

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

EF Nr. 210061

Feldmessung einer Retrofit-Wärmepumpe

ausgearbeitet durch

Dr. Juraj Cizmar, Erich Zahnd

Hochschule für Technik und Architektur, 3400 Burgdorf
juraj.cizmar@hta-bu.bfh.ch

Daniel Trüssel (Projektleiter)

Kälte-Wärme-Technik AG, 3123 Belp
daniel.truessel@kwt.ch

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Zusammenfassung

Während der Heizperiode 2000/2001 ist ein Funktionsmuster einer Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung in den Scrollverdichter in einem Feldversuch geprüft worden. Die Prozessführung zeichnet sich u.a. dadurch aus, dass der zur Einspritzung vorgesehene Kältemittel-Strom in einem Rekuperator zuerst teilverdampft wird. Die bauliche Flexibilität wird durch das Split-Konzept gewährleistet.

Als Wärmequelle dient die Umgebungsluft.

Die **Zweikreis-Schaltung** ermöglicht die Erzeugung der **Heizwärme** mit beachtlichen Vorlauftemperaturen (bis 60°C) und **die Warmwasserbereitung**. Während sich im Winterbetrieb beide Kreisläufe zeitweise ergänzen, bleibt im Sommer nur der Warmwasserkreislauf in Betrieb.

Der Feldversuch ist allen dynamischen Einflüssen, sowohl von der Wärmequelleseite her als auch von der Verbraucherseite her ausgesetzt. Bei der vorhandenen Schaltung ist der Verdichterbetrieb deshalb unregelmässig intermittierend, mit relativ kurzen Laufzeiten. Die EN 255 schreibt jedoch für Messungen den Beharrungszustand vor. Mit programmiertechnischen Mitteln wurden deshalb die Beharrungszustände herausgefiltert und zum Zwecke weiterer rechnerischer Verarbeitung gespeichert. Es wurden also nur die Daten verwendet, die nach der jeweiligen Anlaufphase bzw. vor der jeweiligen Stillstandsphase gemessen worden sind.

Die Aussagen der Untersuchungen sind also mit diesen Einschränkungen gültig.

Eine systematische Klassifizierung der Daten ermöglicht alsdann eine überblickbare grafische Darstellung.

Im Verlauf der ersten Messversuche wurden verschiedene Änderungen notwendig. Der rechnerisch verarbeitete Datensatz umfasst damit nur die Betriebsdaten zwischen dem 27. Febr. 2001 und Ende März 2001.

Die Leistungszahl ε charakterisiert gewissermassen die "reine" Prozessführung, wogegen die COP-Zahl die Verluste und den Energieaufwand für die Nebenantriebe mitberücksichtigt. Die letztere liegt naturgemäss etwas tiefer. Die Messungen ergeben, je nach Bedingungen Werte, die 5 bis 8% unter der entsprechenden Leistungszahl ε liegen.

Die Schaltung nützt die Erfahrungen aus dem Labor-Simulationsbetrieb (Vgl. dazu [2]). So weist die Heizleistung eine erfreulich wenig abfallende Tendenz mit der sinkenden Aussenluft-Temperatur auf. Wird beispielsweise als Bezugswert die Heizleistung bei +7°C gewählt, so sinkt diese bei -7°C auf nur 86% ab.

Ein erhebliches **Verbesserungspotenzial** liegt bei der Optimierung des Wärmegewinnungskreises (optimaler Luftkühler, optimaler Wärmeträgerkreis), im Einsatz eines, für das verwendete Kältemittel geeigneten Verdichters sowie im Einsatz eines Heizwasserboilers. Nicht weniger wichtig ist dabei die sorgfältige Planung und die Analyse der thermischen Eigenschaften des Sanierungsobjektes.

Verminderung des Energiebedarfes der Hilfsantriebe (Wärmeträgerpumpe, Gebläse), 10 bis 15%, bei der Optimierung des Verdichters bis 15%, sowie durch Einbeziehung eines Heizwasserspeichers.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

Abstract

A heat pump-specimen for the production of heating energy as well as warm water supply has been tested during the heating season 2000/2001 in a field-test.

The scroll-compressor of the tested system is designed for a midstage injection during the compression. An internal heat exchanger provides a partial evaporation of the refrigerant before the injection into the compressor (fig.2.1). In order to achieve a flexible heating system, a split-concept has been chosen. The ambient air serves as the primary source for the heat-energy.

Fig. 2.1 shows that, the system consists of two circuits which allow the independent production of heating energy as well as warm water supply. During the *wintertime*, the two circuits work parallel whereas during the *summertime*, only the water supply circuit is in function.

The ever changing parameters of the heat source (ambient air) as well as the irregularity of the warm water consumption made the measurements fairly challenging. There is no additional energy storage tank.

For those reasons, an irregular running regime of the compressor was registered. However, the EN255 regulations demand a steady performance.

By using a filtering technique, all data have been used, which allow a simulation of a quasi-steady performance. A systematic classification of the heating temperature head enabled us to create synoptical graphs.

A considerable improvement can be achieved by optimisation of the heat transport system between the heat pump and the air-cooler, optimisation of the air cooler, as well as using an energy storage tank

A further possibility for improvement is located by applying a scroll compressor for the R407C-refrigerant.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Abstract

	Seite
1. Ziele der Arbeit	5
2. Lösungsweg	6
2.1 Thermodynamisches Konzept	6
2.2 Prüfungsort	7
2.3 Technische Auslegungsdaten der geprüften Wärmepumpe	8
2.4 Aufbau der Versuchsanlage	8
2.5 Auswahl der Verdichter	9
2.6 Wärmeübertrager	9
2.7 Expansionsventile	9
2.8 Auswertungs-Grundlagen	9
2.9 Definitionen	10
2.10 Herleitung zur Berechnung der JAZ_w	11
2.11 Datenerfassung	12
2.12 Genauigkeitsangaben und Fehlerabschätzung	12
3. Hauptergebnisse	12
3.1 Auswertung der Messungen	12
3.2 Prozesseigenschaften der Wärmepumpe ohne Warmwasserbereitung	15
3.3 Prozesseigenschaften des Wärmepumpen-Systems mit Warmwasserbereitung (Winterbetrieb)Expansionsventile	19
3.4 Abschätzung der Jahresarbeitszahl JAZ_w	20
3.5 Abschätzung der Jahresarbeitszahl JAZ_s	21
3.6 Verbesserungspotenzial	22
4. Symbolverzeichnis	23
5. Literaturverzeichnis	23
6. Anhang	24

1 Ziele der Arbeit

Bei den bestehenden Radiatoren-Heizungen in wärmesanierten Gebäuden sind Vorlauftemperaturen über 50° erforderlich. Die im Laborversuch gemessenen Werte ergaben dank der Dampfeinspritzung während der Verdichtung bei derart hohen Temperaturhuben eine um rund 15% höhere Leistung gegenüber der Prozessführung ohne Einspritzung. Zudem wird die maximale Verdichtungsendtemperatur gesenkt, womit allfälligen Ölproblemen entgegengewirkt wird. In einem vorangehenden Projekt wurde bei Laborbedingungen eine Wärmepumpe geprüft, die diesen hohen Temperaturhub bei beachtlichen Leistungszahlen ermöglicht. In diesem Feldversuch dient die Umgebungsluft als Wärmequelle.

Gemäss Verfügung sind die folgenden Arbeiten durchgeführt worden:

- a) Bau eines Funktionsmusters und dessen Einbau in ein 3 Familienhaus mit bestehender Wärmepumpenheizung
- b) Überprüfung der im Laborversuch ermittelten Daten des Funktionsmusters einer Luft/Wasser-Retrofit-Wärmepumpe
- c) Erproben der Funktionstüchtigkeit im praktischen Betrieb
- d) Erfassung aller erforderlichen Daten während der Heizperiode 2000/2001 und daraus die
- e) Ermittlung der folgenden Grössen:
Leistungszahl nach EN255, Gütegrad, Heizleistung, Häufigkeitsverteilung der Wärmepumpenlaufzeiten.
Messung und Darstellung der Verdichteraustrittstemperatur in Abhängigkeit der Aussentemperatur.
Abschätzung der zu erwartenden Jahresarbeitszahl ohne und mit Warmwasserbereitung.
- f) Ausarbeiten und Einreichen eines Schlussberichtes.

Die Messergebnisse werden für vier verschiedene Heizungs-Vorlauftemperaturbereiche in Funktion der Aussentemperatur wie folgt dokumentiert:

- a) Leistungszahl ε
- b) Gütegrad η_{WP}
- c) Heizleistung
- d) Häufigkeitsverteilung der Betriebszeiten pro Einschaltung
- e) COP in Funktion der Aussentemperatur, ohne Warmwasserbereitung
- f) Gütegrad η_{EN} ohne Warmwasserbereitung
- g) Heizleistung
- h) Häufigkeitsverteilung der Betriebszeiten
- i) COP mit Warmwasserbereitung
- j) Gütegrad η_{EN} mit Warmwasserbereitung
- k) Verdichteraustrittstemperatur
- l) JAZ_h und JAZ_w

Im Anhang befinden sich noch Zusatzinformationen, u.A. der Überblick über die Anteile der elektrischen Leistung, COP der Heizungs-Wärmepumpe ohne el. Energiebedarf zum Antrieb der Wärmeträger-Umwälzpumpe und des Gebläses, Leistungsdaten der WP mit Anlauf- und Abstellphasen.

Für den Gütegrad und die bezogene Heizleistung wird eine Fehlerabschätzung gemacht.

2 Lösungsweg

2.1 Thermodynamisches Konzept

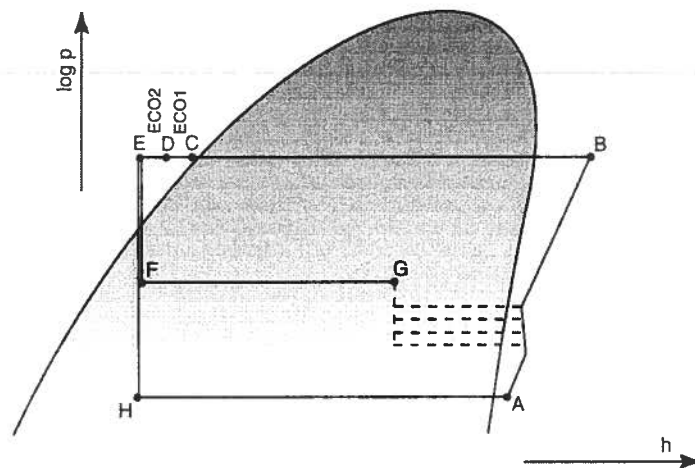
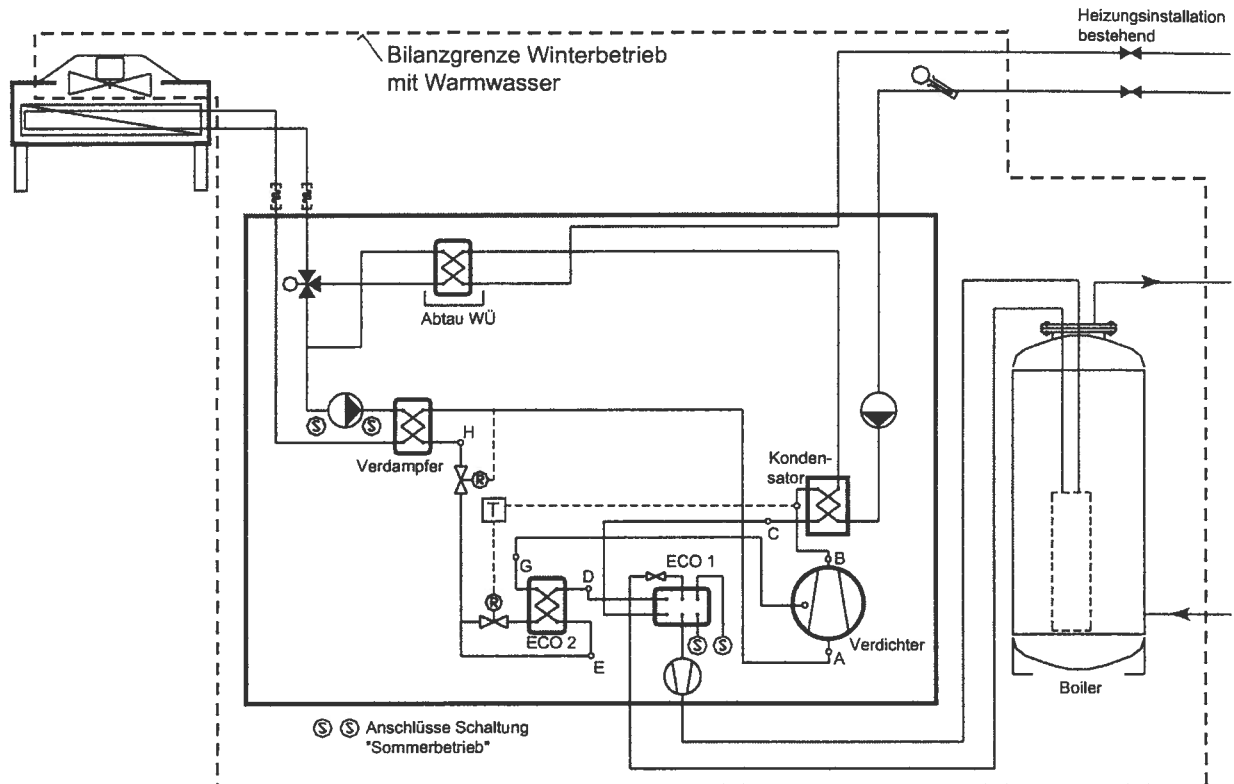


Bild 2.1: Prozessverlauf für die Schaltung "Winterbetrieb"

Die Versuchsanlage kann bei zwei verschiedenen Schaltungen betrieben werden:

a) Winterbetrieb (vgl. Bild 2.1):

Diese Schaltung zeichnet sich dadurch aus, dass das Brauchwasser mit Hilfe von ECO1 erwärmt wird. Mit ECO2 wird der Einspritz-Massenstrom teilweise verdampft. Hier handelt es sich im Prinzip um die "innere" Rekuperation ¹⁾.

b) Sommerbetrieb

Der Heizungs-Hauptkreislauf wird im Sommer abgeschaltet.

Der Brauchwasser-Kreislauf entnimmt die erforderliche Wärme direkt dem Wärmeträger-Kreislauf (Anschlüsse s-s). Der Ventilator ist abgeschaltet.

Die Kondensationswärme wird direkt im Boiler an das Warmwasser abgegeben.

¹⁾ Dieses Prinzip ist bei den Dampfkreisprozessen als eines der Mittel zur Wirkungsgradverbesserung wohl bekannt

2.2 Prüfungsort

Geprüft wurde die Wärmepumpe in einem Dreifamilienhaus in 3078 Richigen, mit klassischer Radiatoren-Heizung. Die Wandbemessung und die Wandisolation des Gebäudes entsprechen dem Standard der 50-er Jahre. Es handelt sich also um ein typisches Wärmesaniierungsobjekt. Die bestehende Wärmepumpe wurde während den Feldmessungen durch den Prüfling ersetzt. Dieser verfügt über einen zweiten Wärmepumpenkreislauf mit Boiler für die Warmwasserbereitung. Diese zweite, kleinere Wärmepumpe entnimmt im "Sommer-Betrieb" die Wärme direkt der Umgebungsluft. Im "Winter-Betrieb" wird dagegen das Kältemittel der Heizungs-Wärmepumpe unterkühlt.



Bild 2.2: 3-Familienhaus in Richigen

2.3 Technische Auslegungsdaten der geprüften Wärmepumpe

Heizungs-WP:	Heizleistung:	26,4 kW
	Kälteleistung:	17,5 kW
	Arbeitspunkt KT/VT:	-6,5/+ 54°C
	Kreislauf:	Einstufig mit einem Scroll-Verdichter.
		Besonderheit: Dampf-Zwischeneinspritzung während der Verdichtung.

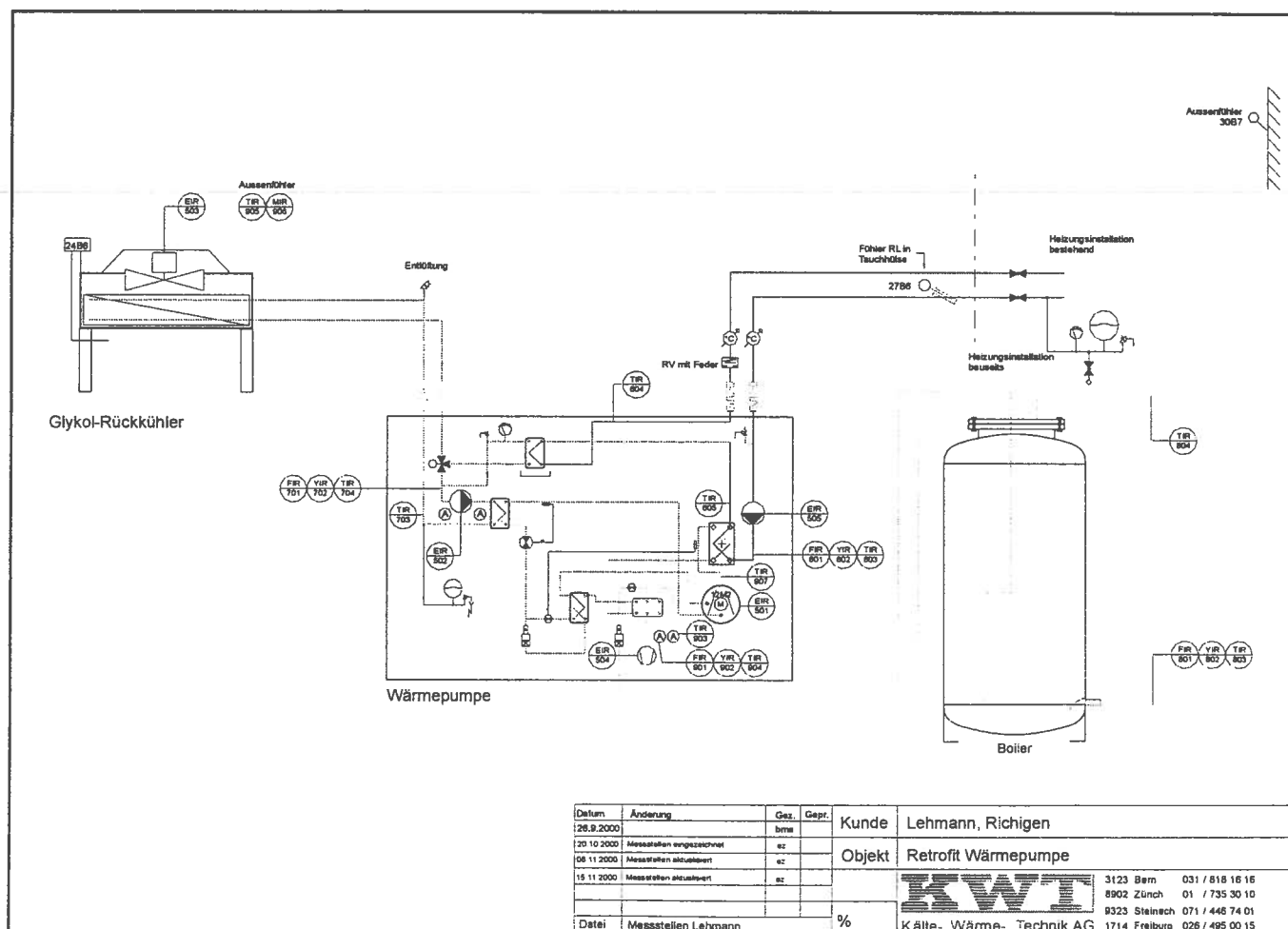
Brauchwasser WP:


Heizleistung:	2,2 kW
Kälteleistung:	1,6 kW
Arbeitspunkt KT/VT:	+ 15/+ 55 °C

Kältemittel:
Hauptkreis: R407C
WW-Kreis: R134a

2.4 Aufbau der Versuchsanlage

Die geprüfte Anlage ist als Split-Anlage konzipiert. Dies ermöglicht eine Installation in Sanierungsobjekten, ohne grossen baulichen Aufwand.



Datum	Änderung	Ges.	Gepr.	Kunde	Lehmann, Richigen					
26.9.2000		bis		Objekt	Retrofit Wärmepumpe					
20.10.2000	Messstellen eingetragen	nz				3123 Bern	031 / 818 16 15			
09.11.2000	Messstellen akustischwert	nz				8902 Zürich	01 / 735 30 10			
15.11.2000	Messstellen akustischwert	nz				8323 St. Gallen	071 / 448 74 01			
Datei	Messstellen Lehmann		%		1214 Ersthuber	026 / 495 00 15				
Kälte- Wärme- Technik AG										

2.5 Auswahl der Verdichter

Nachdem die Auslegung des Systems erfolgt war, wurde die exakte Spezifikation der Anlageteile möglich. Für den Hauptkreislauf wurde ein hermetischer Scroll-Verdichter ausgewählt. Er verfügt über einen Anschluss für die Eindüsung von flüssigem oder teilweise verdampftem Kältemittel (Nassdampf). Zu den vorteilhaften Eigenschaften dieses Verdichtertyps zählt zweifelsohne die Unempfindlichkeit gegen Flüssigkeit im Verdichterraum.

Der Warmwasser-Kältekreislauf wird mit einem kleinen Kolbenverdichter betrieben.

Die Nenndrehzahl beider Verdichter beträgt 2900 min^{-1} .

Im Verlauf der Messungen hat sich herausgestellt, dass die Laufzeiten des Hauptverdichters zu kurz sind. In der Folge ist der vorhandene Verdichter durch einen kleineren ersetzt worden.

2.6 Wärmeübertrager

Bezeichnung	Kreis	Typ
Verdampfer	Hauptkreis-Heizung	Platten-WÜ
Kondensator	Hauptkreis-Heizung	Platten-WÜ
Unterkühler	Brauchwasser-Kreis	Platten-WÜ
Abtau-Übertrager	Wärmeträgerkreis	Platten-WÜ
Aussen-Luftkühler	Wärmeträgerkreis	Rippenrohr-WÜ

2.7 Expansionsventile

Der Hauptkreis ist mit einem thermostatischen Expansionsventil ausgerüstet (vgl. Bild 2.1). Der Temperaturfühler des Hauptkreises befindet sich am kältemittelseitigen Ausgang des Verdampfers.

Der Einspritzkreis hingegen ist mit einem Magnetventil ausgerüstet, der von einem Thermostat angesteuert wird. Die Verdichter-Austrittstemperatur dient dabei als Führungsgrösse für die Regulierung der Kältemittel-Einspritzung in den Verdichter. Als Expansionsorgan dient dabei ein Handreguliertventil.

2.8 Auswertungs-Grundlagen

Der natürliche tageszeitliche Temperaturverlauf der Umgebung ergibt bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe variierende Betriebszahlen der Wärmepumpe.

Der dynamische Zusammenhang zwischen der Leistungszahl ε und der Umgebungstemperatur ist von der Bauart der Wärmepumpe, von den wärmetechnischen Eigenschaften des Gebäudes sowie vom Verhalten der Wärmeverbraucher abhängig. Damit nun Aussagen für eine breitere Verwendung gemacht werden können, ist eine sorgfältige Datenauswahl erforderlich.

Die Auswahl trifft vor allem die Betriebsdaten, die sich innerhalb einer bestimmten Aussentemperatur-Klasse befinden. Bei der grossen Anzahl von Messreihen kann diese Arbeit nur programmiertechnisch bewältigt werden.

2.9 Definitionen

Leistungszahl

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_h}{P_h} \quad (1)$$

Carnot-Leistungszahl

$$\varepsilon_C = \frac{T_{VL}}{T_{VL} - T_{AL}} \quad (2)$$

COP, Coefficient of Performance

$$COP = \frac{\dot{Q}_h + \dot{Q}_{ww} + \dot{Q}_{SPA}}{P_h + P_{PG} + P_{Ve} + P_K + P_{SR} + P_{ww}} \quad 2) \quad (3)$$

Gütegrad

$$\eta_{WP} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_C} \quad (4)$$

$$\eta_{EN} = \frac{COP}{\varepsilon_C} \quad (5)$$

Legende:

T_{VL} = Vorlauftemperatur, Heizwasser

T_{AL} = Aussenlufttemperatur

\dot{Q}_h = abgegebene Heizleistung der Wärmepumpe (aufgewendete Abtauleistung berücksichtigt)

\dot{Q}_{ww} = abgegebene Warmwasserleistung

\dot{Q}_{SPA} = Wärmeverlustleistung der Speicheranlage (Warmwasserboiler)

P_h = Leistungsaufnahme des Verdichters, Heizkreis

P_{GP} = Leistungsaufnahme der Glykolpumpe, Wärmequellenkreis

P_{Ve} = Leistungsaufnahme des Ventilators, Wärmequellenkreis

P_K = anteilige Leistungsaufnahme der Heizwasser-Umwälzpumpe (nach EN255)

P_{SR} = Leistungsaufnahme der Steuerung, Regelung

P_{ww} = Leistungsaufnahme des Verdichters, Warmwasserkreis

η_{WP} = Gütegrad WP ohne WW - Bereitung und ohne übrige Hilfsenergien

η_{EN} = Gütegrad WP mit WW – Bereitung (nach EN255)

²⁾ Der intermittierende Betrieb bringt einen zeitweisen Abtauvorgang, der von der Umgebung selbst, ohne besonderen Energieaufwand erfolgt. Berücksichtigt werden die effektiv gemessene Leistungen, also inkl Abtauaufwand.

Jahresarbeitszahl Winterbetrieb, JAZ_w

$$JAZ_w = \frac{Q_h + Q_{ww} - Q_{SPA}}{W_h + W_{PG} + W_{Ve} + W_K + W_{SR} + W_{ww}} \quad (6)$$

Die jährlich produzierten Energieumsätze sind:

Q_h	=	produzierte Heizwärme
Q_{ww}	=	produzierte Warmwasserwärme
Q_{SPA}	=	Wärmeverluste der Speicheranlage
W_h	=	Energieverbrauch des Verdichters, Heizkreis
W_{GP}	=	Energieverbrauch der Glykelpumpe, Wärmequellenkreis
W_{Ve}	=	Energieverbrauch des Ventilators, Wärmequellenkreis
W_K	=	anteiliger Energieverbrauch der Heizwasser-Umwälzpumpe (nach EN255)
W_{SR}	=	Energieverbrauch der Steuerung, Regelung
W_{ww}	=	Energieverbrauch des Verdichters, Warmwasserkreis

Einige wenige Umformungen dieser Formel erlauben uns die gemessenen COP-Werte in JAZ_w umzurechnen.

2.10 Herleitung zur Berechnung der JAZ_w

$$JAZ_w = \frac{Q_h \cdot \left[1 + \frac{Q_{ww}}{Q_h} - \frac{Q_{SPA}}{Q_h} \right]}{\left[W_h + W_{PG} + W_{Ve} + W_K + W_{SR} \right] \cdot \left[1 + \frac{W_{ww}}{W_h + W_{PG} + W_{Ve} + W_K + W_{SR}} \right]} \quad (8)$$

Mit JAZ_h wird nun die Jahresarbeitszahl der Raumheizung bezeichnet. Gestützt auf die Überlegungen in (3) wird sinngemäss:

$$JAZ_h = \frac{Q_h}{W_h + W_{PG} + W_{Ve} + W_K + W_{SR}} \quad (9)$$

Und damit ist

$$JAZ_w = JAZ_h \cdot \frac{1 + \frac{Q_{ww}}{Q_h} - \frac{Q_{SPA}}{Q_h}}{1 + \frac{W_{ww}}{W_h + W_{PG} + W_{Ve} + W_K + W_{SR}}} \quad (10)$$

Mit f_{ww} wird nun der Warmwasser-Faktor eingeführt:

$$f_{ww} = \frac{1 + \frac{Q_{ww}}{Q_h} - \frac{Q_{SPA}}{Q_h}}{1 + \frac{W_{ww}}{W_h + W_{PG} + W_{Ve} + W_K + W_{SR}}} \quad (9)$$

Damit erhält man

$$JAZ_W = JAZ_h \cdot f_{ww} \quad (10)$$

Der Energieumsatz für die Bereitstellung von Warmwasser ist im Verhältnis zum Energieumsatz für die Raumheizung bei typischen Sanierungsbauten klein. Der Wärmebezug für die Bereitstellung von Warmwasser erfolgt innerhalb des, hauptsächlich für Heizzwecke arbeitenden Systems. Mit dem Warmwasser-Faktor f_{ww} wird JAZ_h zu JAZ_W modifiziert.

Der Faktor ist seinerseits wieder von der JAZ_h und vom Verhältnis der produzierten WW-Wärme am gesamten Wärmeumsatz abhängig.

Die Beziehung (10) ermöglicht uns aber, mit Hilfe der allgemein zugänglichen Klimadaten die JAZ_W abzuschätzen.

Die Ermittlung von JAZ_h erfolgt mit Hilfe der Ausführungen in [4].

Als Heizgrenze wird dabei die Aussenlufttemperatur von 17°C festgelegt.

Als Hauptparameter für die Bestimmung der Temperaturklasse dient die Vorlauftemperatur ϑ_{VL} :

40..45°C

45..50°C

50.. 55°C

55..60°C

2.11 Datenerfassung

Die Sensorsignale werden mit einem 20-Kanal Datenlogger HP 34970A registriert und über die serielle Schnittstelle (RS232) auf einen PC übertragen.

Mit einem Sortiervorgang werden alsdann die Daten nach Bedarf den gewünschten Kategorien zugewiesen, wodurch eine tabellarische und grafische Darstellung ermöglicht wird.

2.12 Genauigkeitsangaben und Fehlerabschätzung

Die maximalen Abweichungen der Messwerte ergeben sich aus der Addition der Sensor-Toleranzen und der Toleranzen der Datenerfassung. Die folgende Tabelle gibt darüber Auskunft:

Messgrösse	Messprinzip	Max. Abweichung inkl. Datenerfassung
Temperatur ¹⁾	PT 100. 1/3 DIN B 4-Leiter	± 0,5% MW ± 0.16°C
Volumenstrom	Flügelrad	± 3% MW
Elektr. Leistung	Spannungs- und Strommessung mit Hallsensoren	± 3% MW inkl. Stromwandler
Relative Luftfeuchte		± 1%
Umgebungstemperatur	PT 100. 1/3 DIN B mit Messumformer	± 0.3°C

Durch Propagation der Messfehler ergeben sich die maximalen relativen Fehler. Mit der steigenden Anzahl der Messgrößen nimmt auch der max. erreichbare Messfehler zu. Allerdings sinkt die Wahrscheinlichkeit der Messfehlerpropagation im Sinne des Max. Fehlers mit der Anzahl der Messgrößen. Zudem variiert die statistische Sicherheit der Messwerte mit der Anzahl der verfügbaren Ereignisse. Eine solche Wahrscheinlichkeitsrechnung würde den Rahmen dieser Auswertung sprengen.

Im Sinne der qualitativen Wertung dieser Feldmessung reicht die in der Praxis oft angewandte Methode der Messfehler-Abschätzung aus :

$$Fehler = \sqrt{\sum_{(i)} Fehler_i^2}$$

Die so erhaltene Toleranzen ergeben eine brauchbare Orientierung.

¹⁾ Bei der Messung der Temperaturdifferenzen entfällt der Toleranzwert von 0.16°C , da die Sensoren gegenseitig abgestimmt worden sind.

3. Hauptergebnisse

3.1 Auswertung der Messungen

Der Betrieb des Heizkreises der Wärmepumpe und jener des Warmwasser-Kreislaufes arbeiten nicht synchron. Die jeweilige Ansteuerung erfolgt je nach Bedarf des Verbrauchers.

Die erhaltenen Daten müssen also je nach Verwendungszweck entsprechend sortiert werden. Die EN255 schreibt für die Ermittlung der Leistungsdaten einen Beharrungszustand vor. In einem Feldversuch ist ein Beharrungszustand kaum erreichbar.

In unserem Feldversuch lief zudem der Verdichter häufiger an als ursprünglich vorgesehen. Die kurzen Laufzeiten zwangen zur Wahl eines Sortierkriteriums, das einen stationären Betriebszustand nachahmt.

Im Bild 3.1 ist der Verlauf der Vorlauf- und Rücklauf Temperatur dargestellt. Für das Herausfiltern der Anlaufvorgänge ist als Kriterium die Differenz { Vorlauf Temperatur minus Rücklauf Temperatur > 6° } gewählt worden. Für die Abstellvorgänge dient die Messung der elektr. Leistung des Verdichters. Das bedeutet, dass alle Daten, bei denen die obengenannten Kriterien erfüllt sind, für die weitere rechnerische Verarbeitung verwendet werden. Die übrigen Daten werden ignoriert. Eine Ausnahme bildet die Abtauung. Die Messdaten der Abtauung wurden immer verwendet.

Die Auswertungen basieren auf Messdaten, die im Zeitraum vom 26. Febr. 2001 und Ende März 2001 registriert worden sind.

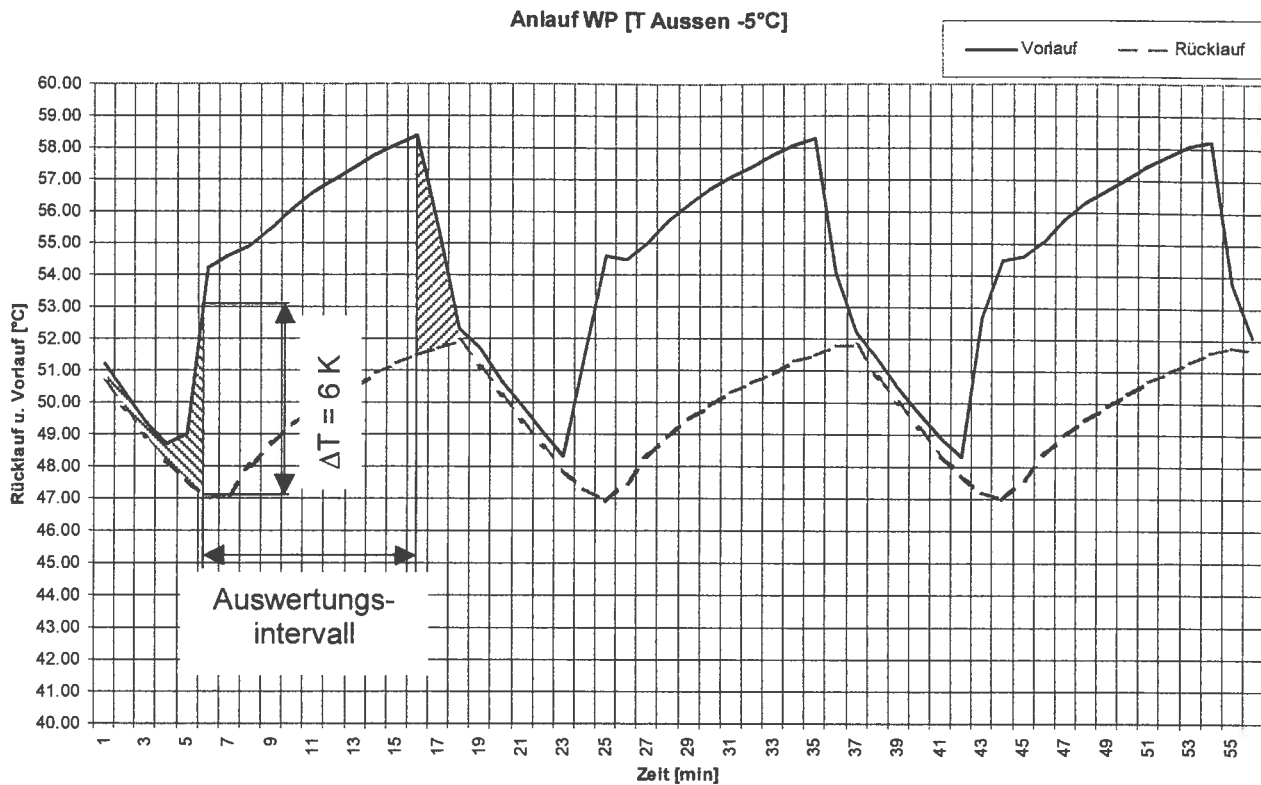


Bild 3.1: Temperaturverlauf Vorlauf/Rücklauf (Ausschnitt)

Die Steuerung der Anlage erlaubt sowohl einen unabhängigen als auch einen kombinierten Betrieb des Heizkreislaufes und des WW-Kreislaufes. Die Betriebsregime beeinflussen sich gegenseitig, wodurch auch die Leistungsdaten entsprechend verschieden ausfallen.

Das recht anspruchsvolle Sortiervverfahren liefert die charakteristischen Leistungswerte, die den folgenden Kategorien zugewiesen werden:

- a) Wärmepumpe ohne Warmwasserbereitung (Winterbetrieb)
- b) Wärmepumpe mit Warmwasserbereitung (Winterbetrieb)
- c) Warmwasser-Wärmepumpe (Sommerbetrieb)

3.2 Prozesseigenschaften der Wärmepumpe ohne Warmwasserbereitung (Winterbetrieb)

Berechnet aus den Messungen nur Heizbetrieb, ohne Warmwasser.

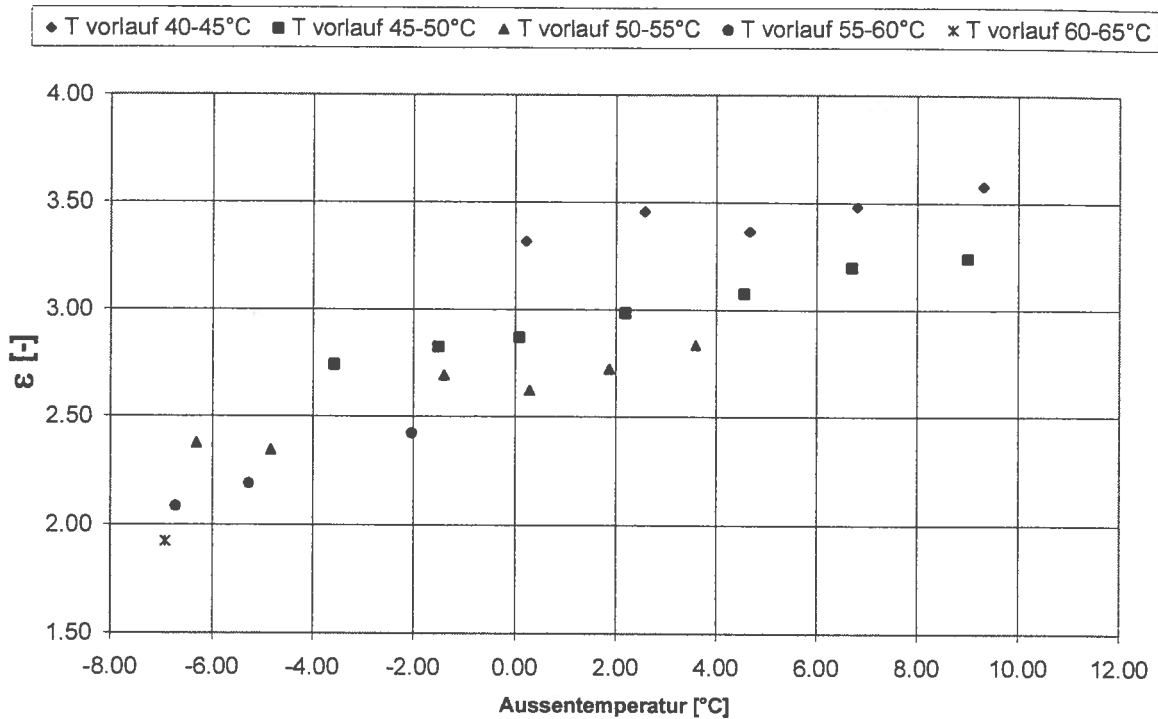


Bild 3.2: Leistungszahl ε in Funktion der Aussenlufttemperatur, berechnet aus den thermischen Messungen der externen Ströme und sortiert nach Vorlauftemperaturen. Genauigkeit: $\pm 4,5\%$

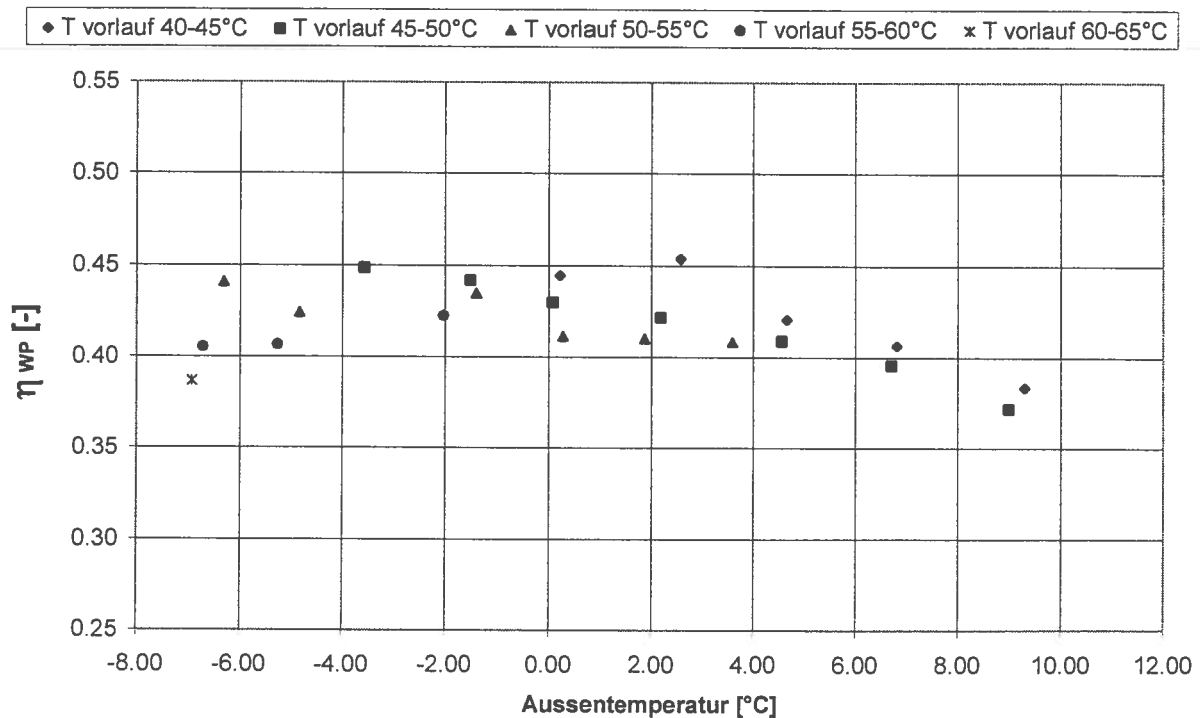
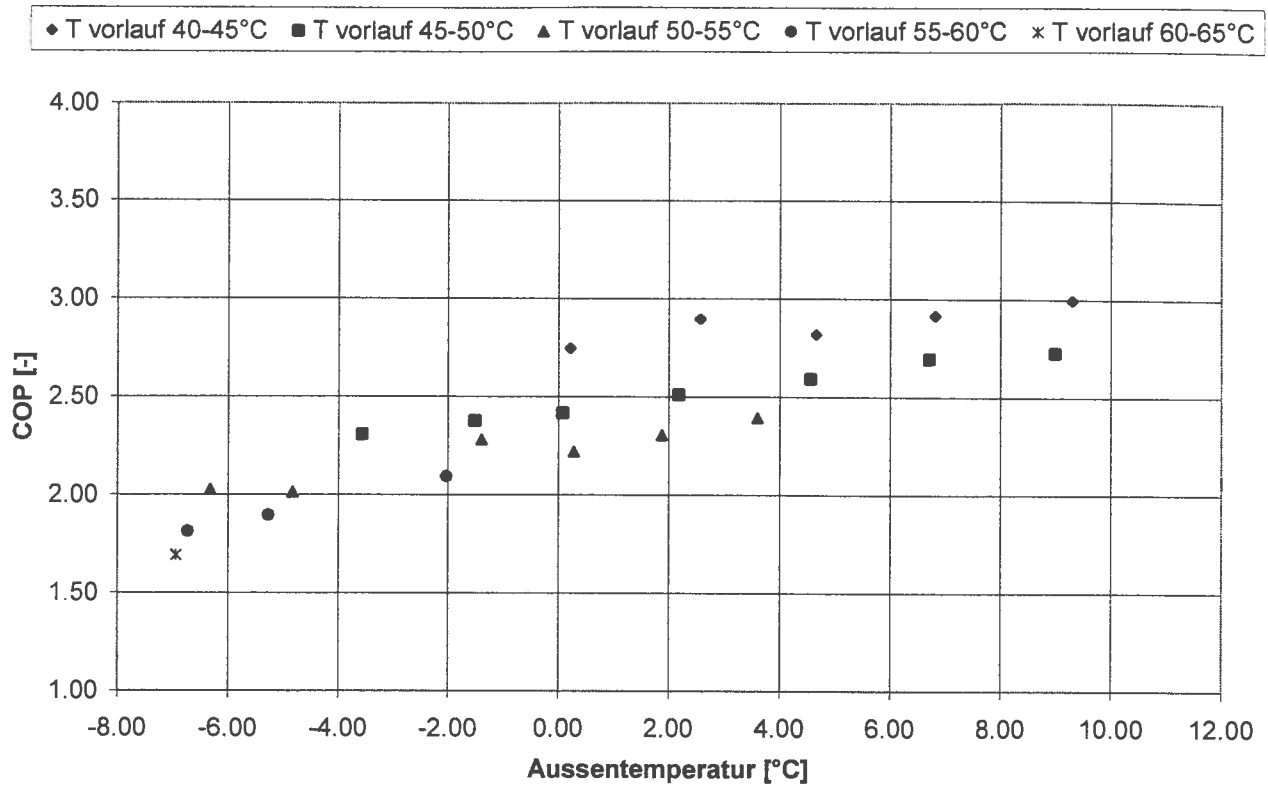
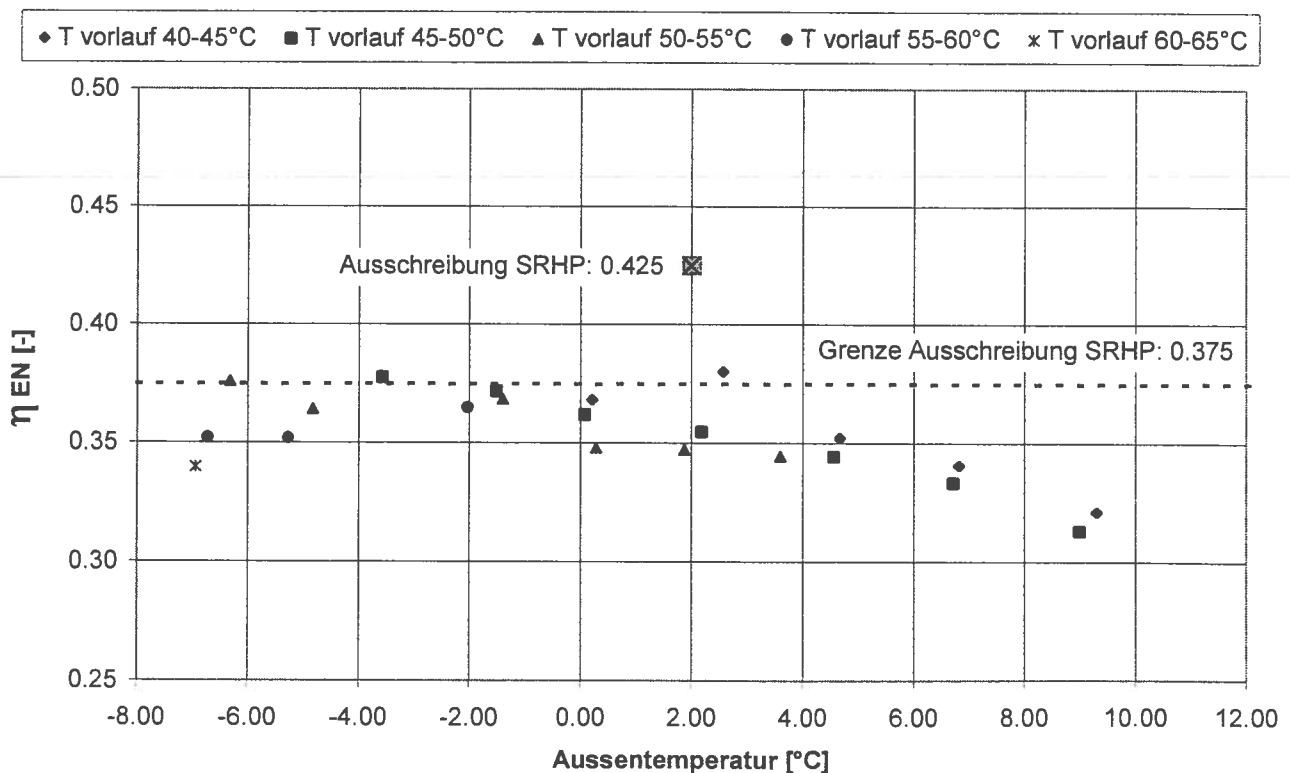


Bild 3.3: Gütegrad η_{WP} . Genauigkeit: $\pm 5,5\%$

Bild 3.4: COP in Funktion der Aussenlufttemperatur (ohne Warmwasserbereitung). Genauigkeit : $\pm 6,5\%$.Bild 3.5: Gütegrad η_{EN} in Funktion der Aussenlufttemperatur. Genauigkeit : $\pm 10\%$.

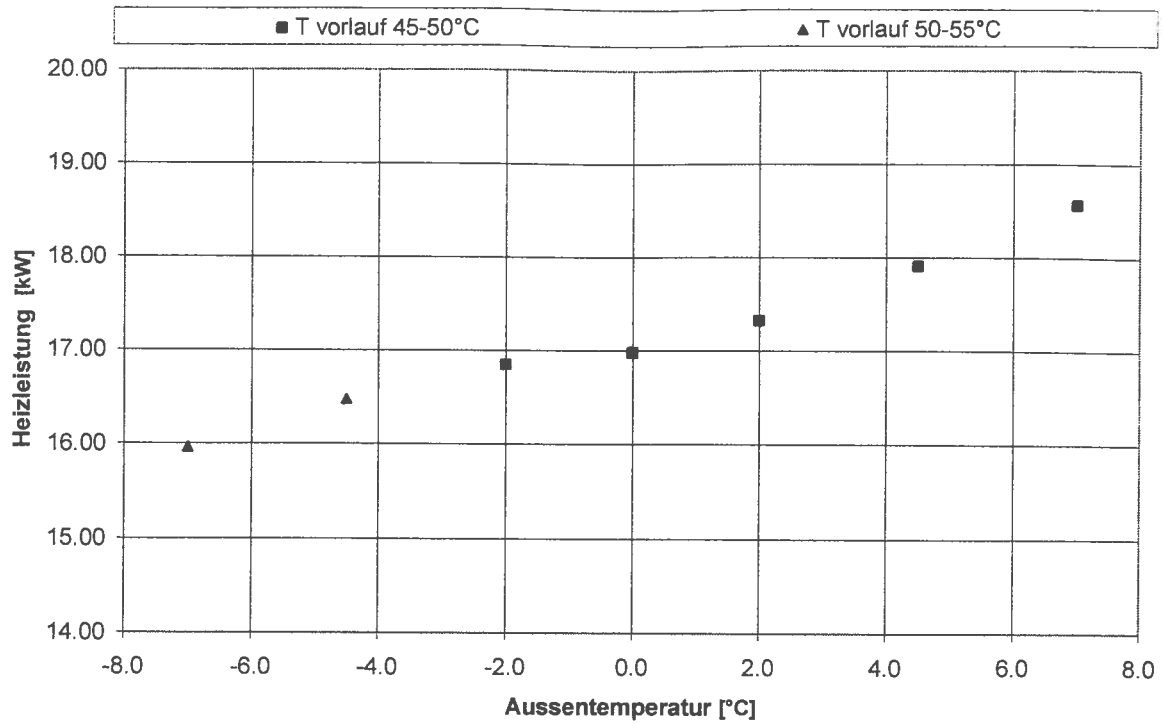


Bild 3.6: Abnahme der Heizleistung bei sinkender Aussenluft-Temperatur (ohne Warmwasserbereitung). Genauigkeit : $\pm 3\%$.

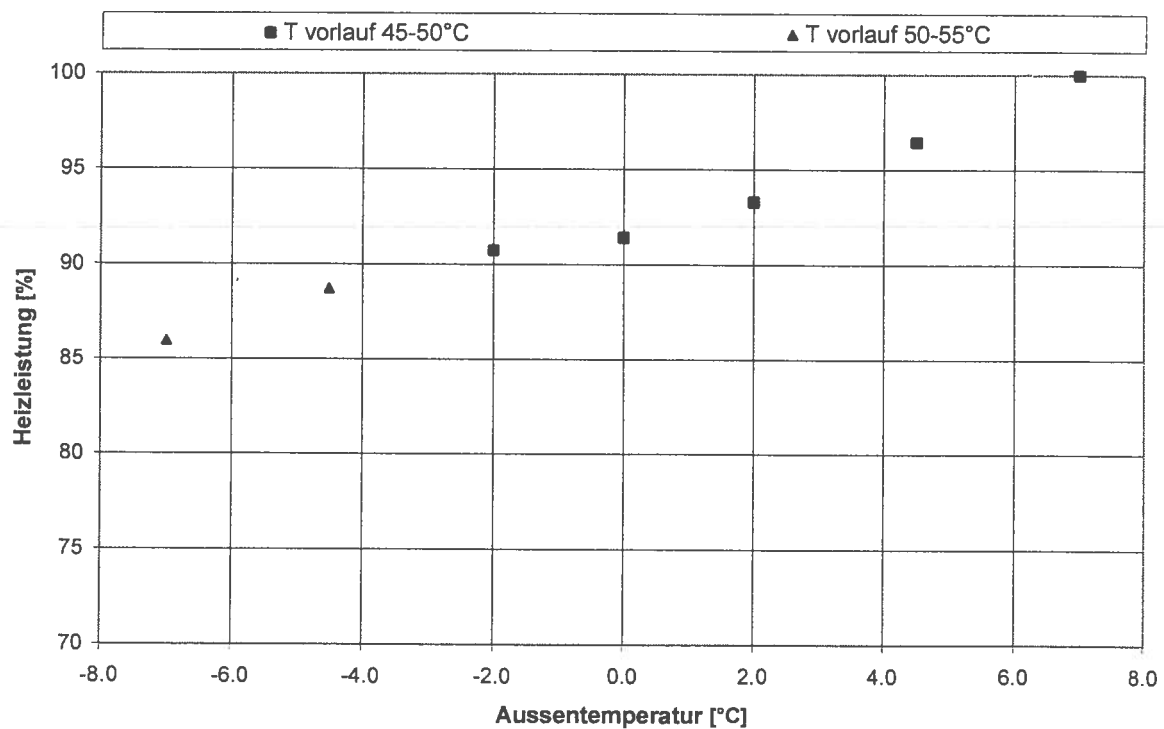


Bild 3.7: Prozentuale Abnahme der Heizleistung bei sinkender Aussenluft-Temperatur (ohne Warmwasserbereitung). 100% bei A7/W45-50.

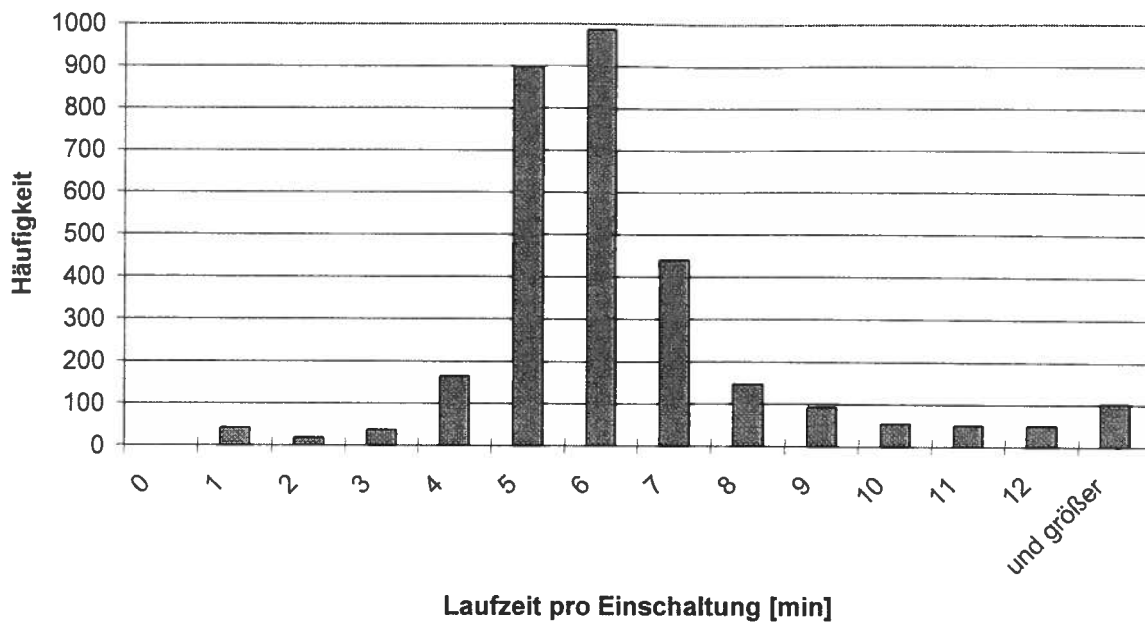


Bild 3.8: Häufigkeitsverteilung der Betriebszeiten pro Einschaltung:
Wärmepumpe ohne Warmwasserbereitung.

3.3 Prozesseigenschaften des Wärmepumpen-Systems mit Warmwasserbereitung (Winterbetrieb, WW 52°C)

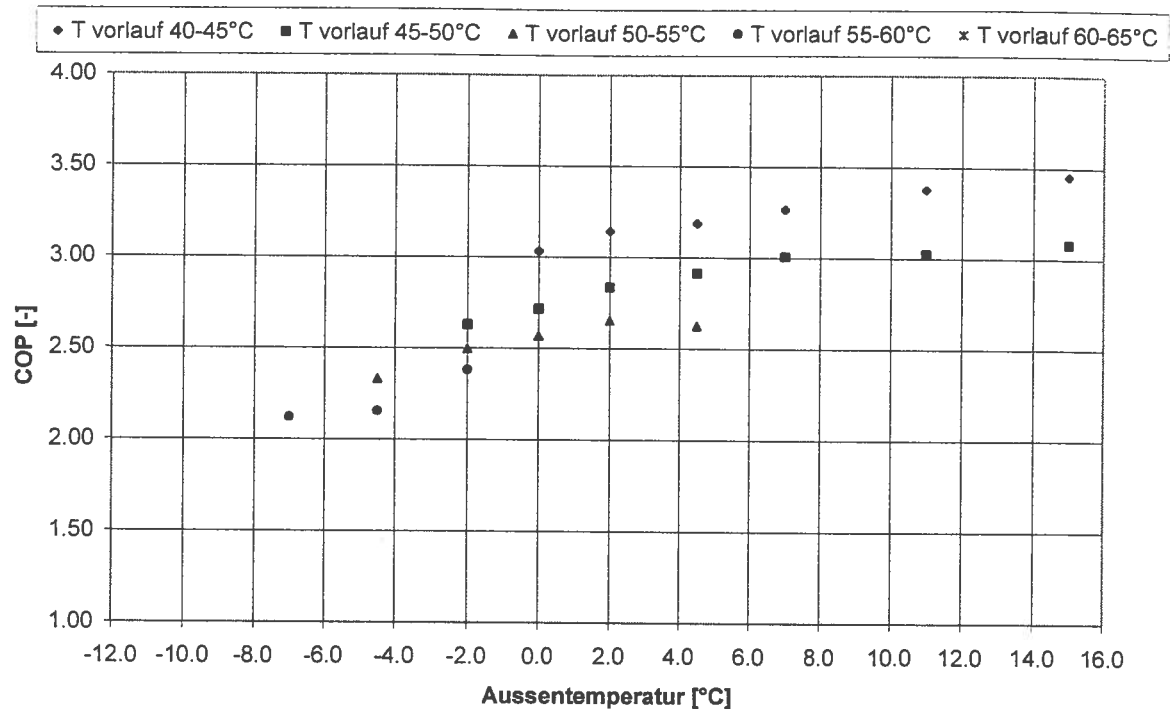


Bild 3.9: COP in Funktion der Aussenlufttemperatur. Genauigkeit : $\pm 6,5\%$.

Gemäss Definition beinhaltet COP die Fremd-Abtauungsenergie. Der Verdichterbetrieb ist jedoch intermittierend (Vgl Bild 3.8). Bei Aussenlufttemperaturen über 0°C wird ein Teil der erforderlichen Abtauwärme durch die Umgebung aufgebracht.

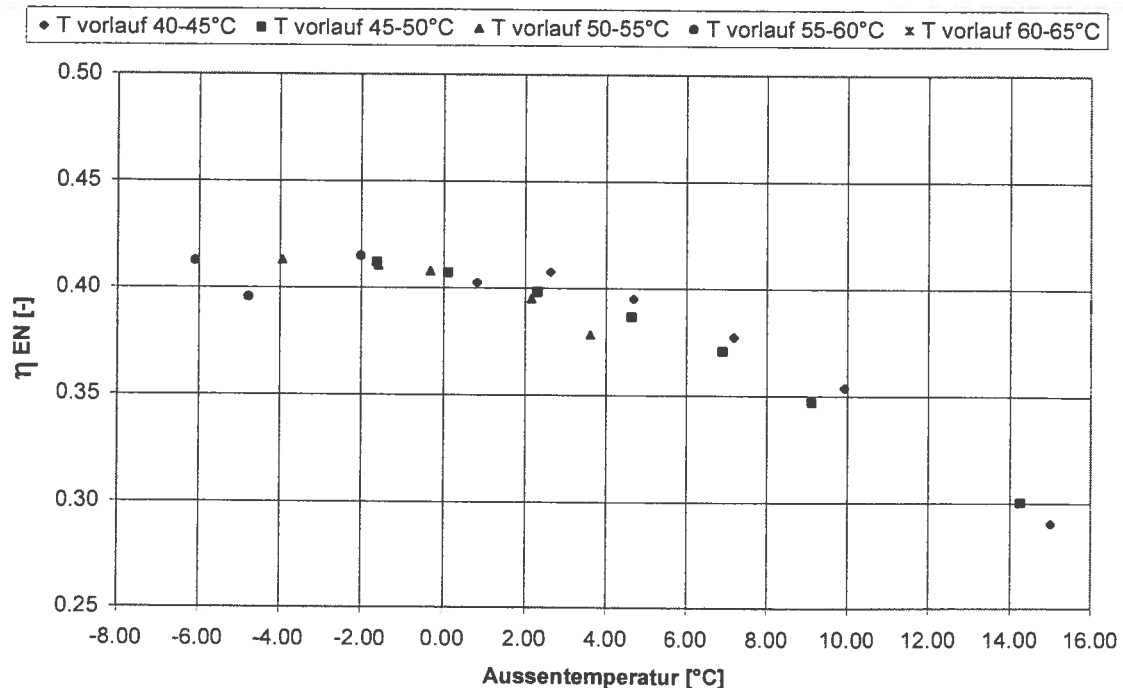


Bild 3.10: Gütegrad η_{EN} in Funktion der Aussenlufttemperatur. Genauigkeit : $\pm 10\%$.

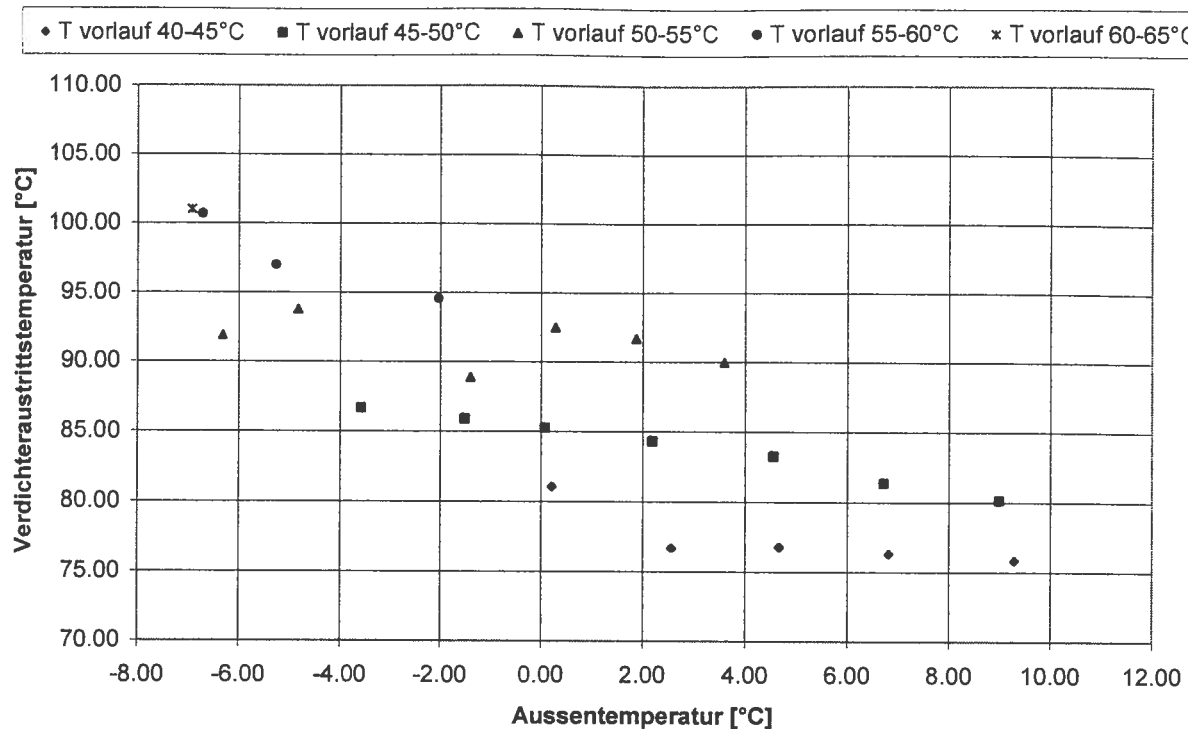


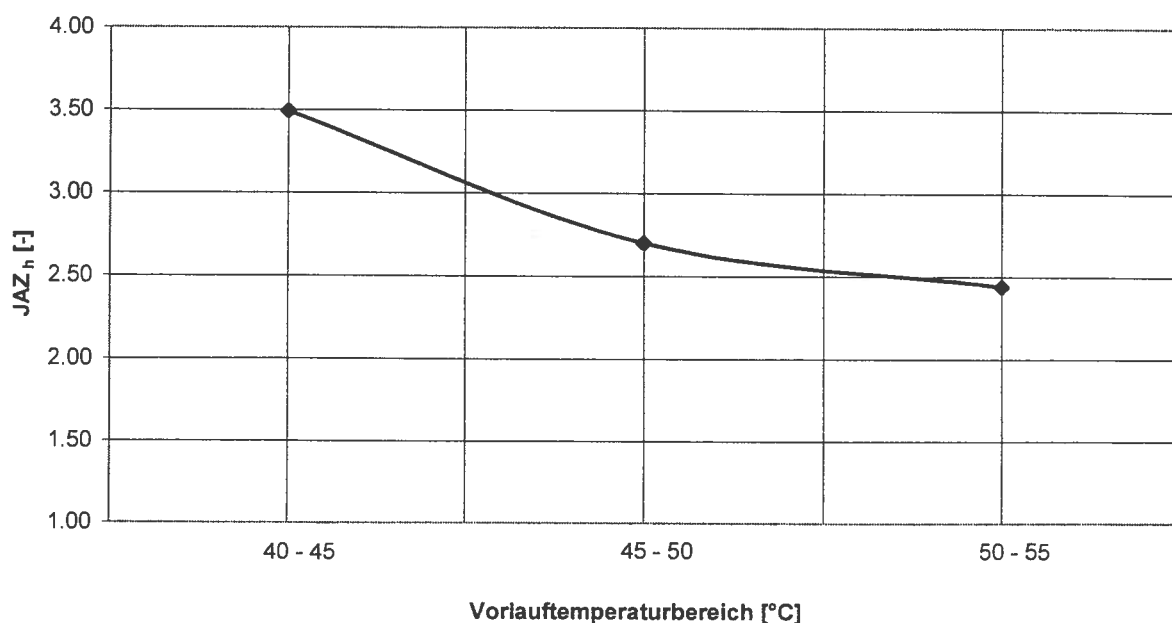
Bild 3.11: Verdichteraustrittstemperatur in Funktion der Aussenlufttemperatur.

3.4 Abschätzung der Jahresarbeitszahl JAZ_w und JAZ_h

Mit JAZ_w wird die Jahresarbeitszahl für den Winterbetrieb bezeichnet. In dieser werden nebst der Heizwärme und der Brauchwasserwärme auch die Speicheranlage-Verluste berücksichtigt. Vgl dazu die Definition (6) im Kap. 2.9.

Mit JAZ_h wird die Jahresarbeitszahl bezeichnet, mit der die Heizwärme Q_h erzeugt wird. Vgl. hierzu die Definition (9) im Kap. 2.9.

Für die Ermittlung der Jahresarbeitszahl JAZ_h ist der durchschnittliche Tagestemperatur-Verlauf verwendet worden, der durch die MeteoSchweiz in Bern-Liebfeld in den letzten 10-Jahren ermittelt worden ist.

Bild 3.12: JAZ_h in Funktion der Vorlauftemperatur bei Auslegungsbedingungen.

Wie aus den Herleitungen im Kap. 2 hervorgeht, ist der Warmwasser-Faktor sehr klein; Die Verläufe JAZ_h und JAZ_w sind deshalb nahezu identisch.

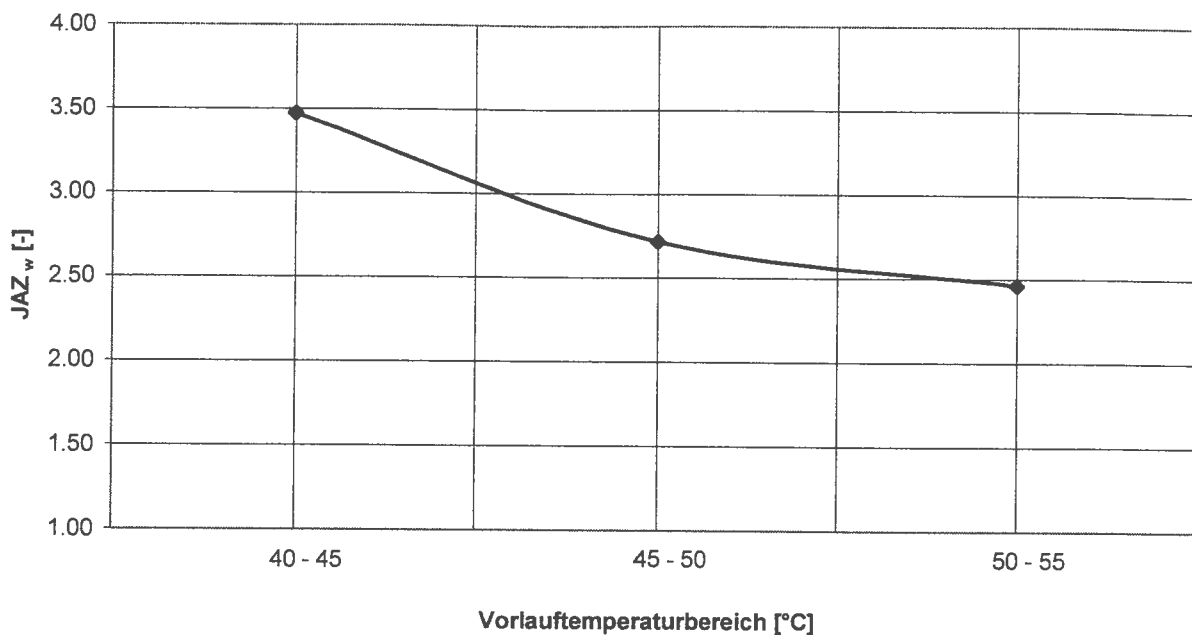


Bild 3.13: JAZ_w in Funktion der Vorlauftemperatur bei Auslegungsbedingungen.

3.5 Abschätzung der Jahresarbeitszahl JAZ_s

Unter JAZ_s wird die Jahresarbeitszahl für den Sommerbetrieb verstanden. Diese widerspiegelt nur die, während der Sommerperiode anfallenden und die Speicheranlage-Verluste.

Als Heizgrenze ist die Aussenlufttemperatur von 17°C gewählt worden. Ab dieser Temperatur gilt rechnerisch der Sommerbetrieb. In diesen Fällen wird die Heizungs-Wärmepumpe ausser Betrieb genommen. In Betrieb ist nur die WW-Wärmepumpe. Das Gebläse des Aussenluft-Wärmeübertragers ist dabei ausser Betrieb.

Die Meteo-Daten der letzten 10 Jahre in Bern-Liebelfeld ergeben eine kummulierte jährliche Stundenzahl von 7279, bei der eine Aussenlufttemperatur tiefer als 17°C liegt. Für die Berechnungen werden also alle kummulierten Stunden zwischen 7279h und 8736h berücksichtigt.

Eine rechnerische Abschätzung ergab eine JAZ_s von **3,07**.

3.5 Verbesserungspotenzial

Wärmegewinnungskreis:

Die Feldmessungen ergaben infolge kurzer Laufzeiten mit entsprechend häufigem Takten infolge eines speicherlosen Einbaus der Wärmepumpe, eines nicht optimalen Luftkühlers und einer Überdimensionierung des Verdichters nicht ganz die erwarteten Resultate.

Der Anteil der Wärmegewinnungsanlage an der Gesamtleistungsaufnahme der Wärmepumpenanlage beträgt gegen 13%, was reichlich hoch erscheint.

Es besteht ein Optimierungspotenzial beim Luftkühler (optimale Rohrgeometrie des Wärmeübertragers (und reduzierte Ventilatorleistung) sowie des Wärmeträgerkreises (geringer Druckverlust und damit geringere Pumpleistung).

Aufgrund der tiefstmöglichen Aussentemperaturen musste ein Wärmeträger mit 45% Anteil an Propylenglykol eingefüllt werden, was eine sehr hohe Pumpenleistung zur Folge hat.

Verdichter

Der eingesetzte kommerziell erhältliche Verdichter ist für den Einsatz im Tieftemperaturbereich konstruiert (Tief/Kühlanlagen). Die im Tieftemperaturbereich üblichen Kältemittel (R507 oder R404a) ergeben für gleiche Kälteleistungen deutlich kleinere Massenströme als das für den Wärmepumpenbetrieb im verlangten Temperaturbereich nötige Kältemittel R407C. Der grössere Massenstrom des R407C führt bei kommerziellen Verdichtern an den zwei Zwischendruckansaugstellen zu einem zu hohen Druckverlust. Zudem liegen die zwei Öffnungen ungünstig früh nach Beginn der Kompression. Aus diesen Gründen wird der gewünschte Effekt einer höheren Leistungszahl und der Steigerung der Heizleistung bei grossen Temperaturhuben nicht so deutlich wie gewünscht. Einer der namhaften Verdichterhersteller der Welt ist jedoch von der Notwendigkeit eines für R407C optimierten Verdichters überzeugt und hat eine Null-Serie eines solchen Verdichters für den Herbst 2001 in Aussicht gestellt.

Heizwärmespeicher

Eine ungenügende Wärmeträgkeit des Wärmeabgabesystems macht den Einsatz eines Parallelspeichers oder eines Seriespeichers mit Überströmventil erforderlich. Hierbei ist eine sorgfältige Analyse der thermischen Eigenschaften des betreffenden Sanierungsobjektes erforderlich.

Abtauung

Jede Abtauung des Luftkühlers soll vollständig abgeschlossen werden. Wird nämlich der Heizbetrieb kurz nach dem Start des Abtauvorgangs infolge genügend hoher Rücklauftemperatur unterbrochen, so muss beim nächsten Einschaltbefehl zuerst mit dem "kalten" Heizwasser abgetaut werden.

Steuerung

Die Warmwasserbereitung soll mit dem Heizbetrieb koordiniert werden. Damit soll vermieden werden, dass die Heiz-WP aufgrund der erreichten max. Rücklauftemperatur abstellt, die WW-WP hingegen gerade anläuft. Eine mögliche Lösung wäre mit dem Einbau eines richtig positionierten Temperaturfühlers im Boiler möglich.

4. Symbolverzeichnis

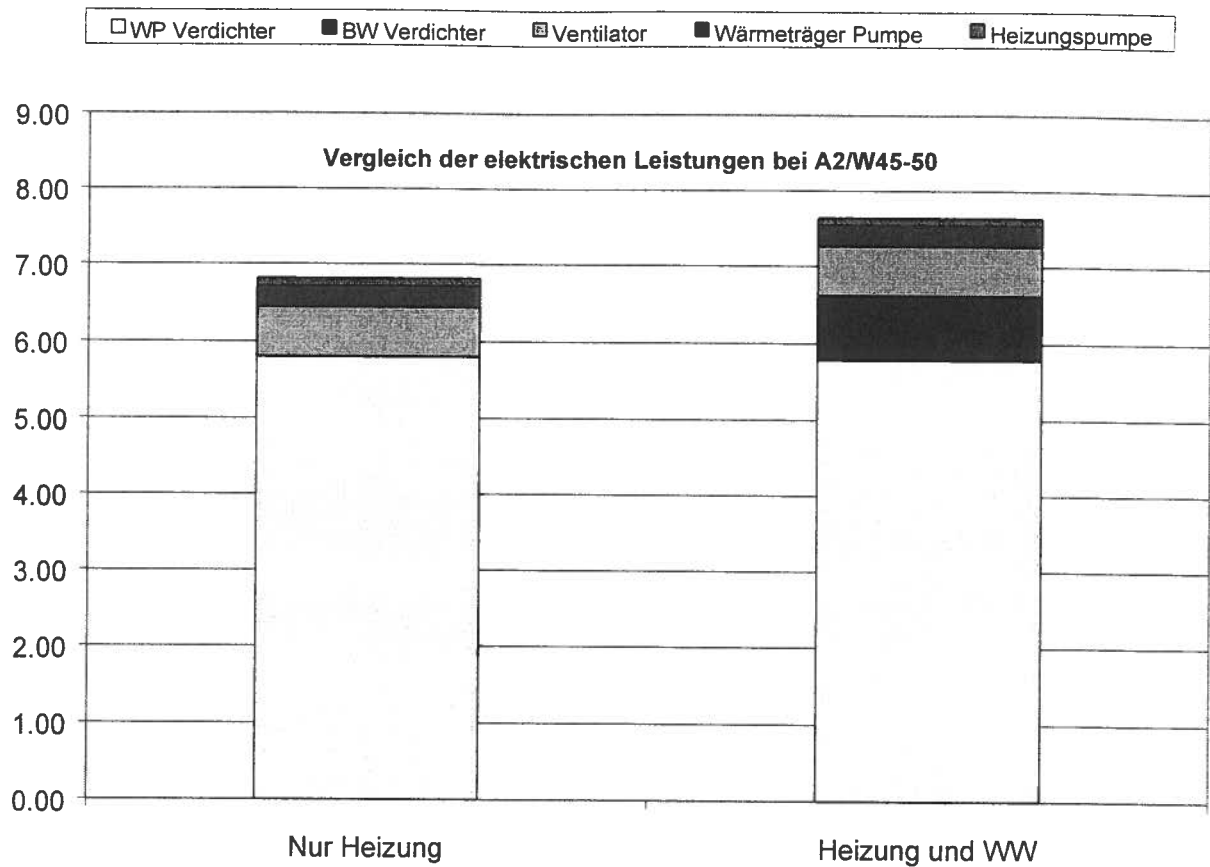
T_{VL}	= Vorlauftemperatur, Heizwasser
T_{AL}	= Aussenlufttemperatur
\dot{Q}_h	= abgegebene Heizleistung der Wärmepumpe (aufgewendete Abtauleistung berücksichtigt)
\dot{Q}_{ww}	= abgegebene Warmwasserleistung
\dot{Q}_{SPA}	= Wärmeverlustleistung der Speicheranlage (Warmwasserboiler)
P_h	= Leistungsaufnahme des Verdichters, Heizkreis
P_{GP}	= Leistungsaufnahme der Glykolkpumpe, Wärmequellenkreis
P_{Ve}	= Leistungsaufnahme des Ventilators, Wärmequellenkreis
P_K	= anteilige Leistungsaufnahme der Heizwasser-Umwälzpumpe (nach EN255)
P_{SR}	= Leistungsaufnahme der Steuerung, Regelung
P_{ww}	= Leistungsaufnahme des Verdichters, Warmwasserkreis
η_{WP}	= Gütegrad WP ohne WW - Bereitung und ohne übrige Hilfsenergien
η_{EN}	= Gütegrad WP mit WW – Bereitung (nach EN255)
Q_h	= produzierte Heizwärme
Q_{ww}	= produzierte Warmwasserwärme
Q_{SPA}	= Wärmeverluste der Speicheranlage (Warmwasserboiler)
W_h	= Energieverbrauch des Verdichters, Heizkreis
W_{GP}	= Energieverbrauch der Glykolkpumpe, Wärmequellenkreis
W_{Ve}	= Energieverbrauch des Ventilators, Wärmequellenkreis
W_K	= anteiliger Energieverbrauch der Heizwasser-Umwälzpumpe (nach EN255)
W_{SR}	= Energieverbrauch der Steuerung, Regelung
W_{ww}	= Energieverbrauch des Verdichters, Warmwasserkreis

5. Literaturverzeichnis

- [1] EN255 Europäische Norm für die Prüfbedingungen der Wasser/Wasser, Sole/Wasser und Luft/Wasser elektrisch betriebenen Kompressions-Wärmepumpen.
- [2] Zehnder, u.a.: Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung bei Scrollkompressoren, ForschungsprogrammUAW, Bundesamt für Energie, April 2000
- [3] Cube, Steimle, Lotz, Kunis: Lehrbuch der Kältetechnik, C.F.Müller Verl. 1997
- [4] Zweifel, Wetter: Handrechenmethode zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen... Zentralschweiz. Technikum Luzern 1997
- [5] SRHP Ausschreibung Swiss Retrofit Heat Pump, Internet: www.waermepumpe.ch/fe, Pflichtenheft Swiss Retrofit Heat Pump, Bundesamt für Energie 1999
- [6] Wärmepumpen. Planung Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpenanlagen RAVEL Heft 3, Bundesamt für Konjunkturfüragen, Best Nr. 724.356d
- [6] Wärmepumpen. Planung Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpenanlagen RAVEL Heft 3, Bundesamt für Konjunkturfüragen, Best Nr. 724.356d
- [7] Expression of the Uncertainty of Measurements in Calibration: EA European co-operation for Accreditation, EA-4/02, December 1999. S.auch www.european-accreditation.org.

6. Anhang

Anteile der elektrischen Leistung



		WP Verdichter	Wärme- träger Pumpe	Ventilator	BW Verdichter	Heizungs- pumpe	Total
Nur Heizung	kW	5.80	0.28	0.64	0.00	0.10	6.81
Nur Heizung	%	85.13	4.05	9.41	0.00	1.40	100.00
Heizung und WW	kW	5.78	0.28	0.64	0.84	0.09	7.63
Heizung und WW	%	75.76	3.62	8.37	11.00	1.24	100.00

Bild 6.1: Anteile der elektrischen Leistung.

Zum Wärmequellenseitigen Verbesserungspotenzial

Der erforderliche el. Energieaufwand zum Betreiben Wärmeträgerpumpe (Wärmeträgerpumpe) und es Luftgebläses ist beträchtlich. Zur Illustration des Verbesserungspotenzials ist im Bild 6.2 der erwähnte el. Energiebedarf ausser acht gelassen.

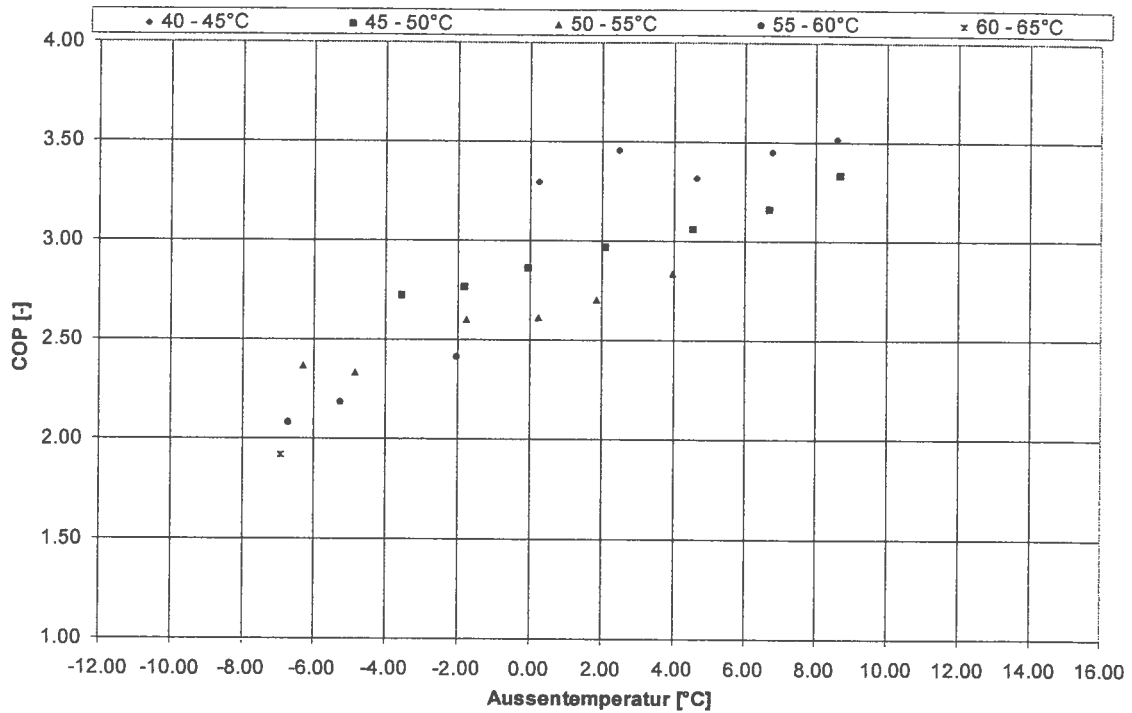


Bild 6.2: COP Heizungs-Wärmepumpe ohne el. Energiebedarf zum Antrieb der Wärmeträger-Umwälzpumpe und des Gebläses.

Messtellenliste für Feldmessungen Haus Lehmann, Richigen

Bezeichnung	Gerät	Medium	Messbereich	Signal	Genauigkeit	Fabrikat	
	Einsatzort		Messprinzip	Einsp.		Typ	
EIR 501	Elektr. Leistungsmessung Verdichter Wärmepumpe	R407C	3-phasig, 5A mit Stromwandler	4..20 mA	< 3% vom Messwert	Transmetra LVT 310.111	
EIR 502	Elektr. Leistungsmessung Glykol Umwälzpumpe	Glykol	1-phasig	4..20 mA	< 2% vom Messwert	Transmetra LVT 311.100	
EIR 503	Elektr. Leistungsmessung Gebläse Glykol-Rückkühler	Luft	3-phasig, 5A	4..20 mA	< 2% vom Messwert	Transmetra LVT 310.111	
EIR 504	Elektr. Leistungsmessung Verdichter Brauchwasser WP	R134a	1-phasig	4..20 mA	< 2% vom Messwert	Transmetra LVT 311.100	
EIR 505	Elektr. Leistungsmessung Heizwasser Umwälzpumpe	Wasser	1-phasig	4..20 mA	< 2% vom Messwert	Transmetra LVT 311.100	
Wärmezähler 6	FIR 601	Durchflussmessung Heizwasser	Wasser	0.07 .. 3.5 m3/h Flügelrad	4..20 mA	< 3% vom Messwert	Aquametro Topas
	YIR 602	Wärmeleistung Heizungs Wärmepumpe	Wasser	Wärmezähler	4..20 mA		Aquametro Calec MB-2S
	TIR 603	Temperaturfühler Rücklauf Heizung	Wasser	-50..+180°C 2xPt 100 4-Leiter	ΔV	1/3 Klasse B 0.1 + 0.0005 * t	Roth+Co. AG W120.4L.06,0x0100.2A
	TIR 604	Temperaturfühler Vorlauf Heizung	Wasser	-50..+180°C 2xPt 100 4-Leiter	ΔV	1/3 Klasse B 0.1 + 0.0005 * t	Roth+Co. AG W120.4L.06,0x0100.2A
	TIR 605	Temperaturfühler Abtau Wärmeübertrager Austritt	Wasser	-50..+180°C Pt 100 4-Leiter	ΔV	1/3 Klasse B 0.1 + 0.0005 * t	Roth+Co. AG W120.4L.06,0x0100.2-
Wärmezähler 7	FIR 701	Durchflussmessung Propylenglykol	Glykol	0.2 .. 20 m3/h Flügelrad	4..20 mA	< 3% vom Messwert	Aquametro Topas
	YIR 702	Kälteleistung Heizungs Wärmepumpe	Glykol	Wärmezähler	4..20 mA		Aquametro Calec MB-2S
	TIR 703	Temperaturfühler Rücklauf Glykol	Glykol	-50..+180°C 2xPt 100 4-Leiter	ΔV	1/3 Klasse B 0.1 + 0.0005 * t	Roth+Co. AG W120.4L.06,0x0100.2A
	TIR 704	Temperaturfühler Vorlauf Glykol	Glykol	-50..+180°C 2xPt 100 4-Leiter	ΔV	1/3 Klasse B 0.1 + 0.0005 * t	Roth+Co. AG W120.4L.06,0x0100.2A
Wärmezähler 8	FIR 801	Durchflussmessung Brauchwasser	Wasser	0.07 .. 3.5 m3/h Flügelrad	4..20 mA	< 3% vom Messwert	Aquametro Topas
	YIR 802	Wärmeleistung Brauchwasser Wärmepumpe	Wasser	Wärmezähler	4..20 mA		Aquametro Calec MB-2S
	TIR 803	Temperaturfühler Eintritt Boiler	Wasser	-50..+180°C 2xPt 100 4-Leiter	ΔV	1/3 Klasse B 0.1 + 0.0005 * t	Roth+Co. AG W120.4L.06,0x0100.2A
	TIR 804	Temperaturfühler Austritt Boiler	Wasser	-50..+180°C 2xPt 100 4-Leiter	ΔV	1/3 Klasse B 0.1 + 0.0005 * t	Roth+Co. AG W120.4L.06,0x0100.2A
Wärmezähler 9	FIR 901	Durchflussmessung Propylenglykol Sommerbetrieb	Glykol	0.07 .. 3.5 m3/h Flügelrad	4..20 mA	< 3% vom Messwert	Aquametro Topas
	YIR 902	Kälteleistung Brauchwasser WP Sommerbetrieb	Glykol	Wärmezähler	4..20 mA		Aquametro Calec MB-2S
	TIR 903	Temperaturfühler Rücklauf Glykol Sommerbetrieb	Glykol	-50..+180°C 2xPt 100 4-Leiter	ΔV	1/3 Klasse B 0.1 + 0.0005 * t	Roth+Co. AG W120.4L.06,0x0100.2A
	TIR 904	Temperaturfühler Vorlauf Glykol Sommerbetrieb	Glykol	-50..+180°C 2xPt 100 4-Leiter	ΔV	1/3 Klasse B 0.1 + 0.0005 * t	Roth+Co. AG W120.4L.06,0x0100.2A
	TIR 905	Temperaturfühler Aussentemperatur	Luft	-40..+60°C Pt 100 2-Leiter	4..20 mA		Rotronic Hygromer MP408A
	MIR 906	Feuchtigkeitssensor Feuchtigkeit Aussenluft	Luft	0..100% rF Kapazitiv	4..20 mA		Rotronic Hygromer MP408A
	TIR 907	Temperaturfühler Verdichter Austrittstemperatur	R407C	-50..+180°C Pt 100 4-Leiter	ΔV	1/3 Klasse B 0.1 + 0.0005 * t	Roth+Co. AG W500.4L.04,0X0070.5-