.	kg	0.9
Polypropylen	kg	0.0292
Polystyrol schlagfest	kg	2.33
PUR-Hartschaum	kg	1.1
PVC schlagfest	kg	1.61
Stahl hochlegiert	kg	0.000375
Stahl niedriglegiert	kg	3.96
Stahl unlegiert	kg	1.47
Transport Lieferwagen	tkm	1.33
Transport LKW 28 t	tkm	93.1
Transport Schiene	tkm	81.9
Aushub Frontladerraupe	m3	1.56
Aushub Hydraulikbagger	m3	2.51
Diesel in Baumaschine	TJ	0.0000412
Heizoel EL in Heizung 1 MW	TJ	0.00000703
MG-Silizium	kg	0.2
Abfaelle in Inertstoffdeponie	kg	3870
Abfaelle in SAVA	kg	0.592
Holz unbehandelt in KVA	kg	224
Kunststoffe in KVA	kg	5.57
PVC in KVA	kg	0.933
Siedlungsabfall in KVA	kg	0.00128
Stahl in KVA	kg	0.375
NMVOC p	kg	0.5
Anhydrit Unterlagsboden	kg	107
Armierungsstahl	kg	25.8
Aussenputz mineralisch	kg	76.1
Backstein	kg	465
Beton pc150	kg	75
Bitumendichtungsbahn	kg	0.0255
Brettschichtholz	kg	74.4
Glasfaser	kg	1.5
Glaswolle	kg	0.03
Holzfaserplatte	kg	6
Innenputz mineralisch	kg	98
PVC-Dichtungsbahn	kg	0.149
Schieferplatte klein	kg	0.875
Schnittholz brett-	kg	54.7
Schnittholz kant-	kg	21
Spanplatte	kg	17.4
Stahlblech verzinkt	kg	3.41
Steinwolle	kg	64.2
Vlies (PE)	kg	0.0161
Weichfaserplatte	kg	35.4
Zement PC-CH	kg	113
Zementstein	kg	7.45
Ziegel	kg	37.5
Backstein-Moertel	kg	116
Gipsfaserplatte	kg	40.3
Holzzementplatte	kg	3.15

Tab. 19: Bilanzierte Materialien und Prozesse für das NOAH Massivbaugebäude pro Jahr.

1.5.1.14 Inventare Gebäudevarianten: SIA2010-Leichtbau

Gebäude SIA2010 Leichtbau pro Betriebsjahr Datenmodule aus [ESU 96] und [ESU 95]		bilanzierte Mengen
Strom Mittelspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.000045
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.0000439
Alkydharzlack	kg	2.48
Betonkies	kg	415
Chemikalien organisch	kg	0.125
Glas (Flach-) beschichtet	kg	28.7
Gummi EPDM	kg	0.0384
Keramik	kg	6
Kupfer	kg	9.25
PE (HD)	kg	13.1
PET 0% Rec.	kg	0.9
Polypropylen	kg	0.00653
Polystyrol schlagfest	kg	2.8
PUR-Hartschaum	kg	1.42
PVC schlagfest	kg	1.61
Stahl hochlegiert	kg	0.000375
Stahl niedriglegiert	kg	3.96
Stahl unlegiert	kg	3.79
Transport Lieferwagen	tkm	2.26
Transport LKW 28 t	tkm	117
Transport Schiene	tkm	232
Aushub Frontladerraupe	m3	1.56
Aushub Hydraulikbagger	m3	2.51
Diesel in Baumaschine	TJ	0.0000412
Heizoel EL in Heizung 1 MW	TJ	0.00000703
MG-Silizium	kg	0.2
Abfaelle in Inertstoffdeponie	kg	3050
Abfaelle in SAVA	kg	0.544
Holz unbehandelt in KVA	kg	380
Kunststoffe in KVA	kg	6.34
PVC in KVA	kg	0.933
Siedlungsabfall in KVA	kg	0.00128
Stahl in KVA	kg	3.45
NMVOC p	kg	0.5
Anhydrit Unterlagsboden	kg	107
Armierungsstahl	kg	17.5
Beton pc150	kg	75
Bitumendichtungsbahn	kg	0.0255
Brettschichtholz	kg	162
Glasfaser	kg	1.5
Glaswolle	kg	0.03
Holzfaserplatte	kg	6
Papierflocken	kg	18.4
PVC-Dichtungsbahn	kg	0.144
Schieferplatte klein	kg	2.63
Schnittholz brett-	kg	173
Schnittholz kant-	kg	24.6
Spanplatte	kg	17.4
Stahlblech verzinkt	kg	3.41
Steinwolle	kg	52.6
Vlies (PE)	kg	0.0156
Weichfaserplatte	kg	34.4
Zement PC-CH	kg	74.7
Zementstein	kg	7.45
Ziegel	kg	36.4
Papier95: in KVA	kg	18.4
Gipsfaserplatte	kg	230
Holzzementplatte	kg	11.7

Tab. 20: Bilanzierte Materialien und Prozesse für das SIA2010 Leichtbaugebäude pro Jahr.

1.5.1.15 Inventare Gebäudevarianten: SIA2010-Massivbau

Gebäude SIA2010 Massivbau pro Betriebsjahr Datenmodule aus [ESU 96] und [ESU 95]		bilanzierte Mengen
Strom Mittelspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.000045
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.0000439
Alkydharzlack	kg	2.48
Betonkies	kg	628
Chemikalien organisch	kg	0.125
Glas (Flach-) beschichtet	kg	28.7
Gummi EPDM	kg	0.000625
Keramik	kg	6
Kupfer	kg	9.25
PE (HD)	kg	13.1
PET 0% Rec.	kg	0.9
Polypropylen	kg	0.0372
Polystyrol schlagfest	kg	2.8
PUR-Hartschaum	kg	1.09
PVC schlagfest	kg	1.61
Stahl hochlegiert	kg	0.000375
Stahl niedriglegiert	kg	3.96
Stahl unlegiert	kg	1.73
Transport Lieferwagen	tkm	2.26
Transport LKW 28 t	tkm	93.3
Transport Schiene	tkm	91.3
Aushub Frontladerraupe	m3	1.56
Aushub Hydraulikbagger	m3	2.51
Diesel in Baumaschine	TJ	0.0000412
Heizoel EL in Heizung 1 MW	TJ	0.00000703
MG-Silizium	kg	0.2
Abfaelle in Inertstoffdeponie	kg	3860
Abfaelle in SAVA	kg	0.544
Holz unbehandelt in KVA	kg	232
Kunststoffe in KVA	kg	6.02
PVC in KVA	kg	0.933
Siedlungsabfall in KVA	kg	0.00128
Stahl in KVA	kg	0.375
NMVOC p	kg	0.5
Anhydrit Unterlagsboden	kg	107
Armierungsstahl	kg	25.8
Aussenputz mineralisch	kg	71.7
Backstein	kg	438
Beton pc150	kg	75
Bitumendichtungsbahn	kg	0.0255
Brettschichtholz	kg	76.3
Glasfaser	kg	1.5
Glaswolle	kg	0.03
Holzfaserplatte	kg	6
Innenputz mineralisch	kg	93.6
PVC-Dichtungsbahn	kg	0.144
Schieferplatte klein	kg	0.875
Schnittholz brett-	kg	59.2
Schnittholz kant-	kg	24.6
Spanplatte	kg	17.4
Stahlblech verzinkt	kg	3.41
Steinwolle	kg	88.1
Vlies (PE)	kg	0.0156
Weichfaserplatte	kg	34.4
Zement PC-CH	kg	113
Zementstein	kg	7.45
Ziegel	kg	36.4
Backstein-Moertel	kg	109
Gipsfaserplatte	kg	39.5
Holzzementplatte	kg	3.15

Tab. 21: Bilanzierte Materialien und Prozesse für das SIA2010 Massivbaugebäude pro Jahr.

1.5.2 Bewertung von Materialien und Prozessen

In [ESU 96] und [ESU 95] wurden die unbewerteten, kumulierten Emissionsprofile der benötigten Materialien und Prozesse publiziert. Für die vorliegende Studie sollen diese zu Umwelteffekten gemäss der Bewertungsmethode EcoInvent95rf zusammengefasst werden [Frischknecht 98]. Die dabei verwendeten sogenannten Charakterisierungs-Faktoren sind in Tab. 22 für die berücksichtigten Emissionen in Luft und Wasser aufgelistet. Wie ersichtlich, kann ein Schadstoff bei mehreren Wirkungskategorien berücksichtigt werden. Prominentestes Beispiel sind die Stickoxid-Emissionen (NO_x), welche gleich zu vier verschiedenen Umwelteffekten beitragen (Sommersmog, Versauerung, Überdüngung, Wintersmog). Andere Beispiele sind Schwefeloxide (SO_x), Methan (CH_4) und einzelne Freone.

Treibhauseffekt		Schwermetalle	
	kg CO ₂ -eq.		kg Pb-eq.
SF6 p in Luft	23900	Ion Quecksilber f in Wasser	10
C2F ₆ p in Luft	9190	Ion Quecksilber s in Wasser	10
R12 FCKW p in Luft	6650	Ion Cadmium f in Wasser	3
CF4 p in Luft	6490	Ion Cadmium s in Wasser	3
R113 FCKW p in Luft	3100	Ion Antimon Sb f in Wasser	2
R142b H-FKW p in Luft	1650	Cd Cadmium m in Luft	1
R22 FCKW p in Luft	1340	Cd Cadmium p in Luft	1
R11 FCKW p in Luft	1320	Cd Cadmium s in Luft	1
R134a FKW p in Luft	1300	Hg Quecksilber m in Luft	1
N2O Lachgas m in Luft	310	Hg Quecksilber p in Luft	1
N2O Lachgas p in Luft	310	Hg Quecksilber s in Luft	1
N2O Lachgas s in Luft	310	Mn Mangan p in Luft	1
R141b H-FKW p in Luft	270	Mn Mangan s in Luft	1
CH4 Methan m in Luft	21	Pb Blei m in Luft	1
CH4 Methan p in Luft	21	Pb Blei p in Luft	1
CH4 Methan s in Luft	21	Pb Blei s in Luft	1
Dichlormethan p in Luft	9	Ion Arsen f in Wasser	1
Trichlormethan p in Luft	4	Ion Arsen s in Wasser	1
CO2 Kohlendioxid m in Luft	1	Ion Blei f in Wasser	1
CO2 Kohlendioxid p in Luft	1	Ion Blei s in Wasser	1
CO2 Kohlendioxid s in Luft	1	Ion Nickel f in Wasser	0.5
1,1,1-Trichlorethan p in Luft	-225	Ion Nickel s in Wasser	0.5
Tetrachlormethan p in Luft	-1530	Cr Chrom m in Luft	0.441
H 1301 Halon p in Luft	-22300	Cr Chrom p in Luft	0.441
Ozonloch		Cr Chrom s in Luft	
	kg R11-eq.		0.441
H 1301 Halon p in Luft	16	Ion Chrom-III f in Wasser	0.2
H 1211 Halon p in Luft	4	Ion Chrom-III s in Wasser	0.2
Tetrachlormethan p in Luft	1.08	Ion Chrom-VI f in Wasser	0.2
R113 FCKW p in Luft	1.07	Ion Chrom-VI s in Wasser	0.2
R13 FCKW p in Luft	1.07	Ion Barium f in Wasser	0.14
R12 FCKW p in Luft	1	Ion Barium s in Wasser	0.14
R11 FCKW p in Luft	1	Ion Molybdaen f in Wasser	0.14
R114 FCKW p in Luft	0.8	Ion Molybdaen s in Wasser	0.14
CH3Br p in Luft	0.6	Ion Bor f in Wasser	0.0301
R115 FCKW p in Luft	0.5	Ion Bor s in Wasser	0.0301
1,1,1-Trichlorethan p in Luft	0.12	Ion Mangan f in Wasser	0.02
R141b H-FKW p in Luft	0.11	Ion Mangan s in Wasser	0.02
R142b H-FKW p in Luft	0.065	Ion Kupfer f in Wasser	0.005
R22 FCKW p in Luft	0.0551	Ion Kupfer s in Wasser	0.005
Sommersmog		Karzinogene	
	kg C ₂ H ₄ -eq.		kg PAH-eq.
Propen p in Luft	1.03	BaP Benzo(a)pyren m in Luft	1
Propen s in Luft	1.03	BaP Benzo(a)pyren p in Luft	1
Ethen p in Luft	1	BaP Benzo(a)pyren s in Luft	1
Ethen s in Luft	1	PAH Poliaromaten p in Luft	1
Buten p in Luft	0.978	PAH Poliaromaten s in Luft	1
Alkene p in Luft	0.908	Ni Nickel m in Luft	0.44
Alkene s in Luft	0.908	Ni Nickel p in Luft	0.44
Xylole p in Luft	0.854	Ni Nickel s in Luft	0.44
Xylole s in Luft	0.854	As Arsen m in Luft	0.044
Aromaten p in Luft	0.762	As Arsen p in Luft	0.044
Aromaten s in Luft	0.762	As Arsen s in Luft	0.044
Styrol p in Luft	0.762	Aromaten p in Luft	0.000011
NO _x Stickoxide als NO ₂ m in Luft	0.646	Aromaten s in Luft	0.000011
NO _x Stickoxide als NO ₂ p in Luft	0.646	Ethylbenzol p in Luft	0.000011
NO _x Stickoxide als NO ₂ s in Luft	0.646	Ethylbenzol s in Luft	0.000011
Propionaldehyd s in Luft	0.604	Benzol m in Luft	0.000011
Ethylbenzol p in Luft	0.594	Benzol p in Luft	0.000011
Ethylbenzol s in Luft	0.594	Benzol s in Luft	0.000011
Toluol p in Luft	0.564	ng TCDD-Aequivalente in Luft	5E-10
Toluol s in Luft	0.564		
Heptan p in Luft	0.53		
Acetaldehyd s in Luft	0.528		
Aldehyde p in Luft	0.444		
Formaldehyd p in Luft	0.421		
Formaldehyd s in Luft	0.421		
Hexan p in Luft	0.421		
		Wintersmog	
			kg SO _x -eq.
Partikel m in Luft			2
Partikel s in Luft			2
SO _x als SO ₂ m in Luft			1
SO _x als SO ₂ p in Luft			1
SO _x als SO ₂ s in Luft			1
NO _x Stickoxide als NO ₂ m in Luft			0.6

Propan p in Luft	0.421	NOx Stickoxide als NO2 p in Luft	0.6
Propan s in Luft	0.421	NOx Stickoxide als NO2 s in Luft	0.6
NMVOC m in Luft	0.417		
NMVOC p in Luft	0.417	Radio. I129 p in Luft	kBq 129I-eq. 1
NMVOC s in Luft	0.417	Radio. C14 p in Luft	0.0942
Pentan p in Luft	0.409	Rad. Cs137 f in Wasser	0.0737
Pentane s in Luft	0.409	Rad. Cs134 f in Wasser	0.0633
Alkane p in Luft	0.4	Radio. U234 p in Luft	0.0425
Alkane s in Luft	0.4	Radio. Pu alpha p in Luft	0.0363
Ethylenoxid p in Luft	0.378	Radio. Pu238 p in Luft	0.0295
Butan p in Luft	0.361	Rad. Cm alpha s in Wasser	0.0251
Butan s in Luft	0.361	Rad. Co60 f in Wasser	0.0194
Ethanol p in Luft	0.268	Rad. Am241 s in Wasser	0.0137
Ethanol s in Luft	0.268	Radio. U235 p in Luft	0.00903
Benzol m in Luft	0.189	Radio. Co60 p in Luft	0.00723
Benzol p in Luft	0.189	Radio. Cs137 p in Luft	0.00593
Benzol s in Luft	0.189	Radio. Cs134 p in Luft	0.00523
Aceton s in Luft	0.178	Radio. U238 p in Luft	0.00358
Methanol s in Luft	0.123	Radio. U238 s in Luft	0.00358
Ethan p in Luft	0.0823	Rad. Pu alpha s in Wasser	0.00326
Ethan s in Luft	0.0823	Rad. C14 s in Wasser	0.000519
Tetrachlormethan p in Luft	0.021	Rad. Sb124 f in Wasser	0.000358
Vinyl Chlorid p in Luft	0.021	Rad. Ag110m f in Wasser	0.000222
1,1,1-Trichlorethan p in Luft	0.021	Rad. I131 f in Wasser	0.000222
Vinyl Chlorid in Wasser f in Wasser	0.021	Radio. Co58 p in Luft	0.000189
Dichlormethan p in Luft	0.01	Rad. Co60 s in Wasser	0.000173
CH4 Methan m in Luft	0.00701	Rad. I129 s in Wasser	0.000138
CH4 Methan p in Luft	0.00701	Rad. Mn54 f in Wasser	0.000136
CH4 Methan s in Luft	0.00701	Radio. I131 p in Luft	6.84E-05
Benzaldehyd s in Luft	-0.334	Rad. Ru106 s in Wasser	6.32E-05
		Rad. Ra 226 f in Wasser	5.61E-05
		Rad. Cs137 s in Wasser	3.48E-05
Versauerung	kg SOx-eq.	Rad. Cs134 s in Wasser	3.45E-05
NH3 Ammoniak p in Luft	1.88	Rad. Co58 f in Wasser	0.000018
NH3 Ammoniak s in Luft	1.88	Rad. U235 f in Wasser	0.000013
HF Fluorwasserstoff p in Luft	1.6	Rad. U234 f in Wasser	1.18E-05
HF Fluorwasserstoff s in Luft	1.6	Rad. U 238 f in Wasser	1.15E-05
SOx als SO2 m in Luft	1	Radio. H3 p in Luft	1.13E-05
SOx als SO2 p in Luft	1	LT Radio. Rn222 in Luft	1.04E-05
SOx als SO2 s in Luft	1	Radio. Rn222 p in Luft	1.04E-05
HCl Salzsäure p in Luft	0.881	Radio. Rn222 s in Luft	1.04E-05
HCl Salzsäure s in Luft	0.881	Rad. U 238 s in Wasser	7.37E-06
NOx Stickoxide als NO2 m in Luft	0.702	Rad. Sb125 s in Wasser	6.48E-06
NOx Stickoxide als NO2 p in Luft	0.702	Radio. I133 p in Luft	4.11E-06
NOx Stickoxide als NO2 s in Luft	0.702	Rad. Sr90 s in Wasser	1.77E-06
		Rad. H3 f in Wasser	1.69E-07
Überdüngung	kg PO4-eq.	Radio. Xe133 p in Luft	6.24E-08
Phosphate f in Wasser	1	Radio. Xe133m p in Luft	6.24E-08
Phosphate s in Wasser	1	Radio. Kr85 p in Luft	6.2E-08
Ammoniak als N f in Wasser	0.427	Radio. Kr85m p in Luft	6.2E-08
Ammoniak als N s in Wasser	0.427	Rad. H3 s in Wasser	5.48E-10
Nitrate p in Luft	0.423		
Stickstoff Gesamt f in Wasser	0.423		
Stickstoff Gesamt s in Wasser	0.423		
NH3 Ammoniak p in Luft	0.35		
NH3 Ammoniak s in Luft	0.35		
NOx Stickoxide als NO2 m in Luft	0.13		
NOx Stickoxide als NO2 p in Luft	0.13		
NOx Stickoxide als NO2 s in Luft	0.13		
COD f in Wasser	0.022		
COD s in Wasser	0.022		

Tab. 22: Verwendete Werte zur gewichteten Zuordnung von verschiedenen Luft- und Wasseremissionen⁵ zu neun Umwelteffekten [Frischknecht 98].

1.5.3 Bilanzierung von neuen Materialien und Prozessen

Einige in der vorliegenden Studie benötigte Materialien sind in [ESU 96] bzw. [ESU 95] nicht ökobilanziert worden. Die Ökoinventare dieser Materialien werden hier erläutert.

⁵ Die Bezeichnungen und Einheiten der Emissionen wurden aus Konsistenzgründen aus [ESU 96] übernommen. Die meisten Emissionen haben die Einheit Kilogramm, mit Ausnahme der radioaktiven Emissionen (Kilobekquerel, kBq) und TCDD-Äquivalente (Nanogramm, ng). Die Suffixe m, s, und p bei den Luftemissionen unterschieden Emissionen aus verschiedene Arten von Quellen (mobile Verbrennung, stationäre Verbrennung, Prozessspezifische Emissionen). Die Suffixe s und f bei den Wasseremissionen unterschieden Emissionen in verschiedene Gewässerarten (sea-water resp. freshwater, Salz- resp. Süßwasser).

1.5.3.1 Kältemittel R407c

Bei beiden Heizwärmepumpen wird das Kältemittel R407c eingesetzt. R 407c ist eine Mischung von Fluor-Kohlenwasserstoffen (FKW). R 407c enthält jedoch keine Chlorverbindungen und besitzt daher bei einer Emission kein Ozonzerstörungspotential. Es wirkt jedoch als Treibhausgas.

R 407c ist eine Mischung aus drei verschiedenen chemischen Verbindungen, was in Tab. 23 wiedergegeben ist. Das Treibhausgaspotential (Global Warming Potential, GWP) von R 407c berechnet sich aus dem gewichteten Mittel der GWP der Inhaltsstoffe zu 1610 [kg CO₂-Eq./kg KM].

KM-Code	GWP in kg CO ₂ -Eq. pro kg KM	chemische Formel	chemische Bezeichnung	G-% in R 407c (Mischung)
R 32	580	CF ₂ H ₂	Difluormethan	23%
R 125	3200	CHF ₂ CF ₃	Pentafluorethan	25%
R 134a	1300	CH ₂ FCF ₃	1,1,1,2-Tetrafluorethan	52%
R 407c	1610	Mischung	—	100%

Tab. 23: Zusammensetzung von R407c, GWP: Global Warming Potential: Treibhausgaspotential pro Kilogramm im Vergleich zu 1 kg Kohlendioxid (Zeithorizont d. Wirkungsintegration 100 Jahre)

Die Komponenten von R 407c werden durch Halogenierung und Weiterreaktion von Kohlenwasserstoffen hergestellt. In [Weibel 96, p.B.4] wurde der Hauptbestandteil R134a bilanziert. Aufgrund der geringen Bedeutung der Herstellung der KM in der vorliegenden Studie, wird die Herstellung von R 407c gemäss der Herstellung von R134a bilanziert. Der dadurch entstehende Fehler ist vernachlässigbar. Der relative Fluorgehalt von R407c und R134a ist praktisch identisch. Die vorausgehenden Umweltbelastungen durch die Fluorherstellung werden also korrekt abgebildet.

Datenqualität

Die Datenqualität der GWP-Berechnung von R407c entspricht den international verwendeten Werten. Die Datenqualität der Herstellung von R407c ist grob abgeschätzt aber für dieses Projekt unkritisch.

1.5.3.2 Energie ab BHKW - BHKW/WP-System

Der BHKW-Strom ab Niederspannungsnetz wird für die Sensitivitätsanalyse beim Betriebsstrom der Wärmepumpen benötigt. Zur Vermeidung einer Allokation wird die gesamte Strom- (= 33%) und Wärmeproduktion (= 57%) des BHKWs unter Erweiterung der Bilanzierungsgrenzen betrachtet. Die BHKW-Wärme wird dabei anteilig anstatt der Wärme ab Wärmepumpen bilanziert (Mischrechnung). Die gesamte BHKW-Wärme enthält zu 40% Wärme aus Spitzenkesseln⁶ (kondensierende Gasheizung). Die erzeugte Wärme wird über ein kleinräumiges Nahwärmenetz mit 6.5% Verlusten zu den Gebäuden geführt. Der erzeugte Strom wird über das Niederspannungsnetz mit 12.1% Verlusten in die Wärmepumpe gespiesen. In der S/W-Wärmepumpe wird mit einer JAZ von 3.66 Heiz- und Brauchwarmwasserwärme erzeugt. Gleichzeitig wird die BHKW-Nahwärme benutzt. Es wird angenommen, dass die Nahwärme sowohl für Heizzwecke als auch für Brauchwarmwasser verwendet werden kann und daher im Winter kein separater Warmwasserbolier benötigt wird. Es wird jedoch zusätzlich die Infrastruktur eines nahwärmegespiesenen Speichers verbucht, welche aus der Warmwasser-Infrastruktur der Öl-Referenzheizung übernommen wird. Im Sommer wird Warmwasser für den Nahwärmeteil über einen Gasdurchlauferhitzer erzeugt (vergl. Warmwasser Gasheizung)**. Diese Sensitivitätsrechnung wird nur für das NOAH Leichtbauhaus durchgeführt.

Bei dieser starr gekoppelten Mischrechnung wird schlussendlich ein Gebäude rein rechnerisch anteilmässig zu 53% über eine Wärmepumpe und zu 47% über BHKW-Nahwärme geheizt.

Zur Berücksichtigung der Verteilung und Verteilverluste wird rechnerisch dem existierenden Datenmodul für Schweizerischen Niederspannungsstrom der Strommix ab Kraftwerk abgezogen und durch

⁶ Bei existierenden Anlagen findet man Werte zwischen 16% und 60%. Der Wert von 40% entspricht der Bilanzierung in [ESU 96], wo allerdings ein Ölkessel bilanziert wird, der hier durch eine Gasheizung ersetzt wird.

den BHKW-Strommix ersetzt. Die verbleibenden Belastungen entsprechen den Aufwendungen für die Verteilung von Niederspannungsstrom. Das Modul "Strom Niederspannung - Bezug in CH Import" verbucht für 1 TJ Niederspannungs-Strom ab Netz aufgrund von Verteilungsverlusten 1.138 TJ Strom ab Kraftwerk (Modul "Strom - Mix CH Import").

Variante BHKW/WP-System	Einheit	Pro TJ _{in} Erdgas in BHKW	pro Gebäude- betriebsjahr	Bem.
Erdgas in BHKW 160 kWel	TJ	1	0.0162	1
CO	kg	144	2.34	2
NO _x	kg	4.44	0.0722	2
Infra Strom BHKW 160 kWel	Stk	0.00478	0.0000777	
Infra Waerme BHKW 160 kWel	Stk	0.00478	0.0000777	
Nutzwaerme ab Heizung LowNO _x KOND.<100 kW	TJout	0.228	0.0037	3
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	0.284	0.00462	4
Strom - Mix CH Import	TJ	-0.33	-0.00536	4
Transport Fernwaerme klein/neu	TJout	0.746	0.0121	5
Nutzwaerme ab Heizung atm. LowNO _x <100 kW	TJ		0.00215	6
Infra BWW-Speicher	Stk		0.0234	
Infra WP	Stk/a		0.58	
Infra Beistellboiler	Stk/a		0.58	

Tab. 24: Inventar zur Bilanzierung der Energiebereitstellung ab BHKW zur Verwendung im NOAH Leichtbau.

Bemerkungen: 1: Precombustion und VerbrennungsemSSIONen, 2: Anpassung Emissionen auf LRV92, 3: Spitzenkessel, Inventar siehe Gasheizung, 4: Berücksichtigung Stromverteilung, 5: Berücksichtigung Wärmeverteilung, 6: Gasdurchlauferhitzer im Sommer für Nahwärmeteil, Inventar siehe BWW Gasdurchlauferhitzer

Die BHKW-Emissionen für CO und NO_x werden nicht aufgrund von Messwerten bilanziert, sondern entsprechend den Grenzwerten der LRV92 für Verbrennungsmotoren: 650 mg CO resp. 80 mg NO_x pro Nm³ Abgas⁷. Das trockene Abgasvolumen bezieht sich auf einen Restsauerstoffgehalt von 5%. Das in der Schweiz verbrauchte Erdgas setzt sich aus Kohlenwasserstoffen der durchschnittlichen Summenformel CH_{3.89} sowie 4.9% inerten Anteilen (CO₂, N₂) zusammen [ESU 96, p.V.62]. Mit einem ebenfalls für die Schweiz typischen Heizwert von 47.1 MJ/kg errechnet sich ein Abgasvolumen von 289'000 Nm³ pro Terajoule verbranntes Erdgas und somit Emissionsfaktoren von 198 kg CO/TJ_{in} und 23.8 kg NO_x/TJ_{in} beim Erreichen des Grenzwertes ⁸.

Datenqualität

Die Datenqualität basiert auf den Standarddatensätzen in [ESU 96] und ist als gut bis sehr gut einzustufen. Die Wirkungsgrade des BHKWs wurden vom Auftraggeber vorgegeben und entsprechen den in Zukunft erwarteten Durchschnittswerten. Die Emissionen von NO_x und CO wurden auf die Grenzwerte der LRV92 angehoben. Die aktuell gültigen, für NO_x gelockerten Grenzwerte der LRV98 werden nicht betrachtet.

⁷ In der LRV98 wurden die NO_x-Grenzwerte für BHKWs auf 250 mg NO_x pro Nm³ Abgas gelockert (entspricht 74.5 kg NO_x/TJ_{in}). Diese Änderung wird jedoch nicht betrachtet.

⁸ im Modul "Erdgas in BHKW 160kW" werden bereits 49.5 kg CO und 19.4 kg NOx verbucht, sodass lediglich die Differenz verbucht wird.

1.5.3.3 GuD-Strom ab Niederspannungsnetz

Der GuD-Strom ab Niederspannungsnetz wird für die Marginalrechnung beim Betriebsstrom der Wärme pumpen benötigt. Inventardaten für den Strom ab Klemme Kraftwerk stammen aus [PSI 96, p.38ff.].

Zur Berücksichtigung der Verteilung und Verteilverluste wird rechnerisch dem existierenden Datenmodul für Schweizerischen Niederspannungsstrom der Strommix ab Kraftwerk abgezogen und durch den GuD-Strom ersetzt. Das Modul "Strom Niederspannung - Bezug in CH Import" verbucht für 1 TJ Strom ab Niederspannungsnetz aufgrund von Verteilungsverlusten 1.138 TJ Strom ab Kraftwerk (Modul "Strom - Mix CH Import").

Der hier berechnete Strom "mix" 100% GuD-Niederspannungsstrom wird in der Marginalrechnung anstatt des durchschnittlichen Landesstrommixes "Strom Niederspannung - Bezug in CH Import" verbucht.

GuD-Kraftwerk Datenmodule aus [ESU 96] nach [PSI 96]		pro TJ Erdgas-Input	pro TJ Strom ab Klemme Wirkungsgrad = 58%
<i>Brennstoff</i>			
Erdgas HD-Abnehmer CH	TJ	1	1.72
<i>Infrastruktur</i>			
Beton	kg	30	51.7
Stahl hochlegiert	kg	4	6.9
Stahl unlegiert	kg	20	34.5
Aluminium 0% Rec.	kg	1	1.72
Kupfer	kg	1	1.72
PE(HD)	kg	3	5.17
Steinwolle	kg	1.5	2.59
HCl	kg	2.5	4.31
NaOH	kg	2	3.45
PE in KVA	kg	3	5.17
<i>Emissionen in Luft</i>			
CO2 Kohlendioxid s	kg	55000	94800
CO Kohlenmonoxid s	kg	30	51.7
NOx Stickoxide als NO2 s	kg	30	51.7
SOx als SO2 s	kg	0.5	0.862
N2O Lachgas s	kg	1	1.72
CH4 Methan s	kg	6	10.3
Hg Quecksilber s	kg	0.00005	0.0000862
Partikel s	kg	0.3	0.517
Butan s	kg	0.6	1.03
Pentane s	kg	0.5	0.862
Formaldehyd s	kg	0.4	0.69
Benzol s	kg	0.2	0.345
Propan s	kg	0.2	0.345
Essigsaeure s	kg	0.1	0.172
Toluol s	kg	0.1	0.172
Propionsaeure s	kg	0.01	0.0172
PAH Polzyklische aromatische HC s	kg	0.005	0.00862
Acetaldehyd s	kg	0.0007	0.00121
BaP Benzo(a)pyren s	kg	0.00001	0.0000172
TCDD-Aequivalente	ng	21	36.2

Tab. 25: Inventarisierung von Elektrizität ab GuD-Kraftwerk mit 58% Jahresnutzungsgrad, ohne Netzzübertragungsaufwände und -verluste.

Verbuchte Module aus [ESU 96] pro 1 TJ 100% GuD Strom ab Niederspannungsnetz	Einheit	Menge
Strom Niederspannung - Bezug in CH Import	TJ	1
Strom - Mix CH Import	TJ	-1.138
Strom ab Klemme GuD-KW (s.o.)	TJ	+1.138

Tab. 26: Inventarisierung von Elektrizität ab GuD-Kraftwerk, inkl. Netzübertragungsaufwände und -verluste.

Datenqualität

Die Datenqualität basiert auf Standarddatensätzen in [ESU 96], Herstellerangaben, eigenen Ergänzungen und Annahmen (Wirkungsgrad) und ist als gut bis sehr gut einzustufen.

1.5.3.4 Gipsfaserplatte

In den Leichtbau-Varianten der betrachteten Gebäude werden Gipsfaserplatten (Handelsname Fermacell) eingesetzt. Von der Vertriebsfirma konnten Informationen über den Herstellungsprozess und die Rohmaterialien erhoben werden [Schubiger 97].

Die Platten werden im wesentlichen aus gebranntem Gips und Altpapier (Haushaltsammelware) hergestellt. Es bestehen drei Werke in Europa: in Deutschland, in Spanien und in Holland. Das Werk in Deutschland beliefert die Schweiz. Dort besteht der eingesetzte Gips im Durchschnitt zu 95% aus neu abgebautem, gebranntem Naturgips und zu 5% aus sogenanntem REA-Gips. Der REA-Gips muss rein sein und stammt aus Rauchgas-Entschwefelungs-Anlagen (REA) von Verbrennungsanlagen wie z.B. Industriefeuerungen oder Kraftwerken mit Heizöl S oder Kohle als Brennstoff. Das Werk in Holland verwendet ausschliesslich REA-Gips, das Werk in Spanien ausschliesslich Naturgips. In Zukunft ist gemäss Herstellerangaben ein höherer Anteil an REA-Gips im deutschen Werk denkbar, was hier aber nicht betrachtet werden kann.

Zusätzlich kommt eine Menge von weniger als 0.1 G-% Stärke und Silikonverbindungen zur Imprägnierung zum Einsatz. Es wird eine Menge von 0.08% G-% als organische Chemikalien bilanziert (unbedenkliche Abschätzung). Bei der Herstellung werden gemäss Hersteller 30% Sekundärmaterial (Plattenverschnitt aus Herstellung und von Baustellen) eingesetzt. Der Wasserverbrauch bei der Herstellung konnte nicht eruiert werden und wird aufgrund der vermutlich kleinen Umweltrelevanz vernachlässigt. Direkte Prozessemissionen sind aufgrund der eingesetzten Stoffe keine zu erwarten. Bei der Herstellung werden 10% Verschnitt angenommen (interne Wiederverwertung). Der Restwassergehalt der Gipsplatten wurde auf 5% geschätzt; der Gipsgehalt der Platten beträgt 80%; der Papiergehalt 15%.

Die direkte Verwendung der Sekundärmaterialien (REA-Gips, Altpapier, Gipsplattenverschnitte) wird gemäss der Methodik in [ESU 96] mit keinen vorgelagerten Umweltbelastungen belastet; bzw. die Umweltbelastungen werden zu 100% den erzeugenden, vorgelagerten Prozessen (Rauchgasreinigung resp. Papierkonsum) angelastet. Lediglich der Transport der Altmaterialien zum Gipsplattenwerk muss dem neuen Produkt angerechnet werden. Es werden dafür 500km Bahntransport bilanziert.

Zur Herstellungsenergie (Pressen, Trocknen, Schleifen) konnten keine Angaben gefunden werden. Daher werden die Angaben für armierte Gipsplatten aus [ESU 95] übernommen.

Die Platten werden in PE-Folie verpackt. Es wird eine geschätzte Menge von 10 Gramm PE-Folie pro kg Fertigprodukt und dessen anschliessende Entsorgung in der KVA verrechnet.

Gemäss [Schubiger 97] werden in Zukunft alte Gipsfaserplatten vermehrt recycelt. Bei einer Gebäudelebensdauer von 80 Jahren wird das Recycling sehr wahrscheinlich einen wesentlichen Anteil an der Altmaterial-Verwertung annehmen. Beim betrachteten Haus werden jedoch die Platten verleimt, was ein Recyclieren verunmöglich oder voraussichtlich mindestens erschwert. Bei der Gebäudebilanzierung wird daher eine Entsorgung als Bauschutt angenommen.

Verbuchte Module aus [ESU 96] und [ESU 95] pro 1 kg Gipsfaserplatte	Einheit	Menge
Gebrannter Gips	kg	0.548
Chemikalien organisch	kg	0.000616
PE (HD)	kg	0.01
PE in KVA	kg	0.01
Heizoel EL in Heizung 1 MW	TJ	0.0000015
Strom Mittelspannung - Bezug in W-D	TJ	0.00000037
Transport Schiene	tkm	0.165

Tab. 27: *Eingabedaten zur Bilanzierung der Herstellung von 1 kg Gipsfaserplatte CH*

Datenqualität

Die Daten sind als weitgehend vollständig anzusehen. Die Daten stammen vom Hersteller selbst. Die wichtigsten Rohstoffe konnten adäquat berücksichtigt werden. Der Energieverbrauch musste in Analogie abgeschätzt werden. Die Datenqualität der Bilanzierung ist gesamthaft als genügend einzustufen.

1.5.3.5 Mörtel für Backsteinmauer

Bei den Massivbauvarianten der Gebäude werden Backsteinmauern als Wände angenommen. Der eingesetzte Mörtel (inkl. Verluste) wurde zu rund 25% der Gewichtes der eingesetzten Backsteine geschätzt [ZZ 95]. Die benötigten Bestandteile des Mörtels sowie dessen Herstellung (Modul "Putzmischen" für 1 kg) wurden in [ESU 96] und [ESU 95] bilanziert. Es wird angenommen, dass der Mörtel aus 80% Sand [ESU 95, p.6.10] und zu 20% aus Zement besteht.

Verbuchte Module aus [ESU 96] und [ESU 95] pro 1 kg Backstein-Mörtel	Einheit	Menge
Sand fuer Bau	kg	0.8
Putzmischen	kg	1
Zement PC-CH	kg	0.2

Tab. 28: *Eingabedaten zur Bilanzierung der Herstellung von 1 kg Backstein-Mörtel*

Datenqualität

Die Zusammensetzung des Produktes musste abgeschätzt werden, ist jedoch im wesentlichen korrekt. Die getroffenen Annahmen sind unbedenklich. Die Bestandteile und deren Verarbeitung konnte vollständig und adäquat berücksichtigt werden. Die Datenqualität der Bilanzierung ist gesamthaft als gut einzustufen.

1.5.3.6 Holzzementplatte

In den Gebäuden werden Holzzementplatten (Handelsname Duripanel) für Brandwände, Wand-Abschlüsse sowie Lukarnen-Verkleidung verwendet. Es handelt sich um zementgebundenes Holzmehl. Von der Vertriebsfirma konnten Informationen über den Herstellungsprozess und die Rohmaterialien erhoben werden [Höllinger et al. 97].

Das eingesetzte Holz (Fichte, Kiefer) hat Bauholzqualität. Altholz kann nicht eingesetzt werden. Der Holzanteil im Fertigprodukt beträgt 36 G-%. Neben Zement (48 G-%) werden geringe Mengen an Weißkalkhydrat, Natronwasserglas und Aluminiumsulfat (zusammen 1.5%) eingesetzt. Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit und der geringen Menge werden diese in erster Näherung als Zement bilanziert. Der Wasserverbrauch bei der Herstellung konnte nicht eruiert werden und wird aufgrund der vermutlich kleinen Relevanz vernachlässigt. Der Verlust/Verschnitt bei der Herstellung wird identisch zur Herstellung von Faserzementplatten in [ESU 95] angenommen.

Die Platten werden in Deutschland hergestellt. Von [Höllinger et al. 97] wird eine Herstellungsenergie von 350 kWh Primärenergie pro Kubikmeter Platte angegeben. Um einzelne Energieträger berück-

sichtigen zu können wurde diese Angabe gemäss der Aufteilung der Energieträger für Faserzementplatten in [ESU 95] differenziert und mittels durchschnittlichen Effizienzen (38% für Strom, 85% für Wärme) von Primär- auf Endenergieeinsatz umgerechnet. Zur Umrechnung wird eine Dichte der Platten von 1250 kg/m³ verwendet.

Für die Rohstoffe (Holz, Zement) wird eine Transportdistanz von 50km LKW angenommen.

Gemäss [Höllinger et al. 97] wird zur Zeit ein Vollrecycling für alte Holzzementplatten geplant. Alte Zementplatten sollen in Zementöfen als Brennstoff/Rohstoffgemisch verbrannt werden und so den Stoffkreislauf schliessen. Bei den vorliegenden Gebäuden wird jedoch eine Entsorgung als Bausperrgut angenommen. Bei den eingesetzten geringen Mengen im Gebäude hat die Entsorgung keine Bedeutung für das Schlussresultat.

Verbuchte Module aus [ESU 96] und [ESU 95] pro 1 kg Gipsfaserplatte	Einheit	Menge
Zement PC-CH	kg	0.647
Schnittholz kant-	kg	0.471
Heizoel EL in Heizung 1 MW	TJ	7.22*10 ⁻⁸
Strom Mittelspannung - Bezug in W-D Import	TJ	2.98*10 ⁻⁷
Erdgas in Industrieheizung >100kW Euro	TJ	1.13*10 ⁻⁷
Heizoel EL in Heizung 100 kW	TJ	4.39*10 ⁻⁹
Transport LKW 28 t	tkm	0.0559

Tab. 29: Eingabedaten zur Bilanzierung der Herstellung von 1 kg Holzzementplatte CH

Datenqualität

Die Daten sind als weitgehend vollständig anzusehen. Die Daten stammen vom Hersteller selbst. Die wichtigsten Rohstoffe konnten adäquat berücksichtigt werden. Der Energieverbrauch musste aus Primärenergieangaben in Analogie umgerechnet werden. Die Datenqualität der Bilanzierung ist gesamthaft als gut einzustufen.

1.5.3.7 Elektronikmaterial

Für geringe Mengen elektronischer Bauteile in den Wärmepumpen wurde in erster Näherung eine durchschnittliche Zusammensetzung von Elektronikkomponenten bilanziert. Die Bilanz stützt sich auf Analysen der elementaren Zusammensetzung von Elektronikkomponenten aus [Zimmermann et al. 96, p.III.B.30]. Bilanziert werden nur die Elektronikkomponenten ohne Epoxykunststoff und Glasfasern der Platinen, welche gesondert erfasst wurden. Rund 73 G-% der angegebenen Elemente können berücksichtigt werden. Zur Herstellungsenergie konnten keine Angaben gefunden werden, diese wird aber für Elektronikmaterial nicht vernachlässigbar sein. Zu Prozessemmissionen (z.B. aus Reinigung), Ausschuss und Abfällen konnten ebenfalls keine Angaben gefunden werden.

Verbuchte Module aus [ESU 96] pro 1 kg Elektronikmaterial	Einheit	Menge
Kupfer	kg	0.272
Stahl niedriglegiert	kg	0.136
Blei	kg	0.103
PVC	kg	0.0881
Zink	kg	0.0476
Nickel ab Anreicherung	kg	0.0457
Aluminium 0% Rec.	kg	0.0206
Silizium 1)	kg	0.0136
Mangan	kg	0.00171
Chrom	kg	0.00161
Platin ab Anreicherung	kg	0.000279
Fluorwasserstoff HF (Flusssäure)	kg	0.0000873

Tab. 30: Eingabedaten zur Bilanzierung der Materialinputs zur Herstellung von 1 kg Elektronikmaterial (ohne Platinenepoxykunststoff und Glasfasern). 1) Eigene Schätzung, bilanziert als 2.27 Stück "m-Si Wafer"

Datenqualität

Elektronikkomponenten sind hochkomplexe und massivst heterogene Materialien. Aufgrund der gerin- gen Wichtigkeit in diesem Projekt mag diese grobe und unvollständige Abschätzung aus Mangel an vollständigeren Daten als Platzhalter dienen. Die Datenqualität ist v.a. aufgrund fehlender Energiebe- züge und Ausschussraten als mangelhaft bis schlecht zu bezeichnen, was aber infolge der geringen Bedeutung beim Endresultat nicht ins Gewicht fällt. Die hier vorliegenden Angaben dürfen in anderen Ökobilanzen explizit *nicht* angewendet werden, wenn die Elektronikkomponenten einen wichtigen Teil des bilanzierten Systems ausmachen (z.B. Ökobilanz von Computern).

1.5.3.8 Elektronikabfälle

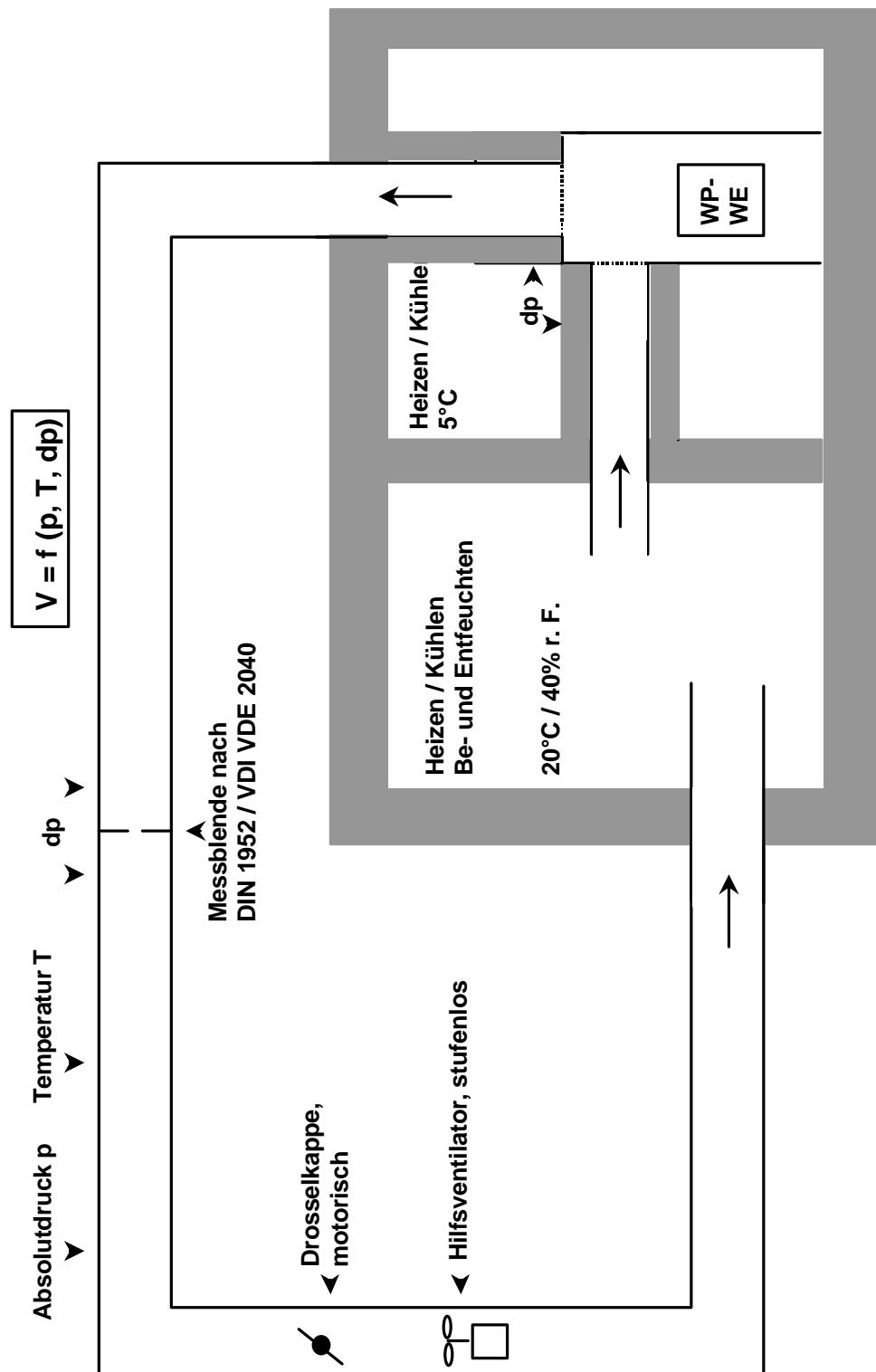
Über die Entsorgung von Elektronikabfällen sind nur wenige ökobilanzrelevante Informationen be- kannt. In [ESU 96] wurde zwar der Abfalltyp "Elektronikabfälle" unterschieden, jedoch nicht bilanziert. Aus einer neuen Publikation konnte der Stromverbrauch beim Elektronikrecycling übernommen wer- den. Der Stromverbrauch wird mit 20 bis 110kWh/t angegeben [Behrendt et al. 98, p.133]. Hier wird ein Mittelwert von 65kWh/t ($2.34 \cdot 10^{-7}$ TJ/kg) als UCPTE Mittelspannungsstrom verbucht.

Datenqualität

Die Datenqualität ist schlecht. Aufgrund der geringen Mengen an Elektronikabfällen im vorliegenden Projekt hat dies jedoch keine Bedeutung für das Endresultat. Vergleiche auch Kommentare zur Da- tenqualität der Bilanzierung von Elektronikkomponenten.

1.6 Messeinrichtungen

1.6.1 Messeinrichtung für WP-Wassererwärmer gemäss EN 255-6



1.7 Annahmen für den Kostenvergleich

1.7.1 Kostenzusammenstellung Luft/Wasser-WP-Heizung mit Abluft-Wärmepumpe zur Wasserwärmung

L/W/4.6/A-WP		Luft/Wasser-WP mit 4.6 kWth (bei L-7/W35) + Abluft-WP-Wassererwärmer		
Kapitalkosten	Zinssatz		Nutzung Jahre	Investition Fr.
	5.0%			Annuität Fr.
		Wärmequelle		
		Bauarbeiten	30	500.00
		Zu-, Abluftschläuche	15	800.00
		Wärmeerzeugung		
		Wärmepumpe inkl. Regler	15	10'350.00
		Montage der WP	15	990.00
			15	95.38
		Einregulierung	15	450.00
			15	43.35
		Planungsanteil	30	500.00
		Anschlussgebühren		32.53
		Elektriker komplett	30	800.00
		Wärmeverteilung		
		Niedrigtemp. 30/25 Grad (Installation + Planung)	30	9'470.00
		Warmwasseraufbereitung		
		Abluft-WP-Wassererw.	15	4'660.00
		Kanäle, Schalldämpfer	30	1'430.00
		Mauerventile (6 Stück)	15	1'035.00
		Montage+Inbetriebnahme	15	3'200.00
		Planungsanteil	30	500.00
		Unterstützungsbeiträge		32.53
		Total Kapitalkosten		34'685.00
				2'928.59
Betriebskosten				Kosten Fr.
		durchschn. Unterhaltskosten		150.00
		Teuerung		
		Teuerungsrate		
		Beurteilungsdauer	20	
		Total Betriebskosten		150.00
Energiekosten		174 MJ/m2a Heizenergiebed.	Menge kWh	Preis Fr./kWh
		62 MJ/m2a Warmwasserbed.		Kosten Fr.
		Elektrizität		
		0.38 Niedertarifanteil		
		3.5 JAZ der Wärmepumpe		0.10
		Zusatzheizung	771	80.23
		2.5 JAZ der Abluft-WP	385	40.02
		Hilfsenergie	56	5.81
		0.62 Hochtarifanteil		
		3.5 JAZ der Wärmepumpe	1259	0.16
		2.5 JAZ der Abluft-WP	628	200.12
		Hilfsenergie	91	99.83
		Teuerung/Fixkosten		
		Teuerungsrate		
		Beurteilungsdauer	20	14.49
		Zahlergebühr		
				57.60
		Total Energiekosten		498.09
Jahreskosten exkl. Mwst.				34'685.00
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Öl				-55.08
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				648.09
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				7.04
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				39.09

1.7.2 Kostenzusammenstellung Ölheizung mit WRG

Oel 16 kW/B-B		Oel 16 kW-Heizkessel mit Beistellboiler und Zuluft-/Abluft-Wärmetauschersystem		
Kapitalkosten	Zinssatz 5%	Nutzung Jahre	Investition Fr.	Annuität Fr.
Wärmequelle				
Oeltank (2000 l)	30	1'450.00	94.32	
Zubehör	30	290.00	18.86	
Spanplattenwand	30	1'000.00	65.05	
Eingabe Amt für U'Schutz	30	150.00	9.76	
Wärmeerzeugung				
Heizkessel mit Beistellboiler inkl.	15	8'500.00	818.91	
Kamin 8m	30	4'000.00	260.21	
Expansionsgefäß	15	350.00	33.72	
Pumpen/Leitungen/Isolat.	15	500.00	48.17	
Platzbedarf	30			
Wärmeverteilung				
Niedertemp. 50/40 Grad (Installation + Planung)	30	5'840.00	379.90	
Warmwasserbereitung				
im Kessel integriert	15			
Montage/Einregulierung				
Elektriker komplett	15	2'500.00	240.86	
15		800.00	77.07	
Zuluft-/Abluft-System				
Monobloc	15	5'000.00	481.71	
Zuluft-/Abluftkanäle	30	8'000.00	520.41	
Total Kapitalkosten		38'380.00	3'048.96	
Betriebskosten	(gemäss Erdölvereinigung)			Kosten Fr.
Service				360.00
Reinigung, Kaminfeger				120.00
Kontrolle				60.00
Tankrevision				70.00
Versicherung				
Teuerung				
Teuerungsrate				
Beurteilungsdauer	20			
Total Betriebskosten				610.00
Energiekosten		Menge	Preis Fr.	Kosten
Elektrizität		kWh		
Niedertarif			0.10	
Hilfsenergie	200			20.00
Hochtarif			0.25	
Hilfsenergie	200			50.00
Elektroboiler im Sommer				
Niedertarif			0.10	
Warmwasser (eta=0.7)	1807			180.70
Heizöl		Liter	Fr./Liter	Fr.
Heizung (eta=0.85)	836	0.33	275.88	
Warmwasser (eta=0.8)	158		52.14	
Teuerung				
Teuerungsrate				
Beurteilungsdauer	20			
Total Energiekosten				578.72
Jahreskosten exkl. Mwst.			38'380.00	4'237.68
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Oel				
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				1188.72
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				12.92
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				46.31

1.7.3 Kostenzusammenstellung Gasheizung mit WRG

Gas/B-B mit WT		Gaskessel atmosphärisch 13 kW mit Beistellboiler mit Zuluft/Abluft-Wärmetauschersystem			
Kapitalkosten		Nutzung Jahre	Investition Fr.	Annuität Fr.	
Zinssatz 5.0%	Zuluft-/Abluft-System Monobloc	15	5'000.00	481.71	
	Zuluft-/Abluftkanäle	30	8'000.00	520.41	
	Wärmeerzeugung Gaskessel	15	2'860.00	275.54	
	Heizungsregelung	15	1'030.00	99.23	
	Hydraulisches Zubehör	15	1'170.00	112.72	
	Montage	15	1'000.00	96.34	
	Inbetriebnahme	15	300.00	28.90	
	Dachkamin komplett	30	1'000.00	65.05	
	Gasleitung im Haus	30	1'500.00	97.58	
	Anschlussgebühr	30	3'000.00	195.15	
Wärmeverteilung Niedertemp. 50/40 Grad (Installation +Planung))					379.90
	Warmwasseraufbereitung Beistellboiler 300 l	15	2'100.00	202.32	
	Elektriker komplett	30	1'500.00	97.58	
	Unterstützungsbeiträge				
		Total Kapitalkosten	34'300.00	2'652.44	
Betriebskosten				Kosten Fr.	
	durchschn. Unterhaltskosten			400.00	
	Teuerung Teuerungsrate Beurteilungsdauer	20			
		Total Betriebskosten		400.00	
Energiekosten	174 MJ/m2a Heizenergiebed. 62 MJ/m2a Warmwasserbed.	Menge kWh	Preis Fr./kWh	Kosten Fr.	
	Elektrizität				
	Niedertarif Hilfsenergie	200	0.10	20.00	
	Hochtarif Hilfsenergie	200	0.25	50.00	
	Teuerung Teuerungsrate Beurteilungsdauer	20	0.25	3.18	
	Gasverbrauch	kWh	Fr./kWh	Fr.	
	Heizung (eta=0.9) Warmwasser (0.8)	7894 3165	0.054	426.30 170.89	
		Total Energiekosten		670.37	
	Jahreskosten exkl. Mwst.		34'300.00	3'722.81	
	monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Oel			-42.91	
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				1070.37	
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				11.63	
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				40.69	

1.7.4 Kostenzusammenstellung Holzheizung mit WRG Eco Confort

Holzofen/WT		Schwedenofen zentral mit Zuluft/Abluft-System Eco Confort		
Kapitalkosten	Zinssatz			
	5.0%		Nutzung Jahre	Investition Fr.
	Wärmequelle			
	Bauarbeiten	30	300.00	19.52
	Erdregister	30	1'200.00	78.06
	Wärmeerzeugung			
	Schwedenofen	15	5'500.00	529.88
	Kamin	15	4'000.00	385.37
	Hydraulisches Zubehör			
	Montage+Inbetriebnahme	15	1'000.00	96.34
	Lüftungssystem Eco Confort			
	Monobloc	15	5'000.00	481.71
	Luftführungen komplett	30	8'000.00	520.41
	Elektriker	30	800.00	52.04
	Wärmeverteilung			
	Warmwasseraufbereitung			
	Elektro-Boiler komplett (inkl. Sanitäranschluss)	15	2'500.00	240.86
	30			
	Unterstützungsbeiträge			
	Total Kapitalkosten		28'300.00	2'404.19
Betriebskosten				Kosten Fr.
	durchschn. Unterhaltskosten			150.00
	Kaminfeuer			80.00
	Teuerung			
	Teuerungsrate			
	Beurteilungsdauer	20		
	Total Betriebskosten			230.00
Energiekosten				Kosten Fr.
	114 MJ/m2a Heizenergiebed.	Menge kWh	Preis Fr./kWh	
	62 MJ/m2a Warmwasserbed.			
	Elektrizität			
	0.38 Niedertarifanteil		0.10	
	85 MJ/m2a Lüftungsverlust			
	6 ETV des L-Systems	154		16.00
	0.7 eta des Elektroboiler	3617		376.13
	Hilfsenergie			
	0.62 Hochtarifanteil		0.25	
	6 ETV des L-Systems	481		120.25
	Zusatzeheizung			
	Hilfsenergie			
	Holz	Ster	Fr./Ster	
	Verbrauch	3.4	100.00	344.81
	Total Energiekosten			857.21
Jahreskosten exkl. Mwst.			28'300.00	3'491.40
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Öl				-62.19
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				1087.21
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				11.82
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				38.16

1.7.5 Kostenzusammenstellung Luft/Luft-WP mit WRG HTM200

L/L-WRG HTM 200		Luft/Luft-Wärmepumpe HTM 200 mit WRG/Erdregister und integriertem Wassererwärmer		
Kapitalkosten	Zinssatz		Nutzung Jahre	Investition Fr.
	5.0%			Annuität Fr.
	Wärmequelle			
	Bauarbeiten	30	300.00	19.52
	Erdregister	30	1'200.00	78.06
	Wärmeerzeugung			
	HTM 200 Kompakteinheit inkl. Heizungsregelung inkl. hydraul. Zubehör Montage	15	15'000.00	1'445.13
	Platzbedarf Anschlussgebühren Elektriker	30	500.00	48.17
	Wärmeverteilung			
	Material + Installation Planung	30	6'000.00	390.31
		30	1'000.00	65.05
	Warmwasseraufbereitung integriert in HTM 2000 Sanitäranschluss	30	1'000.00	65.05
	Unterstützungsbeiträge			
	Total Kapitalkosten		25'500.00	2'143.82
Betriebskosten				Kosten Fr.
	durchschn. Unterhaltskosten			150.00
	Teuerung			
	Teuerungsrate Beurteilungsdauer	20		
	Total Betriebskosten			150.00
Energiekosten				Kosten Fr.
	174 MJ/m2a Heizenergiebed. 62 MJ/m2a Warmwasserbed.	Menge kWh	Preis Fr./kWh	
	Elektrizität			
	0.38 Niedertarifanteil 2.5 JAZ WP für Heizen Zusatzheizung 2.5 JAZ WP für Wassererwärmung Elektrofilter	1080	0.10	112.32
		1013		105.32
		56		5.81
	0.62 Hochtarfanteil 2.5 JAZ WP für Heizen Zusatzheizung Elektrofilter	1762	0.16	280.16
		91		14.49
	Teuerung/Fixkosten			
	Teuerungsrate Beurteilungsdauer Zählergebühr	20		57.60
	Total Energiekosten			575.70
Jahreskosten exkl. Mwst.			25'500.00	2'869.52
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Öl				-114.01
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				725.70
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				7.89
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				31.36

1.7.6 Kostenzusammenstellung Sole/Wasser-WP-Heizung mit Beistellboiler und WRG

S/W /4.9/B-B sc Propan		Sole/Wasser-WP 4.9 kWth (S0/W35) mit Beistellboiler und Zuluft-/Abluft-Wärmetauschersystem		
Kapitalkosten				
Zinssatz	5.0%	Nutzung Jahre	Investition Fr.	Annuität Fr.
	Wärmequelle 100m Erdwärmesonde komplett Bauseitige Arbeiten (Mauerfräsen, Grabarbeit)	30 30	8'800.00 500.00	572.45 32.53
	Wärmeerzeugung Wärmepumpe inkl. Heizungsregelung Apparate/Armat./Leit./Isol.	15 15	9'700.00 1'750.00	934.52 168.60
	Zuluft-/ Monobloc Zuluft-/Abluftkanäle	15 30	5'000.00 8'000.00	481.71 520.41
	Wärmeverteilung Niedertemp. 30/25 Grad (Installation + Planung)	30 30	9'500.00	617.99
	Warmwasseraufbereitung Beistellboiler komplett Sanitäranschluss	15 30	2'100.00 1'000.00	202.32 65.05
	Elektriker komplett Transport/Montage kompl.	30 15	1'500.00 1'900.00	97.58 183.05
	Unterstützungsbeiträge			
	Total Kapitalkosten		49'750.00	3'876.21
Betriebskosten				Kosten Fr.
	durchschn. Unterhaltskosten			150.00
	Teuerung Teuerungsrate Beurteilungsdauer	20		
	Total Betriebskosten			150.00
Energiekosten				
	174 MJ/m2a Heizenergiebed. 62 MJ/m2a Warmwasserbed.	Menge kWh	Preis Fr./kWh	Kosten Fr.
	Elektrizität			
	0.38 Niedertarifanteil 3.1 JAZ der Wärmepumpe Zusatzheizung eta des Elektroboiler Hilfsenergie	1181	0.10	122.85
	0.62 Hochtarifanteil 3.1 JAZ der Wärmepumpe Zusatzheizung Hilfsenergie	1927 91	0.16	306.45 14.49
	Teuerung/Fixkosten Teuerungsrate Beurteilungsdauer Zählergebühr	20		57.60
	Total Energiekosten			507.20
Jahreskosten exkl. Mwst.			49'750.00	4'533.41
monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Oel				24.64
jährlich anfallende Kosten (ohne Kapitalkosten)				657.20
Kosten in Rp. pro kWh (Energie und Betrieb)				7.14
Gesamtkosten in Rp. pro kWh (inkl. Kapital)				49.55

1.8 Projektbeschrieb „MINERGIE-Wärmepumpe“: Erarbeitung von Marketing-Grundlagen für Wärmepumpen in Niedrigenergiehäusern“

1.8.1 Titel: Marketing-Projekt „MINERGIE-Wärmepumpe“

1.8.2 Projektbeschreibung

Im Rahmen des BFE-Forschungs-Projektes 60242 „Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe“ wird gezeigt, dass sich mit Kleinwärmepumpen in Niedrigenergiehäusern sehr gute Jahresarbeitszahlen bei tiefen Investitionskosten realisieren lassen. Bis Mitte 1999 werden diese theoretischen Erkenntnisse durch Messungen in Referenzanlagen verifiziert. Das Forschungsprojekt wird die Resultate in einem Schlussbericht und einem technischen Planungs-Handbuch dokumentieren. Die Mehrkosten für die Referenzanlagen werden von der Elektrizitätswirtschaft finanziert. Es fehlen nun aber noch die marktseitigen Aktivitäten, um diese Erkenntnisse unter die Fachleute und Bauherrschaften zu bringen. Die FWS möchte deshalb innerhalb dieser Gesamtarbeit ein Marketing-Handbuch für die involvierten Fachleute und ein Faltprospekt zur Information der Investoren / Bauherren realisieren.

1.8.3 Zielsetzung

Erarbeitung und Dokumentation der Marktbearbeitungs-Grundlagen für den Einsatz von Kleinwärmepumpen in Niedrigenergiehäusern (zwecks Erreichen des Minergie-Zertifikats) sowie Bekanntmachung der Technologie bei den potentiellen Bauherrschaften, Behörden, Fachleute und Banken

1.8.4 Projektteam/Auftragnehmer

Projektteam: Ressort Marketing der FWS

Auftragnehmer: D. Wittwer, INFEL (stv. Projektleiter BFE-Projekt 60242)

Unterauftragnehmer: noch offen (Texten, Grafik, Layout und Druck)

1.8.5 Termine

Aktivität	Verantwortlich	Termin:
Messungen an 3 Referenzanlagen	Projektteam NTH3	Winter 98/99
Auswertung des ersten Halbjahres	„	Mai 99
Erarbeiten Marketing-Grundlagen	Ressort Marketing FWS	8/98-6/99
Realisieren des Faltblattes	“	3/99-6/99
Tag der offenen Türe	“	Herbst 99
Erarbeiten Planungs-Grundlagen	A. Huber, Ing. Büro	8/98-6/99
Druck des gemeinsamen Handbuchs	Projektteam NTH4	Sommer 99

1.8.6 Erfolgskriterien

Die Möglichkeiten der Kleinwärmepumpen sind bei den Fachleuten, Behörden, Investoren und Bauherren bekannt. Die WP-Heizung ist neben der Gasheizung das Standardsystem zur Erreichung des Minergie-Zertifikates für ein Einfamilienhaus.

1.9 Übersicht Technisches Handbuch für Planer und Energieberater

Das Handbuch wird parallel zur Phase 3 des Forschungsprojektes "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" gestartet. Damit soll sichergestellt werden, dass die Forscher selbst Ihre Resultate bereits in der Projektphase in den Gesamtzusammenhang stellen und in einer für Außenstehende verständlichen Form darstellen können. Damit kann ein über ihr Fachgebiet hinaus reichendes Publikum angesprochen werden.

Das Handbuch wird einen Umfang von 60-70 Seiten haben und die wichtigsten Zusammenhänge sowie die Vorgehensweise bei der Planung erklären. Neben einem kurz gefassten Gesamtüberblick und einer Darstellung der neuen Forschungsergebnisse sollen auch Beispiele zur Anwendung der Resultate enthalten sein.

Für das Handbuch ist die folgende Gliederung vorgesehen:

• <u>Inhaltsverzeichnis</u>	total	1	Seite
• <u>Grundlagen und Forschungsresultate</u>	total	24 (30)	Seiten
Begriffsklärung	je	1	Seite
Energie: Heute / Ziele	je	½	Seite
Oekonomie: Heute / Ziele		2	Seiten
Oekonomie: Situation Passivhaus		1	Seite
Regelung, Situation heute		½	Seite
Regelung / Steuerung, neue Konzepte (Grundidee, Messresultate)		2	Seiten
Regelung, neue Konzepte, (Reglerauslegung, Messresultate)		3	Seiten
Oekologie, Grundproblematik, Methodik		2	Seiten
Oekologie, Forschungsresultate		4	Seiten
Systemanalyse NTH (inkl. hydr. Schaltbilder / Messresultate)		4	Seiten
Systemsimulationen / Resultate Simulation NTH		4	Seiten
Systemanalyse Passivhaus (inkl. hydr. Schaltbilder / Messres.)		2	Seiten
Systemsimulationen Passivhaus		2	Seiten
Hinweise zu Platzbedarf, Brandschutz, etc.		1	Seite
• <u>Planungsvorgehen</u>	total	14 (16)	Seiten
Planungsvorgehen nach SIA		2	Seiten
Integrale Planung		1	Seite
Machbarkeitsabklärungen (inkl. Prinzipschema)		2	Seiten
Vorprojekt (Kosten, Termine, Platz)		1	Seite
Projekt (KV, Disposition, Koord., MSR)		2	Seiten
Ph. 3: Ausschreibung, QS (JAZ)		1	Seite
Ausführung, Qualitätssicherung		1	Seite
Abnahmen		1	Seite
Planungsbeispiel		3	Seiten
Hinweise zu Spezialitäten des Passivhauses		2	Seiten
• <u>Beispiele für Niedrigenergie- und Passivhäuser</u>	total	12 (16)	Seiten
ERDSONDEN-WP FÜR HEIZEN UND WARMWASSER			
Beschreibung (Foto, Schema, Energiebilanz)		1	Seite
Berechnungen		1	Seite
Messresultate		1	Seite
Kosten (Planungswerte, real)		1	Seite
LUFT-/WASSER-WP MIT HYDRAULISCHEM VERTEILSYSTEM UND ABLUFT-WP-BOILER			
Beschreibung (Foto, Schema, Energiebilanz)		1	Seite
Berechnungen		1	Seite
Messresultate		1	Seite
Kosten (Planungswerte, real)		1	Seite
LUFT-WP MIT ABLUFT-WP-BOILER, MIT LUFTHEIZUNG			
Beschreibung (Foto, Schema, Energiebilanz)		1	Seite

Berechnungen	1	Seite	
Messresultate	1	Seite	
Kosten (Planungswerte, real)	1	Seite	
<u>PASSIVHAUS-KONZEPT</u>			
Beschrieb (Foto, Schema, Energiebilanz)	1	Seite	
Berechnungen	1	Seite	
Messresultate	1	Seite	
Kosten (Planungswerte, real)	1	Seite	
• <u>Abkürzungsverzeichnis</u>	total	1	Seite
• <u>Informationsquellen</u>	total	1	Seite
• <u>Stichwortverzeichnis</u>	total	2	Seiten
• <u>Checklisten</u>	total	2	Seiten

Anmerkungen:

- Der Endverkaufspreis des Handbuchs soll maximal 50 Fr. betragen
- Der Vertrieb erfolgt über ENET und INFEL