

Jahresbericht 2001, 4. Dezember 2001

Projekt

Messungen an Retrofit-Wärmepumpen

Phase 2

Autor und Koautoren	Hans Rudolf Gabathuler und Hans Mayer
Beauftragte Institution	ARGE Gabathuler AG – Roschi & Partner AG – KWT AG – HTA Burgdorf
Adresse	c/o Gabathuler AG, Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen
Telefon, E-mail	052 654 16 50, gabathuler.ag@bluewin.ch
BFE-Nummern	Projekt: 43098; Vertrag: 82828
Dauer des Projekts	vom 01.07.01 bis 30.06.02

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts «Swiss Retrofit Heat Pump (SRHP)» wurden in der Heizsaison 2000/2001 erste Messungen an einer Retrofit-Wärmepumpe durchgeführt. Das Bundesamt für Energie verlangt nun zusätzliche Messungen an zwei weiteren Sanierungsobjekten in der Heizsaison 2001/2002.

Es wurden die folgenden zwei Versuchsanlagen evaluiert:

- Grössere Versuchsanlage 1: Zweifamilienhaus in Münsingen, Baujahr 1958, reine Heizkörperheizung, Wärmeleistungsbedarf 18 kW bei -12°C Aussentemperatur, Vorlauftemperatur 57 °C bei -12°C Aussentemperatur, Wassererwärmung über die Wärmepumpe
- Kleinere Versuchsanlage 2: Einfamilienhaus in Waltalingen, Fachwerkbau mit angebauter Scheune, Baujahr 1810, reine Heizkörperheizung, Wärmeleistungsbedarf 8,1 kW bei -12°C Aussentemperatur, Vorlauftemperatur 58°C bei -12°C Aussentemperatur, Wassererwärmung über die Wärmepumpe

Passend zu den beiden Versuchsanlagen wurden zwei Prototyp-Wärmepumpen gebaut und gemäss «Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen bis 25 kW» [2] wie folgt in die Anlage eingebunden:

- Grössere Versuchsanlage 1: Parallelspeicher, beidseitig mit konstantem Durchfluss, witterungsgeführte Speichertemperaturregelung mit Einschaltfühler oben und Ausschaltfühler unten im Speicher
- Kleinere Versuchsanlage 2: Seriespeicher im Rücklauf, witterungsgeführte Rücklauftemperaturregelung

Die Inbetriebsetzung mit Start der Messdatenaufzeichnung der Versuchsanlage 1 erfolgte am 1. Oktober 2001, diejenige der Versuchsanlage 2 am 20. November. Die Betriebsoptimierung mit Hilfe der Messdatenaufzeichnung ist bei beiden Anlagen im Gange. Eine erste provisorische Auswertung der Versuchsanlage 1 wurde anlässlich der Begleitgruppensitzung vom 22. November vorgestellt.

Projektziele

Im Rahmen des Projekts «Swiss Retrofit Heat Pump (SRHP)» wurden in der **Phase 1** (Heizsaison 2000/2001) erste Messungen an einer Retrofit-Wärmepumpe durchgeführt. Die Resultate sind in [1] dokumentiert.

Das Bundesamt für Energie verlangte nun in einer **Phase 2** zusätzliche Messungen in der Heizperiode 2001/2002. Diese sollen, entsprechend der Anforderungsliste des Bundesamtes für Energie, wie folgt durchgeführt werden:

1. Es sollen Messungen an zwei geeigneten Sanierungsobjekten durchgeführt werden. Diese Messungen sollen die vollständige Heizperiode umfassen. Die Vorlauftemperaturen des Heizkörpersystems dieser Objekte sollen bei -12°C Aussentemperatur rund 60°C betragen.
2. Die hydraulische Schaltung für die beiden Sanierungsobjekte sollen dem neuesten Erkenntnisstand des BFE-Projekts «Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen bis 25 kW» [2] entsprechen. Die Einbindung der Prototypen soll sorgfältig geplant werden.
3. Die Messungen sollen möglichst mit den künftigen Herstellungspartnern durchgeführt werden (Erhöhung der Akzeptanz).
4. Die Messungen sollen gemäss [1] durchgeführt und wie folgt ausgewertet werden:
 - Einfache Monatsbilanzen und Bilanzen über die ganze Heizsaison
 - Auswertung wie in [1] mit Erfassen des Anlaufvorganges
 - Der Betrieb soll mit und ohne Warmwasserbereitung getrennt erfasst werden
 - Zu jeder Betriebsart sollen die in [1] definierten Kennzahlen verwendet werden
 - Die Darstellung der Ergebnisse soll, einschliesslich der Fehlerrechnungen, analog zu [1] erfolgen
5. Die einzubauenden Prototypen sollen mit den bis zum Einbau realisierbaren Verbesserungen ausgerüstet sein. Wenigstens ein Aggregat soll von der gleichen Leistungsklasse sein, wie das 2000 im WPZ Töss gemessene.

Bis Ende 2001 sollen folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Evaluation von 2 Objekten zur Erstellung der Versuchsanlagen durch alle Beteiligten
- Zusammenstellung der Grundlagendaten der beiden Objekte durch den Betreiber für die Versuchsanlage Münsingen und durch Gabathuler AG für die Versuchsanlage Waltalingen
- Zusammenstellung der Grundlagendaten für die Prototyp-Wärmepumpen durch KWT AG
- Planung der beiden Versuchsanlagen durch Roschi & Partner AG
- Dokumentation der Planung durch Roschi & Partner AG
- Bau der beiden Prototyp-Wärmepumpen durch KWT AG
- Anlieferung der Prototyp-Wärmepumpen und Montage der beiden Versuchsanlagen durch KWT AG (inklusive Organisation Heizungsinstallateur, Elektriker, Maurer usw.)
- Organisation der Durchflussmesser, Wärmerechner und Druckdifferenzfühler durch HTA Burgdorf
- Instrumentierung zur Messung der beiden Versuchsanlagen durch Gabathuler AG
- Inbetriebsetzung der beiden Versuchsanlagen durch KWT AG
- Erste Auswertungen durch Gabathuler AG zur Betriebsoptimierung
- Betriebsoptimierung durch alle Beteiligten

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

EVALUATION DER VERSUCHSANLAGEN

Die grössere Versuchsanlage 1 stand bereits Ende Juni 2001 mit der Anlage in Münsingen fest:

- Zweifamilienhaus, Baujahr 1958
- Energiebezugsfläche 308 m²
- Reine Heizkörperheizung
- Heizleistung 18 kW bei -12°C Aussentemperatur
- Vorlauftemperatur 57°C bei -12°C Aussentemperatur
- Wassererwärmung über die Wärmepumpe möglich
- Transport- und Platzverhältnisse gut

Die Evaluation der kleineren Versuchsanlage 2 gestaltete sich schwieriger. Vier Anlagen standen zur Auswahl, die durch KWT AG und durch Gabathuler AG wie folgt begutachtet wurden:

- Burgstein: Leistungsbedarf eher zu klein, Vorlauftemperatur sicher zu tief, keine Wassererwärmung über die Wärmepumpe möglich
- Dürnten: Keine Angaben über den bisherigen Energieverbrauch (Holzheizung), keine Wassererwärmung über die Wärmepumpe möglich (Platzproblem), schwieriger Transport
- Ziefen: Leistungsbedarf eher zu hoch, Vorlauftemperatur sicher zu tief
- Waltalingen: am besten geeignet (siehe unten)

Die Anlage Waltalingen entsprach – bei zuverlässigen Grundlagendaten – den BFE-Forderungen:

- Einfamilienhaus (Fachwerkbau mit angebauter Scheune) Baujahr 1810
- Energiebezugsfläche 180 m²
- Reine Heizkörperheizung, 1977 eingebaut
- Heizleistung 8,1 kW bei -12°C Aussentemperatur
- Vorlauftemperatur 58° bei -12°C Aussentemperatur
- Wassererwärmung über die Wärmepumpe möglich
- Transport- und Platzverhältnisse gut

BAU DER PROTOTYP-WÄRMEPUMPEN

Passend zu den beiden Versuchsanlagen wurden zwei Prototyp-Wärmepumpen gebaut. Die zu erwartenden Leistungsdaten, die der Auslegung zugrunde gelegt wurden (d. h. inkl. Abtauung), sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Prototyp	Heizungs-Wärmepumpe				Warmwasser-Wärmepumpe			
	Aussen-temp. [°C]	Verfl.-Aus-trittstemp. [°C]	Elektro-leistung [kW]	Wärme-leistung [kW]	Aussen-temp. [°C]	WW-Temp. [°C]	Elektro-leistung [kW]	Wärme-leistung [kW]
Versuchs-anlage 1	-12	60	7	14	-12	55	1	2
	0	45	5,85	17,6				
	+15	30	5,4	25,5				
	Auslegung: +3/0	55/49	7,00	19,90				
Versuchs-anlage 2	-12	60	4	8	-12	55	1	2
	0	45	3,15	9,95				
	+15	30	2,8	13,8				
	Auslegung: +3/0	55/49	3,92	11,45				

Tabelle 1: Zu erwartende Leistungsdaten der beiden Prototyp-Wärmepumpen (massgebend für Auslegung, d. h. inkl. Abtauung)

Prototyp-Scrollverdichter mit Zwischenansaugung: Gemäss Auskunft des Herstellers, wurde leider beschlossen, dass kein Prototyp-Scrollverdichter für den Feldversuch im Rahmen des vorliegenden Retrofit-Projekts des BFE freigegeben wird. (Der einzige Feldversuch, für den Prototyp-Scrollverdichter zur Verfügung stehen, wird durch die EPFL durchgeführt.)

Wärmeträger für den Luftkühler: Aus Zeitgründen wurde die Versuchsanlage 1 in Münsingen mit Propylen-Glykol in Betrieb gesetzt (KWT-Standard). Als Alternative dazu wurde mit der Hochschule für Technik Rapperswil (Herren Deller und Kopp) der Wärmeträger «Temper» bestimmt. Die Versuchsanlage in Waltalingen wurde von Anfang an mit diesem neuen Wärmeträger gefüllt, bei der Anlage in Münsingen wurde der Wärmeträger im Nachhinein auch noch ausgewechselt. Der Wärmeträger wird durch den Hersteller, Aspen Petroleum AB (Schweden), wie folgt beschrieben [3]:

«Temper ist eine synthetische und homogenisierte glykolfreie Lösung auf der Basis von Salzen. [...] Temper hat eine hohe spezifische Wärmekapazität (z. B. 3,5 kJ/kg bei Temper -20°C im Temperaturbereich +20 bis +30°C) und zeichnet sich zusätzlich durch eine – insbesondere im Vergleich mit Propylenglykol – hervorragende Wärmeleitfähigkeit aus. Besondere Zusätze in Temper sorgen für optimalen Korrosionsschutz und Schmiereigenschaften. Durch die vergleichsweise geringe Viskosität gegenüber Glykol, können Pumpen und Leitungen bei gleicher Leistung kleiner dimensioniert werden. [...] Temper ist – im Gegensatz zu Glykolen – ungiftig und ökologisch unbedenklich und wird natürlich abgebaut. Außerdem ist Temper weder brennbar noch explosiv und ist in Wassergefährdungsklasse (WGK) 1 eingestuft. In geschlossener Verpackung und geschlossenen Systemen ist Temper stabil und besitzt im Prinzip unbegrenzte Haltbarkeit. Beim Erreichen des Gefrierpunktes wird Temper körnig, ohne jedoch dabei eine deutliche Volumensteigerung zu zeigen, so daß keine Sprengwirkung entsteht.»

MESSEINRICHTUNG

Die detaillierten Prinzipschemata und Messstellenlisten werden weiter unten bei den Versuchsanlagen beschrieben (Abbildung 5 und Tabelle 6 bzw. Abbildung 9 und Tabelle 10). Hier die allgemeinen für beide Versuchsanlagen geltenden Angaben:

- Datenlogger DELTA
- Messkanäle Eingänge für Temperaturfühler (hier Ni1000)
Normsignaleingänge 4...20 mA, 0...1 V, 0...10 V
Impulseingänge für Elektro-, Wärme- und Volumenstromzähler
Betriebsstundenzählereingänge für Verdichter, Ventilatoren, Pumpen usw.
- Messintervall 10 Sekunden
- Aufzeichnungsintervall 1 Minute
5 Minuten bei trägen Messstellen (Aussentemperatur usw.)
- Aufzeichnung Mittelwerte der 10 Sekunden-Messwerte bzw. Summenwerte
- Datenübertragung Mittels Analog-Modem

Ganz generell gilt: Feldmessungen erfolgen an Haustechnikanlagen, die durch Handwerker auf einer Baustelle erstellt werden. Der Einbau der Messfühler und deren Verdrahtung muss also unter den gegebenen Platzverhältnissen auf der Anlage erfolgen. Lehrbuchmässig erstellte Messstellen sind oft reines Wunschdenken. Der Betrieb des Datenloggers, die Datenaufzeichnung und die Datenübertragung muss auch in feuchten Räumen bei stark schwankenden Temperaturen möglich sein. Langjährige Erfahrungen mit vergleichbaren Messprojekten ergaben folgende grundsätzlichen Erkenntnisse:

■ Mit speziell ausgesuchten kleinen Ni1000-Temperaturfühlern, die mit Wärmeleitpaste am Metallrohr befestigt und gut isoliert werden, kann die geforderte Genauigkeit erzielt werden (siehe nächster Punkt). Vorteilhaft ist dabei:

- Kein Eingriff in die Anlage notwendig
- Flexibilität bei der Auswahl und ggf. Änderung des Messortes
- Geringerer Platzbedarf

- Niedrige Material- und Installationskosten
- 10mal kleinerer Einfluss des Leitungswiderstandes als bei 100-Ohm-Fühlern
- Um die geforderte Genauigkeit bei den Temperaturmessungen mit Ni1000-Fühlern zu erreichen, wird wie folgt vorgegangen:
 - Die in in grösseren Stückzahlen eingekauften Temperaturfühler werden bei 0°C, 20°C und bei 50°C einer ersten Eichmessung unterzogen
 - Sortierung der Temperaturfühler nach Fehlerklassen
 - Paarbildung ausgewählter Temperaturfühler zur Temperaturdifferenzmessung
 - Bestimmung der Längen der notwendigen Anschlusskabel zum voraus auf der Anlage
 - Zweite Eichmessung der Temperaturfühler mitsamt Datenlogger und Anschlusskabel bei 0°C, 20°C und bei 50°C; der Fehler der Einheit Fühler, Logger und Anschlusskabel kann somit zuverlässig angegeben werden
 - Zusätzlichen Messfehler, die an der Messstelle entstehen können, werden durch sorgfältige Ausführung und genügend starke Wärmedämmung minimiert
- Völlig unbrauchbar sind Messstellen mit laminarer Strömung und daraus resultierender Temperaturschichtung. Dies gilt gleichermassen für Fühler in Tauchhülsen wie für Anlegefühler. Durch die Wahl geeigneter Messorte und ggf. durch zusätzliche Massnahmen (z. B. Einbau selbstgebauter statischer Mischer) kann dies vermieden werden.

Die zu erwartenden Temperatur-Messfehler zeigt Tabelle 2.

Temperaturmessung	Fehler für Fühler, Anschlusskabel und Logger	Zusätzliche Fehler der Messstelle bei definierten Randbedingungen	Gesamtfehler
Mediumtemperatur mit Ni1000-Fühler an der Rohroberfläche gemessen	Fühler mit Anschlusskabel und Logger bei 0°C und bei 50°C geeicht, Umgebungstemperatur des Loggers 15...25°C → Fehler im Bereich –20...50°C: ± 0,15 K	Homogene Temperaturverteilung im Medium, satt am Rohr aufliegend, genügend Wärmeleitpaste, einwandfrei gegen Raumluft isoliert ± 0,10 K	± 0,25 K
Temperaturdifferenz zweier Medienströme mit Ni1000-Fühlern gemessen	Fühler mit Anschlusskabel und Logger bei 0°C und bei 50°C geeicht, Umgebungstemperatur des Loggers 15...25°C → Fehler im Bereich –20...50°C: ± 0,10 K	Randbedingungen wie oben; bei identischen Messstellen heben sich die Fehler weitgehend auf ± 0,05 K	± 0,15 K
Aussenluft mit einem NTC-Fühler in einem ventilierten Gehäuse gemessen (Feuchtemessung im gleichen Gehäuse)	Fühler mit Anschlusskabel und Logger bei 0°C und bei 50°C geeicht, Umgebungstemperatur des Loggers 15...25°C → Fehler im Bereich –20...50°C: ± 0,15 K	Temperatur auf Höhe der Messeinrichtung (SMA definiert 2 m über Boden), keine Sonnenstrahlung auf die Messeinrichtung ± 0,10 K	± 0,25 K

Tabelle 2: Messfehler Temperaturmessung

Auf der Wärmeabgabeseite werden pro Anlage zwei autonome Wärmezähler von AQUAMETRO eingesetzt (Durchflussmesser und Wärmerechner mit Temperaturdifferenzmessung separat). Der Elektrizitätsverbrauch wird über je drei Elektro-Energiezähler EMU erfasst (Verdichter Heizung, Verdichter Warmwasser, Hilfsenergie). Grundsätzlich können mit diesen Messinstrumenten, ergänzt durch einige Systemtemperaturen, alle notwendigen Auswertungen erstellt werden. Die Genauigkeit dieser Messinstrumente wird durch die Hersteller wie folgt angegeben:

- Durchflussmesser $\pm 3\%$ bei Nenndurchfluss 10...100%
 $\pm 5\%$ bei Nenndurchfluss 2...10%
- Temperaturdifferenzmessung $\pm 0,05 \text{ K}$

- Wärme-Rechenwerk $\pm 0,3\%$ im Temperaturdifferenzbereich 2...180 K
- Elektrozählerzähler $\pm 2\%$ (Klasse 2 IEC 1036)

Auf der Wärmeabgabeseite erfolgt noch eine zusätzliche Wärmezählung durch Temperaturdifferenzmessung und Wärmerechnung über den Datenlogger (gleicher Durchflussmesser wie Wärmezählung). Auf der Wärmequellenseite sind nur Durchflussmesser eingebaut; hier erfolgt die Wärmezählung allein durch Temperaturdifferenzmessung und Wärmerechnung über den Datenlogger. Angaben über die zu erwartenden Messfehler gibt Tabelle 3. Typische Werte beim vorliegenden Projekt dürften sich im Bereich von Fall A und B bewegen.

Wärmezählung	Fall	Randbedingungen	Fehler Durchfl.-messung	Fehler Temperaturmessung (gemäss Tabelle 2)	Gesamtfehler
Flügelrad-Durchflussmesser, Temperaturdifferenzmessung und Wärmerechnung über Datenlogger	A	100% Auslegedurchfluss 10 K Temperaturdifferenz	$\pm 3\%$	$\pm 0,15$ K von 10 K = $\pm 1,5\%$	$\pm 4,5\%$
	B	100% Auslegedurchfluss 6 K Temperaturdifferenz	$\pm 3\%$	$\pm 0,15$ K von 6 K = $\pm 2,5\%$	$\pm 5,5\%$
	C	100% Auslegedurchfluss 1 K Temperaturdifferenz	$\pm 3\%$	$\pm 0,15$ K von 1 K = $\pm 15\%$	$\pm 18\%$

Tabelle 3: Messfehler Wärmezählung über Datenlogger

VERSUCHSANLAGE 1: MÜNSINGEN

Gebäude und Wärmeabgabesystem

Das Zweifamilienhaus (Abbildung 4) wurde 1958 erbaut. Es hat eine Energiebezugsfläche von 308 m². Das Wärmeabgabesystem ist eine reine Heizkörperheizung.

Messkonzept

Das vereinfachte Prinzipschema (Abbildung 5) und die Messtellenliste (Tabelle 6) zeigen die 34 erfassten Messstellen.



Abbildung 4: Versuchsanlage 1 in Münsingen; der Luftkühler (Bild rechts) steht links neben dem Gebäude auf einem Parkplatz

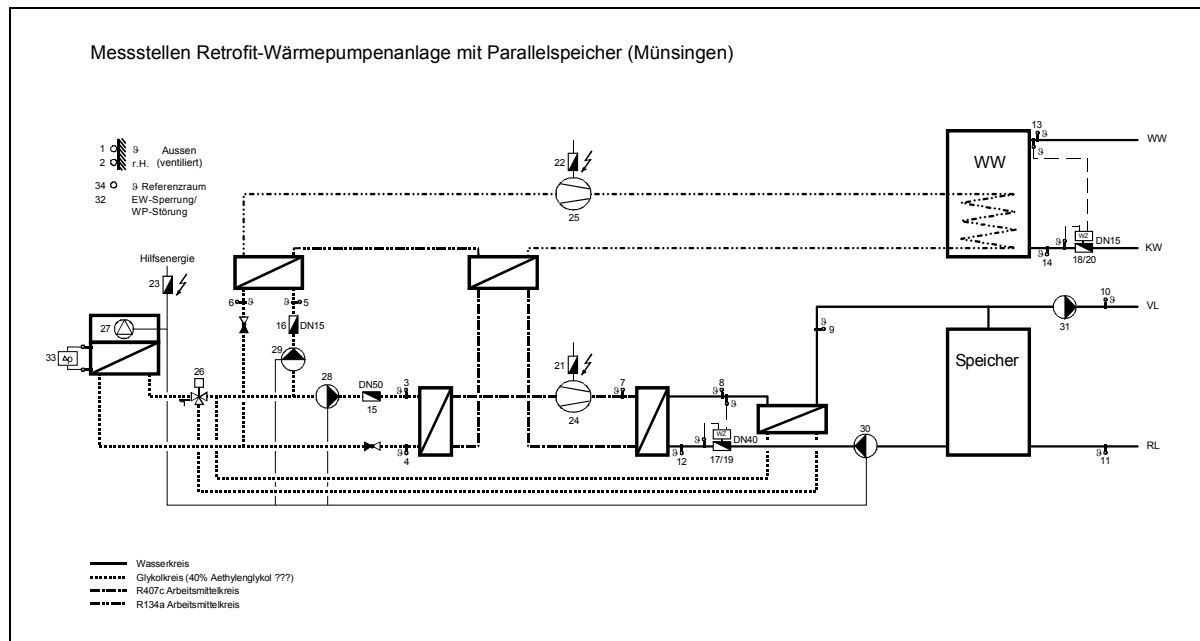


Abbildung 5: Vereinfachtes Prinzipschema (Expansionsventile und Economizer 2 sind nicht gezeichnet)

Nr.	Messgrösse	Messort	Messgerät/-fühler	Messbereich	Messsignal
1	Temperatur	Wärmequelle: Aussenluft (ventiliert)	NTC	-50...+110°C	
2	Relative Feuchte	Wärmequelle: Aussenluft (Rückkühler Eintritt)	Vaisala (kapazitiv)	0...100% r. H.	0...1 V
3	Temperatur	Glykolkreis: Heizungs-WP Verdampfer Eintritt	Ni 1000	-35...+125°C	
4	Temperatur	Glykolkreis: Heizungs-WP Verdampfer Austritt	Ni 1000	-35...+125°C	
5	Temperatur	Glykolkreis: WW-WP Verdampfer Eintritt ?	Ni 1000	-35...+125°C	
6	Temperatur	Glykolkreis: WW-WP Verdampfer Austritt ?	Ni 1000	-35...+125°C	
7	Temperatur	Arbeitsmittel: Heizungs-WP Verdichter Austritt	Ni 1000	-35...+125°C	
8	Temperatur	Heizkreis: WP Austritt (Verflüssiger)	Ni 1000	-35...+125°C	
9	Temperatur	Heizkreis: Abtau-WT Austritt	Ni 1000	-35...+125°C	
10	Temperatur	Heizkreis: Heizung Vorlauf	Ni 1000	-35...+125°C	
11	Temperatur	Heizkreis: Heizung Rücklauf	Ni 1000	-35...+125°C	
12	Temperatur	Heizkreis: WP Eintritt (Verflüssiger)	Ni 1000	-35...+125°C	
13	Temperatur	Warmwasser: Speicher Austritt (WW)	Ni 1000	-35...+125°C	
14	Temperatur	Warmwasser: Speicher Eintritt (KW)	Ni 1000	-35...+125°C	
15	Volumen ²⁾	Glykolkreis: Heizungs-WP Verdampfer Eintritt	Topas	0...5 m³/h	1 Liter/Imp.
16	Volumen ²⁾	Glykolkreis: WW-WP Verdampfer Eintritt	Topas	0...1,5 m³/h	1 Liter/Imp.
17	Volumen ²⁾	Heizkreis: Heizungs-WP Verflüssiger Eintritt	Topas /Calec MB	0...5 m³/h	10 Liter/Imp.
18	Volumen ²⁾	Warmwasser: Speicher Eintritt (KW)	Topas /Calec MB	0...1,5 m³/h	1 Liter/Imp.
19	Wärme ³⁾	Heizkreis: Heizungs-WP Verflüssiger	Calec MB	0...40 kW	10 Wh/Imp.
20	Wärme ³⁾	Warmwasser: WW-Speicherbezug	Calec MB	0...100 kW	10 Wh/Imp.
21	Elektrizität ¹⁾	Wärmepumpe: Verdichter Heizen	EMU 32.x1M	max. 10 kW	1 Wh/Imp.
22	Elektrizität ¹⁾	Wärmepumpe: Verdichter WW	EMU 32.x1M	max. 10 kW	1 Wh/Imp.
23	Elektrizität ¹⁾	Wärmepumpe: Hilfsenergie (Ventilator, UP's etc.)	EMU 32.x1M	max. 10 kW	1 Wh/Imp.
24	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Verdichter Heizen		0...10'	1 s/Imp.
25	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Verdichter WW		0...10'	1 s/Imp.
26	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Abtauen		0...10'	1 s/Imp.
27	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Ventilator		0...10'	1 s/Imp.
28	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Umwälzpumpe Glykolkreis Heizungs-WP		0...10'	1 s/Imp.
29	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Umwälzpumpe Glykolkreis WW-WP		0...10'	1 s/Imp.
30	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Umwälzpumpe Ladekreis		0...10'	1 s/Imp.
31	Betriebsstunden	Wärmeabgabe: Umwälzpumpe Heizkreis		0...10'	1 s/Imp.
32	Betriebsstunden	Wärmepumpe: EW-Sperrung/WP-Störung		0...10'	1 s/Imp.
33	Druckdifferenz	Wärmepumpe: Rückkühler (luftseitig)	QBM 65-1/C	0...1 mbar	0...10 V
34	Temperatur	Referenzraum: Raumluft	NTC	-50...+110°C	

¹⁾ Elektrozähler (Privatzähler) mit Impulsausgang (1 Wh/Impuls)
²⁾ Flügelrad-Volumenstromzähler mit Impulsausgang (1 Liter/Impuls bzw 10 Liter/Impuls)
³⁾ Wärmezähler mit Impulsausgängen (10 Wh/Impuls)

Tabelle 6: Messstellenliste (die Numerierung bezieht sich auf Abbildung 5)

Hydraulik und Regelkonzept

Hydraulik (vgl. Abbildung 5) und Regelkonzept entsprechen der Standardlösung STASCH 5 bzw. STASCH 6 (wobei bei STASCH [2] die Einbindung der Retrofit-Wärmepumpe noch nicht definiert ist).

An der witterungsgeführten Speichertemperaturregelung ist die Heizkurve (Parallelverschiebung und Steilheit) und die Hysterese (2...10 K) einstellbar. Die Wärmepumpe wird im Heizbetrieb wie folgt geschaltet:

- EIN, wenn Istwert Temperatur Speicher oben < Sollwert gemäss Heizkurve – 1/2 Hysterese
- AUS, wenn Istwert Temperatur Speicher unten > Sollwert gemäss Heizkurve + 1/2 Hysterese

Auslegung

Grundsätzliche Vorgabe gemäss Beschluss-Protokoll der Sitzung vom 21.08.2001: Auslegung und Betrieb auf eine möglichst hohe Jahresarbeitszahl (d. h. kein kostenoptimaler Betrieb).

Pos.	Auslegegrößen	Planungswerte	Wie ermittelt?
A	Energiekennlinie: Heizenergiebedarf pro 24 Stunden in Funktion der Aussentemperatur (ohne Warmwasser)	390 kWh/Tag bei -12°C AT 0 kWh/Tag bei 15°C AT (Heizgrenze)	Ölverbrauch in der Heizsaison 2000/2001 (inkl. Warmwasser) = 5'200 l/a
B	Temperaturkennlinien: Vorlauf- und Rücklauftemperaturen in Funktion der Aussentemperatur	Vorlauftemperatur: 57°C bei -12°C AT 44,5°C bei 0°C AT Rücklauftemperatur: 51°C bei -12°C AT 41°C bei 0°C AT	Vorlauftemperatur 53°C bei -8°C AT gemäss Betreiber der Anlage; Rücklauftemperatur = Annahme
C	Energiebedarf zur Wassererwär- mung pro 24 Stunden	18 kWh/Tag	300 Liter pro Tag gemäss Betreiber der Anlage
D	Maximale Sperrzeit pro 24 Stunden	1,5 h	Aktuelle Sperrzeiten: 11.00–12.30 Uhr
E	Reduktion der Vollbetriebsstunden	0 h	Kein reduzierter Betrieb
F	Zur Auslegung der WP massge- bende Lastkennlinie berechnet aus Pos. A, C, D, E	18 kW bei -12°C AT (= $58 \text{ W}/\bar{\alpha}^2 = b_{cf}$) 0 kW bei 15°C AT	$(A + C) / (24 - D - E)$ C = 0 kWh (weil Wassererwärmung mit eigenem Verdichter erfolgt)
G	Massgebende WP-Kennlinie	14 kW bei A-12/W60 17,6 kW bei A0/W45 25,5 kW bei A15/W30	Siehe Tabelle 1
H	Schnittpunkt massgebende Last- kennlinie und massgebende WP- Kennlinie	15,3 kW bei -8°C AT, d. h. monovalenter Betrieb möglich bis -8°C	
J	Kältekreis Heizung	Pumpe: Biral M 15 (Stufe 2) mit 4,5 m³/h bei 5 mWS	Rohrnetzberechnung mit Äthyleng- lykol/Wasser-Gemisch 38%
K	Kältekreis Warmwasser	Pumpe: Biral M 10 (Stufe 2) mit 0,5 m³/h bei 1,9 mWS	Rohrnetzberechnung mit Äthyleng- lykol/Wasser-Gemisch 38%
L	Ladekreis	entfällt (Seriespeicher)	
M	Entladekreis	Pumpe: Biral M 13 (Stufe 3) mit 2,9 m³/h bei 2,6 mWS	Rohrnetzberechnung mit Wasser
N	Speicher	Parallelspeicher 850 Liter = 33 l/kW max. Heizleistung	STASCH-Vorgabe [2]: 20...50 l/kW max. Heizleistung

Tabelle 7: Auslegung der Versuchsanlage 1 (Münsingen)

Inbetriebsetzung und Betriebsoptimierung

Die Inbetriebsetzung der Wärmepumpenanlage mit Start der Betriebsdatenaufzeichnung erfolgte am 1. Oktober 2001.

Die Auswertung der Messdaten zeigte sofort zwei Probleme:

1. Der Wärmerechner von Aquametro im Ladekreis arbeitete fehlerhaft. Der Wärmerechner wurde durch Aquametro repariert und kontrolliert.
2. Der Speicher mit 4 Anschlüssen arbeitete nicht wie gewünscht. Durch die ausserordentlich starke Gegenströmung des Ladekreises (zuvor bereits von den geplanten 2,9 m³/h reduziert auf 2,4 m³/h) und des Entladekreises (1,8 m³/h) wurde der Speicher derart stark durchmischt, dass der Vorlauf zur Wärmeabgabe immer um ca. 4 K kälter war als die Verflüssigeraustrittstemperatur. Folge: reduzierte Speicherkapazität, zu kurze WP-Laufzeit, schlechtere Arbeitszahl...

Lösung: Abblinden des einen oberen Speicheranschlusses (Vorlauf zur Wärmeabgabe) und Neuanschluss des Vorlaufes zur Wärmeabgabe am anderen Speicheranschluss (gemeinsam mit Verflüssiger-Austritt). Zusätzlich erfolgte noch der Einbau eines Magnetventils im Ladekreis zur Verhinderung einer Fehlzirkulation durch die zusätzliche Druckdifferenz über dem Speicher.

Praktisch während des ganzen Oktobers war es noch verhältnismässig warm. Die eigentliche Betriebsoptimierung war deshalb erst im November möglich.

Messresultate

Messdaten liegen seit Inbetriebsetzung vor. Diese wurden bisher hauptsächlich zur Betriebsoptimierung benutzt. Eine erste provisorische Auswertung wurde anlässlich der Begleitgruppensitzung vom 22. November vorgestellt.

VERSUCHSANLAGE 2: WALTALINGEN

Gebäude und Wärmeabgabesystem

Der Fachwerkbau mit angebauter Scheune (Abbildung 8) wurde 1810 erbaut und wird heute als Einfamilienhaus mit einer Energiebezugsfläche von 180 m² genutzt. Das Wärmeabgabesystem, eine reine Heizkörperheizung, wurde 1977 eingebaut.

Messkonzept

Das vereinfachte Prinzipschema (Abbildung 9) und die Messtellenliste (Tabelle 10) zeigen die 33 erfassten Messstellen.

Hydraulik und Regelkonzept

Hydraulik (vgl. Abbildung 9) und Regelkonzept entsprechen der Standardlösung STASCH 3 bzw. STASCH 4 (wobei bei STASCH [2] die Einbindung der Retrofit-Wärmepumpe noch nicht definiert ist).

Auf der Heizungsseite wird ein Seriespeicher im Rücklauf eingesetzt, der mit konstantem Durchfluss von unten nach oben betrieben wird. Die Pumpe läuft immer.

An der witterungsgeführten Rücklauftemperaturregelung ist die Heizkurve (Parallelverschiebung und Steilheit) und die Hysterese (2...10 K) einstellbar. Die Wärmepumpe wird im Heizbetrieb wie folgt geschaltet:

- EIN, wenn Istwert Rücklauftemperatur < Sollwert gemäss Heizkurve – 1/2 Hysterese
- AUS, wenn Istwert Rücklauftemperatur > Sollwert gemäss Heizkurve + 1/2 Hysterese



Abbildung 8: Versuchsanlage 2 in Waltalingen; das Wohnhaus ist der Fachwerkbau links und der Mittelteil der ehemaligen Scheune; der Luftkühler (Bild rechts) steht rechts neben der Scheune

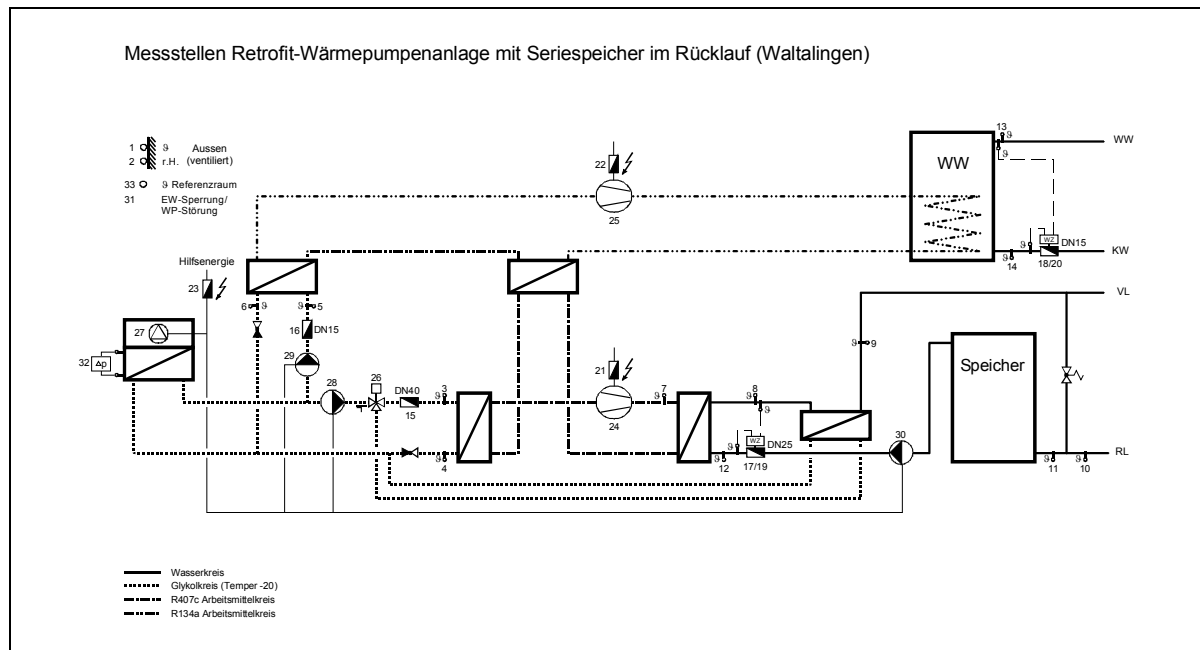


Abbildung 9: Vereinfachtes Prinzipschema (Expansionsventile und Economizer 2 sind nicht gezeichnet)

Nr.	Messgrösse	Messort	Messgerät/-fühler	Messbereich	Messsignal
1	Temperatur	Wärmequelle: Aussenluft (ventiliert)	NTC	-50...+110°C	
2	Relative Feuchte	Wärmequelle: Aussenluft (Rückkühler Eintritt)	Vaisala (kapazitiv)	0...100% r. H.	0...1 V
3	Temperatur	Glykolkreis: Heizungs-WP Verdampfer Eintritt	Ni 1000	-35...+125°C	
4	Temperatur	Glykolkreis: Heizungs-WP Verdampfer Austritt	Ni 1000	-35...+125°C	
5	Temperatur	Glykolkreis: WW-WP Verdampfer Eintritt ?	Ni 1000	-35...+125°C	
6	Temperatur	Glykolkreis: WW-WP Verdampfer Austritt ?	Ni 1000	-35...+125°C	
7	Temperatur	Arbeitsmittel: Heizungs-WP Verdichter Austritt	Ni 1000	-35...+125°C	
8	Temperatur	Heizkreis: WP Austritt (Verflüssiger)	Ni 1000	-35...+125°C	
9	Temperatur	Heizkreis: Heizung Vorlauf (Abtau-WT Austritt)	Ni 1000	-35...+125°C	
10	Temperatur	Heizkreis: Heizung Rücklauf (RL vor Überströmventil)	Ni 1000	-35...+125°C	
11	Temperatur	Heizkreis: Speicher Eintritt (RL nach Überströmventil)	Ni 1000	-35...+125°C	
12	Temperatur	Heizkreis: WP Eintritt (Verflüssiger)	Ni 1000	-35...+125°C	
13	Temperatur	Warmwasser: Speicher Austritt (WW)	Ni 1000	-35...+125°C	
14	Temperatur	Warmwasser: Speicher Eintritt (KW)	Ni 1000	-35...+125°C	
15	Volumen ²⁾	Glykolkreis: Heizungs-WP Verdampfer Eintritt	Topas	0...3 m³/h	1 Liter/Imp.
16	Volumen ²⁾	Glykolkreis: WW-WP Verdampfer Eintritt	Topas	0...1,5 m³/h	1 Liter/Imp.
17	Volumen ²⁾	Heizkreis: Heizungs-WP Verflüssiger Eintritt	Topas /Calec MB	0...3 m³/h	1 Liter/Imp.
18	Volumen ²⁾	Warmwasser: Speicher Eintritt (KW)	Topas /Calec MB	0...1,5 m³/h	1 Liter/Imp.
19	Wärme ³⁾	Heizkreis: Heizungs-WP Verflüssiger	Calec MB	0...20 kW	10 Wh/Imp.
20	Wärme ³⁾	Warmwasser: WW-Speicherbezug	Calec MB	0...100 kW	10 Wh/Imp.
21	Elektrizität ¹⁾	Wärmepumpe: Verdichter Heizen	EMU 32.x1M	max. 10 kW	1 Wh/Imp.
22	Elektrizität ¹⁾	Wärmepumpe: Verdichter WW	EMU 32.x1M	max. 10 kW	1 Wh/Imp.
23	Elektrizität ¹⁾	Wärmepumpe: Hilfsenergie (Ventilator, UP's etc.)	EMU 32.x1M	max. 10 kW	1 Wh/Imp.
24	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Verdichter Heizen		0...10'	1 s/Imp.
25	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Verdichter WW		0...10'	1 s/Imp.
26	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Abtauen		0...10'	1 s/Imp.
27	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Ventilator		0...10'	1 s/Imp.
28	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Umwälzpumpe Glykolkreis Heizungs-WP		0...10'	1 s/Imp.
29	Betriebsstunden	Wärmepumpe: Umwälzpumpe Glykolkreis WW-WP		0...10'	1 s/Imp.
30	Betriebsstunden	Wärmeabgabe: Umwälzpumpe Heizkreis		0...10'	1 s/Imp.
31	Betriebsstunden	Wärmepumpe: EW-Sperrung/WP-Störung		0...10'	1 s/Imp.
32	Druckdifferenz	Wärmepumpe: Rückkühler (luftseitig)	QBM 65-1/C	0...1 mbar	0...10 V
33	Temperatur	Referenzraum: Raumluft	NTC	-50...+110°C	

¹⁾ Elektrozähler (Privatzähler) mit Impulsausgang (1 Wh/Impuls)
²⁾ Flügelrad-Volumenstromzähler mit Impulsausgang (1 Liter/Impuls)
³⁾ Wärmezähler mit Impulsausgängen (10 Wh/Impuls)

Tabelle 10: Messstellenliste (die Numerierung bezieht sich auf Abbildung 9)

Auslegung

Grundsätzliche Vorgabe gemäss Beschluss-Protokoll der Sitzung vom 21.08.2001: Auslegung und Betrieb auf eine möglichst hohe Jahresarbeitszahl (d. h. kein kostenoptimaler Betrieb).

Pos.	Auslegegrössen	Planungswerte	Wie ermittelt?
A	Energiekennlinie: Heizenergiebedarf pro 24 Stunden in Funktion der Aussentemperatur (ohne Warmwasser)	170 kWh/Tag bei -12°C AT 0 kWh/Tag bei 15°C AT (Heizgrenze)	Ölverbrauch der letzten 14 Jahre (inkl. Warmwasser) = 2290 l/a Kurzzeitmessung Heizung: 85 kWh/d bei 1,5°C AT
B	Temperaturkennlinien: Vorlauf- und Rücklauftemperaturen in Funktion der Aussentemperatur	Vorlauftemperatur: 58°C bei -12°C AT 45°C bei 0°C AT Rücklauftemperatur: 53°C bei -12°C AT 42°C bei 0°C AT	Relativ zuverlässige Daten ab Sigmagyr-Regler: Vorlauftemperatur 58° bei -12° AT Kurzzeitmessung Heizung: Vorlauftemperatur 43°C bei 1,5° AT Durchfluss = 1,4 m³/h Vollbetriebsstunden = 16 h/d
C	Energiebedarf zur Wassererwärmung pro 24 Stunden	12 kWh/Tag	200 Liter pro Tag
D	Maximale Sperrzeit pro 24 Stunden	3 h	Aktuelle Sperrzeiten: 11.00-12.00 und 22.00-24.00 Uhr
E	Reduktion der Vollbetriebsstunden	0 h	Kein reduzierter Betrieb
F	Zur Auslegung der WP massgebende Lastkennlinie berechnet aus Pos. A, C, D, E	8,1 kW bei -12°C (= $45 \text{ W}/\bar{\alpha}^2 = b_{cf}$) 0 kW bei 15°C	$(A + C) / (24 - D - E)$ C = 0 kWh (weil Wassererwärmung mit eigenem Verdichter erfolgt)
G	Massgebende WP-Kennlinie	8 kW bei A-12/W60 9,95 kW bei A0/W45 13,8 kW bei A15/W30	Siehe Tabelle 1
H	Schnittpunkt massgebende Lastkennlinie und massgebende WP-Kennlinie	8,05 kW bei -11,5°C AT, d. h. monovalenter Betrieb möglich bis -11,5°C	
J	Kältekreis Heizung	Pumpe: Biral M 14 (Stufe 2) mit 2,8 m³/h bei 5 mWS	Rohrnetzberechnung mit Äthylenglykol/Wasser-Gemisch 38%
K	Kältekreis Warmwasser	Pumpe: Biral M 10 (Stufe 2) mit 0,5 m³/h bei 1,9 mWS	Rohrnetzberechnung mit Äthylenglykol/Wasser-Gemisch 38%
L	Ladekreis	entfällt (Seriespeicher)	
M	Entladekreis	Pumpe: Biral M 13 (Stufe 3) mit 1,8 m³/h bei 3,9 mWS	Rohrnetzberechnung mit Wasser
N	Speicher	Seriespeicher im Rücklauf 500 Liter = 36 l/kW max. Heizleistung	STASCH-Vorgabe [2]: 20...50 l/kW max. Heizleistung

Tabelle 11: Auslegung der Versuchsanlage 2 (Waltalingen)

Inbetriebsetzung und Betriebsoptimierung

Die Apparate wurden am 25.10.01 angeliefert und bis am 7.11.01 installiert. Die Inbetriebsetzung mit Start der Messdatenaufzeichnung erfolgte am 20.11.01.

Messresultate

Betriebsoptimierung im Gange; noch keine Auswertung der Messdaten.

SPEICHEREINBINDUNG UND ABTAUBETRIEB

Damit die Retrofit-Wärmepumpen möglichst optimal betrieben werden können, wurde vor allem versucht, zwei Forderungen zu erfüllen:

- Die volle Verflüssiger-Austrittstemperatur soll ohne Zeitverzögerung auf die Heizkörperheizung übertragen werden
- Der Seriespeicher soll bei der Entladung korrekt von unten nach oben durchflossen werden (Verhinderung eines warmen «Zapfens», der nicht mehr aus dem Speicher herausgebracht werden kann)

Dies hat zu folgenden Konsequenzen geführt:

- Bei Versuchsanlage 1 wurde der Parallelspeicher oben auf einen einzigen Speicheranschluss umgebaut
- Bei Versuchsanlage 2 wurde der Seriespeicher (entgegen dem ursprünglichen Plan) im Rücklauf eingebaut und von unten nach oben durchflossen

Im Abtaubetrieb können die obgenannten Einbauarten jedoch zu Problemen führen, weil hier der Heizungsvorlauf für einige Minuten auf 10...15°C absinken kann. Dies kann weitgehend wie folgt verhindert werden:

- Beim Parallelspeicher: Abschalten der Entladepumpe während dem Abtaubetrieb (in Versuchsanlage 1 realisiert)
- Beim Seriespeicher im Rücklauf: Abtauwärmetauscher im Heizungsrücklauf vor dem Seriespeicher einbauen (in Versuchsanlage 2 nicht realisiert)

Nationale Zusammenarbeit

Mit den nachfolgenden BFE-Projekten erfolgt eine Zusammenarbeit:

- Th. Afjei et al.: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen bis 25 kW (STASCH). Bern, Bundesamt für Energie. (Laufendes Projekt, vgl. [2])
- Thomas Kopp et al.: Wärmequelle Luft für Retrofit-Wärmepumpen. Rapperswil, Hochschule für Technik. (Laufendes BFE-Projekt)

Internationale Zusammenarbeit

Bisher keine Internationale Zusammenarbeit.

Bewertung 2001 und Ausblick 2002

Alle im Jahr 2001 vorgesehenen Arbeiten wurden durchgeführt. Die Versuchsanlage 1 in Münsingen wurde am 1. Oktober und Versuchsanlage 2 in Waltalingen am 20. November in Betrieb gesetzt. Die Messdatenaufzeichnung beider Anlagen liefert Messdaten seit Inbetriebsetzung.

Zwischen 1. Januar und 30. Juni 2001 sollen folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Betrieb der beiden Versuchsanlagen unter möglichst realen Bedingungen
- Laufende Auswertungen durch Gabathuler AG
- Betriebsoptimierung soweit noch notwendig
- Spezielle Messungen zur Optimierung des Luftkühlers durch die Hochschule für Technik Rapperswil
- Abschluss der Messungen am 30. April 2002

- Rückbau der Versuchsanlagen
- Versand Schlussberichtsentswurf ca. 10. Juni 2002 durch Gabathuler AG
- Jury-Sitzung mit Präsentation der Resultate durch Gabathuler AG am Donnerstag, 20. Juni 2002 nachmittags (unter Beisein von D. Trüssel und J. Cizmar)
- Definitiver Schlussbericht per 30. Juni 2002 durch Gabathuler AG

Referenzen

- [1] J. Cizmar, E. Zahnd, D. Trüssel: Feldmessung einer Retrofit-Wärmepumpe. Bern, Bundesamt für Energie, 2001.
- [2] Th. Afjei et al.: Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen bis 25 kW (STASCH). Zwischenbericht Juli 2001. Bern, Bundesamt für Energie, 2001.
- [3] Aspen Petroleum AB (Schweden): Temper, der Kälteträger mit System. Stuttgart, Christof Fischer GmbH, o. J.