

Untersuchung von Leistungszahlen bestehender Wärmepumpenanlagen (Projekt V)

Hochschule Wismar
Fachbereich Maschinenbau

Ingenieurpraktikum
im Rahmen des
Bachelorstudiengangs

Erstellt durch:

Robert Seifert
13.06.1986
Immatr.-Nr.:110708

Betreuer:

Prof. Dr. Ing. A. Platzhoff
Dipl. Ing. W. Beglau

22.11.2010

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen:.....	3
Vorwort:.....	4
Einleitung:	4
Vorwissen:.....	5
Messgeräte:	6
Untersuchung Leistungszahl:	7
Rahmenbedingungen:.....	10
Messung	10
Auswertung	14
Verzeichnisse	16

Formelzeichen:

Lateinische und Griechische Buchstaben:

Symbol	Bedeutung	Einheit
T	Temperatur	K
ϑ	Temperatur	°C
ΔT	Temperaturdifferenz	K
p	Druck	bar
h	Enthalpie	kJ/kg
P	Leistung	kW
ϵ / COP	Leistungszahl	
Q	Wärmeleistung	kW
U	spez. Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² *K)
A	Fläche	m ²
t	Zeit	s
I	Stromstärke	A
U	Spannung	V

Indizes:

Ü	Überhitzung
U	Unterkühlung
0	Verdampfung
C	Kondensation
therm.	thermisch
el.	elektrisch
H	Heizen

Abkürzungen:

gem.	gemessener Wert
Pkt.	Punkt
S.	Seite
DT	Dampf tafel
Hz	Hertz
EFH	Einfamilienhaus
re.	rechts
li.	links
Abb.	Abbildung
Tab.	Tabelle
KOP	Kompressorkopftemperatur

Vorwort:

Laut Studienordnung des Bachelorstudiengangs Maschinenbau der Fachhochschule Wismar ist ein 12 wöchiges Ingenieurpraktikum vorgesehen.

Dieses wird in der Firma Beglau Wärmepumpen durchgeführt.

Die Aufgabe besteht in der Untersuchung von bestehenden Wärmepumpenanlagen unter verschiedenen Einsatzbedingungen und der Ermittlung der jeweiligen Leistungszahlen sowie deren Bewertung. Dabei sollen Besonderheiten von Wärmepumpen im Allgemeinen, aber auch Unterschiede verschiedener Wärmequellen (Erdwärme-, Luftwärmenutzung) und Anwendungsbereiche (Neubau, Bestandsbau) erfasst werden.

Einleitung:

Innerhalb dieses Projekts soll die Betrachtung auf eine Bestandsbauanlage übertragen werden. Bei diesem Anlagentyp wird primär Luftwärmenutzung eingesetzt, da diese platzsparend und ohne Eingriff in die bestehende Außenanlage (Garten, etc.) installiert werden kann. Weil die prinzipielle Funktionsweise von Wärmepumpen in vorherigen Untersuchungen bereits ausführlich beschrieben wurde, soll auf eine Wiederholung hier verzichtet werden. Grundlegend wird angestrebt, die bestehenden, wassergeführten Heizkörper im Bestandsgebäude weiter nutzen zu können. Daher wird als zusätzliche Komponente ein Pufferspeicher mit integrierten Wärmetauschern eingefügt. Nach dem Enthitzen des Heißgases auf annähernd Kondensationstemperatur, wird dieses im Pufferspeicher verflüssigt. Während dieses Prozesses gibt das Medium seinen Energieinhalt durch Wärmeübertragung an das Heizwasser ab und wird anschließend wieder der äußeren Wärmequelle zugeführt. Das vorherige Enthitzen dient der Warmwassererzeugung.

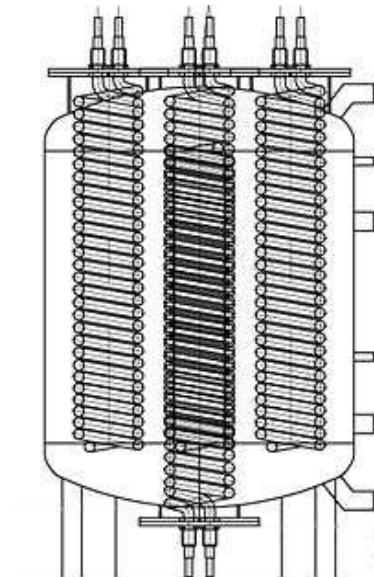


Abb. 1: Pufferspeicher (techn.) mit Wärmetauscherspiralen

Die Temperaturen und zugehörigen Drücke im System liegen höher als bei Anlagen mit nur einem Kreislauf, da die Verluste durch Wärmetauscher, aber auch die höheren, notwendigen Heizwassertemperaturen aufgebracht werden müssen. Daher liegt ein wesentlicher Punkt der Auslegung der Anlage in der Untersuchung der vorhandenen Heizkörper hinsichtlich ihrer Eignung in Niedertemperaturheizanlagen. In diesen Bereichen muss eine beanspruchungsgerechte Anpassung der Heizkörper gewährleistet sein.

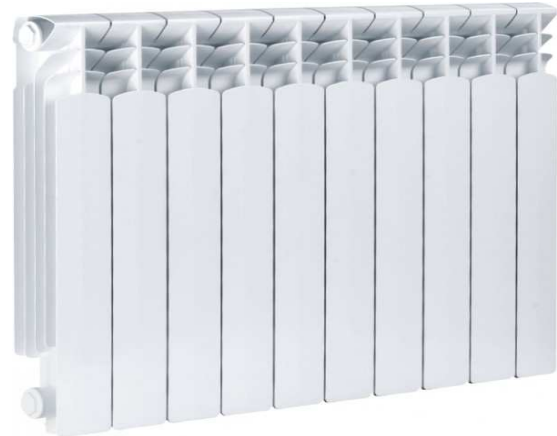


Abb. 2: li: herkömmlicher Heizkörper
re: großflächiger Heizkörper für Niedertemperaturen

Die übertragbare Wärmeleistung Q ergibt sich aus: $Q = u \cdot A \cdot \Delta t$.

u beschreibt den stoffabhängigen Wärmedurchgangskoeffizienten, A die Fläche des Wärmeübertragers (Heizkörper) und Δt die Spreizung zwischen Innenraum und Heizwasser. Da die Spreizung bei Niedertemperaturen kleiner wird und die Stoffspezifik für das verwendete Material eine feste Größe darstellt, muss demnach die Übertragungsfläche größer werden (siehe Abb. 2), um die selbe Wärmemenge abgeben zu können.

Vorwissen:

Wie in den vergangenen Versuchsaufbauten wird zur Ermittlung der momentanen Leistungszahl der Wärmepumpenanlage eine konforme Druck- und Temperaturmessung an zwei Betrachtungsstellen vorgenommen. Zum Einen wird der Druck der Verdampferseite (außen) vor dem Eintritt in den Verdichter aufgenommen und die Temperatur an äquivalenter Stelle erfasst, zum Anderen werden der Kondensationsdruck (innen) und die zugehörige Temperatur untersucht. Durch separate Strommessung kann wiederum die real aufgenommene Leistung berechnet werden. Die Werte werden mittels $\log(p)$ - h -Diagramm grafisch ausgewertet und mit einem Berechnungsprogramm des Verdichterherstellers verglichen und gemittelt. Dieser Mittelwert soll der Einschätzung der Anlage dienen.

Messgeräte:

Druckmessung:

Testo560: Datenlogger (integrierter Speicher)

Messbereich: 1 * 0...200mbar; 2 * 50bar

Genauigkeit (2...50bar): 0,5% fs = 0,005 * 50bar = 0,25bar

Temperaturmessung:

Testo925: Messbereich (-50)...1000°C

Genauigkeit (-40)...900°C) ± (0.5°C + 0.3% v. Messwert.)

Strommessung:

HT7010 Digitale Stromzange: Messbereich: 0...400A

Genauigkeit: ± (1,8% Anzeige + 3digit)

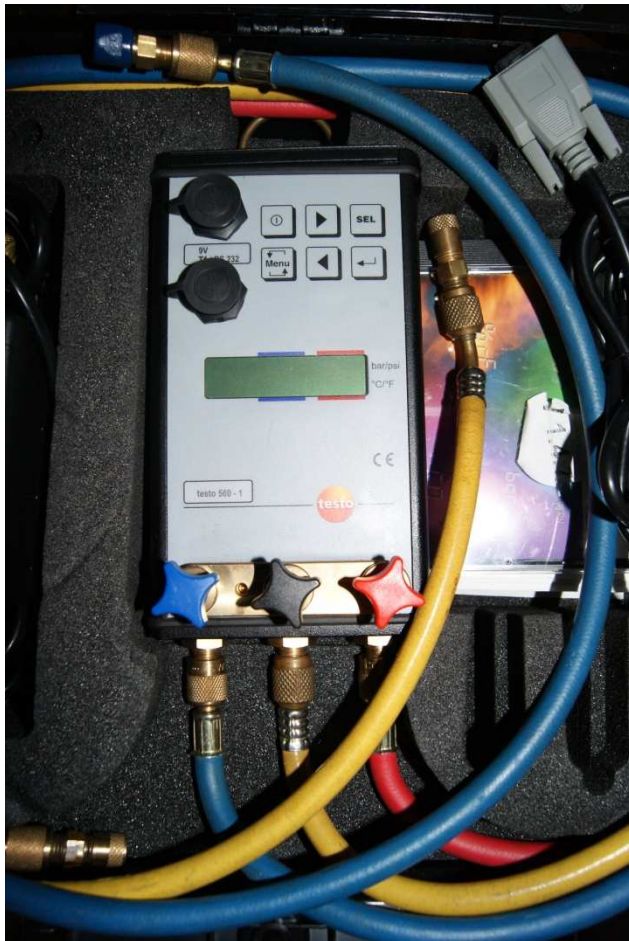


Abb.3: oben – Testo560, Testo925 (v.li.)

unten – HT7010



Untersuchung Leistungszahl:

Objekt: Dieckhoff, Gustävel
Bestandsbau
Luftwärmenutzung

Zeitraum: 17.11.10

Anzahl der Messungen: 1



Abb. 4: Luftwärmeverdampfer und Technikschaft direkt am Gebäude bilden die einzigen, sichtbaren Komponenten im Außenbereich



Abb. 5: Warmwasserspeicher und Pufferspeicher (oben) bilden die notwendigen Komponenten im Innenbereich, die Regelung nimmt keinen nennenswerten Platz in Anspruch (unten li, vor Pufferspeicherinstallation)

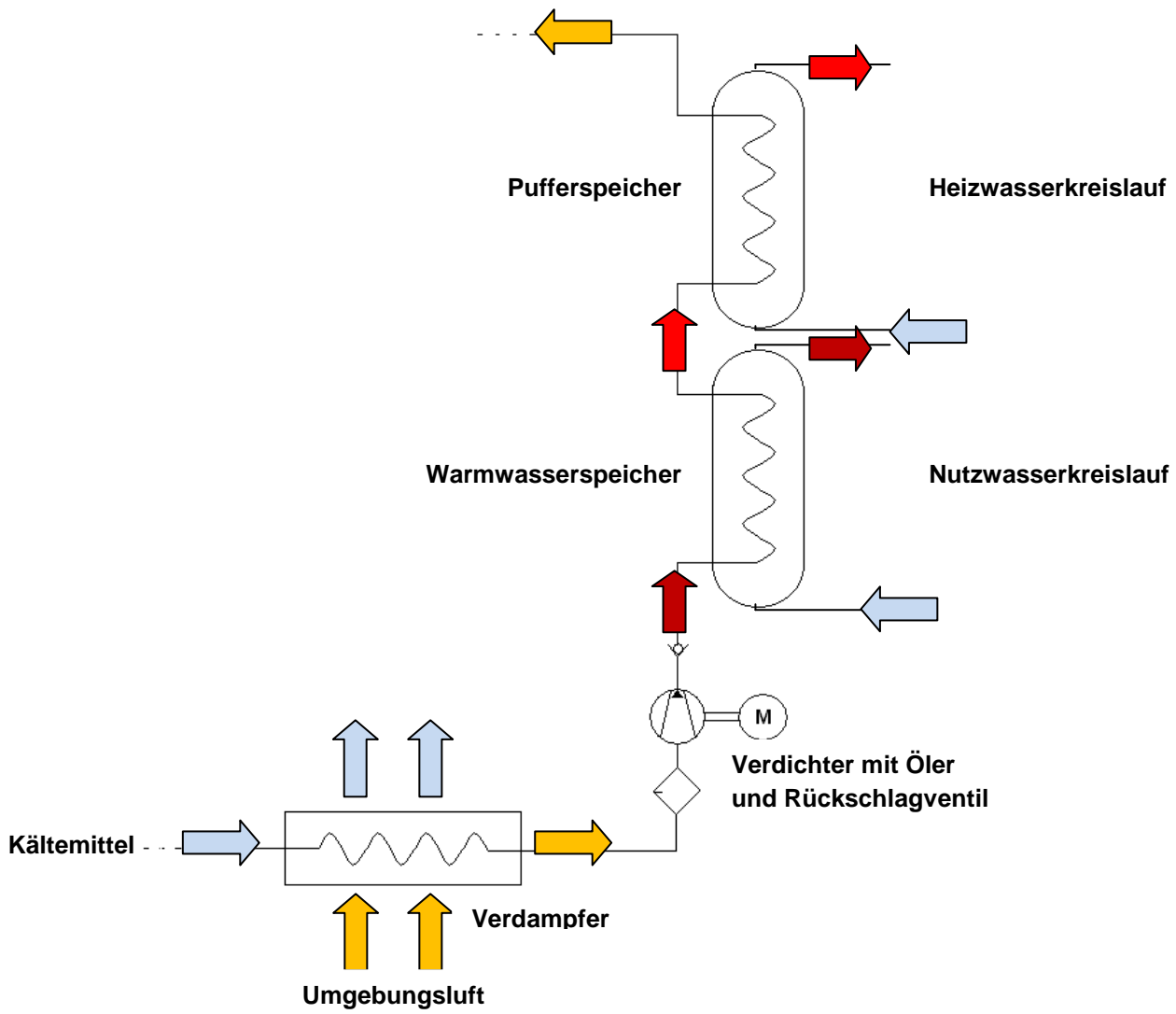


Abb. 6: hydraulisches Schaltbild mit Warmwasser- und Pufferspeicher

Rahmenbedingungen:

Die Heizperiode beschreibt den Zeitraum, in dessen Verlauf die Außentemperatur die Grenztemperatur für den Heizbetrieb unterschreitet. Die Heizgrenztemperatur bezieht sich auf den Zustand, indem unter Ausnutzung solarer und interner Wärmegewinne kein zusätzliches Heizen erforderlich ist. Sie liegt bei etwa 10°C Außenlufttemperatur. Die gemittelte Dauer der Heizperiode liegt demnach bei 185 Tagen, beginnend ab Mitte Oktober und endend etwa Mitte April.^{/1/} Die Untersuchung der Bestandsbauanlage fällt nach diesen Angaben bereits deutlich in die Heizperiode, sodass ein aussagekräftiger Wert der Leistungszahl zu erwarten ist. Die durchschnittlich gemessene Temperatur der Außenluft beträgt 5,72°C.

Ein während der Installation der Wärmepumpenanlage festgelegter Referenzraum gibt die IST-Temperatur des Gebäudes vor, nach deren Erreichen die Anlage heruntergefahren wird. Durch automatisierte Erfassung der Außentemperatur wird die momentan erforderliche Vorlauftemperatur des Heizwassers ermittelt. Um die zur Zeit der Untersuchung geforderten Temperaturen von 40°C Erreichen zu können, wird eine Kondensationstemperatur des Wärmeträgermediums von 45°C angestrebt.

Messung

Wegen der Kontinuität der vorliegenden Parameter ist eine ausgeprägte Schwankung der momentanen Leistungszahlen nicht zu erwarten. Daher wird ein ausreichender Zeitraum für die Datenerfassung von etwa 30 min angesetzt. Die Drücke werden im 2s Takt gespeichert, die Temperaturen werden manuell alle 30s notiert, ebenso die Stromaufnahme.

Eine Zusammenfassung der sich daraus ergebenden Mittelwerte zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: durchschnittlich aufgenommene Messwerte

p_o [bar]	ϑ_o (DT) [°C]	ϑ_o (gem.) [°C]	$\Delta T_{\ddot{u}}$ [K]	p_c [bar]	ϑ_c (DT) [°C]	ϑ_c (gem.) [°C]	ΔT_u [K]	I [A]	KOP [°C]
8,53	2,07	3,43	1,36	26,31	43,49	35,74	7,75	5,42	59,78

^{/1/} Bauphysik S.29

Veranschaulichend werden nachfolgend die Daten über die gesamte Messung im Diagramm grafisch dargestellt.

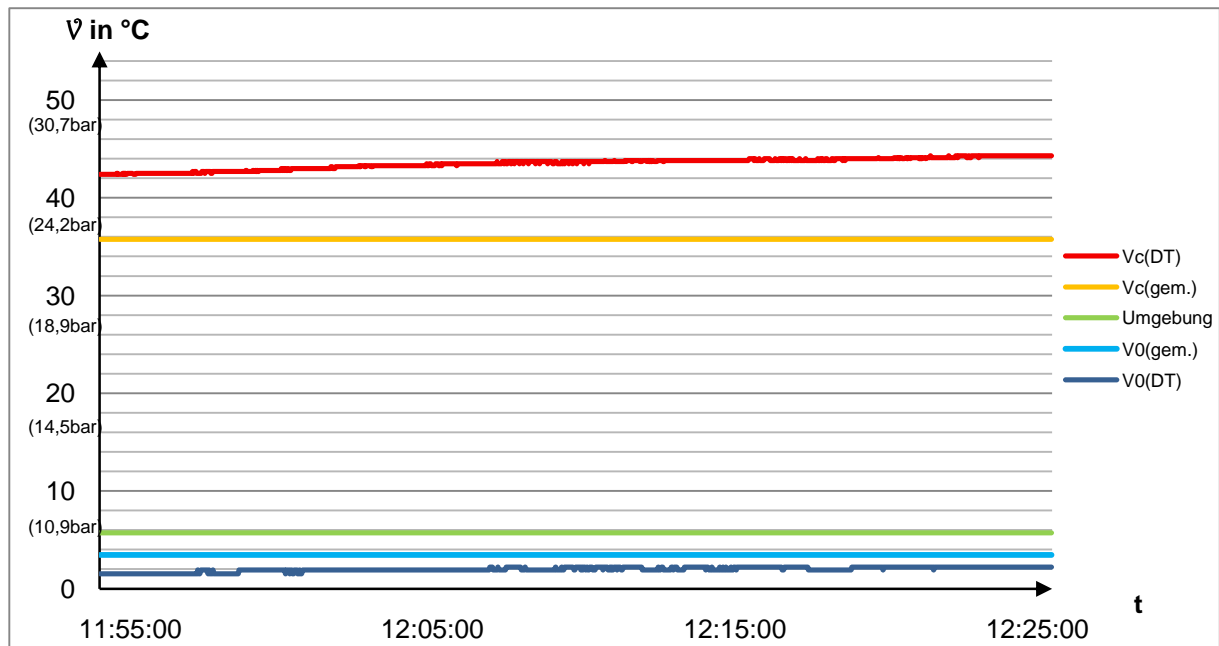


Diagramm 1: Druck- und Temperaturverläufe

Da die Grafen der Verdampfungs- (ϑ_0) und Kondensationstemperaturen (ϑ_c) den jeweiligen Druckverläufen entsprechen, können diese in einem Diagramm zusammengefasst werden. Besonders deutlich ist die Unterkühlung des Heißgases zu erkennen (Spreizung zwischen ϑ_c (DT) und ϑ_c (gem.)). Prinzipiell sagt dieser Wert aus, dass dem verflüssigten Medium noch weiterhin Wärme entzogen wird. Die Leistungszahl steigt daraufhin, da das Verhältnis von nutzbarer Wärmemenge zur aufgebrauchten elektrischen Leistung vergrößert wird. Aufgrund der Tatsache, dass die Unterkühlung direkt am Verdampfer, also im Außenbereich aufgenommen wird, ist die tatsächlich genutzte Restwärme nicht abschätzbar. Es ist anzunehmen, dass ein nicht unerheblicher Anteil durch Wärmeverluste an die Umgebung verloren geht. Durch das Schalten eines zusätzlichen Wärmeübertragers z.B. zwischen Druckleitung vor der Einspritzung und der Saugleitung vor den Verdichter könnte diese Restwärme effektiv genutzt werden. Das durch den Verdichter zu überwindende Temperaturniveau würde verkleinert und der elektrische Leistungsumsatz folglich verringert. Dieser Prozess stellt ein Potential zur Optimierung der Leistungszahl dar.

Die theoretisch vorliegende, momentane Leistungszahl wird zunächst durch Übertrag der gemessenen Drücke und Temperaturen in das log(p)-h-Diagramm des Wärmeträgermediums (R410A) ermittelt.

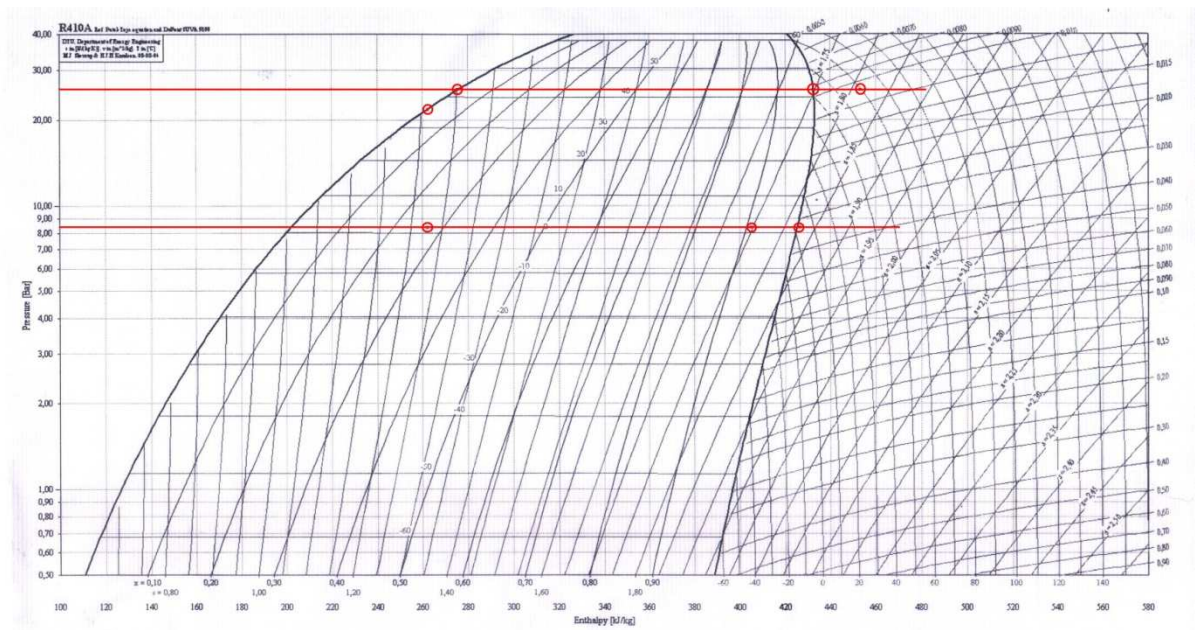


Diagramm 2: log(p)-h-Verlauf der Messung

Diesem Diagramm können an den jeweiligen Punkten die spezifischen Energien entnommen werden.

Tabelle 2: Auflistung von Druck p, Temperatur T/t und Enthalpie h

Pkt.	p in bar	T in K	t in °C	h in kJ/kg
1'	8,53	275,22	2,07	405
1	8,53	276,58	3,43	426
2	26,31	332,93	59,78	453
2'	26,31	316,64	43,49	432
3'	26,31	316,64	43,49	276
3	26,31	308,89	35,74	262
4	8,53	275,22	2,07	262

Die Leistungszahl ϵ ergibt sich nach: $\epsilon = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} = \frac{453 - 262}{453 - 426}$

= 7,07

Dieser Wert wird noch um einen elektrisch, mechanischen Verlust von 5% korrigiert^{/2/}, sodass sich theoretisch eine Leistungszahl von 6,72 ergibt.

Zum Vergleich wird die Leistungszahl zusätzlich mit dem Berechnungsprogramm des Verdichterherstellers ermittelt. Nach diesem ergibt sich eine Heizleistung von 14,45kW. Die elektrische Leistung beträgt bei der vorliegenden Parametrisierung und bei 50Hz Netzfrequenz 2,52kW. Da die Frequenz durch einen vorgeschalteten Umrichter an den momentanen Bedarf angeglichen werden kann, weicht die reale, elektrische Leistungsaufnahme von den Herstellerangaben ab. Bei der gemessenen Stromaufnahme von 5,42A (Tab.1) errechnet sich nach $P = \sqrt{3} * 400V * I * \cos(120)$ eine Leistung von 3,056kW. Dieser erhöhte Wert kann sich zum Beispiel daraus ergeben, dass die Anlage wegen einer vorangegangenen Sperrzeit des Energieversorgers heruntergefahren wurde und die Speicher während der Untersuchung einen geringen Wärmeinhalt aufgewiesen haben. Die sich dadurch ergebende Leistungszahl beträgt demnach 4,73. Der für die abschließende Bewertung verwendete Mittelwert beider Ergebnisse liegt bei 5,23.

In Anbetracht der verhältnismäßig hohen Kondensationsdrücke und –temperaturen ist dieser Wert noch sehr groß und somit als sehr gut einzustufen. Das lässt sich zum Einen auf eine gute Abstimmung und zum Anderen auf die Annäherung der Umwelttemperaturen an den Auslegungspunkt der Wärmepumpenanlage zurückführen, in dem die optimale Ausnutzung der Anlage erfolgt.

- ✓ **Heizleistung: 14,45kW**
- ✓ **Elektr. Leistung: 3,06kW**
- ✓ **Leistungszahl (Mittelwert): 5,23**

^{/2/} nach Verdichterhersteller Copeland

Auswertung

Das Potential für eine Optimierung wurde bereits auf Seite 11 angeführt und soll in diesem Abschnitt nicht wieder aufgenommen werden.

Um die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpenanlage im Vergleich zu herkömmlichen Heizmedien bewerten zu können, wird die vom Verdichterhersteller angebrachte Heizleistung von 14,45kW auf Braunkohle, Heizöl und Flüssiggas umgerechnet und mit aktuellen, spezifischen Kosten angesetzt. Es werden in der Betrachtung keine Verluste der jeweiligen Heizungsanlagen, sondern nur die Heizwerte der Rohstoffe berücksichtigt. Die realen Verbrauchswerte müssen um diese Verluste korrigiert werden. Die Heizperiode von 185 Tagen wird aus dem Abschnitt „Rahmenbedingungen (S.10)“ übernommen und eine Betriebsstundenzahl von 1500 angenommen (8 Stunden pro Tag).

Tabelle 3: Heizwerte und aktuelle Energiepreise

Medium	Heizwert	Kosten	Angaben nach:
	[kWh/kg(l)]	[€/kg(l)]	
Braunkohle	5,800	0,27	burr-brennstoffe.de
Heizöl	10,000	0,66	oelbestellung.de
Flüssiggas	13,000	0,61	esyoil.com
Wärmepumpenstrom		0,16€/kWh	Wemag

Tabelle 4: Heizkosten im Vergleich

Medium	Kosten bei 14,45kW Heizleistung [€]
Braunkohle	1009,01
Heizöl	1430,55
Flüssiggas	1017,06
Wärmepumpe	734,40

Die Berechnung stellt nur einen theoretischen Vergleich dar und bezieht weder Investitions- oder Betriebskosten (Schornsteinreinigung, Wartung, etc.), noch reale Wetterbedingungen mit ein. Weiterhin ist die momentane Leistungsaufnahme der untersuchten Wärmepumpenanlage aus den oben angeführten Gründen (S.13) höher als sie im ausgewogenen Zustand des Systems sein wird. Der Durchschnittsverbrauch fällt daher mit großer Wahrscheinlichkeit geringer aus. Dennoch ist eine eindeutige Tendenz erkennbar. Besonders hinsichtlich der Heizölnutzung zeigt sich ein enormes Einsparpotential. Vor Allem die Energiepreise für Heizöl und –gas sind in den vergangenen Jahren im Mittel deutlich stärker angestiegen, als die für Strom und Kohle. Bei der Kohlenutzung ist dabei noch die staatliche Subventionierung zu beachten, die voraussichtlich Ende 2018^{/3/} auslaufen wird und der dadurch entstehende Kostenvorteil verschwindet.

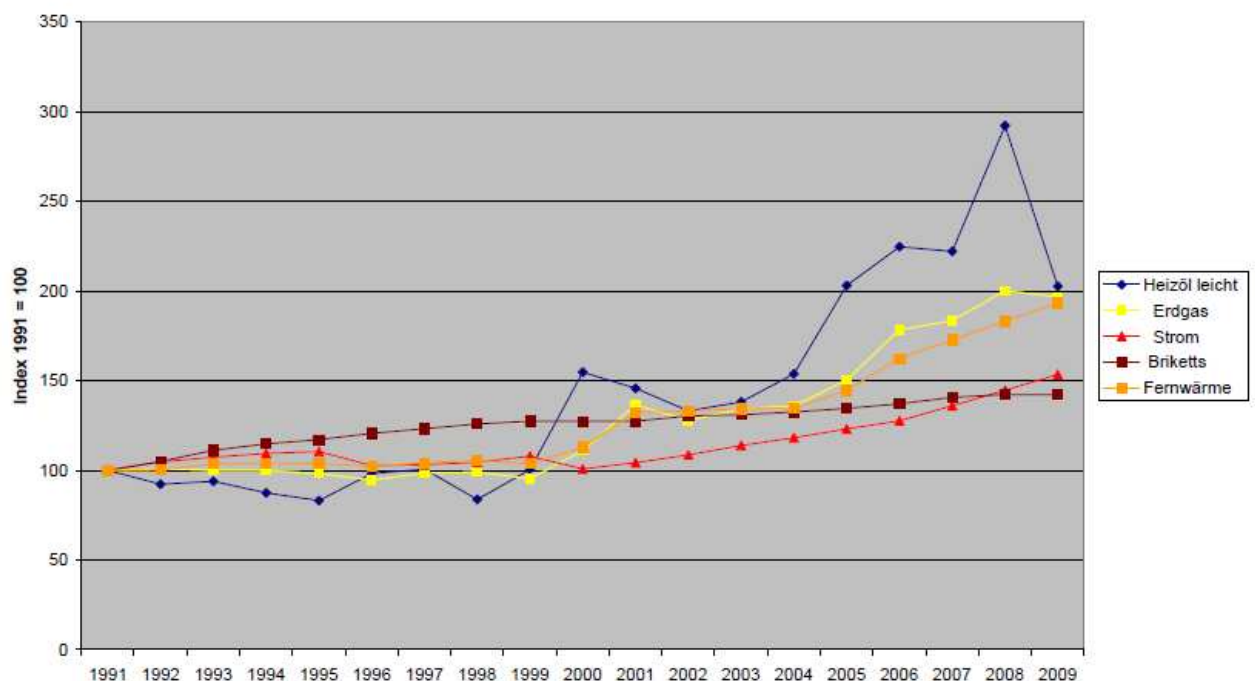


Diagramm 3: Entwicklung der Energiepreise privater Haushalte
Quelle: BMWi auf der Basis der Indexwerte von StBa

Bei den derzeitigen Prognosen wird sich der Kostenaufwand von Wärmepumpenanlagen demnach stabiler verhalten und die Einsparungen im Vergleich zu anderen Heizmedien ansteigen. Wird der Strom ergänzend durch regenerative Quellen erzeugt, tritt zusätzlich noch der ressourcen- und umweltschonende Vorteil deutlich hervor.

Mit Wärmepumpen

Altbau wirtschaftlich und umweltschonend beheizen!

^{/3/} FÖS-Studie / Greenpeace

Verzeichnisse

Literaturhinweise

- /1/ Bläsi, Walter; Bauphysik; 7. Auflage; Europa Lehrmittel; 2008; 342 Seiten
- /2/ Copeland; www.emersonclimate.de
- /3/ Meyer, B.; Küchler, S.; Hölzinger, O.; FÖS-Studie (Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft) im Auftrag von Greenpeace; Berlin; 2010
- /4/ Burr-Brennstoffe; www.burr-brennstoffe.de
- /5/ www.oelbestellung.de
- /6/ Esoil; www.esoil.com
- /7/ Wemag; www.wemag.com
- /8/ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; www.bmwi.de

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Pufferspeicher	4
Abb. 2: herkömmlicher Heizkörper, großflächiger Heizkörper für Niedertemperaturen	5
Abb. 3: Messgeräte	6
Abb. 4: Luftwärmeverdampfer und Technikschaft	7
Abb. 5: Warmwasserspeicher und Pufferspeicher	8
Abb. 6: hydraulisches Schaltbild mit Warmwasser- und Pufferspeicher	9

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: durchschnittlich aufgenommene Messwerte.....	10
Tabelle 2: Auflistung von Druck p, Temperatur T/t und Enthalpie h	12
Tabelle 3: Heizwerte und aktuelle Energiepreise	14
Tabelle 4: Heizkosten im Vergleich	14

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Druck- und Temperaturverläufe.....	11
Diagramm 2: log(p)-h-Verlauf der Messung.....	12
Diagramm 3: Entwicklung der Energiepreise privater Haushalte	15