

PV/T-Schiefer

Anwendungsbeispiele und Fallstudien



Ausgearbeitet durch
S. Kropf, ETH Zürich

Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Dezember 2003

Auftraggeber:

Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

Institut für Hochbautechnik, ETH Zürich

Autoren:

S. Kropf, ETH Zürich

Begleitgruppe:

A. Moser, ETH Zürich
G. Zweifel, HTA Luzern

M. Zimmermann, EMPA, Programmleiter „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“
A. Eckmanns, Bereichsleiter Gebäude BFE

2003, als Dissertation an der ETH Zürich eingereicht

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb: EMPA ZEN, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, www.empa-ren.ch
ENET, Egnacherstrasse 59, 9320 Arbon, enet@temas.ch, www.energieforschung.ch

Inhaltsverzeichnis

1. Hintergrund	5
2. Vorüberlegungen	5
Nutzungsvariante a:	
Brauchwasser-Vorerwärmung	6
Nutzungsvariante b:	
Zuluft-Vorerwärmung	7
Nutzungsvariante c:	
Zuluft-Vorerwärmung alpin	8
Nutzungsvariante d:	
Aussenluft-Wärmepumpe	9
Nutzungsvariante e:	
Erdreich-Saisonspeicher	10
Nutzungsvariante f:	
Latent-Saisonspeicher	13
3. Hotel in Lugano:	
Brauchwasser-Vorerwärmung	15
Referenz-System (ohne PV/T)	15
System mit PV/T	16
Resultate	18
Übersicht und Vergleich der Resultate	27
4. Wohnsiedlung in Davos:	
Erdreich-Saisonspeicher	28
Referenz-System (ohne PV/T)	29
System mit PV/T	31
Resultate	32
Übersicht und Vergleich der Resultate	37
5. Diskussion der Resultate	38
6. Literaturverzeichnis	38
A. NMF-Modell Schichtspeicher	39
B. NMF-Modell Luft-Wasser-Wärmepumpe	43
C. NMF-Modell Erdwärmetauscher	47
C.1. Das Modell	47
C.2. Der NMF-Code	51
C.3. Die Validierung	55
C.3.1. Gitterstudie	55
C.3.2. Vergleich mit FRACTure	62

Adresse

Sven Kropf
Institut für Hochbautechnik
Fachgruppe Air&Climate
ETH Zentrum WET A1
CH-8092 Zürich
Schweiz

sven.kropf@freesurf.ch

Das Projekt wurde unterstützt durch:

Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"
Hochschule für Architektur Luzern, Zentrum für interdisziplinäre Gebäudetechnik

1. Hintergrund

In einem Projekt der ETH Zürich wurde mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie und der Fachhochschule Zentralschweiz die Hinterlüftung von Photovoltaik-Ziegeln untersucht und optimiert. Diese Ziegeln werden im Folgenden mit "PV/T-Schiefer" bezeichnet (PV/T = Photovoltaik/Thermie).

Die Hinterlüftung gebäudeintegrierter Photovoltaik hat in erster Linie die Kühlung der Solarzellen zum Ziel. Tiefere Zell-temperaturen führen zu einem höheren elektrischen Wirkungsgrad. Als günstiger Nebeneffekt erwärmt sich die hinterströmende Luft.

In Laboruntersuchungen wurde der Vorgang des Wärmeüberganges von den PV-Modulen in die hinterströmende Luft untersucht ([1] Kropf 1999). Ein Prototyp des PV/T-Schiefers wurde im

Freien ausgemessen ([2] Kropf 2002). Dieselben PV/T-Schiefer wurden in einer ersten kleinen Pilotanlage verwendet ([3] Kropf 2002). An Hand der Resultate aus den bestehenden Messungen wurde ein dynamisches Modell zur Berechnung der Luft-Austrittstemperatur validiert ([4] Kropf 2003). Mit Hilfe dieses Modells wurde für verschiedene typische Klimazonen der Schweiz der Wärmeertrag des PV/T-Schiefers berechnet und präsentiert ([5] Kropf 2003).

Mit den gewonnenen Erkenntnissen ist es möglich, aus vielen erdenklichen Anwendungsarten die vielversprechendsten auszuwählen. Diese werden in den vorliegenden Fallstudien präsentiert, mit Hilfe des Rechenmodells genauer untersucht und anschliessend diskutiert.

2. Vorüberlegungen

Als Grundlage dient der PV/T Ertragsatlas ([5] Kropf 2003).

Der PV/T-Schiefer liefert vor allem im Sommer viel Wärme. Diese ungleiche Verteilung des Wärmeangebots gilt insbesondere für den Standort Zürich und für ein Dach mit kleinem Steigungswinkel. Eine Fassade in Davos liefert demgegenüber im Sommerhalbjahr sogar etwas weniger Wärme als im Winterhalbjahr.

Hinzu kommt, dass das Temperaturniveau der zur Verfügung stehenden Wärme mit der Aussenlufttemperatur jahreszeitlich schwankt und von Ort zu Ort variiert. Währenddem sie im Juli in Lugano bei 25-50°C (durchschnittlich 38°C) anfällt, tut sie dies im Januar in Davos bei 0-20°C (durchschnittlich 10°C).

Gesucht sind also Anwendungs-Situationen (Nutzungsvarianten) mit einem hohen Wärmebedarf im Sommer, bei denen auch ausgesprochene Niedertemperatur-Wärme genutzt werden kann.

Um verschiedene Nutzungsvarianten untereinander vergleichen zu können, werden folgende zwei Grössen definiert:

solarer Nutzungsgrad

$$= \frac{\text{Einsparung an Endenergie dank PV/T}}{\text{Primärenergie (Einstrahlung auf PV-Fläche)}}$$

solarer Deckungsgrad

$$= \frac{\text{Einsparung an Endenergie dank PV/T}}{\text{Endenergie bedarf ohne PV/T}}$$

In diesem Kapitel sollen erste Überlegungen zu möglichen Nutzungsvarianten beschrieben werden, auf Grund derer entschieden werden kann, für welche sich eine nähere Untersuchung lohnt. Die vielversprechendsten Nutzungsvarianten werden danach in den folgenden Kapiteln detaillierter behandelt.

Nutzungsvariante a: Brauchwasser-Vorwärmung für Hotel 2. Klasse, 50 Betten (= CH Durchschnitt), Standort Lugano.

Gemäss VSSH Handbuch ([45] VSSH 1998) Blatt Nr. 2.2.7 beträgt der tägliche Bedarf je Bett durchschnittlich 50 Liter Wasser von 60°C. Für die Deckung der Spitzen wird von einem täglichen Bedarf von 70 Liter je Bett ausgegangen.

Monat	Tage	pro Tag Liter	pro Monat Liter	Start-Temp °C	Vorwärm-Temp °C	Ziel-Temp °C	totaler Wärmebedarf kWh	Wärmeanteil PV/T kWh	PV/T m ²
Jan	31	1500	46500	10	16	60	2702	324	36
Feb	28	1500	42000	10	21	60	2440	537	36
März	31	2000	62000	12	22	60	3458	720	34
April	30	2500	75000	14	22	60	4009	697	35
Mai	31	3000	93000	16	26	60	4755	1081	36
Juni	30	3000	90000	18	30	60	4392	1255	37
Juli	31	3500	108500	20	33	60	5043	1639	36
Aug	31	3000	93000	20	36	60	4322	1729	35
Sep	30	2500	75000	18	31	60	3660	1133	35
Okt	31	2000	62000	16	25	60	3170	648	34
Nov	30	2000	60000	14	20	60	3207	418	35
Dez	31	2000	62000	12	14	60	3458	144	36
Total			86900				44615	10326	

Tab. 1: Abschätzung des monatlichen Wärmebedarfs für Warmwasser und dessen Deckung mittels PV/T.

Tab. 1 zeigt in den einzelnen Kolonnen folgendes:

"pro Tag": Den für jeden Monat durchschnittlichen täglichen Warmwasserbedarf (abhängig von der Bettenbelegung) so, dass einerseits die Spitze 70 Liter je Bett und der Durchschnitt 50 Liter je Bett beträgt und andererseits im Sommerhalbjahr 60% des Jahresbedarfs verbraucht wird und im Winterhalbjahr 40%.

"pro Monat": Den für jeden Monat totalen Warmwasserbedarf.

"Start-Temp": Die für jeden Monat geschätzte Temperatur des Leitungswassers von Lugano für den Speicher-Eintritt.

"Vorwärm-Temp": Eine gemäss PV/T-Ertragsatlas häufig erreichte Temperatur der gewonnenen Wärme. Auf diese Temperatur soll das Wasser im Speicher mit der PV/T-Luft vorerwärmt werden.

"Ziel-Temp": Das ganze Jahr wird das Wasser im Speicher auf 60°C nacherwärmt.

"totaler Wärmebedarf": Den für jeden Monat totalen Wärmebedarf für Warmwasser, berechnet aus dem monatlichen Warmwasserbedarf, der Start- und der Ziel-Temperatur sowie der spezifischen Wärme von Wasser.

"Wärmeanteil PV/T": Die Wärme für jeden Monat, welche nötig ist, um das Brauchwasser von der Start- auf die Vorwärmtemperatur vorzuwärmen.

"PV/T": Die PV/T-Fläche, welche gemäss PV/T-Ertragsatlas nötig ist, um den Wärmeanteil PV/T auf dem Niveau der Vorwärmtemperatur zu decken.

Da nicht alle in der Hinterlüftung gesammelte Wärme ins Brauchwasser getauscht werden kann, muss von einer grösseren PV/T-Fläche ausgegangen werden, als in Tab. 1 aufgeführt ist. Bei 75 % Übertragungs-Wirkungsgrad beträgt die benötigte PV/T-Fläche rund 50 m².

50 m² PV bringen 5'350 kWh el. Energie. Die Hinterlüftung bringt gemäss PV/T-Ertragsatlas 200 kWh Mehrertrag (Strom für Ventilator bereits abgezogen) und gemäss Tab. 1 rund 10'000 kWh Einsparung für die Warmwasseraufbereitung.

Betrachtungsperiode: 1 Jahr

Aufgewendete Endenergie ohne PV: 44'600 kWh thermisch

Eingesparte Endenergie mit PV: 5'350 kWh elektrisch

Eingesparte Endenergie mit PV/T: 5'500 kWh elektrisch

+ 10'000 kWh thermisch

Einstrahlung auf PV-Fläche: 50 m² · 1'280 kWh/m² = 64'000 kWh

solarer Nutzungsgrad = 15'500/64'000 = 24 %
elektrisch: 8.7 %
thermisch: 15.6 %

solarer Deckungsgrad = 15'500/44'600 = 35 %

Fazit: Die Nutzungsvariante a soll als Fallbeispiel detaillierter untersucht werden.

Siehe Kapitel 3.

Nutzungsvariante b: Zuluft-Vorerwärmung für Minergie-P-Wohnhaus, Standort Burgdorf.

Fig. 1 zeigt die Verteilung der Sonnenschein-Stunden für Burgdorf während eines Jahres aufgeteilt nach der Aussenlufttemperatur (Farben gemäss Legende) und nach der Intensität der Einstrahlung auf eine 60° geneigte und gegen Süden ausgerichtete Fläche (Rubriken der x-Achse).

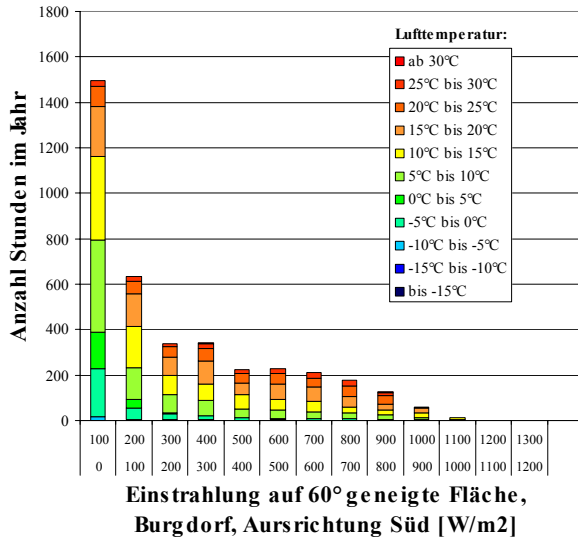


Fig. 1: Verteilung der Sonnenscheinstunden

Diese Verteilung dient als Grundlage für eine statische Berechnung zur Abschätzung des Nutzens eines PV/T-Dachs für die Zuluft-Vorerwärmung in einem Minergie-P-Wohnhaus. Alle weiteren Annahmen für die Berechnung entnimmt man der Tab. 2.

Neigung der PV-Fläche	60 °
Ausrichtung der PV-Fläche	Süd
PV-Flächenanteil an die Gebäudehülle	20 %
Luftvolumenstrom PV/T	50 m ³ /(h.m ² PV)
Lufterwärmungsfaktor im PV/T-Luftkollektor	0.02 °C/(W/m ²)
Durchschnittlicher U-Wert ohne Fenster	0.386 W/(m ² .K)
Energetisch wirksamer Luftwechsel	1 /h
Austauschvolumen / PV-Fläche	15 m ³ /m ²
Fenster-Flächenanteil an Gebäudehülle S	30 %
Fenster-Flächenanteil an Gebäudehülle W	12 %
Fenster-Flächenanteil an Gebäudehülle E	3 %
Fenster-Flächenanteil an Gebäudehülle N	7 %
U-Wert der Fenster	1.5 W/(m ² .K)
g-Wert der Fenster	60 %
Reduktionsfaktor für passiv-solare Gewinne	1
Reduktionsfaktor I(Fenster)/I(geneigt) S	0.7
Reduktionsfaktor I(Fenster)/I(geneigt) W	0.3
Reduktionsfaktor I(Fenster)/I(geneigt) E	0.3
Reduktionsfaktor I(Fenster)/I(geneigt) N	0.01
Interne Wärmegewinne / PV-Fläche	31.6 W/m ²

Tab. 2: Annahmen für die Berechnung

Mit dem Lufterwärmungsfaktor lässt sich leicht aus der Aussenlufttemperatur und der Einstrahlung auf die PV/T-Fläche die im PV/T-Luftkollektor erreichte Austrittstemperatur berechnen ($T_{\text{Austritt}} = T_{\text{Umgebung}} + \text{Lufterwärmungsfaktor} \cdot \text{Einstrahlung}$). Daraus und aus dem Luftvolumenstrom berechnet sich die Wärmeertragsleistung ($= \text{Luftvolumenstrom} \cdot \text{Luft-Wärmekapazität} \cdot (T_{\text{Austritt}} - T_{\text{Umgebung}})$). Multipliziert man diese Wärmeertragsleistung mit den Anzahl Stunden im Jahr, so erhält man schliesslich das Wärmeangebot des PV/T-Luftkollektors für jede Klimabedingung (Aussenlufttemperatur und Einstrahlung):

W/m ² °C	0	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	kWh/ m ² PV
-20 -15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
-15 -10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
-10 -5	0.0	0.3	0.2	0.3	0.1	0.2	0.6	0.5	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3
-5 0	0.0	3.9	2.8	2.4	2.2	1.6	1.2	1.1	1.6	0.6	1.0	0.0	0.4	0.0	19
0 5	0.0	6.3	6.6	5.5	6.8	4.7	6.4	4.2	4.3	4.0	1.9	0.7	0.0	0.0	52
5 10	0.0	7.1	7.2	6.8	7.8	6.1	6.9	6.3	6.7	5.6	3.1	1.4	0.0	0.0	65
10 15	0.0	6.3	9.4	7.5	8.7	9.6	8.9	10.5	5.9	6.1	5.8	2.4	0.0	0.0	81
15 20	0.0	3.7	7.3	6.7	11.7	7.4	11.8	13.7	11.1	7.3	6.3	0.7	0.0	0.0	88
20 25	0.0	1.5	2.7	3.6	6.4	6.1	8.1	7.1	11.2	9.4	1.5	0.0	0.0	0.0	57
25 30	0.0	0.4	1.1	1.0	2.4	2.4	3.7	5.3	5.9	4.2	0.3	0.0	0.0	0.0	27
30 35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.2	0.6	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2
	0	29	37	34	47	38	48	49	47	38	20	5	0	0	393

Tab. 3: jährliches Wärmeangebot des PV/T-Luftkollektors

Das Wärmeangebot soll nun mit dem Wärmebedarf des Minergie-P-Wohnhauses verglichen werden. Aus den Annahmen (Tab. 2) werden zuerst die Heizgradstunden und damit sowohl die Transmissions- und die Lüftungswärmeverluste wie auch die internen und solaren Gewinne berechnet. Die Summe multipliziert mit den Anzahl Stunden im Jahr ergibt schliesslich den Wärmebedarf:

W/m ² °C	0	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	kWh/ m ² PV
-20 -15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-15 -10	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
-10 -5	23	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
-5 0	145	33	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	181
0 5	159	36	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	199
5 10	90	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	112
10 15	39	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40
15 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30 35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	459	95	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	562

Tab. 4: jährlicher Wärmebedarf eines Minergie-P-Wohnhauses

Die Maximal erreichbare PV/T-Nutzungswärme entspricht dem Minimum zwischen dem Wärmeangebot und dem Wärmebedarf:

W/m ² °C	0	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	kWh/ m ² PV
-20 -15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
-15 -10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
-10 -5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
-5 0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3
0 5	0.0	6.3	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10
5 10	0.0	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7
10 15	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2
15 20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
20 25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
25 30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
30 35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
	0	15	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21

Tab. 5: maximal erreichbare jährliche Nutzungswärme für die Zuluft-Vorerwärmung eines Minergie-P-Wohnhauses

Dies entspricht einem solaren thermischen Nutzungsgrad von knapp 2% und einem solaren Deckungsgrad von knapp 4%. Diese Bilanz wird sogar noch schlechter, wenn man bedenkt, dass die vom PV/T-Luftkollektor gewonnene Wärme die Effizienz der WRG in praktisch derselben Grössenordnung schmälert.

Betrachtungsperiode: 1 Jahr / Bezugsgrösse: 1m² PV

Bedarf an Endenergie für Heizung: 562 kWh thermisch

Eingesparte Endenergie mit PV/T: 21 kWh thermisch

Einstrahlung auf PV-Fläche: 1'150 kWh/m²

solarer Nutzungsgrad = $21/1'150 = 4 \%$

solarer Deckungsgrad = $21/562 = 2 \%$

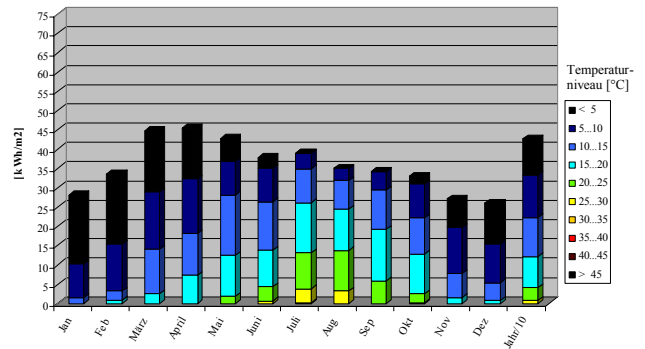
Fazit: Die Nutzungsvariante b verspricht eindeutig keinen lohnenswerten Nutzungsgrad.

Nutzungsvariante c: Zuluft-Vorerwärmung für Minergie-P-Leichtbau, Weissfluhjoch.

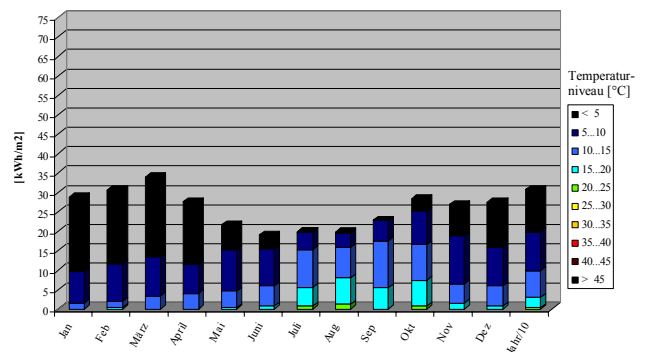
In extrem kalten Regionen mit gleichzeitig viel Sonneneinstrahlung könnte der Wärmebedarf genügend hoch sein, um die PV/T-Wärme nutzen zu können.

Als Grundlage für eine erste Abschätzung dient das analog zum PV/T-Wärmeatlas bestimmte und in Fig. 2 dargestellte PV/T-Wärmeangebot für Weissfluhjoch.

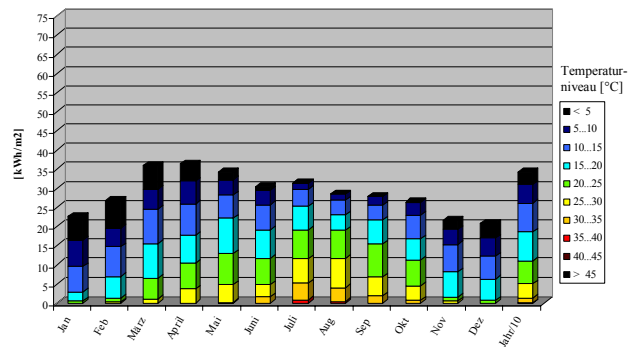
Weissfluhjoch - 45° - 15 g/s.m²



Weissfluhjoch - 90° - 15 g/s.m²



Weissfluhjoch - 45° - 8 g/s.m²



Weissfluhjoch - 90° - 8 g/s.m²

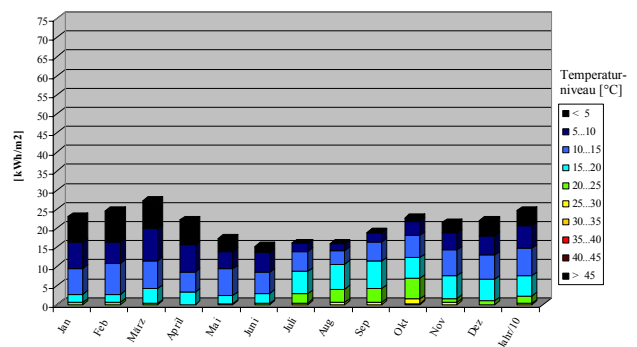


Fig. 2: PV/T-Wärmeangebot für Weissfluhjoch

Gemäss ([46] Koschenz et al. 2003) muss jeweils tagsüber gekühlt und nachts geheizt werden. Das Problem liegt somit nicht bei der Wärmegewinnung (diese kann auch direkt passiv gewonnen werden), sondern vielmehr bei der Speicherung der Wärme vom Tag in die Nacht und bei der Konzeptionierung der Gebäudehülle so, dass der Tageskühlbedarf etwa gleich ist wie der Nachtheizbedarf. Legt man die Gebäudehülle für den Winterfall aus, so muss im Sommer gekühlt (oder besser beschattet) werden. Legt man die Gebäudehülle für den Sommerfall aus, so muss im Winter geheizt werden. Beides kann nicht idealerweise mittels PV/T-Schiefer geschehen. Der PV/T-Schiefer könnte allenfalls im Sommer einen Heizbedarf-Überschuss decken, ein solcher ist aber lediglich im Winter zu erwarten.

Fazit: Die Nutzungsvariante c verspricht keinen lohnenswerten Nutzungsgrad.

Nutzungsvariante d: Aussenluft-Wärmepumpe für Warmwasser und/oder Bodenheizung bei einer Einfamilienhaus-Rennovation nach Minergie.

Resultat aus dem BFE-Projekt STASCH ([47] Gabathuler et al. 2002): Es stehen folgende Stundenwerte einer Gebäudesimulation zur Verfügung:

- Wetterdaten
- von der WP verbrauchte elektrische und abgegebene thermische Energie
- Quelltemperatur ohne PV/T (=Umgebungstemperatur)
- Zieltemperatur (= Heizungs-Vor- und Rücklauftemperatur).

Die Quelltemperatur mit PV/T (=PV/T-Austrittstemperatur) wird grob geschätzt auf $T(\text{Umgebung}) + 0.2^\circ\text{C pro W/m}^2 \text{ Einstrahlung}$.

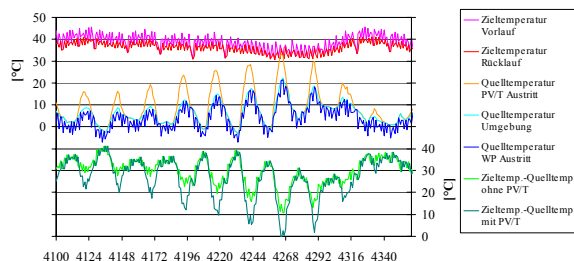


Fig. 3: Ausschnitt von 10 Tagen aus den Temperatur-Stundenwerten.

Der Jahresbedarf an elektrischer Energie für die Wärmepumpe erhält man durch Summierung aller Stundenwerte. Er beträgt für den vorliegenden Fall 8'383 kWh.

Annahme: Der COP der Wärmepumpe erhöht sich um 1 pro 5°C höherer Quelltemperatur. Für jede Stunde kann nun die Quelltemperatur-Erhöhung dank PV/T bestimmt und der Bedarf an elektrischer Leistung mit dem korrigierten COP berechnet werden.

Ohne Tagesspeicher beträgt somit das Einsparpotenzial an elektrischer Energie ca. 600 kWh.

Kann dank Tagesspeicher die Laufzeit der Wärmepumpe auf die Mittagszeit (wenn die Quelltemperatur mit PV/T hoch ist) beschränkt werden, so wird die Einsparung schätzungsweise verdreifacht und beträgt 1'800 kWh, was einem Deckungsgrad von gut 20% entspricht.

Betrachtungsperiode: 7 Monate

Aufgewendete Endenergie ohne PV: 8'400 kWh elektrisch

Eingesparte Endenergie mit PV: 6'800 kWh elektrisch

Eingesparte Endenergie mit PV/T: 7'270 kWh elektrisch

+ 1'800 kWh elektrisch

Einstrahlung auf PV-Fläche: $72 \text{ m}^2 \cdot 390 \text{ kWh/m}^2 = 28'000 \text{ kWh}$

solarer Nutzungsgrad = $9'070/28'000 = 32 \%$

solarer Deckungsgrad = $9'070/8'400 = 108 \%$

Fazit: Der PV/T-Schiefer kann eine Aussenluft-Wärmepumpe sehr einfach und auch wirkungsvoll unterstützen. Die Schwierigkeit liegt bei der Optimierung der Systemsteuerung. Als Fallbeispiel dient die Pilotanlage in Steinhausen ([3] Kropf 2002).

Nutzungsvariante e: Erdreich als saisonaler Speicher der PV/T-Wärme.

Wir gehen von einem Reihenhaus oder einer EFH-Überbauung nach dem Minergie-Standard mit Bodenheizung und Erdsonden-Wärmepumpe aus:

Energiekennzahl Wärme: $150 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ ($42 \text{ kWh/m}^2\text{a}$)

Energiekennzahl Elektrizität: $50 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ ($14 \text{ kWh/m}^2\text{a}$)

Annahme: Wohneinheiten 2-geschossig mit je einer EBF von $2 \times 80 = 160 \text{ m}^2$

-> jährlicher Heizenergiebedarf: $6'000 \text{ kWh}$

jährlicher Elektrizitätsbedarf: $2'000 \text{ kWh}$ (ohne Wärmepumpe)

Annahme: 50 m^2 Dachfläche gegen Süden mit PV/T-System

-> jährlicher Elektrizitätsgewinn PV: $5'000 \text{ kWh}$

-> jährlicher Wärmegewinn PV/T (Zürich):

> 35°C : $4'000 \text{ kWh}$

> 25°C : $10'000 \text{ kWh}$

> 20°C : ca. $14'000 \text{ kWh}$

10 Einheiten könnten somit jährlich (insbes. im Sommerhalbjahr) bis zu $120'000 \text{ kWh}$ Wärme in einen Erdspeicher einspeisen, währenddem sie diesem jährlich (insbesondere im Winterhalbjahr) ca. $50'000 \text{ kWh}$ Wärme (Wärmepumpe mit JAZ = 4) entziehen.

Um abzuschätzen, wie stark die im Sommer eingespeiste Wärme sich auf den elektrischen Aufwand der Wärmepumpen im Winter auswirkt, dient das Programm EWS, Version 2.9 ([64] Widmer et al. 2002).

Annahmen für die Simulation des Falles ohne PV/T:

1 Erdwärmesonde pro Wohneinheit, 100 m tief, 32 mm doppel-U-Rohr mit Monopropylenglykol 25%, Massenstrom 0.2 kg/s , homogenes Erdreich, Jahresmitteltemperatur 9°C .

Annahmen für die Simulation des Falles mit PV/T:
Für alle 10 Wohneinheiten ein zentrales Bohrlochfeld mit $3 \times 6 = 18$ Erdwärmesonden, je 50 m tief mit Sondenabstand 10 m , 32 mm doppel-U-Rohre mit Monopropylenglykol 25%, Massenstrom total 2.0 kg/s , homogenes Erdreich, Jahresmitteltemperatur 9°C .

Wie mit Hilfe des PV/T-Ertragsatlases und des Programms EWS der Verlauf der Soletemperatur bestimmt wird, ist in Fig. 5 veranschaulicht: Die Einspeiseenergie muss mit dem thermischen Ertrag des PV/T-Schiefers korrelieren. Für 45° Neigung, Standort Zürich und Luftmassenstrom $15 \text{ g/(s m}^2 \text{ PV)}$ entnehmen wir dem PV/T-Ertragsatlas ([5] Kropf 2003) das Diagramm in Fig. 5. Mit Hilfe dieses Diagramms und mit vorerst geschätzten Startwerten für die monatlichen durchschnittlichen Soletemperaturen bestimmen wir die monatliche Einspeise-Energien. Ziehen wir diese von der monatlich benötigten Erdwärme ab, so erhalten wir die totalen monatlichen Entzugsenergien, welche als Input für die EWS-Simulation dienen. Als Output kriegen wir die Monatswerte der durchschnittlichen Soletemperatur, welche wir mit unseren gemachten Annahmen vergleichen. Stimmen diese nicht überein, werden sie entsprechend angepasst. In einem iterativen Prozess passen wir die Einspeiseenergie so lange an, bis die vom EWS-Programm berechneten durchschnittlichen Soletemperaturen mit den Annahmen übereinstimmen.

Tab. 6 und Fig. 6 entnimmt man die Resultate aus dieser Iteration.

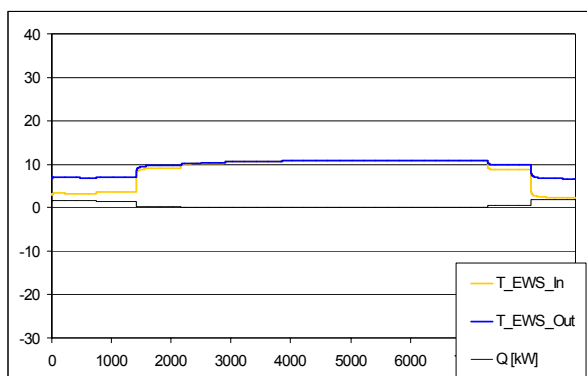
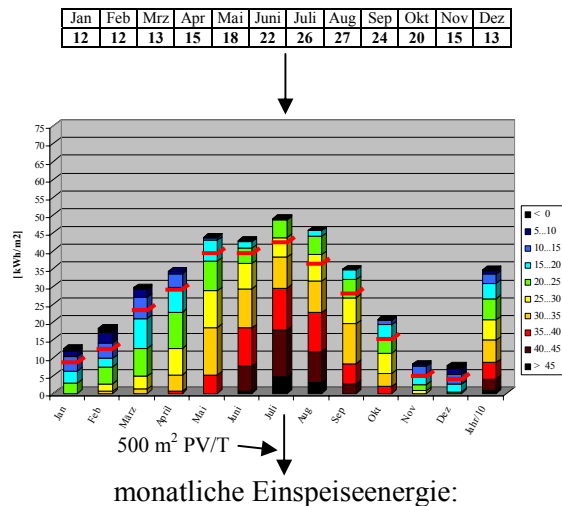


Fig. 5: Mit EWS 2.9 berechnete Soletemperaturen ohne PV/T

monatliche durchschnittliche Soletemperaturen
(vorerst Annahme):



	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Einspeiseenergie	400	600	1150	1400	1900	1900	2100	1800	1350	750	250	200
benötigte Wärme	1200	1000	200	50	0	0	0	0	0	350	1400	
Entzugsenergie	800	400	-950	-1350	-1900	-1900	-2100	-1800	-1350	-750	100	1200

EWS

Fig. 5: Thermischer Ertrag PV/T-Schiefer

	Sole-temp.	Einspeise-energie	benötigte Erdwärme	Entzugs-energie
Januar	16°C	2'000 kWh	12'000 kWh	10'000 kWh
Februar	16°C	4'000 kWh	10'000 kWh	6'000 kWh
März	19°C	6'000 kWh	2'000 kWh	-4'000 kWh
April	20°C	10'500 kWh	500 kWh	-10'000 kWh
Mai	22°C	15'000 kWh	0 kWh	-15'000 kWh
Juni	23°C	17'000 kWh	0 kWh	-17'000 kWh
Juli	25°C	20'000 kWh	0 kWh	-20'000 kWh
August	25°C	18'000 kWh	0 kWh	-18'000 kWh
September	24°C	12'000 kWh	0 kWh	-12'000 kWh
Oktober	22°C	6'500 kWh	0 kWh	-6'500 kWh
November	18°C	1'000 kWh	3'500 kWh	2'500 kWh
Dezember	15°C	1'000 kWh	14'000 kWh	13'000 kWh
total		111'000 kWh	42'000 kWh	

Tab. 6: Angenommene Soletemperaturen (für den Ladevorgang) und davon abgeleitete Entzugsenergie.

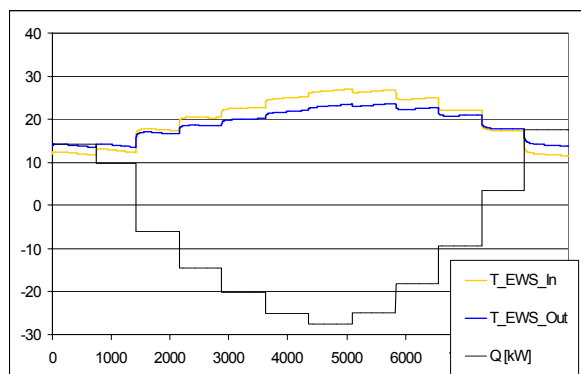


Fig. 6: Mit EWS 2.9 berechnete Soletemperaturen mit PV/T

Bemerkung: Die Einspeiseenergie wurde am Diagramm aus dem PV/T-Ertragsatlas abgelesen.

Da diese Energie derjenigen entspricht, welche von den PV-Modulen in die Hinterlüftungsluft gelangt, entspricht sie nicht genau der Energie, welche mit der gewonnenen Warmluft ins Erdreich gespeichert werden kann. Da die Soletemperatur insbesondere im Sommer während den Einspeisezeiten meistens kühler ist als die Umgebungstemperatur, bleiben wir mit unseren Abschätzungen eher auf der sicheren Seite: Im Sommer kann eher mehr Energie eingespeist werden, im Winter eher etwas weniger. Die erreichte Soletemperatur im Winter dürfte aber etwa den hier gemachten Angaben entsprechen.

Gemäss Wärmepumpen-Testzentrum Töss beträgt die Leistungszahl (COP) für handelsübliche Wärmepumpen (je bester Wert bei Zieltemperatur 35°C):

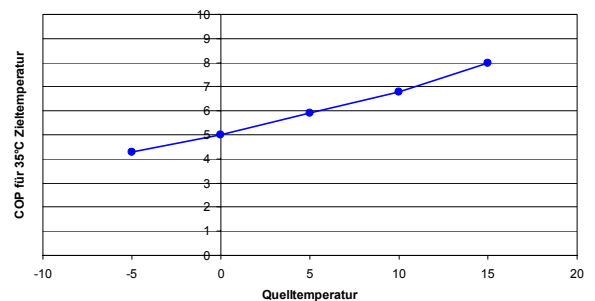


Fig. 7: COP in Funktion der Quelltemperatur bei 35°C Zieltemperatur (Messresultate Testzentrum Töss)

Quelltemp.	COP
8 °C	6.44
9 °C	6.62
15 °C	8
16 °C	8.24
17 °C	8.48

Tab. 7: Aus Diagramm in Fig. 7 abgelesener COP für die in unserer Abschätzung (Tab. 8) vorkommenden Quelltemperaturen (=Soletemperaturen während der Heizsaison) bei 35°C Zieltemperatur.

	benötigte Erdwärme	mit PV/T		ohne PV/T	
		Quell- temp. für WP	Strom- verbrauch Wärme- pumpe	Quell- temp. für WP	Strom- verbrauch Wärme- pumpe
Jan	1'200 kWh	15°C	214 kWh	8°C	276 kWh
Feb	1'000 kWh	15°C	179 kWh	8°C	230 kWh
März	200 kWh	16°C	35 kWh	9°C	44 kWh
April	50 kWh	17°C	8 kWh	9°C	11 kWh
Mai					
Juni					
Juli					
Aug					
Sep					
Okt					
Nov	350 kWh	17°C	58 kWh	9°C	78 kWh
Dez	1'400 kWh	15°C	93 kWh	8°C	322 kWh
Total	4'200 kWh		587 kWh		961 kWh

Tab. 8: Mit dem Programm EWS berechnete monatliche Werte der Quelltemperaturen für die Wärmepumpe und mit dem COP in Tab. 7 berechneter Stromverbrauch der Wärmepumpe

50 m² PV bringen 5'100 kWh el. Energie. Die Hinterlüftung bringt gemäss PV/T Ertragsatlas 350 kWh Mehrertrag (Strom für Ventilator bereits abgezogen) und gemäss Tab. 8 370 kWh Einsparung für die Wärmepumpe. Je Wohneinheit bleiben fast 3'000 kWh elektrische Überschussenergie - 700 kWh mehr als ohne Hinterlüftung der PV-Module.

Betrachtungsperiode: 1 Jahr

Aufgewendete Endenergie ohne PV: 2'000 kWh elektrisch
+ 961 kWh elektrisch

Eingesparte Endenergie mit PV: 5'100 kWh elektrisch

Eingesparte Endenergie mit PV/T: 5'450 kWh elektrisch
+ 370 kWh elektrisch

Einstrahlung auf PV-Fläche: 50 m² · 1'150 kWh/m² = 57'000 kWh

solarer Nutzungsgrad = 5'820/57'000 = 10 % (elektrisch)

solarer Deckungsgrad = 5'820/2'960 = 200 %

Fazit: Die Nutzungsvariante e soll als Fallbeispiel detaillierter untersucht werden.

Siehe Kapitel 4.

Nutzungsvariante f: Aufladen eines Latent-Saisonspeichers.

Annahme: Es kann ein geeigneter Latentspeicher gefunden werden, welcher bei 32-33°C genügend Wärme speichern kann, um den Heizwärmebedarf für ein Minergie-P-Haus vom Sommer in den Winter zu speichern.

-> Einspeisetemperatur $\geq 35^\circ\text{C}$
Vorlauftemperatur = 30°C

Annahme: 2-geschossige Einheit mit einer EBF von $2 \times 80 = 160 \text{ m}^2$, Wärmebedarf nach Minergie-P: 2'400 kWh

Nachteil: Die Warmluft kann nur bis zum Herunterkühlen auf 35°C genutzt werden!

-> Wärmeangebot PV/T (Zürich / $15\text{g}/(\text{s m}^2)$):

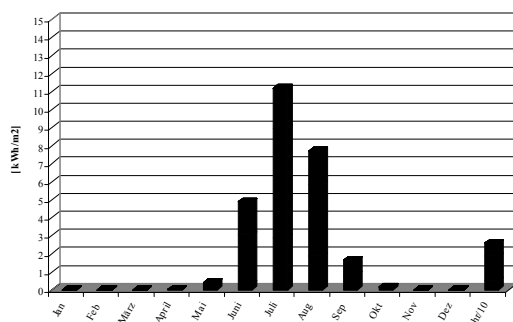


Fig. 8: Wärmeangebot für das Laden des Latentspeichers pro m^2 PV/T-Fläche

-> Unter der Annahme eines Speicherverlusts von 20% müssen 3'000 kWh gespeichert werden. Bei 25 kWh/m^2 sind somit 120 m^2 PV/T nötig, um den Bedarf zu decken. Bei einer maximalen Dachfläche von 80 m^2 können 2'000 kWh Heizwärme angeboten werden.

Bedingungen für eine 100%-ige Deckung des Heizenergiebedarfs durch die PV-Abwärme sind also:

- sehr tiefe Heizenergie-Kennzahl von $10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
- Maximale Dachfläche gegen Süden
-> Pultdach ohne Unterbrüche wie Kamin, Dachfenster usw.

Ein Pultdach nach Süden führt jedoch zu einer kleinen Südfassade und somit zu weniger passiven Gewinnen. Dies wiederum macht das Erreichen der niedrigen Heizenergie-Kennzahl schwierig.

Betrachtungsperiode: 1 Jahr

Aufgewendete Endenergie ohne PV: 1'600 kWh thermisch
+ 2'000 kWh elektrisch

Eingesparte Endenergie mit PV: 8'300 kWh elektrisch

Eingesparte Endenergie mit PV/T: 9'200 kWh elektrisch
+ 1'600 kWh thermisch

Einstrahlung auf PV-Fläche: $80 \text{ m}^2 \cdot 1'150 \text{ kWh/m}^2 = 92'000 \text{ kWh}$

solarer Nutzungsgrad = $10'800/92'000 = 12 \%$

elektrisch: 10 %

thermisch: 2 %

solarer Deckungsgrad = $10'800/3'600 = 300 \%$

elektrisch: 460 %

thermisch: 100 %

Fazit: Ein Erreichen eines 100%-igen thermischen Deckungsgrades erscheint somit als schwierig, aber machbar (ev. kann die Einspeisetemperatur noch etwas gedrückt oder die Speicherverluste verringert werden). Falls sowieso eine "Notheizung" (für den Fall, dass der Speicher vor dem Frühling leer sein sollte) vorgesehen ist, ist auch eine Anlage mit tieferem Deckungsgrad denkbar. Jedenfalls wird die Anlage wegen der grossen PV-Fläche recht teuer. Der Überschussstrom sollte allenfalls zu guten Preisen an eine Strombörse verkauft werden können.

Die Nutzungsvariante f wird hier nicht als Fallbeispiel detaillierter untersucht.

Steuerung:
Heizregister auf on/off-Betrieb bei 50 kW
Betriebsfenster zwischen 0 und 4 Uhr und
zwischen 14 und 16 Uhr
Einschaltkriterium $T_2 < 57.5^{\circ}\text{C}$
Ausschaltkriterium $T_2 > 62.5^{\circ}\text{C}$



Simulation:

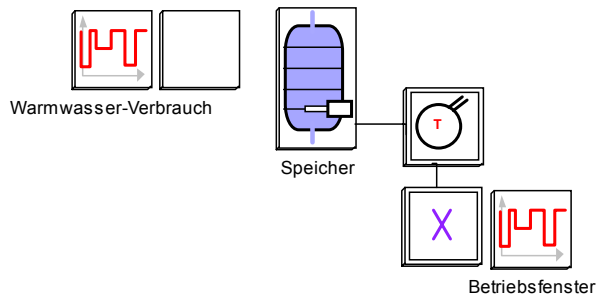
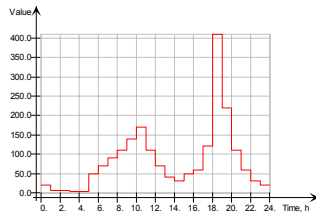


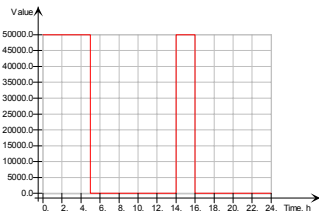
Fig. 9: Schema der Simulation des Referenzsystems mit IDA ICE

Fig. 9 zeigt das Schema aus dem IDA ICE Advanced Level. Es beinhaltet folgende Modelle:

Im Verbrauchs-Fahrplan (linkes Symbol) sind für alle Monate der Tagesverlauf des Warmwasserverbrauchs in Liter pro Stunde definiert (siehe Grafik). Der Multiplikator (rechtes Quadrat) rechnet diesen Wert in kg/s um.



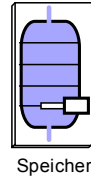
Der Fahrplan "Betriebsfenster" gibt den Tagesverlauf der erlaubten elektrischen Heizleistung in W (siehe Grafik).



Das Thermostat-Modell vergleicht die im Speicher-Modell definierte Schichttemperatur mit der auf 60°C gesetzten Umschalttemperatur. Der Ausgabewert schaltet auf den Wert 1, wenn die Schichttemperatur von oben her kommend 57.5°C erreicht und auf den Wert 0, wenn die Schichttemperatur von untern her kommend 62.5°C erreicht (Setpoint: 60°C, Deadband: 5°C).

Der Multiplikator multipliziert den Ausgabewert des Thermostaten mit der erlaubten elektrischen Heizleistung vom Betriebsfenster-Fahrplan und gibt das Resultat als effektive Heizleistung an das Speicher-Modell weiter.

Das Speicher-Modell (detaillierte Beschreibung siehe Anhang A.) berechnet aus der Heizleistung und dem Verbrauchsfahrplan den zeitlichen Verlauf der Schichttemperaturen. Die Temperatur der zweituntersten Schicht hat seinerseits über das Thermostat-Modell wie oben beschrieben einen Einfluss auf das Ein- und Ausschalten der Heizleistung.



System mit PV/T

Warmwasserverbrauch:
Wie Referenz-System

Speicher-Werte:
Wie Referenz-System, aber doppelt so hoch (4.6m) und entsprechend doppelt so viele (20) Rechen-Schichten
Heizstab in den Schichten 11-13
Wärmetauscher in den Schichten 1-10
Thermostaten in den Schichten 1 (für den Wärmetauscher) und 12 (für das elektrische Heizregister)

Steuerung:

Heizregister wie Referenz-System

Vorwärmzyklus Einschaltkriterium:

$$T_1 < TH_{x_{in}} - 0.5^{\circ}C$$

Vorwärmzyklus Ausschaltkriterium:

$$T_1 > TH_{x_{in}} + 0.5^{\circ}C$$

wobei:

- T_1 : Speichertemperatur in der untersten Schicht
- $TH_{x_{in}}$: Temperatur der Flüssigkeit im Vorwärmzyklus beim Speicher-Eintritt

PV/T:

50 m², 40°, Module wie in ([3] Kropf 2002),

Luftvolumenstrom 19 m³/(h m²)

Luftmassenstrom 6.3 g/(s m²)

Simulation:

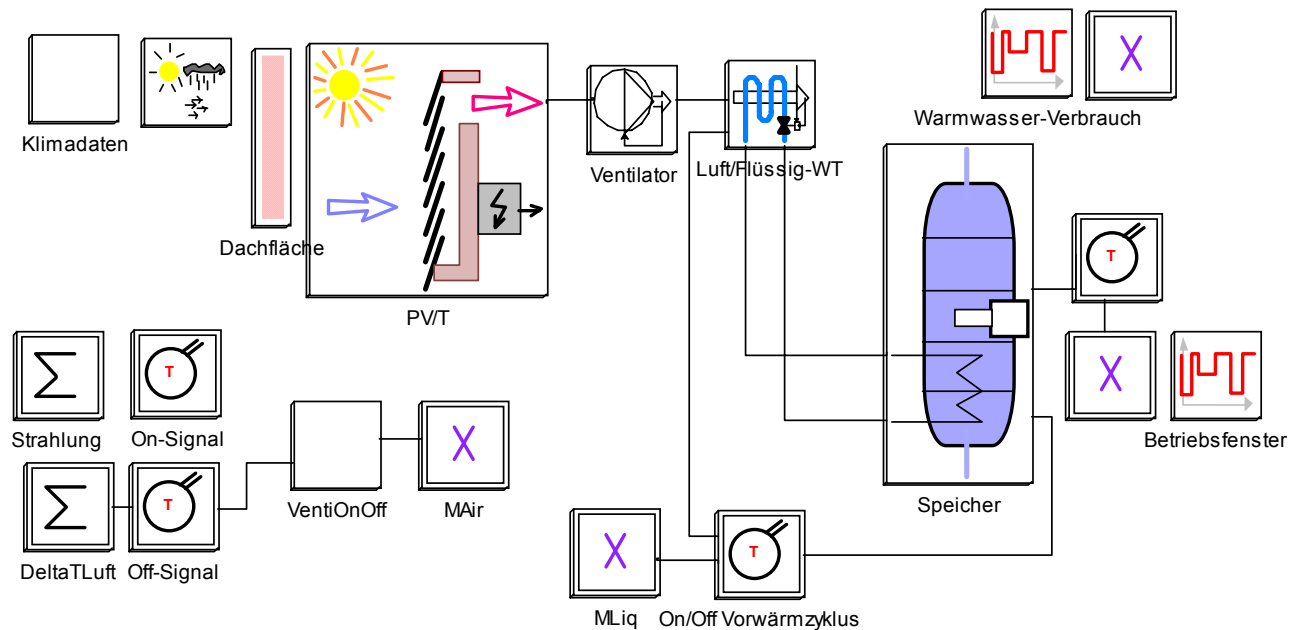
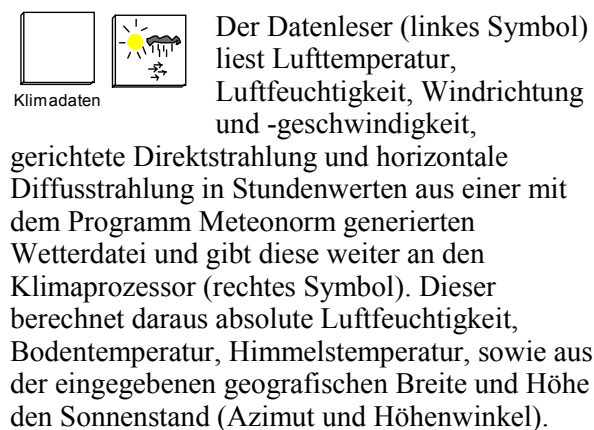
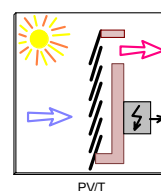


Fig. 10: Schema der Simulation des Systems mit PV/T mit IDA ICE

Fig. 10 zeigt das Schema aus dem IDA ICE Advanced Level. Es beinhaltet folgende Modelle:

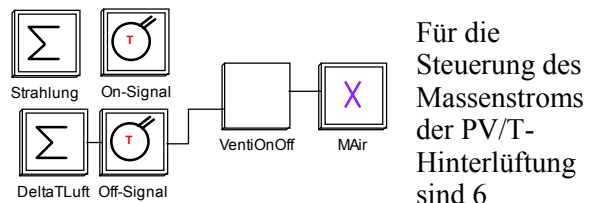


 Das Fassaden-Modell berechnet aus den Daten vom Klimaprozessor für die Dachfläche den temperatur- und windabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten, sowie die direkte Strahlung, die diffuse Himmelsstrahlung und die diffuse Bodenstrahlung.



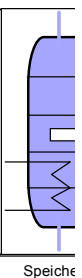
Das PV/T-Modell (detaillierte Beschreibung siehe [4] 2003) berechnet aus den vom Fassaden-Modell aufbereiteten Daten, dem Luftmassenstrom sowie aus den eingegebenen geometrischen Parametern die Zelltemperatur,

die davon abhängige gewonnene elektrische Energie und die Austrittstemperatur der Hinterlüftung.



Für die
Steuerung des
Massenstroms
der PV/T-
Hinterlüftung
sind 6

Modelle miteinander verlinkt: Ein Addierer ("Strahlung") addiert die direkte und die beiden diffusen Strahlungen zur globalen Strahlung auf die Dachfläche. Ein Thermostat ("On-Signal") gibt den Wert 1, falls diese globale Strahlung grösser ist als 200 W/m^2 und den Wert 0, falls sie kleiner ist als 200 W/m^2 . Ein zweiter Addierer ("DeltaTLuft") rechnet die Differenz von Umgebungstemperatur und PV/T-Austrittstemperatur. Ein zweiter Thermostat ("Off-Signal") gibt den Wert 1, falls diese Lufttemperatur-Erhöhung kleiner ist als 5°C und den Wert 0, falls sie grösser ist als 5°C . Das OnOff-Modell ("VentiOnOff") gibt schliesslich das OnOff-Signal für den Ventilator. Dieses hat immer den Wert 1, solange das On-Signal auch den Wert 1 hat. Falls das On-Signal den Wert 0 hat, so ist das Off-Signal massgebend: Hat es den Wert 0, so bleibt das OnOff-Signal auf seinem Wert. Hat es aber den Wert 1, so kriegt das OnOff-Signal den Wert 0. Der Multiplikator ("MAir") multipliziert schlussendlich das OnOff-



Signal mit dem Betriebsmassenstrom (0.3168 kg/s) des Ventilators. Dieser Luftmassenstrom wird an das PV/T-Modell weitergegeben.



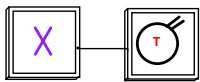
Ventilator

Das Ventilator-Modell übernimmt den Massenstrom vom PV/T-Modell. Es fügt der Austrittsluft einen kleinen Temperaturhub (1°C) zu und berechnet die erforderliche elektrische Leistung.



Luft/Flüssig-WT

Das Luft/Flüssig-Wärmetauscher-Modell übernimmt den Luftmassenstrom vom Ventilator und den Massenstrom der Flüssigkeit von der Steuerung des Vorwärmzyklus und berechnet aus den Eintrittstemperaturen der Luft und der Flüssigkeit die beiden zugehörigen Austrittstemperaturen.



MLiq On/Off Vorwärmzyklus

Für die Steuerung des Vorwärmzyklus sind zwei Modelle miteinander verlinkt: Ein Thermostat (rechtes Symbol) vergleicht die Austrittstemperatur des Fluids im Luft/Flüssig-Wärmetauscher (im Falle des abgestellten Vorwärmzyklus entspricht diese der PV/T-Luft-Austrittstemperatur) mit der Schichttemperatur des Speichers beim Vorwärmzyklus-Austritt. Ist erstere mehr als um 0.5°C grösser als zweite, so wechselt sein Wert auf 1. Ist erstere mehr als um 0.5°C kleiner als zweite, so wechselt sein Wert auf 0. Ansonsten bleibt sein Wert konstant. Der Multiplikator (linkes Symbol) multipliziert den Wert des Thermostaten mit dem OnOff-Signal des Luftmassenstroms und dem Betriebsmassenstrom (0.0792 kg/s) des Vorwärmzyklus. Dieser Massenstrom wird an den Luft/Flüssig-Wärmetauscher weitergegeben.

Das Speicher-Modell wurde für diese Simulation um einen in den Speicher integrierten Wärmetauscher für den Vorwärmzyklus erweitert (detaillierte Beschreibung siehe Anhang A.). Es berechnet aus dem Massenstrom und der Eintrittstemperatur des Vorwärmzyklus, sowie der Heizleistung den zeitlichen Verlauf der Schichttemperaturen. Die Temperatur der untersten Schicht des Wärmetauschers und diejenige der mittleren Schicht des Heizregisters haben ihrerseits über die Thermostat-Modelle einen Einfluss auf das Ein- und Ausschalten des Vorwärmzyklus bzw. der Heizleistung.



Steuerung der Heizleistung wie beim Referenz-System.



Warmwasser-Verbrauch

Eingabe des Verbrauchs-Fahrplans wie beim Referenz-System.

Resultate

Fig. 11 und Fig. 16a-b zeigen die berechneten Tagesverläufe der Wärmeflüsse und der Schichttemperaturen im Speicher für vier verschiedene Verbrauchsprofile (Januar, März, Mai und Juli).

Durch zeitliche Integration der verschiedenen Leistungen erhält man die entsprechenden monatlichen und jährlichen Energien (siehe Tab. 9 und Fig. 12, sowie Fig. 14, Fig. 15 und Tab. 10). Daraus ergeben sich die Jahresenergiebilanzen der Systeme (siehe Fig. 13, Fig. 17 und Fig. 18).

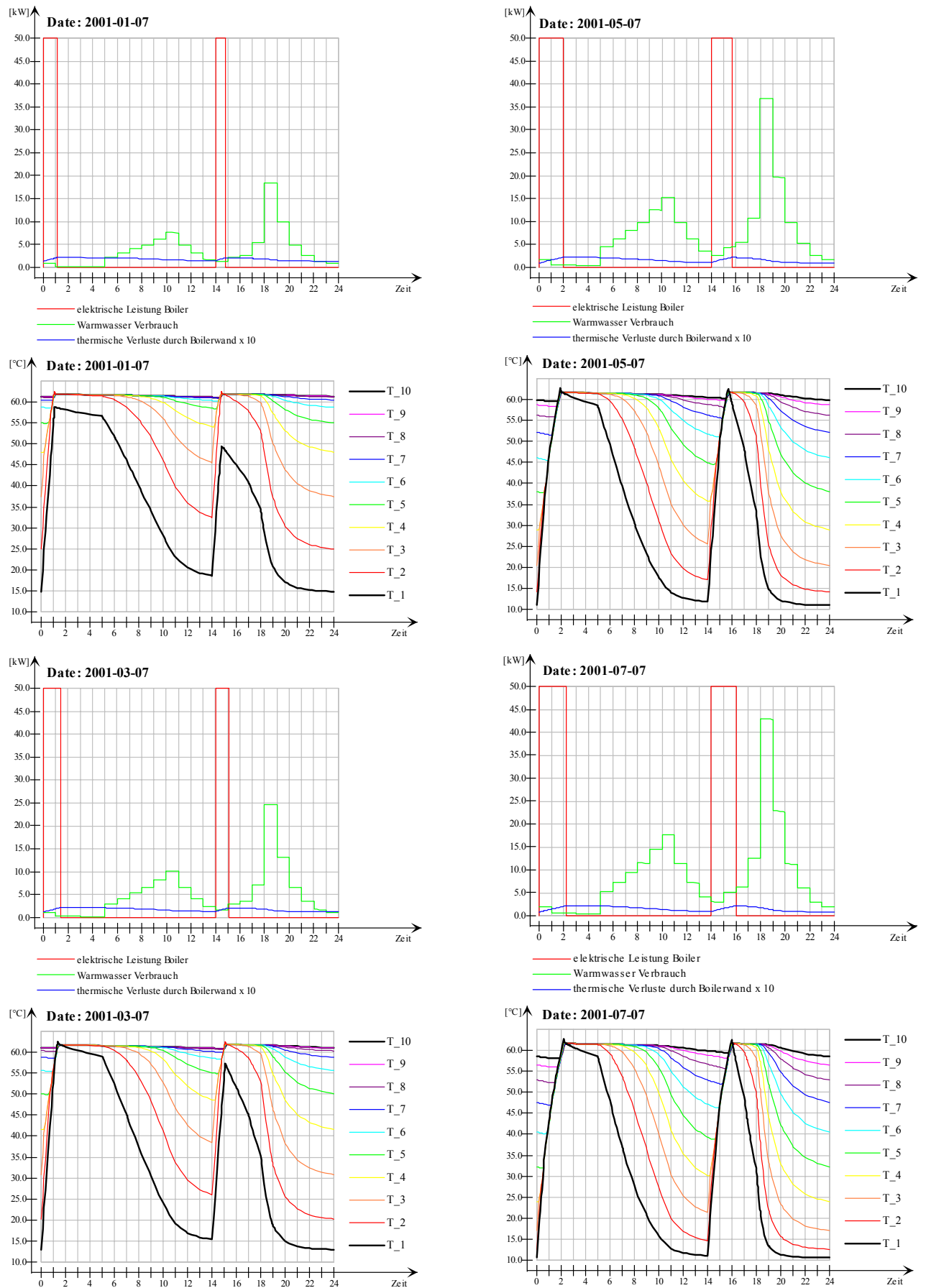


Fig. 11: Tagesverlauf der Wärmeflüsse und der Schichttemperaturen im Speicher für 4 Tage im Jahr mit verschiedenen Hotel-Auslastungen ohne PV/T.

	elektrische Energie Speicher		
	Warmwasser Verbrauch		
	thermische Verluste durch Speicherwand		
Jan	2'922	2'788	134
Feb	2'639	2'518	121
März	3'832	3'715	117
April	4'604	4'471	133
Mai	5'662	5'533	129
Juni	5'494	5'355	139
Juli	6'520	6'425	95
Aug	5'690	5'533	157
Sep	4'631	4'471	160
Okt	3'845	3'703	142
Nov	3'713	3'588	125
Dez	3'837	3'708	129
Jahr	53'390	51'808	1'582

Tab. 9: Monatlicher Energieverbrauch im Speicher ohne PV/T. Werte in kWh.

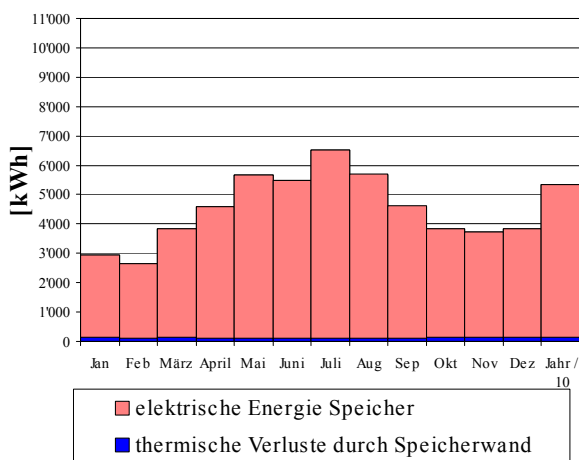


Fig. 12: Monatlicher Energieverbrauch im Speicher ohne PV/T.

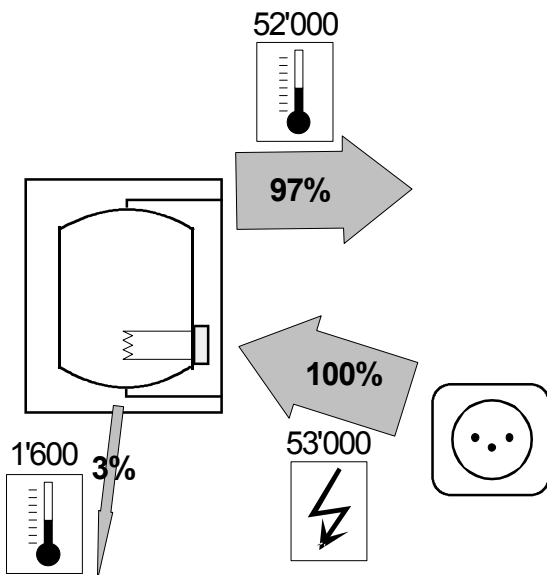


Fig. 13: Jahresenergiebilanz des Speichers ohne PVT/T. Absolutwerte in kWh. Prozentwerte bezogen auf den Energieeintrag in den Speicher.

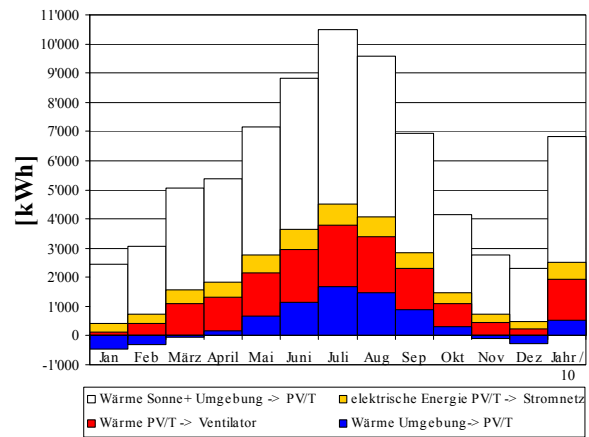


Fig. 14: Monatliche Energiebilanz des PV/T-Daches. Blau und weiss: Energie-Eintrag. Rot und gelb: Energie-Austritt

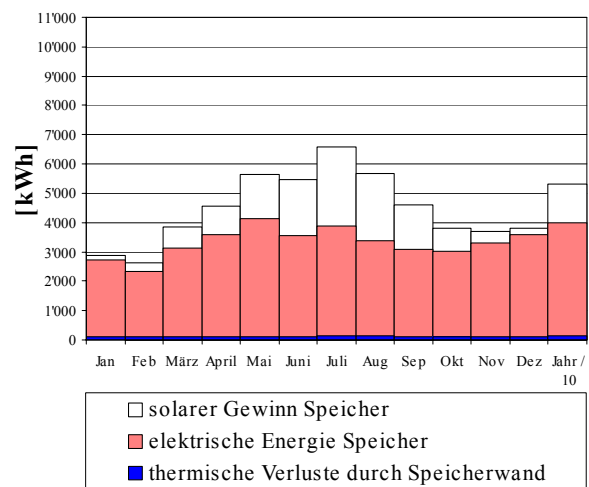


Fig. 15: Monatlicher Energieverbrauch im Speicher mit PV/T.

	Wärme Umgebung -> PV/T	Wärme Sonne -> PV/T	Wärme Umgebung + Sonne -> PV/T	elektrische Energie PV/T -> Stromnetz	Wärme PV/T -> Ventilator	Wärme PV/T -> Speicher	elektrische Energie Speicher	Warmwasser Verbrauch	thermische Verluste durch Speicherwand
Jan	-444	2886	2442	292	140	186	2'740	2'789	101
Feb	-327	3396	3069	333	406	319	2'345	2'518	98
März	-42	5082	5040	483	1096	740	3'132	3'717	115
April	162	5226	5388	495	1336	952	3'595	4'474	108
Mai	654	6504	7158	594	2159	1552	4'134	5'536	114
Juni	1131	7687	8818	680	2962	2041	3'547	5'358	123
Juli	1694	8806	10500	747	3780	2731	3'892	6'444	127
Aug	1462	8123	9586	696	3374	2336	3'364	5'539	133
Sep	897	6046	6943	537	2300	1557	3'075	4'476	124
Okt	306	3834	4140	362	1102	797	3'007	3'707	115
Nov	-100	2857	2757	280	464	366	3'324	3'590	98
Dez	-282	2589	2308	260	228	227	3'601	3'709	97
Jahr	5'113	63'035	68'149	5'758	19'345	13'804	39'757	51'856	1'356

Tab. 10: Monatliche Energiebilanz des PV/T-Daches und des Speichers mit PV/T. Werte in kWh.

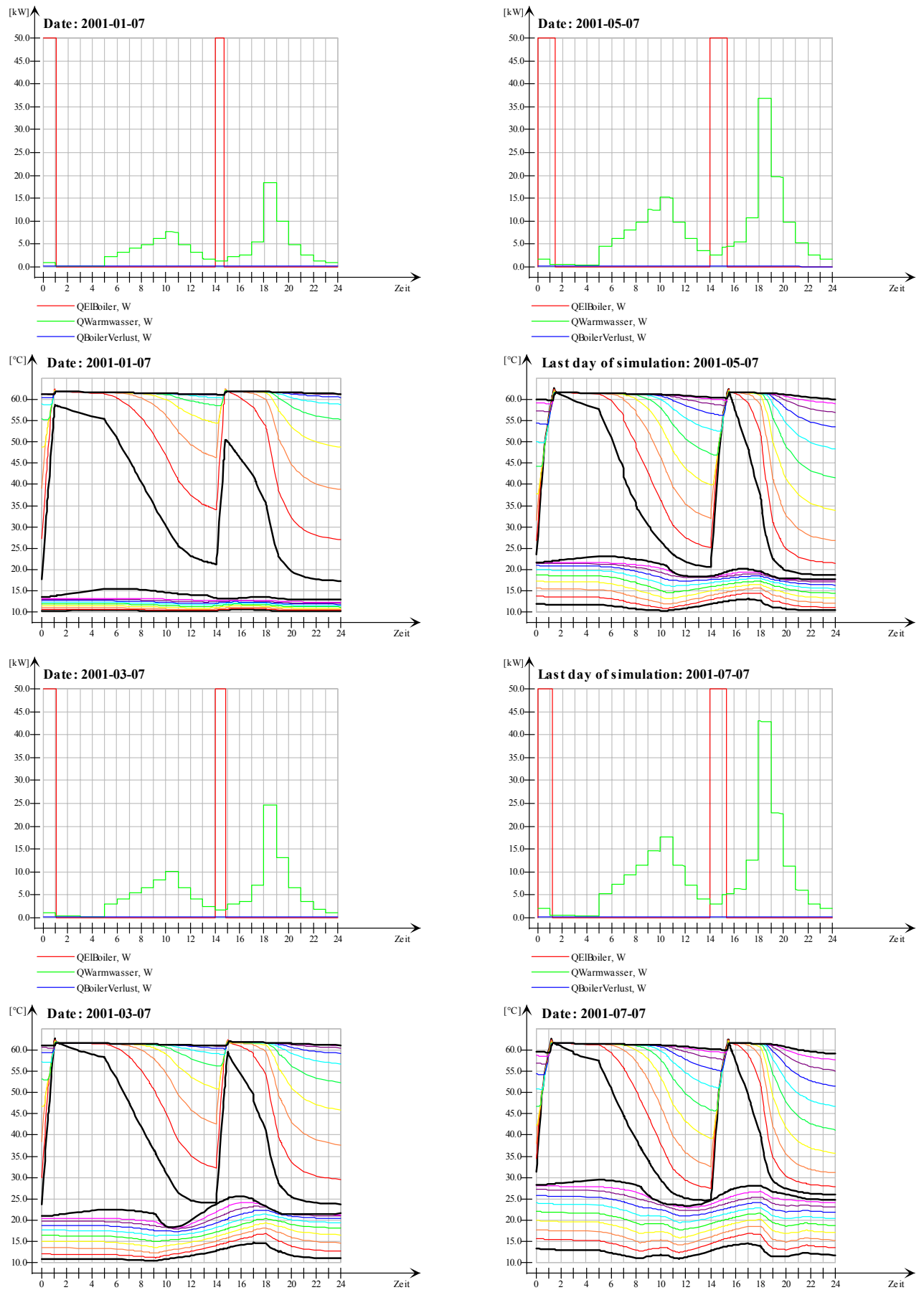


Fig. 16a: Tagesverlauf der Wärmeflüsse und der Schichttemperaturen im Speicher für 4 Tage im Jahr mit verschiedenen Hotel-Auslastungen mit PV/T.

3. Hotel in Lugano: Brauchwasser-Vorwärmung

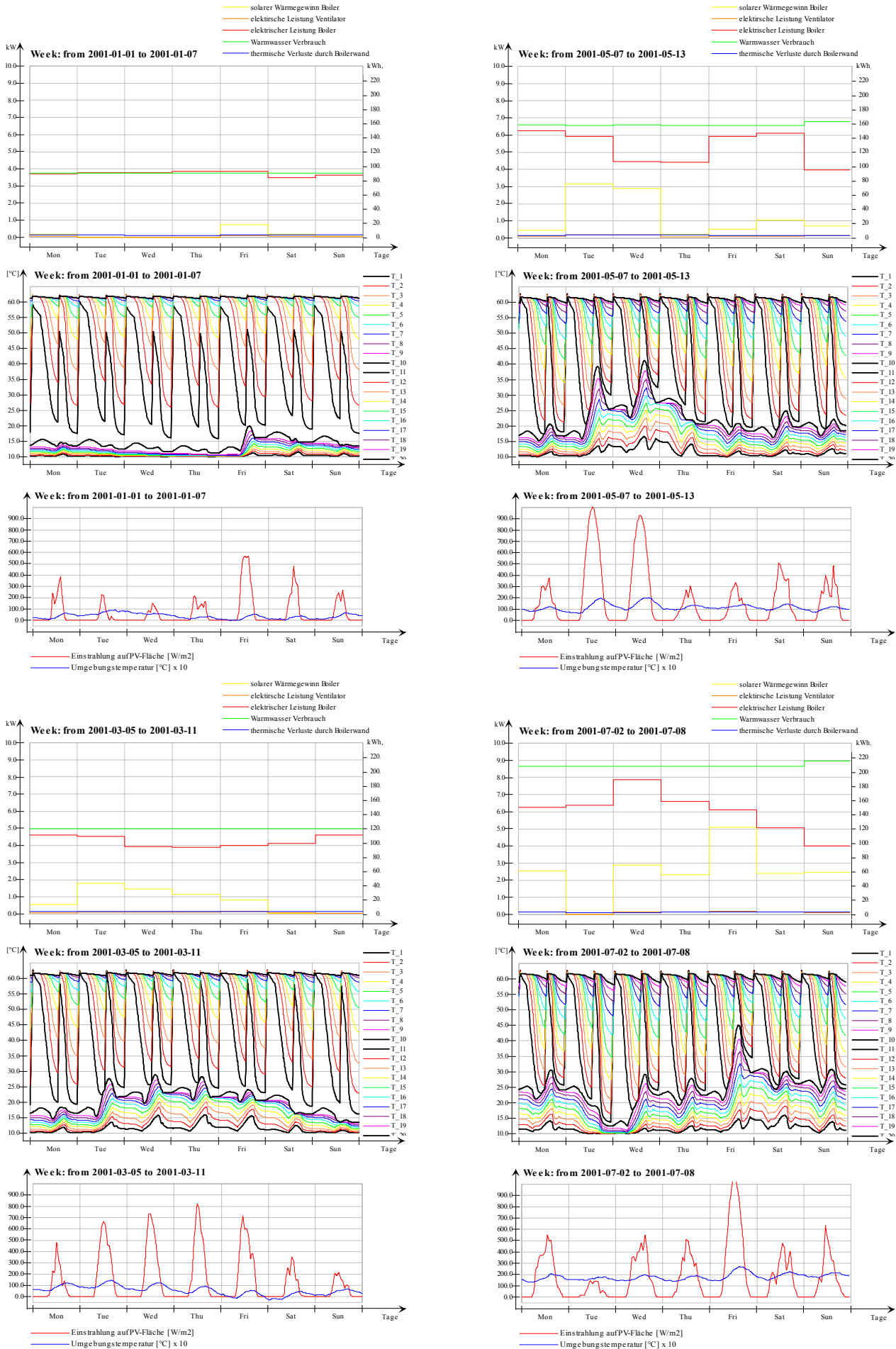


Fig. 16b: tägliche Durchschnittsleistung der einzelnen Wärmefflüsse, Tagesverlauf der Schicht-temperaturen im Speicher und zugehörige Wetterdaten für vier ausgewählte Wochen mit PV/T.

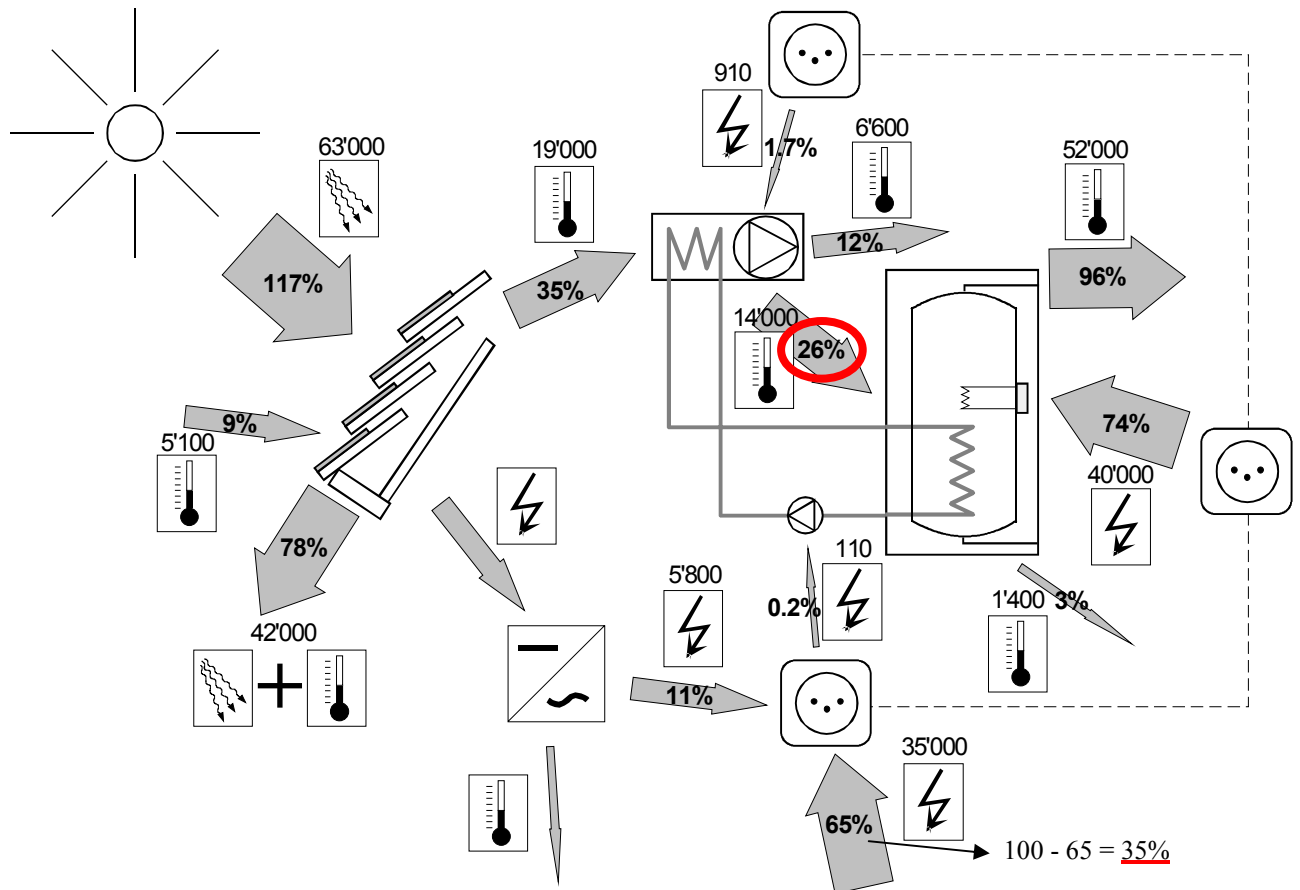


Fig. 17: Jahresenergiebilanz des ganzen Systems mit PV/T. Absolutwerte in kWh. Prozentwerte bezogen auf den gesamten Energieeintrag in den Speicher. Kaltwassertemperatur 10°C. Eingekreist: Solarer thermischer Deckungsgrad. Unterstrichen: Solarer Gesamtdeckungsgrad.

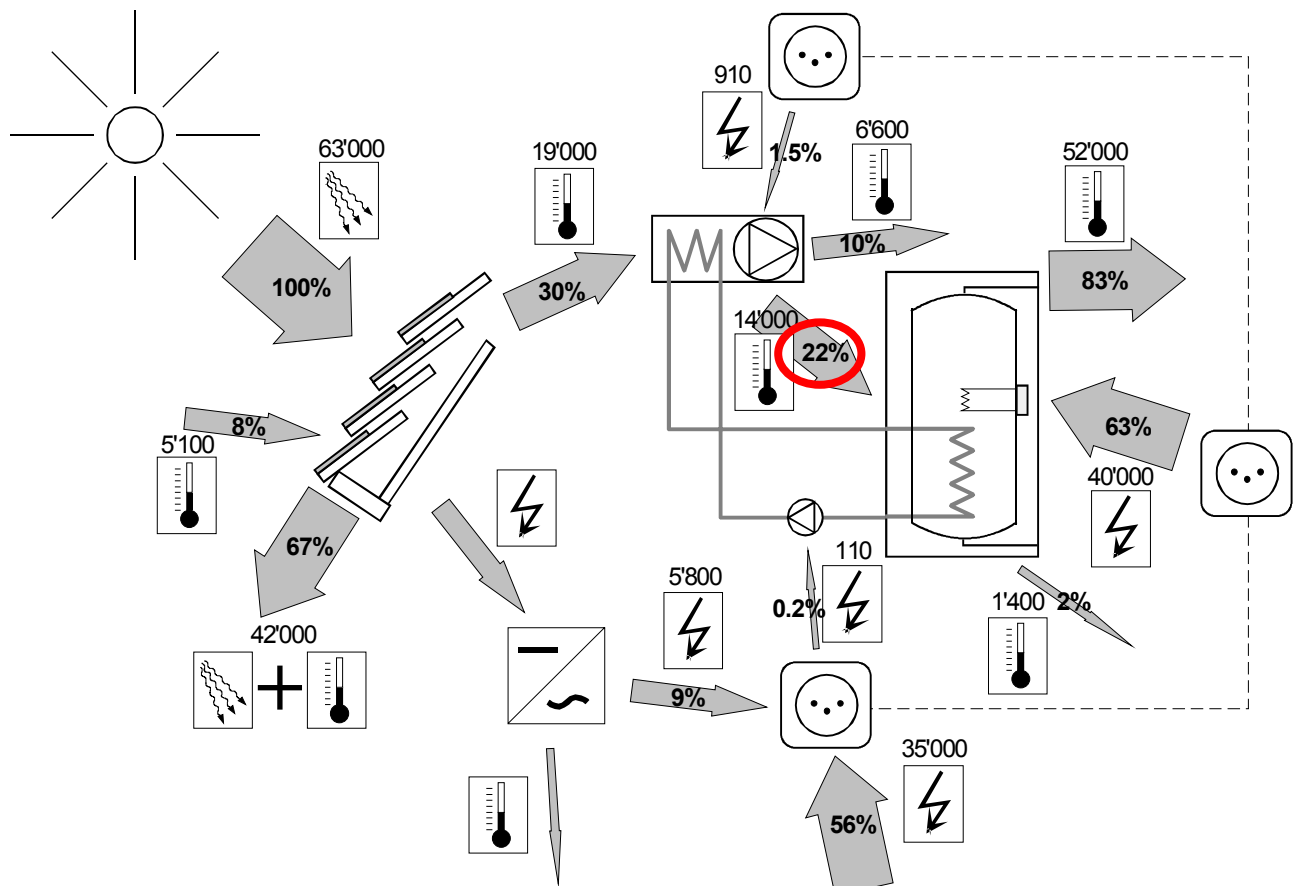


Fig. 18: Wie oben, aber Prozentwerte bezogen auf die solare Einstrahlung auf die PV-Fläche. Eingekreist: Solarer thermischer Nutzungsgrad.

Temperaturen Kaltwasser

Alle bisherigen Resultate beruhen auf Simulationen mit einer übers Jahr konstanten Kaltwasser-Temperatur von 10°C.

Höhere Kaltwasser-Temperaturen bedeuten sowohl für den Referenzfall wie auch für die Anlage mit PV/T einen kleineren elektrischen Energiebedarf für das Heizregister im Speicher. Es ist zu erwarten, dass die Einsparungen durch den PV/T-Luftkollektor ebenfalls kleiner ausfallen werden, da die Nutzwärme im Durchschnitt auf einem höheren Temperaturniveau liegt. Es ist also mit einer etwas schlechteren Ausnutzung der vom PV/T-System zur Verfügung stehenden Wärme zu rechnen. Um diesen Effekt genauer Quantifizieren zu können, wurden dieselben Simulationen mit monatlich gemäss Tab. 1 variierender Kaltwasser-Temperatur wiederholt:

	elektrische Energie Speicher	Warmwasser Verbrauch	thermische Verluste durch Speicherwand
Jan	2'922	2'788	135
Feb	2'639	2'518	122
März	3'689	3'568	132
April	4'253	4'122	124
Mai	5'057	4'883	124
Juni	4'681	4'518	122
Juli	5'278	5'168	123
Aug	4'630	4'452	128
Sep	3'913	3'776	127
Okt	3'418	3'274	135
Nov	3'438	3'312	129
Dez	3'692	3'563	132
Jahr	47'609	45'943	1'531

Tab. 11: Monatlicher Energieverbrauch im Speicher ohne PV/T. Werte in kWh.

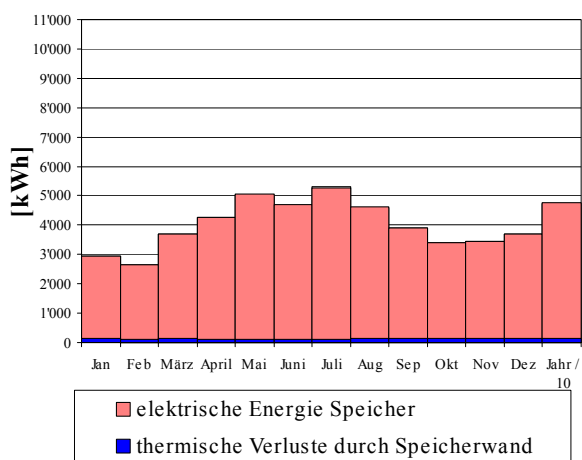


Fig. 19: Monatlicher Energieverbrauch im Speicher ohne PV/T.

	Wärme Umgebung -> PV/T	Wärme Sonne -> PV/T	Wärme Umgebung+ Sonne -> PV/T	elektrische Energie PV/T -> Stromnetz	Wärme PV/T -> Ventilator	Wärme PV/T -> Speicher	elektrische Energie Speicher	Warmwasser Verbrauch	thermische Verluste durch Speicherwand
Jan	-445	2886	2441	292	140	186	2'740	2'789	101
Feb	-327	3396	3069	333	406	319	2'345	2'518	98
März	-223	5082	4860	483	915	649	3'075	3'572	119
April	-216	5226	5010	495	958	727	3'489	4'126	117
Mai	-19	6504	6485	594	1484	1114	3'944	4'888	128
Juni	157	7687	7844	680	1983	1421	3'351	4'523	139
Juli	408	8806	9214	747	2493	1852	3'534	5'186	151
Aug	280	8123	8403	696	2191	1566	3'080	4'460	155
Sep	100	6045	6145	537	1504	1057	2'878	3'779	141
Okt	-109	3834	3724	362	681	527	2'873	3'276	130
Nov	-306	2857	2551	280	260	245	3'173	3'312	110
Dez	-379	2590	2210	260	130	175	3'497	3'566	103
Jahr	-1'078	63'035	61'957	5'758	13'144	9'839	37'980	45'996	1'491

Tab. 12: Monatliche Energiebilanz des PV/T-Daches und des Speichers mit PV/T. Werte in kWh.

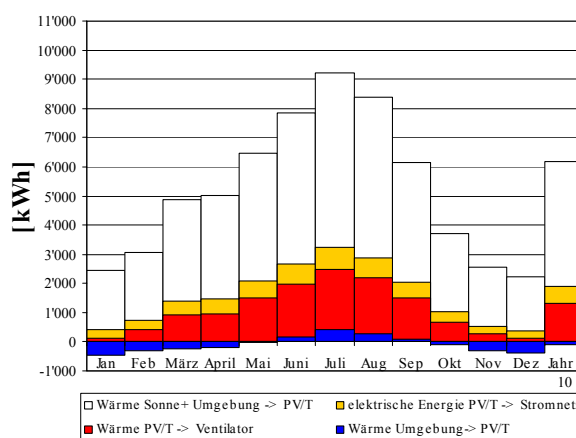


Fig. 20: Monatliche Energiebilanz des PV/T-Daches. Blau und weiss: Energie-Eintrag. Rot und gelb: Energie-Austritt

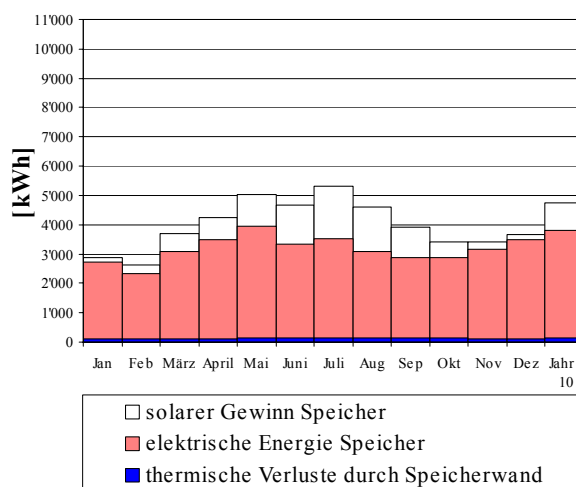


Fig. 21: Monatlicher Energieverbrauch im Speicher mit PV/T.

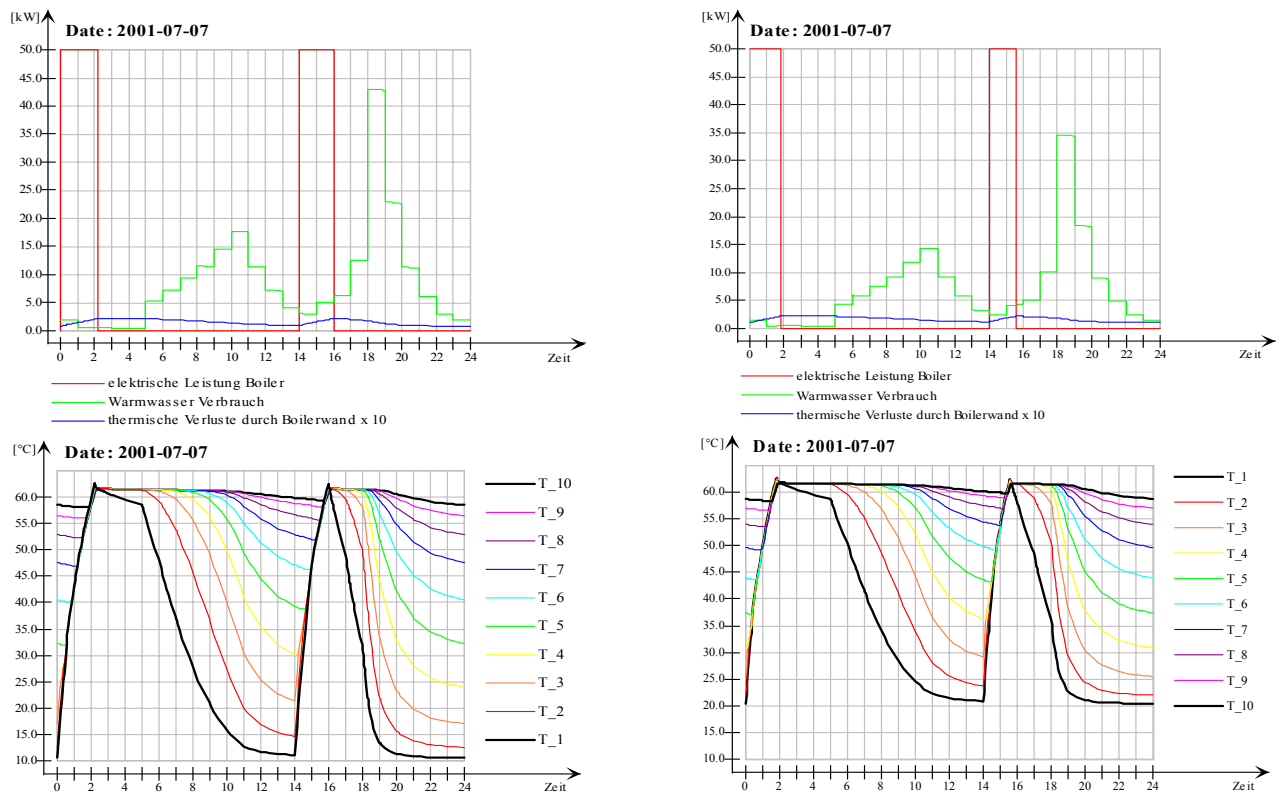


Fig. 22: Tagesverlauf der Wärmeflüsse und der Schichttemperaturen im Speicher für den Monat Juli ohne PV/T. Kaltwassertemperatur links 10°C (wie in Fig. 11), rechts 20°C.



Fig. 23: tägliche Durchschnittsleistung der einzelnen Wärmeflüsse, Tagesverlauf der Schichttemperaturen im Speicher und zugehörige Wetterdaten für eine Juli-Wochen mit PV/T. Kaltwassertemperatur links 10°C (wie in Fig. 16b), rechts 20°C.

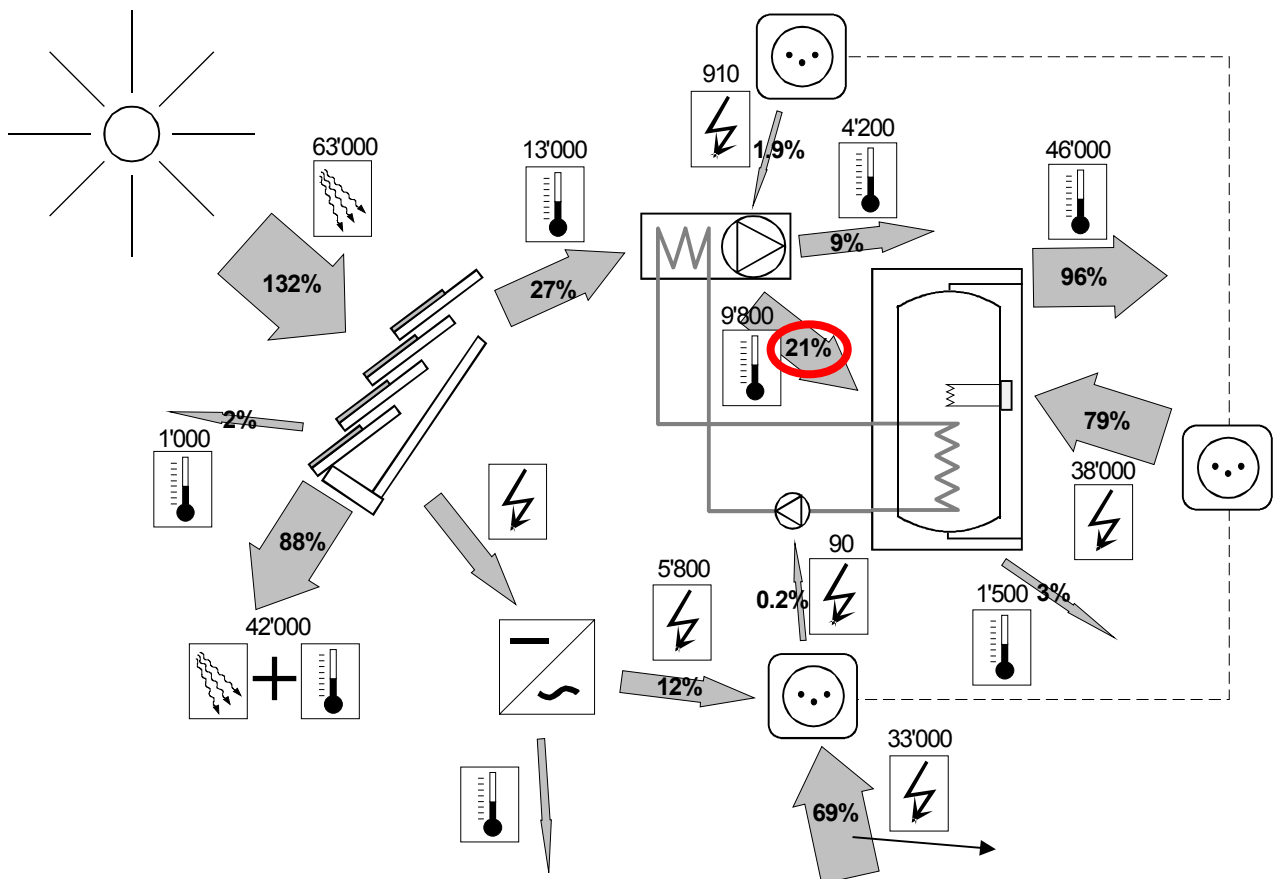


Fig. 24: Jahresenergiebilanz des ganzen Systems mit PV/T. Absolutwerte in kWh. Prozentwerte bezogen auf den gesamte Energieeintrag in den Speicher. Kaltwassertemperatur saisonal zwischen 10°C und 20°C variierend. Eingekreist: Solarer thermischer Deckungsgrad. Unterstrichen: Solarer Gesamtdeckungsgrad.

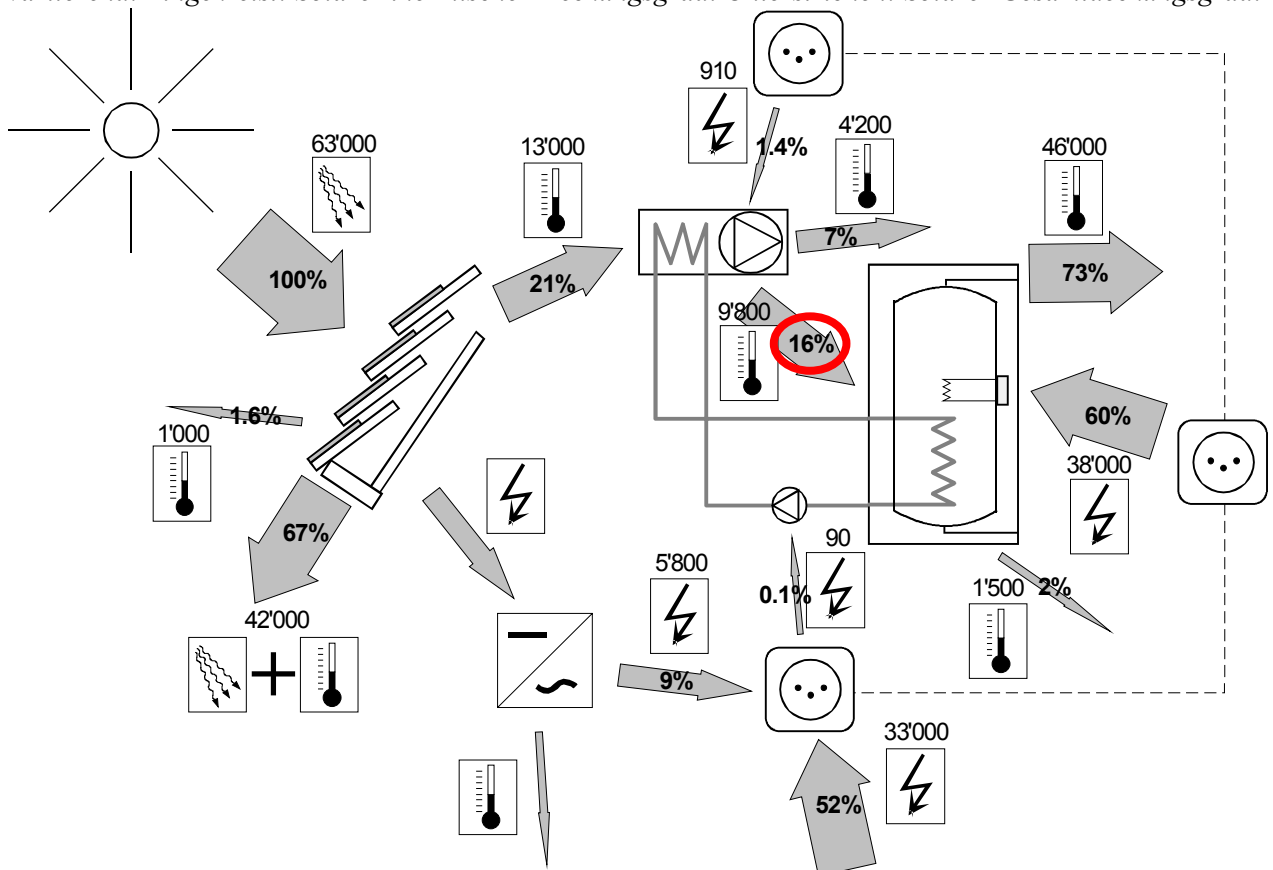


Fig. 25: Wie oben, aber Prozentwerte bezogen auf die solare Einstrahlung auf die PV-Fläche. Eingekreist: Solarer thermischer Nutzungsgrad.

Übersicht und Vergleich der Resultate

Tab. 13 und Tab. 14 zeigen die wichtigsten Resultate aus den Simulationen im Vergleich ohne - mit PV/T bzw. tiefe-variiierende Kaltwassertemperatur.

Nutzenergie	ohne PV/T	mit PV/T
Kaltwasser 10°C	52'000 kWh	52'000 kWh
Kaltwasser 10-20°C	46'000 kWh	46'000 kWh

Nachheizenergie	ohne PV/T	mit PV/T
Kaltwasser 10°C	53'000 kWh	40'000 kWh
Kaltwasser 10-20°C	48'000 kWh	38'000 kWh

Tab. 13: Nutzenergie und Nachheizenergie für den Speicher im Vergleich ohne - mit PV/T und tiefe-variiierende Kaltwassertemperatur.

mit PV/T	thermischer		totaler
	Nutzungsgrad	Deckungsgrad	
Kaltwasser 10°C	22 %	26 %	35%
Kaltwasser 10-20°C	16 %	21 %	31%

Tab. 14: thermischer bzw. totaler (=elektrisch-thermischer) Nutzungs- bzw. Deckungsgrad für den PV/T-Schiefer im Vergleich tiefe-variiierende Kaltwassertemperatur.

Die Resultate stimmen sehr gut mit denjenigen der gemachten Vorüberlegungen (Kapitel 2, Nutzungsvariante a) überein.

Die Resultate bestätigen, dass der Bedarf an Nutzenergie sehr gut mit dem Angebot an PV/T-Wärme übereinstimmen muss, um einen guten thermischen solaren Nutzungs- und Deckungsgrad zu erhalten. Wird im Sommer mit einer höheren Kaltwassertemperatur gerechnet, so sinkt insbesondere die erforderliche Nutzenergie im für den PV/T-Schiefer günstigen tiefen Temperaturbereich.

Die Resultate zeigen aber auch, wie wichtig eine gute Kenntnis der erforderlichen Nutzenergie hinsichtlich Quantität und Temperaturniveau ist, um Nutzungs- und Deckungsgrad richtig voraussagen zu können.

Ähnlich starke Abweichungen im thermischen Nutzungs- und Deckungsgrad sind zu erwarten bei:

- von 60°C abweichender Aufheiztemperatur.
- abweichendem Warmwasserbedarf.

Interessant wäre insbesondere der Standort in einer Region mit tiefer Kaltwassertemperatur im Sommer, relativ hohem Warmwasserbedarf und einem System mit PV/T-Vorwärmung kombiniert mit einer Nacherwärmung mittels Wärmepumpe auf eine tiefe Temperatur (40°C), dafür entsprechend grösserem Speicher. Eine Luft/Wasser-Wärmepumpe könnte wahlweise direkt Aussenluft oder die aus dem Luft/Flüssig-Wärmetauscher austretende PV/T-Luft als Wärmequelle verwenden:

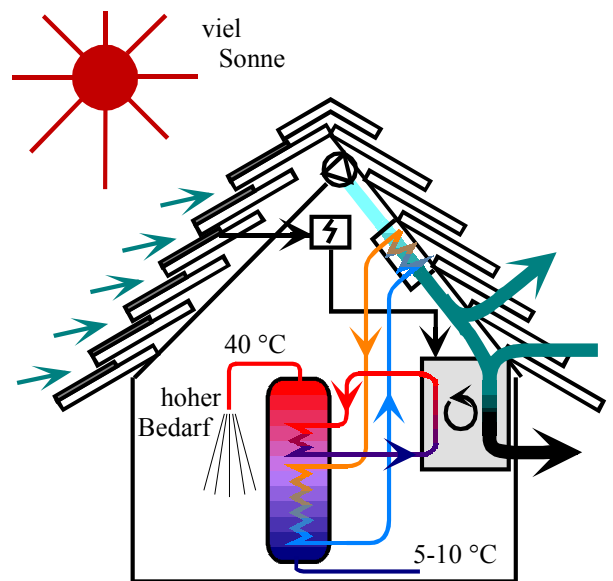
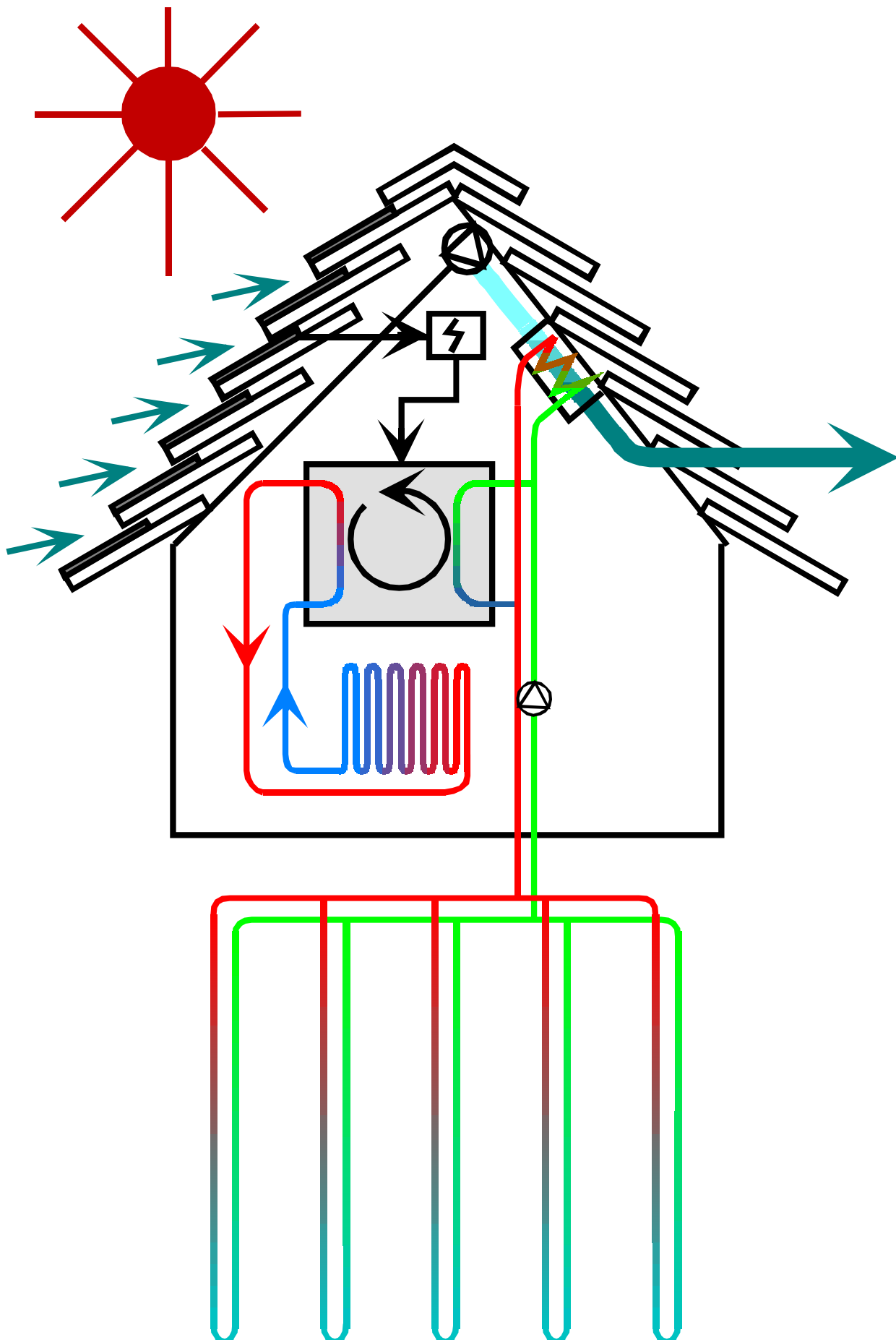


Fig. 26: System mit hohem potenziellen Nutzungs- und Deckungsgrad.

Dabei könnte je nach Gegebenheiten der solare thermische Nutzungsgrad auf die maximal möglichen 30% gesteigert werden, der totale Deckungsgrad sogar auf über 100%.

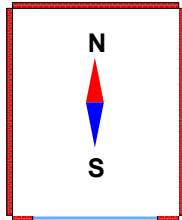
4. Wohnsiedlung in Davos: Erdreich-Saisonspeicher



Referenz-System (ohne PV/T)

Heizlast:

Da es in der Berechnung weniger um eine quantitativ korrekte Aussage des Wärmebedarfs und mehr um einen qualitativen Vergleich des Systems mit und ohne PV/T geht, wird das Gebäude vereinfacht beschrieben. Das Modell soll den Jahresverlauf der Heizlast einer Reihenhauses-Einheit beschreiben.



2 identische vereinfachte Zonen à 80m² mit je vier Aussenwänden, dafür adiabatem Boden und adiabater Decke bilden das Modell für die Berechnung der Heizlast.

Aussenwände:

17cm Polystyrol
12cm Modul-Bachstein
-> u-Wert = 0.2 W/m²K.

Fenster:

Nur im Süden
Fläche = 12m² je Zone
u-Wert = 0.1 W/m²K
Rahmenanteil = 10%
u-Wert Rahmen = 2.0 W/m²K
g-Wert ohne Beschattung = 50%
g-Wert mit Beschattung = 10%.

interne Wärmelast:

konstant 70 W je Zone

Lüftung:

konstanter 0.4-facher Luftwechsel
Wärmerückgewinnungsgrad 80%
WRG-Bypass bei Raumtemperatur > 24°C

Erdregister:

Verlegungstiefe 5m
Rohrlänge 25m
Rohrdurchmesser 20cm
Jahresmitteltemperatur 3.1°C

Wärmepumpe:

Aus der Tabelle der im Wärmepumpenzentrum Töss (www.wpz.ch) getesteten Sole/Wasser-Wärmepumpen wurde eine mit möglichst kleiner Leistung ausgewählt. Ihre Kennlinien sind Fig. 27 zu entnehmen.

Die Wärmepumpe wird nach Rücklauftemperatur der Bodenheizung gesteuert. Die Schalttemperatur ist dabei gemäss Kurve in Fig. 28 abhängig von der Aussentemperatur.

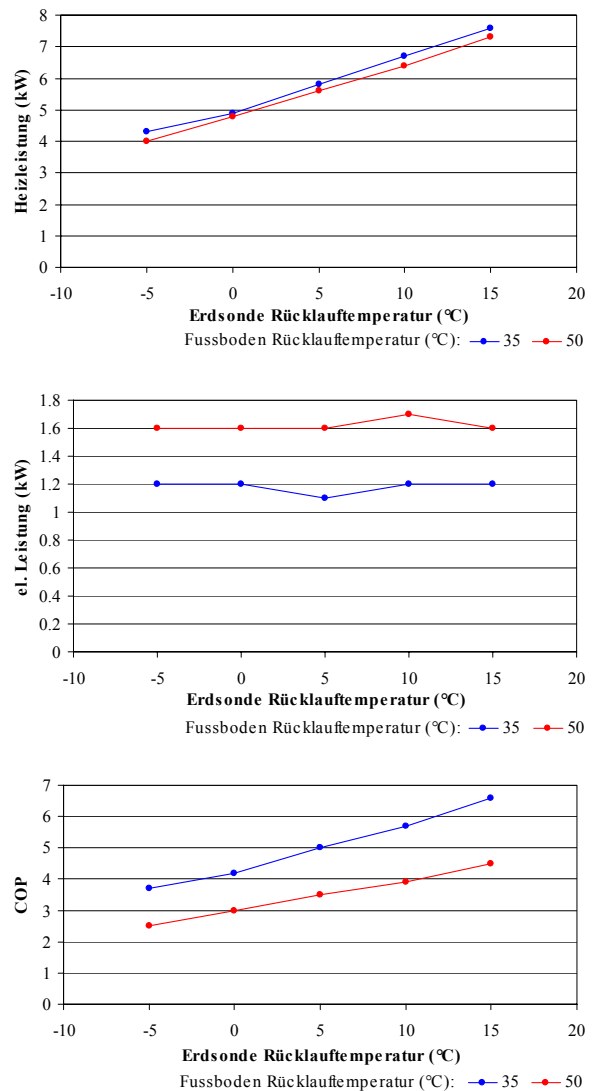


Fig. 27: Kennlinien der verwendeten Wärmepumpe gemäss Wärmepumpenzentrum Töss

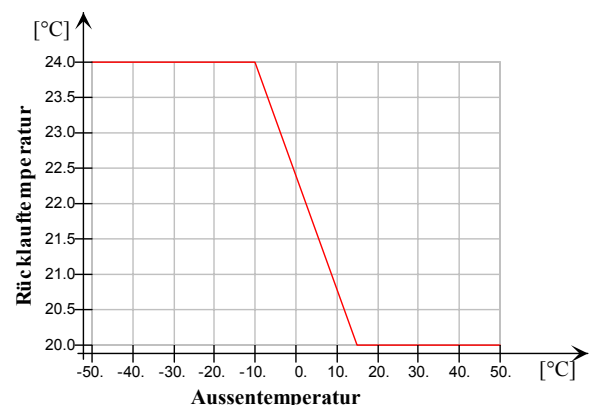


Fig. 28: Rücklauftemperatur der Bodenheizung, bei der die Wärmepumpe ein- resp. ausschaltet

Erdsonde:

1 Bohrloch mit doppel-U-Rohr

Flüssigkeit:

kinetische Viskosität $3.49 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtlzahl 27

Wärmeleitfähigkeit $0.51 \text{ W}/(\text{m K})$ Wärmekapazität $3.89 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ Dichte $1'040 \text{ kg}/\text{m}^3$

Rohr-Durchmesser 3.2 cm

Bohrloch/Hinterfüllung:

Tiefe 100 m

Durchmesser 11.5 cm

Wärmeleitfähigkeit $0.8 \text{ W}/(\text{m K})$ Wärmekapazität $2.00 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ Dichte $1'000 \text{ kg}/\text{m}^3$

Erdreich (homogen):

Wärmeleitfähigkeit $2.5 \text{ W}/(\text{m K})$ Wärmekapazität $1.00 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ Dichte $2'500 \text{ kg}/\text{m}^3$ Temperatur an der Oberfläche: 4°C Temperaturzunahme: $3^\circ\text{C}/100\text{m}$

Simulation:

Zuerst wurde im IDA ICE Standard Level das Gebäude definiert und das dazugehörige Modell für den IDA ICE Advanced Level gebildet, welches danach mit den zusätzlichen Modellen wie Erdregister, Erdsonde, Wärmepumpe und Bodenheizung ergänzt wurde (siehe Fig. 29 - Fig. 32).

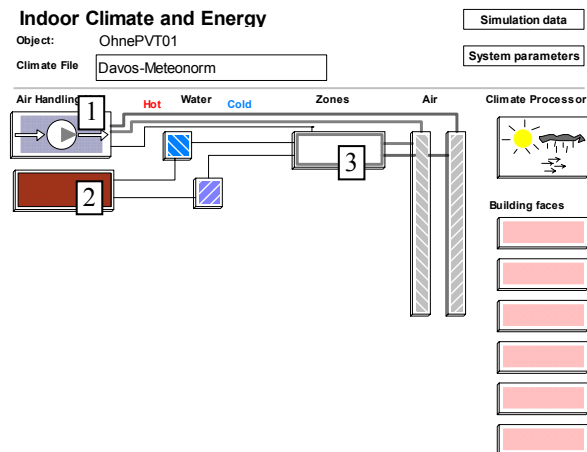


Fig. 29: Schema der Simulation - Überblick

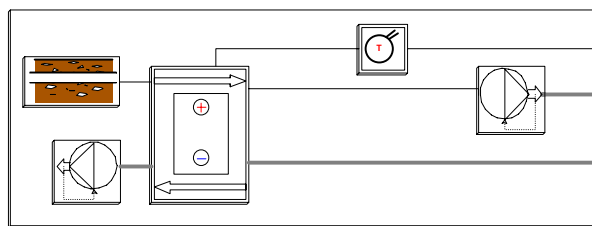


Fig. 30: Makro 1 - Lüftung

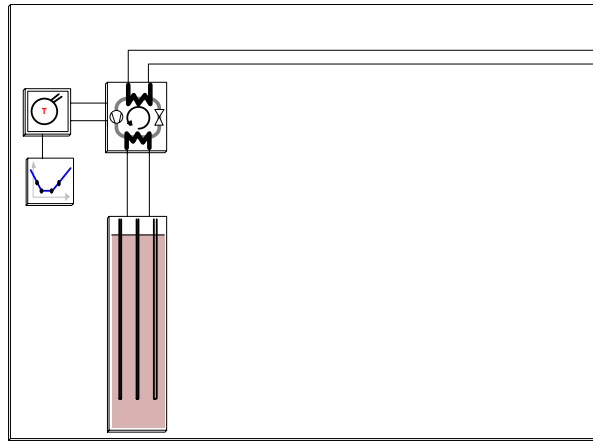


Fig. 31: Makro 2 - Erdsonde und Wärmepumpe

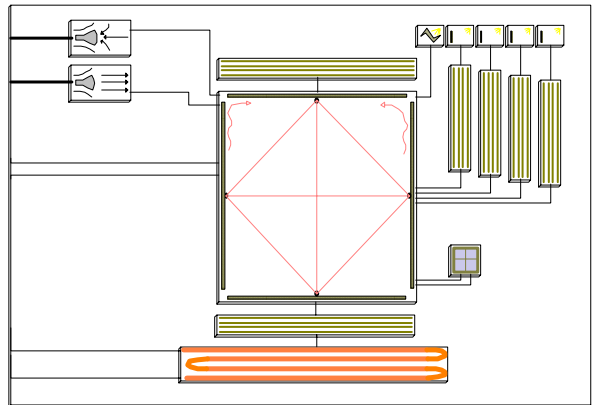
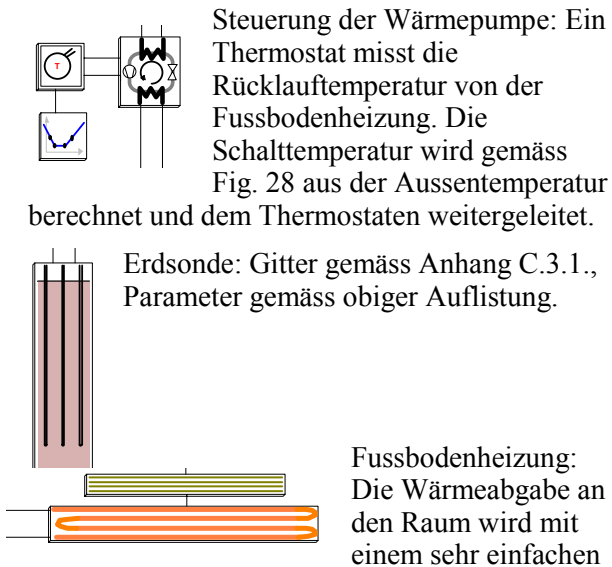


Fig. 32: Makro 3 - Zone

Vervielfachung der berechneten Zone: Der Massenstrom des Heizkreislaufes wird im Vorlauf halbiert und im Rücklauf wieder verdoppelt. Die Wärmepumpe erhält so die doppelte Wärmelast einer Zone.

Erdregister: Zur Vorerwärmung der Aussenluft der WRG vorgeschaltet senkt es den Wärmebedarf des Gebäudes und damit auch den potenziellen Nutzungsgrad der PV-Hinterlüftungswärme.

Steuerung der WRG: Ein Thermostat misst die Raumlufttemperatur. Beträgt diese mehr als 25°C , so wird die WRG ausgeschaltet. Fällt die Temperatur auf unter 23°C , so wird sie wieder dazugeschaltet.



Steuerung der Wärmepumpe: Ein Thermostat misst die Rücklauftemperatur von der Fussbodenheizung. Die Schalttemperatur wird gemäss Fig. 28 aus der Aussentemperatur

berechnet und dem Thermostaten weitergeleitet.

Erdsonde: Gitter gemäss Anhang C.3.1., Parameter gemäss obiger Auflistung.

Fussbodenheizung: Die Wärmeabgabe an den Raum wird mit einem sehr einfachen

Modell simuliert. Dieses berechnet aus dem Massenfluss (MLiq), der Vorlauftemperatur (TIn) und der inneren Wandtemperatur (TSurf) die Rücklauftemperatur (TOut) und den Wärmefluss in die Wand (Q):

$$Q = MLiq \cdot cpLiq \cdot (T_{in} - T_{out})$$

$$Q = h \cdot A \cdot (T_{mean} - T_{surf})$$

wobei:

- cpLiq: Wärmekapazität der Flüssigkeit
- h: Auf 100 W/(m² K) geschätzter Wärmeübergangskoeffizient
- TMean: Mittelwert von TIn und TOut

System mit PV/T

Heizlast, Aussenwände, Fenster, interne Wärmelast, Lüftung, Erdregister und Wärmepumpe wie Referenz-System.

Erdsonde:

Das Erdreich als saisonaler Wärmespeicher zu nutzen macht mit einer Erdsonde allein keinen Sinn, da die Wärme zur Seite hin zu schnell entweichen würde:

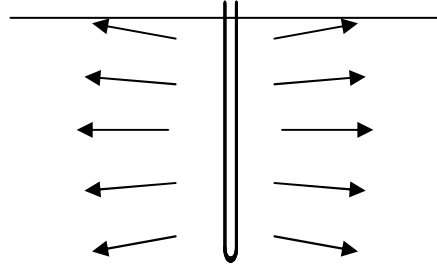


Fig. 33: Wärmeverlust einer Einzelsonde

Wird ein grosser Wärmespeicher bestehend aus einem Erdsondenfeld realisiert, so wird dieser Wärmeverlust verringert und im Idealfall ("unendlich grosses Erdsondenfeld") kann die Wärme nur noch in einer engen Säule zur Oberfläche hin entweichen, was natürlich viel weniger schnell geschieht:

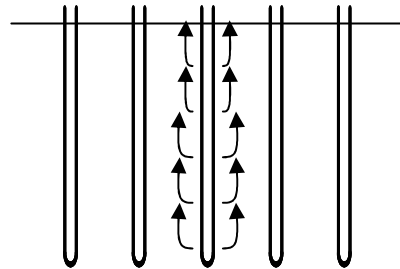


Fig. 34: Wärmeverlust einer Sonde im Sondenfeld

Die PV-Hinterlüftungswärme soll deshalb durch eine Sonde im Erdsondenfeld dem Erdreich zugeführt werden. Durch dieselbe Sonde geschieht während der Heizperiode die Entladung des Erdwärmespeichers für die Wärmepumpe.

Der Sondenabstand soll 7 m betragen. Dies ergibt pro Sonde eine Querschnittfläche des Erdspeichers von knapp 50 m² und ein Speichervolumen von 5'000 m³.

Die Wärmekapazität des Speichers beträgt also pro Sonde:

$$\begin{aligned} & 5'000 \text{ m}^3 \times 1'000 \text{ J/(kg K)} \times 2'500 \text{ kg/m}^3 \\ & = 7.5 \cdot 10^9 \text{ J/K} \\ & = 2'000 \text{ kWh/K} \end{aligned}$$

Simulation:

Um den Aufwand für die Steuerung der Sonde zu verringern, werden zwei Sonden sehr Nahe beieinander berechnet. Durch die eine geschieht die Ladung des Erdreichspeichers mit PV-Hinterlüftungswärme und durch die andere die Entladung mit der Wärmepumpe.

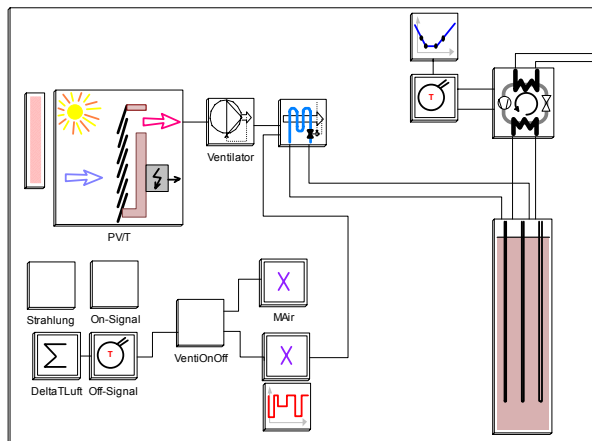
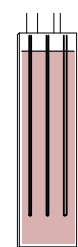


Fig. 35: Makro 2 - PV/T, Wärmetauscher, Erdsonde und Wärmepumpe

Steuerung des Ladezykluses der Erdsonde: Der Fahrplan schaltet den Ladezyklus im Winter (November - März) aus. Während der restlichen Zeit läuft der Ladezyklus immer dann, wenn die PV-Hinterlüftung eingeschaltet ist.



Erdsonde: RMax wird von 100m auf 4m reduziert. Der Gitterfaktor beträgt neu 2 (vorher 3). Die Anzahl Rechenringe (nRing) bleibt bei 10. Die Anzahl Bohrlöcher erhöht sich von 1 auf 2. Der Abstand der Bohrlöcher beträgt 10 cm. Ein- und Austritt von Bohrloch 1 werden mit der Kühlseite der Wärmepumpe verbunden, Ein- und Austritt von Bohrloch 2 mit dem Luft/Flüssig-Wärmetauscher der PV-Hinterlüftung.

Resultate

Im Folgenden sind die wichtigsten Resultate der Simulationen dargestellt.

Fig. 36 - Fig. 38 zeigen den berechneten Verlauf der wichtigsten Temperaturen im Detail für die letzte Woche im Jahr (jeweils obere Grafik) und als Tagesmittelwerte für das ganze Jahr (jeweils untere Grafik) für das System ohne PV/T. Fig. 41, Fig. 44 und Fig. 47 zeigen den Verlauf der Sondentemperaturen für das erste, das fünfte und das zwanzigste Betriebsjahr mit PV/T.

Durch zeitliche Integration der verschiedenen Leistungen erhält man die entsprechenden monatlichen und jährlichen Energien (siehe Tab. 15 und Fig. 39 sowie Tab. 16 - Tab. 18 und Fig. 42, 43, 45, 46, 48 und 49). Daraus ergibt sich die Jahresenergiebilanz des Systems ohne PV/T (Fig. 40) und mit PV/T (Fig. 50 und Fig. 51).

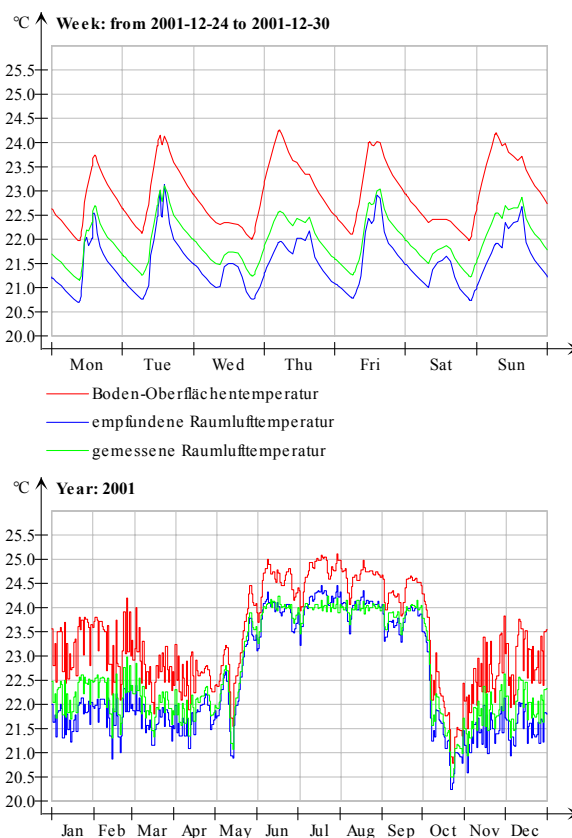


Fig. 36: Temperaturen im Raum ohne PV/T

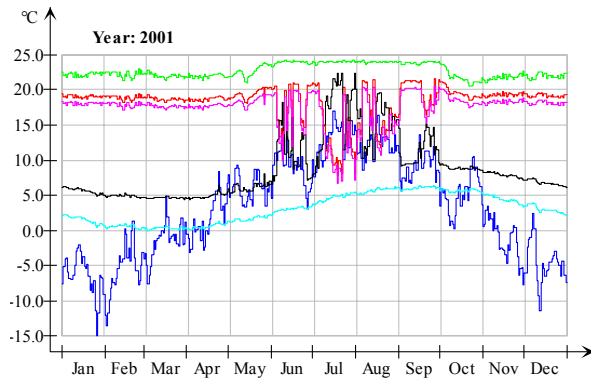
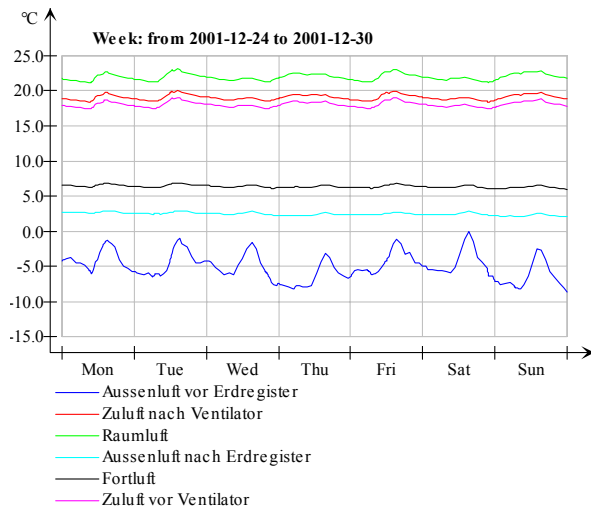


Fig. 37: Temperaturen Lüftung ohne PV/T

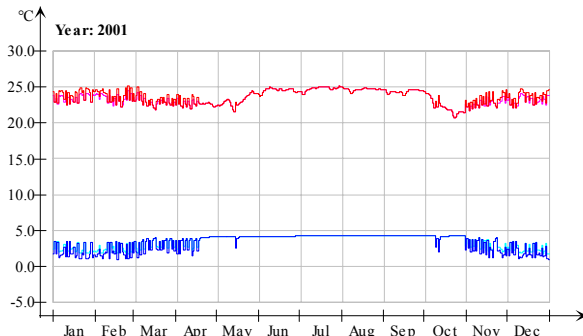
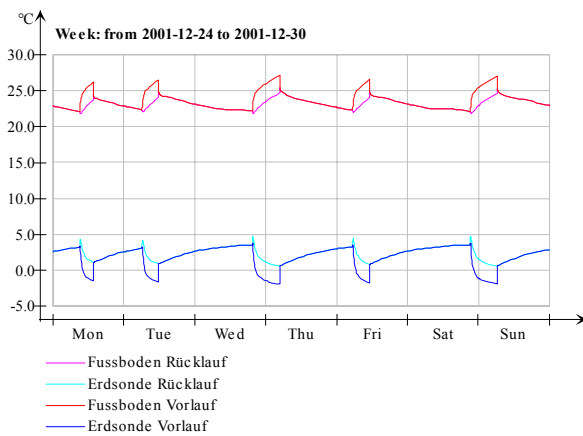


Fig. 38: Temperaturen Wärmepumpe ohne PV/T

	elektrische Energie Wärmepumpe genutzte Wärme aus dem Erdreich Wärmebedarf der Fussbodenheizung		
Jan	124	631	755
Feb	96	489	586
März	55	292	347
April	29	155	184
Mai	3	18	21
Juni	0	0	0
Juli	0	0	0
Aug	0	0	0
Sep	0	0	0
Okt	12	68	80
Nov	80	428	508
Dez	116	596	712
Jahr	514	2'678	3'192

Tab. 15: Monatlicher Energieverbrauch der Wärmepumpe ohne PV/T. Werte in kWh.

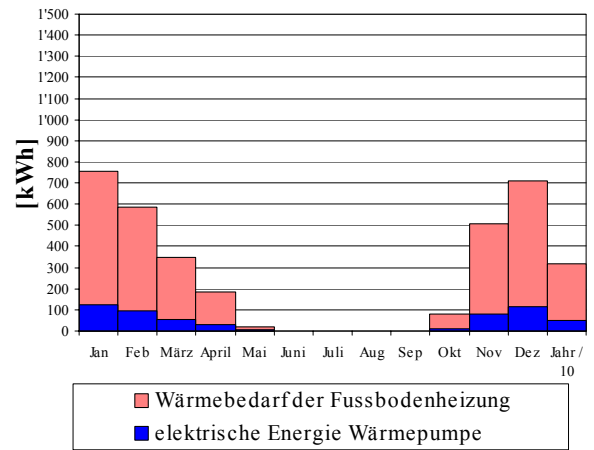


Fig. 39: Monatlicher Energieverbrauch der Wärmepumpe ohne PV/T.

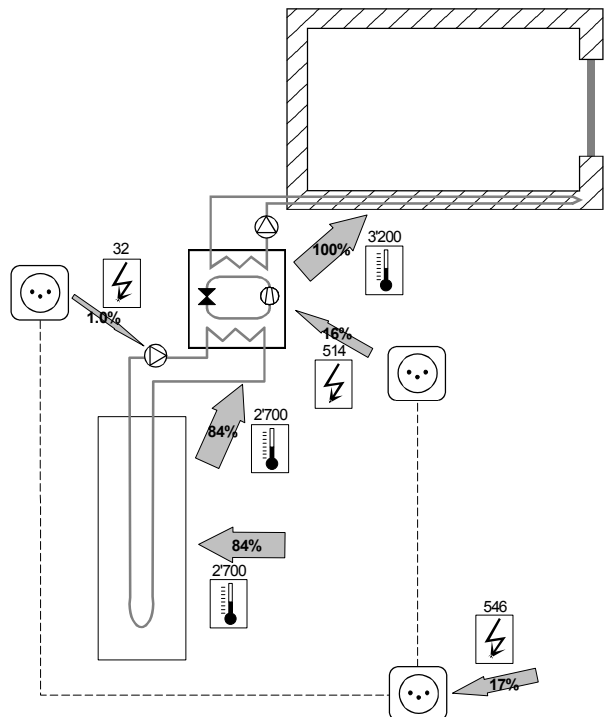


Fig. 40: Jahresenergiebilanz der Wärmepumpe ohne PV/T. Absolutwerte in kWh. Prozentwerte bezogen auf die von der Wärmepumpe dem Raum zugeführte Wärme.

	Wärme Sonne -> PV/T	elektrische Energie PV/T -> Stromnetz	Wärme PV/T -> Wärmetauscher	Wärme Wärmetauscher -> Erdsonde	elektrische Energie Wärmepumpe	Wärmebedarf der Fussbodenheizung	Wärmem Erdsonde -> Wärmepumpe
Jan	4'174	428	798	0	123	748	630
Feb	5'311	519	1'065	0	98	590	496
März	7'770	741	1'609	0	53	329	279
April	8'008	751	1'645	1'153	28	188	161
Mai	8'509	782	1'721	1'500	4	27	23
Juni	8'270	751	1'666	1'658	0	0	0
Juli	8'807	785	1'733	2'045	0	0	0
Aug	7'903	711	1'549	1'780	0	0	0
Sep	6'629	610	1'286	1'278	0	0	0
Okt	5'643	532	1'065	845	10	74	65
Nov	3'785	380	682	0	69	485	419
Dez	3'419	353	608	0	104	698	600
Jahr	78'227	7'344	15'427	10'259	488	3'137	2'672

Tab. 16: Monatliche Energiebilanz des Systems für das erste Betriebsjahr mit PV/T. Werte in kWh.

Jan	4'174	428	798	0	100	754	659
Feb	5'311	519	1'064	0	78	587	513
März	7'769	741	1'609	0	43	328	288
April	8'008	751	1'645	858	24	187	165
Mai	8'508	782	1'721	1'204	3	29	25
Juni	8'271	752	1'666	1'369	0	0	0
Juli	8'810	786	1'733	1'759	0	0	0
Aug	7'901	711	1'548	1'512	0	0	0
Sep	6'630	610	1'285	1'048	0	0	0
Okt	5'643	532	1'065	648	10	79	70
Nov	3'774	378	680	0	60	487	430
Dez	3'419	353	608	0	90	704	620
Jahr	78'217	7'343	15'424	8'398	408	3'153	2'769

Tab. 17: Monatliche Energiebilanz des Systems für das fünfte Betriebsjahr mit PV/T. Werte in kWh.

Jan	4'174	428	796	0	96	757	668
Feb	5'399	527	1'086	0	72	571	503
März	7'784	742	1'612	0	44	352	311
April	8'087	756	1'660	530	20	163	144
Mai	8'253	762	1'663	793	4	31	28
Juni	8'532	773	1'722	1'064	0	0	0
Juli	8'735	780	1'721	1'405	0	0	0
Aug	7'943	714	1'559	1'178	0	0	0
Sep	6'448	596	1'245	717	0	0	0
Okt	5'604	529	1'057	395	9	76	67
Nov	3'814	383	691	0	63	509	451
Dez	3'375	349	597	0	87	700	618
Jahr	78'146	7'337	15'410	6'082	396	3'158	2'790

Tab. 18: Monatliche Energiebilanz des Systems für das zwanzigste Betriebsjahr mit PV/T. Werte in kWh.

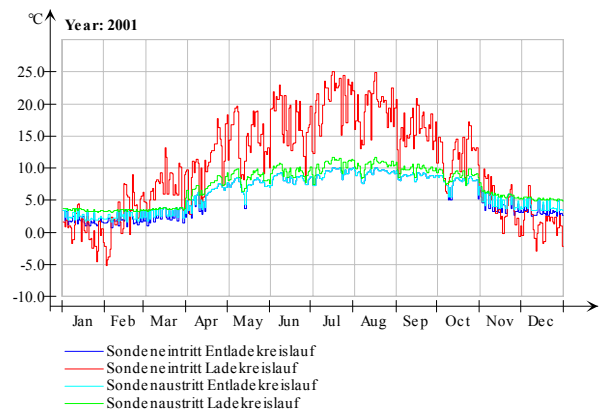


Fig. 41: Sondentemperaturen für das erste Betriebsjahr mit PV/T.

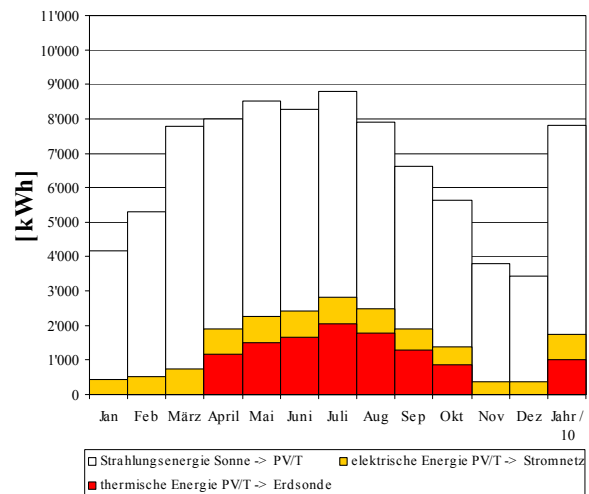


Fig. 42: Monatliche Energiebilanz des PV/T-Daches für das erste Betriebsjahr.

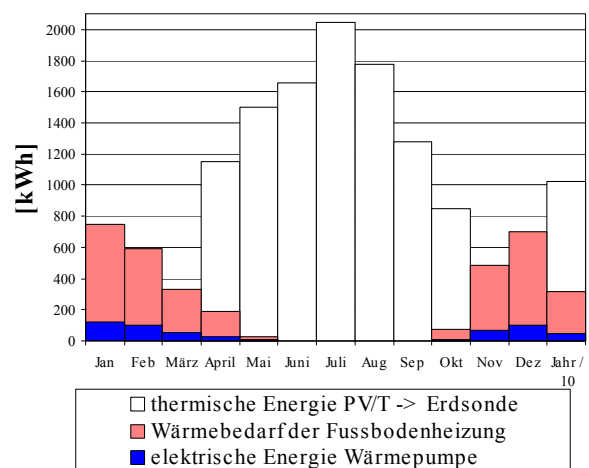


Fig. 43: Monatliche Energiebilanz des Erdsonde-Wärmepumpen-Systems für das erste Betriebsjahr mit PV/T.

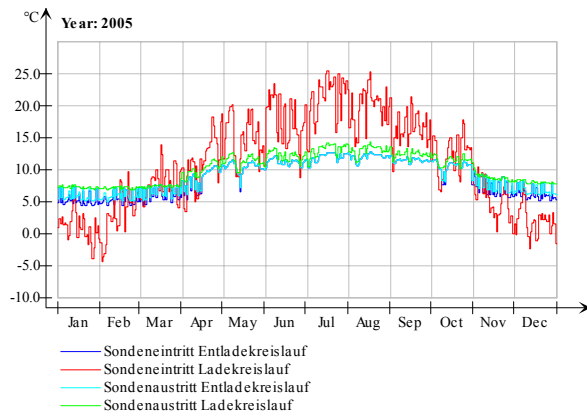


Fig. 44: Sondentemperaturen für das fünfte Betriebsjahr mit PV/T.

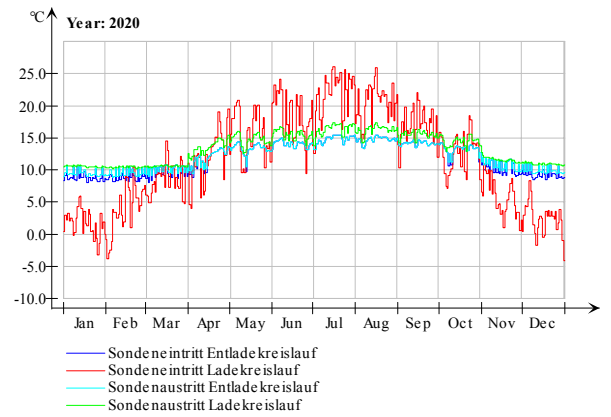


Fig. 47: Sondentemperaturen für das zwanzigste Betriebsjahr.

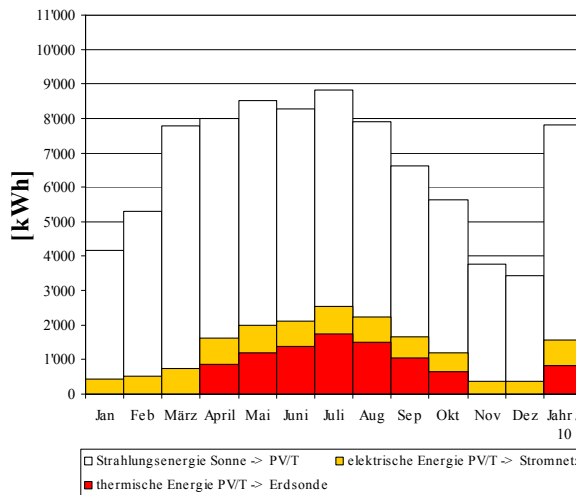


Fig. 45: Monatliche Energiebilanz des PV/T-Daches für das fünfte Betriebsjahr.

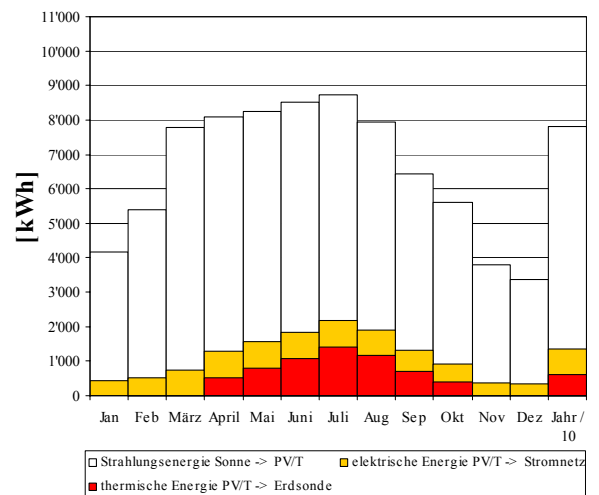


Fig. 48: Monatliche Energiebilanz des PV/T-Daches für das zwanzigste Betriebsjahr.

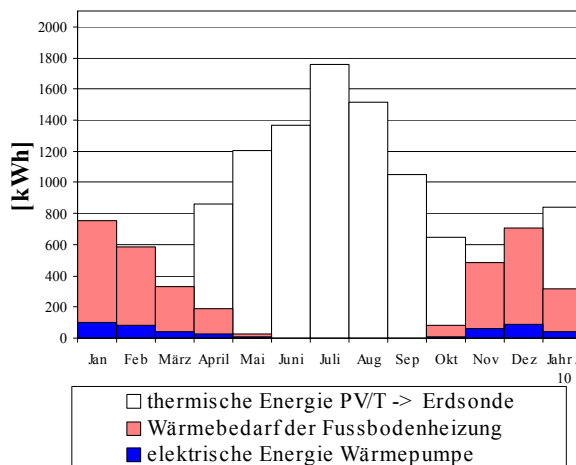


Fig. 46: Monatliche Energiebilanz des Erdsonde-Wärmepumpen-Systems für das fünfte Betriebsjahr mit PV/T.

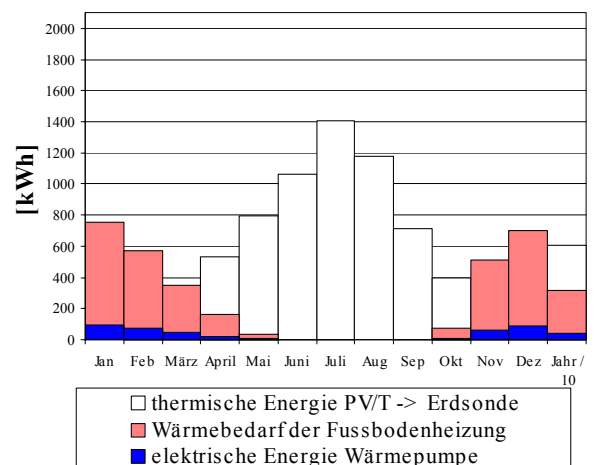


Fig. 49: Monatliche Energiebilanz des Erdsonde-Wärmepumpen-Systems für das zwanzigste Betriebsjahr mit PV/T.

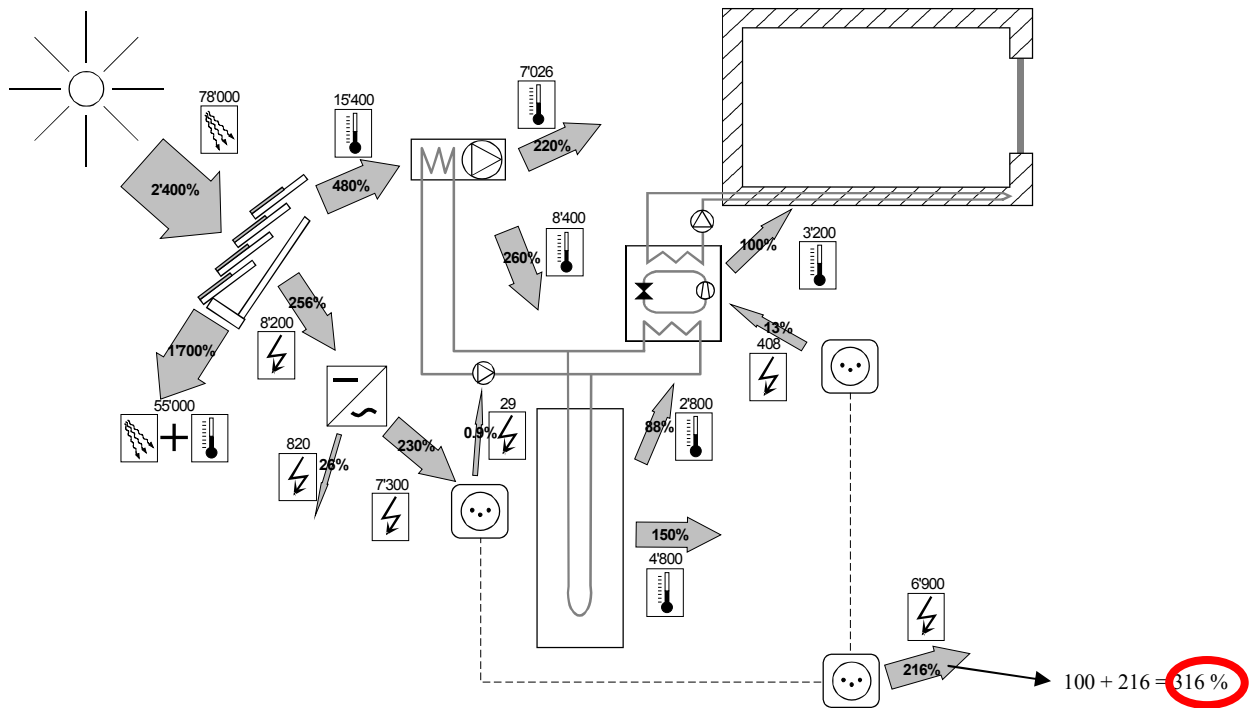


Fig. 50: Jahresenergiebilanz für das fünfte Betriebsjahr mit PV/T. Absolutwerte in kWh. Prozentwerte bezogen auf die von der Wärmepumpe dem Raum zugeführte Wärme.
Eingekreist: Solarer Deckungsgrad des Heizsystems.

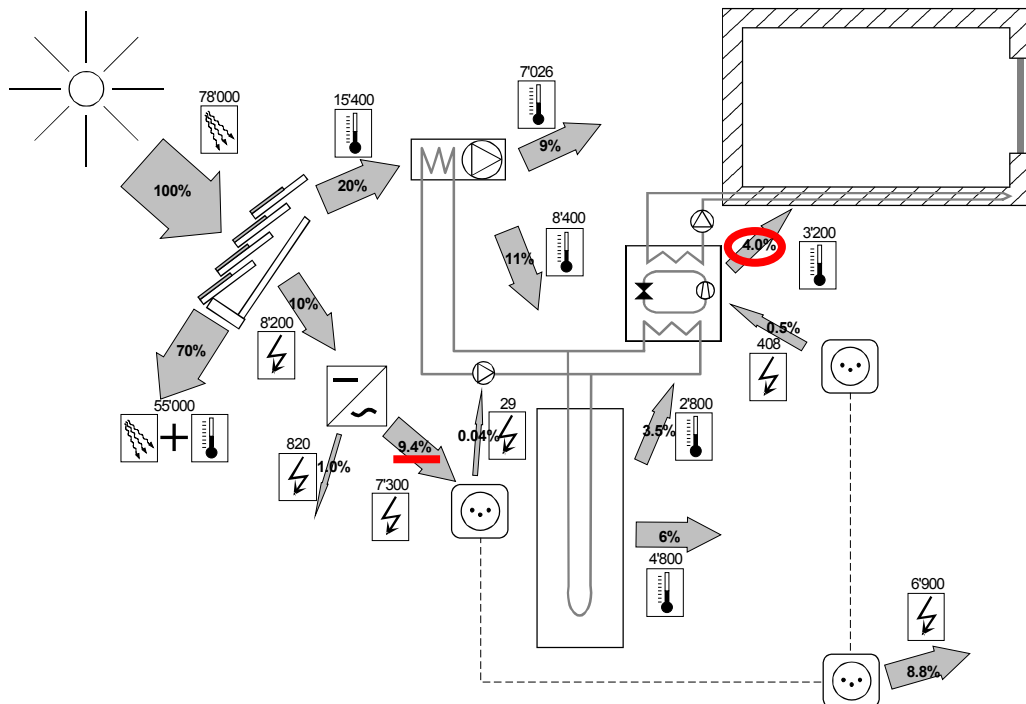


Fig. 51: Jahresenergiebilanz für das fünfte Betriebsjahr mit PV/T. Absolutwerte in kWh. Prozentwerte bezogen auf die solare Einstrahlung auf die PV-Fläche..
Eingekreist: Solarer thermischer Nutzungsgrad.
Unterstrichen: Solarer elektrischer Nutzungsgrad.

Fig. 52 und Tab. 19 zeigen das langsame Laden der Erdreichspeichers. Erst mit steigender Erdreichtemperatur steigt der thermische Verlust auf einen Wert an, bei dem er zusammen mit der Entladeenergie im Winter die Ladeenergie im Sommer ausgleicht. Nach ungefähr 20 Jahren ist die Endsituation erreicht.

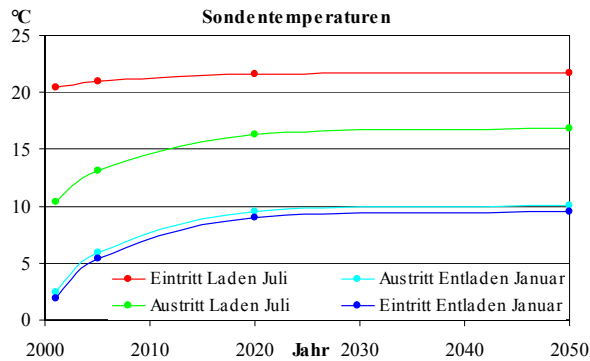


Fig. 52: Verlauf der Erdsondentemperaturen während 50 Betriebsjahren mit PV/T.

	Eintritt Laden Juli	Austritt Laden Juli	Eintritt Entladen Januar	Austritt Entladen Januar
2001	20.4 °C	10.4 °C	1.9 °C	2.4 °C
2005	20.9 °C	13.1 °C	5.4 °C	5.9 °C
2020	21.6 °C	16.3 °C	9.0 °C	9.5 °C
2050	21.7 °C	16.8 °C	9.5 °C	10.1 °C

Tab. 19: Verlauf der Erdsondentemperaturen während 50 Betriebsjahren mit PV/T.

Übersicht und Vergleich der Resultate

Tab. 20 und Tab. 21 zeigen die wichtigsten Resultate aus den Simulationen im Vergleich mit und ohne PV/T.

ohne PV/T	514 kWh
1. Jahr mit PV/T	488 kWh
5. Jahr mit PV/T	408 kWh
20. Jahr mit PV/T	396 kWh

Tab. 20: elektrische Energie Wärmepumpe

	thermischer	elektrischer	elektrischer
	solarer Nutzungsgrad		Deckungsgrad
ohne PV	-	-	83 %
ungekühlte PV	-	8.5 %	289 %
5. Jahr mit PV/T	4.0 %	9.4 %	316 %

Tab. 21: Nutzungs- und Deckungsgrad des Systems im Vergleich mit und ohne PV/T.

Im Vergleich zu den in den Vorüberlegungen gefundenen Resultaten (Kapitel 2, Nutzungsvariante e) ist bei diesen Resultaten der Nutzungsgrad höher und der Deckungsgrad tiefer. Grund dafür sind die verschiedenen Annahmen: Der Standort Davos führt wegen den tieferen Umgebungstemperaturen zu einem höheren thermischen Nutzungsgrad. Der tiefere Wärmebedarf führt zu einem tieferen thermischen Nutzungsgrad und zu einem höheren Deckungsgrad.

Die Resultate zeigen, dass der Hauptgewinn des PV/T-Daches der Solarstrom bleibt. Für den Fall einer PV-Anlage auf dem Dach eines mit Erdwärmetauscher beheizten Wohnhauses lohnt sich die Hinterlüftung auf Grund des minimalen Mehraufwandes aber trotzdem.

Für den Eigenbedarf und auch für die Unterstützung der Wärmepumpe ist die PV/T-Anlage überdimensioniert. Wäre sie ein Drittel so gross, so würde der totale Deckungsgrad auf 160 % sinken und der Überschussstrom (ca. 2'000 kWh pro Jahr) für einen Haushalt mit sparsamen elektrischen Geräten immer noch genügen.

Wie viel die Erdsondentemperaturen gegenüber der grossen PV/T-Anlage sinken würden und wie sich dabei die Ladezeit des Erdreichspeichers ändern würde, wäre nachzurechnen.

Auch der Einfluss auf die Resultate im Fall eines Wohnhauses mit grösserem Heizwärmebedarf ist ohne Simulation nicht mit genügender Sicherheit abzuschätzen.

Dasselbe gilt für die Variation des Standortes.

Ausserdem wäre die Frage interessant, mit welchen zusätzlichen Massnahmen die Erdreichtemperatur genügend stark erhöht werden könnte, so dass nach einer gewissen Zeit die Wärmepumpe ganz überflüssig wird.

All diese ohne Simulation offen bleibenden Fragen unterstreichen den Nutzen der Gebäudesimulation für die Planung von Gebäudesystemen mit neu entwickelten und noch selten angewendeten Komponenten.

5. Diskussion der Resultate

Tab. 22 gibt eine Übersicht über die gefundenen Resultate für die einzelnen Systeme zur Nutzung der PV-Abwärme.

System	a1)	a2)	a3)	d)	e1)	e2)	f)
Nutzungsgrad	24%			32%			12%
elektrisch	9%	9%	9%		10%	9%	10%
thermisch	16%	22%	16%			4%	2%
Deckungsgrad	35%	35%	31%	108%			300%
elektrisch					200%	316%	460%
thermisch		26%	21%				100%

Tab. 22: Für die untersuchten Systeme mittels Simulation gefundener Nutzungs- und Deckungsgrad.

a) Wasservorwärmung

- 1) Vorüberlegung; Kaltwassertemp. 10-20°C
- 2) Simulation; Kaltwassertemperatur 10°C
- 3) Simulation; Kaltwassertemp. 10-20°C

d) Aussenluft-Wärmepumpe

e) Erdsonden-Wärmepumpe

- 1) Vorüberlegung
- 2) Simulation

f) Latentspeicher

Natürlich ist ein Vergleich der einzelnen Nutzungsarten direkt gar nicht möglich, denn auf Grund der Verschiedenartigkeit der Systeme können die Definitionen der zur Bestimmung von Nutzungs- und Deckungsgrad notwendigen Grössen nicht gleich sein. Jedes System hat vielmehr wieder ihre Besonderheiten:

a) Die benötigte Nutzenergie ist zwar thermisch, die dafür aufgewendete Endenergie ist aber elektrisch. Auch mit thermischen Kollektoren könnte also elektrische Energie eingespart und so gesehen für andere Anwendungen gewonnen werden. Ganz anders sähe ein gleiches System mit Wärmepumpenboiler aus.

d) Bereits beim Referenzsystem stammt die thermische Energie aus erneuerbarer Quelle. Deshalb kann nur elektrische Energie eingespart werden. Weil die Wärmepumpe nur während 7 Monaten im Jahr läuft, wurde für die Berechnung des Nutzungsgrades nur diese Periode betrachtet. Bezieht man die im Sommer nutzlos vorhandene Wärme in die Rechnung mit ein, so sinkt der Nutzungsgrad drastisch.

e)/f) Der thermische Nutzungsgrad ist deshalb so tief, weil die Wärme erst ab einem gewissen Temperaturniveau genutzt werden kann. Um den Wärmebedarf genügend decken zu können, ist eine entsprechend grosse PV-Fläche nötig. Dies führt zwar zu einem ansprechenden thermischen Deckungsgrad, gleichzeitig aber zum tiefen thermischen Nutzungsgrad und zu einem elektrischen Deckungsgrad von weit über 100%.

Ob sich eine Nutzung der PV-Abwärme lohnt, kann nicht generell gesagt werden. Dieser Entscheid muss für jeden konkreten Fall einzeln unter Berücksichtigung aller möglichen Alternativen gefällt werden.

6. Literaturverzeichnis

Sämtliche Hefte [1] - [5] erhältlich beim Autor

[1] Sven Kropf: "Multifunktionale Gebäudehülle: Wetterschutz, PV und Luftkollektor"; Zürich 1999.

[2] Sven Kropf: "PV/T-Schiefer - Labormessungen"; Horw 2002.

[3] Sven Kropf: "PV/T-Schiefer - Obstweg 12, Steinhausen"; Horw 2002.

[4] Sven Kropf: "PV/T-Schiefer - dynamisches Simulationsmodell"; Zürich 2003.

[5] Sven Kropf: "PV/T-Schiefer - Ertragsatlas"; Zürich 2003.

[45] Vereinigung Schweizerischer Sanitär- und Heizungsfachleute; *Si-Handbuch* Nr. 5; 1998.

[46] Markus Koschenz, Beat Lehmann; *Thermische Simulationsberechnungen Newspirit Weissfluhjoch / Davos*; Interner Schlussbericht Nr. 203'095, EMPA, 2003.

[47] H. R. Gabathuler, H. Mayer, T. Afjei; *Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen*; Schlussbericht im Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung des Bundesamtes für Energie, Dezember 2002.

A. NMF-Modell Schichtspeicher

Das Modell beruht auf dem Prinzip einzelner homogen durchmischter Schichten. Es erlaubt eine beliebig wählbare Anzahl Schichten:

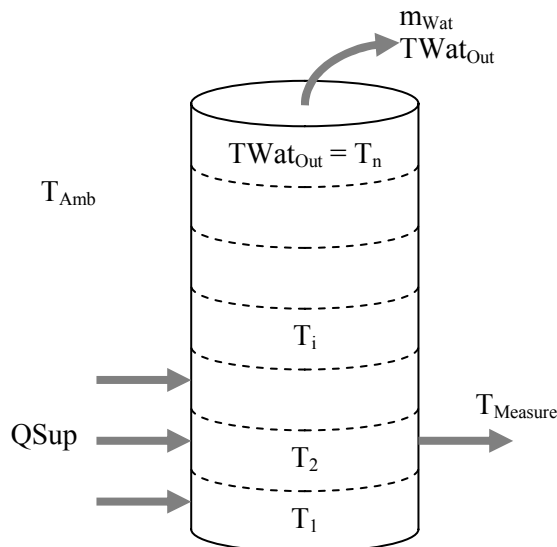


Fig. 53: Speicher mit n Rechenschichten, Kaltwasser-Eintritt in die unterste Schicht, Warmwasser-Austritt aus der obersten Schicht und Heizregister (Q_{Sup}) in beliebig verteilte Schichten (typischerweise unten)

Für jede Schicht gilt die Energiebilanz:

$$\frac{V_{\text{Tank}}}{n} \cdot \rho_{\text{Wat}} \cdot c_{p, \text{Wat}} \cdot \frac{dT_i}{dt} = Q_{\text{Cond}_i} + Q_{\text{Trans}_i} + Q_{\text{Conv}_i} + Q_{\text{Aux}_i} - Q_{\text{Loss}_i}$$

wobei:

- V_{Tank} (m³): totales Speichervolumen
- n (-): Anzahl Rechenschichten
- ρ_{Wat} (kg/m³): Dichte des Speicherwassers
- $c_{p, \text{Wat}}$ (J/(kg K)): Wärmekapazität des Speicherwassers
- T_i (°C): Wassertemperatur in der i-ten Schicht
- Q_{Cond_i} (W): durch Wärmeleitung in die i-te Schicht gelangende Wärme
- Q_{Trans_i} (W): durch Wärmetransport in die i-te Schicht gelangende Wärme
- Q_{Conv_i} (W): durch Konvektion in die i-te Schicht gelangende Wärme
- Q_{Aux_i} (W): durch ein Heizregister in die i-te Schicht gelangende Wärme
- Q_{Loss_i} (W): durch Wärmeleitung von der i-ten Schicht an die Umgebung verlorene Wärme

Die Wärmeflüsse in die i-te Schicht werden wie folgt berechnet:

$$Q_{\text{Cond}_i} = \frac{\lambda_{\text{Wat}} \cdot A_{\text{Tank}}}{H_{\text{Tank}}} \cdot ((T_{i-1} - T_i) + (T_{i+1} - T_i))$$

wobei:

- λ_{Wat} (W/(m K)): Wärmeleitfähigkeit des Speicherwassers
- A_{Tank} (m²): horizontale Querschnittsfläche des Speichers
- H_{Tank} (m): totale Höhe des Speichers
- $T_{i-1} = T_i$ für $i=1$
- $T_{i+1} = T_i$ für $i=n$

$$Q_{\text{Trans}_i} = m_{\text{Wat}} \cdot c_{p, \text{Wat}} \cdot (T_{i-1} - T_i)$$

wobei:

- m_{Wat} (kg/s): Massenfluss des Speicherwasser-Verbrauchs
- $T_{i-1} = T_{\text{Wat}_\text{In}}$ für $i=1$
- T_{Wat_In} (°C): Speicher-Eintrittstemperatur des Kaltwassers

$$Q_{\text{Conv}_i} = \begin{cases} 0 & \text{falls } T_{i-1} < T_i \\ F & \text{sonst} \end{cases} \cdot (T_{i-1} - T_i) + \begin{cases} 0 & \text{falls } T_i < T_{i+1} \\ F & \text{sonst} \end{cases} \cdot (T_{i+1} - T_i)$$

wobei:

- F (W/K): Faktor für die Wärmekonvektion (in der Regel reicht es für die Genauigkeit des Modells aus, wenn F gross genug ist, so dass höhere Temperaturen in tieferen Schichten immer einen sofortigen Wärmeaustausch bewirken)
- $T_{i-1} = T_i$ für $i=1$
- $T_{i+1} = T_i$ für $i=n$

$$Q_{\text{Aux}_i} = \text{Sup}_i \cdot \frac{Q_{\text{Sup}}}{n_{\text{Sup}}}$$

wobei:

- Sup_i (-): Auf 1 oder 0 gesetzter Parameter (je nachdem, ob das Heizregister an die i-ten Schicht Wärme abgibt oder nicht)
- n_{Sup} (-): Anzahl Schichten, an die das Heizregister Wärme abgibt
- Q_{Sup} (W): Leistung des Heizregisters

$$Q_{\text{Loss } i} = A_{\text{Coat } i} \cdot u \cdot (T_i - T_{\text{Amb}})$$

wobei:

- $A_{\text{Coat } i}$ (m^2): Fläche des Speichermantels für die i -te Schicht
- u ($\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$): u -Wert des Speichermantels
- T_{Amb} ($^{\circ}\text{C}$): Temperatur der Speicherumgebung

Die Speicher-Austrittstemperatur entspricht der Temperatur der obersten Schicht:

$$T_{\text{Wat Out}} = T_n$$

Die an das Brauchwasser abgegebene Endenergie beträgt:

$$Q_{\text{Wat}} = m_{\text{Wat}} \cdot c_{p \text{ Wat}} \cdot (T_{\text{Wat Out}} - T_{\text{Wat In}})$$

NMF-Code:

CONTINUOUS_MODEL StratTank

ABSTRACT

"tank model with stratification"

/* Date: 18.10.2002

Made by: Hochschule Technik+Architektur, Luzern (CH)
Meer Fabian
Gattlen Ivan
modified 2003 Sven Kropf */

EQUATIONS

FOR i = 1, n

/* energy balance of one layer */

$V_{\text{Tank}} \cdot \rho_{\text{Wat}} \cdot c_{p \text{ Wat}} / n \cdot T'[i] = Q_{\text{Cond}}[i] + Q_{\text{Trans}}[i] + Q_{\text{Conv}}[i] + Q_{\text{Aux}}[i] - Q_{\text{Loss}}[i];$

/* heat input to one layer due to heat conduction */

$Q_{\text{Cond}}[i] = \text{IF } i==1 \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \lambda_{\text{Wat}} \cdot A_{\text{Tank}} / H_{\text{Tank}} \cdot n \cdot (T[i-1] - T[i]) \text{ END_IF}$
 $+ \text{IF } i==n \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \lambda_{\text{Wat}} \cdot A_{\text{Tank}} / H_{\text{Tank}} \cdot n \cdot (T[i+1] - T[i]) \text{ END_IF};$

/* heat input to one layer due to heat transport */

$Q_{\text{Trans}}[i] = m_{\text{Wat}} \cdot c_{p \text{ Wat}} \cdot (\text{IF } i==1 \text{ THEN } T_{\text{Wat In}} \text{ ELSE } T[i-1] \text{ END_IF} - T[i]);$

/* heat input to one layer due to heat convection */

$Q_{\text{Conv}}[i] = \text{IF } i==1 \text{ THEN } 0 \text{ ELSE IF } T[i-1] < T[i] \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } F \cdot (T[i-1] - T[i]) \text{ END_IF END_IF}$
 $+ \text{IF } i==n \text{ THEN } 0 \text{ ELSE IF } T[i] < T[i+1] \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } F \cdot (T[i+1] - T[i]) \text{ END_IF END_IF};$

/* auxiliary heat to layer */

$Q_{\text{Aux}}[i] = \text{Sup}[i] \cdot Q_{\text{Sup}} / n_{\text{Sup}};$

/* heat loss of one layer to ambient */

$Q_{\text{Loss}}[i] = A_{\text{Coat}}[i] \cdot u \cdot (T[i] - T_{\text{Amb}});$

END_FOR;

$T_{\text{Wat Out}} = T[N];$

$Q_{\text{Wat}} = m_{\text{Wat}} \cdot c_{p \text{ Wat}} \cdot (T_{\text{Wat Out}} - T_{\text{Wat In}});$

$Q_{\text{Loss Tot}} = \text{Sum } i=1, n \text{ } Q_{\text{Loss}}[i] \text{ END_SUM};$

$T_{\text{Measure}} = T[\text{Measure}];$

LINKS

/* type name variables */

Q	HeatSup	POS_IN QSup;
PMT	WatIn	PWat, POS_IN mWat, TWatIn;
PMT	WatOut	PWat, POS_OUT mWat, TWatOut;
T	AmbientLink	Tamb;
T	MeasureLink	TMeasure;

VARIABLES

/*type name role def min max description */

Temp	T[n]	OUT	20	ABS_ZERO	BIG	"water temperature of layer"
Temp	TMeasure	OUT	20	ABS_ZERO	BIG	"measured water temperature"
Temp	TAmb	IN	20	ABS_ZERO	BIG	"tank ambient temperature"
Temp	TWatIn	IN	20	ABS_ZERO	BIG	"water input temperature"
Temp	TWatOut	OUT	20	ABS_ZERO	BIG	"water output temperature"
Pressure	PWat	IN	0	0	BIG	"water pressure"
HeatFlux	QCond[n]	OUT	0	-BIG	BIG	"heat input to one layer due to heat conduction"
HeatFlux	QTrans[n]	OUT	0	-BIG	BIG	"heat input to one layer due to heat transport"
HeatFlux	QConv[n]	OUT	0	-BIG	BIG	"heat input to one layer due to heat convection"
HeatFlux	QSup	IN	0	-BIG	BIG	"total supplied heat to tank"
HeatFlux	QAux[n]	OUT	0	-BIG	BIG	"auxiliary heat supplied to one layer"
HeatFlux	QLoss[n]	OUT	0	-BIG	BIG	"heat loss of one layer to ambient"


```

HeatFlux  QLossTot      OUT  0      -BIG  BIG  "total heat loss of all layers to ambient"
HeatFlux  QWat          OUT  0      -BIG  BIG  "used heat in water out of tank"
MassFlow  mWat          IN   0      -BIG  BIG  "water massflow through tank"

MODEL_PARAMETERS

/*  type      name      role def      min      max  description  */
INT       n          SMP  10          1 BIGINT "number of tank layers"

PARAMETERS

/*  type      name      role def      min      max  description  */
Volume    VTank       C_P    0.284    0      BIG  "tank volume"
Density   RhoWat      S_P    990      0      BIG  "water density"
HeatCapM  cpWat       S_P    4183     0      BIG  "water mass heat capacity"
HeatCondL LambdaWat   S_P    0.6      0      BIG  "water heat conductivity"
Length    DTank       S_P    0.55     0      BIG  "inner diameter of tank"
Area      ATank       C_P    0.283    0      BIG  "cross-section area of tank"
Length    HTank       S_P    1.196    0      BIG  "tank hight"
Area      ACoat[n]    C_P    0.5      0      BIG  "total coat area of tank layer"
HeatConda u          S_P    0.4      0      BIG  "U-value of tank coat"
Factor    nSup        S_P    2        0      BIG  "number of layers with heat supply"
Factor    Sup[n]      S_P    0        0      1    "heat supply in this layer? 1=yes 0=no"
Factor    Measure     S_P    1        1      BIG  "number of layer with thermostat"
Factor    F           S_P    1        0      BIG  "Factor for heat convection"

PARAMETER_PROCESSING

For i = 1, n
  ACoat[i] := DTank*Pi*HTank/n + IF i==1 OR i==n THEN (DTank/2)**2*Pi ELSE 0 END_IF;
END_FOR;

ATank := (DTank/2)**2*Pi;
VTank := ATank*HTank;

END_MODEL

```

Zusätzlicher Wärmetauscher:

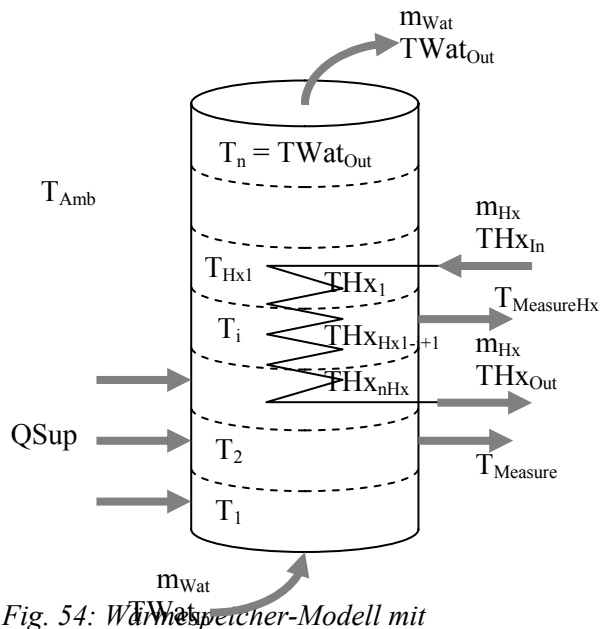


Fig. 54: Wärmespeicher-Modell mit Wärmetauscher

Um zusätzlich oder alternativ zum Heizregister dem Speicher per Wärmetauscher Wärme einspeisen zu können, wurde das Modell mit einem zusätzlichen Term QHx_i in der Energiebilanz erweitert:

$$\frac{V_{Tank}}{n} \cdot \rho_{Wat} \cdot c_{p,Wat} \cdot \frac{dT_i}{dt} = Q_{Cond_i} + Q_{Trans_i} + Q_{Conv_i} + QHx_i + QAux_i - Q_{Loss_i}$$

Der Wärmefluss vom Wärmetauscher in die i-te Schicht beträgt dabei:

$$Q_{Hx_i} = \begin{cases} \text{Coeff}_{Hx} & \text{falls } Hx_i = 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \cdot (TH_{Hx1-i+1} - T_i)$$

wobei:

- Coeff_{Hx} (W/K): Wärmetauschkoeffizient
- Hx_i (-): Auf 1 oder 0 gesetzter Parameter (je nachdem, ob der Wärmetauscher durch die i-te Schicht geht oder nicht)
- TH_{x_j} (°C): Temperatur der Wärmetauscher-Flüssigkeit in der i-ten Speicherschicht
- $Hx1$ (-): Nummer der Speicherschicht des Wärmetauscher-Eintritts

Ausserdem wird das Modell um eine weitere Energiebilanz (diejenige der Wärmetauscherflüssigkeit im j-ten Abschnitt) erweitert:

$$\frac{V_{Hx}}{n_{Hx}} \cdot \rho_{Hx} \cdot c_{p_{Hx}} \cdot \frac{dTH_{x_j}}{dt} = -Q_{Hx_{Hx1-j+1}} + Q_{HxTrans_j}$$

wobei:

- V_{Hx} (m³): totales Volumen der Wärmetauscherflüssigkeit im Wärmespeicher
- n_{Hx} (-): Anzahl Speicherschichten, durch die der Wärmetauscher geht
- ρ_{Hx} (kg/m³): Dichte der Wärmetauscherflüssigkeit
- $c_{p_{Hx}}$ (J/(kg K)): Wärmekapazität der Wärmetauscherflüssigkeit

- TH_{x_j} (°C): Temperatur der Wärmetauscherflüssigkeit im j-ten Abschnitt
- $Q_{Hx_{Hx1-j+1}}$ (W): Wärmefluss vom j-ten Abschnitt des Wärmetauschers in den Wärmespeicher
- $Q_{HxTrans_j}$ (W): durch Wärmetransport in den j-ten Abschnitt gelangende Wärme

Der Wärmetransport zwischen den Wärmetauscherabschnitten wird wie folgt berechnet:

$$Q_{HxTrans_j} = m_{Hx} \cdot c_{p_{Hx}} \cdot (TH_{x_{j-1}} - TH_{x_j})$$

wobei:

- m_{Hx} (kg/s): Massenfluss des Speicherwasser-Verbrauchs
- $T_{j-1} = TH_{x_{In}}$ für $j=1$
- $TH_{x_{In}}$ (°C): Speicher-Eintrittstemperatur der Wärmetauscherflüssigkeit

Die Speicher-Austrittstemperatur entspricht der Temperatur des letzten Wärmetauscher-Abschnitts:

$$TH_{x_{Out}} = TH_{x_{n_{Hx}}}$$

Die totale vom Wärmetauscher an den Speicher abgegebene Wärme lässt sich auf zwei Arten berechnen:

$$Q_{Hx_{Tot}} = \sum_{j=1}^{n_{Hx}} Q_{Hx_j}$$

$$Q_{Hx_{Tot2}} = m_{Hx} \cdot c_{p_{Hx}} \cdot (TH_{x_{In}} - TH_{x_{Out}})$$

B. NMF-Modell Luft/Wasser-Wärmepumpe

Das Modell ist grösstenteils (mit Ausnahme der berücksichtigten Anfahrverluste) nur quasistationär und berechnet aus den beiden Eintrittstemperaturen (luft- und wasserseitig) mittels linearer Interpolation zwischen den für bestimmte Betriebspunkte gemessenen Werten die Heizleistung $Q_{\text{Heiz'}}$ und die elektrische Leistung $Q_{\text{el'}}$ und daraus (bei gegebenen Massenströmen) die beiden Austrittstemperaturen. Die für diese Interpolation benötigten Werte können den Prüfergebnissen vom Wärmepumpenzentrum Töss (www.wpz.ch) entnommen werden.

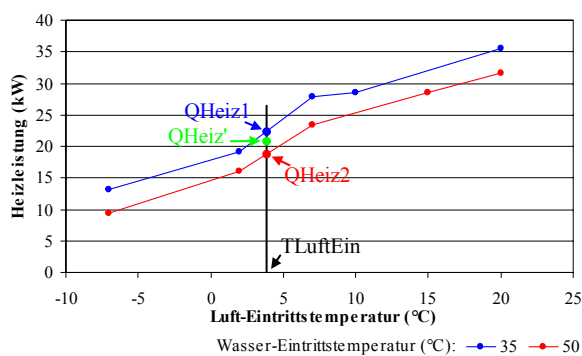


Fig. 55: lineare Interpolation zur Berechnung der Heizleistung $Q_{\text{Heiz'}}$.

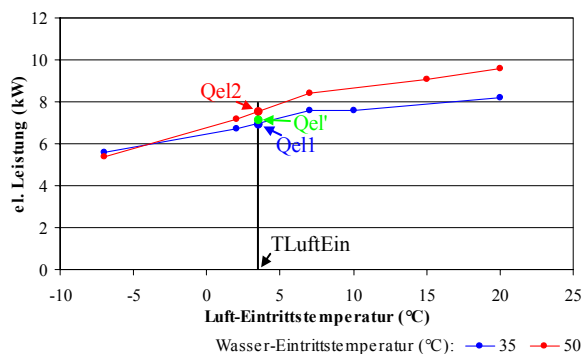


Fig. 56: lineare Interpolation zur Berechnung der elektrischen Leistung $Q_{\text{el'}}$.

$Q_{\text{Heiz'}}$ bedeutet die Heizleistung der Wärmepumpe im Falle des Dauerbetriebs. Um die sogenannten Anfahrverluste zu berücksichtigen, wird dieser Wert mit einem Faktor f multipliziert:

$$Q_{\text{Heiz}} = f \cdot Q_{\text{Heiz'}}$$

Der Faktor f soll asymptotisch gegen den Wert 1 streben, solange die Wärmepumpe läuft und gegen den Wert 0, solange sie ausgeschaltet ist.

Diese Charakteristik wird durch folgende Differenzialgleichung erreicht:

$$\frac{df}{dt} = \begin{cases} A \cdot (1 - f) & \text{falls signal} = 1 \\ -A \cdot f & \text{falls signal} = 0 \end{cases}$$

Wobei $\text{signal} = 1$ bedeutet, dass die Wärmepumpe in Betrieb ist.

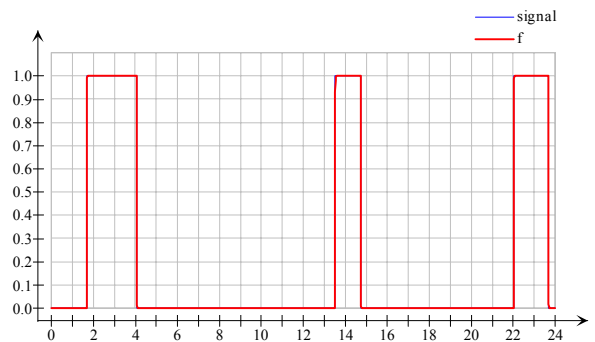


Fig. 57: Die Funktion f mit $A=0.1$

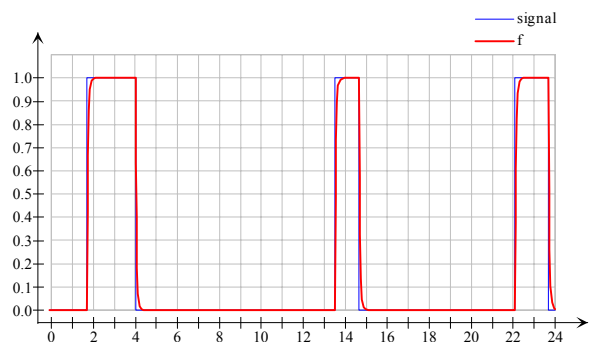


Fig. 58: Die Funktion f mit $A=0.01$

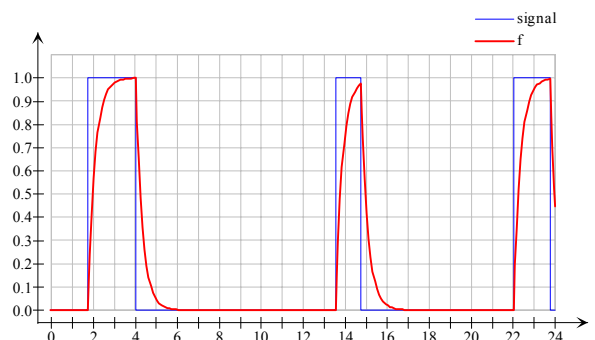


Fig. 59: Die Funktion f mit $A=0.001$

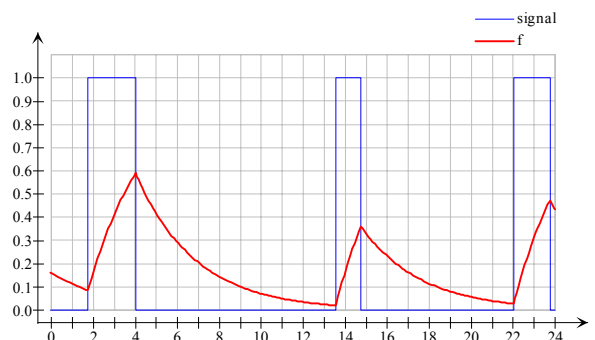


Fig. 60: Die Funktion f mit $A=0.0001$

Qel' bedeutet die elektrische Leistung der Wärmepumpe im Falle signal = 1. Anderenfalls muss diese 0 sein:

$$Q_{el} = \begin{cases} Q_{el}' & \text{falls signal} = 1 \\ 0 & \text{falls signal} = 0 \end{cases}$$

Aus Qel und QHeiz kann die der Umgebungsluft entzogene Wärme QUmg, sowie die Leistungszahl COP der Wärmepumpe berechnet werden:

$$Q_{Heiz} = Q_{Umg} + Q_{el}$$

$$COP = \begin{cases} \frac{Q_{Heiz}}{Q_{el}} & \text{falls signal} = 1 \\ 0 & \text{falls signal} = 0 \end{cases}$$

Aus QHeiz und dem wasserseitigen Massenstrom MH2O kann die Wasser-Austrittstemperatur TH2OAus und aus QUmg und dem luftseitigen Massenstrom MLuft die Luft-Austrittstemperatur TLuftAus berechnet werden:

$$Q_{Heiz} = MH2O \cdot c_{pH2O} \cdot (TH2OAus - TH2OEin)$$

$$Q_{Umg} = MLuft \cdot c_{pLuft} \cdot (TLuftEin - TLuftAus)$$

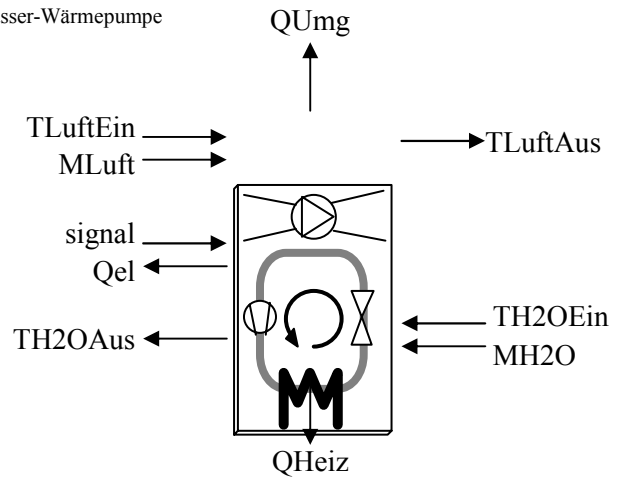


Fig. 61: Prinzip des NMF-Modells für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe. Man beachte, dass die Pfeile andeuten, ob es sich bei der dazugehörigen Variable um eine In- oder eine OUT-Variable handelt. QUmg und Qel fließen zwar in das physikalische System "Wärmepumpe" hinein, ihre Werte werden aber vom Modell berechnet und ausgegeben.

NMF-Code

CONTINUOUS_MODEL WP

ABSTRACT "wärmepumpenmodell"

EQUATIONS

```

SteigQH1 = (IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QHTest[2,1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QHTest[3,1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QHTest[4,1]
            ELSE      QHTest[5,1] END_IF
- IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QHTest[1,1]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QHTest[2,1]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QHTest[3,1]
  ELSE      QHTest[4,1] END_IF)
/(IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[2]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[3]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[4]
  ELSE      TLuftEinTest[5] END_IF
- IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[1]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[2]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[3]
  ELSE      TLuftEinTest[4] END_IF);

AbschQH1 = IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QHTest[1,1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QHTest[2,1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QHTest[3,1]
            ELSE      QHTest[4,1] END_IF
- IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[1]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[2]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[3]
  ELSE      TLuftEinTest[4] END_IF
* SteigQH1;
QHeiz1 = AbschQH1 + SteigQH1 * TLuftEin;

```

```

SteigQH2 = (IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QHTest[2,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QHTest[3,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QHTest[4,2]
            ELSE      QHTest[5,2] END_IF
            - IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QHTest[1,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QHTest[2,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QHTest[3,2]
            ELSE      QHTest[4,2] END_IF)
/(IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[2]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[3]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[4]
  ELSE      TLuftEinTest[5] END_IF
  - IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[1]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[2]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[3]
  ELSE      TLuftEinTest[4] END_IF);

AbschQH2 = IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QHTest[1,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QHTest[2,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QHTest[3,2]
            ELSE      QHTest[4,2] END_IF
            - IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[3]
            ELSE      TLuftEinTest[4] END_IF
            * SteigQH2;
QHeiz2   = AbschQH2 + SteigQH2 * TLuftEin;

SteigQel1 = (IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QelTest[2,1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QelTest[3,1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QelTest[4,1]
            ELSE      QelTest[5,1] END_IF
            - IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QelTest[1,1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QelTest[2,1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QelTest[3,1]
            ELSE      QelTest[4,1] END_IF)
/(IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[2]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[3]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[4]
  ELSE      TLuftEinTest[5] END_IF
  - IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[1]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[2]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[3]
  ELSE      TLuftEinTest[4] END_IF);

AbschQel1 = IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QelTest[1,1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QelTest[2,1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QelTest[3,1]
            ELSE      QelTest[4,1] END_IF
            - IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[3]
            ELSE      TLuftEinTest[4] END_IF
            * SteigQel1;
Qel1      = AbschQel1 + SteigQel1 * TLuftEin;

SteigQel2 = (IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QelTest[2,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QelTest[3,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QelTest[4,2]
            ELSE      QelTest[5,2] END_IF
            - IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QelTest[1,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QelTest[2,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QelTest[3,2]
            ELSE      QelTest[4,2] END_IF)
/(IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[2]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[3]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[4]
  ELSE      TLuftEinTest[5] END_IF
  - IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[1]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[2]
  ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[3]
  ELSE      TLuftEinTest[4] END_IF);

AbschQel2 = IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN QelTest[1,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN QelTest[2,2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN QelTest[3,2]
            ELSE      QelTest[4,2] END_IF
            - IF      TLuftEin < TLuftEinTest[2] THEN TLuftEinTest[1]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[3] THEN TLuftEinTest[2]
            ELSE_IF TLuftEin < TLuftEinTest[4] THEN TLuftEinTest[3]
            ELSE      TLuftEinTest[4] END_IF
            * SteigQel2;
Qel2      = AbschQel2 + SteigQel2 * TLuftEin;

SteigQH   = (QHeiz2 - QHeiz1) / (TH20EinTest[2] - TH20EinTest[1]);
AbschQH   = QHeiz1 - TH20EinTest[1] * SteigQH;
QHeiz     = f * (AbschQH + SteigQH * TH20Ein);

SteigQel  = (Qel2 - Qel1) / (TH20EinTest[2] - TH20EinTest[1]);
AbschQel  = Qel1 - TH20EinTest[1] * SteigQel;
Qel       = IF signal == 0 THEN 1e-12 ELSE AbschQel + SteigQel * TH20Ein END_IF;

```

```

Qel + QUmG = QHeiz;
eps = IF signal == 0 THEN 0 ELSE QHeiz / Qel END_IF;
QHeiz = MH2O * cpH2O * (TH20Aus-TH20Ein);
QUmG = MLuft * cpLuft * (TLuftEin-TLuftAus);

f' = IF signal == 1 THEN A * (1-f) ELSE - A * f END_IF;

QC_out = QHeiz * Alter;

Q0_out = IF QUmG < 0 THEN 0 ELSE QUmG * Alter END_IF;

```

```

LINKS
/* type      name      variables .... */
PMT          H20Aus      PH20, POS_OUT MH20, TH20Aus;
UniAir       LuftAus     PLuftAus, POS_OUT MLuft, TLuftAus, XLuft, HumLuft;
PMT          H20Ein      PH20, POS_IN MH20, TH20Ein;
T            LuftEin     TLuftEin;
Q            QKond        POS_OUT QC_OUT;
ControlLink  OnOff       signal;
ControlLink  Level       f;
ControlLink  Q0WP        Q0_out;

```

VARIABLES

Temp	TLuftEin	IN	0	ABS_ZERO	BIG	"Luft Eintrittstemperatur"
Temp	TLuftAus	OUT	-10	ABS_ZERO	BIG	"Luft Austrittstemperatur"
Temp	TH20Ein	IN	20	ABS_ZERO	BIG	"Wassereintrittstemp"
Temp	TH20Aus	OUT	50	ABS_ZERO	BIG	"Wasseraustrittstemp"
Heatflux	QUmG	OUT	80	0	BIG	"Verdampferleistung"
Generic	Q0_out	OUT	0	0	BIG	"Verdampferleistung"
Heatflux	QHeiz	OUT	80	0	BIG	"Kondensatorleistung"
Heatflux	QC_out	OUT	80	0	BIG	"Kondensatorleistung"
Heatflux	Qel	OUT	20	0	BIG	"Verdichterleistung"
Factor	eps	OUT	3.5	0	BIG	"Leistungszahl"
Factor	SteigQH1	OUT	0	0	BIG	"Steigung QHeiz1"
Factor	SteigQH2	OUT	0	0	BIG	"Steigung QHeiz2"
Factor	SteigQH	OUT	0	0	BIG	"Steigung QHeiz"
Factor	SteigQel1	OUT	0	0	BIG	"Steigung Qel1"
Factor	SteigQel2	OUT	0	0	BIG	"Steigung Qel2"
Factor	SteigQel	OUT	0	0	BIG	"Steigung Qel"
Heatflux	AbschQH1	OUT	-50	ABS_ZERO	BIG	"Achsenabschnitt QHeiz1"
Heatflux	AbschQH2	OUT	-50	ABS_ZERO	BIG	"Achsenabschnitt QHeiz2"
Heatflux	AbschQH	OUT	-50	ABS_ZERO	BIG	"Achsenabschnitt QHeiz"
Heatflux	AbschQel1	OUT	-50	ABS_ZERO	BIG	"Achsenabschnitt Qel1"
Heatflux	AbschQel2	OUT	-50	ABS_ZERO	BIG	"Achsenabschnitt Qel2"
Heatflux	AbschQel	OUT	-50	ABS_ZERO	BIG	"Achsenabschnitt Qel"
Heatflux	QHeiz1	OUT	80	0	BIG	"Kondensatorleistung"
Heatflux	QHeiz2	OUT	80	0	BIG	"Kondensatorleistung"
Heatflux	Qel1	OUT	80	0	BIG	"Kondensatorleistung"
Heatflux	Qel2	OUT	80	0	BIG	"Kondensatorleistung"
Control	signal	IN	1	0	1	"on/off"
Control	f	OUT	1	0	1	"Test-Signal"
Pressure	PH20	IN	0	0	BIG	"dummy water pressure"
MassFlow	MH20	IN	0.2	0	BIG	"Massenstrom Wasser"
MassFlow	MLuft	IN	0.5	0	BIG	"Massenstrom Luft"
Fraction_y	XLuft	IN	594	0	BIG	""
HumRatio	HumLuft	IN	0.01	0	BIG	""
Pressure	PLuftAus	IN	1326	0	BIG	""

MODEL_PARAMETERS

Int	n	SMP	5	5	5	"Anzahl Test-Arbeitspunkte TLuftEin"
Int	m	SMP	2	2	2	"Anzahl Test-Arbeitspunkte TH20Ein"

PARAMETERS

Heatflux	QHTest[N,M]	S_P	1000	0	BIG	"Kondensatorleistung bei Testpunkt nm"
Heatflux	QelTest[N,M]	S_P	500	0	BIG	"Verdichterleistung bei Testpunkt nm"
Temp	TLuftEinTest[n]	S_P	0	ABS_ZERO	BIG	"Luft Eintrittstemperatur bei Testpunkt n"
Temp	TH20EinTest[m]	S_P	10	ABS_ZERO	BIG	"Wassereintrittstemperatur bei Testpunkt m"
Factor	Alter	S_P	0.8	SMALL	BIG	"Verschmutzungsfaktor Wärmepumpe"
Factor	A	S_P	0.001	SMALL	BIG	"A in EXP(-A*t)"
HeatCapM	cpLuft	S_P	1005	SMALL	BIG	"Wärmekapazität Luft"
HeatCapM	cpH2O	S_P	4182	SMALL	BIG	"Wärmekapazität Wasser"

END_MODEL

C. NMF-Modell Erdwärmetauscher

C.1. Das Modell

Das Modell beschreibt den Wärmeaustausch vom Fluid in einem oder mehreren Sondenrohren in die Hinterfüllung eines Bohrloches und die Wärmeleitung von der Hinterfüllung eines oder mehrerer Bohrlöcher ins umliegende Erdreich:

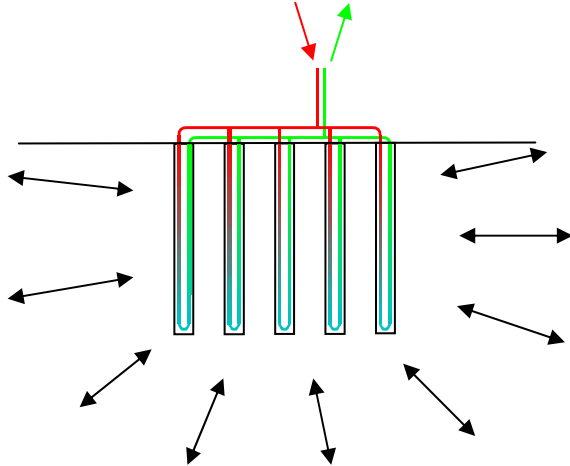


Fig. 62: Modell Erdwärmetauscher

Wärmeaustausch Fluid - Hinterfüllung - Erdreich

Berechnet wird der Wärmeübergang vom Sondenfluid in die Hinterfüllung des Bohrloches, sowie die Wärmeleitung von der Hinterfüllung bis an dessen Grenzfläche zum Erdreich. Dazu wird das ganze System Erdreich-Bohrloch-Sondenrohr in Schichten aufgeteilt, für welche eine homogene Temperatur im Fluid und im Bohrloch angesetzt wird:

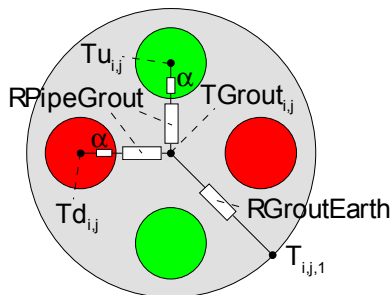


Fig. 63: Wärmeaustausch Fluid - Hinterfüllung - Erdreich in der Schicht j des Bohrlochs i

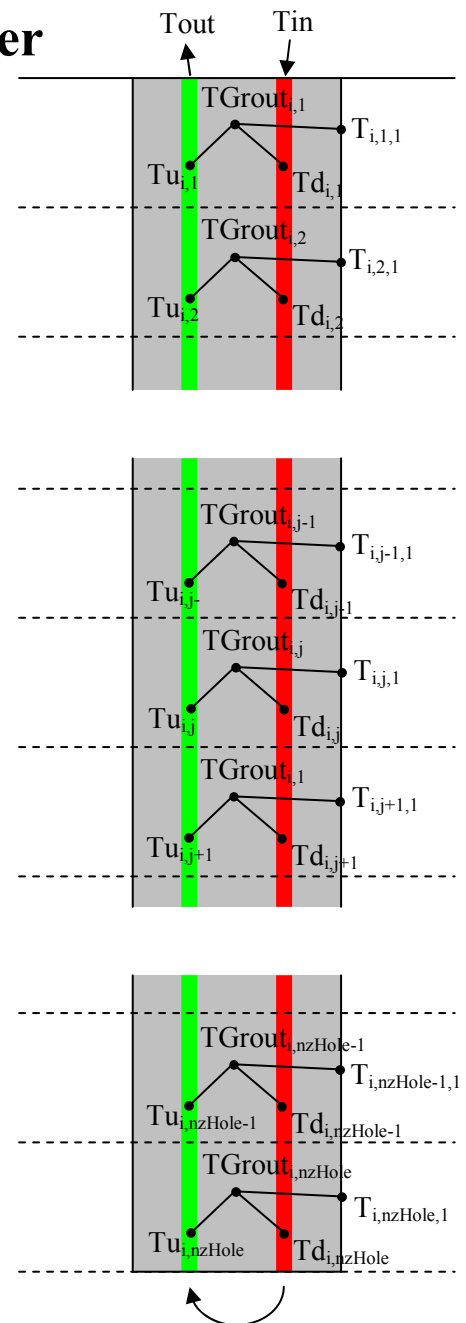


Fig. 64: Thermische Massen (Punkte) und ihre thermischen Verbindungen (dünne schwarze und dicke farbige Linien) im Bohrloch i .

Die Energiebilanzen für das Sondenfluid lauten:

$$M_{cpLiq,j} \cdot \frac{dT_{d_{i,j}}}{dt} = m_i \cdot c_{pLiq} \cdot (T_{d_{i,j-1}} - T_{d_{i,j}}) + K_{LiqGrout,i,j} \cdot (T_{Grout,i,j} - T_{d_{i,j}})$$

$$M_{cpLiq,j} \cdot \frac{dT_{u_{i,j}}}{dt} = m_i \cdot c_{pLiq} \cdot (T_{u_{i,j+1}} - T_{u_{i,j}}) + K_{LiqGrout,i,j} \cdot (T_{Grout,i,j} - T_{u_{i,j}})$$

wobei:

- $M_{cpLiq,j}$ (J/K): Absolute Wärmekapazität des gesamten auf- oder absteigenden Sondenfluids im Abschnitt der Schicht j in einem Bohrloch
- $T_{d_{i,j}}$ (°C): Temperatur des absteigenden Sondenfluids im Abschnitt der Schicht j im Bohrloch i
- $T_{d_{i,j-1}} = T_{In,i}$ für $j=1$
- $T_{u_{i,j}}$ (°C): Temperatur des aufsteigenden Sondenfluids im Abschnitt der Schicht j im Bohrloch i
- $T_{u_{i,j+1}} = T_{i,nzHole}$ für $j = nzHole$
- m_i (kg/s): Massenfluss des Sondenfluids im Bohrloch i
- c_{pLiq} (J/(kg K)): Massenspezifische Wärmekapazität des Sondenfluids
- $K_{LiqGrout,i,j}$ (W/K): Koeffizient für den Wärmeübergang vom Sondenfluid in die Hinterfüllung in der Schicht j im Bohrloch i
- $T_{Grout,i,j}$ (°C): Temperatur der Hinterfüllung in der Schicht j im Bohrloch i

Die absolute Wärmekapazität des Sondenfluids beträgt:

$$M_{cpLiq,j} = \rho_{Liq} \cdot c_{pLiq} \cdot n_{Pipe} \cdot r_{Pipe}^2 \cdot \pi \cdot z_{Lay,j}$$

wobei:

- ρ_{Liq} (kg/m³): Dichte des Sondenfluids
- n_{Pipe} (-): Anzahl doppel-U-Rohre je Bohrloch
- r_{Pipe} (m): Radius der Sondenrohre
- $z_{Lay,j}$ (m): Schichtdicke der j-ten Schicht

Der Koeffizient für den Wärmeübergang vom Sondenfluid in die Hinterfüllung beträgt:

$$K_{LiqGrout,i,j} = \frac{n_{Pipe} \cdot 2 \cdot r_{Pipe} \cdot \pi \cdot z_{Lay,j}}{\frac{1}{\alpha} + R_{PipeGrout}}$$

wobei:

- α (W/(m² K)): Wärmeübergangskoeffizient vom Sondenfluid auf die Innenoberfläche des Sondenrohrs
- $R_{PipeGrout}$ (K/(W/m²)): Flächenspezifischer Wärmewiderstand zwischen Sondenfluid und Hinterfüllung

Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt:

$$\alpha = \frac{\lambda_{Liq} \cdot Nu_i}{2 \cdot r_{Pipe}}$$

wobei:

- λ_{Liq} (W/(m K)): Wärmeleitfähigkeit des Sondenfluids
- Nu_i (-): Nusseltzahl für Bohrloch i

Die Nusseltzahl beträgt:

$$Nu_i = \begin{cases} Nu_{Lam,i} & \text{falls } Re_i < 2300 \\ Nu_{Turb,i} & \text{falls } Re_i > 10'000 \\ \sqrt{Nu_{Lam,i}^2 + Nu_{Turb,i}^2} & \text{sonst} \end{cases}$$

$$Nu_{Lam,i} = 1.86 \cdot \left(\frac{Re_i \cdot Pr_{Liq} \cdot 2 \cdot r_{Pipe}}{\sum_{j=1}^{nzHole} z_{Lay,j}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_{Turb,i} = 0.023 \cdot Re_i^{0.8} \cdot Pr_{Liq}^{0.3}$$

wobei:

- Re_i (-): Reynoldszahl für Bohrloch i
- $Nu_{Lam,i}$ (-): Nusseltzahl für laminare Strömung
- $Nu_{Turb,i}$ (-): Nusseltzahl für turbulente Strömung

Die Reynoldszahl beträgt:

$$Re_i = \frac{v_i \cdot 2 \cdot r_{Pipe}}{v_{Liq}}$$

wobei:

- v_i (m/s): Geschwindigkeit des Sondenfluids in Bohrloch i
- v_{Liq} (): Viskosität des Sondenfluids

Die Geschwindigkeit des Sondenfluids beträgt:

$$v_i = \frac{m_i}{\rho_{Liq} \cdot n_{Pipe} \cdot r_{Pipe}^2 \cdot \pi}$$

Die Energiebilanz für die Hiterfüllung lautet:

$$\text{McpGrout}_j \cdot \frac{dT_{\text{Grout}}}{dt} = \text{KLiqGrout}_{i,j} \cdot (T_{d,i,j} + T_{u,i,j} - 2 \cdot T_{\text{Grout}}) + \text{KGroutEart}_{h,j} \cdot (T_{i,j,1} - T_{\text{Grout}})$$

wobei:

- McpGrout_j (J/K): Absolute Wärmekapazität der Hinterfüllung für die Schicht j in einem Bohrloch
- $\text{TGrout}_{i,j}$ (°C): Temperatur der Hinterfüllung in der Schicht j im Bohrloch i
- KGroutEarth_j (W/K): Koeffizient für die Wärmeleitung vom Kern der Hinterfüllung an deren Grenze zum Erdreich in der Schicht j im Bohrloch i
- $\text{T}_{i,j,1}$ (°C): Temperatur des Erdreichs am Bohrlochrand von Bohrloch i in der Schicht j

Die absolute Wärmekapazität der Hinterfüllung beträgt:

$$\text{McpGrout}_j = \text{RhoGrout} \cdot \text{cpGrout} \cdot (\text{rHole}^2 - \text{nPipe} \cdot \text{rPipe}^2) \cdot \pi \cdot \text{zLay}_j$$

wobei:

- ρ_{Grout} (kg/m³): Dichte der Hinterfüllung
- $c_{p\text{Grout}}$ (J/(kg K)): Massenspezifische Wärmekapazität der Hinterfüllung
- r_{Hole} (m): Radius des Bohrlochs

Der Koeffizient für die Wärmeleitung vom Kern der Hinterfüllung an deren Grenze zum Erdreich beträgt:

$$K_{GroutEarth} h_j = \frac{2 \cdot r_{Hole} \cdot \pi \cdot z_{Lay_j}}{R_{GroutEarth} h}$$

wobei:

- RGroutEarth (K/(W/m²):
Flächenspezifischer Wärmewiderstand
zwischen Hinterfüllung und Erdreich

Wärmeleitung und -speicherung im Erdreich

Zur Berechnung der Wärmeleitung und -speicherung wird das Erdreich um ein Bohrloch in ein 2dimensionales Gitter aufgeteilt. Die Aufteilung in axialer Richtung

(Erdreichschichten) entspricht den Abschnitten des Bohrlochs, kann aber darunter fortgesetzt werden. Zusätzlich wird das Erdreich in radialer Richtung in Erdreichringe aufgeteilt:

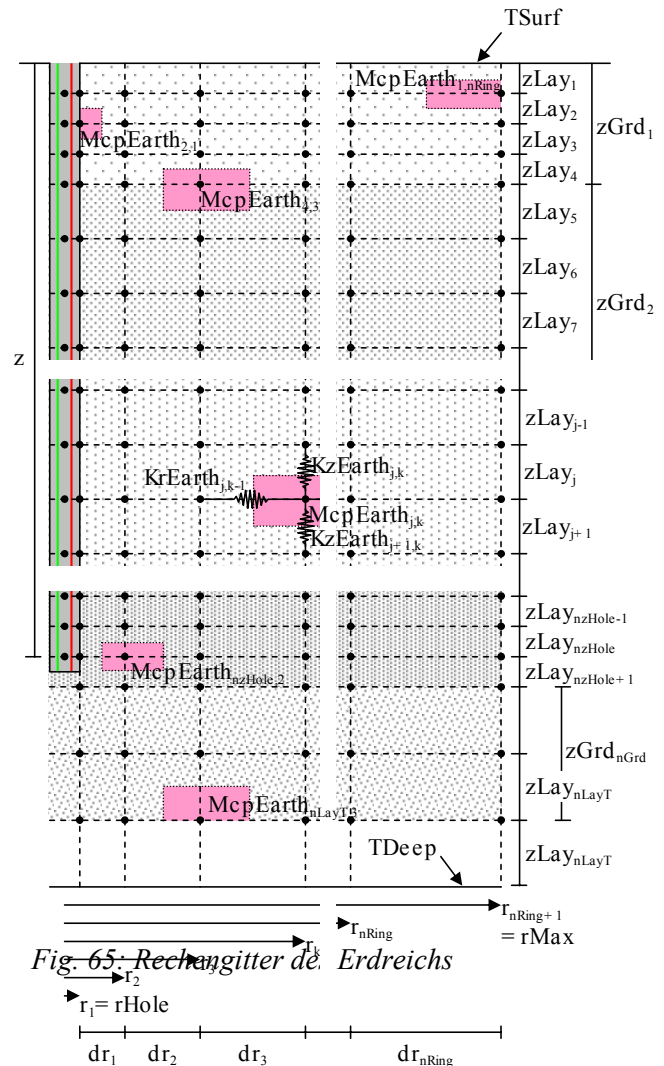


Fig. 65: Rechengitter des Erdreichs

Die Energiebilanz für die Erdreich-Ringelemente lautet:

$$\text{McpEarth}_{j,k} \cdot \frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \text{KrEarth}_{j,k-1} \cdot (T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k}) + \text{KrEarth}_{j,k} \cdot (T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}) + \text{KzEarth}_{j,k} \cdot (T_{i,j-1,k} - T_{i,j,k}) + \text{KzEarth}_{j+1,k} \cdot (T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k})$$

wobei:

- $\text{McpEarth}_{j,k}$ (J/K): Absolute Wärmekapazität des k-ten Erdringelesmentes in Schicht j
- $T_{i,j,k}$ (°C): Temperatur des k-ten Erdringelesmentes in Schicht j im Bohrloch i
- $\text{KrEarth}_{j,k}$ (W/K): Koeffizient für die Wärmeleitung in radialer Richtung zwischen dem k-ten und k+1-ten Erdreichring in Schicht j
- $\text{KzEarth}_{j,k}$ (W/K): Koeffizient für die Wärmeleitung in axialer Richtung zwischen den k-ten Erdreichringen in Schicht j-1 und j
- der Term mit $\text{KrEarth}_{j,k-1}$ bei k=1 ersetzt wird durch $\text{KGroutEart}_{h_j} \cdot (T_{\text{Grout}_{i,j}} - T_{i,j,k})$
- der Term mit $\text{KrEarth}_{j,k}$ bei k=nRing+1 ersetzt wird durch 0
- $T_{i,j-1,k} = T_{\text{Surf}}$ für j=1
- T_{Surf} (°C): Erdoberflächentemperatur
- $\text{KzEarth}_{j+1,k} = \text{KzEarth}_{j,k}$ für k = nLayT
- $T_{i,j+1,k} = T_{\text{Deep}}$ für j = nLayT
- T_{Deep} (°C): Erdreichtemperatur am unteren Rand des Rechengebietes

Die absolute Wärmekapazität eines Erdringelesmentes beträgt:

$$\text{McpEarth}_{j,k} = \left(\left(\frac{r_k + r_{k+1}}{2} \right)^2 - \left(\frac{r_{k-1} + r_k}{2} \right)^2 \right) \cdot \pi \cdot$$

$$\frac{\text{RhoLay}_j \cdot \text{cpLay}_j \cdot \text{zLay}_j + \text{RhoLay}_{j+1} \cdot \text{cpLay}_{j+1} \cdot \text{zLay}_{j+1}}{2}$$

wobei:

- r_k (m): innerer Radius des k-ten Erdringelesments
- $r_{k-1} = r_k$ für k=1
- $r_{k+1} = r_k$ für k=nRing+1
- RhoLay_j (kg/m³): Dichte des Erdreichs der j-ten Schicht
- cpLay_j (J/(kg K)): Massenspezifische Wärmekapazität des Erdreichs der j-ten Schicht
- $\text{RhoLay}_{j+1} \text{cpLay}_{j+1} \text{zLay}_{j+1} = 0$ für j = nLayT
- zLay_j (m): Schichtdicke der j-ten Schicht

Der Koeffizient für die Wärmeleitung in radialer Richtung beträgt:

$$\text{KrEarth}_{i,j} = \frac{(r_k + r_{k+1}) \cdot \pi \cdot \frac{\text{LambLay}_j \cdot \text{zLay}_j + \text{LambLay}_{j+1} \cdot \text{zLay}_{j+1}}{2}}{\text{dr}_k}$$

wobei:

- $\text{LambLay}_{j+1} \text{zLay}_{j+1} = 0$ für j = nLayT
- LambLay_j (W/(m K)): Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs in Schicht j
- dr_k (m): Dicke des k-ten Erdringelesmentes (Differenz vom äusseren zum inneren Radius)

Der Koeffizient für die Wärmeleitung in axialer Richtung beträgt:

$$\text{KzEarth}_{i,j} = \frac{\left(\left(\frac{r_k + r_{k+1}}{2} \right)^2 - \left(\frac{r_{k-1} + r_k}{2} \right)^2 \right) \pi \cdot \text{LambLay}_j}{\text{zLay}_j}$$

wobei:

- $r_{k-1} = r_k$ für k=1
- $r_{k+1} = r_k$ für k=nRing+1

Bohrlochfelder

Bei mehr als einem Bohrloch werden die thermischen Vorgänge im Erdreich um die einzelnen Bohrlöcher grundsätzlich gleich berechnet wie bis anhin beschrieben. Hinzu kommt bei jedem Bohrloch der Einfluss aller anderen Bohrlöcher auf die Erdreichtemperatur.

Es wird deshalb für jede Schicht j die Temperatur des ungestörten Erdreiches (ohne Bohrloch) T_{Ref_j} berechnet, so dass die Temperaturen der Erdringelesmenten aufgeteilt werden können in:

$$T_{i,j,k} = T_{\text{Ref}_j} + DT_{i,j,k} + DT_{\text{Sum}_{i,j}}$$

wobei:

- $T_{i,j,k}$ (°C): Temperatur des k-ten Erdringelesments der Schicht j um das Bohrloch i
- T_{Ref_j} (°C): Temperatur des ungestörten Erdreiches in Schicht j
- $DT_{i,j,k}$ (°C): Erhöhung der Erdreichtemperatur im k-ten Erdring in Schicht j beim Bohrloch i auf Grund des Bohrloches i
- $DT_{\text{Sum}_{i,j}}$ (°C): Erhöhung der Erdreichtemperatur in Schicht j beim Bohrloch i auf Grund des Einflusses aller anderen Bohrlöcher

In der Energiebilanz für die Erdreich-Ringelemente wird

$$\frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{dT_{Re f_j}}{dt} + \frac{dDT_{i,j,k}}{dt} + \frac{dDTSum_{i,j}}{dt} \approx \frac{dDT_{i,j,k}}{dt}$$

gesetzt, da sich T_{Ref_j} und $DTSum_{i,j}$ nur unwesentlich mit der Zeit verändern. Die Energiebilanz lautet somit wie folgt:

$$McpEarth_{j,k} \cdot \frac{dDT_{i,j,k}}{dt} = KrEarth_{j,k-1} \cdot (DT_{i,j,k-1} - DT_{i,j,k}) + KrEarth_{j,k} \cdot (DT_{i,j,k+1} - DT_{i,j,k}) + KzEarth_{j,k} \cdot (DT_{i,j-1,k} - DT_{i,j,k}) + KzEarth_{j+1,k} \cdot (DT_{i,j+1,k} - DT_{i,j,k})$$

wobei:

- $DT_{i,j-1,k} = 0$ für $j = 1$
- $DT_{i,j+1,k} = 0$ für $j = nLayT$

Für die neu hinzugekommene Temperatur T_{Ref_j} wird eine zusätzliche Energiebilanz nötig:

$$McpEarth_{j,2} \cdot \frac{dT_{Re f_j}}{dt} = KzEarth_{j,2} \cdot (T_{Re f_{j-1}} - T_{Re f_j}) + KzEarth_{j+1,2} \cdot (T_{Re f_{j+1}} - T_{Re f_j})$$

wobei:

- $T_{Ref_{j-1}} = T_{Surf}$ für $j = 1$
- $T_{Ref_{j+1}} = T_{Deep}$ für $j = nLayT$

Es bleibt noch die Formel für $DTSum_{i,j}$:

$$DTSum_{i,j} = \sum_{h=1}^{nHole} \begin{cases} 0 & \text{für } h = i \\ f_{i,h} \cdot DT_{h,j,\tilde{k}_{i,h}} + (1 - f_{i,h}) \cdot DT_{h,j,\tilde{k}_{i,h}+1} & \text{sonst} \end{cases}$$

dabei gilt für $\tilde{k}_{i,h}$ und für $f_{i,h}$:

$$r_{\tilde{k}_{i,h}} \leq Dist_{i,h} \leq r_{\tilde{k}_{i,h}+1} \quad f_{i,h} = \frac{r_{\tilde{k}_{i,h}+1} - Dist_{i,h}}{r_{\tilde{k}_{i,h}+1} - r_{\tilde{k}_{i,h}}}$$

wobei:

- $Dist_{i,h}$ (m): Abstand zwischen Bohrloch i und Bohrloch h

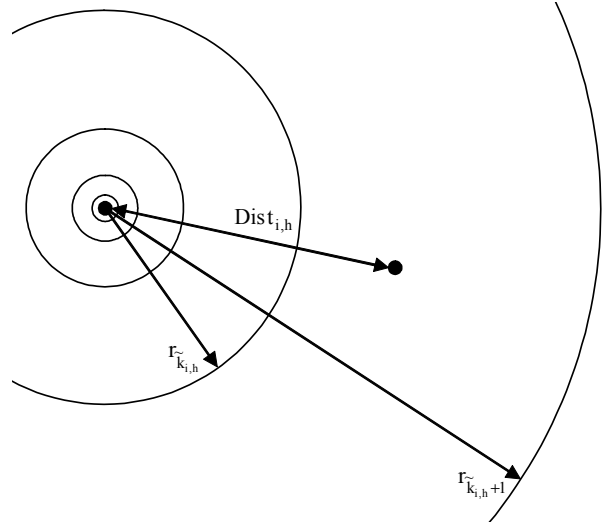


Fig. 66: Ort des Bohrlochs h bezüglich Bohrloch i

C.2. Der NMF-Code:

CONTINUOUS_MODEL GHX

ABSTRACT "3D model for an arbitrary combination of vertical boreholes of equal length. The model is based on superposition of cylindrical 2D fields around each borehole and a 1D vertical field for the undisturbed ground temperature. Dirichlet boundary conditions at top and bottom and isolation at outer radius. Tref is undisturbed temperature in earth (without influence from boreholes). DT is temperature increase caused by influence from bore hole. DTSum(i,j) = sum(j=/=i) DT, i.e. temperature increase at hole i from all other holes. TReal is actual temperature in earth at holes.

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \cdot \frac{d(k \cdot r \cdot \frac{dT}{dr})}{dr} + \frac{d(k \cdot \frac{dT}{dz})}{dz}$$

$$\Leftrightarrow 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d(k \cdot r \cdot \frac{dT}{dr})}{dr} + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{d(k \cdot \frac{dT}{dz})}{dz}$$

```

----> r
|
| Tu Tin 1 2 3 T=TSurf nRing1
V
z |Td|Tg| | | |
  | 1. 1. | | | |
  | 2. 1. | | | |
  | 3. 2. | | | |
  | 2. 2. | | | |

nzhole. | | | | |
  \ | | | | |
nzhole. | | | | |
  | | | | |
nLayT.  | | | | |

T=TDeep

```

EQUATIONS

```

FOR i=1, nHole
  v[i] := M[i]/RhoLiq/(nPipe*rPipe**2*Pi);

```

```

Re[i] := v[i]*2*rPipe/NuLiq;
Nu[i] := IF Re[i]<2300 THEN 1.86*(Re[i]*PrLiq*2*rPipe/SUM j=1,nzHole zLay[j] END_SUM)**(1/3)
        ELSE IF Re[i]>10000 THEN 0.023*Re[i]**0.8*PrLiq**0.3
        ELSE
            Sqrt((1.86*(Re[i]*PrLiq*2*rPipe/SUM j=1,nzHole zLay[j] END_SUM)**(1/3))**2
                + (0.023*Re[i]**0.8*PrLiq**0.3)**2)
        END_IF;
Alfa[i] := max(1,LambLiq*Nu[i]/(2*rPipe));
FOR j=1, nzHole
    KLiGrout[i,j] := nPipe*2*Pi*rPipe*zLay[j]/(1/Alfa[i] + RPipeGrout);
END_FOR;
END_FOR;

FOR j=1, nLayT
    McpEarth[j,2]*Tref'[j] = IF j==1 THEN KzEarth[j,2] *(TSurf - Tref[j])
                            ELSE KzEarth[j,2] *(Tref[j-1] - Tref[j])
                            END_IF
    + IF j==nLayT THEN KzEarth[j,2] *(TDeep - Tref[j])
    ELSE KzEarth[j+1,2] *(Tref[j+1] - Tref[j])
    END_IF;
END_FOR;

FOR i=1, nHole
    FOR j=1, NzHole
        DTSum[i,j] := SUM k=1, nHole
            IF k == i THEN
                0
            ELSE
                DT_fac[i,k,1]*DT[k,j,nint(DT_ind[i,k,1])] +
                DT_fac[i,k,2]*DT[k,j,nint(DT_ind[i,k,2])]
            END_IF
        END_SUM;
        TReal[i,j] := DTSum[i,j] + DT[i,j,1] + Tref[j];
    END_FOR;
END_FOR;

FOR i=1, nHole
    Tout[i] = Tu[i,1];
    FOR j=1, nzhole
        McpLiq[j]*Td'[i,j] = M[i]*cpLiq*(IF j==1 THEN Tin[i] ELSE Td[i,j-1] END_IF - Td[i,j])
        + KLiGrout[i,j]*(Tgrout[i,j] - Td[i,j]);
        McpLiq[j]*Tu'[i,j] = M[i]*cpLiq*(IF j==nzhole THEN Td[i,nzhole] ELSE Tu[i,j+1] END_IF - Tu[i,j])
        + KLiGrout[i,j]*(Tgrout[i,j] - Tu[i,j]);
        McpGrout[j]*Tgrout'[i,j] = KLiGrout[i,j] *(Td[i,j] + Tu[i,j] - 2*Tgrout[i,j])
        + KGroutEarth[j] *(DT[i,j,1] + DTSum[i,j] + Tref[j] - Tgrout[i,j]);
        FOR k=1, nRing1
            McpEarth[j,k]*DT'[i,j,k] = IF k==1 THEN KGroutEarth[j]*(Tgrout[i,j]-DT[i,j,k]-DTSum[i,j]-Tref[j])
            ELSE KrEarth[j,k-1]*(DT[i,j,k-1] - DT[i,j,k])
            END_IF
            + IF k==nRing1 THEN 0
            ELSE KrEarth[j,k] *(DT[i,j,k+1] - DT[i,j,k])
            END_IF
            + IF j==1 THEN KzEarth[j,k] *(0 - DT[i,j,k])
            ELSE KzEarth[j,k] *(DT[i,j-1,k] - DT[i,j,k])
            END_IF
            + IF j==nLayT THEN KzEarth[j,k] *(0 - DT[i,j,k])
            ELSE KzEarth[j+1,k]*(DT[i,j+1,k] - DT[i,j,k])
            END_IF;
        END_FOR;
    END_FOR;
    FOR j=nzhole1, nLayT
        FOR k=1, nRing1
            McpEarth[j,k]*DT'[i,j,k] = IF k==1 THEN 0
            ELSE KrEarth[j,k-1]*(DT[i,j,k-1] - DT[i,j,k])
            END_IF
            + IF k==nRing1 THEN 0
            ELSE KrEarth[j,k] *(DT[i,j,k+1] - DT[i,j,k])
            END_IF
            + IF j==1 THEN KzEarth[j,k] *(0 - DT[i,j,k])
            ELSE KzEarth[j,k] *(DT[i,j-1,k] - DT[i,j,k])
            END_IF
            + IF j==nLayT THEN KzEarth[j,k] *(0 - DT[i,j,k])
            ELSE KzEarth[j+1,k]*(DT[i,j+1,k] - DT[i,j,k])
            END_IF;
        END_FOR;
    END_FOR;
END_FOR;

FOR i=1, nHole
    POut[i] = PIn[i];
END_FOR;

```

LINKS

```

/* type          name          variables... */

FOR i = 1, nHole
  PMT            Inlet[i]      Pin[i], POS_IN  M[i], Tin[i];
  PMT            Outlet[i]     Pout[i], POS_OUT M[i], Tout[i];
END_FOR;

```

VARIABLES

```

/* type          name          role def min max  description */

velocity        v[nHole]          LOC          "liquid velocity in borehole"
Factor          Re[nHole]          LOC          "Reynolds number in borehole"
Factor          Nu[nHole]          LOC          "Nusselt number in borehole"
HeatConda       Alfa[nHole]        LOC          "heat transfer coefficient between liquid an pipe"
HeatCond        KLiqGrout[nHole,nzHole] LOC      "heat cunductance between liquid and grout"

Temp            Tin[nHole]          IN           "inlet liquid temperature of borehole"
Temp            Tout[nHole]         OUT          "outlet liquid temperature of borehole"
Temp            Td[nHole,nzhole]    OUT 20 -BIG BIG "temperature of downwards flowing liquid in borehole at layer"
Temp            Tu[nHole,nzhole]    OUT 20 -BIG BIG "temperature of upwards flowing liquid in borehole at layer"
Temp            Tgrout[nHole,nzHole] OUT 20 -BIG BIG "grout temperature in borehole at layer"
Temp            DT[nHole,nLayT,nRing1] OUT 0 -BIG BIG "temperature increase caused by influence from bore hole"
Temp            Tref[nLayT]         OUT 15 -BIG BIG "undisturbed temperature in earth (wo influence from boreholes)"

Temp            DTSum[nHole,nzHole] LOC          "DTSum(i,j) = sum(j/=i) DT, i.e. temperature increase at hole i from all other holes"
Temp            TReal[nHole,nzHole] LOC          "actual temperature in earth at hole"

MassFlow        M[nHole]           IN           "liquid massflow in borehole"
Pressure        Pin[nHole]         IN           "pressure at liquid inlet"
Pressure        Pout[nHole]        OUT          "pressure at liquid outlet"

```

MODEL_PARAMETERS

```

/* type          name          role def min max  description */

Int             nGrd            SMP 1 1 BIGINT "number of ground layer with different properties (geol. layer)"
Int             nLayT           SMP 1 1 BIGINT "total number of ground layers (grid layers)"
Int             nLayT1          CMP 2 2 BIGINT "total number of nodes in z-direction"
Int             nHole           SMP 1 1 BIGINT "number of boreholes"
Int             nzHole          SMP 2 2 BIGINT "number of nodes in borehole"
Int             nzHole1         CMP 3 3 BIGINT "number of nodes in borehole"
Int             nRing           SMP 1 1 BIGINT "number of earth rings around borehole (grid in r-direction)"
Int             nRing1          CMP 2 2 BIGINT "number of nodes in r-direction"
Int             nPipe           SMP 1 1 BIGINT "number of u-pipes per borehole"
Int             two             SMP 2 2 2      "2"

```

PARAMETERS

```

/* type          name          role def min max  description */

HeatCapM        CpGrd[nGrd]      S_P 800    SMALL BIG "mass heat capacity of ground"
HeatConda       LambGrd[nGrd]    S_P 0.064  SMALL BIG "heat conductivity of ground"
Density         RhoGrd[nGrd]     S_P 1500   SMALL BIG "density of ground"
Length          zGrd[nGrd]       S_P 100    SMALL BIG "thickness of ground"

Factor          nLay[nGrd]       S_P        "number of grid layer in geological layer"
Factor          firstLay[nGrd]    C_P        "number of first grid layer in geological layer"
Factor          lastLay[nGrd]     C_P        "number of last grid layer in geological layer"

ViscKin         NuLiq            S_P        "kinematic viscosity of liquid"
Factor          PrLiq            S_P        "Prandtl number of liquid"
HeatConda       LambLiq          S_P        "heat conductivity of liquid"
HeatResA        RPipeGrout       S_P        "heat resistance between pipe and grout"
HeatResA        RGroutEarth      S_P        "heat resistance between grout and earth"

HeatCond        KGroutEarth[nzHole] C_P        "heat conductance between grout and earth"
HeatCapM        CpLay[nLayT]     C_P        "mass heat capacity of grid layer"
HeatConda       LambLay[nLayT]    C_P        "heat conductivity of grid layer"
Density         RhoLay[nLayT]     C_P        "density of grid layer"
Length          zLay[nLayT]       C_P        "grid layer thickness"

Length          rMax              S_P 10      SMALL BIG "distance from the borehole to the boundary of the calculation region"
Factor          GridFac           S_P 2        1    BIG "factor for earth ring thickness"
Factor          GridFacTot[nRing] C_P        "GridFacTot[i] := 1+GridFac+GridFac**2+ ..."
Length          dr[nRing]         C_P        "thickness of earth ring"
Length          r[nRing1]         C_P        "outer radius of earth ring"

Length          x[nHole]          S_P 0      -BIG BIG "x-coordinate of borehole"
Length          y[nHole]          S_P 0      -BIG BIG "y-coordinate of borehole"

```

```

Length      z                S_P 5      SMALL BIG "depth of borehole"
Length      rHole            S_P 0.2    SMALL BIG "radius of borehole"
Length      Dist[nHole,nHole] C_P      "distance between boreholes"

HeatCap      McpEarth[nLayT,nRing1] C_P "absolute heat capacity of earth ring"
HeatCond      KrEarth[nLayT,nRing]   C_P "heat conductance between nodes in r-direction"
HeatCond      KzEarth[nLayT,nRing1]  C_P "heat conductance between nodes in Z-direction"

Length      rPipe            S_P 0.1    SMALL BIG "radius of u-pipes"
Length      ThickPipe        S_P 0.05   SMALL BIG "thickness of pipe wall"
HeatCapM      CpPipe          S_P 800    SMALL BIG "mass heat capacity of pipe wall material"
HeatCondL      LambPipe       S_P 1.0    SMALL BIG "heat conductivity of pipe wall material"
HeatCapM      CpLiq           S_P 4000   SMALL BIG "mass heat capacity of liquid"
Density      RhoLiq           S_P 1000   SMALL BIG "density of liquid"
HeatCap      McpLiq[nzHole]    C_P "absolute heat capacity of liquid"
HeatCapM      CpGrout         S_P 800    SMALL BIG "mass heat capacity of grout"
HeatCondL      LambGrout       S_P 1.0    SMALL BIG "heat conductivity of grout"
Density      RhoGrout         S_P 1000   SMALL BIG "density of grout"
HeatCap      McpGrout[nzHole]  C_P "absolute heat capacity of grout"

Temp          TSurf           S_P 20     -BIG BIG "surface temperaturer"
Temp          TDeep           S_P 15     -BIG BIG "surface temperaturer"
Temp          TInit[nLayT,nRing1] S_P 15 -BIG BIG "initial ground temperature"

Factor        DT_ind[nHole,nHole,two] C_P 2      1 BIG "radial node numbers"
Factor        DT_fac[nHole,nHole,two] C_P 2      1 BIG "weights"

```

PARAMETER_PROCESSING

```

nRing1 := nRing + 1;
nzHole1 := nzHole + 1;
nLayT1 := nLayT + 1;

GridFacTot[nRing] := (GridFac**nRing-1)/(GridFac-1);

FOR i=1, nRing
  dr[i] := IF i==1 THEN (rMax - rHole)/GridFacTot[nRing] ELSE GridFac * dr[i-1] END_IF;
  r[i] := IF i==1 THEN rHole ELSE r[i-1] + dr[i-1] END_IF;
END_FOR;
r[nRing1] := rMax;

FOR i=1, nGrd
  firstLay[i] := IF i==1 THEN 1 ELSE firstLay[i-1] + nLay[i-1] END_IF;
  lastLay[i] := firstLay[i] + nLay[i] - 1;
  FOR j=firstLay[i], lastLay[i]
    cpLay[j] := cpGrd[i];
    LambLay[j] := LambGrd[i];
    RhoLay[j] := RhoGrd[i];
    zLay[j] := zGrd[i]/nLay[i];
    IF j <= nzHole THEN
      McpLiq[j] := RhoLiq*cpLiq *nPipe*Pi*rPipe**2 *zLay[j];
      McpGrout[j] := RhoGrout*cpGrout *Pi*(rHole**2 - 2*nPipe*rPipe**2)*zLay[j];
    END_IF;
  END_FOR;
END_FOR;

IF nLayT != SUM i=1,nGrd NINT(nLay[i]) END_SUM THEN
  CALL NMF_ERROR("nLayT is not equal to sum(nLay)");
END_IF;

FOR j=1, nLayT
  FOR k=1, nRing1
    McpEarth[j,k] := Pi*
      IF k==1 THEN
        ((r[k+1]+r[k])/2)**2 - r[k]**2)/2*
        IF j==nLayT THEN
          RhoLay[j] *cpLay[j] *zLay[j]
        ELSE
          (RhoLay[j+1]*cpLay[j+1]*zLay[j+1]
          +RhoLay[j] *cpLay[j] *zLay[j])
        END_IF
      ELSE IF k==nRing1 THEN
        (r[k]**2 - ((r[k]+r[k-1])/2)**2)/2*
        IF j==nLayT THEN
          RhoLay[j] *cpLay[j] *zLay[j]
        ELSE
          (RhoLay[j+1]*cpLay[j+1]*zLay[j+1]
          +RhoLay[j] *cpLay[j] *zLay[j])
        END_IF
      ELSE
        (((r[k+1]+r[k])/2)**2 - ((r[k]+r[k-1])/2)**2)/2*
        (RhoLay[j+1]*cpLay[j+1]*zLay[j+1]
        +RhoLay[j] *cpLay[j] *zLay[j])
      END_IF
    END_FOR;
  END_FOR;

```

```

FOR j=1, nLayT
  FOR k=1, nRing
    KrEarth[j,k] := 2*Pi*(r[k+1]+r[k])/2 / dr[k]*
      IF j==nLayT THEN (LambLay[j]*zLay[j])/2
      ELSE (LambLay[j]*zLay[j] + LambLay[j+1]*zLay[j+1])/2
      END_IF
  END_FOR;
END_FOR;
FOR j=1, nLayT
  FOR k=1, nRing1
    KzEarth[j,k] := Pi*(LambLay[j]/zLay[j])*
      IF k==1 THEN (((r[k+1]+r[k])/2)**2 - r[k]**2)
      ELSE_IF k==nRing1 THEN (r[k]**2 - ((r[k]+r[k-1])/2)**2)
      ELSE (((r[k+1]+r[k])/2)**2 - ((r[k]+r[k-1])/2)**2)
      END_IF
  END_FOR;
END_FOR;

FOR i=1, nHole
  FOR j=1, nHole
    Dist[i,j] := sqrt((x[i] - x[j])**2 + (y[i]-y[j])**2);
  END_FOR;
END_FOR;
FOR i=1, nHole
  FOR j=1, nHole
    IF Dist[i,j] <= r[1] AND i != j THEN
      CALL NMF_ERROR("holes coincide");
    ELSE_IF Dist[i,j] > r[nRing1] THEN
      DT_ind[i,j,1] := nRing1;
      DT_ind[i,j,2] := nRing1;
      DT_fac[i,j,1] := 0;
      DT_fac[i,j,2] := 0;
    ELSE
      FOR k=1, nRing
        IF Dist[i,j] >= r[k] AND Dist[i,j] <= r[k+1] THEN
          DT_ind[i,j,1] := k;
          DT_ind[i,j,2] := k+1;
          DT_fac[i,j,1] := (r[k+1]-Dist[i,j])/(r[k+1]-r[k]);
          DT_fac[i,j,2] := 1-DT_fac[i,j,1];
        END_IF
      END_FOR;
    END_IF
  END_FOR;
END_FOR;

FOR j=1, nHole
  KGroutEarth[j] := 2*Pi*rHole*zLay[j]/RGroutEarth;END_FOR;
END_MODEL

```

C.3. Die Validierung

C.3.1. Gitterstudie für die Simulation mit 1 Bohrloch

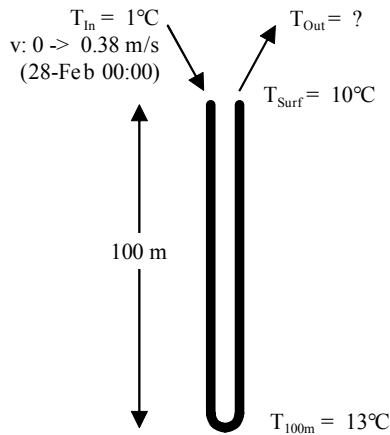


Fig. 67

Boden:
 $c_p = 1'000 \text{ J/(kg K)}$
 $\lambda = 2.5 \text{ W/(m K)}$
 $\rho = 2'500 \text{ kg/m}^3$

Bohrloch/Hinterfüllung:
 Durchmesser: 115 mm
 $c_p = 2'000 \text{ J/(kg K)}$
 $\lambda = 0.8 \text{ W/(m K)}$
 $\rho = 1'000 \text{ kg/m}^3$

Rohr:
 doppel-U-Rohr
 Durchmesser: 32 mm
 Wandstärke: 2.6 mm
 $c_p = 1'700 \text{ J/(kg K)}$
 $\lambda = 0.42 \text{ W/(m K)}$
 $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$

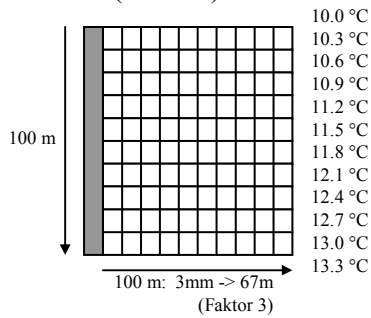
Sole-Flüssigkeit:
 $v = 3.49 \text{ mm}^2/\text{s}$
 $Pr = 27$
 $c_p = 3'890 \text{ J/(kg K)}$
 $\lambda = 0.51 \text{ W/(m K)}$
 $\rho = 1'040 \text{ kg/m}^3$

Damit ein späterer Vergleich des Modells mit anderen Modellen möglichst effizient durchgeführt werden kann, soll als erstes in einer Gitterstudie untersucht werden, wie fein das Erdreich in einzelne Gitterringe aufgeteilt werden muss, um genügend genaue Resultate zu erhalten.

Gesucht ist ein möglichst grobes Gitter, dessen weitere Verfeinerung zu keiner wesentlichen Veränderung der Simulationsergebnisse führt.

Für die Gitterstudie müssen die beiden Wärmeleitwiderstände (siehe Fig. 63) in einer Näherung abgeschätzt werden:

$$R \approx \frac{L}{\lambda} \Rightarrow \begin{cases} R_{\text{PipeGrout}} \approx \frac{r_{\text{Hole}} - r_{\text{Pipe}}}{4 \cdot \lambda_{\text{Grout}}} \approx 0.01 \frac{\text{K}}{\text{W/m}^2} \\ R_{\text{GroutEarth}} \approx \frac{r_{\text{Hole}}}{3 \cdot \lambda_{\text{Grout}}} \approx 0.02 \frac{\text{K}}{\text{W/m}^2} \end{cases}$$

Gitter A-C: verschiedene Anzahl Schichten**Gitter A (10 x 10)**

Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.077 °C

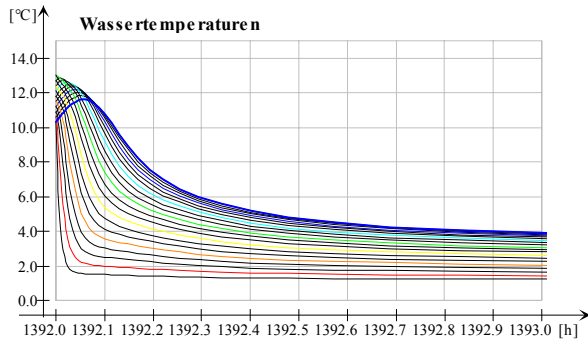
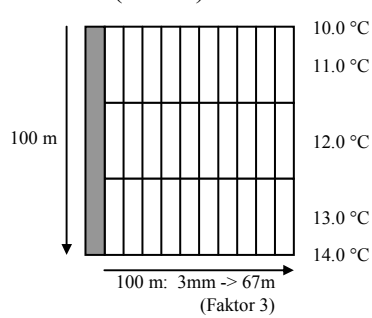


Fig. 68: Gitter A mit Simulationsergebnis

Gitter C (3 x 10)

Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.060 °C

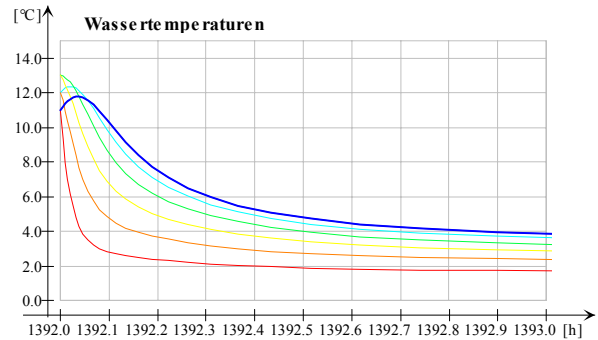
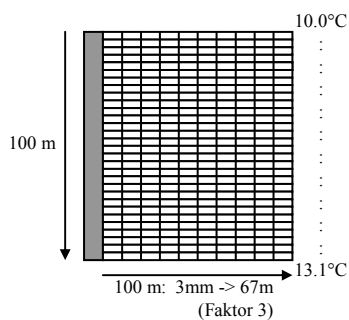


Fig. 70: Gitter C mit Simulationsergebnis

Gitter B (30 x 10)

Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.122 °C

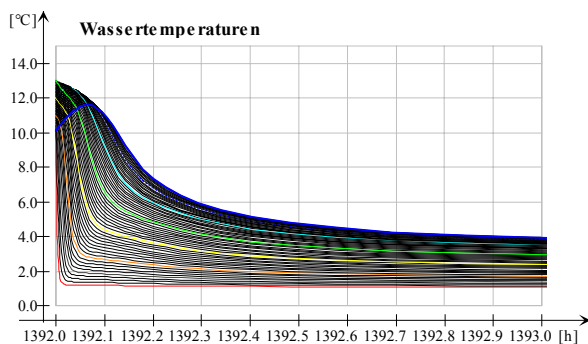


Fig. 69: Gitter B mit Simulationsergebnis

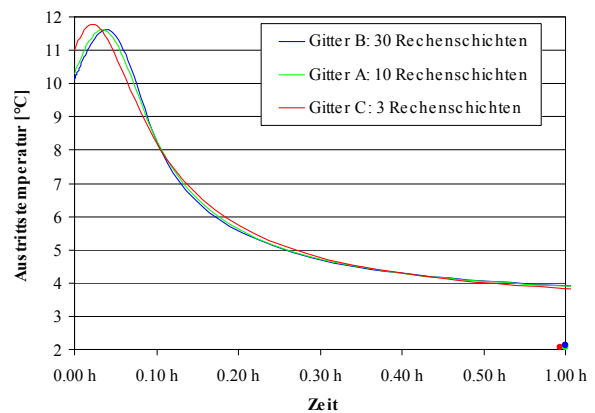
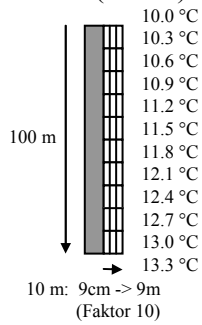
Vergleich der Gitter A-C

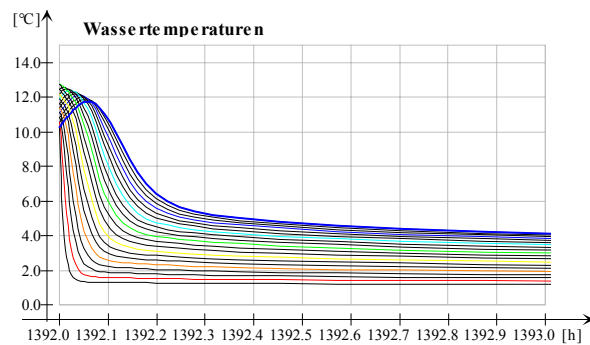
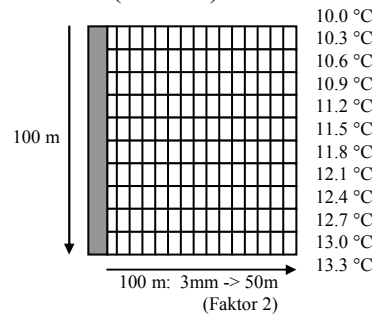
Fig. 71: Berechnete Austrittstemperatur für Gitter A-C im Vergleich (die Punkte unten rechts zeigen an, welche Austritts-temperatur sich nach 10 Monaten einstellt).

Fig. 71 zeigt, dass eine weitere Verfeinerung von Gitter A keine wesentliche Veränderung des Simulationsergebnis mehr bringt.

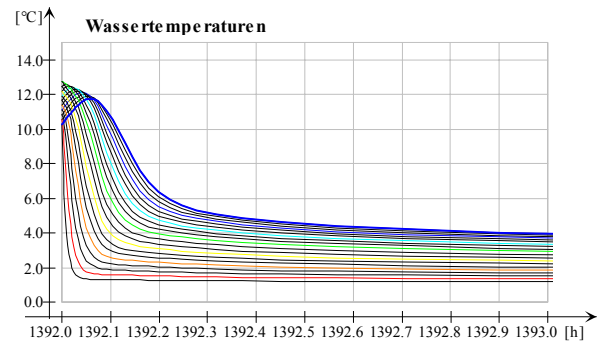
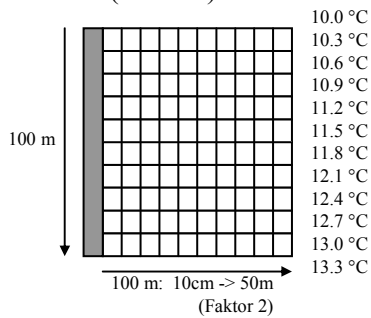
Wir wählen deshalb wie in Gitter A eine Einteilung des Erdreichs in 10 Rechenschichten (je 10 m dick).

Gitter D-I: verschiedene Gitteraufteilung in radialer Richtung**Gitter D (10 x 3)**

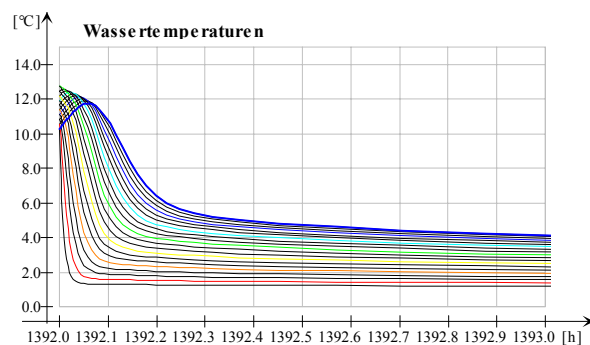
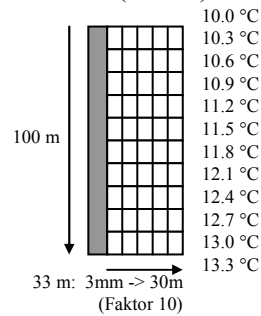
Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.251 °C

*Fig. 72: Gitter D mit Simulationsresultat***Gitter F (10 x 15)**

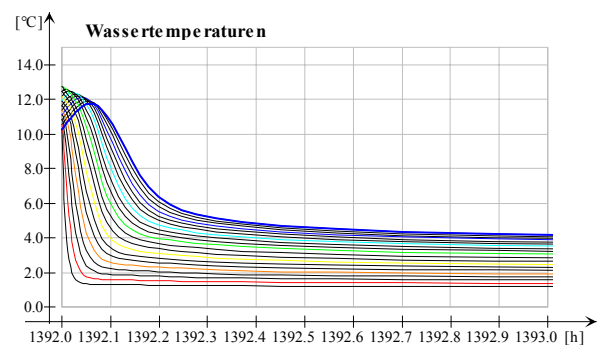
Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.031 °C

*Fig. 74: Gitter F mit Simulationsresultat***Gitter E (10 x 10)**

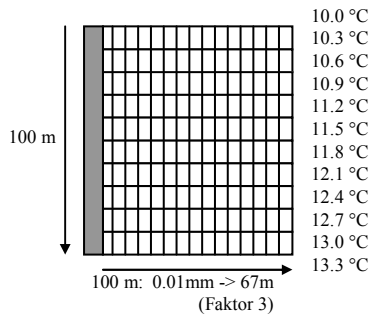
Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.044 °C

*Fig. 73: Gitter E mit Simulationsresultat***Gitter G (10 x 5)**

Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.299 °C

*Fig. 75: Gitter G mit Simulationsresultat*

Gitter H (10 x 15)



Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.076 °C

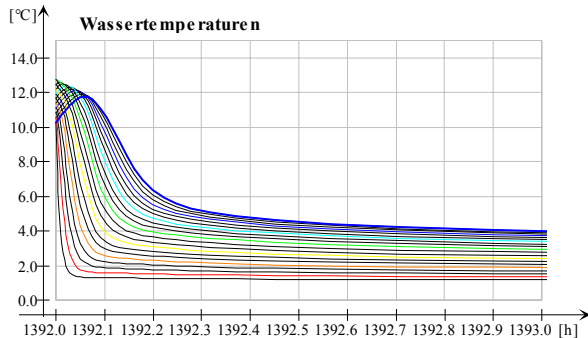
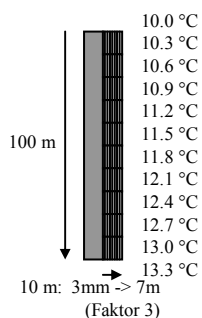


Fig. 76: Gitter H mit Simulationsergebnis

Gitter I (10 x 8)



Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.061 °C

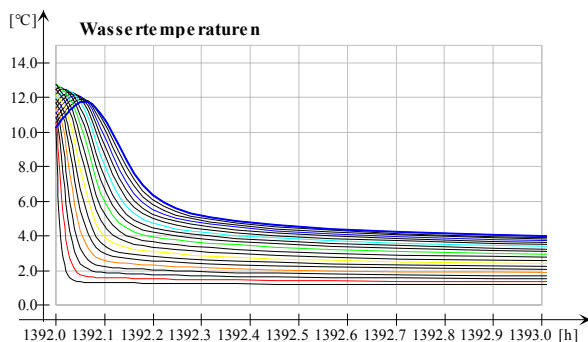


Fig. 77: Gitter I mit Simulationsergebnis

Vergleich der Gitter A und D-I

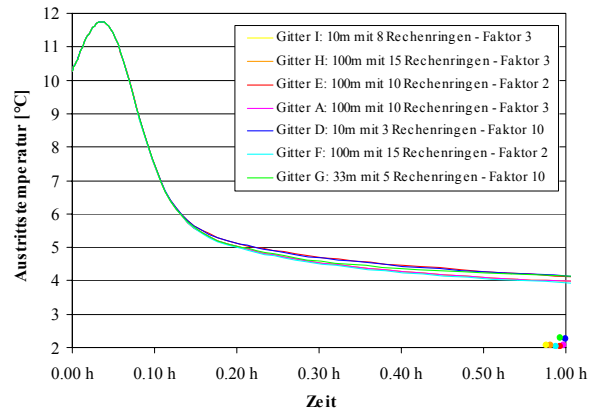


Fig. 78: Berechnete Austrittstemperaturen für Gitter A und D-I im Vergleich (die Punkte unten rechts zeigen an, welche Austritts-temperatur sich nach 10 Monaten einstellt).

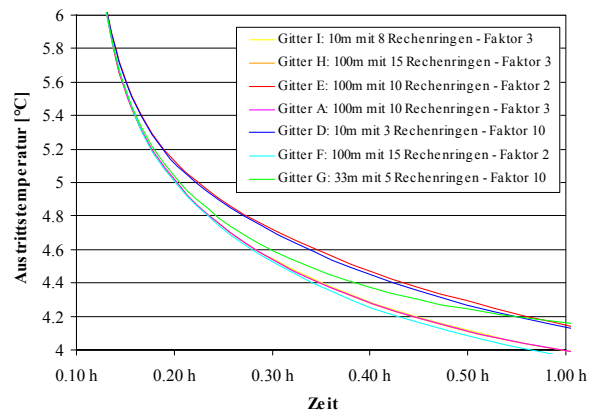


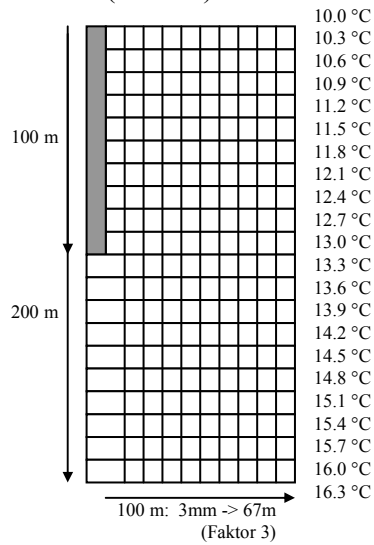
Fig. 79: Wie Fig. 78, aber mit anderer Skalierung der y-Achse

Gitter F liefert die genauesten Resultate. Fig. 78 und Fig. 79 zeigen, dass die Resultate der Gitter A, H und I übereinander liegen und nur unwesentlich von denjenigen von Gitter F abweichen. Die Gitter D, E und G haben einen zu grossen Gitterfaktor (D,G) und/oder einen zu dicken ersten Rechenring (D,E).

Von Allen Gittern mit gleichem Resultat ist Gitter I das einfachste. Da aber Gitter A nicht wesentlich aufwändiger ist, den Einfluss eines Bohrlochs auf das umliegende Erdreich aber nicht nur bis zu einem Abstand von 10m, sondern bis zu einem solchen von 100 m berücksichtigt, wählen wir eine Einteilung des Erdreiches wie in Gitter A in 10 Rechenringe und einer von innen nach aussen jeweils um den Gitterfaktor 3 zunehmenden Ringdicke von 3mm bis 67m.

Gitter J-N: Erweiterung des Rechengebietes unterhalb des Bohrlochs und stellenweise Verfeinerung/Vergröberung

Gitter J (20 x 10)



Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.161 °C

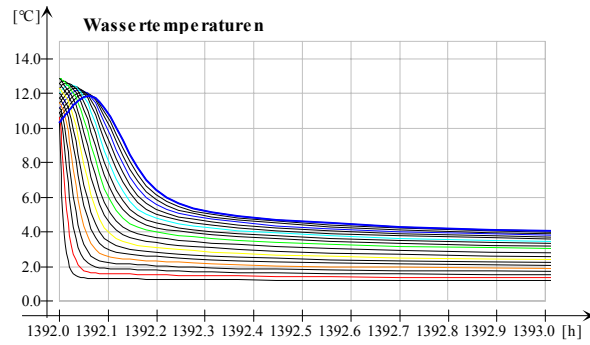
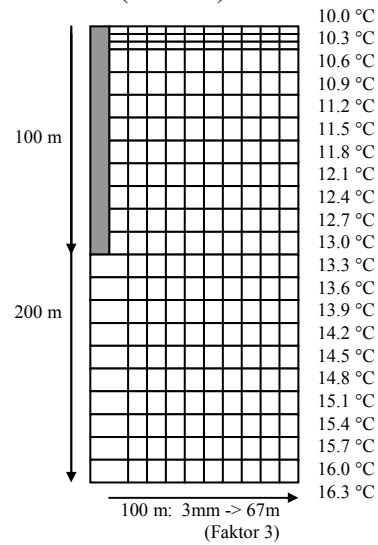


Fig. 80: Gitter J mit Simulationsresultat

Gitter K (22 x 10)



Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.176 °C

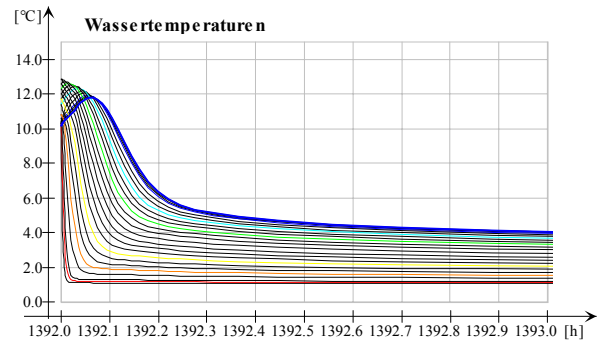
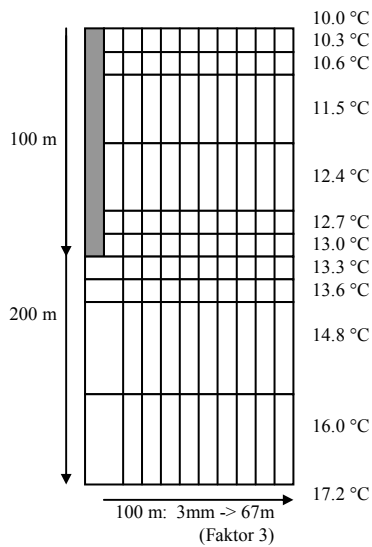
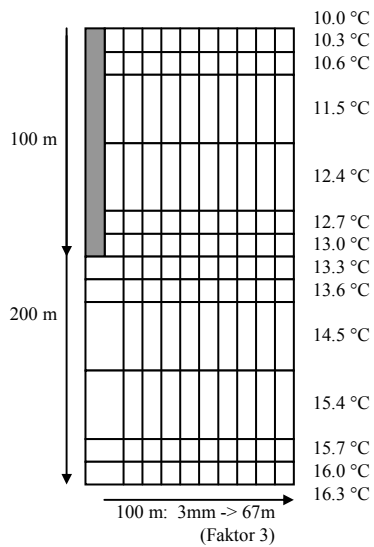


Fig. 81: Gitter K mit Simulationsresultat

Gitter L (10 x 10)



Gitter M (12 x 10)



Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.116 °C

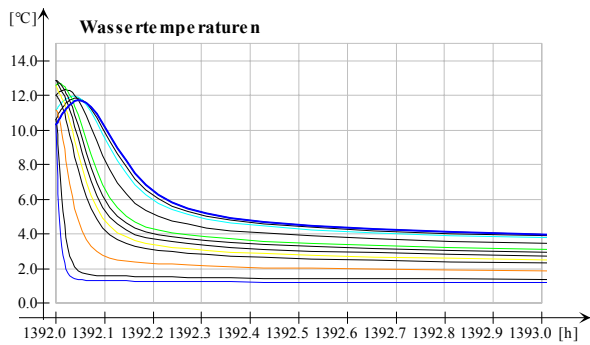


Fig. 82: Gitter L mit Simulationsergebnis

Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 2.116 °C

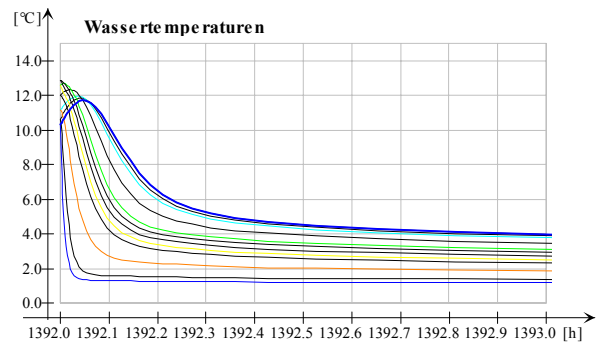
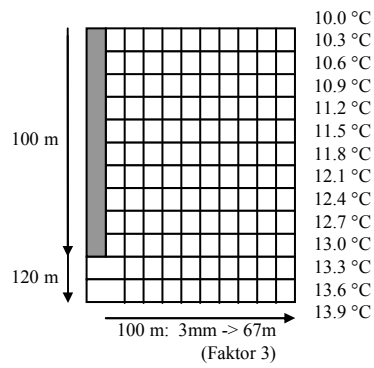


Fig. 83: Gitter M mit Simulationsergebnis

Gitter N (12 x 10)



Austrittstemperatur nach 10 Monaten: 4.161 °C

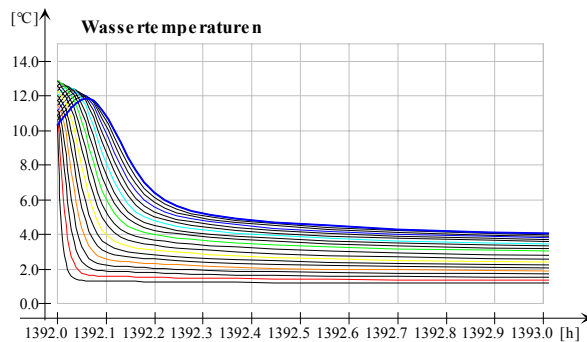


Fig. 84: Gitter N mit Simulationsresultat

Vergleich der Gitter A und J-N

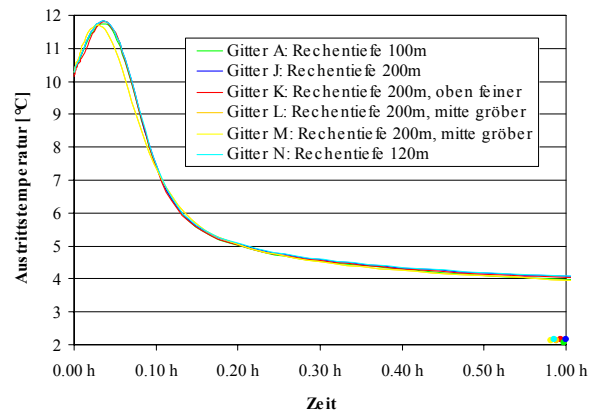


Fig. 85: Berechnete Austrittstemperaturen für Gitter A und J-N im Vergleich (die Punkte unten rechts zeigen an, welche Austritts-temperatur sich nach 10 Monaten einstellt).

Fig. 85 zeigt, dass die Erweiterung des Rechengebietes unterhalb des Bohrlochs eine kleinere Änderung der Austrittstemperatur nach 10 Monaten mit sich bringt. Eine lokale Verfeinerung an der Oberfläche (K) bringt keine wesentliche Änderung am Resultat. Die gröberen Gitter (L und M) zeigen aber Abweichungen.

Wir wählen deshalb eine Erweiterung des Rechengebietes wie in Gitter N bis 20 m unter den Bohrlochfuss.

C.3.2. Vergleich der Resultate mit denjenigen von FRACTure

FRACTure ist ein auf der Methode der finiten Elemente basierendes Simulationsprogramm für geophysikalische Vorgänge. Da es erlaubt, durch die Definition eines sehr feinen Rechengitters die thermischen Vorgänge im Erdreich mit einem wesentlich detaillierteren Modell zu beschreiben, eignet es sich bestens für die Validierung des NMF-Codes.

Die Simulationen mit FRACTure wurden von der Forschungsgruppe für Geothermik und Radiometrie am Institut für Geophysik an der ETH Zürich durchgeführt.

Die Parameter wurden gleich wie in der Gitterstudie definiert:

Boden:

$c_p = 1'000 \text{ J/(kg K)}$
 $\lambda = 2.5 \text{ W/(m K)}$
 $\rho = 2'500 \text{ kg/m}^3$
 Oberflächentemperatur: 10°C
 Temperaturgradient: $3^\circ\text{C}/100\text{m}$

Sole-Flüssigkeit:

$\nu = 3.49 \text{ mm}^2/\text{s}$
 $Pr = 27$
 $c_p = 3'890 \text{ J/(kg K)}$
 $\lambda = 0.51 \text{ W/(m K)}$
 $\rho = 1'040 \text{ kg/m}^3$

Bohrloch:

Tiefe: 100 m
 Durchmesser: 115 mm

Hinterfüllung:

$c_p = 2'000 \text{ J/(kg K)}$
 $\lambda = 0.8 \text{ W/(m K)}$
 $\rho = 1'000 \text{ kg/m}^3$

Rohr:

doppel-U-Rohr
 Durchmesser: 32 mm
 Wandstärke: 2.6 mm
 $c_p = 1'700 \text{ J/(kg K)}$
 $\lambda = 0.42 \text{ W/(m K)}$
 $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$

Input:

Untersucht wurde das Anfahr-Verhalten mit konstantem Durchfluss (kg/s oder 0.38 m/s) und konstanter Eintrittstemperatur (1°C).

Output:

Es interessiert sowohl das kurzzeitige wie auch das mittel- und langzeitige Verhalten der Austrittstemperatur.

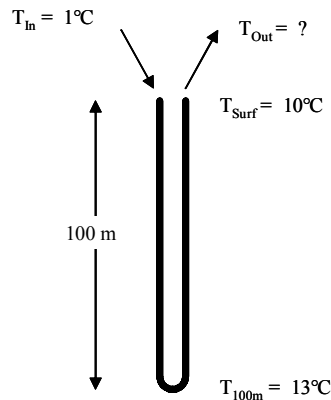


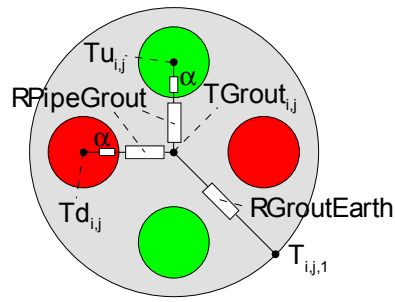
Fig. 86: Situation für die Validierungsrechnung

Verbesserung des NMF-Modells

Um eine bessere Übereinstimmung mit den Resultaten von FRACTure zu erhalten, wurde das Modell in der Hinterfüllung noch verfeinert. Das einfachere ursprüngliche (in Fig. 63 skizzierte) Modell wird im Folgenden als Modell 1 bezeichnet. In Modell 2 wird die Hinterfüllung nicht mehr mit einer über die Querschnittfläche homogenen Temperatur modelliert, sondern es wird unterschieden zwischen der Temperatur im Hinterfüllungskern und den Temperaturen in unmittelbarer Nähe der auf- resp. absteigenden Rohre. Dies führt einerseits zu einer Erhöhung der Anzahl Knoten um 2 pro Schicht (zusätzlich zu TGrout kommt TGroutu und TGroutd), andererseits zu 4 statt 2 Widerständen zwischen den U-Rohren und dem Erdreich (zusätzlich zu RPipeGrout und RGroutEarth kommen RGroutGrout und RRingEarth). Ausserdem muss das Modell mit einem zusätzlichen Parameter (rGroutRing) beschrieben werden.

Die Resultate der Validierung (Fig. 87 - Fig. 92) zeigen, dass durch Anpassen der Wärmewiderstände zwischen der Bohrflüssigkeit und dem Erdreich insbesondere das Modell 2 im Langzeitverhalten auf eine sehr gute Übereinstimmung mit demjenigen von FRACTure gebracht werden kann. Hingegen weist es im Kurzzeitverhalten wegen starker Vereinfachung im Bereich der Hinterfüllung noch kleine Mängel auf. In Modell 2 äussert sich diese Vereinfachung jedoch nur noch in einem um knapp 3 Minuten zu frühen Peak im Verlauf der Austrittstemperatur. Dieser Fehler ist in den meisten Anwendungsfällen vernachlässigbar.

Modell 1:



RPipeGrout =
RGroutEarth =

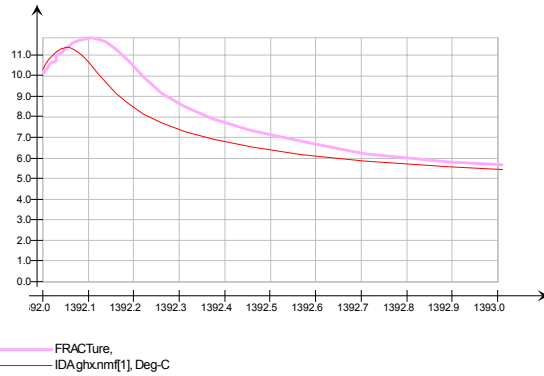


Fig. 87: Modell 1 - erste Stunde

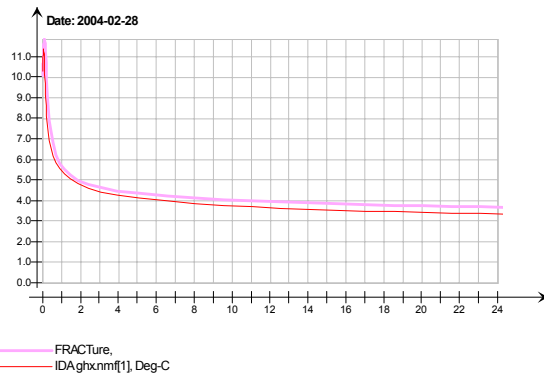


Fig. 88: Modell 1 - erster Tag

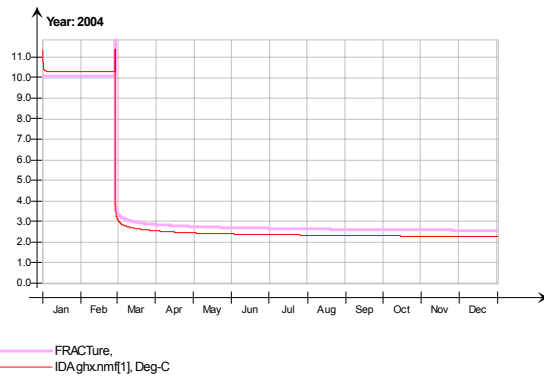
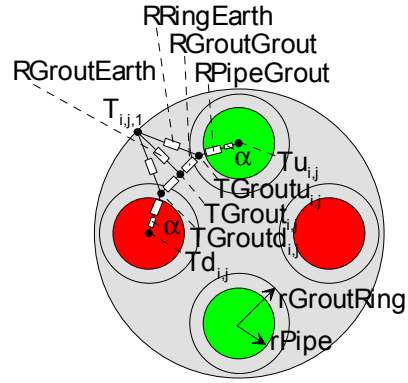


Fig. 89: Modell 1 - zehn Monate

Modell 2:



RPipeGrout =
RGroutGrout =

RRingEarth =
RGroutEarth =

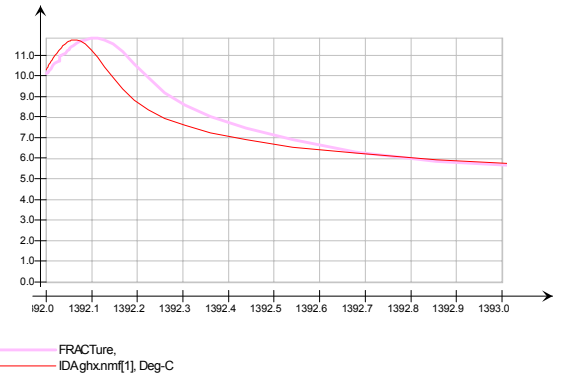


Fig. 90: Modell 2 - erste Stunde

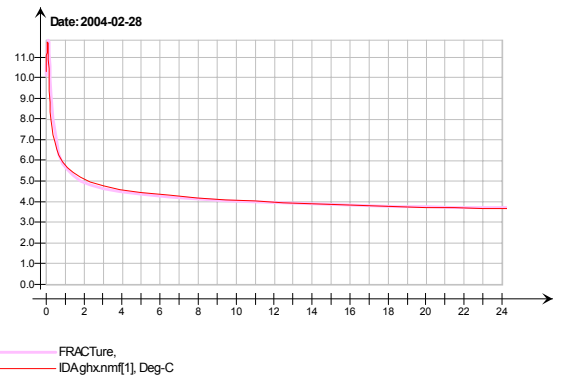


Fig. 91: Modell 2 - erster Tag

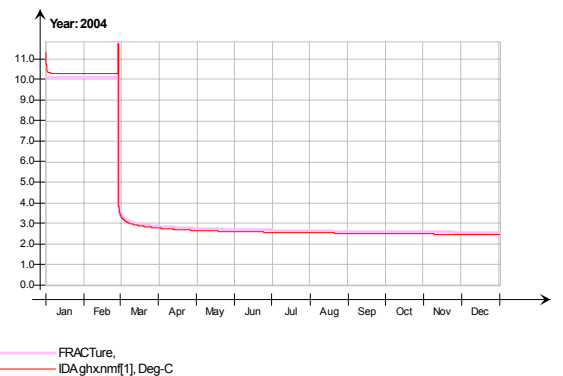


Fig. 92: Modell 2 - zehn Monate