

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: | Bircher + Keller AG | 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 Energietschnik, 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 | HANDRECHENMETHODE ZUR BESTIMMUNG DER JAHRESARBEITSZAHL VON WÄRMEPUMPENANLAGEN FÜR HEIZ- UND WARMWASSERBETRIEB | 1 |
| 1.2 | TRNSYS-TYPE FÜR EINE ZWEISTUFIG DREHZAHLGEREGLTE 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> | <i>39</i> |
| 1.5.2 | <i>Bewertung von Materialien und Prozessen</i> | <i>52</i> |
| 1.5.3 | <i>Bilanzierung von neuen Materialien und Prozessen.....</i> | <i>53</i> |
| 1.6 | MESSEINRICHTUNGEN | 61 |
| | <i>Messeinrichtung für WP-Wassererwärmer gemäss EN 255-6.....</i> | <i>61</i> |
| 1.7 | ANNAHMEN FÜR DEN KOSTENVERGLEICH | 62 |
| 1.7.1 | <i>Kostenzusammenstellung Luft/Wasser-WP-Heizung mit Abluft-Wärmepumpe zur Wasserwärmung</i> | <i>62</i> |
| 1.7.2 | <i>Kostenzusammenstellung Ölheizung mit WRG</i> | <i>63</i> |
| 1.7.3 | <i>Kostenzusammenstellung Gasheizung mit WRG.....</i> | <i>64</i> |
| 1.7.4 | <i>Kostenzusammenstellung Holzheizung mit WRG Eco Confort.....</i> | <i>65</i> |
| 1.7.5 | <i>Kostenzusammenstellung Luft/Luft-WP mit WRG HTM200.....</i> | <i>66</i> |
| 1.7.6 | <i>Kostenzusammenstellung Sole/Wasser-WP-Heizung mit Beistellboiler und WRG ...</i> | <i>67</i> |
| 1.8 | PROJEKTBSCHRIEB „MINERGIE-WÄRMEPUMPE“: ERARBEITUNG VON MARKETING-GRUNDLAGEN FÜR WÄRMEPUMPEN IN NIEDRIGENERGIEHÄUSERN“ | 68 |
| 1.8.1 | <i>Titel: Marketing-Projekt „MINERGIE-Wärmepumpe“</i> | <i>68</i> |
| 1.8.2 | <i>Projektbeschreibung.....</i> | <i>68</i> |
| 1.8.3 | <i>Zielsetzung</i> | <i>68</i> |
| 1.8.4 | <i>Projektteam/Auftragnehmer</i> | <i>68</i> |
| 1.8.5 | <i>Termine.....</i> | <i>68</i> |
| 1.8.6 | <i>Erfolgskriterien.....</i> | <i>68</i> |
| 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 Wärmesenkentemperatur

Die Leistungszahl von Wärmepumpen sind sehr stark von der Wärmequellen- und Wärmesenkentemperatur 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 Carnotprozesses 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

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

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:

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

Gl. 4

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

$$f_T = \frac{(J_{VL,eff} + 273)(J_{VL,norm} - J_{Ver,eff,norm})}{(J_{VL,norm} + 273)(J_{VL,eff} - J_{Ver,eff})}$$

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 Quelltemperatur berücksichtigt. Vereisungs- und Abtauverluste müssen in den COP-Werten bereits enthalten sein.

Bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe wird eine mittlere Quelltemperatur angenommen, da ohne Simulationsrechnungen in der Regel keine genaue Kenntnis über den jahreszeitlichen Quelltemperaturverlauf 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:

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

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

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

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.

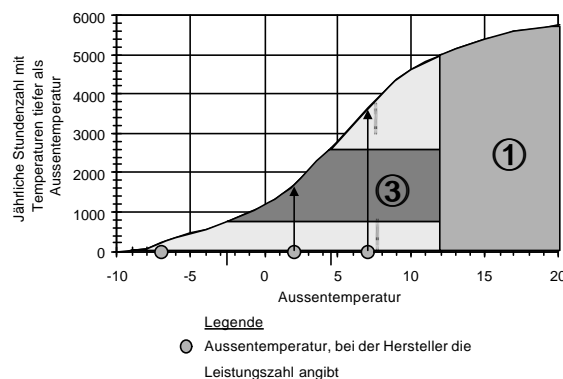


Abb. 1: Summenhäufigkeitsdiagramm für Zürich Kloten, 1. Oktober bis 31. Mai

Hierzu werden die Aussenlufttemperaturen, zu denen der Hersteller die Leistungszahlen angibt (in unserem Fall -7°C, +2°C und +7°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.

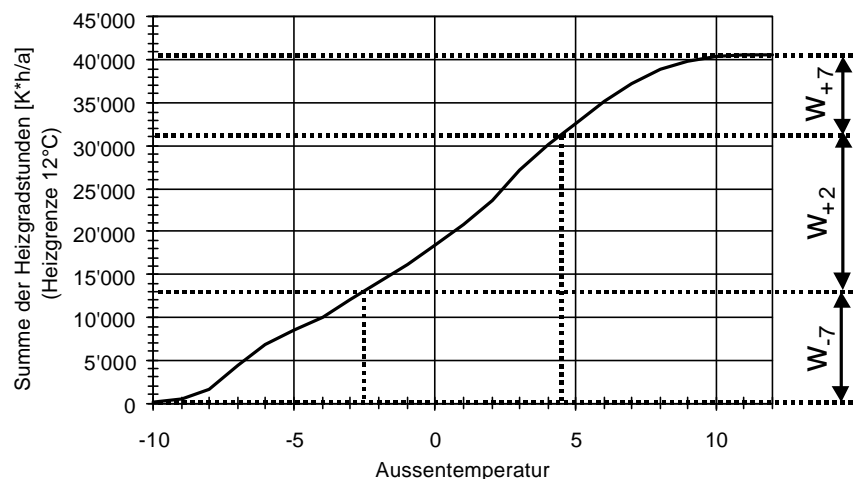


Abb. 2: Summe der Heizgradstunden für Zürich Kloten, 1. Oktober bis 31. Mai, Heizgrenze 12°C

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

$$\begin{aligned} w_{-7} &= \frac{HGH_{-2.5}}{HGH_{+12}} \\ w_{+2} &= \frac{HGH_{+4.5} - HGH_{-2.5}}{HGH_{+12}} \\ w_{+7} &= \frac{HGH_{+12} - HGH_{+4.5}}{HGH_{+12}} \end{aligned}$$

Gl. 12

Die Gewichtungsfaktoren 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 | Gewichtungsfaktor w |
|--------------------|-----------------------|
| -7 | 0.33 |
| +2 | 0.45 |
| +7 | 0.22 |

Tab. 1: Gewichtungsfaktoren 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 $+5^{\circ}\text{C}$ 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:

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

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

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

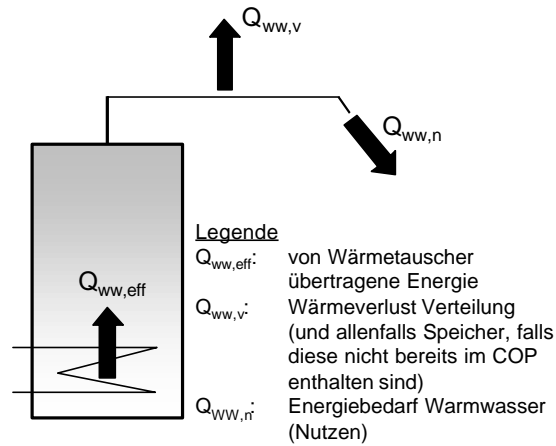


Abb. 3: Wärmeströme im Warmwassersystem

Nach Abb. 3 gilt für die dem Warmwasser zugeführte Wärmeenergie

$$Q_{ww,eff} = Q_{ww,n} + Q_{ww,v}$$

Gl. 15

Somit lässt sich Gl. 14 schreiben als

$$\begin{aligned} JAZ_{ww} &= \frac{Q_{ww,eff} - Q_{ww,v}}{E_{e,ww}} \\ &= \frac{Q_{ww,eff}}{E_{e,ww}} - \frac{Q_{ww,v}}{E_{e,ww}} \end{aligned}$$

Gl. 16

Der Elektrizitätsverbrauch kann über die Leistungszahl bestimmt werden:

$$E_{e,ww} = \frac{Q_{ww,eff}}{COP_{ww}}$$

Gl. 17

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

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

Gl. 18

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

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

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 Verteilungen $Q_{ww,v}$ 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

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

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 |
| Vorlauftemperatur | 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 |
| Vorlauftemperatur | 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 |
| Vorlauftemperatur | 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 |
| Vorlauftemperatur | 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 |
|----------------|--------|-------|
| Normtemperatur | -5 | 35 |

| | | Quellentemperatur | | | | | | |
|-------------------|-----------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | -8 | -7 | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 |
| Vorlauftemperatur | 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 |
|----------------|--------|-------|
| Normtemperatur | 0 | 35 |

| | | Quellentemperatur | | | | | | |
|-------------------|-----------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Vorlauftemperatur | 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 |
| Vorlauftemperatur | 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 |
| Vorlauftemperatur | 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 |
| Vorlauftemperatur | 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 |
| Vorlauftemperatur | 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 Wärmepumpe

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% |

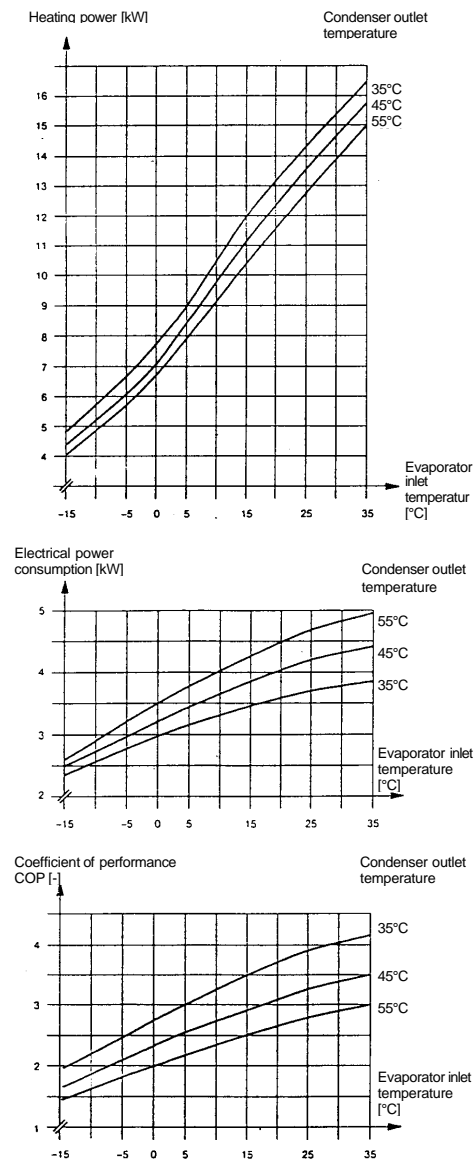


Fig. 1: Power characteristics of a single-stage heat pump.

Symbols

Variables

| | |
|----------|---|
| τ | Time constant |
| Δ | Difference |
| A | Constant for frost/defrost loss |
| B | Constant for frost/defrost loss |
| b_p | Polynomial coefficient for compressor power |
| b_q | 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- cle | 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:

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

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

for $ol = 1, 2$ and $i = 1 \dots 6$

Eq. 1

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

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

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

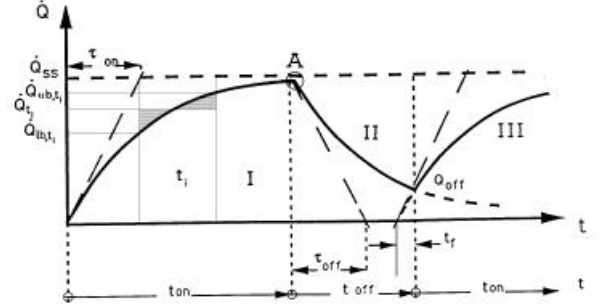


Fig. 2: Cycling losses shown with an example of a discrete time step.

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

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

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:

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

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:

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

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 $\dot{Q}_{lb,c}$:

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

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 $\dot{Q}_{lb,c}$:

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{m,c} &= \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{lb}}^{t_{ub}} \dot{Q}_c dt \\ &= \dot{Q}_{ss,c} + \frac{t_{on,ol}}{\Delta t} \left(\dot{Q}_{ss,c} - \dot{Q}_{lb,c,init} \right) \left(e^{-\frac{t_{ub}}{t_{on,ol}}} - e^{-\frac{t_{lb}}{t_{on,ol}}} \right) \end{aligned}$$

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

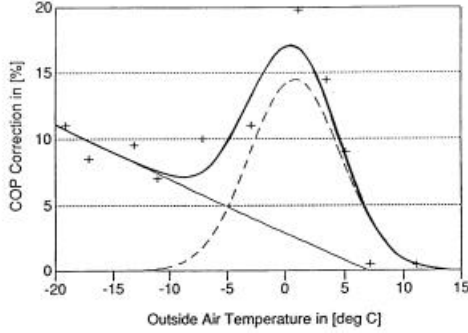


Fig. 3: COP reduction due to icing and defrosting of the evaporator. (Dots indicate measurement data)

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:

$$COP_{corr} = COP_{cycle} (1 - \Delta COP_{ice})$$

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

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

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

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

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

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 | evaporator inlet temp. +7°C, condenser outlet temp. +35°C, max. operating level | | |
|-----------|------------------|--|--|------------------|---|
| 1 | scale | Scale factor for heat pump power, uniformly applied to both operating levels | 18 | nchange-max | Maximal number of changes of the heat pump mode during a TRNSYS timestep |
| 2 | ce | specific heat of evap. fluid | 19 | LUNbq(1) | Logical unit number of file containing the polynomial coefficients of the condenser power corresponding to operating level 1 |
| 3 | cc | specific heat of cond. fluid | | | |
| 4 | Pcar | power of carter heating | | | |
| 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) | | | |
| 7 | airhp | Flag for evaporator icing/defrosting (0: No icing/defrosting is calculated, 1: Icing/defrosting is calculated) | 21 | LUNbp(1) | Logical unit number of file containing the polynomial coefficients of the compressor power corresponding to operating level 1 |
| 8 | COPcorr1 | 1 st COP correction value on straight line of frost curve | 22 | LUNbp(2) | Logical unit number of file containing the polynomial coefficients of the compressor power corresponding to operating level 2 |
| 9 | COPcorr2 | 2 nd COP correction value on straight line of frost curve | | | |
| 10 | COPcorr3 | Maximum COP correction on Gauss curve (<i>not</i> on the superposition of the Gauss curve and the straight line!) | assign filename LUNbq(1) assign filename LUNbq(2) assign filename LUNbp(1) assign filename LUNbp(2) | | |
| 11 | Tdbcorr1 | Outside air temperature at 1 st COP correction value | <i>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).</i> | | |
| 12 | Tdbcorr2 | Outside air temperature at 2 nd COP correction value | | | |
| 13 | Tdbcorr3 | Outside air temperature at maximum of Gauss curve | Input | Fortran variable | Description |
| 14 | Tdbcorr4 | Width (temperature) of the gauss curve on the half height of the Gauss maximum | 1 | mdote | Mass flow evaporator |
| 15 | tauon(1) | Heat-up time constant for operating level 1, related to the mean operation power | 2 | Tein | Inlet temperature evaporator |
| 16 | tauon(2) | Heat-up time constant for operating level 2 | 3 | mdotc | Mass flow condenser |
| 17 | tauoff | Cool-down constant, related to | 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 | Afjei Thomas; YUM, A Yearly Utilization Model for Calculating the Seasonal Performance Factor of Electric Driven Heat Pump Heating Systems, Technical Form; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, IET-LES; Zürich 1989; Schweiz |
| 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 | Afjei Thomas, Wittwer Dieter; Yearly Utilization Model YUM WP/Holz, Benutzerhandbuch mit Beispielen; INFEL/KRE; Zürich 1995; Schweiz |
| 6 | Qdotme | Mean evaporator power over the time step | | |
| 7 | Pcomp | Compressor power | 3 | Press William H., Flannery Brian P., Teukolsky Saul A., Vetterling William T.; Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing; ISBN 0 521 30811 9; Cambridge University Press; Cambridge MA 1987; USA |
| 8 | Pcar | Carter heating power | | |
| 9 | (Pcomp+Pcar) | Sum of compressor and carter heating power | | |
| 10 | COPc | Coefficient of performance, including cycling and icing/defrost losses | 4 | Conde M. R.; Progress Report IEA-Annex 10, Air-to-Water Heat Pump, Simple Simulation Model; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, IET-LES; Zürich 1985; Schweiz |
| 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. | | |

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.

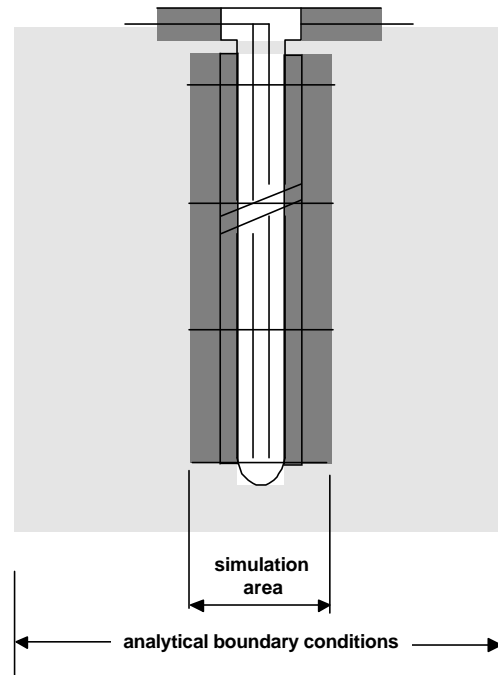


Fig. 4: Simulation of the earth next to the borehole with Crank-Nicholson schema and analytical outer boundary conditions with an adaptation of the formula of Werner [5]

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_o | Heat transfer coefficient from the brine to the pipes at no operation |
| α_1 | Heat transfer coefficient from the brine to the pipes with running pump |
| Δ | Difference |
| λ | Thermal conductivity |
| ν | Kinematic viscosity |
| ρ | Density |
| ξ | Friction factor |
| C | Heat capacity |
| c | specific heat capacity |
| D_b | Borehole diameter |
| D_i | Inner diameter of the pipes |
| dl | Length of a borehole element |
| dt | Internal time step to calculate the earth |
| $dt2$ | Internal time step to calculate the brine |
| f | grid factor in radial direction |
| L | Thermal conductance |
| L_0 | Thermal conductance of the flowing brine in vertical direction |
| L_1 | Thermal conductance between the brine and the filling material |
| m | mass of the brine in the element dl in 2 pipes |
| \dot{q} | Specific heat extraction |
| r | Radial distance from the borehole axis |
| r_o | Inner radius of the pipes |
| r_1 | Radius of the borehole |
| r_m | Radius of the outer boundary of the simulation area |
| rz | Radial center of gravity |
| R | Thermal resistance |

| | |
|-----------|---|
| R_a | Internal thermal resistance |
| R_b | Borehole thermal resistance |
| t | time |
| T | Temperature |
| T_b | Borehole temperature |
| $TEarth$ | Temperature of the earth |
| $TDown$ | Temperature of the downward flowing brine |
| TUp | Temperature of the upward flowing brine |
| $TSource$ | Source temperature (brine coming out of the vertical borehole heat exchanger) |
| $TSink$ | Brine temperature at the inlet of the vertical borehole heat exchanger |
| v | Brine velocity in the pipes |

Indices

| | |
|----------|---|
| $DimAxi$ | Number of grid points axial direction |
| $DimRad$ | Number of grid points radial direction |
| i | Axial coordinate |
| j | Radial coordinate |
| k | time coordinate |
| lam | Laminar |
| p | constant pressure |
| $turb$ | Turbulent |
| $Erde$ | Earth |
| $Fill$ | Filling material |
| $Sole$ | Brine |
| t | Time |
| $Woche$ | week of focus for the outer boundary conditions |

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:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{with } T = T(t, x) \quad \text{Eq. 21}$$

As an implicit equation of differences it is written as:

$$T_{k+1,j} - \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (T_{k+1,j-1} - T_{k+1,j}) - \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (T_{k+1,j+1} - T_{k+1,j}) = T_{k,j} + \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (T_{k,j-1} - T_{k,j}) + \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (T_{k,j+1} - T_{k,j}) \quad \text{Eq. 22}$$

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:

$$L = \frac{1}{R} = \frac{\dot{Q}}{\Delta T} \quad \text{Eq. 23}$$

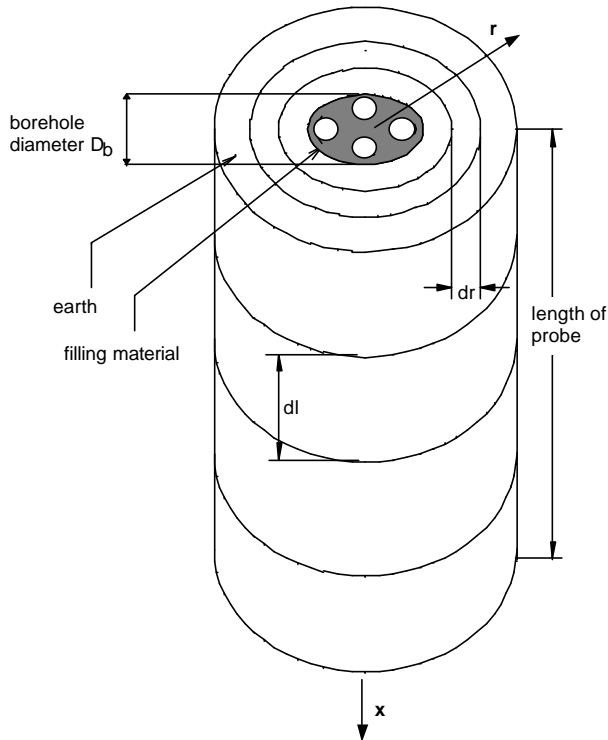


Fig. 5: Cylindrical coordinate system to solve the one-dimensional heat equation for each axial layer, with thermal properties of its own in each layer.

Arithmetical grid

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

$$dl = \frac{\text{borehole length}}{\text{DimAxi}} \quad \text{Eq. 24}$$

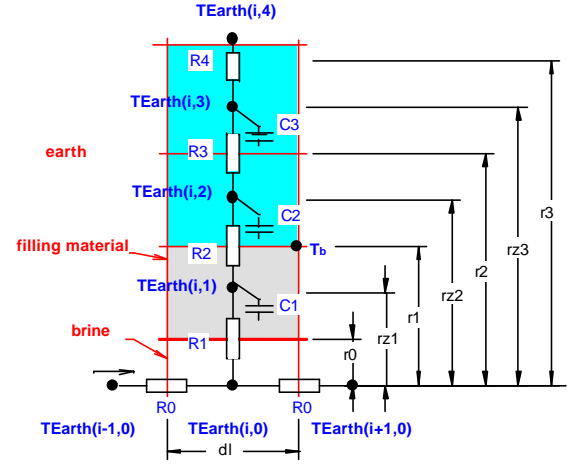


Fig. 6: Overview of the naming in a vertical layer

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

$$\text{grid factor } f = \frac{r_{j+1} - r_j}{r_j - r_{j-1}} \quad \text{Eq. 25}$$

A grid factor 2 doubles the difference of the radiuses 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:

$$\begin{aligned} r_0 &= D_i/2 = \text{inner radius of the pipes} \\ r_1 &= D_b/2 = \text{radius of the borehole} \\ r_m &= \text{maximum radius of the simulation area} \end{aligned}$$

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

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:

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

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

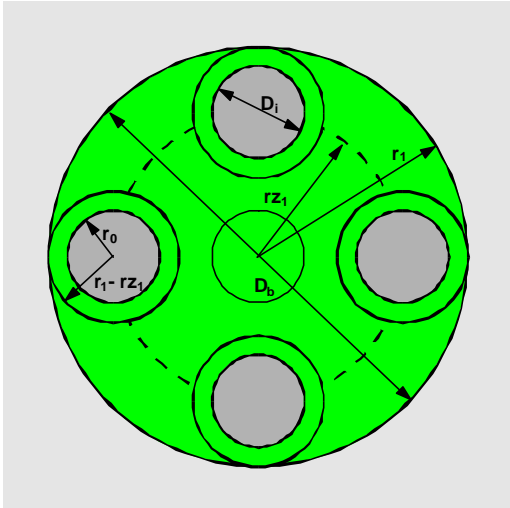


Fig. 7: Double-U-pipe borehole system

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:

$$[A] \cdot \{T\}_i^{k+1} = [F] \cdot \{T\}_i^k \quad \text{Eq. 37}$$

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

$$\{T\}_i^{k+1} = [B] \cdot \{T\}_i^k \quad \text{Eq. 38}$$

where B is defined by:

$$[B] = [A]^{-1} \cdot [F] \quad \text{Eq. 39}$$

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:

$$v = \frac{\dot{m}}{2p \cdot r_0^2 \cdot r_{Sole}} \quad \text{Eq. 40}$$

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

$$L_0 = c_{p,Sole} \dot{m} = 2p \cdot r_0^2 \cdot v \cdot r_{Sole} c_{p,Sole} \quad \text{Eq. 41}$$

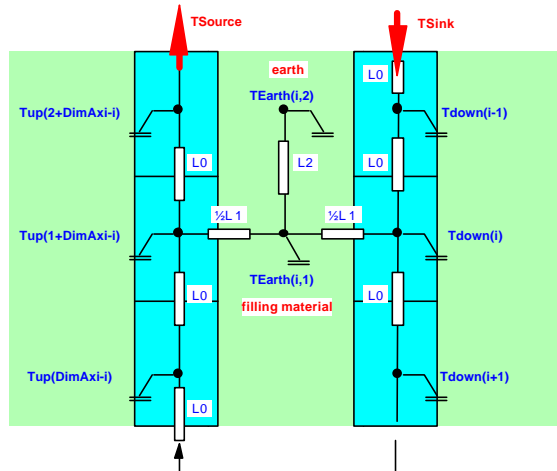


Fig. 8 Non steady-state simulation of the brine with an explicit time-step method

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

$$m = 2p \cdot r_0^2 \cdot dl \cdot r_{Sole} \quad \text{Eq. 42}$$

The energy balance for such an element gives:

$$Tdown_{k+1,i} = Tdown_{k,i} + \left(Tdown_{k+1,i-1} - Tdown_{k,i} \right) \frac{L_0 \cdot dt}{m \cdot cp} + \left(TEarth_{k,i,1} - Tdown_{k,i} \right) \frac{L_1 \cdot dt}{2 \cdot m \cdot cp} \quad \text{Eq. 43}$$

and in the upward direction

$$Tup_{k+1,i} = Tup_{k,i} + \left(Tup_{k+1,i-1} - Tup_{k,i} \right) \frac{L_0 \cdot dt}{m \cdot cp} + \left(TEarth_{k,i,1+DimAxi-i,1} - Tup_{k,i} \right) \frac{L_1 \cdot dt}{2 \cdot m \cdot cp} \quad \text{Eq. 44}$$

with the boundary condition

$$Tdown_{k+1,0} = TSink \quad \text{Eq. 45}$$

$$Tup_{k+1,0} = Tdown_{k+1,DimAxi} \quad \text{Eq. 46}$$

$$TSource = Tup_{k+1,DimAxi}$$

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

$$Tdown_i = \frac{\left(L_0 \cdot Tdown_{i-1} + \frac{L_1}{2} \cdot TEarth_{i,1} \right)}{\left(L_0 + \frac{L_1}{2} \right)} \quad \text{and} \quad \text{Eq. 47}$$

$$Tup_i = \frac{\left(L_0 \cdot Tup_{i-1} + \frac{L_1}{2} \cdot TEarth_{i+DimAxi-i,1} \right)}{\left(L_0 + \frac{L_1}{2} \right)} \quad \text{Eq. 48}$$

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:

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

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

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

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:

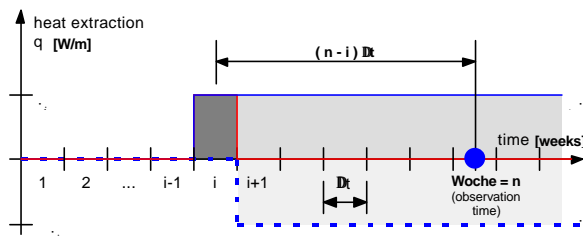


Fig. 9: To get a discrete heat extraction q_i we superpose q and $-q$, starting at different time steps.

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:

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

with

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Eq. 63

$$x_0 = 0.031437$$

Eq. 64

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

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

Eq. 65

The heat transfer coefficient is only used, when R_f 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.

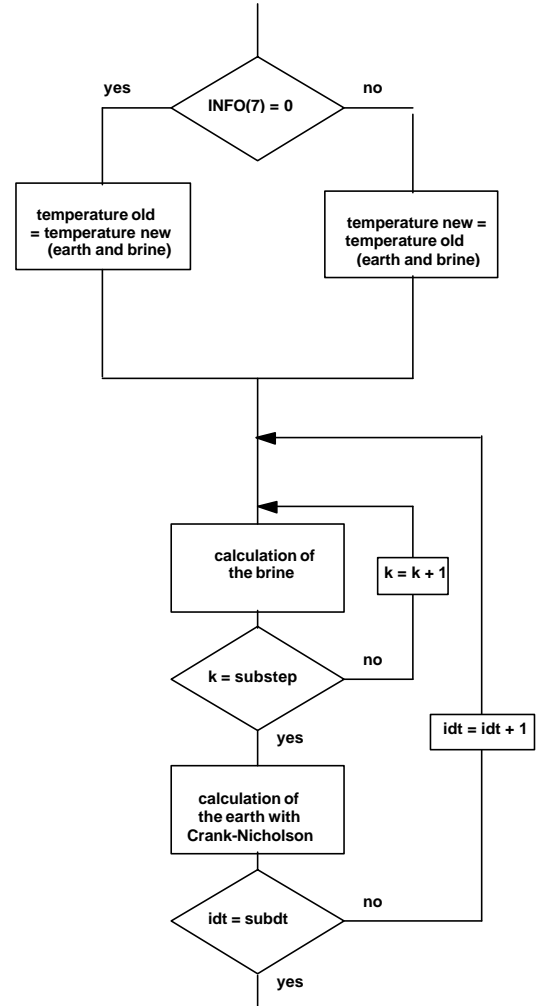


Fig. 10: Flow chart of the code.

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 |
| | | | 16 | rhoSole | Density 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: $R_1=f(R_a)$, $R_2=f(R_a, R_b)$ | 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. |
| | | | 23 | MonitorAxi3 | Axial coordinate of the 3rd monitor temperature |
| 4 | Rechenradius | Radius of the outer boundary r_m of the simulation area | | | |
| 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 | Sondendurchmesser | Inner diameter of the pipes D_i | | | |
| | | | 26 | MonitorRad4 | Radial coordinate of the 4th monitor temperature |
| 8 | Bohrerdurchmesser | Borehole Diameter D_b | | | |
| 9 | TGrad | Axial temperature gradient in the earth at the start of the simulation | 27 | MonitorAxi5 | Axial coordinate of the 5th monitor temperature |
| 10 | Jahresmitteltemp | Average annual air temperature | 28 | MonitorRad5 | Radial coordinate of the 5th monitor temperature |
| 11 | Bodenerwaermung | Average yearly temperature difference between the soil surface and the air | 29 | MonitorAxi6 | Axial coordinate of the 6th monitor temperature |
| 12 | cpFill | Specific heat capacity of the filling material | | | |
| | | | 30 | MonitorRad6 | Radial coordinate of the 6th monitor temperature |
| 13 | rhoFill | Density of the filling material | | | |
| 14 | lambdaFill | Heat conductivity of the filling material | 31 | MonitorAxi7 | Axial coordinate of the 7th monitor temper. |

| | | | | | |
|-----------------|----------------|---|---------------|--|---|
| 32 | MonitorRad7 | Radial coordinate of the 7th monitor temperature | Input | Fortran variable | Description |
| | | | 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 | Output | 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 + DimAxi | 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* DimAxi | lambdaErde(i) | Heat conductivity of the earth in the axial layer i | 4 | TEarth (monitor1) | 1st monitor temperature |
| | | | 5 | TEarth (monitor2) | 2nd monitor temperature |
| 37 + 3* DimAxi | R1 or Ra or Rb | R ₁ if calcBTR = 2 R _b if calcBTR = 3 R _a if calcBTR = 4 | 6 | TEarth (monitor3) | 3rd monitor temperature |
| | | | 7 | TEarth (monitor4) | 4th monitor temperature |
| 38 + 3* DimAxi | Rb | R _b if calcBTR = 4 | 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 Sys-
tems. Theory. Dep. of Mathe-
matical Physics, University of
Lund, Sweden.
- 2 Huber, Arthur; Schuler, Othmar
(1997): Berechnungsmodul für
Erdwärmesonden. For-
schungsprogramm UAW des
BEW, Bern, ENET-Nr.
9658807
- 3 Merker, Günter (1987): Kon-
vektive Wärmeübertragung.
Springer-Verlag.
- 4 Sanner, Burkhard (1992): Erd-
gekoppelte Wärmepumpen,
Geschichte, Systeme, Ausle-
gung, 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 Bo-
den und Grundwasser im Kan-
ton 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

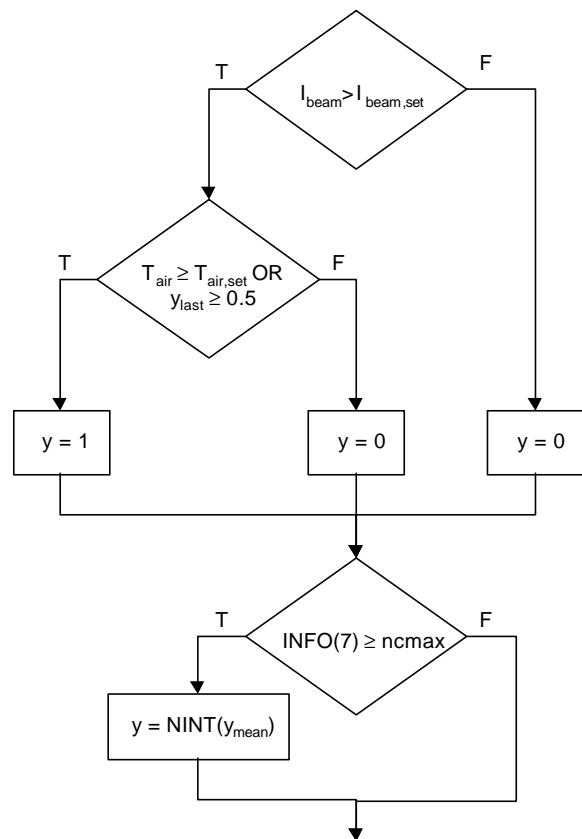


Abb. 4: Flussdiagramm Storensteuerung

Komponenten Konfiguration

| Parameter | 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 |

| Output | 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 (Schweisssgas) 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 "Heizöl Petro ab Raffinerie Euro" bilanziert. Brennstoffe für die Wärmepumpenherstellung werden als "Erdgas in Industrieheizung >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.

¹ Chemische Bezeichnung Ethin, $\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$

² $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$

³ $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3$

1.5.1.2 Inventare Heizungssysteme: L/W-Wärmepumpe

| Infrastruktur L/W-Wärmepumpe pro Betriebsjahr | | bilanzierte Mengen |
|---|-----|--------------------|
| Datenmodule aus [ESU 96] | | |
| Zink fuer Verzinkung | kg | 0.0582 |
| Strom Niederspannung - Bezug in CH Import | TJ | 0.0000014 |
| Strom Mittelspannung - Bezug in B Import | TJ | 0.000000495 |
| Strom Mittelspannung - Bezug in CH Import | TJ | 0.000000432 |
| Strom Mittelspannung - Bezug in I | TJ | 0.000000315 |
| Strom Mittelspannung - Bezug in W-D | TJ | 0.000000315 |
| Strom Mittelspannung - Bezug in W-D Import | TJ | 0.000000315 |
| Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT | 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 |
| Heizöl Petro ab Raffinerie Euro | t | 0.000128 |
| Erdgas in Industrieheizung >100kW Euro | TJ | 0.0000011 |
| Abfaelle in Inertstoffdeponie | kg | 0.875 |
| PVC in KVA | kg | 0.368 |
| PE in KVA | kg | 0.298 |
| Elektronikabfaelle | 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 | | Strom Niederspannung - |
|---|----|------------------------|
| Gebäudevarianten | | 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 |
| Heizael 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 verschiedenen 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 |
| Heizael EL 2000 ab Regionallager CH °° | t | 0.568 |
| Heizael EL ab Regionallager CH °° | t | -0.568 |
| Gebäudevariante SIA2010 LB | | |
| Stahl unlegiert ° | kg | -2.11 |
| Nutzwaerme ab Heizung 10 kW Brennwert | TJ | 0.0185 |
| Heizael EL 2000 ab Regionallager CH °° | t | 0.462 |
| Heizael EL ab Regionallager CH °° | t | -0.462 |
| Gebäudevariante SIA2010 MB | | |
| Stahl unlegiert ° | kg | -1.84 |
| Nutzwaerme ab Heizung 10 kW Brennwert | TJ | 0.0162 |
| Heizael EL 2000 ab Regionallager CH °° | t | 0.403 |
| Heizael 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 | | bilanzierte Mengen |
|--|------------------|--------------------|
| Datenmodule aus [ESU 96] | | |
| 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 |
| CH ₄ Methan s | kg | 0.851 |
| CO Kohlenmonoxid s | kg | 5.32 |
| CO ₂ 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 |
| N ₂ O Lachgas s | kg | 0.745 |
| NO _x Stickoxide als NO ₂ s | kg | 26.6 |
| PAH Polyzyklische 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 |
| SO _x als SO ₂ s | kg | 69.2 |
| TCDD-Äquivalente | ng | 60.6 |
| Toluol s | kg | 0.0426 |
| Zn Zink s | kg | 0.000745 |
| Aluminium 0% Rec. | kg | 14.4 |
| Beton (ohne Armierungseisen) | kg | 263 |
| Beton in Inertstoffdeponie | kg | 133 |
| Cadmiumfreies Hartlot | kg | 2.81 |
| Deckfarbe | kg | 3.51 |
| Erdgas in Industr.f. Low-NO _x >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 |
| Fläche IV-IV | m ² a | 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

| Infrastruktur und Betrieb Gasheizung pro Betriebsjahr | | bilanzierte Mengen |
|---|----|--------------------|
| Datenmodule aus [ESU 96] | | |
| Gebäudevariante NOAH I R und NOAH MR | | |
| Stahl unlegiert ° | kn | -2 33 |
| Nutzwärme ab Heizung LowNOx KOND.<100 kW | TJ | 0.0228 |
| Gebäudevariante SIA2010 I R | | |
| Stahl unlegiert ° | kn | -1 89 |
| Nutzwärme ab Heizung LowNOx KOND.<100 kW | TJ | 0.0185 |
| Gebäudevariante SIA2010 MR | | |
| Stahl unlegiert ° | kn | -1 65 |
| Nutzwärme 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

| Nutzwärme ab Heizung LowNOx KOND.<100 kW pro T.J | | bilanzierte Mengen |
|--|-----|--------------------|
| Datenmodule aus [ESU 96] | | |
| Nitrate f | kn | 0 134 |
| Nitrite f | ka | 0.00309 |
| Sulfate f | ka | 0.0516 |
| Sulfite f | ka | 0.0516 |
| Abwärme in Luft p | TJ | 0.0000949 |
| Abwärme in Luft s | TJ | 1.14 |
| Acetaldehyd s | ka | 0.00103 |
| BaP Benzo(a)pyren s | ka | 0.0000103 |
| Benzol s | ka | 0.412 |
| Butan s | ka | 0.722 |
| CH4 Methan s | ka | 2.06 |
| CO Kohlenmonoxid s | ka | 30.9 |
| CO2 Kohlendioxid s | ka | 57700 |
| Essigsäure s | ka | 0.155 |
| Formaldehyd s | ka | 0.103 |
| Hg Quecksilber s | ka | 0.0000567 |
| N2O Lachgas s | ka | 0.516 |
| NOx Stickoxide als NO2 s | ka | 20.6 |
| PAH Polyzyklische aromatische HC s | ka | 0.0103 |
| Partikel s | ka | 0.103 |
| Pentane s | ka | 1.24 |
| Propan s | ka | 0.206 |
| Propionsäure s | ka | 0.0206 |
| SOx als SO2 s | ka | 0.516 |
| TCDD-Äquivalente | na | 30.9 |
| Toluol s | ka | 0.206 |
| Beton in Inertstoffdeponie | kn | 130 |
| Deckfarbe in Inertstoffdeponie | ka | 0.68 |
| Karton in KVA | ka | 3.41 |
| Kupfer in Inertstoffdeponie | ka | 4.09 |
| Mineralwolle in Inertstoffdeponie | ka | 6.13 |
| PE in KVA | ka | 2.38 |
| Schweissstaub in Sonderabfallbehandlung | ka | 0.134 |
| Erdgas in Industrieheizung >100kW Euro | TJ | 0.00175 |
| Leckage Erdgas Schweiz Hochdruck | m3 | 56.7 |
| Deckfarbe | ka | 0.68 |
| Transport LKW 28 t | tkm | 13.6 |
| Transport Schiene | tkm | 205 |
| Aluminium 0% Rec. | ka | 4.64 |
| Aluminium 100% Rec. | ka | 9.28 |
| Beton (ohne Armierungseisen) | ka | 130 |
| Gusseisen | ka | 8.19 |
| Karton (Verpackungs-) | ka | 3.41 |
| Kupfer | ka | 4.09 |
| Mineralwolle | ka | 6.13 |
| PE (HD) | ka | 2.38 |
| Stahl hochlegiert | ka | 3.4 |
| Stahl unlegiert | ka | 140 |
| Wasser entkarbonisiert | ka | 68.2 |
| Erdgas ND-Abnehmer CH | TJ | 1.03 |
| Strom Mittelspannung - Bezug in UCPTE | TJ | 0.0000949 |
| Strom Niederspannung - Bezug in CH | TJ | 0.0206 |

Tab. 9: Bilanzierte Materialien und Prozesse im Modul "Nutzwärme 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 [ESU 96] | | bilanzierte Mengen |
|---|-----|--------------------|
| Stahl unlegiert | kn | 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 Strommixe 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: BWB-Wärmepumpe

| Warmwasser ab BWB-Wärmepumpe pro Betriebsjahr Datenmodule aus [ESU 96] 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 |
| Heizöl Petro ab Raffinerie Euro | t | 0.00002 |
| Erdgas in Industrieheizung >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 | | bilanzierte Mengen |
|--|-----|--------------------|
| Datenmodule aus [ESU 96] | | |
| Strom Niederspannung - Bezug in CH Import | TJ | 0.00365 |
| Strom Mittelspannung - Bezug in UCPT | 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 | | Einheit | bilanzierte Mengen |
|---|-----|---------|--------------------|
| Datenmodule gemäss [ESU 96] | | | |
| Strom Mittelspannung - 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 |
| Heizöl EL 2000 ab Regionallager CH | t | | 0.167° |
| Heizöl EL ab Regionallager CH | t | | -0.167° |
| Nutzwärme 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 | Einheit | Bilanzierte Mengen |
|---|---------|----------------------|
| Datenmodule gemäss [ESU 96] | | |
| 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 ÷ 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 |
|---|---------|--------------------|
| Abwärme in Luft p | TJ | 0.000106 |
| Abwärme 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 |
| Essigsäure 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 |
| Propionsäure s | kg | 0.023 |
| SOx als SO2 s | kg | 0.575 |
| TCDD-Äquivalente | 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 Industrieheizung >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 "Nutzwärme ab Heizung atm. LowNOx <100 kW" (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 Betriebs-jahr | | 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 [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 | 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 |
| Heizöl EL in Heizung 1 MW | TJ | 0.00000703 |
| MG-Silizium | kg | 0.2 |
| Abfälle in Inertstoffdeponie | kg | 3040 |
| Abfälle 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 |
| NM VOC 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 Frontladeraupe | m3 | 1.56 |
| Aushub Hydraulikbagger | m3 | 2.51 |
| Diesel in Baumaschine | TJ | 0.0000412 |
| Heizöl EL in Heizung 1 MW | TJ | 0.00000703 |
| MG-Silizium | kg | 0.2 |
| Abfälle in Inertstoffdeponie | kg | 3870 |
| Abfälle 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 |
| Holzfaserverplatte | 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 |
| Gipsfaserverplatte | 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 Frontladderraupen | m3 | 1.56 |
| Aushub Hydraulikbagger | m3 | 2.51 |
| Diesel in Baumaschine | TJ | 0.0000412 |
| Heizöl EL in Heizung 1 MW | TJ | 0.00000703 |
| MG-Silizium | kg | 0.2 |
| Abfälle in Inertstoffdeponie | kg | 3050 |
| Abfälle 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 |
| NM VOC 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 |
| Holzfasersplatte | kg | 6 |
| Papierflocken | kg | 18.4 |
| PVC-Dichtungsbahn | kg | 0.144 |
| Schieferplatte klein | kg | 2.63 |
| Schneitholz brett- | kg | 173 |
| Schneitholz 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 Frontladderraupen | m3 | 1.56 |
| Aushub Hydraulikbagger | m3 | 2.51 |
| Diesel in Baumaschine | TJ | 0.0000412 |
| Heizöl EL in Heizung 1 MW | TJ | 0.00000703 |
| MG-Silizium | kg | 0.2 |
| Abfälle in Inertstoffdeponie | kg | 3860 |
| Abfälle 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 |
| NM VOC 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 |
| Holzfasersplatte | 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 (CH₄) und einzelne Freone.

| Treibhauseffekt | | Schwermetalle | |
|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------|
| | kg CO ₂ -eq. | | kg Pb-eq. |
| SF6 p in Luft | 23900 | Ion Quecksilber f in Wasser | 10 |
| C2F6 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 |
| | | Cr Chrom s in Luft | 0.441 |
| Ozonloch | | Ion Chrom-III f in Wasser | 0.2 |
| | kg R11-eq. | Ion Chrom-III s in Wasser | 0.2 |
| H 1301 Halon p in Luft | 16 | Ion Chrom-VI f in Wasser | 0.2 |
| H 1211 Halon p in Luft | 4 | Ion Chrom-VI s in Wasser | 0.2 |
| Tetrachlormethan p in Luft | 1.08 | Ion Barium f in Wasser | 0.14 |
| R113 FCKW p in Luft | 1.07 | Ion Barium s in Wasser | 0.14 |
| R13 FCKW p in Luft | 1.07 | Ion Molybdaen f in Wasser | 0.14 |
| R12 FCKW p in Luft | 1 | Ion Molybdaen s in Wasser | 0.14 |
| R11 FCKW p in Luft | 1 | Ion Bor f in Wasser | 0.0301 |
| R114 FCKW p in Luft | 0.8 | Ion Bor s in Wasser | 0.0301 |
| CH3Br p in Luft | 0.6 | Ion Mangan f in Wasser | 0.02 |
| R115 FCKW p in Luft | 0.5 | Ion Mangan s in Wasser | 0.02 |
| 1,1,1-Trichlorethan p in Luft | 0.12 | Ion Kupfer f in Wasser | 0.005 |
| R141b H-FKW p in Luft | 0.11 | Ion Kupfer s in Wasser | 0.005 |
| R142b H-FKW p in Luft | 0.065 | | |
| R22 FCKW p in Luft | 0.0551 | | |
| Sommersmog | | Karzinogene | |
| | kg C2H4-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 Polyaromaten p in Luft | 1 |
| Buten p in Luft | 0.978 | PAH Polyaromaten 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 |
| Xylol p in Luft | 0.854 | Ni Nickel s in Luft | 0.44 |
| Xylol 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 |
| NOx Stickoxide als NO2 m in Luft | 0.646 | Aromaten s in Luft | 0.000011 |
| NOx Stickoxide als NO2 p in Luft | 0.646 | Ethylbenzol p in Luft | 0.000011 |
| NOx Stickoxide als NO2 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 | Wintersmog | |
| Acetaldehyd s in Luft | 0.528 | | kg SOx-eq. |
| Aldehyde p in Luft | 0.444 | Partikel m in Luft | 2 |
| Formaldehyd p in Luft | 0.421 | Partikel s in Luft | 2 |
| Formaldehyd s in Luft | 0.421 | SOx als SO2 m in Luft | 1 |
| Hexan p in Luft | 0.421 | SOx als SO2 p in Luft | 1 |
| | | SOx als SO2 s in Luft | 1 |
| | | NOx Stickoxide als NO2 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 |
| NM VOC m in Luft | 0.417 | Radioaktivität kBq 129I-eq. | |
| NM VOC p in Luft | 0.417 | | |
| NM VOC s in Luft | 0.417 | Radio. I129 p in Luft | 1 |
| Pentan p in Luft | 0.409 | Radio. C14 p in Luft | 0.0942 |
| Pentane s in Luft | 0.409 | Rad. Cs137 f in Wasser | 0.0737 |
| Alkane p in Luft | 0.4 | Rad. Cs134 f in Wasser | 0.0633 |
| Alkane s in Luft | 0.4 | Radio. U234 p in Luft | 0.0425 |
| Ethylenoxid p in Luft | 0.378 | Radio. Pu alpha p in Luft | 0.0363 |
| Butan p in Luft | 0.361 | Radio. Pu238 p in Luft | 0.0295 |
| Butan s in Luft | 0.361 | Rad. Cm alpha s in Wasser | 0.0251 |
| Ethanol p in Luft | 0.268 | Rad. Co60 f in Wasser | 0.0194 |
| Ethanol s in Luft | 0.268 | Rad. Am241 s in Wasser | 0.0137 |
| Benzol m in Luft | 0.189 | Radio. U235 p in Luft | 0.00903 |
| Benzol p in Luft | 0.189 | Radio. Co60 p in Luft | 0.00723 |
| Benzol s in Luft | 0.189 | Radio. Cs137 p in Luft | 0.00593 |
| Aceton s in Luft | 0.178 | Radio. Cs134 p in Luft | 0.00523 |
| Methanol s in Luft | 0.123 | Radio. U238 p in Luft | 0.00358 |
| Ethan p in Luft | 0.0823 | Radio. U238 s in Luft | 0.00358 |
| Ethan s in Luft | 0.0823 | Rad. Pu alpha s in Wasser | 0.00326 |
| Tetrachlormethan p in Luft | 0.021 | Rad. C14 s in Wasser | 0.000519 |
| Vinyl Chlorid p in Luft | 0.021 | Rad. Sb124 f in Wasser | 0.000358 |
| 1,1,1-Trichlorethan p in Luft | 0.021 | Rad. Ag110m f in Wasser | 0.000222 |
| Vinyl Chlorid in Wasser f in Wasser | 0.021 | Rad. I131 f in Wasser | 0.000222 |
| Dichlormethan p in Luft | 0.01 | Radio. Co58 p in Luft | 0.000189 |
| CH4 Methan m in Luft | 0.00701 | Rad. Co60 s in Wasser | 0.000173 |
| CH4 Methan p in Luft | 0.00701 | Rad. I129 s in Wasser | 0.000138 |
| CH4 Methan s in Luft | 0.00701 | Rad. Mn54 f in Wasser | 0.000136 |
| Benzaldehyd s in Luft | -0.334 | Radio. I131 p in Luft | 6.84E-05 |
| Versauerung kg SOx-eq. | | Rad. Ru106 s in Wasser | 6.32E-05 |
| NH3 Ammoniak p in Luft | 1.88 | Rad. Ra 226 f in Wasser | 5.61E-05 |
| NH3 Ammoniak s in Luft | 1.88 | Rad. Cs137 s in Wasser | 3.48E-05 |
| HF Fluorwasserstoff p in Luft | 1.6 | Rad. Cs134 s in Wasser | 3.45E-05 |
| HF Fluorwasserstoff s in Luft | 1.6 | Rad. Co58 f in Wasser | 0.000018 |
| SOx als SO2 m in Luft | 1 | Rad. U235 f in Wasser | 0.000013 |
| SOx als SO2 p in Luft | 1 | Rad. U234 f in Wasser | 1.18E-05 |
| SOx als SO2 s in Luft | 1 | Rad. U 238 f in Wasser | 1.15E-05 |
| HCl Salzsäure p in Luft | 0.881 | Radio. H3 p in Luft | 1.13E-05 |
| HCl Salzsäure s in Luft | 0.881 | LT Radio. Rn222 in Luft | 1.04E-05 |
| NOx Stickoxide als NO2 m in Luft | 0.702 | Radio. Rn222 p in Luft | 1.04E-05 |
| NOx Stickoxide als NO2 p in Luft | 0.702 | Radio. Rn222 s in Luft | 1.04E-05 |
| NOx Stickoxide als NO2 s in Luft | 0.702 | Rad. U 238 s in Wasser | 7.37E-06 |
| Überdüngung kg PO4-eq. | | Rad. Sb125 s in Wasser | 6.48E-06 |
| Phosphate f in Wasser | 1 | Radio. I133 p in Luft | 4.11E-06 |
| Phosphate s in Wasser | 1 | Rad. Sr90 s in Wasser | 1.77E-06 |
| Ammoniak als N f in Wasser | 0.427 | Rad. H3 f in Wasser | 1.69E-07 |
| Ammoniak als N s in Wasser | 0.427 | Radio. Xe133 p in Luft | 6.24E-08 |
| Nitrate p in Luft | 0.423 | Radio. Xe133m p in Luft | 6.24E-08 |
| Stickstoff Gesamt f in Wasser | 0.423 | Radio. Kr85 p in Luft | 6.2E-08 |
| Stickstoff Gesamt s in Wasser | 0.423 | Radio. Kr85m p in Luft | 6.2E-08 |
| NH3 Ammoniak p in Luft | 0.35 | Rad. H3 s in Wasser | 5.48E-10 |
| 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 (Kilobecquerel, kBq) und TCDD-Äquivalente (Nanogramm, ng). Die Suffixe m, s, und p bei den Luftemissionen unterschieden Emissionen aus verschiedenen 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. R407c ist eine Mischung von Fluor-Kohlenwasserstoffen (FKW). R407c enthält jedoch keine Chlorverbindungen und besitzt daher bei einer Emission kein Ozonzerörungspotential. 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 R407c 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 Verbrennungsemissionen, 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 Grenzwertes⁸.

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 NO_x 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 Wärmepumpen 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 | | pro TJ Erdgas-Input | pro TJ Strom ab Klemme Wirkungsgrad = 58% |
|--|----|---------------------|--|
| Datenmodule aus [ESU 96] nach [PSI 96] | | | |
| <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 Polyzyklische 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 Netzübertragungsaufwände 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 Herstellungenergie (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 rezykliert. 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 Rezyklieren verunmöglicht 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 |
| Heizöl 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 Gewichts 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 berücksichtigen zu können, wurden die folgenden Werte angenommen:

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 |
| Heizöl 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 |
| Heizöl 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 Epoxystoff 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 Prozessemissionen (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 Platinenepoxystoff und Glasfasern). ¹⁾ Eigene Schätzung, bilanziert als 2.27 Stück "m-Si Wafer"

Datenqualität

Elektronikkomponenten sind hochkomplexe und massivst heterogene Materialien. Aufgrund der geringen 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 Energiebezüge 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

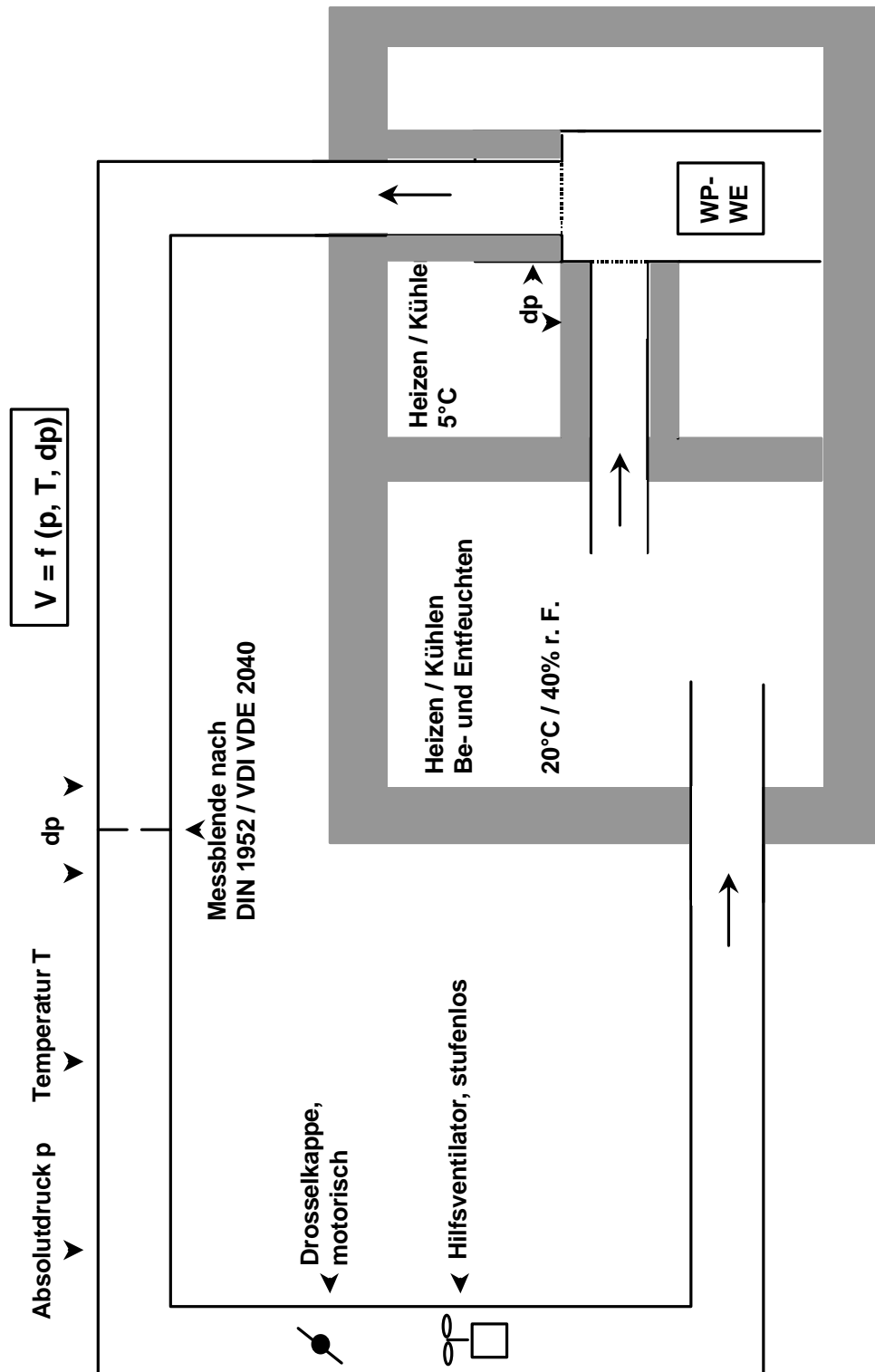
Über die Entsorgung von Elektronikabfällen sind nur wenige ökobilanzrelevante Informationen bekannt. In [ESU 96] wurde zwar der Abfalltyp "Elektronikabfälle" unterschieden, jedoch nicht bilanziert. Aus einer neuen Publikation konnte der Stromverbrauch beim Elektronikrecycling übernommen werden. Der Stromverbrauch 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 UCPTTE 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 Datenqualität 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 | 5.0% | Nutzung Jahre | Investition Fr. | Annuität Fr. |
| | Wärmequelle | | | | |
| | Bauarbeiten | | 30 | 500.00 | 32.53 |
| | Zu-, Abluftschläuche | | 15 | 800.00 | 77.07 |
| | Wärmeerzeugung | | | | |
| | Wärmepumpe inkl. Regler | | 15 | 10'350.00 | 997.14 |
| | Montage der WP | | 15 | 990.00 | 95.38 |
| | | | 15 | | |
| | Einregulierung | | 15 | 450.00 | 43.35 |
| | | | 15 | | |
| | Planungsanteil | | 30 | 500.00 | 32.53 |
| | Anschlussgebühren | | | | |
| | Elektriker komplett | | 30 | 800.00 | 52.04 |
| | Wärmeverteilung | | | | |
| | Niedrigtemp. 30/25 Grad (Installation + Planung) | | 30 | 9'470.00 | 616.04 |
| | Warmwasseraufbereitung | | | | |
| Abluft-WP-Wassererw. | | 15 | 4'660.00 | 448.96 | |
| Kanäle, Schalldämpfer | | 30 | 1'430.00 | 93.02 | |
| Mauerventile (6 Stück) | | 15 | 1'035.00 | 99.71 | |
| Montage+Inbetriebnahme | | 15 | 3'200.00 | 308.30 | |
| Planungsanteil | | 30 | 500.00 | 32.53 | |
| Unterstützungsbeiträge | | | | | |
| 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 | Preis | Kosten | |
| | 62 MJ/m2a Warmwasserbed. | kWh | Fr./kWh | Fr. | |
| | Elektrizität | | | | |
| | 0.38 Niedertarifanteil | | 0.10 | | |
| | 3.5 JAZ der Wärmepumpe | 771 | | 80.23 | |
| | Zusatzheizung | | | | |
| | 2.5 JAZ der Abluft-WP | 385 | | 40.02 | |
| | Hilfsenergie | 56 | | 5.81 | |
| | 0.62 Hochtarifanteil | | 0.16 | | |
| | 3.5 JAZ der Wärmepumpe | 1259 | | 200.12 | |
| | 2.5 JAZ der Abluft-WP | 628 | | 99.83 | |
| | Hilfsenergie | 91 | | 14.49 | |
| Teuerung/Fixkosten | | | | | |
| Teuerungsrate | | | | | |
| Beurteilungsdauer | | 20 | | | |
| Zahlergebühr | | | | 57.60 | |
| Total Energiekosten | | | | 498.09 | |
| Jahreskosten exkl. Mwst. | | | 34'685.00 | 3'576.69 | |
| monatl. Mehrkosten im Vergleich zu Oel | | | | -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 | | Nutzung Jahre | Investition Fr. | Annuität Fr. |
| Zinssatz 5% | | | | |
| 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 | 15 | 2'500.00 | 240.86 | |
| Elektriker komplett | 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 | Zinssatz 5.0% | Nutzung Jahre | Investition Fr. | Annuität Fr. |
| | 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)) | 30 | 5'840.00 | 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 | | 0.10 | |
| | Hilfsenergie | 200 | | 20.00 |
| | Hochtarif | | 0.25 | |
| | Hilfsenergie | 200 | | 50.00 |
| | Teuerung | | 0.25 | |
| | Teuerungsrate | | | |
| | Beurteilungsdauer | 20 | | 3.18 |
| | Gasverbrauch | kWh | Fr./kWh | Fr. |
| | Heizung (eta=0.9) | 7894 | 0.054 | 426.30 |
| | Warmwasser (0.8) | 3165 | | 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. | Annuität 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 30 | 2'500.00 | 240.86 |
| | Unterstützungsbeiträge | | | |
| | Total Kapitalkosten | | 28'300.00 | 2'404.19 |
| Betriebskosten | | | | Kosten Fr. |
| | durchschn. Unterhaltskosten Kaminfeger | | | 150.00 80.00 |
| | Teuerung | | | |
| | Teuerungsrate | | | |
| | Beurteilungsdauer | 20 | | |
| | Total Betriebskosten | | | 230.00 |
| Energiekosten | 114 MJ/m2a Heizenergiebed. 62 MJ/m2a Warmwasserbed. | Menge kWh | Preis Fr./kWh | Kosten Fr. |
| | Elektrizität | | | |
| | 0.38 Niedertarifanteil | | 0.10 | |
| | 85 MJ/m2a Lüftungsverlust | | | |
| | 6 ETV des L-Systems | 154 | | 16.00 |
| | 0.7 eta des Elektroboiler Hilfsenergie | 3617 | | 376.13 |
| | 0.62 Hochtarifanteil | | 0.25 | |
| | 6 ETV des L-Systems Zusatzheizung Hilfsenergie | 481 | | 120.25 |
| | Holz | Ster | Fr./Ster | Fr. |
| | 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 Oel | | | | -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 5.0% | Nutzung Jahre | Investition Fr. | 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 |
| | | 15 | 500.00 | 48.17 |
| | Platzbedarf Anschlussgebühren Elektriker | 30 | | |
| | | 30 | 500.00 | 32.53 |
| | 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 | 174 MJ/m2a Heizenergiebed. 62 MJ/m2a Warmwasserbed. | Menge kWh | Preis Fr./kWh | Kosten Fr. |
| | Elektrizität | | | |
| | 0.38 Niedertarifanteil 2.5 JAZ WP für Heizen Zusatzheizung | 1080 | 0.10 | 112.32 |
| | 2.5 JAZ WP für Wassererwärmung Elektrofilter | 1013 56 | | 105.32 5.81 |
| | 0.62 Hochtarifanteil 2.5 JAZ WP für Heizen Zusatzheizung Elektrofilter | 1762 91 | 0.16 | 280.16 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 Oel | | | | -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 | 30 | 8'800.00 | 572.45 |
| | Bauseitige Arbeiten (Mauerfräsen, Grabarbeit) | 30 | 500.00 | 32.53 |
| | Wärmeerzeugung | | | |
| | Wärmepumpe inkl. Heizungsregelung | 15 | 9'700.00 | 934.52 |
| | Apparate/Armat./Leit./Isol. | 15 | 1'750.00 | 168.60 |
| | Zuluft-/ | | | |
| | Monobloc | 15 | 5'000.00 | 481.71 |
| | Zuluft-/Abluftkanäle | 30 | 8'000.00 | 520.41 |
| | Wärmeverteilung | | | |
| | Niedertemp. 30/25 Grad (Installation + Planung) | 30 30 | 9'500.00 | 617.99 |
| | Warmwasseraufbereitung | | | |
| | Beistellboiler komplett | 15 | 2'100.00 | 202.32 |
| | Sanitäranschluss | 30 | 1'000.00 | 65.05 |
| | Elektriker komplett | 30 | 1'500.00 | 97.58 |
| | Transport/Montage kompl. | 15 | 1'900.00 | 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 | | 0.10 | |
| | 3.1 JAZ der Wärmepumpe | 1181 | | 122.85 |
| | Zusatzheizung eta des Elektroboiler | | | |
| | Hilfsenergie | 56 | | 5.81 |
| | 0.62 Hochtarifanteil | | 0.16 | |
| | 3.1 JAZ der Wärmepumpe | 1927 | | 306.45 |
| | Zusatzheizung | | | |
| | Hilfsenergie | 91 | | 14.49 |
| | Teuerung/Fixkosten | | | |
| | Teuerungsrate | | | |
| | Beurteilungsdauer | 20 | | |
| | Zählergebühr | | | 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 Projektbeschreibung „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 Handbuches | 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 Forschungsergebnisse</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, Forschungsergebnisse | | 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 Handbuches soll maximal 50 Fr. betragen
- Der Vertrieb erfolgt über ENET und INFEL