

Schlussbericht 21. Oktober 2014

JAZ Monitoring

Wärmepumpen-interne Messung der JAZ

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs
Werdenbergstrasse 4
9471 Buchs
www.ntb.ch

Autoren:

Andres Heldstab, Hochschule für Technik Buchs, andres.heldstab@ntb.ch
Gabriel Feichter, Hochschule für Technik Buchs, gabriel.feichter@ntb.ch
Stefan Bertsch, Hochschule für Technik Buchs, stefan.bertsch@ntb.ch

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
1.1. Vorgehensweise	4
1.2. Betrachtung zur Jahresarbeitszahl	4
2. Literaturrecherche	7
2.1. Wissenschaftliche Artikel	7
2.2. Deutsches Förderungsprogramm	9
2.3. JAZ Monitoring Systeme und Wärmezähler	10
3. Definitionen und Modelle	13
3.1. Begriffe	13
3.2. Aussentemperatur	13
3.3. Leistungskennlinie	13
3.4. Systemgrenzen	14
3.5. Kreisläufe	15
3.6. Komponentenmodelle	16
3.7. Sensoren	18
4. Strategien für internes JAZ Monitoring	19
4.1. Sensibilitätsanalyse	19
4.2. Messkatalog	20
4.3. Beschreibung der Messprinzipien	21
5. Schlussfolgerung	25
Literaturverzeichnis	26
A. Anhang	28
A.1. Sensoren auf dem Markt	28
A.2. Einfluss der Parameter	29
A.3. Drucksensoren	38
A.4. Temperatursensoren	39
A.5. Stromzähler	41
A.6. Wärmezähler	42

1. Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist die Beurteilung der Genauigkeit der kältekreislauf-internen Jahresarbeitszahlmessung. Dabei werden die Bedeutung und die Problematiken der Jahresarbeitszahl JAZ dargelegt. Verschiedene Publikationen zeigen Messmethoden und ihre Genauigkeit. Anfragen bei Herstellern zeigen die Vielfalt der bisherigen internen und externen JAZ-Messverfahren. Die beschriebene Simulation soll zeigen, welche Genauigkeit eine interne JAZ-Messung ermöglicht und welche Messmethoden dazu geeignet sind.

1.1. Vorgehensweise

Die Einleitung behandelt neben dem Vorgehen die Bedeutung und die Interpretation der JAZ. Sie zeigt kritisch was die Problematik der JAZ-Messung ist und wofür man ein Bewusstsein entwickeln muss.

In Kapitel 2 wird eine Recherche in der wissenschaftlichen Literatur aufgezeigt, die die interne und externe JAZ-Messung numerisch vergleicht. Danach wird die deutsche Wärmepumpen-Förderstrategie besprochen, in der ein JAZ Monitoring vorgeschrieben ist. Dies veranlasste verschiedene Hersteller für den Deutschen Markt kostengünstige interne JAZ-Messsysteme zu entwickeln. Verschiedene Hersteller wurden über ihre JAZ-Messsysteme angefragt.

Das Kapitel 3 fasst die verwendeten Definitionen und Modelle zusammen. Auf dieser Grundlage werden Simulationen durchgeführt.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Simulation besprochen und die möglichen Messmethoden erklärt. Ein Messkatalog fasst die Ergebnisse zusammen und zeigt, dass nur einzelne Varianten geeignet sind.

Das Kapitel 5 fasst die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zusammen.

1.2. Betrachtung zur Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl JAZ dient als Instrument, um die Funktionalität eines Wärmepumpenheizsystems zu überprüfen. Die Effizienz einer Wärmepumpe wird durch Güteprüfungen nach EHPA und der daraus resultierenden COP bestimmt. Jedoch garantiert dies keine energieeffiziente Heizung, wenn die Anbindung und der Betrieb fehlerhaft oder nicht optimal sind. Wenn die gewonnene Wärme nicht beim Verbraucher ankommt oder energieintensive Komponenten die Vorteile der Wärmepumpe gegenüber der Elektroheizung minimieren, kann das Instrument JAZ dies signalisieren.

Im optimalen Fall zeigt die JAZ das Verhältnis des Wärmebedarfs Q_{bedarf} zu der dazu benötigten elektrischen Energie E über die Periode von einem Jahr an. Der Wärmebedarf umfasst, alle thermische Energie die im Gebäude benötigt wird. Dabei sollten alle Verluste in Speicher und Leitungen, die nicht zur Bedarfsdeckung gehören, inbegriffen sein. Zur elektrischen Energie gehören alle energieverbrauchenden Komponenten wie Wärmepumpe, Umwälzpumpen, Ventilator und elektrische Begleitheizung, die für den Betrieb der Heizung verwendet werden.

Die Nutzenergie eines Hauses kann schlecht gemessen werden. Bisher wird diese dadurch angenommen, wieviel Wärme in einer bestimmten Systemgrenze genutzt wird. Diese Einteilung in die Systemgrenzen erzeugt zwei Probleme.

Erstens, werden je nach Systemgrenze Verluste oder Fehlschaltungen nicht einbezogen. Zum Beispiel, wenn die Wärmenutzung nach dem Speicher aufgenommen wird, vernachlässigt man die Speicher-

und Leitungsverluste die vorher entstanden.

Zweitens sind die Systemgrenze je nach Studie unterschiedlich definiert und es ist nicht möglich/sinnvoll die Studien zu vergleichen. Es hat sich bisher noch keine einheitliche Systemgrenze durchgesetzt. Beispiel von JAZ-Studien sind die FAWA-Studie [ERB04], die E-on-Studie [EWE05] oder die Fraunhofer-Studie [MIA11].

Weiter kommt zur Problematik der JAZ hinzu, dass diese Zahl Standort und Klima abhängig ist. Dies reduziert den möglichen Vergleich der JAZ, denn eine Luft-Wasser-Wärmepumpe im Mittelland erreicht klimabedingt eine bessere JAZ als eine Luft-Wasser-Wärmepumpe in den Alpen. Es gibt Möglichkeiten, die JAZ zu normieren, diese sind jedoch meistens sehr aufwendig zu berechnen.

Auch wenn Nachteile und Ungenauigkeit der JAZ bestehen, ist es als Instrument geeignet, um Betrieb und Installation des Heizsystems zu überprüfen. Jedoch muss die Systemgrenze kritisch betrachtet werden und möglichst viel in die JAZ einbezogen werden, um eine gute Aussage machen zu können.

Die Abschätzung der JAZ über die kreislauf-interne Messung und die externe Messung über Wärmezähler muss mit Vorsicht betrachtet werden. Erstens sind die interne Messung und die externe Messung, die direkt an der Hydraulik der Wärmepumpe misst, soweit beschränkt, dass nur die erzeugte Wärme gemessen wird. Eine Abschätzung wie viel Wärme ungenutzt verloren geht, kann nur dann gemacht werden, wenn auch die Nutzenergie bekannt ist. Die elektrische Energie muss ebenfalls bewusst gemessen werden, damit alle Verbraucher im Heizsystem bekannt sind. Eine schematische Darstellung dieser Gegebenheit gibt die Abbildung 1, wobei die JAZ sich auf die FAWA-Studie [ERB04] bezieht.

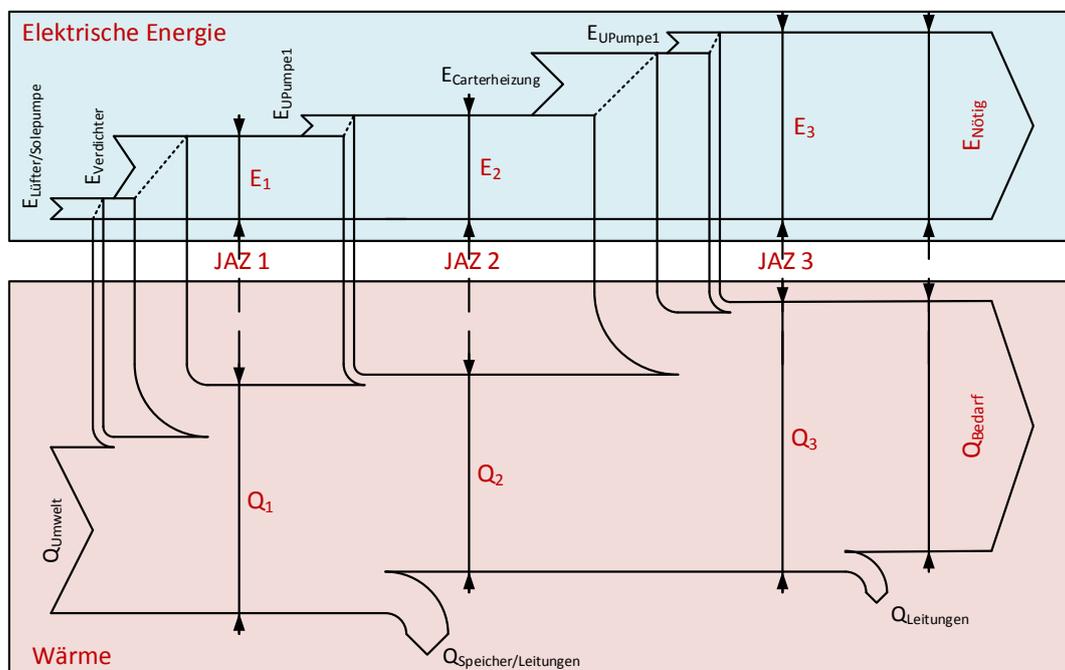


Abbildung 1: Einteilungen der JAZ im Wärme- und elektrischen Energiefluss

Das Schema zur Einteilung der JAZ ist in Abbildung 9 gezeigt. Es gibt für die JAZ2 die weitere Bezeichnung Systemnutzungsgrad SNG. Die JAZ3 entspricht der manchmal verwendeten Bezeichnung

Systemnutzungsgrad+ SNG+. Die nachfolgende Betrachtungen beschäftigen sich mit der internen JAZ Messung die der JAZ1 entspricht, somit der Messungen im Kreislauf.

Allgemein gilt für die interne und externe Messung, dass die Resultate bei dynamischen Zustandsänderungen mit grösseren Unsicherheit beaufschlagt sind. Auch Prozesse wie die Abtauung führen zu weiteren Ungenauigkeiten und Fehlerquellen in der Messung.

2. Literaturrecherche

2.1. Wissenschaftliche Artikel

Im wissenschaftlichen Bereich wurden einige Arbeiten über die interne COP-Ermittlung veröffentlicht. Diese wurden aber nicht für die europäisch dominierenden Luft-Wasser-, Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen durchgeführt, sondern für die amerikanisch dominierenden Luft-Luft-Wärmepumpen. Das Problem bei diesen ist die schlechte Messbarkeit des Luftvolumenstroms und -enthalpie. Darum besteht ein Interesse den COP über den Kältekreislauf zu ermitteln. Aus dem COP kann leicht durch die Arbeitspunkte übers Jahr die JAZ aufsummiert werden.

Fahlén [FAH04] untersucht die externe COP Messung wie auch eine interne Methode. Die externe Methode besteht aus Volumenstromzähler mit Thermofühlerpaaren. Fahlén zeigt dass diese Methode in der Praxis nie eine Messunsicherheit unter 5% erreicht, weil durch Ungenauigkeit und schlechte Montage Messfehler entstehen. Im Labor werden Messunsicherheiten von 1.4-4.7% erreicht und in der Praxis schätzt man die Messunsicherheit auf 5-15%.

Die interne Methode besteht aus der Messung von Kondensations- und Verdampfungsdruck, Überhitzung und Unterkühlung. Der COP wurde bei fünf Wärmepumpen im Labor und acht Wärmepumpen in der Praxis durch interne und externe COP-Messungen beurteilt. Die interne COP-Messung lag in keinem Fall ausserhalb von 15%. Wenn die Sensoren optimal platziert werden konnten, lag die Differenz sogar unter 5%.

Tran et al. [TRA12] zeigen eine Messmethode bei der zwei Coriolis-Massenstromsensoren, zwei Drucksensoren und zwei Temperatursensoren eingesetzt werden, diese ist in Abbildung 2 aufgezeigt. Die Methode soll bei stationären wie auch dynamischen Vorgänge, wie zum Beispiel Abtaungszyklen, glaubwürdige Ergebnisse liefern. Die Luft-Wasser-Wärmepumpe besteht aus einem Split-System.

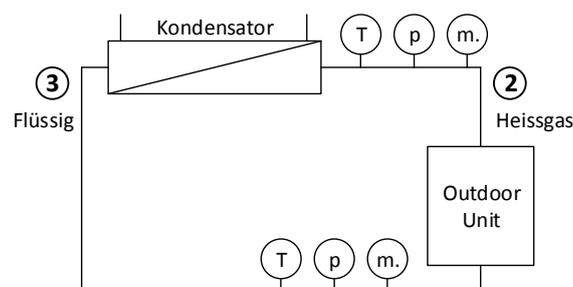


Abbildung 2: Schema der Messstrategie von [TRA12]

Der Massenstrom \dot{m}_{KM} wird mit einem Coriolis-Massenstromsensor beim Heissgas Punkt 2 gemessen, der zweite wird für die Messung des Dampfblasenanteil verwendet um in Kombination der Drucksensoren und Temperatursensoren die beiden Enthalpien h_2 , h_3 zu berechnen. Aus Massenstrom \dot{m}_{KM} und Enthalpien h_2 , h_3 kann die Wärmeabgabe \dot{Q}_{Heiz} berechnet werden.

Je nach Einsatzgebiet liegt die relative Messungenauigkeit bei 1.9-5% im stationären Bereich. In Langzeitversuchen konnte eine relative Messungenauigkeit von 1.8% auf den Mittelwert von einer externen Wärmemessung ermittelt werden.

Tran et al. [TRA13] zeigt ein weiteres Messprinzip mit dem Verzicht beider Coriolis-Massenstromsensoren und dem Einbeziehen von mehreren Druck- und Temperatursensoren. In Abbildung 3 sind die Messpunkte gezeigt. Die vollen Kreise sind die Messpunkte des Konzepts, die gestrichelten Kreise sind

Referenz-Messpunkte, um die Messunsicherheit des Konzepts zu beurteilen.

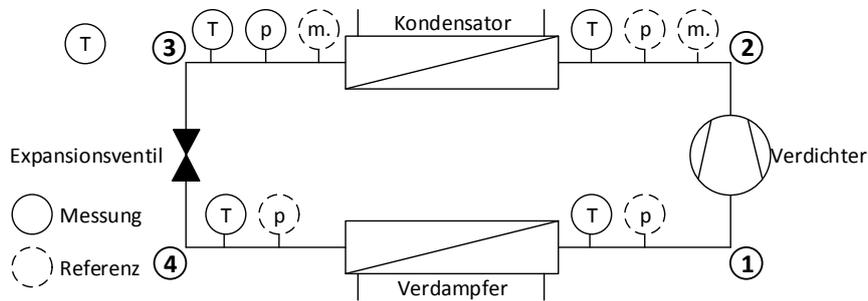


Abbildung 3: Schema der Messstrategie von [TRA13]

Der Massenstrom \dot{m} wird über das thermische Gleichgewicht des Verdichters berechnet, wobei die Verlustleistung $\dot{Q}_{Verlust}$ durch eine Approximation mit der Umgebungstemperatur bestimmt wird. Der Druckverlust über den Kondensator und Verdampfer wurde als vernachlässigbar eingestuft. Die relative Messungenauigkeit wird auf 6.6-9.2% bestimmt. Die Basis der Aussagen beziehen sich auf die Referenz-Messpunkte.

Singer et al. [SIN14] stellt eine Messmethode vor, die nur mit Temperatursensoren und einem Leistungssensor auskommt. Dabei werden die zwei Wärmepumpenkreisläufe mit Economizer und internen Wärmetauscher analysiert. Das log p,h-Diagramm und das Schema mit den Messpunkten ist in Abbildung 4 dargestellt. Dabei stellt sich heraus, dass durch bloße Temperaturmessung in den Zweiphasenbereichen und Leistungsmessung eine Messunsicherheit von 10% besteht. Die grösste Unsicherheit ist der Zustand des Dampfes in der Zwischeneinspritzung. Viele der Temperaturen sind sowieso durch die Wärmepumpenregelung aufgenommen und es muss nur wenig investiert werden um eine COP-Messung zu ermöglichen.

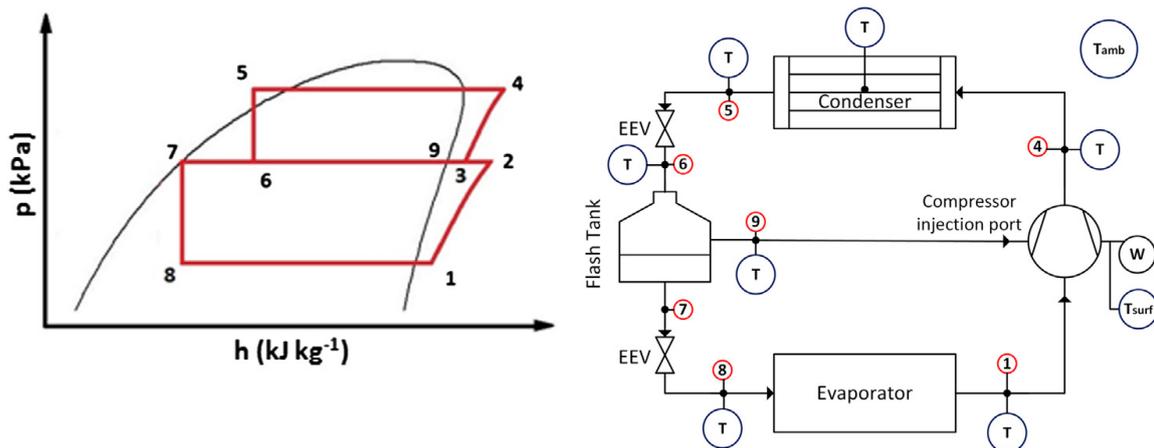


Abbildung 4: Log p,h-Diagramm und Schema der Messstrategie von Singer et al. [SIN14] für Wärmepumpen mit Economizer

2.2. Deutsches Förderungsprogramm

Deutschland betreibt ein Marktanreizprogramm zur Förderung von effiziente Wärmepumpen durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle BAFA. Vom Bundesamt werden keine Zahlen herausgegeben, aber die Förderung läuft noch (Stand: Juni 2014). In der Förderrichtlinie zum Marktanreizpotenzial 2012 [MAP12] sind neben einer JAZ-Messung noch weitere Voraussetzung gefordert.

- Messung der aufgenommenen Strommenge der Wärmepumpe durch Stromzähler und Messung aller abgegebene Wärme der Wärmepumpe durch Wärmezähler.
- Nachweis einer Jahresarbeitszahl bei Sole/Wasser und Wasser/Wasser-Wärmepumpen von 3.8 und bei Luft/Wasser-Wärmepumpen von mindestens 3.5 (Wärmepumpe unter 100 kW). Diese JAZ wird über VDI 4650 Blatt 1 berechnet und es ist kein Messung als Nachweis nötig.
- Für die Berechnung der Jahresarbeitszahl benötigten COP-Werte müssen durch ein unabhängiges Prüfungsinstituts oder mit einem Prüfbericht des EHPA-Wärmepumpen-Gütesiegels nachgewiesen werden.
- Die Jahresarbeitszahl bei Wärmepumpen ist das Ergebnis der Division der abgegeben Wärme durch die eingesetzte Strommenge. Einschliesslich der Strommenge für den Betrieb der peripheren Verbraucher (insbesondere der Grundwasserpumpe, der Soleumwälzpumpe, des Notheizstabes und der Regelung).
- Die Jahresarbeitszahl ist nach VDI 4650 (2009) unter Berücksichtigung der Jahresarbeitszahlen für Raumwärme und für Warmwasser zu bestimmen.

Die Berechnung der JAZ mit VDI 4650 Blatt 1 geht von einer Leistungszahl gemessen nach EN 14511 aus und korrigiert diese durch Einbeziehen von Faktoren für unterschiedliche Betriebsbedingungen und Wärmequellen. Dieses Verfahren scheint eine grobe Abschätzung zu sein und wird für den Förderungsantrag verwendet.

Für den Antrag müssen die Anlagen zuerst in Betrieb genommen werden und innerhalb von 6 Monaten mit folgenden Unterlagen angemeldet werden.

- Förderantrag, der mit Hilfe des Installateurs ausgefüllt wird
- Fachunternehmenserklärung, vom Installateur ausgefüllt und enthält die prognostizierten JAZ nach VDI 4650 sowie eine Bestätigung des hydraulischen Abgleichs
- Vollständige Rechnung in Kopie

Danach wird die Prämie bezahlt. Es werden Stichproben durchgeführt, um abzuklären ob wirklich eine Anlage installiert wurde.

Die Richtlinie gibt keine Spezifikation für den Wärmezähler an. Aus den Gesprächen zu den Herstellern kam heraus, dass die Behörden alle Verfahren für die Wärmezählung akzeptieren. Es konnte jedoch nicht erschlossen werden, ob es Einschränkungen in der Unsicherheit gibt. Um nicht durch einen externen Wärmezähler den Preis einer Wärmepumpe weiter zu erhöhen, bieten mehrere Hersteller bereits interne Wärmezähler an. Diese sind meistens für den Antrag einer Förderung ausreichend, dürfen aber nicht für Heizkosten-Abrechnungen genutzt werden, da die Systeme nicht geeicht sind. Auch sind die Messabweichungen in der Regel höher als bei genormten und geeichten Wärmezählern.

2.3. JAZ Monitoring Systeme und Wärmezähler

Ein Überblick über bestehende Systeme für die Wärmezählung einer Wärmepumpe soll nun hier gegeben werden und kann im ersten Blick in Tabelle 1 betrachtet werden. Mehrere Hersteller rüsten Ihre Wärmepumpen mit internen Wärmezähler aus. Interne Messung bedeutet, dass die Daten aus dem Kältekreislauf gewonnen werden. Bei der externen Messung wird über die Quellen- oder Senkenseite die Information aufgenommen. Daraus kann nicht geschlossen werden, ob die Messung mechanisch im Gerät oder ausserhalb installiert ist.

Hersteller	interne Messung	externe Messung
Alpha-InnoTec AIT		x
CTA		x
Hoval		x
Oertli	x	x
Vaillant	x	
Weishaupt	x	
Waterkotte	x	
Zehnder		x

Tabelle 1: Übersicht der Messverfahren verschiedener Hersteller

Alpha-InnoTec AIT Wärmepumpen können optional mit Wärmezähler ausgerüstet werden. Die Wärmezähler basieren auf Temperatur- und Volumenstrommessung auf der Heizungsseite.

Emerson Climate Technologies liefert für die Emerson Verdichter einen Überhitzungs- und Systemregler, der den COP wie auch die JAZ berechnet. Die Umsetzung besteht aus diversen Druck- und Temperatursensoren im Kältekreislauf, sowie einer Abbildung des Verdichters durch ein 20-Koeffizienten Modell, welches die Verdampfungs-, Kondensationstemperatur und die Drehzahl als Funktion verwendet. Der Energieverbrauch kann durch die Bus-Kommunikation ins System übertragen werden. Es werden keine Angaben über die Messunsicherheit angegeben.

CTA bietet für die All-in-One Wärmepumpen integrierte Wärmezähler an, die auf der Wasserseite messen. Für alle anderen können Wärmezähler auf Wunsch extern eingebaut werden. Der Wärmepumpenregler kann diese Daten verarbeiten.

Hoval rüstet nach und nach seine Wärmepumpen mit Leistungsaufnahme-/ Wärmemessung/ -zählung aus. Die Messung erfolgt in der Heizwasser-Hydraulik durch den Volumenstrom und den Temperaturhub. Über die Messgenauigkeit kann im Moment keine Aussage gemacht werden [HOV14].

Oertli bedient sich der Methode den Nieder- und Hochdruck zu messen und mit den Verdichterdaten wird die momentane Heizleistung berechnet. Die Wärmepumpen LIN9TU und LIN12TU sind mit diesem System ausgerüstet. Dem Kunden wird am Display des Wärmepumpenmanagers die abgegebene Wärme angezeigt, die JAZ muss jedoch selber berechnet werden [OER14₁].

Wärmepumpen die nicht über eine interne Wärmemessung verfügen, können mit einem optionalen Wärmezähler ausgerüstet werden. Dieser wertet die Temperatur am Vor- und Rücklauf und den Durchfluss aus und die Wärme wird am Display angezeigt. Dieser Wärmezähler erfüllt die Anforderungen des deutschen Marktanzreizprogrammes zur Förderung von effizienten Wärmepumpen, ist aber nicht geeicht und somit für eine Abrechnung nicht zugelassen [OER14₂].

Vaillant gibt auf ihrer Homepage an, dass ihre geoTHERM-Wärmepumpenbaureihe über einen integrierten Wärmezähler verfügen, welcher für das Marktanzreizprogramm anerkannt wird [VAI14₁]. Nach einem Telefonat am 25. Mai 2014 mit einem Techniker der Firma Vaillant hat sich herausgestellt, dass der interne Wärmezähler nicht auf Daten aus dem Kältemittelkreislauf zurückgreift. Laut Techniker wird die aufgenommene Energie aus der Umwelt (Erdreich/Luft/Wasser) durch Ein- und Austrittstemperatur sowie Volumenstrom gemessen. Aus der aufgenommenen Umweltenergie und der elektrischen Energie kann der COP und über ein Jahr die JAZ berechnet werden. Nach Angaben des Technikers ist die Messung aber nicht sehr genau und kein Ersatz für einen geeichten Wärmezähler.

Die Bedienungsanleitung der 'geoTHERM'-Wärmepumpe gibt einen Einblick in die Darstellung der Wärmezählung [VAI14₂]. Die Darstellung wird Energieertragsanzeige genannt und ist in Abbildung 5 dargestellt. Der Energieertrag, als schwarzer Balken markiert, wird für jeden der 12 Monate des aktuellen Jahres angezeigt. Für die zukünftigen Monate wird der Ertrag vom Vorjahr als weisser Balken prognostiziert. Rechts oben wird die Gesamtsumme des Umweltertrages seit Inbetriebnahme angezeigt.

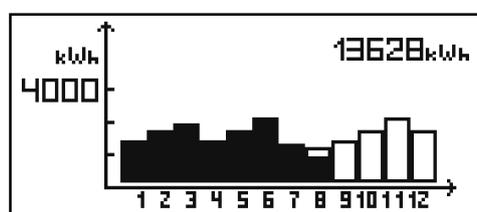


Abbildung 5: Energieertragsanzeige von Vaillant geoTHERM Wärmepumpen [VAI14₂]

Weishaupt Sole/Wasser-Wärmepumpen verfügen ebenfalls über einen integrierten Wärmezähler. Laut einer E-Mail der Firma Weishaupt werden die Daten zur Berechnung der Wärme aus dem Kältekreislauf aufgenommen. Dabei wird über Drucksensoren der Zustand des Kältekreislaufes ausgewertet und mit Hilfe der Verdichterkennlinie die Wärme berechnet. Dieses Verfahren weist eine Abweichung von kleiner 2.5% gegenüber externen Wärmemessungen auf. Laut Aussage kann die interne Wärmezähler nicht für die Abrechnung, aber für die Effizienzprüfung der Behörden genutzt werden [WEI14].

Waterkotte Wärmepumpen der Baureihe Ai1 und DS verfügen ebenfalls über einen internen Wärmezähler. Die Wärme wird durch Druck und Temperatur am Verdichter Ein- und Austritt sowie der Kennlinie des Verdichters berechnet. Des weiteren werden Druck- und Temperatur vor und nach dem Kondensator gemessen. Aus diesen Parametern lässt sich die abgegebene thermische Energie berechnen. Laut E-Mail wurde der interne Wärmezähler geprüft. Dabei wurde eine Abweichung von $\pm 3.5\%$ ermittelt. Intern wird die JAZ berechnet und über 10 Jahre gespeichert [WAT14].



Abbildung 6: Leistungsanzeige von Waterkotte-Wärmepumpen [WAT14]

Zehnder ist dran die Wärmemengenmessung optional anzubieten. Auf Wunsch kann ein Durchflusssensor und Temperatursensoren eingebaut und auf dem Bedieneinheit kann Warmwasser-, Wärme- und Kältemenge separat angezeigt werden.

Zusammenfassung

- In der Praxis wird kreislauf-intern und extern gemessen
- Das deutsche Förderprogramm lässt beide Verfahren zu
- Typische Abweichungen nach der wissenschaftlichen Literatur liegt für die Praxisanwendung zwischen 5-15%
- Typische Abweichungen nach den Herstellern liegt zwischen 2.5-3.5% gegenüber externen Messungen
- Die interne Messmethode ist nicht geeicht

3. Definitionen und Modelle

3.1. Begriffe

Jahresarbeitszahl JAZ Die Jahresarbeitszahl JAZ ist eine Arbeitszahl, die die erzeugte Wärme mit der aufgewendeten elektrischen Arbeit über ein Zeitperiode von einem Jahr wiedergibt. Dies kann entweder über eine externe oder interne JAZ-Messung erfolgen.

Externe JAZ-Messung Die externe JAZ-Messung misst mit einem Wärmehzähler, der grundsätzlich aus einem Volumenstromzähler und zwei Temperaturfühlern besteht, die erzeugte oder genutzte Wärme. Dieser kann an der Senke oder beschränkt an der Quelle angebracht werden. Neben der Wärme muss über einen Stromzähler die aufgewendete Arbeit aufgenommen werden, damit die JAZ berechnet werden kann.

Interne JAZ-Messung Die interne JAZ-Messung beruht auf dem Prinzip, dass nicht die Quelle oder die Senke als Messpunkt genutzt wird, sondern die Leistungsdaten werden direkt aus dem Kältekreislauf der Wärmepumpe berechnet. Durch verschiedene Sensoren kann der COP der Wärmepumpe bestimmt werden. Der COP kann zeitlich integriert werden und mit der elektrischen Arbeit errechnet sich die JAZ.

3.2. Aussentemperatur

Die mittlere stündliche Aussentemperatur wird aus dem Meteonorm Datensatz vom Standort Zürich nach SIA Merkblatt 2028 verwendet. Die Temperaturklassen werden nach der Bin-Methode von SIA 384/3 eingeteilt und in dieser Form bei der Auswertung verwendet. Eine grafische Darstellung der Summenhäufigkeitsmethode (Bin-Methode) ist für Zürich in Abbildung 7 gezeigt.

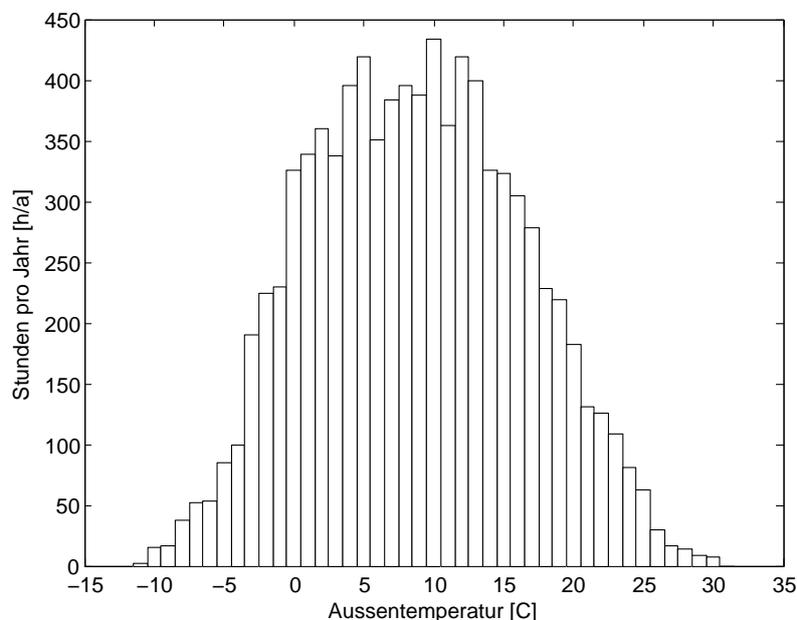


Abbildung 7: Aussentemperaturen nach der Bin-Methode von SIA 384/3 für den Standort Zürich

3.3. Leistungskennlinie

Die Heizwärmeleistung wird nach SIA 384/3 modelliert. Es werden dabei zwei Fälle unterschieden. Einmal die Heizwärmeleistung und zweitens die Heizwärmeleistung mit Warmwasserbedarf. Beide

Kennlinien sind in Abbildung 8 abgebildet. Die Wärmepumpe wird so ausgelegt, dass beim Norm-Punkt eine Leistung von 70% vorhanden ist.

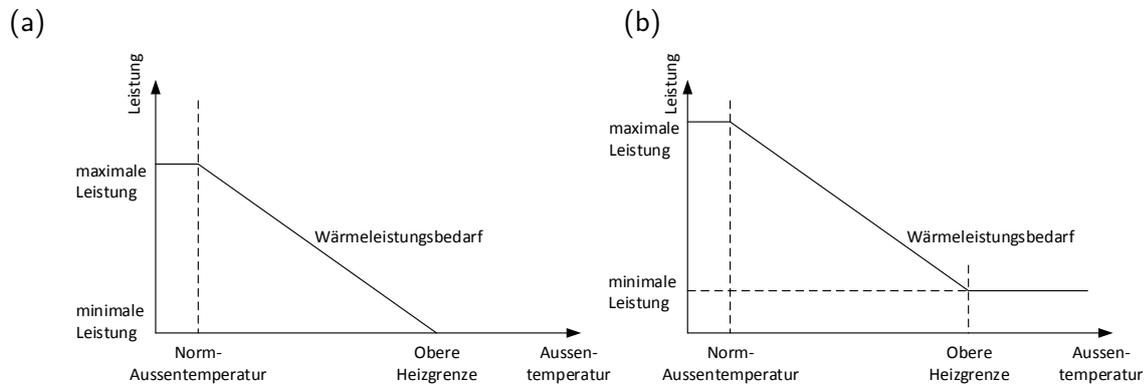


Abbildung 8: Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/3 mit (a) Heizleistung, (b) Heizleistung und Warmwasser

Die Norm-Aussentemperatur wird nach SIA 384.201 bestimmt und liegt im Fall Zürich bei -8°C . Die restlichen Parameter werden für zwei Fälle berechnet und sind in Tabelle 2 gezeigt.

- Fall 1: EFH Minergie Standard, Wärmekennzahl $35 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, Fussbodenheizung
- Fall 2: EFH Altbau Wärmeschutzklasse E, Wärmekennzahl $130 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, Radiatoren

Parameter	EFH Minergie	EFH Altbau
Wärmekennzahl	$35 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	$130 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
Wohnfläche	200 m^2	200 m^2
max. Heizleistung	4.3 kW	10.9 kW
min. Leistung	0 kW	0 kW
Obere Heizgrenze	12°C	18°C
Norm-Aussentemperatur	-8°C	-8°C
max. Vorlauftemperatur	30°C	50°C
min. Vorlauftemperatur	25°C	30°C

Tabelle 2: Parameter für zwei Fälle

3.4. Systemgrenzen

Die Definition der Systemgrenzen der JAZ werden von der FAWA Studie [ERB04] adaptiert. In Abbildung 9 ist die Definition der JAZ Systemgrenzen schematisch dargestellt. Dabei wird bei der internen Methode nur die JAZ1 gemessen.

JAZ 1 - Verhältnis zwischen der Wärme ab WP, ohne Speicherluste und dem WP spezifischen Elektrizitätsbedarf, inklusive der Hilfsaggregate wie Umwälzpumpen und Carterheizung. Senkenseitig wird nur der Stromverbrauch zur Überwindung des Druckabfalls über dem Verflüssiger einbezogen. [...] [ERB04]

Kurz erörtert ergeben sich für die JAZ1 folgende Verbraucher:

- Wärmepumpe (Verdichter und Steuerung)

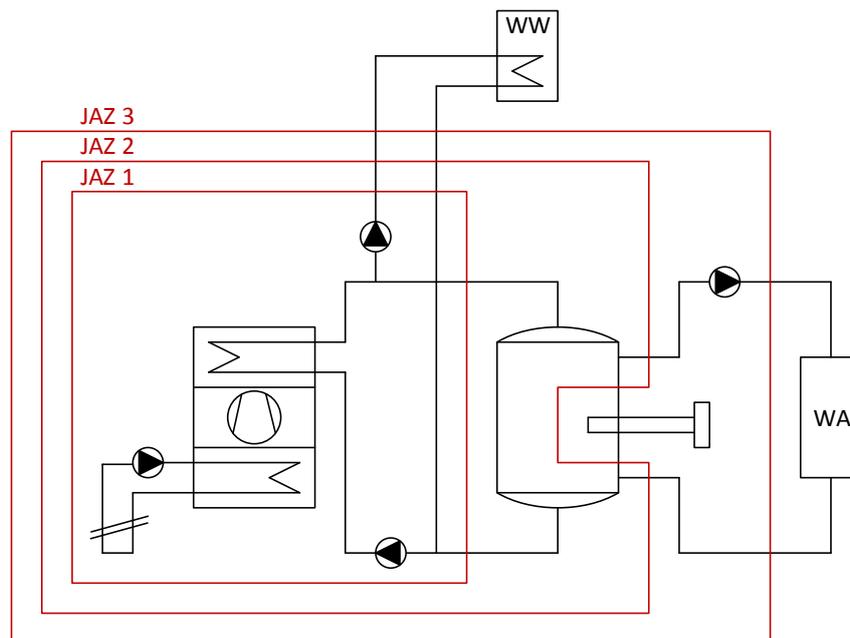


Abbildung 9: JAZ Systemgrenzen nach FAWA [ERB04]

- Lüfter oder Umwälzpumpe der Quelle
- Umwälzpumpe der Senke (jedoch nur die Leistung, um den Druckabfall im Wärmetauscher zu überwinden)

3.5. Kreisläufe

Um die Messunsicherheit der JAZ errechnen zu können, werden die Wärmepumpenmodelle mit EES (Engineering Equation Solver) gelöst. Dazu wurden zwei gängige Kreisläufe ausgewählt, die momentan den Grossteil des Wärmepumpenmarktes abdecken. Zusätzlich werden für beide Kreisläufe die Quellen Luft und Erdsonden unterschieden.

- Wärmepumpenkreislauf mit Sauggasüberhitzer (Verdichter, Verdampfer, Kondensator, Expansionsventil und Sauggasüberhitzer), Abbildung 10.

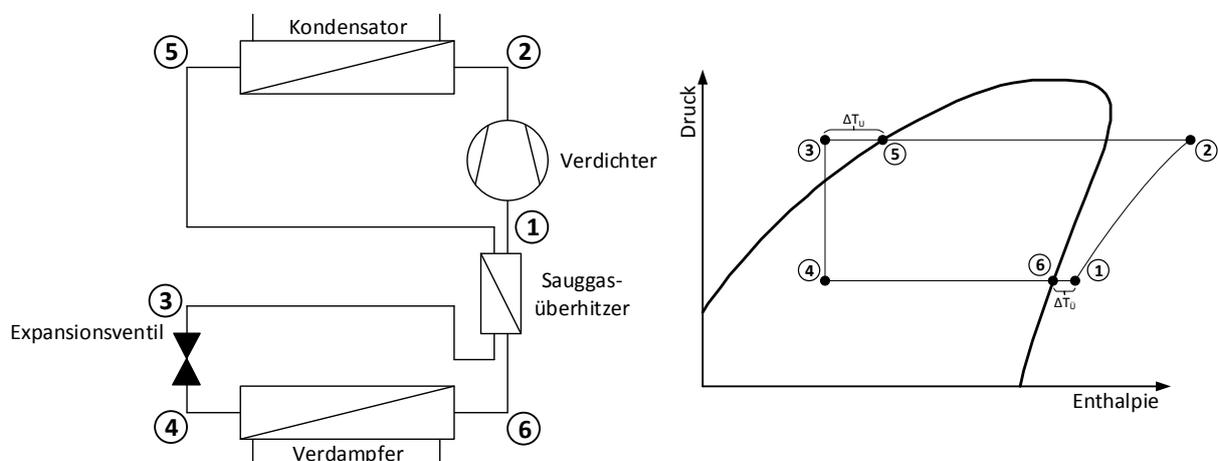


Abbildung 10: Wärmepumpe mit Sauggasüberhitzung

- Wärmepumpenkreislauf mit Economizer (Verdichter mit Zwischeneinspritzung, Verdampfer, Kondensator, zwei Expansionsventile, Economizer), Abbildung 11.

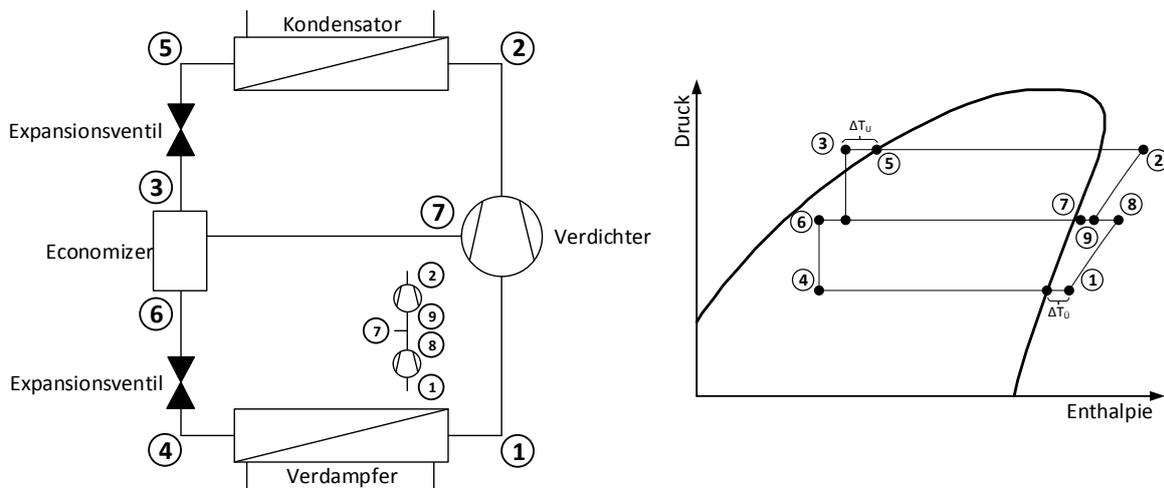


Abbildung 11: Wärmepumpe mit Economizer

3.6. Komponentenmodelle

Einfacher Verdichter

Das Verdichter-Kennfeld wird mit dem ANSI/AHRI Standard 540 Modell [ANS04] abgebildet. Dabei wird der Verdichter als Kennliniefeld durch 10 Koeffizienten in Abhängigkeit von Verdampfungstemperatur und Kondensationstemperatur abgebildet. Der Massenstrom \dot{m}_{KM} und die elektrische Leistung P_{el} wird mit dem Modell von Dabiri [DAB81] an die neu verwendete Überhitzung korrigiert. Die Leistung wird durch einen Faktor an den Bedarf angepasst.

Dieses Modell von ANSI/AHRI Standard und Dabiri dient als Ausgangslage, um die Ungenauigkeit des Verdichtermodell mit konstanter isentropischer Effizienz und Liefergrad zu bestimmen.

Verdichter mit Zwischeneinspritzung

Das Verdichter-Kennfeld des Verdichters mit Zwischeneinspritzung wird nach dem 20 Koeffizientenmodell von Emerson Climate Technologies gewählt. Dabei spielt hier die Verdampfungs-, Kondensationstemperatur und die Drehzahl eine Rolle. Die Drehzahl wird zur Vereinfachung konstant gehalten. Die Größe des Verdichters wird durch einen Faktor an den Heizbedarf angepasst.

Wärmetauscher

Verdampfer und Kondensator werden mit dem Efficiency-NTU Modell abgebildet [DEW11]. Als Basis wird der 'All exchangers' verwendet, welcher mit den Formeln 1 - 2 wiedergegeben ist.

$$\epsilon [-] \quad \dots \quad \text{Effizienz Wärmetauscher} \quad \epsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (1)$$

$$NTU [-] \quad \dots \quad \text{Number of Transfer Units}$$

$$UA [kW/K] \quad \dots \quad \text{Gesamter Wärmeübergang} \quad NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (2)$$

$$C_{min} [kW/K] \quad \dots \quad \text{Wärmekapazitätsrate}$$

Flüssigkeitspumpe

Die Leistung der Umwälzpumpe um den Druckabfall über die Wärmetauscher zu überwinden wird nach der Norm EN 14511 berechnet.

Expansionsventil

Das Expansionsventil bewirkt, dass ein hoher Kondensationsdruck auf den tieferen Verdampfungsdruck abgebaut wird. Diese Zustandsänderung entspricht einer adiabaten Zustandsänderung. Konkret kann dies durch die Formel 3 abgebildet werden. Mit inbegriffen sind die Druckabfälle über Zuleitung, Trockenfilter, Schauglas und andere Hilfsapparate [EHR00].

$$h \text{ [kJ/kg]} \quad \dots \quad \text{Enthalpie} \qquad h_3 = h_4 \qquad (3)$$

Man geht von einem elektrischen oder thermischen Expansionsventil aus, das auf eine konstante Überhitzung von 8°C geregelt wird.

Sauggasüberhitzer

Bei der Sauggasüberhitzung geht man von einem kältekreislauf-internen Wärmetauscher aus. Dieser wird ebenfalls mit dem Efficiency-NTU Modell und der Energieerhaltung abgebildet.

Economizer

Der Economizer wirkt als offener Behälter, wobei die flüssige Komponente dem Verdampfer zugeführt wird und die gasförmige dem Verdichter als Zwischeneinspritzung abgegeben wird. Dieses Modell wird nach der Energieerhaltung im Behälter und dann im Verdichter abgebildet.

Erdwärmesonde

Die Auslegung erfolgt über die von SIA 384/6:2010 geforderten 3 K bis 4 K Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt am Verdampfer. Die Wärmestromdichte ist mit 50 W/m gewählt worden und mit einer Pumpenleistung von 2 W/m. Die Länge wurde beim Normpunkt ermittelt. Die Soletemperatur am Eingang des Verdampfers wurde nach einer Messung von Ehrbar [EHR10] angenähert und ist in Abbildung 12 dargestellt.

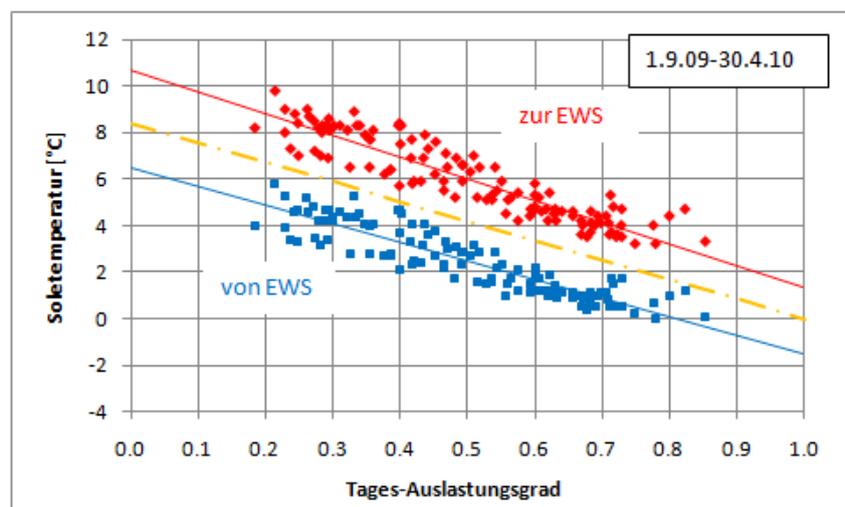


Abbildung 12: Temperaturverlauf der Sole nach dem Auslastungsgrad [EHR10]

Luft

Die Eintrittstemperatur der Luft in den Verdampfer entspricht der Aussentemperatur. Der Volumenstrom wird auf 3000 m³/h und 6000 m³/h für beide Fälle eingestellt. Der Volumenstrom wurden aus

Daten verschiedener Hersteller gewählt. Das WPZ schätzt die Leistungsaufnahme des Ventilators auf 60 W für Wärmeleistungen von 5 kW und auf 100 W für Wärmeleistungen von 10 kW.

Zusammenfassung Parameter

Parameter	EFH Minergie	EFH Altbau
Unterkühlung	5°C	5°C
Überhitzung	8°C	8°C
UA-Wert Wärmetauscher	1 $\frac{\text{kW}}{\text{K}}$	3 $\frac{\text{kW}}{\text{K}}$
Volumenstrom Verdampfer Sole	1.17 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	3.28 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
Volumenstrom Verdampfer Luft	3000 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	6000 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
Volumenstrom Kondensator	0.86 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	3.28 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
Druckabfall Wärmetauscher flüssig	10 kPa	20 kPa
Leistungsaufnahme Lüfter	60 W	100 W
Konzentration Glykol (Sole)	30%	30%

Tabelle 3: Zusammenfassung Parameter

3.7. Sensoren

In der Kältetechnik werden vor allem Temperatur- und Drucksensoren eingesetzt. In der Entwicklung und Forschung werden zusätzlich noch Volumen- oder Massenstromsensoren und elektrische Leistungsmesser verwendet, die aber sehr kostenintensiv sind und nicht in Seriengeräten eingebaut werden. In Tabelle 4 sind Temperatur-, Drucksensoren, Energie- und Wärmezähler mit der Messunsicherheit und den Kosten aufgelistet. Dies ist eine Zusammenfassung aus der kurzen Recherche in Anhang A.1, wobei spezifische Sensoren aufgelistet sind. Ein Stromzähler benötigt jede JAZ-Messung ob intern oder extern. Obwohl die Verdichterleistung berechnet werden könnte, sind die Pumpen- und Lüfterleistung nur durch Stromzähler genau genug zu bestimmen. Die Wärmezähler sind als Referenz eingefügt, um das Kostendach für die interne Wärmemessung darzustellen. Man kann davon ausgehen, dass sie in jenen Wärmepumpen Regler vorhanden sind, die mit zusätzlichen Eingängen ausgerüstet sind, damit weitere Sensoren angehängt werden können.

Messgrösse	Messprinzip	Unsicherheit	Listenpreis
Temperatur	NTC, PTC	$\pm 1.0^\circ\text{C}$	40.-
	PT-100	$\pm(0.3+0.005*T)^\circ\text{C}$	40-100.-
Druck		$\pm 0.8\% - \pm 1.0\% \text{ FS}$	130-160.-
		$\pm 1.0\% - \pm 1.2\% \text{ FS}$	60-130.-
Stromzähler		$\pm 2.0\%$ (Klasse 1/Klasse B)	250.-
Wärmezähler		$\pm 3.0\%$ (Klasse 2)	450.-

Tabelle 4: Mögliche Sensoren für JAZ-Monitoring

4. Strategien für internes JAZ Monitoring

Um die JAZ, respektive zeitlich das COP aufzuzeichnen, werden Zustände im Kreislauf gemessen und fehlende Angaben durch Modelle berechnet. Der Massenstrom wird in diesem Fall immer durch ein Modell berechnet, da ein Massenstrommessgerät einen sehr grossen Investitionsaufwand bedeuten würde. In Abbildung 13 ist das log p,h-Diagramm aufgezeigt und die benötigten Kreislaufzustände sind eingezeichnet. Ebenfalls sind die Druckabfälle über den Wärmetauscher eingezeichnet. Die elektrische Energie soll durch einen Stromzähler aufgezeichnet werden. Dieser verbessert die Genauigkeit der JAZ Messung wesentlich weil die Leistung der Umwälzpumpen, Lüfter, Steuerung und Caterheizung nicht geschätzt werden müssen. Auch die energieintensiven Enteisungen bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe kann konkret aufgezeichnet werden, was einer der grossen Unsicherheiten wäre.

Um die Wärmeleistung zu berechnen ist die Verdampfungstemperatur T_{ver} , die Kondensationstemperatur T_{kon} , die Überhitzung T_{Ue} und die Unterkühlung T_U nötig. Daraus lassen sich die Enthalpien h_1 , h_2 und h_3 sowie der Massenstrom \dot{m} berechnen.

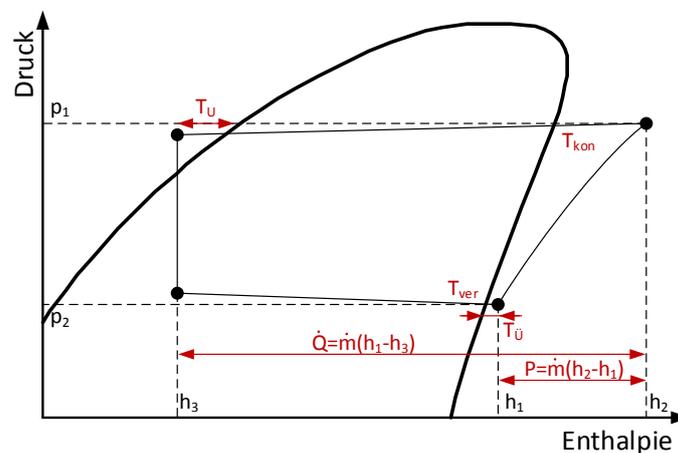


Abbildung 13: log p,h-Diagramm mit Parametern und Leistungen

Die Messung dieser Parameter kann auf unterschiedliche Weise mit Druck- und Temperatursensoren geschehen. Zuerst wurden die Einflüsse der Parameter auf die JAZ untersucht. Danach wurden verschiedene mögliche Messverfahren bewertet, wie genau sie die JAZ gegenüber dem Modell messen können.

4.1. Sensibilitätsanalyse

Die grössten Einflüsse im Kältekreislauf auf die JAZ können auf sieben Parameter beschränkt werden. Die Unterkühlung, Überhitzung, isentropische Effizienz, Verdampfungstemperatur und Kondensationstemperatur. Die Effizienz der beiden Wärmetauscher muss ebenfalls herangezogen werden, wenn keine Verdampfungs- oder Kondensationstemperatur gemessen werden kann. So können durch die Vor-, Rücklauf, Quellen- und Austrittstemperatur die nötigen Werte berechnet werden. In Abbildung 14 sind diese im log p,h Diagramm abgebildet.

In Anhang A.2 sind diese Parameter bei den Wärmepumpenmodellen einzeln variiert und die Abweichung zur JAZ ermittelt worden. Dadurch lässt sich bestimmen wie genau die Messungen sein müssen, um eine gewisse Messunsicherheit zu gewährleisten.

Folgende Erkenntnisse können daraus gezogen werden:

- Die Überhitzung bewirkt nur eine kleine JAZ-Abweichung.

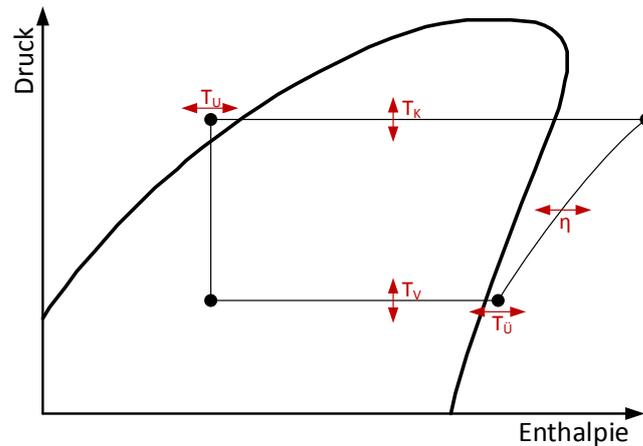


Abbildung 14: Verhalten der Einflüsse auf den Kreislauf

- Die Unterkühlung bewirkt eine grosse JAZ-Abweichung mit ca. 1% pro 1°C.
- Die Modellierung des Verdichters muss mit dem 10 Komponentenmodell oder einem Kennliniennfeld abgebildet werden, da sehr grosse Abweichungen zu einfacheren Modellen bestehen.
- Abweichungen des realen Verdichters auf das 10 Komponentenmodell haben einen Einfluss, der je nach Verdichter sehr unterschiedlich ist. JAZ Abweichungen bis maximal 2% bei 10% Verdichtergrößen-Abweichung sind möglich.
- Die Verdampfungstemperatur beeinflusst die JAZ enorm bis zu 3% pro 1°C Abweichung.
- Die Kondensationstemperatur beeinflusst die JAZ bis zu 1.5% pro 1°C Abweichung
- Die Heissgastemperatur bewirkt einen mittleren Einfluss der JAZ von maximal 0.5% pro 1°C.
- Die UA-Werte der Wärmetauscher bewirken eine starke JAZ-Änderung. Des Weiteren ist die UA-Wert Schätzung sehr schwierig bei stark ändernden Temperaturniveaus.

4.2. Messkatalog

Der Messkatalog soll verschiedene Messprinzipien beurteilen und ist in Tabelle 5 und 6 gezeigt. Fünf anwendbare Prinzipien wurden ausgearbeitet. Dabei wurde das Schema soweit wie möglich vereinfacht. Die zwei Leistungsfälle (Minergie, Altbau) verhalten sich in den Simulationen sehr ähnlich, so dass diese zusammengefasst wurden. Die Unterscheidungen liegen nun bei Quelle und Kreislauf. Die Genauigkeit der Messfühler wurde unterschieden. Dabei wurde ein Minimum und Maximum verwendet. Zusätzlich wurden drei weitere Prinzipien ausgearbeitet die zeigen, welche ungenügend sind falls zu wenig in die Messinfrastruktur investiert wird. Dabei spielen die Faktoren der Modellschätzung (Verdichter und Wärmetauscher) einen grossen Beitrag.

Bei den Temperatursensoren wurde das Minimum auf 0.5°C gelegt, was einen kalibrierten Sensor mit optimaler Integration in den Kreislauf darstellt (Tauchhülse, Anlegefühler ummantelt mit Isolation). Das Maximum liegt bei 1.5°C bei einem Standardsensor und einer nicht optimalen Integration (Anlegefühler, schlecht isoliert, schlechte Platzierung).

Die Drucksensoren sind sehr robust gegen Fehlintegration, darum wurden diese auf Genauigkeit der Hersteller ausgelegt. Das Minimum wird auf 0.8% und das Maximum auf 1.2% Messabweichung gelegt. Beim UA-Wert wird angenommen, dass eine gute Schätzung bei $\pm 20\%$ und eine schlechte bei $\pm 40\%$ liegt. Bei einem Messprinzip wird die isentropische Effizienz η_{isent} auf 0.65 und 0.60

gesetzt bei festgehaltenem λ von 0.7.

Die Messgenauigkeiten von Überhitzung, Unterkühlung, Verdampfungs-, Kondensationstemperatur, Stormzähler, Abweichungen zum Verdichtermodell und Wärmetauschermodell wurden mit der quadratischen Kombination ($u = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$) zusammengerechnet.

4.3. Beschreibung der Messprinzipien

Verfahren 1 Die Verdampfungstemperatur wird durch einen Drucksensor ermittelt und die Überhitzung mit einem zusätzlichen Temperatursensor. Diese Beschaltung ist sehr verbreitet für Steuerungen von elektrische Expansionsventile. Zusätzlich nimmt ein Drucksensor nach dem Verdichter die Kondensationstemperatur auf und mit einem Temperatursensor wird auf die Unterkühlung geschlossen. Über das 10 Komponentenmodell wird der Massenstrom berechnet.

Dieses Verfahren ist in der Literatur bekannt und mit einem angemessenen Aufwand kann es mit einer ähnlichen Genauigkeit wie die Wärmezähler angewendet werden. Darum ist dieses Verfahren geeignet.

Verfahren 2 Dieses Verfahren bestimmt die nötigen thermodynamischen Zustände im Kreislauf durch Sensoren. Dadurch lässt sich auf das 10 Komponentenmodell verzichten und eine Verschlechterung des Verdichters kann detektiert werden.

Dieses Verfahren ist von der Genauigkeit her vergleichbar mit dem Verfahren 1. Darüber hinaus können Abweichungen des Verdichters z.B. Alterung aufgenommen werden. Dieses Verfahren ist somit sehr gut geeignet.

Verfahren 3 Dieses Verfahren ist eine Erweiterung zum Verfahren 1, dabei wird die Messung der Unterkühlung verbessert. Durch einen zusätzlichen Drucksensor kann der Druckabfall über den Wärmetauscher bestimmen werden.

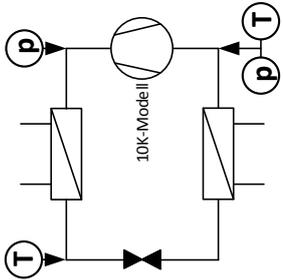
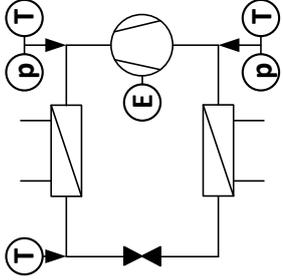
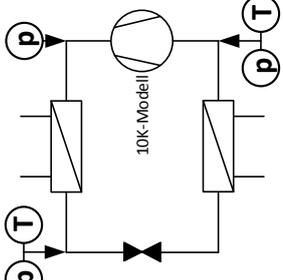
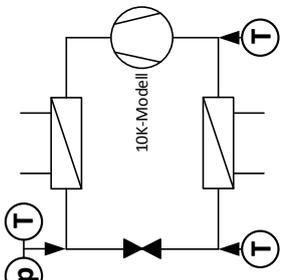
Dieses Verfahren ist leicht besser als das Verfahren 1 und 2, jedoch ist ein viel grösserer Messaufwand nötig.

Verfahren 4 Die Verdampfungstemperatur und Überhitzung wird über zwei Temperatursensoren gemessen. Die Verdampfungstemperatur wird nach dem Wärmetauscher über einen Drucksensor gemessen, sowie die Unterkühlung durch eine zusätzliche Temperaturmessung. Das 10 Komponentenmodell ist dazu nötig. Jedoch ist eine Ungenauigkeit von Verdampfungs- und Kondensationstemperatur vorhanden, da diese je hinter dem Wärmetauscher gemessen werden.

Dieses Verfahren scheint ebenfalls genügend genau zu sein und kann mit einem geringen Investitionsaufwand eingesetzt werden. Jedoch kommt die Genauigkeit nicht an das Verfahren 1, 2 und 3 heran und es reagiert sehr sensibel gegenüber schlechter Temperaturmessung.

Verfahren 5 Ist sehr ähnlich zum Verfahren 4, die einzige Änderung ist die Positionierung der Druckmessung zum Verdichter.

Aus den Simulationen geht hervor, dass die Genauigkeit gleich wie das Verfahren 4 ist und auch geeignet für die interne JAZ-Messung ist.

Verfahren Empfehlung	1 Geeignet	2 Geeignet	3 Geeignet	4 Geeignet
Schema				
Publikationen	[FAH04]			[TRA13]
Messunsicherheit	5-15% (Feld)			6.6-9.2%
Genauigkeit	*1, *2, *3, *4	*1, *2, *3, *4	*1, *2, *3, *4	*1, *2, *3, *4
T 0.5°C, p 0.8%	3.2, 2.9, 2.8, 2.7	3.1, 2.9, 2.7, 2.7	3.1, 2.9, 2.7, 2.6	4.8, 4.3, 3.7, 3.5
T 1.5°C, p 0.8%	3.5, 3.2, 3.2, 3.1	3.6 3.2, 3.3, 3.1	3.4, 3.1, 3.1, 3.0	7.8, 6.6, 5.7, 5.4
T 0.5°C, p 1.2%	4.1, 3.7, 3.3, 3.2	4.0, 3.7, 3.3, 3.2	4.0, 3.6, 3.2, 3.1	5.0, 4.5, 3.8, 3.7
T 1.5°C, p 1.2%	4.4, 3.9, 3.8, 3.6	4.4, 3.9, 3.8, 3.6	4.3, 3.8, 3.6, 3.5	7.9, 6.7, 5.8, 5.5
Anwendung	WP mit EXV	WP mit EXV	WP mit EXV	WP mit TXV
Beurteilung				
Investition	2 p, 2 T	2 p, 3 T	3 p, 2 T	1 p, 3 T)
Messgenauigkeit	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut
Bedingungen	10 Komponentenmodell des Verdichters, Grössendifferenz 3%, Wärmetauscher nach NTU-Efficiency, Parameter in Tabelle 2 und 3			

*1: Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Sauggasüberhitzer, *2: Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Sauggasüberhitzer

*3: Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung, *4: Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung

Tabelle 5: Messkatalog - Teil 1

Verfahren Empfehlung	5 Geeignet	6 Ungeeignet	7 Ungeeignet	8 Ungeeignet
Schema				
Genauigkeit	*1, *2, *3, *4	*1, *2, *3, *4	*1, *2, *3, *4	*1, *2, *3, *4
T 0.5°C, p 0.8%	4.8, 4.1, 3.7, 3.5			8.1, 16.8, 11.3, 10.8
T 1.5°C, p 0.8%	7.7, 6.5, 5.8, 5.4			8.1, 16.8, 11.3, 10.8
T 0.5°C, p 1.2%	4.9, 4.3, 3.8, 3.7			16.6, 29.6, 21.8, 22.5
T 1.5°C, p 1.2% - *	7.9, 6.6, 5.9, 5.5			
* UA 20%, η 0.65				
* UA 40%, η 0.65				
* UA 20%, η 0.60				
Anwendung	WP mit TXV	WP mit TXV	WP mit EXV	WP mit EXV
Beurteilung				
Investition	(1 p, 3 T)	(2 T)	(1 p, 2 T)	(2 p, 2 T)
Messgenauigkeit	gut	schlecht	schlecht	schlecht
Bedingungen 10 Komponentenmodell des Verdichters, Grössendifferenz 3%, Wärmetauscher nach NTU-Efficiency, Parameter in Tabelle 2 und 3				
*1: Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Sauggasüberhitzer, *2: Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Sauggasüberhitzer				
*3: Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung, *4: Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung				

Tabelle 6: Messkatalog - Teil 2

Verfahren 6 Wenn die Temperaturen der Anschlusshydraulik bekannt sind, kann durch die UA-Wert Schätzung auf die Verdampfungs- respektive die Kondensationstemperatur geschlossen werden. Dieses Verfahren ist jedoch sehr ungenau, da durch unterschiedliche Arbeitspunkte eine grosse UA-Wert Änderungen möglich ist.

Dieses Verfahren ist sehr sensibel und wenn zusätzlich noch schlechte Sensoren verwendet oder diese schlecht platziert werden, ist die Ungenauigkeit sehr gross. Darum ist dieses Verfahren ungeeignet.

Verfahren 7 Bei diesem Verfahren wird der UA-Wert nur vom Kondensator geschätzt, was eine bessere Schätzung sein kann, da nur geringe Temperaturschwankungen auf der Kondensatorseite geben kann.

Dieses Verfahren ist dennoch sehr ungenau und wird nicht empfohlen.

Verfahren 8 Die Annahme einer konstanten isentropischen Effizienz ist ein sehr einfach anwendbares Modell. Der Schätzwert muss gut gewählt werden. Jedoch ändert sich die isentropische Effizienz, je nach Arbeitsbereich was zu einer grossen Ungenauigkeit auch bei guter Anordnung der Sensoren führt.

Dieses Verfahren wird nicht empfohlen, weil die Ungenauigkeit sehr hoch ist.

5. Schlussfolgerung

Die interne JAZ-Messung ist eine mögliche Lösung, um die JAZ zu bestimmen, jedoch muss man **sich bewusst sein**, was man wirklich messen möchte. Dies gilt aber nicht nur für die interne JAZ-Messung sondern auch bei der externen muss man sich bewusst sein, was man misst. Abbildung 1 zeigt, dass bei jedem elektrischen Energieverbraucher Wärme zugeführt wird, wie auch Verluste, die die nötige Wärmemenge erhöht.

Die **Literaturrecherche** zeigte, dass in der Praxis viele Wärmepumpen mit Kältekreislauf-internen JAZ-Messung betrieben werden. Das laufende deutsche Förderprogramm lässt beide Verfahren zu und die Wärmepumpen in diesem Markt sind gemischt mit internen und externen Verfahren ausgestattet. Eine Publikation zeigt aber, dass in der Praxis die Genauigkeit bei 5-15% liegt. Die angefragten Hersteller schätzen, dass die interne Messung zwischen 2.5-3.5% gegenüber der externen Messung abweichen, es sind aber keine absoluten Messungen vorhanden.

Als **Messinfrastruktur** kann bei der internen JAZ-Messung auf Temperatur und Drucksensoren zurückgegriffen werden. Jedoch muss eine Messauswertung vorhanden sein und ein genaues Modell des Verdichters muss bei den meisten Messkombinationen implementiert sein, um eine ausreichende Genauigkeit zu erhalten. Das 10 Komponentenmodell nach AHRI gibt Verdichter durch ein sehr genaues Kennlinienfeld an, jedoch sind Normabweichungen und Alterung nicht detektierbar. Ein Messverfahren, das die Heissgastemperatur misst, kann auf ein Modell des Verdichters verzichten und somit auch Abweichung und Alterung messen.

Eine **Sensibilitätsanalyse** zeigt den Einfluss von Messfehler in Verdampfungs-, Kondensationstemperatur, Überhitzung, Unterkühlung, Verdichtermodell und UA-Werte der Wärmetauscher. Daraus kann geschlossen werden, dass eine genaue Messung der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur sowie die Unterkühlung sehr wichtig sind.

In Tabelle 5 und 6 sind die einsetzbaren **Verfahren** aufgelistet. Die Ergebnisse sind prognostizierte Genauigkeiten zu verschiedenen Wärmequellen und Kreislaufarten. Die Variation von Sensorgenauigkeiten zeigen die Sensibilität dieser Messkombinationen auf. Fünf Verfahren sind geeignet, wobei vor allem Verfahren 1, 2 und sehr geeignet sind. Erstens weil die Genauigkeit sehr hoch ist und beim Verfahren 2 eine Beurteilung der Verdichteralterung möglich ist. Die korrekte Montage der Sensoren ist sehr wichtig, vor allem Temperatursensoren sind auf Fehlplatzierung sehr sensibel.

Literatur

- [ANS04] ANSI/AHRI Standard 540:2004. Standard for performance rating of positive displacement refrigerant compressors and compressor units.
- [DAB81] Dabiri, A.E., Rice, C.K.: A compressor simulation model with corrections for the level of suction gas superheat. Symposium, ASHRAE Transaction, Volume 87, Part 2, Cincinnati, Ohio, 1981.
- [DEW11] Dewitt D.P (u.a): Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, Inc., 7. Edition, 2011.
- [EN 14511] Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumheizung und -kühlung. Europäische Norm.
- [EHR00] Ehrbar, M.: Thermodynamik. Buchs, 2000.
- [EHR10] Ehrbar, M.: Entlastung von Erdwärmesonden. Einführungsreferat zum 3. Fachkolloquium an der NTB. 2010.
- [ERB04] Erb, M., Hubacher, P., Ehrbar, M.: Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen, FAWA, 1996-2003. BFE Schlussbericht, 2004.
- [FAH04] Fahlén, P.: Methods for commissioning and performance checking of heat pumps and refrigeration equipment. Chalmers University of Technology, Building Services Engineering, 2004.
- [HOV14] Hoval: E-Mail Kontakt mit Ulrich Lindemann, Hoval Mitarbeiter. 17. Juni 2014
- [MAP12] Richtlinie zur Förderung von Massnahmen zur Nutzung erneuerbaren Energien im Wärmemarkt (Marktanreizpotenzial - MAP). Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle BAFA, Deutschland, 20. Juli 2012. Stand Juni 2014.
- [OER14₁] Oertli: LIN 9Tu, LIN 12TU - Montage und Gebrauchsanweisung. www.waltermeier.com, Stand 16. Juni 2014.
- [OER14₂] Oertli: LIN 20TES, LIN 24TES, LIN 28TES - Montage und Gebrauchsanweisung. www.waltermeier.com, Stand 16. Juni 2014.
- [SIN14] Singer, E., Tran, C.T., Rivière, P.: On-field measurement method of vapor injection heat pump system. International Journal of Refrigeration 41 (2014) 147-156.
- [TRA12] Tran, C.T., Rivière, P., Marchio, D., Arzano-Daurelle, C.: Refrigerant-based measurement method of heat pump seasonal performances. International Journal of Refrigeration 35(2012) 1585-1594
- [TRA13] Tran, C.T., Rivière, P., Marchio, D., Arzano-Daurelle, C.: In situ measurement methods of air to air heat pump performance. International Journal of refrigeration 36 (2013) 1442-1455.
- [VAI14₁] Vaillant: geoTHERM - Integrierter Wärmehähler gemäss MAP anerkannt. www.vaillant.de/Presse/Fachpresse/Archiv-2009, Stand 16. Juni 2014.
- [VAI14₂] Vaillant: geoTHERM Wärmepumpe - Bedienungsanleitung. www.vaillant.de, Stand 16. Juni 2014.

- [VDI 4650 Blatt 1] VDI-Richtlinie: Berechnung von Wärmepumpen - Kurzverfahren zur Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen - Elektro-Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung. März 2009.
- [WAT14] Watterkotte: E-Mail vom 5. Juni 2014 von Benno Lehmann, Mitarbeiter der Firma Watterkotte.
- [WEI14] Weishaupt: E-Mail vom 27. Mail 2014.
- [EWE05] Ewert, M.: Feldtest bestätigt hohe Effizienz von Wärmepumpen. HLH Band 56 (2005) Nr. 3.
- [MIA11] Miara, M., et al.: Wärmepumpen Effizienz, Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. Fraunhofer ISE, 2005.

A. Anhang

A.1. Sensoren auf dem Markt

Tabelle A1 ist ein Auszug aus den am Markt erhältlichen Sensoren. Die Preise sind Listenpreise. Eine kurze Recherche über die Normen zu den Sensoren sind im Anhang A.3 bis A.6 abgelegt.

Komponente	Produktname	Listenpreis	Genauigkeit
JAZ-Messung, JAZ	NeoVac Superstatic 479 SPF Stromzähler, Durchflusssensor, T-Fühlerpaar	800 CHF	
Wärmezähler, Q	Siemens WSM515-0E Durchflusssensor, T-Fühlerpaar	450 CHF	2, $\pm 3\%$
Stromzähler, E	Finder 7E.46.8.400.0012 Stromzähler 3-phasig, 65 A, MID	250 CHF	1/B, $\pm 2\%$
	Finder 7E.23.8.230.0010 Stromzähler 1-phasig, 32 A, MID	110 CHF	1/B, $\pm 1.5\%$
Temperatursensor, T	Carel NTC/PT100 Anlegefühler	20 - 40 CHF	$\pm 1^\circ\text{C}$
	Danfoss AKS 21, PT1000	100 CHF	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
	Jumo PT100	60 CHF	$\pm 1^\circ\text{C}$
	Siemens LG-Ni1000	95 CHF	$\pm 0.4^\circ\text{C}$
	Elreha TF201, PTC	40 CHF	$\pm 0.5^\circ$
Drucksensor, p	Carel SPKT00XXR0 (ratio) 9, 12, 17, 34, 45 bar	65 CHF	$\pm 1.2\%$ FS
	Alco PT5-XXM 7, 18, 30, 50 bar	130-245 CHF	$\pm 1\%$ FS
	Danfoss AKS32R (ratio) 9, 12, 34 bar	160 CHF	$\pm 0.8\%$ FS
	Danfoss NSK (ratio) 9, 15, 20, 30, 35, 50 bar	125 CHF	$\pm 2.5\%$ FS
	Keller PA-21Y 0-10 V, 4-20 mA 7, 12, 18, 30, 50 bar	105 CHF	$\pm 1\%$ FS

Tabelle A1: Aufstellung der Sensoren

A.2. Einfluss der Parameter

Überhitzung

Die Überhitzung hat einen sehr kleinen Einfluss, wie man in der Tabelle A2 und Abbildung A1 sieht. Die Simulationen zeigen, dass hier nur eine kleine Verbesserung der Messgenauigkeit möglich ist wenn die Überhitzung genauer gemessen wird.

Überhitzung [°C]	±1	±2	±3	±4	±5	±10
WP1, Sole, 4.3 kW	0.03%	0.07%	0.1%	0.15%	0.20%	0.23%
WP1, Sole, 10.9 kW	0.01%	0.03%	0.04%	0.06%	0.07%	0.18%
WP1, Luft, 4.3 kW	0.09%	0.17%	0.25%	0.33%	0.41%	0.61%
WP1, Luft, 10.9 kW	0.05%	0.10%	0.14%	0.20%	0.24%	0.36%
WP2, Sole, 4.3 kW	0.04%	0.08%	0.13%	0.17%	0.22%	0.29%
WP2, Sole, 10.9 kW	0.01%	0.03%	0.08%	0.11%	0.15%	0.35%
WP2, Luft, 4.3 kW	0.07%	0.13%	0.19%	0.26%	0.33%	0.47%
WP2, Luft, 10.9 kW	0.03%	0.06%	0.08%	0.12%	0.14%	0.15%

Tabelle A2: Auswirkung der Messabweichung bei der Überhitzung

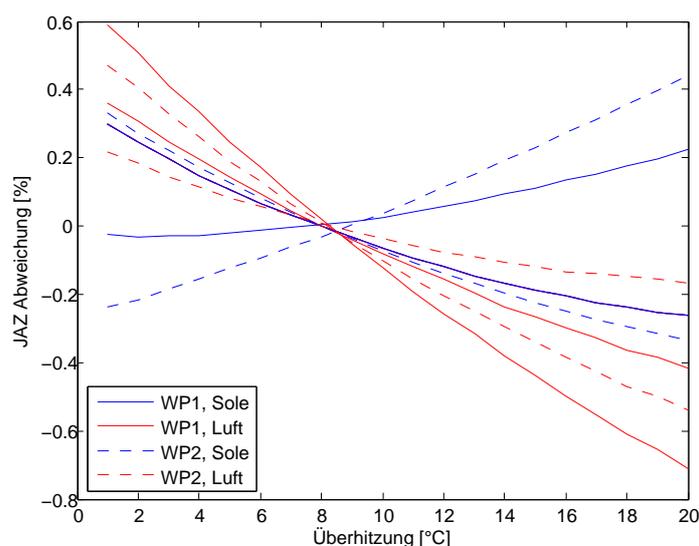


Abbildung A1: JAZ Abweichung in Funktion der Überhitzung

Auf eine Messung der Überhitzung kann verzichtet werden, jedoch muss die Überhitzung immer gewährleistet werden, um den Verdichter zu schützen. Bei elektrischen Expansionsventilen wird die Überhitzung für die Regelung gemessen.

Der Aufwand beläuft sich auf die Messung der Verdampfungs-temperatur - Druckmessung vor dem Verdichter oder durch Temperaturmessung vor dem Verdampfer - und Sauggastemperatur - Temperaturmessung vor dem Verdichter.

Unterkühlung

Die Unterkühlung bewirkt einen grösseren Einfluss auf die JAZ. Die Verschlechterung liegt bei ca. 1% pro 1°C. In Tabelle A3 und Abbildung A2 ist dies auf die WP-Modelle genauer dargestellt.

Unterkühlung [°C]	±1	±2	±3	±4	±5
WP1, Sole, 4.3 kW	0.7%	1.4%	2.1%	2.9%	3.4%
WP1, Sole, 10.9 kW	0.8%	1.7%	2.6%	3.4%	4.0%
WP1, Luft, 4.3 kW	0.5%	1.1%	1.6%	2.2%	2.6%
WP1, Luft, 10.9 kW	0.6%	1.3%	1.9%	2.6%	2.9%
WP2, Sole, 4.3 kW	0.6%	1.3%	1.9%	2.6%	2.9%
WP2, Sole, 10.9 kW	1.0%	1.9%	2.9%	3.9%	4.6%
WP2, Luft, 4.3 kW	0.7%	1.4%	2.2%	2.9%	3.4%
WP2, Luft, 10.9 kW	0.9%	1.7%	2.6%	3.4%	3.9%

Tabelle A3: Auswirkung der Messabweichung bei der Unterkühlung

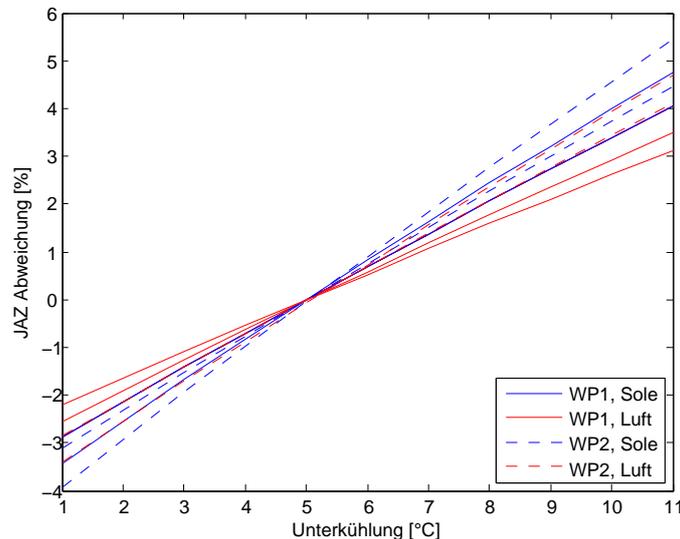


Abbildung A2: JAZ Abweichung in Funktion der Unterkühlung

Um einen möglichst geringen Messfehler zu haben, ist es nötig die Unterkühlung zu messen. Das bedeutet Kondensationstemperatur und die Temperatur vor dem Expansionsventil.

Der Aufwand besteht aus der Messung von Kondensationstemperatur - Druckmessung vor dem Kondensator oder Temperaturmessung im Kondensator (im 2-Phasendom) - und die Temperatur der Flüssigphase - Temperaturmessung vor dem Expansionsventil.

Isentropische Effizienz

Die isentropische Effizienz ist in Wirklichkeit eine nichtlineare Funktion. Die einfachste Modellierung ist, eine Konstante daraus zu machen. In Tabelle A4 und Abbildung A3 sind die Abweichungen angegeben. Diese sind massiv, was zeigt, dass die Modellierung des Verdichters sehr wichtig ist. Es gibt lineare oder höhere Modelle, die jedoch sehr Verdichter spezifisch sind und hier nicht untersucht wurden.

η_{isent} [-]	± 0.00	± 0.04	± 0.08	± 0.12	± 0.16	± 0.20
WP1, Sole, 4.3 kW	1.1%	3.8%	6.9%	9.8%	13.0%	16.6%
WP1, Sole, 10.9 kW	0.9%	4.0%	6.9%	9.7%	12.5%	15.4%
WP1, Luft, 4.3 kW	3.4%	10.0%	14.4%	18.7%	23.0%	27.3%
WP1, Luft, 10.9 kW	7.4%	13.9%	18.3%	22.6%	26.9%	31.3%
WP2, Sole, 4.3 kW	5.3%	7.1%	10.8%	14.5%	18.3%	22.2%
WP2, Sole, 10.9 kW	5.3%	7.4%	10.6%	13.9%	17.2%	20.6%
WP2, Luft, 4.3 kW	2.8%	4.8%	8.9%	13.1%	17.2%	21.4%
WP2, Luft, 10.9 kW	2.8%	7.6%	11.5%	15.3%	19.2%	23.0%

Tabelle A4: Auswirkung der Messabweichung bei der Unterkühlung

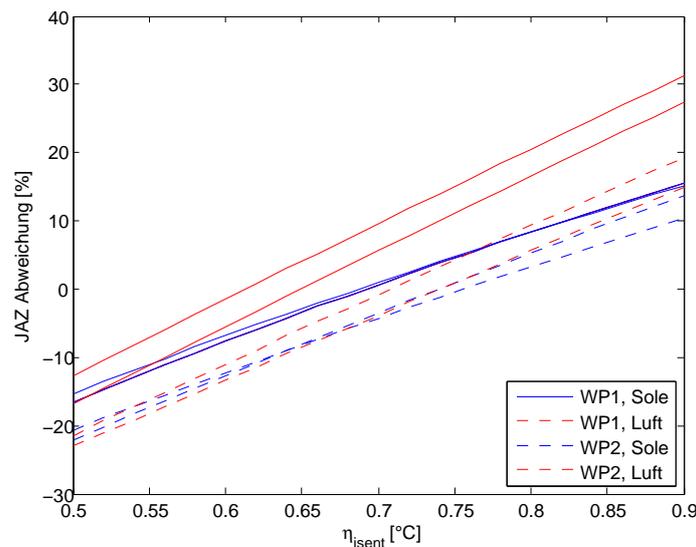


Abbildung A3: JAZ Abweichung in Funktion von η_{isent}

Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu haben, ist es nötig das 10 Komponentenmodell oder das Kennlinienfeld der Verdichterhersteller zu verwenden. Dazu sind Verdampfungs-, Kondensationstemperatur und die Überhitzung nötig.

Der Aufwand besteht aus der Implementierung des 10 Komponentenmodell in den Datenlogger/Controller für die mathematische Abbildung des Verdichters. Jedoch kann eine Verschlechterung der Verdichtereffizienz über die Zeit nicht abgebildet werden.

Verdichter

Das 10 Komponentenmodell ist ideal um den Verdichter zu berechnen. Jedoch gibt es zu den realen Verdichtern leichte Abweichungen, die hier mit der Verdichtergrösse abgebildet wird. In Tabelle A9 und Abbildung A8 zeigt die JAZ Abweichung unterschiedlicher Verdichtergrössen.

Verdichtergrösse [%]	±1	±2	±3	±4	±5
WP1, Sole, 4.3 kW	0.23%	0.43%	0.64%	0.84%	1.04%
WP1, Sole, 10.9 kW	0.23%	0.44%	0.64%	0.85%	1.06%
WP1, Luft, 4.3 kW	0.20%	0.36%	0.52%	0.69%	0.85%
WP1, Luft, 10.9 kW	0.18%	0.35%	0.51%	0.68%	0.85%
WP2, Sole, 4.3 kW	0.04%	0.07%	0.10%	0.14%	0.17%
WP2, Sole, 10.9 kW	0.11%	0.40%	0.58%	0.76%	0.95%
WP2, Luft, 4.3 kW	0.12%	0.21%	0.31%	0.41%	0.50%
WP2, Luft, 10.9 kW	0.12%	0.22%	0.32%	0.41%	0.53%

Tabelle A5: Auswirkung der Messabweichung unterschiedlicher Verdichtergrösse

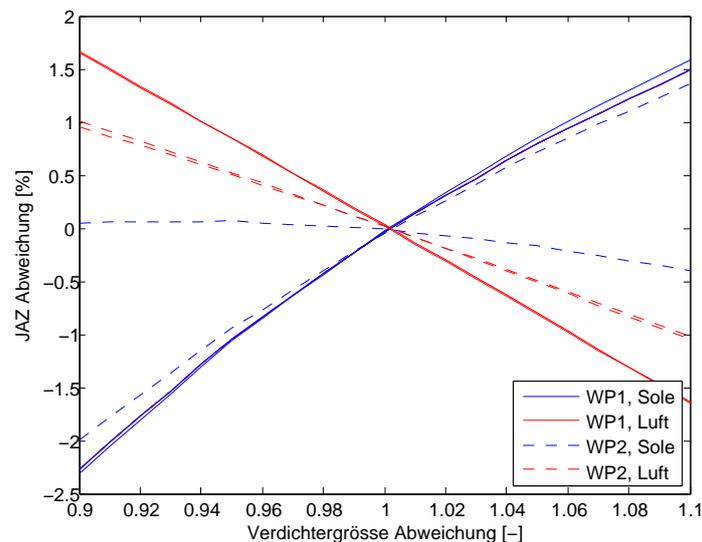


Abbildung A4: JAZ Abweichung in Funktion der Verdichtergrösse

Es stellt sich heraus, dass je nach Verdichter unterschiedliche Fehleranfälligkeit bestehen können. Maximal ergibt sich ein Fehler von 2.5% bei einer Fehleinschätzung des Liefergrades/Massenstrom.

Verdampfungstemperatur

Die Verdampfungstemperatur wird als Eingabe im 10 Komponentenmodell des Verdichters benötigt. Die Messunsicherheit hat einen grossen Einfluss auf die Genauigkeit der JAZ-Berechnung. In Tabelle A6 und Abbildung A5 sind die Ergebnisse abgelegt.

$T_{Verdampfung}$ [°C]	±0.5	±1.0	±1.5	±2.0	±2.5	±3.0
WP1, Sole, 4.3 kW	1.6%	3.3%	4.8%	6.4%	8.0%	9.5%
WP1, Sole, 10.9 kW	1.6%	3.1%	4.7%	6.2%	7.7%	9.2%
WP1, Luft, 4.3 kW	1.3%	2.7%	4.0%	5.3%	6.6%	7.9%
WP1, Luft, 10.9 kW	1.3%	2.5%	3.8%	5.0%	6.3%	7.5%
WP2, Sole, 4.3 kW	1.0%	2.1%	3.1%	4.1%	5.1%	6.1%
WP2, Sole, 10.9 kW	1.2%	2.3%	3.5%	4.6%	5.8%	6.9%
WP2, Luft, 4.3 kW	1.1%	2.1%	3.2%	4.2%	5.2%	6.3%
WP2, Luft, 10.9 kW	1.0%	2.0%	3.0%	3.9%	4.9%	5.9%

Tabelle A6: Auswirkung der Messabweichung bei der Verdampfungstemperatur

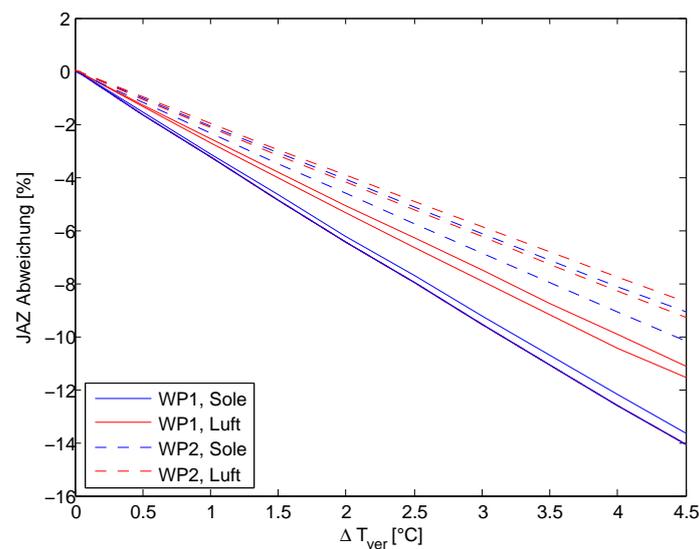


Abbildung A5: JAZ Abweichung in Funktion der Verdampfungstemperatur

Der Aufwand besteht aus der Messung der Verdampfungstemperatur - Druckmessung vor dem Verdichter oder Temperaturmessung vor dem Verdampfer.

Kondensationstemperatur

Die Kondensationstemperatur ist ebenfalls eine Eingabe im 10 Komponentenmodell des Verdichters. In Tabelle A7 und Abbildung A6 ist ersichtlich, dass die Kondensationstemperatur einen kleineren Einfluss als die Verdampfungstemperatur hat.

$T_{Kondensation}$ [°C]	±0.5	±1.0	±1.5	±2.0	±2.5	±3.0
WP1, Sole, 4.3 kW	0.7%	1.5%	2.2%	2.9%	3.6%	4.3%
WP1, Sole, 10.9 kW	0.7%	1.5%	2.2%	3.0%	3.7%	4.4%
WP1, Luft, 4.3 kW	0.9%	1.8%	2.6%	3.5%	4.3%	5.2%
WP1, Luft, 10.9 kW	0.9%	1.9%	2.8%	3.7%	4.6%	5.5%
WP2, Sole, 4.3 kW	0.4%	0.9%	1.3%	1.8%	2.2%	2.6%
WP2, Sole, 10.9 kW	0.3%	0.7%	1.0%	1.3%	1.6%	1.9%
WP2, Luft, 4.3 kW	0.5%	1.0%	1.6%	2.1%	2.6%	3.1%
WP2, Luft, 10.9 kW	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%	2.9%

Tabelle A7: Auswirkung der Messabweichung bei der Kondensationstemperatur

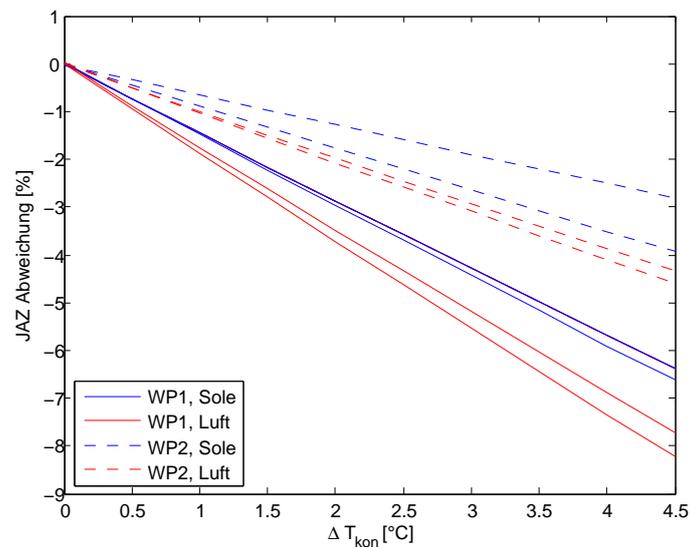


Abbildung A6: JAZ Abweichung in Funktion der Kondensationstemperatur

Der Aufwand besteht aus der Messung der Kondensationstemperatur - Druckmessung nach dem Verdichter oder Temperaturmessung im Verdampfer (2-phasendom).

Heissgastemperatur

Die Messung der Heissgastemperatur und der Verdichtersleistung kann das 10 Komponentenmodell ersetzt. Durch die Messung der Verdichtersleistung kann auch die altersbedingte Verschlechterung detektiert werden. In Tabelle A8 und Abbildung A7 sind die Ergebnisse dargestellt.

$T_{Kondensation}$ [°C]	±0.5	±1.0	±1.5	±2.0	±2.5	±3.0
WP1, Sole, 4.3 kW	0.3%	0.6%	0.8%	1.1%	1.5%	1.8%
WP1, Sole, 10.9 kW	0.2%	0.4%	0.7%	0.9%	1.2%	1.5%
WP1, Luft, 4.3 kW	0.3%	0.6%	0.7%	1.0%	1.4%	1.4%
WP1, Luft, 10.9 kW	0.2%	0.6%	0.8%	0.9%	1.1%	1.2%
WP2, Sole, 4.3 kW	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.3%	0.4%
WP2, Sole, 10.9 kW	0.2%	0.4%	0.6%	0.8%	1.0%	1.2%
WP2, Luft, 4.3 kW	0.2%	0.4%	0.5%	0.6%	0.7%	0.9%
WP2, Luft, 10.9 kW	0.2%	0.3%	0.4%	0.6%	0.7%	0.8%

Tabelle A8: Auswirkung der Messabweichung bei der Heissgastemperatur

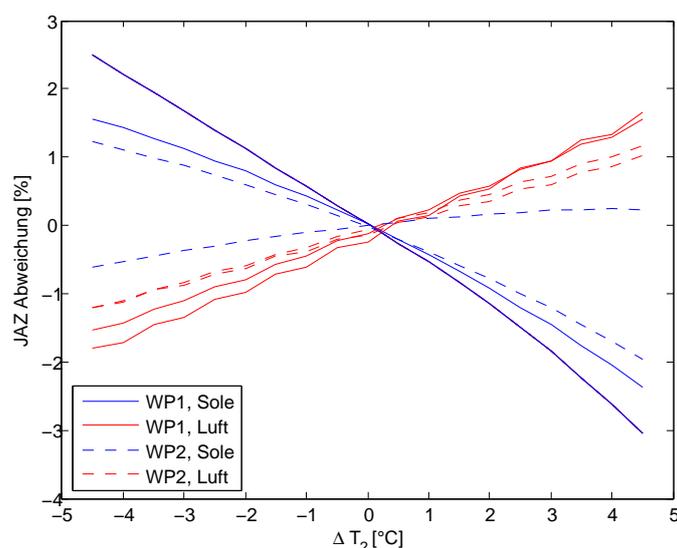


Abbildung A7: JAZ Abweichung in Funktion der Heissgastemperatur

Die Messungenauigkeit bei der Heissgastemperatur bewirkt einen Einfluss auf die JAZ. Die Abweichung ist aber sehr verdichterspezifisch.

UA Kondensator

Der UA-Wert ist nur wichtig, wenn die Vorlauftemperatur gemessen wird anstatt die Kondensationstemperatur. Dieser Wert ist für den Kondensator eine relativ feste Grösse und ändert sich je nach Arbeitspunkt wenig. Die Effizienz des Wärmetauschers ändert sich jedoch stark, wie auch der Temperaturabstand. Der Einfluss einer falschen Schätzung des UA-Wertes auf die JAZ ist in Tabelle A9 und Abbildung A8 aufgezeigt.

UA Abweichung [%]	±10	±20	±30	±40	±50
WP1, Sole, 4.3 kW	1.1%	2.4%	4.0%	6.2%	9.2%
WP1, Sole, 10.9 kW	0.9%	2.1%	3.6%	5.6%	8.4%
WP1, Luft, 4.3 kW	1.4%	3.0%	5.0%	7.7%	11.2%
WP1, Luft, 10.9 kW	1.3%	2.8%	4.6%	7.1%	10.4%
WP2, Sole, 4.3 kW	1.2%	2.8%	4.8%	7.4%	11.0%
WP2, Sole, 10.9 kW	0.7%	1.5%	2.6%	4.0%	6.0%
WP2, Luft, 4.3 kW	1.0%	2.1%	3.6%	5.5%	8.1%
WP2, Luft, 10.9 kW	0.9%	1.9%	3.2%	4.9%	7.1%

Tabelle A9: Auswirkung der Messabweichung beim UA-Wert Kondensator

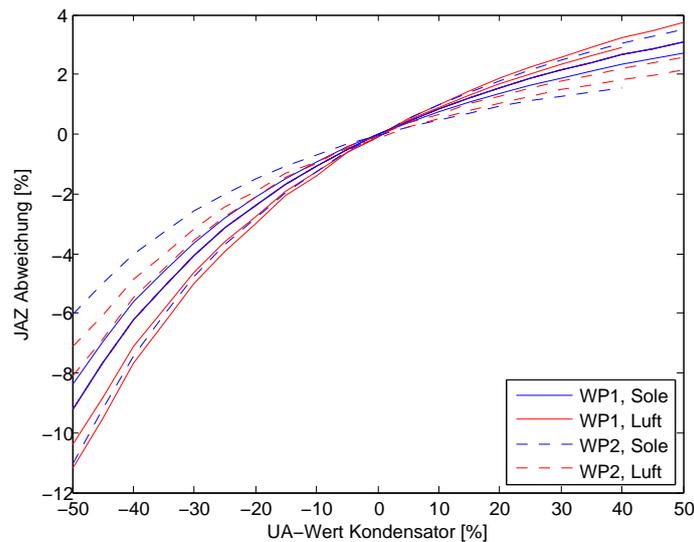


Abbildung A8: JAZ Abweichung in Funktion des UA-Wertes Kondensator

Mit dem UA-Wert des Kondensators kann auf die Kondensationstemperatur geschlossen werden.

Aufwand besteht aus der Abklärung des UA-Wert beim Arbeitspunkt beim Hersteller. Zusätzlich ist die Vorlauf- und Rücklauftemperatur nötig um auf die Kondensationstemperatur schliessen zu können.

Die Bestimmung von der Kondensationstemperatur aus Vorlauf- und Rücklauftemperatur ist nicht empfehlenswert.

UA Verdampfer

Der UA-Wert ist nur wichtig, wenn die Quelltemperatur gemessen wird anstatt die Kondensationstemperatur. Der UA-Wert des Verdampfers verhält sich ähnlich wie derjenige vom Kondensator. In Tabelle A10 und Abbildung A9 sind die Zusammenhänge dargestellt.

UA Abweichung [%]	±10	±20	±30	±40	±50
WP1, Sole, 4.3 kW	1.2%	2.7%	4.6%	6.8%	9.8%
WP1, Sole, 10.9 kW	0.9%	2.1%	3.5%	5.3%	7.6%
WP1, Luft, 4.3 kW	1.1%	2.5%	4.1%	6.1%	8.6%
WP1, Luft, 10.9 kW	0.8%	1.8%	2.9%	4.5%	6.5%
WP2, Sole, 4.3 kW	1.2%	2.7%	4.5%	6.7%	9.5%
WP2, Sole, 10.9 kW	0.8%	1.7%	2.9%	4.3%	6.2%
WP2, Luft, 4.3 kW	0.9%	1.8%	3.1%	4.6%	6.6%
WP2, Luft, 10.9 kW	0.7%	1.4%	2.3%	3.5%	5.0%

Tabelle A10: Auswirkung der Messabweichung beim UA-Wert Verdampfer

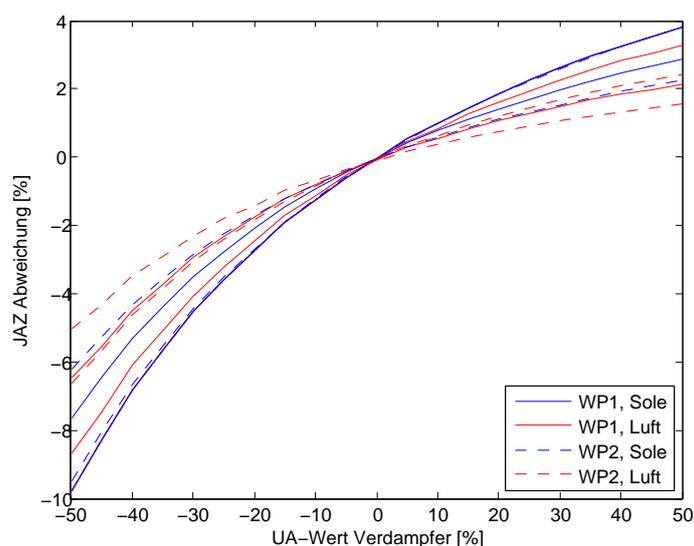


Abbildung A9: JAZ Abweichung in Funktion des UA-Wertes Verdampfer

Mit dem UA-Wert des Verdampfers kann auf die Verdampfungstemperatur geschlossen werden.

Der Aufwand besteht aus der Abklärung des UA-Wert beim Arbeitspunkt beim Hersteller. Zusätzlich ist der Quellen Einlauf- und Rücklauf-temperatur nötig, um auf die Verdampfungstemperatur schließen zu können.

Die Bestimmung von der Verdampfungstemperatur aus Quellen- und Quellenrücklauf-temperatur ist nicht empfehlenswert.

A.3. Drucksensoren

Für Drucksensoren gibt es keine Norm, welche eine Einteilung in Genauigkeitsklassen vorsieht. Aus diesem Grund geben die Hersteller für ihre Sensoren jeweils eigene Charakterisierungen an. Durch das Fehlen einer einheitlichen Genauigkeitsklasse werden oft unterschiedlichste Werte angegeben, jedoch gibt es die maximale Kennlinienabweichung nach IEC 770, die aus drei Parametern besteht.

Linearität Wird meistens auf Datenblättern angegeben und beschreibt die maximale Abweichung des Sensorsignals von einer Referenzgeraden. Diese Abweichung kommt durch das nichtlineare Verhalten der Sensoren zustande und eine Linearisierung des Signals ist sehr aufwendig. Ein Vergleich ist erschwert, da unterschiedliche Referenzgeraden erzeugt werden können.

Hysterese Die Hysterese gibt die Differenz zwischen zwei Messkurven, einmal mit zunehmenden und abnehmenden Druck, an.

Nichtwiederholbarkeit Drucksensoren unterliegen zufallsbedingten Einflüssen, durch diese wird bei gleichem Druck nicht immer das gleiche Ausgangssignal angezeigt. Die Nichtwiederholbarkeit gibt die grösste Abweichung aus drei aufeinanderfolgenden Druckmessungen unter identischen Bedingungen an.

Des Öfteren geben Hersteller auf ihren Datenblättern typische Werte an. Diese Werte spiegeln das Verhalten der meisten Sensoren einer Bauart wieder. Die typischen Werte beziehen sich somit auf den grössten Teil.

Wird der die Messabweichung mit FS (Full Scale) gekennzeichnet, ist ein **Fehlertoleranzband** gemeint, welches mit den Messabweichungen bei dem jeweiligen Endwert ermittelt wird. Das Fehlertoleranzband wird bei den Herstellern am meisten verwendet.

A.4. Temperatursensoren

Für Temperatursensoren gibt es an die Messprinzipien angepasste Genauigkeitsklassen. Dabei wird zwischen Thermoelementen und Widerstandsthermometern unterschieden.

Widerstands-Temperatursensor

Die Widerstands-Temperatursensoren nutzen den temperaturabhängigen Widerstand. Verschiedene Verschaltungen (3-Leiter, 4-Leiter) verbessern die Messgenauigkeit.

In der Norm EN 60751:2009 werden fünf Genauigkeitsklassen für Platin-Thermometer, jeweils für Schicht und Drahtgewickelte Widerstände angegeben und jeweils vier Genauigkeitsklassen für Messwiderstände.

Für Nickel-Widerstandsthermometer gilt die EN 43760, welche in der VDI 3511 Blatt 2 ebenfalls vorkommt. Hier werden aber nur zwei Grenzabweichungen für unterschiedliche Temperaturbereiche in denen die Ni-100 eingesetzt werden angegeben. Dabei fällt auf, dass die Grenzabweichungen höher ausfallen als bei Platin-Thermometern. Zusätzlich gibt es noch eine Norm für NTC Sensoren, die EN 60738. Da die Hersteller meist eigene Grenzabweichungen für die Temperaturbereiche angeben wird eine Aufstellung verzichtet.

Da in der Wärmepumpentechnik meist nur NTC und PT100 Temperatursensoren eingesetzt werden, wird nur die Genauigkeitsklasse von PT100 in Tabelle A11 angegeben. Der Widerstand des NTC kann über längere Zeiträume durch Alterung driften.

Klasse	Gültigkeitsbereich [°C]		Grenzabweichung [°C]
	Drahtgewickelt	Schichtwiderstände	
AA	-50 bis +250	0 bis +150	$\pm(0.1 + 0.0017 * T^*)$
A	-100 bis +450	-30 bis +300	$\pm(0.15 + 0.002 * T^*)$
B	-196 bis +600	-50 bis +500	$\pm(0.3 + 0.005 * T^*)$
C	-196 bis +600	-50 bis +600	$\pm(0.6 + 0.01 * T^*)$

T*: Betrag der Temperatur in °C ohne Berücksichtigung des Vorzeichens

Tabelle A11: Genauigkeitsklassen für Platin-Temperatursensoren nach EN 60751

Thermoelement

Thermoelemente nutzen den Seebeck-Effekt, welcher eine Wechselwirkung zwischen Temperatur und der Elektronegativität unterschiedlicher Materialien beschreibt. Da für Thermoelemente verschiedene Materialien zum Einsatz kommen, werden in der Norm IEC 584 Teil 2 acht Typen in sechs Klassen zusammengefasst. Eine Übersicht gibt Tabelle A12.

	Klasse 1 [°C]	Klasse 2/ [°C]	Klasse 3 [°C]
Typ T, Cu-CuNi			
Temperaturbereich	-40 bis +125	-40 bis +133	-40 bis +125
Grenzabweichung	±0.5	±1.0	±1.0
Temperaturbereich	125 bis 350	125 bis 350	125 bis 350
Grenzabweichung	±0.004*T	±0.0075* t	±0.0015* t
Typ E, NiCr-CuNi			
Temperaturbereich	-40 bis +375	-40 bis +333	-167 bis +40
Grenzabweichung	±1.5	±2.5	±2.5
Temperaturbereich	375 bis 800	333 bis 900	-200 bis -167
Grenzabweichung	±0.004*T	±0.0075*T	±0.015*T
Typ J, Fe-CuNi			
Temperaturbereich	-40 bis +375	-40 bis +333	
Grenzabweichung	±1.5	±2.5	
Temperaturbereich	375 bis 750	333 bis 750	
Grenzabweichung	±0.004*T	±0.0075*T	
Typ K, NiCr-NiSi, Typ N, NiCrSi-NiSi			
Temperaturbereich	-40 bis +375	-40 bis 333	-167 bis +40
Grenzabweichung	±1.5	±2.5	±2.5
Temperaturbereich	375 bis 1000	333 bis 1200	-200 bis -167
Grenzabweichung	±0.004*T	±0.0075*T	±0.015*T

Tabelle A12: Klassen der Grenzabweichungen für Thermoelemente nach IEC 584

A.5. Stromzähler

Für Stromzähler gibt es unterschiedliche Genauigkeitsklassen, meist wird die Klasse nach der Norm IEC 62053-21 oder die Genauigkeitsklasse nach EN 50470-3 angegeben. Die Genauigkeitsklassen sind in Tabelle A13 und A14 dargestellt. Selten geben Hersteller neben den Genauigkeitsklasse auch Prozentwerte nach EN 688 Teil 1 an.

Des Weiteren gibt es Leistungsmesswandler, welche den Vorteile haben universell einsetzbar zu sein. Diese können in einem grossen Spannung- und Frequenzbereich eingesetzt werden. Dies ist von den Einsatz für Wärmepumpen nicht notwendig, da diese meist über das Niederspannungsnetz angeschlossen sind und somit bei konstanter Spannung und Frequenz. Für die Stromabrechnung in privaten Haushalten sind meistens Zähler mit der Genauigkeitsklasse B nach EN 50470-3 im Einsatz.

Für die Abrechnung mit dem Elektrizitätswerk ist die Wirkleistung entscheidend, diese wird auf für die Berechnung der JAZ herangezogen. Stromzähler erreichen erst ab einer gewissen Stromstärke ihre vorgegebene Genauigkeit, bei geringen Stromstärken nimmt die Messgenauigkeit ab, dies gilt auch für extreme Temperaturen. Da die meisten Stromzähler aber innerhalb des Hauses verbaut werden, spielen diese Abweichungen meist eine untergeordnete Rolle.

Phasen	Bereich	Klasse 1	Klasse 2
Einphasig	$0.1I_N \leq I \leq I_{max}$	± 1.0	± 2.0
Mehrphasig	$0.1I_N \leq I \leq I_{max}$	± 2.0	± 3.0

Tabelle A13: Grenze der Messabweichung in Prozent nach EN 62053-21

Phasen	Bereich	Klasse A	Klasse B	Klasse C
Einphasig	$0.1I_N \leq I \leq I_{max}$	± 2.0	± 1.0	± 0.5
Mehrphasig	$0.1I_N \leq I \leq I_{max}$	± 3.0	± 2.0	± 1.0

Tabelle A14: Grenze der Messabweichung in Prozent nach EN 50470-3

A.6. Wärmehähler

Die Genauigkeitsklasse von Wärmehähler wird in der EN 1434 festgelegt. Dabei werden die drei Teile Rechenwerk, Temperaturfühlerpaar und Durchflusssensor einzeln nach dem zulässigen Höchstwert der Messabweichung angegeben. In Tabelle A15 sind die drei Klassen angegeben.

Klasse	Rechenwerk	Temperaturfühlerpaar	Durchflusssensor
Klasse 1	$\pm(0.5 + \frac{\Delta Q_{min}}{\Delta Q})$	$\pm(0.5 + 3 \frac{\Delta Q_{min}}{\Delta Q})$	$\pm(1 + 0.01 \frac{q_p}{q})$, max 3.5%
Klasse 2	$\pm(0.5 + \frac{\Delta Q_{min}}{\Delta Q})$	$\pm(0.5 + 3 \frac{\Delta Q_{min}}{\Delta Q})$	$\pm(2 + 0.02 \frac{q_p}{q})$, max 5%
Klasse 3	$\pm(0.5 + \frac{\Delta Q_{min}}{\Delta Q})$	$\pm(0.5 + 3 \frac{\Delta Q_{min}}{\Delta Q})$	$\pm(3 + 0.05 \frac{q_p}{q})$, max 5%

Tabelle A15: Genauigkeitsklassen in Prozent für Wärmehähler nach EN 1434