

*Schlussbericht, April 2004*

# Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003

ausgearbeitet durch

Markus Erb  
Dr.EICHER+PAULI AG  
Kasernenstrasse 21  
4410 Liestal

Peter Hubacher  
Hubacher Engineering  
Tannenbergrasse 2  
9032 Engelburg

Max Ehrbar  
Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs  
Werdenbergrasse 4  
9471 Buchs

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern, Sektion Erneuerbare Energien,  
Bereich Umgebungswärme/WKK/Kälte, vertreten durch Fabrice Rognon

**Leitung Projektteam:**

Frau Gaby Brugger, Präsidentin FWS (bis 2001)  
Fabrice Rognon, Bundesamt für Energie BFE (ab 2002)

**Auftragnehmer:**

Dr.Eicher+Pauli AG, Kasernenstrasse 21, 4410 Liestal  
Hubacher Engineering, Tannenbergrasse 2, 9032 Engelburg (Projektleitung)

**Autoren:**

Markus Erb (markus.erb@eicher-pauli.ch)  
Peter Hubacher (he-ko@bluewin.ch)  
Max Ehrbar (ehrb@ntb.ch)

**Begleitgruppe:**

Markus Real, Alpha Real AG (Leitung)  
Fabrice Rognon, Bundesamt für Energie BFE  
Max Ehrbar, Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs  
Heinz Etter, Neukom Engineering AG  
Emil Grüniger, Soltherm AG (bis 2001)  
Marco Andreoli, CTA AG (ab 2003)  
Thomas Haldimann, Installateur  
Peter Meyer, Meyer Energietechnik AG  
Christoph Wehrli WPZ (bis 2001)  
Wolfgang Rogg, WPZ (ab 2002 - 2003)

**Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen - FAWA**

Schlussbericht, April 2004

Diese Studie wurde im Rahmen des Programms Umgebungswärme, Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung des Bundesamts für Energie BFE erstellt. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

**EnergieSchweiz**

Bundesamt für Energie BFE, Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.energie-schweiz.ch

Vertrieb: ENET Nr. 240016

## Zusammenfassung

### **Ziele**

Ursprüngliches Ziel von FAWA (Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen) war es, die energetische Effizienz von Kleinwärmepumpen bis  $20 \text{ kW}_{\text{th}}$  im Feld mit statistischen Methoden zu dokumentieren und Verbesserungspotentiale aufzuzeigen. Das Projekt wurde 1996 vom Bundesamt für Energie als Begleitmassnahme zur Wärmepumpenförderstrategie gestartet.

Im Laufe von FAWA zeigte sich, dass mit den erhobenen Daten auch tiefer gehende Analysen zum Anlagenverhalten über längere Zeit und empfehlenswerten Anlagenkonzepten durchgeführt werden können.

FAWA beschreibt und analysiert also die heutige Realität im Feld und liefert dadurch Hinweise für die Planung. Aufgrund des statischen Charakters der Daten können die daraus abgeleiteten Ergebnisse aber nicht als allgemeingültige Planungsregeln verstanden werden.

### **Vorgehen**

Seit Projektstart wurden jährlich 30 neu erstellte Anlagen in FAWA aufgenommen, wobei auch die Jahrgänge 94/95 nachträglich erfasst wurden.

Von 221 der total 236 Anlagen liegen heute Jahresarbeitszahlen (JAZ) vor. Diese gliedern sich in je ca. 45% Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Anlagen. Den Rest bilden Wasser/Wasser- und Erdregisteranlagen, über welche aber keine statistisch gesicherten Aussagen gemacht werden können. Bis heute wurden 1.3 Mio. Betriebsstunden, resp. 740 Betriebsjahre erfasst. Damit kann FAWA als die wohl weltweit grösste und am besten dokumentierte Qualitätsuntersuchung eines Wärmesystems bezeichnet werden.

Die JAZ-Berechnungen basieren auf Ablesungen der installierten Elektro- und Wärmezähler durch die Anlagenbesitzer. Neben den Energiemengen wurde die Hälfte der Anlagen auch bezüglich der Systemtemperaturen untersucht. Darauf basierend ist auch geprüft worden, wie weit sich die realen Aggregate bezüglich Arbeitszahlen und Wärmeproduktion von den aus Daten einer allfälligen EN 255 Prüfung (WPZ), resp. aus Herstellerangaben berechneten, unterscheiden.

### **Objekte und Vorlauftemperaturen**

Neubau- und Sanierungs-Anlagen unterscheiden sich bezüglich der JAZ-relevanten Grössen nur durch die Vorlauftemperatur. Im Mittel liegt diese bei den Sanierungs-Anlagen um 5K höher und die JAZ entsprechend um 9% tiefer.

Am Auslegungspunkt stimmen Planungs- und Messwerte der Vorlauftemperatur gut überein. Es wurden jedoch zwei starke Hinweise auf Optimierungspotentiale gefunden. Beide betreffen die Planung. Es wurde festgestellt, dass die Energiekennzahlen (EKZ) der Objekte nicht mit den jeweiligen Vorlauftemperaturen korrelieren. Eine tiefe EKZ würde aber häufig tiefere Vorlauftemperaturen ermöglichen, was in der Planung kaum berücksichtigt wird. Weiter hat sich gezeigt, dass die am Regler eingestellten Vorlauftemperaturen (Heizkurven) zwar gut den Planungswerten entsprechen, diese aber häufig über dem real notwendigen Wert liegen.

<b>FESTSTELLUNG</b>	Ein beträchtliches energetisches Optimierungspotential besteht bei der Auslegung des Abgabesystems. Die eingestellten Heizkurven liegen i.b. bei den Sole/Wasser-Anlagen häufig über dem heiztechnisch erforderlichen Niveau, was energetisch nachteilig ist.
---------------------	--

<b>EMPFEHLUNG</b>	Die Vorlauftemperatur hat einen grossen Einfluss auf die energetische Effizienz einer Anlage, sie sollte deshalb so niedrig wie möglich geplant werden. Die Komfortansprüche der Kunden (Bodenoberflächentemperaturen) müssen dabei berücksichtigt werden. Bei vielen der untersuchten Anlagen kann durch entsprechende Reglereinstellung leicht eine energetische Verbesserung erreicht werden.
-------------------	---

→ *Resultate:* Kap. 5.3.3 und 5.3.5 (p 51 f und p 54 ff.)

→ *Interpretation:* Kap. 6.1 und 6.3.3 (p 77 und p 80)

### **JAZ-Entwicklung**

Die Sole/Wasser-Anlagen (S/W) liegen mit einer mittleren JAZ von 3.5 um 32% über dem Wert von Luft/Wasser-Anlagen (L/W) mit 2.7. Festgestellt wurde auch, dass wohl wegen der sehr unterschiedlichen Leistungsfähigkeit der Erdwärmesonden die JAZ von S/W-Anlagen eine viel grössere Streuung aufweisen als jene der L/W-Anlagen. Bezüglich der Verbesserung seit 1994/95 liegen die beiden Gruppen bei ca. 15%. Die auf den Schweizerischen Anlagenpark hochgerechneten Jahresarbeitszahlen mit 59% L/W- und 41% S/W-Anlagen zeigen seit Projektbeginn eine Zunahme um 20% von 2.5 auf 3.0. Diese Zunahme entspricht sehr gut den Ergebnissen des Wärmepumpentestzentrums Töss (WPZ). Auch das FAWA-Ergebnis, dass sich die JAZ seit 1999 kaum mehr verändern, entspricht den WPZ Daten.

<b>FESTSTELLUNG</b>	Die durchschnittlichen JAZ der gemessenen Anlagen verbessern sich über die Jahre. Der am WPZ festgestellte Verlauf widerspiegelt sich auch im Feldbetrieb. Die im Feld gemessenen Verbesserungen sind primär auf bessere Maschinen zurückzuführen.
---------------------	--

→ *Resultate:* Kap. 5.2 (p 43 ff.)

→ *Interpretation:* Kap. 6.2 (p 78)

## **Kundenzufriedenheit**

Bei einer 1997 durchgeführten Umfrage gaben 78% der Befragten WP-Besitzer an, sehr zufrieden zu sein. Weitere 17% waren ziemlich zufrieden. Lediglich 3% meldeten Vorbehalte und 2% waren gar nicht zufrieden mit ihrer Wärmepumpe. Dieses doch erfreuliche Ergebnis hat sicher auch mit der in FAWA festgestellten hohen Verfügbarkeit von Wärmepumpenanlagen von 99.5% zu tun.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Wärmepumpenanlagen haben sehr wenige Störungen. Sole/Wasser-Anlagen und Anlagen ohne technischen Speicher schneiden diesbezüglich am besten ab.</b>
---------------------	--

→ *Resultate:* Kap. 5.1 und 5.3.1 (p 41 ff. und p 48 ff.)

→ *Interpretation:* Kap. 6.3.1 (p 79)

## **Alterung**

Ebenfalls unerwartet gut haben die Anlagen bezüglich Alterung abgeschnitten. Während den acht erfassten Betriebsjahren konnte weder bei LW- noch S/W-Anlagen eine signifikante Reduktion der JAZ festgestellt werden.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Über acht Messjahre wurde bisher keine Verschlechterung der JAZ festgestellt. Verschmutzung des Verdampfers und Abkühlung der Erdwärmesonden sind also bisher keine Themen.</b>
---------------------	--

→ *Resultate:* Kap. 5.3.2 (p 50 ff.)

→ *Interpretation:* Kap. 6.3.2 (p 79)

## **Regler**

Überdurchschnittlich gut haben Anlagen mit Regler mit Raumtemperaturkompensation abgeschnitten. Der festgestellte positive Effekt auf die JAZ von gut 8% kann maximal zur Hälfte durch die Kompensation von externen Lasten (z.B. Sonnenschein) erklärt werden. Es ist deshalb anzunehmen, dass die Regler primär zu hoch eingestellte Heizkurven korrigieren.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Regler mit Raumtemperaturkompensation führen zu tieferen Vorlauftemperaturen und damit zu Energieeinsparungen ohne Komforteinbuße.</b>
---------------------	---

<b>EMPFEHLUNG</b>	<b>Regler mit Raumtemperaturaufschaltung sind empfehlenswert.</b>
-------------------	---

→ *Resultate:* Kap. 5.3.3 (p 51 f.)

→ *Interpretation:* Kap. 6.3.3 (p 80)

## **Zusatzheizungen**

Der reale Betrieb von LW-Anlagen hat gezeigt, dass elektrische Zusatzheizungen für den normalen Heizbetrieb nicht benötigt werden, also auch bei tiefen Aussentemperaturen der gesamte Wärmebedarf durch die Wärmepumpe abgedeckt werden kann. Elektrische Zusatzheizungen können aber für die Inbetriebnahme und Bauaustrocknung trotzdem sinnvoll sein. Aufgrund der gemessenen Auslastungen bei Auslegebedingungen muss festgestellt werden, dass i.b. die SW-Aggregate häufig überdimensioniert sind. Dies hat primär ökonomisch nachteilige Folgen.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Luft/Wasser-WP können im Mittelland problemlos monovalent betrieben werden. Im normalen Heizbetrieb wird keine elektrische Zusatzheizung benötigt. Für die Inbetriebnahme und Bauaustrocknung kann ein Elektroeinsatz sinnvoll sein. Sole/Wasser-WP werden häufig zu gross ausgelegt, was sich negativ auf die Kosten auswirkt.</b>
<b>EMPFEHLUNG</b>	<b>Sicherheitszuschläge bei der Auslegung von Sole/Wasser-WP sind zu vermeiden.</b>

→ *Resultate:* Kap. 5.3.4 (p 52 ff.)

→ *Interpretation:* Kap. 6.3.4 (p 80)

## **Warmwassereinbindung**

FAWA zeigt, dass durch die Einbindung der Warmwasserbereitung deutliche ökologisch-energetische Vorteile gegenüber Elektroboilern erzielt werden. Deutliche Unterschiede konnten auch bezüglich der verschiedenen Typen der Einbindung der Warmwasserbereitung festgestellt werden. Bezüglich energetischer Effizienz haben sich separate, knapp dimensionierte Boiler (ein Tagesbedarf) mit innenliegendem Wärmetauscher am besten bewährt.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Die Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpe hat im Vergleich zu Elektroboilern deutliche ökologisch-energetische Vorteile.</b>
<b>EMPFEHLUNG</b>	<b>Die Warmwasserbereitung sollte in die WP-Anlage integriert werden. Am besten bewährt haben sich dabei einfache Boiler mit innenliegendem Wärmetauscher. Kombispeicher sollten nur bei Einbindung von anderen Energiequellen (Sonne, Holz) verwendet werden.</b>

→ *Resultate:* Kap. 5.3.6 (p 56 ff.)

→ *Interpretation:* Kap. 6.3.5 (p 81)

### **Technische Speicher**

Technische Speicher haben keinen positiven Einfluss auf die JAZ. Sie kosten aber Geld, beanspruchen Platz und komplizieren eine Anlage und sollten deshalb nur dort verwendet werden, wo sie auch tatsächlich notwendig sind.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Technische Speicher haben keinen Einfluss auf die Jahresarbeitszahl.</b>
<b>EMPFEHLUNG</b>	<b>Technische Speicher verteuern und komplizieren die Anlagen und sollten deshalb nur dort verwendet werden, wo sie auch tatsächlich notwendig sind.</b>

→ *Resultate:* Kap. 5.3.7 (p 59 ff.)

→ *Interpretation:* Kap. 6.3.6 (p 82)

### **Erdwärmesonden**

Wie erwähnt sind bei den JAZ von S/W-Anlagen grosse Differenzen festzustellen. Die Vermutung, dass ein wichtiger Grund dafür in den stark unterschiedlichen Eigenschaften des komplexen Teilsystems Erdreich-Erdwärmesonde-Erwärmesondenkreislauf zu finden ist, hat sich bestätigt. Die gemessenen Soletemperaturen liegen zwar im Mittel mit knapp 5°C recht hoch, jedoch ist ihre Streuung sehr gross. Die gemessenen Soletemperaturen konnten nur teilweise durch die Geologiedaten erklärt werden. Die heute verwendete Faustregel für die Sondenauslegung von 50 W/m konnte nicht als Garant für ein gutes Ergebnis bestätigt werden. Als Auslegegrösse wäre die jährliche Entzugsenergie pro Sondenlänge empfehlenswerter. Ein grosses und relativ einfach zu erschliessendes Optimierungspotential konnte bei den Umwälzpumpen im Solekreis geortet werden. Die Überdimensionierung der Solepumpen wirkt sich deutlich negativ auf die JAZ der Soleanlagen aus.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Die Sole/Wasser-Wärmepumpen werden meist zu gross gewählt. Wird die Erdwärmesonde gemäss der WP-Leistung ausgelegt, so ist auch diese meist zu lang. Die Soletemperatur wird von verschiedenen, i.b. geologischen Faktoren, bestimmt. Liegen hierzu keine detaillierten Informationen vor, so besteht ein beträchtliches Unsicherheitspotential. Solekreispumpen sind häufig überdimensioniert, was einen deutlich negativen Einfluss auf die energetische Effizienz der Anlagen hat.</b>
<b>EMPFEHLUNG</b>	<b>Nur eine bedarfsgerechtere Auslegung der Erdwärmesonde führt zu einem ökonomisch und energetisch optimalen Resultat. Bohrfirmen sollten sich stärker bei dieser Aufgabe engagieren. Es ist auf eine korrekte Auslegung der Solekreispumpe zu achten.</b>

→ *Resultate:* Kap. 5.3.8 (p 61 ff.)

→ *Interpretation:* Kap. 6.3.7 (p 82)

### **Wärmepumpen-Aggregate**

Ein sehr erfreuliches Resultat ergab die Analyse der energetischen Qualität der eigentlichen Wärmepumpenaggregate im Feld. Auf Basis von Prüfstandsmessungen wurde eine Voraussage bezüglich der Arbeitszahl von S/W-Maschinen gemacht und diese mit den Feldmessungen verglichen. Diese Berechnungen zeigen im Mittel nur eine Abweichung gegenüber den Prüfstandsdaten von -4%. Dies zeigt, dass sich am WPZ festgestellte Verbesserungen der Aggregate direkt auf die energetische Effizienz der Anlagen auswirken. Weiter wird belegt, dass die zur WPZ-Prüfung eingereichten Maschinen einem durchschnittlichen Produkt aus der Fabrikationsreihe der Hersteller entsprechen.

<b>FESTSTELLUNG</b> Im realen Betrieb ist die energetische Effizienz von Wärmepumpen-Aggregaten so, wie dies Prüfstandsmessungen (WPZ oder Herstellerangaben) erwarten lassen.
--

→ *Resultate:* Kap. 5.3.9 (p 69 ff.)

→ *Interpretation:* Kap. 6.3.8 (p 84)

### **Ausblick FAWA**

FAWA wird in reduziertem Umfang weitergeführt. Neue Anlagenjahrgänge können wegen fehlender Mittel nicht mehr aufgenommen werden. Die Aktivitäten werden sich deshalb auf die Erfassung von Messdaten des vorhandenen Anlagenbestandes konzentrieren, mit dem Ziel Fragen zu Alterung und Lebensdauer von Wärmepumpenanlagen auf den Grund zu gehen.

## Dank

Das FAWA-Team möchte sich bei allen bedanken, die sich in irgendeiner Form für das Gelingen dieses Projekts eingesetzt haben. Unser Dank richtet sich insbesondere an die Anlagenbesitzer, die mit viel Elan und noch mehr Ausdauer die Betriebsdaten ihrer Anlagen protokollieren. Diese Daten bilden die Basis des Projekts und sind deshalb von unschätzbarem Wert.

Unser Dank gilt weiter jenen Personen, die uns jedes Jahr Kontakte zu interessierten Bauherren geliefert haben. Insbesondere waren das Energiefachstellen, Wärmepumpenhersteller, Installateure, Planer und Elektrizitätswerke.

Last but not least wollen wir uns bei der FAWA-Begleitgruppe und speziell auch beim Bundesamt für Energie, Fabrice Rognon, Bereichsleiter Umgebungswärme, für die kreative Begleitung bedanken.

# Inhaltsverzeichnis

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>I</b>
<b>DANK</b>	<b>VII</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>VIII</b>
<b>1. EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2. ZIELE UND PROJEKTABLAUF</b>	<b>2</b>
2.1 Ziele	2
2.2 Projektablauf	3
<b>3. VORGEHEN</b>	<b>4</b>
3.1 Kriterien der Anlagenwahl	4
3.2 Messmethodik	5
3.2.1 Langzeitmessungen	6
3.2.2 Kurzzeitmessungen	7
3.2.3 Anlagen mit Erdwärmesonden	9
3.2.4 Nutzerbefragung	10
3.3 Definitionen und Modelle	11
3.3.1 Heizperiode	11
3.3.2 Aussentemperatur	11
3.3.3 Arbeits- und Jahresarbeitszahl	11
3.3.4 Fehlerrechnung für Arbeits- und Jahresarbeitszahlen	12
3.3.5 Klimanormierte JAZ (nJAZ)	15
3.3.6 JAZ Anlagenpark Schweiz	16
3.3.7 Auslastung bei Auslegebedingungen	18
3.3.8 Speicherverlustmodell	18
3.3.9 Abtaukorrektur	19
3.3.10 Verfügbarkeit	20
3.4 Normierung mit Modellwerten	21
3.4.1 Einführung	21
3.4.2 WP-Modell	22
3.4.3 Einfluss von Temperaturen und Anlagenkomponenten auf nJAZ	25
3.4.4 Einfluss von WP-Komponenten und Betriebsweise auf AZ	28
3.5 Rechenwerkzeuge	32
3.5.1 Anlagenfile	33
3.5.2 Allgemeine Daten	33
3.6 Datenkontrolle	34
3.6.1 Fehlerdetektion und -korrektur	34
3.6.2 Wärmezählerkalibrierung	34
3.7 Übergeordnete Qualitätssicherung	36
3.7.1 Begleitgruppe	36
3.7.2 Experte	36

3.7.3	Externe Software-Überprüfung	37
3.7.4	Plausibilitätskontrolle	37
<b>4.</b>	<b>ANLAGENÜBERSICHT</b>	<b>39</b>
4.1	Gebäude	39
4.2	Anlagentypen	40
<b>5.</b>	<b>RESULTATE</b>	<b>41</b>
5.1	Zufriedenheit	41
5.2	Energetische Effizienz	43
5.2.1	Zeitliche Entwicklung Anlagengruppen	45
5.2.2	Entwicklung CH-Anlagenpark	46
5.3	Vertiefte Analysen	48
5.3.1	Verfügbarkeit	48
5.3.2	Alterung	50
5.3.3	Regelung	51
5.3.4	Betriebsart und Auslegung	52
5.3.5	Energiekennzahlen und Vorlauftemperaturen	54
5.3.6	Warmwasser	56
5.3.7	Speichereinbindung	59
5.3.8	Erdwärmesonden	61
5.3.9	Erwartungswert	69
<b>6.</b>	<b>INTERPRETATION UND EMPFEHLUNGEN</b>	<b>77</b>
6.1	Objekte und Vorlauftemperaturen	77
6.2	Energetische Effizienz	78
6.2.1	Luft- vs. Erdwärmesondenanlagen	78
6.2.2	JAZ-Entwicklung	78
6.3	Vertiefte Analysen	79
6.3.1	Verfügbarkeit	79
6.3.2	Alterung	79
6.3.3	Regelung	80
6.3.4	Betriebsart und Auslegung	80
6.3.5	Warmwasser	81
6.3.6	Speichereinbindung	82
6.3.7	Erdwärmesonden	82
6.3.8	Erwartungswert	84
<b>7.</b>	<b>SCHLUSSWORT UND AUSBLICK</b>	<b>86</b>
<b>8.</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>88</b>
<b>9.</b>	<b>SYMBOLVERZEICHNIS UND GLOSSAR</b>	<b>89</b>
<b>10.</b>	<b>ANHANG</b>	<b>92</b>
10.1	Nichtklimanormierte Jahresarbeitszahlen (JAZ)	92
10.2	EWS-Sensitivitäten	94

# 1. Einleitung

Die Wärmepumpe ist keine neue Erfindung, sie ist seit mehr als 100 Jahren bekannt. In der Schweiz wurden bereits in den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts mehrere Wärmepumpen installiert. Der Durchbruch geschah im Zuge der Ölkrise (Ende 70er Jahre) und entwickelte sich abgesehen von einem grösseren Einbruch anfangs der 80er Jahre stetig nach oben.

Das BFE hatte aufgrund der energiepolitischen Ziele ein grosses Interesse an der Verbreitung der Wärmepumpe, da diese auch dem Bereich der erneuerbaren Energie zugeordnet wurde. Die Annahme des Energieartikels am 23.9.1990 führte beim BFE zu einem Handlungsauftrag für die Förderung der *rationellen Energieverwendung* und der *erneuerbaren Energien*. Mit dem Förderprogramm „Energie 2000“ wurde dieses Ziel weiter verfolgt und sehr erfolgreich vorangetrieben. Das Nachfolgeprogramm „EnergieSchweiz“ hat diese Aktivitäten nahtlos weiter geführt.

Die Hauptziele für die Wärmepumpenförderung sind *Vertrauen schaffen, die Bekanntheit steigern, die Kenntnisse fachlicher Zielgruppen erweitern, die Qualität und Effizienz verbessern*. Das Ziel war also keine wilde Förderung, sondern durch Qualität zufriedene Wärmepumpenbesitzer zu gewinnen.

Im Jahre 1993 wurde im Rahmen der Aktionsgruppe regenerierbare Energien (AGR) von Energie 2000 das Konzept einer Qualitätskontrolle für Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energien aufgearbeitet. Im Bereich Wärmepumpen wurden rasch verschiedene Möglichkeiten für die Durchführung einer Qualitätssicherung diskutiert. Man wollte die schlechten Erfahrungen des ersten Wärmepumpenbooms der 80er Jahre vermeiden. Damals hat sich der schlechte Ruf dieser Technologie wegen mangelhafter Qualität und fehlender Kompetenz der Akteure schnell verbreitet und sich auf die Verbreitung der Wärmepumpe negativ ausgewirkt.

Bereits damals waren einige Werkzeuge, wie diverse Hefte für den Wärmepumpenbereich, etc. und erste Normen oder Richtlinien, z.B. von der Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen (AWP) vorhanden. Im Rahmen des ersten Impulsprogrammes (IP Haustechnik) wurden in den 80er Jahren zusammen mit Fachverbänden auch verschiedene Publikationen erstellt. Auch erste systematische Feldmessungen an Wärmepumpenanlagen wurden im Rahmen von Forschungsprojekten des NEFF (Nationaler Energieforschungsfond) durchgeführt.

Die Situation wurde 1993 mit der Gründung der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS und des Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrums WPZ wesentlich verbessert. Die FWS hat aufbauend auf dem WPZ ein ganzes Spektrum von Instrumenten zur Qualitätssicherung entwickelt und umgesetzt: Ausbildung von Fachpartnern, Einführung des Gütesiegels für Wärmepumpen, Schaffung einer Anlaufstelle für Problemfälle. Im Bereich Marketing wurde der Begriff „WPZ-geprüft“ erfolgreich etabliert. Weiterhin blieb jedoch eine Unsicherheit bezüglich der Qualität von real betriebenen Anlagen, bestehend aus Wärmequelle, Wärmepumpe und Wärmeverteilung inkl. Einbindung der Warmwasseraufbereitung. Das BFE sah deshalb den Bedarf nach einer Erfolgskontrolle bezüglich der Wärmepumpenförderstrategie. Einzig eine umfassende Messkampagne im Feld konnte diese zentrale Information für die Steuerung der Aktivitäten im Bereich Umgebungswärme liefern. So entstand ursprünglich die Arbeitsgruppe „QS-WP“ und dann das Projekt „Feld-Analyse von Wärmepumpen-Anlagen (FAWA)“.

## 2. Ziele und Projektablauf

### 2.1 Ziele

Ziel von FAWA ist es, die energetische Effizienz von Kleinwärmepumpen bis  $20 \text{ kW}_{\text{th}}$  im Feld mit statistischen Methoden zu dokumentieren und Verbesserungspotentiale aufzuzeigen. Das Projekt wurde 1996 vom Bundesamt für Energie als Begleitmassnahme zur Wärmepumpenförderstrategie gestartet.

Die Hauptziele für die Wärmepumpenförderung bis zum Jahr 2000 waren Vertrauen schaffen, die Kenntnisse aller Zielgruppen erweitern, die Bekanntheit steigern, die Qualität und Leistungszahl verbessern und damit die Anzahl der Wärmepumpenanlagen auf 100'000 Stück zu erhöhen. In diesem Zusammenhang wurde vom BFE das Projekt FAWA initiiert.

Die Kernziele von FAWA sind:

- Bestimmen eines statistischen Mittels der Jahresarbeitszahlen von realen Wärmepumpenanlagen mit einer Heizleistung von maximal 20 kW.
- Aufzeigen der Entwicklung der durchschnittlichen Jahresarbeitszahlen nach Anlagenbaujahren.
- Vergleich von Effizienzdaten, die am Wärmepumpentestzentrum Töss (WPZ) gemessen wurden, mit den Feldmessungen von baugleichen Wärmepumpenaggregaten.
- Erkennen von Veränderungen der Jahresarbeitszahlen mit zunehmendem Alter der Anlagen (Alterungseffekte).
- Bestimmen der Auslastung von Wärmepumpenaggregaten, resp. Ausweisen der realen Leistungsreserven.

Im Laufe des Projektes wurden von der Begleitgruppe aufgrund bereits vorliegender Resultate weitere Ziele formuliert:

- Bestimmen der Zuverlässigkeit von Wärmepumpenanlagen (Verfügbarkeit) und Festhalten der wichtigsten Ursachen von Betriebsausfällen.
- Vergleich der Arbeitszahlen von Anlagen mit und ohne Integration der Warmwasserbereitung.
- Auswirkungen von technischen Speichern auf Betriebsregime (Takten) und Arbeitszahl bei verschiedenen hydraulischen Einbindungen.
- Ableiten von statistisch gesicherten Faziten, die zur Qualitätssteigerung in Planung und Realisierung von neuen Wärmepumpenanlagen beitragen können.

## 2.2 Projektablauf

Um die Qualitätssicherung bei Wärmepumpenanlagen zu beeinflussen, wurde im April 1995 vom BFE ein „Projekt zur Sicherstellung der Effizienz bei elektrischen Wärmepumpen im Betrieb“ lanciert. Es wurden die damals wichtigsten Fragen und Ziele aufgenommen. Das ausgearbeitete Pflichtenheft wurde am 30. März 1995 verabschiedet und anschliessend ausgeschrieben.

Das Projekt „QS-WP“, wie es anfänglich genannt wurde, war in drei Teilbereiche (Teilprojekte) gegliedert: Teilprojekt 1 „Werkzeuge“; Teilprojekt 2 „Umsetzung“; Teilprojekt 3 „Marketing“.

Der Bereich Marketing wurde nach einem Jahr im Rahmen der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS weitergeführt, das Teilprojekt 1 Werkzeuge wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Standardschaltungen“ STASCH [2] weiter bearbeitet.

Die Arbeitsgemeinschaft wurde bei der Anlagenauswahl von Elektrizitätswerken, Installateuren, Herstellern und Energiefachstellen unterstützt. Diese lieferten Adressen interessierter Bauherrschaften. Aus diesen konnten dann geeignete Anlagen ausgewählt werden. Zu Beginn des Projekts musste einige Überzeugungsarbeit geleistet werden, um Anlagenbesitzer für die Teilnahme an FAWA zu gewinnen. Der Aufwand der Anlagenbesitzer liegt im Ablesen der vom Projektteam installierten Zähler. Im Laufe der Jahre hat FAWA einen recht hohen Bekanntheitsgrad erreicht, und die Anlagensuche hat sich dadurch deutlich vereinfacht.

Zu Beginn des Projektes wurden die Anlagen zufällig aus dem Pool an interessierten Anlagenbesitzern ausgewählt. Häufig bestand aber keine grosse Auswahlmöglichkeit, da es schwierig war, überhaupt genügend Interessierte zu finden.

Im Jahr 2000 wurden erste Erkenntnisse unter dem neuen Namen FAWA anlässlich eines zweitägigen Workshops mit der Fachbranche besprochen. Um Missverständnisse zu vermeiden, wurde beschlossen, dass die Kommunikation der FAWA-Erkenntnisse via FWS erfolgen soll. Der Zeitrahmen wurde für das Projekt bis 2005 verlängert.

An der 6. UAW Tagung 1999 in Burgdorf mit dem Thema *Wärmepumpen – heute und morgen* wurde ein erster Schwerpunkt zur Information über die Kleinwärmepumpen gesetzt. Die Mehrheit der Referate hatte die Feldanalyse zum Thema [1].

Auch an der 8. UAW Tagung 2001 wurde ein Referat zu den Erkenntnissen von FAWA gehalten. Das Thema war damals *Erfahrungen an Retrofit-Anlagen im Betrieb* und umfasste die Erfahrungen und Lehren mit WP bei Altbauten (Sanierungen, insbesondere Ersatz von Heizkesseln durch WP).

Im Jahre 2003 wurde vom Bundesrat und den eidg. Räten bedeutende finanzielle Kürzungen beschlossen, welche die Weiterführung von FAWA im bisherigen Umfang in Frage stellen. Daher wurde beschlossen, FAWA mit dem vorliegenden Schlussbericht vollumfänglich zu dokumentieren.

FAWA wird in reduziertem Umfang weitergeführt. Neue Anlagenjahrgänge können wegen fehlender Mittel nicht mehr aufgenommen werden. Die Aktivitäten werden sich deshalb auf die Erfassung von Messdaten des vorhandenen Anlagenbestandes konzentrieren, mit dem Ziel Fragen zu Alterung und Lebensdauer von Wärmepumpenanlagen auf den Grund zu gehen.

## 3. Vorgehen

FAWA hat also zum Ziel, statistisch gesicherte Aussagen zur Qualität im Feldbetrieb von in der Schweiz installierten Wärmepumpenanlagen mit einer Leistung bis maximal  $20 \text{ kW}_{\text{th}}$  zu machen. Insbesondere interessiert deren Entwicklung über die Jahre. Weiter sind aber auch jene Parameter gesucht, welche die Unterschiede zwischen verschiedenen Anlagen, respektive Anlagengruppen verursachen.

Das grundsätzliche Vorgehen besteht darin, möglichst viele Anlagen energietechnisch zu erfassen. Um Veränderungen der Technologie der letzten Jahre zu erkennen, wurden pro Jahr rund 30 neue WP-Anlagen ins Projekt aufgenommen. Die Anlagen verbleiben dann solange im Sample, wie die Anlagenbetreiber bereit sind, die installierten Zähler periodisch abzulesen (vgl. unten). Jedes Jahr erhöht sich damit die Zahl der untersuchten Anlagen.

### 3.1 Kriterien der Anlagenwahl

Zu Beginn des Projektes waren noch keine Messdaten bezüglich der statistischen Verteilung (Standardabweichung) der Jahresarbeitszahlen im Feld vorhanden. Es war deshalb nicht möglich, zu bestimmen, wie viele Anlagen notwendig sind, um beispielsweise einen JAZ-Mittelwert pro Jahr mit einem bestimmten Vertrauensintervall (CI, vgl. [Kap. 9](#)) zu erhalten. Nicht zuletzt budgetbedingt wurde die Zahl der pro Jahr neu aufzunehmenden Anlagen auf 30 festgelegt.

Bei der konkreten Anlagenwahl wird jeweils versucht, möglichst viele der folgenden Kriterien zu erfüllen:

1. **Thermische Leistung**

Die Wärmepumpenanlagen sollten eine thermische Leistung von maximal  $20 \text{ kW}_{\text{th}}$  nicht überschreiten, da diese Anlagengruppe den Markt zahlenmässig dominiert.

2. **Wärmequellen**

Luft/Wasser-, Sole/Wasser- oder Wasser/Wasser-Anlagen, wobei dem Markt entsprechend in erster Priorität Luft und in zweiter Priorität Sole gewählt werden.

3. **Produktionsart**

Seriegeräte, keine Sonderanfertigungen.

4. **Betriebsart**

Monovalent, monoenergetisch oder bivalent mit erfassbarer zweiter Wärmeerzeugung.

5. **Standort**

Geographisch unterschiedliche Lagen.

6. **Objekte**

Die Anlagen befinden sich in Neubauten und Sanierungsobjekten. Sanierungsobjekte definieren sich dadurch, dass sie älter sind als die WP-Anlage, diese also eine andere Anlage ersetzt hat.

7. **Warmwasser**

Anlagen mit Warmwasserbereitung mittels WP-Anlage sollen gemäss ihrem Anteil an den real installierten Systemen vertreten sein.

### 8. Besitzverhältnisse

Es werden nur private Anlagenbesitzer berücksichtigt, keine öffentlichen Objekte.

### 9. Prüfung

Die Wärmepumpenaggregate sind möglichst nach EN 255 geprüft worden.

### 10. Instrumentierung

Die Anlagen sind möglichst bereits mit Elektro- und Wärmehzähler ausgerüstet, so dass Stromverbrauch und die produzierte Wärmemenge der WP-Anlage erfasst wird. Andernfalls müssen die Anlagen mit bescheidenem Aufwand nachrüstbar sein.

### 11. Hydraulische Einbindung

Die Wärmepumpenaggregate sind in der Regel in bewährter Weise hydraulisch eingebunden.

Ein sehr wichtiges Kriterium ist die Wärmequelle, also Luft, Erdreich (Sole) und Wasser. Es hat sich im Laufe des Projektes gezeigt, dass es bei einem jährlichen Stichprobenumfang von 30 Anlagen unmöglich ist, für alle drei Gruppen statistisch relevante Aussagen bezüglich der Jahresarbeitszahl machen zu können. Von der Begleitgruppe wurde deshalb Ende 2000 entschieden, keine weiteren Wasser- und Erdregister-Systeme ins Messprogramm aufzunehmen, da diese in der Schweiz einen nur sehr bescheidenen Marktanteil aufweisen. Ab diesem Zeitpunkt wurden dann jeweils 15 Luft- und 15 Sole-Anlagen ausgewählt. Heute wissen wir auch, dass die JAZ-Streuung bei den Sole-Anlagen deutlich höher liegt als bei den Luft-Anlagen. In Abb. 1 ist die durch FAWA festgestellte Situation für Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Anlagen dargestellt. Soll z.B. für jeden Jahrgang ein CI der JAZ von  $\pm 10\%$  ( $\pm 5\%$ ) erreicht werden, so müssten pro Jahr jeweils 9 (35) LW- und für 14 (55) S/W-Anlagen ins Programm aufgenommen werden. Bei einer allfälligen Fortführung von FAWA wird deshalb der Anteil der LW- zugunsten der S/W-Anlagen entsprechend reduziert.

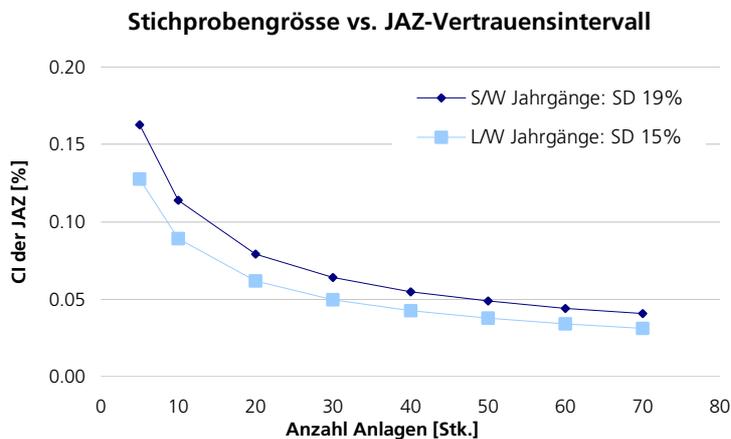


Abbildung 1: Je nach Standardabweichung (SD, vgl. Kap. 9) und gewünschtem Vertrauensintervall (CI) verändert sich die notwendige Stichprobengrösse drastisch.

## 3.2 Messmethodik

Von den für FAWA ausgewählten Anlagen werden in einem ersten Schritt alle für das Projekt relevanten Anlagendaten erfasst. Damit werden jene Parameter bezeichnet, die sich während dem Betrieb nicht verändern, respektive nur durch Manipulation (z.B. Reglereinstellungen). Sie umfassen einerseits das Gebäude, welches durch die Wärmepumpe beheizt wird, und anderer-

seits die Wärmepumpenanlage selbst. Im Anhang sind die erfassten Grössen einer Anlage beispielhaft dargestellt.

### 3.2.1 Langzeitmessungen

Zum Erfassen der Betriebsdaten über die gesamte Zeitperiode, in der sich die Anlage in FAWA befindet, werden die Anlagen mit den unten beschriebenen Zählern ausgerüstet. Diese werden von den Bauherrschaften im Idealfall wöchentlich, teilweise aber auch nur alle drei bis vier Wochen abgelesen und protokolliert.

- **Stromverbrauch:** Ein Elektrozähler erfasst den Stromverbrauch der Wärmepumpenanlage. Je nach Systemgrenze wird die erfasste Energiemenge rechnerisch korrigiert. Schliesst der Zähler beispielsweise eine elektrische Zusatzheizung ein, so kann deren Beitrag über Anschlussleistung und Laufzeit ermittelt und bei Bedarf (Systemgrenze) in Abzug gebracht werden.

**Messgeräte:** Es werden Ferraris-Induktionszähler der Genauigkeitsklasse 2 (nicht geeicht) mit einer Messunsicherheit von  $\pm 2\%$  aber auch moderne Induktionszähler (Electrex, Ulrich Matter AG) mit  $\pm 0.5\%$  verwendet.

- **Wärmeproduktion:** Ein Wärmezähler (Ultraschallgerät) erfasst die von der Wärmepumpe abgegebene Wärmemenge. Wenn ein Speicher vorhanden ist und es die räumlichen Verhältnisse zulassen, wird der Wärmezähler zwischen Wärmepumpe und Speicher platziert. Rechnerische Korrekturen bezüglich bestimmter Systemgrenzen werden wie beim Elektrozähler beschrieben vorgenommen.

**Messgeräte:** Mit wenigen Ausnahmen sind Wärmezähler im Einsatz, die den Durchfluss mit einem Ultraschallsensor bestimmen. Die Temperaturfühler befinden sich direkt im Medium (keine Tauchhülsen). Neben der Wärmemenge liefert der Wärmezähler auch den Volumenstrom über dem Verflüssiger. In 75% der Fälle wurde der Wärmezähler von FAWA geliefert und eingebaut. Dabei wurden Neovac (Siemens) Geräte der Serien 2WR3 bis 2WR5 verwendet. Sie wurden so gewählt, dass der durch sie verursachte Druckabfall keine relevante Reduktion des Volumenstroms erzeugte. Die Messunsicherheit dieser Zähler liegt gemäss Fehlerrechnung bei maximal  $\pm 2.2\%$  (vgl. [Kap. 3.3.4](#)).

- **Laufzeit und Starts:** Wenn nicht bereits vom Wärmepumpenregler erfasst, werden Laufzeit und Anzahl Starts des Kompressors über einen mechanischen Zähler erhoben. Bei Anlagen mit zwei Kompressoren werden diese getrennt erfasst.

**Messgeräte:** Es werden analoge Geräte von EHS Schaffhausen (Typ 920) verwendet. Diese bestehen aus einem Zeit- und einem Impulzzähler. Zur Messunsicherheit können keine Angaben gemacht werden.

#### Spezialfälle

- **Elektrische Zusatzheizung:** Laufzeit und Starts von elektrischen Zusatzheizungen werden durch einen zusätzlichen Laufzeit/Start-Zähler erfasst.
- **Wärme:** Kann die gesamte von der Wärmepumpe abgegebene Wärmemenge nicht mit nur einem Zähler ermittelt werden, dann wird ein zweiter Zähler eingebaut. Dies ist notwendig wenn der Hauptwärmezähler nach einem Speicher montiert werden muss (Platzmangel) und eine zweite Wärmequelle den Speicher speist, beispielsweise eine solarthermische Anlage. In diesem Fall wird die Solarwärme von einem zweiten Zähler gemessen.

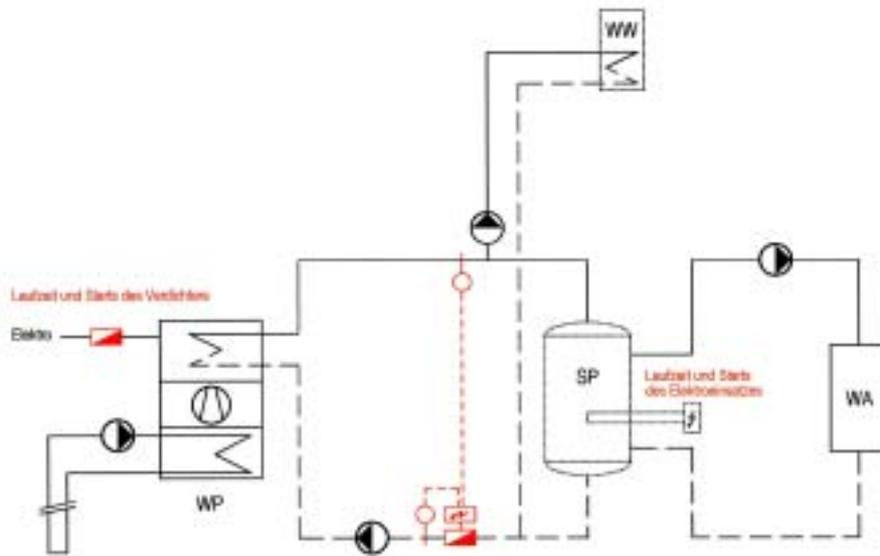


Abbildung 2: FAWA Messschema für der Langzeituntersuchung. Wärmehähler, Elektrozähler, Laufzeiten und Starts werden von den Anlagenbetreibern periodisch abgelesen.

### 3.2.2 Kurzzeitmessungen

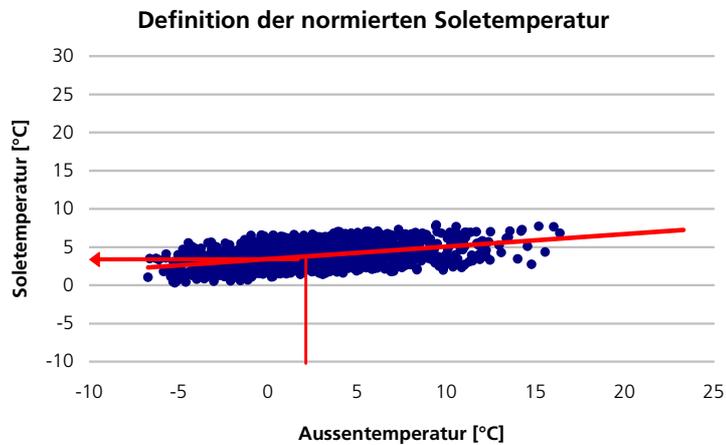
Die Arbeitszahl (AZ) einer Wärmepumpe wird stark durch die quellen- und senkenseitigen Temperaturen beeinflusst. Diese sind deshalb wichtige Faktoren für die Interpretation der über Energiezähler ermittelten Arbeitszahlen. Weiter sind sie die Basis der Erwartungswertberechnung, die in [Kap. 3.3.10](#) näher beschrieben wird.

Während drei Monaten im Winter werden die Anlagen mit Datenloggern ausgemessen. Die Länge dieses Intervalls wurde so festgelegt, dass ein möglichst weiter Bereich an Aussentemperaturen abgedeckt wird. Dadurch kann das Anlagenverhalten ziemlich umfassend beurteilt werden. Die begrenzte Speicherkapazität der Logger führt dazu, dass jeweils Mittelwerte über 30-Minuten-Intervallen festgehalten werden. In der Praxis hat sich gezeigt, dass diese Auflösung vollkommen ausreichend ist.

Es werden folgende Grössen erfasst (vgl. [Abb. 4](#)):

- Temperaturen:** Es werden jeweils die 30-Minuten-Mittelwerte der folgenden drei Temperaturen ermittelt. Es sind dies die Aussen-, die Vorlauf- und die Sole- (Sole/Wasser-Anlagen) resp. die Rücklauftemperatur (Luft/Wasser-Anlagen). Die Unterscheidung wird gemacht, da bei den Luft/Wasser-Anlagen die Quellen- und Aussentemperatur identisch sind und so ein Kanal des Loggers für die Rücklauftemperatur verwendet werden kann. Die Temperaturmittelung geschieht ereignisgesteuert, d.h. es werden nur jene Temperaturwerte für die Mittelwertbildung im Messintervall verwendet, welche in jenem Teil des Intervalls gemessen wurden, in welchem der Kompressor in Betrieb war. Dadurch werden irrelevante Stillstandstemperaturen ausgeschlossen. Die Soletemperaturen sind während der Heizperiode nicht konstant. Wie sich gezeigt hat, korrelieren sie im Einzelfall gut mit der Aussentemperatur ([Abb. 3](#)), resp. der Sondenbelastung. Die Korrelation ist durch die bei tiefen Aussentemperaturen höhere Sondenentzugleistung (höhere Heizenergiebedarf) bedingt. Um die Messdaten verschiedener Anlagen vergleichen zu können, wird auf Basis dieser Korrelation eine Normierung vorgenommen. Dazu

wird bei allen Anlagen eine lineare Regression der Aussen- zur Soletemperatur durchgeführt und der  $T_{\text{Sole}}$ -Wert bei einer  $T_a$  von  $2^\circ\text{C}$  ermittelt (Abb. 3).



*Abbildung 3:* Soletemperatur in Abhängigkeit von der Aussentemperatur. Da die Soletemperatur gut mit der Aussentemperatur korreliert, kann mittels linearer Regression (rot) eine klimanormierte  $T_{\text{Sole}}$  definiert werden.

- **Laufzeit und Starts:** Laufzeit und Starts des Kompressors werden über einen digitalen Kanal des Loggers erhoben.



*Abbildung 4:* FAWA Messschema der ca. vierwöchigen Loggermessungen, bei welcher Systemtemperaturen und Laufzeit sowie Starts der Wärmepumpe erfasst werden.

Heute liegen von knapp 120 Anlagen solche Messungen über rund drei Monaten vor.

### **Spezialfälle**

Bei einigen wenigen Anlagen wurde neben den oben erwähnten Grössen auch die Energien (Elektroverbrauch und Wärmeproduktion) aufgezeichnet (Abb. 5). Dabei wurde eine Intervalllänge 5 oder 10-Minuten gewählt.

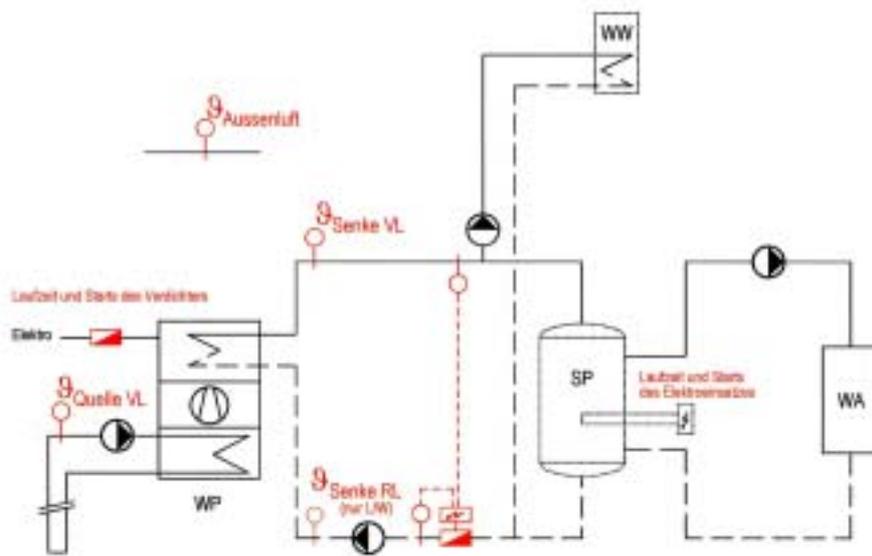


Abbildung 5: FAWA Messschema für die ca. vierwöchige Loggermessung zur Erfassung von Energieströmen und Systemtemperaturen.

### Datenlogger

Für die einfachen Loggermessungen (Kurzzeitmessungen) kommen 4-Kanallogger (3 x analog, 1 x digital) der Firma Elpro (Typ Hotbox BE3, Auflösung 0.1 K) zum Einsatz. Die analogen Kanäle werden für die Temperaturmessung mittels Thermoelementen (Typ NTC) verwendet und der digitale Kanal erfasst Laufzeit und Starts des Kompressors. Der Messfehler der Thermoelemente liegt bei den in FAWA auftretenden Temperaturen (-10 bis 65°C) bei  $\pm 0.2$  K (Elpro, pers. Kom.).

Die aufwendigeren Spezialmessungen wurden mit Loggern der Firma Datataker des Typs DT50 und DT100 durchgeführt. Die Temperaturen wurden mit PT100 (Klasse A) gemessen, deren Messfehler errechnet sich mit der Formel:

$$\Delta T = \pm(0.150 + 0.002 * \vartheta) \quad (1)$$

Daraus folgt bei 0°C ein Fehler von  $\pm 0.15$  K, der kontinuierlich ansteigt und bei 65°C einen Wert von  $\pm 0.28$  K erreicht.

### 3.2.3 Anlagen mit Erdwärmesonden

Im Laufe von FAWA hat sich gezeigt, dass die Streuung der Jahresarbeitszahlen bei Sole/Wasser-Anlagen deutlich grösser ist als bei Luft/Wasser-Anlagen. Ursache dafür kann eigentlich nur die nicht einheitliche Qualität der Erdwärmesondensysteme (Sonde, Hinterfüllung, umgebendes Erdreich) sein. Aus diesem Grund wurden Anlagen mit Erdwärmesonden genauer untersucht. Ziel der Arbeiten war es, Korrelationen zwischen den Sondeneigenschaften, Soletemperaturen und Jahresarbeitszahlen zu finden.

#### FAWA-Erdwärmesondenanlagen

In einem ersten Schritt werden die in FAWA gemessenen Betriebsdaten (JAZ, Soletemperatur) in Beziehung zu den erhobenen Erdwärmesondendaten (z.B. Erdwärmesondenlänge,) gesetzt und auf Korrelationen untersucht. Dazu wurden alle verfügbaren Bohrprotokolle und Bohrprofile der

FAWA-Anlagen beschafft. Diese Unterlagen enthalten Informationen zu Bohrunternehmen, Bohrmethode, Geologie, Sondentyp und -hinterfüllung.

Tab. 1: Verwendete Wärmeleitfähigkeiten von Untergrundmaterialien.  
Quelle: <sup>a</sup>BFE 1998 [4], <sup>b</sup>Hellström & Sanner [5].

Untergrund	WLF [W/mK]
Trockenes Lockergestein <sup>a</sup>	1.00
Festgestein oder wassergesättigtes Lockergestein <sup>a</sup>	2.25
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit <sup>a</sup>	4.00
Kies, Sand trocken <sup>b</sup>	0.40
Kies, Sand wasserführend <sup>b</sup>	1.80
Ton, Lehm feucht <sup>b</sup>	1.60
Kalkstein massiv <sup>b</sup>	2.80
Sandstein <sup>b</sup>	2.30
Granit <sup>b</sup>	3.40
Basalt <sup>b</sup>	1.70
Gneis <sup>b</sup>	2.70
Mergel <sup>b</sup>	2.30
Nagelfluh <sup>b</sup>	2.80

Aus den Bohrprofilen wurde für jede Anlage die mittlere Wärmeleitfähigkeit des ungestörten Erdreichs im Sondenbereich berechnet. Dazu wurden die im Protokoll ausgewiesenen Untergrundtypen nach ihrer Mächtigkeit und Wärmeleitfähigkeit (Tab. 1) gewichtet.

### **Simulation der Soletemperaturen**

Im zweiten Schritt wurden bei allen genügend dokumentierten Anlagen die Soletemperatur-Messdaten mit den Resultaten einer Simulation mit dem Programm EWS [6] verglichen. Die Ermittlung des  $T_{\text{sole}}$ -Messwertes ist in Kap. 3.2.2 beschrieben. Für die Simulation wurden die bekannten Anlagenkenngrößen (i.b. Sondenbeschaffenheit, Kälteleistung der WP, Geologie, Hinterfüllung) und die Betriebskenngrößen (i.b. jährliche Sondenentzugsenergie, mittlere Jahresausseitentemperatur) verwendet. Die Entzugsprofile (Stundenmittel) sind von den untersuchten Anlagen nicht bekannt, es wurde deshalb ein Standard-Jahresgang mit DOE-2 berechnet. DOE-2 ist ein Gebäudesimulationsprogramm, dessen Entwicklung massgeblich von der US Energiebehörde unterstützt wurde.

Fünf ausgewählte Anlagen, welche den gesamten in FAWA gemessenen Bereich an Soletemperaturen ( $T_{\text{sole}}$ ) repräsentieren, wurden im Sinne von Fallstudien genauer untersucht. Dazu wurden allfällige Abweichungen zwischen den erwähnten Simulationsresultaten und den Messwerten durch Variation der Eigenschaften von Hinterfüllung und umgebendem Erdreich zu kompensieren versucht.

### **3.2.4 Nutzerbefragung**

Eine erste Befragung wurde durch das Marketingbüro MKR Consulting AG, Bern in Zusammenarbeit mit Polyquest AG, Bern durchgeführt. Bei dieser Befragung ging es um die Feststellung des Stellenwertes der Wärmepumpe im gesamten Heizungsmarkt. Das Zielpublikum setzte sich zusammen aus Wärmepumpenbetreibern in Neu- und Umbauten. Für die Erarbeitung der benötigten qualitativen Informationen fanden im Jahr 1996 zwei Gruppendiskussionen mit je 18 Teilnehmern während je zwei Stunden statt.

Aufgrund der Auswertungen der vorerwähnten Gruppendiskussionen wurde ein Fragebogen für eine repräsentative Telefonbefragung ausgearbeitet. Der Stichprobenumfang für diese repräsentative Befragung beträgt 218 Interviews. 113 Befragungen wurden mit Personen durchgeführt, die eine Wärmepumpe gleichzeitig mit dem Neubau eines Hauses installiert hatten. 105 Befragungen wurden mit Personen durchgeführt, die ihr altes Heizsystem im Rahmen einer Sanierung ersetzten. Diese Befragung erfolgte im Jahre 1997.

Einige Jahre später wurde im Zusammenhang mit der Kontrolle der Messeinrichtungen (insbesondere der Wärmezähler) den Besitzern der Anlagen gleichzeitig einige Fragen im Bezug auf die eigene Wärmepumpenanlage, deren Bedienung, Funktion und Leistung sowie über die Zufriedenheit gestellt. Zu 9 Fragen waren 2 – 3 gezielte vorgegebene Kurzantworten möglich. Bei der 10. Frage ging es um allfällige Störungen und deren Behebung. Die ausgewählten Anlagenbesitzer waren aufgrund einer Kontrollaktion der eingesetzten Wärmezähler ausgewählt worden, wobei nur die älteren Anlagen (Anlagenbaujahr < 1998) berücksichtigt worden sind.

### 3.3 Definitionen und Modelle

#### 3.3.1 Heizperiode

Die in FAWA verwendete Heizperiode beginnt am 1. Oktober und endet am 30. April. Dieser Zeitraum wurde gewählt, da einerseits der überwiegende Teil des Raumwärmebezugs abgedeckt wird und andererseits nur in seltenen Fällen Perioden ohne Raumwärmebezug hinein fallen. Damit kann weitgehend ausgeschlossen werden, dass darin Perioden (Datenpunkte) auftreten, welche von Hilfsenergieverbräuchen (Abgabepumpe) und Speicherverlusten dominiert werden (vgl. Abb. 7). Dieses würde die Berechnung der klimanormierte JAZ (vgl. Kap. 3.3.5) beeinträchtigen.

#### 3.3.2 Aussentemperatur

Die mittlere Aussentemperatur zwischen zwei Ablesungen der Bauherrschaft wird auf Basis der Daten der nächstgelegenen Meteostation berechnet. Dabei wird eine Korrektur bezüglich der Höhenunterschiede zwischen Objekt und Meteostation vorgenommen. Es wird mit einer Höhenstufe von -0.5 K pro 100 m gerechnet.

#### 3.3.3 Arbeits- und Jahresarbeitszahl

Die Arbeitszahl (AZ) ist das Verhältnis aus produzierter Wärme- und aufgenommener Strommenge über ein bestimmtes Zeitintervall. Wird dieses Verhältnis über ein ganzes Jahr gebildet, nennt sich die resultierende Grösse Jahresarbeitszahl (JAZ). In FAWA wurden drei Systemgrenzen definiert, entsprechend resultieren drei AZ resp. JAZ (vgl. Abb. 6):

**JAZ 1** Verhältnis zwischen der Wärmemenge ab WP, ohne Speicherverluste (sofern vorhanden) 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 (Volumenstrom gemäss Messung Wärmezähler). Konkret wird bei Anlagen mit parallel geschaltetem Speicher der Stromverbrauch der Ladepumpe voll eingerechnet. Bei den restlichen Anlagen wird der Pumpenstromverbrauch des Verflüssigers über dessen

Druckverlustkennlinie, den realen Volumenstrom und einen angenommenen Pumpenwirkungsgrad (15%) abgeschätzt.

**JAZ 2** Verhältnis zwischen der Wärmemenge ab WP resp. ab Speicher, sofern vorhanden und dem WP spezifischen Elektrizitätsbedarf, inklusive der Hilfsaggregate wie Umwälzpumpen (senkenseitig nur Druckabfall über Verflüssiger) und Carterheizung. Bei speicherlosen Anlagen entspricht also die JAZ 1 der JAZ 2.

**JAZ 3** Verhältnis zwischen der Wärmemenge ab WP resp. ab Speicher, sofern vorhanden, inklusive elektrischer Zusatzheizungen (für Raumheizung und WW, Letzteres nur, wenn WW in WP-Anlage eingebunden) und dem WP spezifischen Elektrizitätsbedarf, inklusive aller Hilfsaggregate wie Umwälzpumpen (total) und Carterheizung.

Die heutigen Auswertungen basieren auf der JAZ 2. Einzig bei den Erwartungswerten (Kap. 3.4.4) liegt die Systemgrenze der JAZ 1 zugrunde.

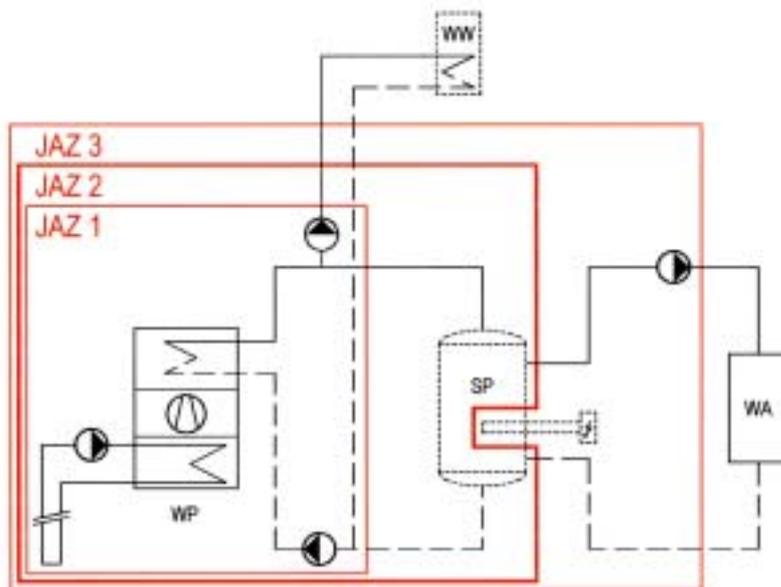


Abbildung 6: In FAWA verwendete Systemgrenzen zur Berechnung der JAZ 1, 2 und 3. In den allermeisten Fällen wird die JAZ 2 verwendet, welche allfällige Speicherverluste berücksichtigt. Bei Anlagen ohne Speicher wird der abgabeseitige Umwälzpumpenstromverbrauch gemäss Druckverlust über dem Verflüssiger in JAZ 1 und JAZ 2 berücksichtigt.

### 3.3.4 Fehlerrechnung für Arbeits- und Jahresarbeitszahlen

Die wichtigste Messgrösse in FAWA ist die Arbeitszahl der Anlagen. Sie wird mittels Wärme- und Elektromessung ermittelt (Gl. 2). Die dazu verwendeten Messgeräte sind mit einer bestimmten Messunsicherheit behaftet. Bei der Wärmemessung setzt sich diese aus der Unsicherheit bei der Temperaturdifferenz- und der Durchflussmessung zusammen. Mediumsdichte und Wärmekapazität werden nicht in die Fehlerrechnung einbezogen.

$$AZ = f(\dot{m}, dT, Pel) \quad (2)$$

$$\Delta AZ = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial f}{\partial \dot{m}}\right| * \Delta \dot{m}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial f}{\partial dT}\right| * \Delta dT\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial f}{\partial Pel}\right| * \Delta Pel\right)^2} \quad (3)$$

- $\dot{m}$ : Massenstrom über Wärmezähler  
 $dT$ : Temperaturdifferenz zw. Vor- und Rücklauf  
 $Pel$ : Elektrische Leistung über Elektrozähler

In den folgenden Tabellen sind Fehlerrechnungen (Gl. 3) bezüglich der Arbeitszahl für drei verschiedene Fälle dargestellt:

- Messunsicherheit von Wärme- und Elektrozähler gemäss Herstellerangaben (Tab. 2),
- Wärmezählermessunsicherheit gemäss Kalibriermessungen an neuen Zählern und Herstellerangaben bei Elektrozählern (Tab. 4),
- Wärmezählermessunsicherheit gemäss Kalibriermessungen an gebrauchten Zählern und Herstellerangaben bei Elektrozählern (Tab. 5).

Bei den Berechnungen wurde mit Verhältnissen bezüglich Temperaturspreizung, Volumenstrom und elektrischer Leistung gerechnet, wie sie typischerweise in FAWA angetroffen werden. Zur Ableitung des maximalen Fehlers aus den Kalibriermessungen wurde angenommen, dass dieser 95% der Messwerte umfassen soll. Daraus ergibt sich, dass der maximale Fehler der zweifachen Standardabweichung (SD) der Verteilung der Messwertefehler entspricht.

Im letzten Abschnitt der Tabellen sind jeweils noch die Vertrauensintervalle (CI) dargestellt, die sich aus der Messunsicherheit für Messungen an Anlagengruppen verschiedenen Umfangs ergeben. Diese Daten machen deutlich, dass die Messunsicherheit nur einen sehr bescheidenen Anteil an der im Feld festgestellten Streuung (Kap. 5) hat.

Tabelle 2: Fehlerrechnung auf Basis von Herstellerangaben. Die so ermittelte Messunsicherheit bezüglich der JAZ liegt bei nur 2.2%.

<b>Herstellerangaben</b>							
<b>Wärmemessung</b>	<b>Messpunkt</b>	<b>Fehler (Komponenten)</b>		<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>	
Neovac, 2WR5	Tvl [°C] Trl [°C]	absolut [K]	relativ [%]	absolut [K]	relativ [%]	absolut [-]	
Temperaturdifferenz	45 35	0.03	0.5	0.08	0.80	0.02	
	<b>Messpunkt</b>	<b>Fehler</b>		<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>	
	Vol.strom [m3/h]	relativ [%]		absolut [m3/h]	relativ [%]	absolut [-]	
Durchfluss	1.3	2.0		0.03	2.00	0.06	
<b>Elektromessung</b>	<b>Messpunkt</b>	<b>Fehler</b>		<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>	
Ulrich Matter, Electrex	Pel [kW]	relativ [%]		absolut [kW]	relativ [%]	absolut [-]	
Elektroenergie	5.0	0.50		0.03	0.50	-0.02	
<b>Arbeitszahl (AZ)</b>	<b>Messpunkt [-]</b>			<b>Fehlerrechnung (±AZ)</b>			
	3.0			absolut [-]	relativ [%]		
<b>Total</b>				<b>0.07</b>	<b>2.2</b>		
<b>Vertrauensintervall (CI)</b>	<b>Anlagen [Stk.]</b>			<b>CI [%]</b>			
Annahme:	5			0.97			
Max.Fehler = 2*SD	10			0.69			
	50			0.31			

Wie die Resultate zeigen, liegt die Unsicherheit bezüglich der Arbeitszahl bei ± 2.2% (Herstellerangaben). Wird beim Elektrozähler anstatt ± 0.5% (moderner Induktionszähler) mit ± 2.0% (Ferraris-Induktionszähler) gerechnet, dann erhöht sich die Gesamtmessunsicherheit von ± 2.2 auf ± 2.9%.

Tabelle 3: Fehlerrechnung auf Basis von Herstellerangaben, jedoch wurde der Fehler der Temperaturfühler auf 0.3 K gesetzt („worst case“), was einer Messunsicherheit der Temperaturdifferenz von gut 0.4 K entspricht. Die so ermittelte Messunsicherheit bezüglich JAZ steigt nun auf 5.2%.

<b>Herstellerangaben mit realistischerem absolutem Temperaturmessfehler eines Fühlers von 0.3 K</b>							
<b>Wärmemessung</b>	<b>Messpunkt</b>		<b>Fehler (Komponenten)</b>		<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>
Neovac, 2WR5	Tvl [°C]	Trl [°C]	absolut [K]	relativ [%]	absolut [K]	relativ [%]	absolut [-]
Temperaturdifferenz	45	35	0.4	0.5	0.5	4.74	0.14
	<b>Messpunkt</b>		<b>Fehler</b>		<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>
Durchfluss	Vol.strom [m3/h]		relativ [%]		absolut [m3/h]	relativ [%]	absolut [-]
	1.3		2.0		0.03	2.00	0.06
<b>Elektromessung</b>	<b>Messpunkt</b>		<b>Fehler</b>		<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>
Ulrich Matter, Electrex	Pel [kW]		relativ [%]		absolut [kW]	relativ [%]	absolut [-]
Elektroenergie	5.0		0.50		0.03	0.50	-0.02
<b>Arbeitszahl (AZ)</b>	<b>Messpunkt [-]</b>		<b>Fehlerrechnung (±AZ)</b>				
	3.0		absolut [-]		relativ [%]		
<b>Total</b>			<b>0.16</b>		<b>5.2</b>		
<b>Vertrauensintervall (CI)</b>	<b>Anlagen [Stk.]</b>		<b>CI [%]</b>				
Annahme:	5		2.27				
Max.Fehler = 2*SD	10		1.60				
	50		0.72				

Wird bei den Wärmehählern mit den Kalibriermessungen gearbeitet, so ergibt sich eine Unsicherheit von ± 1.0% bis ± 2.9% (neue resp. gebrauchte Zähler). Diese Werte liegen deutlich niedriger, als die Annahme eines Temperaturmessfehlers von 0.3 K (Tab. 3), welche eine Messunsicherheit von ± 5.2% ergibt. Dieser Fall berücksichtigt den nicht optimalen Einbau der Temperaturfühler, d.h. diese befinden sich an einer Messstelle im Rohr, an welcher sie nicht die mittlere Mediumtemperatur erfassen. Diese Situation kann als „worst case“ bezeichnet werden.

Tabelle 4: Fehlerrechnung auf Basis von Messunsicherheiten gemäss Kalibriermessungen bei neuen Wärmehählern und Herstellerangaben bei Elektrozählern.

<b>Kalibrierungsmessdaten (IWB): Neue Zähler</b>							
<b>Wärmemessung</b>	<b>Messpunkt</b>		<b>SD</b>	<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>	
Max.Fehler = 2*SD	Tvl [°C]	Trl [°C]	relativ [%]	absolut [K]	relativ [%]	absolut [-]	
Temperaturdifferenz	50	35	0.19	0.057	0.38	0.01	
	<b>Messpunkt</b>		<b>SD</b>	<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>	
Durchfluss	Vol.strom [m3/h]		relativ [%]	absolut [m3/h]	relativ [%]	absolut [-]	
	1.6		0.4	0.01	0.80	0.02	
<b>Elektromessung</b>	<b>Messpunkt</b>		<b>Fehler</b>		<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>
Ulrich Matter, Electrex	Pel [kW]		relativ [%]		absolut [kW]	relativ [%]	absolut [-]
Elektroenergie	9.2		0.50		0.05	0.50	-0.02
<b>Arbeitszahl (AZ)</b>	<b>Messpunkt [-]</b>		<b>Fehlerrechnung (±AZ)</b>				
	3.0		absolut [-]		relativ [%]		
<b>Total</b>			<b>0.03</b>		<b>1.0</b>		
<b>Vertrauensintervall (CI)</b>	<b>Anlagen [Stk.]</b>		<b>CI [%]</b>				
Annahme:	5		0.45				
Max.Fehler = 2*SD	10		0.32				
	50		0.14				

Tabelle 5: Fehlerrechnung auf Basis von Messunsicherheiten gemäss Kalibriermessungen bei neuen Wärmezählern und Herstellerangaben bei Elektrozählern.

<b>Kalibrierungsmessdaten (IWB): Alte Zähler</b>						
<b>Annahme:</b>	<b>Messpunkt</b>		<b>SD</b>	<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>
<i>Max.Fehler = 2*SD</i>	Tvl [°C]	Trl [°C]	relativ [%]	absolut [K]	relativ [%]	absolut [-]
Temperaturdifferenz	50	35	0.9	0.27	1.80	0.05
	<b>Messpunkt</b>		<b>SD</b>	<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>
Durchfluss	Vol.strom [m3/h]		relativ [%]	absolut [m3/h]	relativ [%]	absolut [-]
	1.6		1.12	0.04	2.24	0.07
<b>Elektromessung</b>	<b>Messpunkt</b>	<b>Fehler</b>		<b>Totaler Fehler</b>		<b>±AZ</b>
<i>Ulrich Matter, Electrex</i>	PeI [kW]		relativ [%]	absolut [kW]	relativ [%]	absolut [-]
Elektroenergie	9.2		0.50	0.05	0.50	-0.02
<b>Arbeitszahl (AZ)</b>	<b>Messpunkt [-]</b>		<b>Fehlerrechnung (±AZ)</b>			
	3.0		absolut [-]		relativ [%]	
<b>Total</b>			<b>0.09</b>		<b>2.9</b>	
<b>Vertrauensintervall (CI)</b>	<b>Anlagen [Stk.]</b>		<b>CI [%]</b>			
<i>Annahme:</i>	5		1.28			
<i>Max.Fehler = 2*SD</i>	10		0.90			
	50		0.40			

### 3.3.5 Klimanormierte JAZ (nJAZ)

Normierungen dienen dazu, bekannte Einflüsse von bestimmten Parametern aus Messdaten zu eliminieren. Damit erreicht man, dass Effekte von nicht normierten Grössen stärker in Erscheinung treten und somit besser erkannt werden können.

Bei der Klimanormierung der JAZ geht es um die Eliminierung des Einflusses von unterschiedlichen Klimabedingungen (Aussentemperaturen) an verschiedenen Standorten und über verschiedene Heizperioden aus der JAZ. Eine Umrechnung auf Normklimabedingungen ist relativ kompliziert, weshalb das nachfolgend beschriebene Verfahren gewählt wurde.

Wie erwähnt, werden von den Anlagenbesitzern die installierten Zähler periodisch abgelesen. Aus den Energiedifferenzen dieser Zählerablesewerte können nun Arbeitszahlen für die Perioden zwischen zwei Ablesungen berechnet werden. Diese Arbeitszahlen werden dann gegenüber den mittleren Aussentemperaturen in den entsprechenden Perioden aufgetragen, mit welchen sie praktisch linear korrelieren.

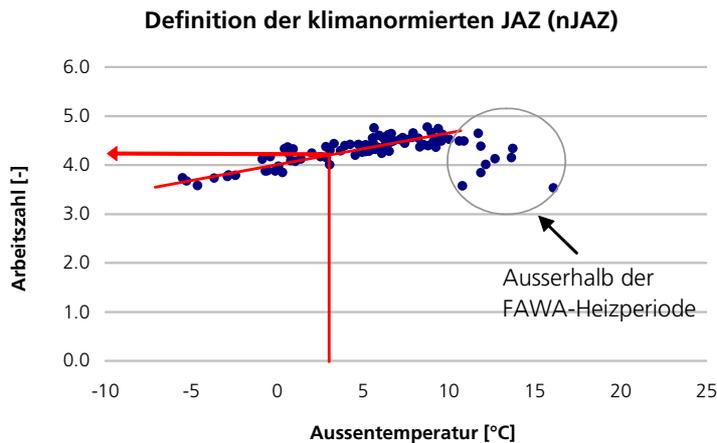


Abbildung 7: Die Arbeitszahlen (AZ), ermittelt aus Zählerablesungen in der Heizperiode (Intervall: 1 bis 2 Wochen), korrelieren sehr gut mit der Aussentemperatur. Die nJAZ entspricht dem Regressionswert bei einer Aussentemperatur ( $T_a$ ) von 3°C.

Um nun den Klimaeffekt zu eliminieren, wird eine Regressionsgerade in Werte einer Heizperiode gelegt. Die nJAZ 2 ist nun die AZ 2 bei einer Aussentemperatur von 3°C. Diese Temperatur entspricht dem Mittelwert der wärmebedarfsgewichteten Aussentemperatur (Gl. 4) über allen Anlagen.

$$\bar{\vartheta}_{a,Q_{gew}} = \frac{\sum_{n=1}^x \vartheta_{a,n} * Q_n}{\sum_{n=1}^x Q_n} \quad (4)$$

$\bar{\vartheta}_{a,Q_{gew}}$  : Mit dem Wärmebezug gewichtete Aussentemperatur einer Anlage;  
 $\vartheta_{a,n}$  : Aussentemperatur im  $n$ -ten Intervall;  
 $Q_n$  : Wärmebezug im  $n$ -ten Intervall.

Wie erwähnt werden hier jeweils nur Ablesedaten aus der betreffenden FAWA-Heizperiode verwendet (Oktober bis April). Der Mittelwert der normierten nJAZ 2 aller Anlagen unterscheidet sich gegenüber der nicht normierten JAZ 2 um -3% (CI  $\pm 1\%$ ).

### 3.3.6 JAZ Anlagenpark Schweiz

FAWA schätzt den Mittelwert der mittleren JAZ aller Schweizerischen Anlagen eines bestimmten Jahrgangs wie folgt:

$$JAZ_{CH,j} = (JAZ_{LW,j} * M_{LW,j}) + (JAZ_{SW,j} * M_{SW,j}) \quad (5)$$

$JAZ_{CH,j}$  : Geschätzter JAZ-Mittelwert der im Jahr  $j$  in der Schweiz installierten Anlagen.  
 $JAZ_{LW,j}$  : Geschätzte JAZ-Mittelwerte der im Jahr  $j$  in der Schweiz installierten LW- resp. SW-Anlagen. Diese entsprechen dem aus FAWA resultierenden Mittelwert der jeweiligen Kategorie.

$M_{LWj}$ : Schweizerischer Marktanteil der LW- resp. SW-Anlagen im Jahr  $j$ . Hier wird mit  $M_{LWj} + M_{SWj} = 1.0$  gearbeitet.

Die Verkaufsstatistik gibt keine Auskunft über die Verteilung der Heizleistung innerhalb der hier untersuchten Klasse mit einer thermischen Leistung von  $< 20 \text{ kW}$ . Aus diesem Grund kann diese Grösse nicht bei der Gewichtung einbezogen werden.

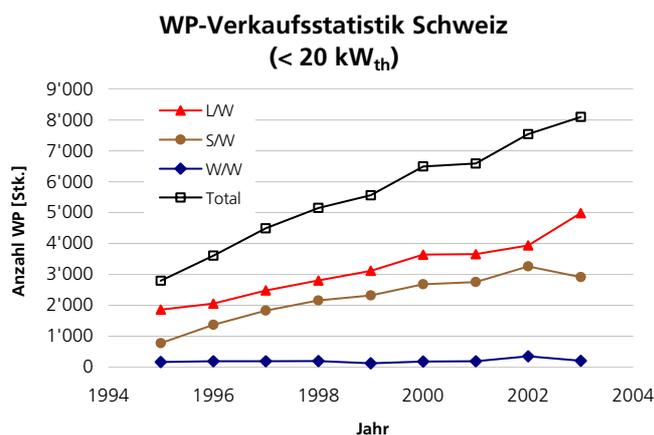


Abbildung 8: Verkaufszahlen von Wärmepumpen mit einer thermischen Leistung von  $< 20 \text{ kW}$  in der Schweiz (Quelle: Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz).

Mit der gleichen Methode werden die COP-Prüfresultate des WPZ behandelt (vgl. [Kap. 5.2.2](#)).

### 3.3.7 Auslastung bei Auslegebedingungen

Als Auslastung wird in FAWA das Verhältnis aus realer zu maximal möglicher Laufzeit (24 h pro Tag) bezeichnet. Der in FAWA verwendete Wert für die Auslastung bei Auslegebedingungen einer WP-Anlage wird ermittelt, indem eine Regressionsgerade durch die Auslastungswerte der einzelnen Ableseintervalle gelegt wird.

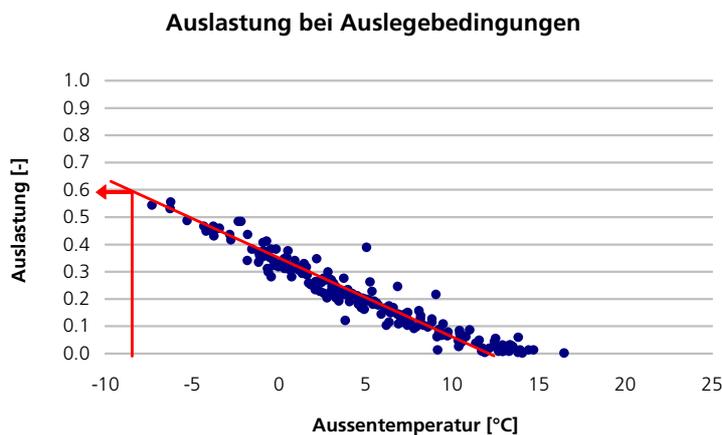


Abbildung 9: Die Auslastung korreliert verständlicherweise sehr gut mit der Aussentemperatur. So kann die Auslastung als Regressionswert der Auslastung bei einer Aussentemperatur von  $-8^{\circ}\text{C}$  ermittelt werden.

Durch Ermitteln des Regressionswertes bei der Auslegeaussentemperatur (meist  $-8^{\circ}\text{C}$ ) erhält man die gesuchte Auslegeauslastung. Diese bezieht sich wie erwähnt auf eine Laufzeit von 24 h pro Tag, d.h. mögliche Sperrzeiten werden nicht berücksichtigt.

### 3.3.8 Speicherverlustmodell

Um die Energiemengen, resp. Arbeitszahlen für die verschiedenen Systemgrenzen zu berechnen, wird ein Modell für die Abschätzung der Speicherverlustleistung verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass der Speicher ein Zylinder ist mit:

$$\text{Höhe } (h) = 3 * \text{Durchmesser } (d) \quad (6)$$

daraus folgt:

$$A = 2 * \pi * \left( \sqrt[3]{\frac{4 * V}{3 * \pi}} \right)^2 \quad (7)$$

$$P_s = \Delta T * \frac{\lambda}{d} * A + (\Delta T * n * p_A) \quad (8)$$

- A*: Oberfläche des Speichers
- V*: Speichervolumen
- P<sub>s</sub>*: Speicherverlustleistung
- ΔT*: Temperaturdifferenz zw. Speicher und Umgebung
- λ*: Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials
- d*: Dämmstärke

$n$ : Anzahl Anschlüsse am Speicher

$p_A$ : Verlustleistung pro Anschluss und Kelvin Temperaturdifferenz Wasser/Umgebung

Tabelle 6: Annahmen für die Berechnung von Verlusten technischer Speicher.

Mittlere Umgebungstemperatur (Keller)	17°C
Lambda der Dämmung ( $\lambda$ )	35 mW/(mK)
Verlustleistung pro Anschluss* ( $p_A$ )	0.125 W/K

\*Dieser Wert wurde in Anlehnung an [9] von FAWA definiert. Unter Annahme, dass im Bewusstsein der Problematik seit 1982 Anschlüsse besser angeordnet und isoliert werden.

Die Speichertemperatur wird aus der Heizkurve ermittelt (Messung oder Reglereinstellung). Ist keine der beiden Quellen verfügbar, dann werden die in Tab. 7 dargestellten Werte verwendet. Zur Abschätzung des maximal möglichen Fehlers, der durch die Annahme einer unbekanntes Speichertemperatur eintreten kann, wurde bei einer durchschnittlichen Anlage (Leistungsbedarf des Objekts 15 kW, Speicherinhalt 600 l, 10 cm PU-Dämmung) der Verlust bei einer mittleren Speichertemperatur von 30°C resp. 55°C berechnet. Es hat sich gezeigt, dass der Speicherverlust bei 30°C auf 0.5% bezüglich der von der Wärmepumpe abgegebenen Wärmemenge zu stehen kommt, und bei 55% auf 1.5%. Die aus den beiden Fällen resultierende JAZ 2 unterscheidet sich also um 1%, was eine sicherlich akzeptable Unsicherheit darstellt.

Tabelle 7: Speichertemperaturen (Annahmen) für die Verlustberechnung. Werden nur verwendet, wenn keine Mess- oder Planungsdaten vorliegen.

Speicher-temperatur	Seriespeicher im Vorlauf	Seriespeicher im Rücklauf	Parallelspeicher
Neubau	40°C	32°C	36°C
Sanierung	45°C	35°C	40°C

### 3.3.9 Abtaukorrektur

Bei Luft/Wasser-Systemen, die über Prozessumkehr abtauen, wird dem System beim Abtauen Wärme entzogen, d.h. der Verflüssiger wird zum Verdampfer und umgekehrt. In den meisten dieser Fälle muss eine rechnerische Korrektur der vom Wärmehähler gemessenen Energiemenge vorgenommen werden, da die in FAWA verwendeten Wärmehähler negative Temperaturdifferenzen nicht erfassen. Das dafür verwendete Modell geht davon aus, dass im Aussentemperaturbereich zwischen -10°C bis +10°C abgetaut wird mit dem Maximum bei -1°C (vgl. Abb. 10). Bei diesem Maximum wird angenommen, dass der Anteil des Energieumsatzes der Wärmepumpe (Summe aus den Beträgen für Heiz- und Abtauenergie) für das Abtauen bei 7% liegt und linear zu den Endpunkten (-10, resp. +10°C) abfällt.

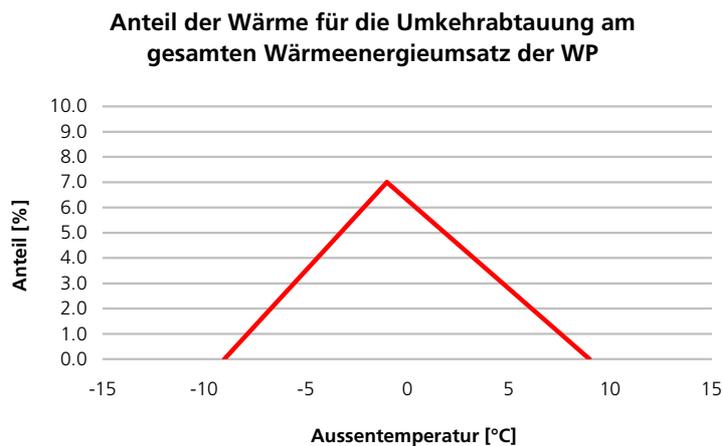


Abbildung 10: In FAWA verwendeter Anteil der Abtauenergie (Prozessumkehr) am gesamten Energieumsatz der WP zur Korrektur der „falschen“ Wärmehändlerdaten.

### 3.3.10 Verfügbarkeit

Eine bestimmende Grösse für die Zufriedenheit von Wärmepumpenbesitzern ist die Zuverlässigkeit von WP-Anlagen. Aus diesem Grund wird in FAWA auch die Verfügbarkeit der Anlagen erfasst. Die Anlagenbesitzer führen dazu Störungsprotokolle, auf welchen folgende Informationen erfasst werden:

- Datum und Zeit des Störungseintritts, resp. dessen Feststellung
- Störungstyp (vgl. unten)
- Dauer der Störung bis zur Behebung
- Behebung der Störung durch Betreiber/-in oder WP-Service

Das Erfassungsprotokoll unterscheidet zwischen folgenden Störungstypen:

Tabelle 8: Störungstypen gemäss Erfassungsprotokoll.

Störungstypen
Hochdruck
Niederdruck
Wassermangel Verdampfer
Regelung
Vereisung Verdampfer
Verdichter
Kältemittelverlust
Verschmutzter Verdampfer
Verschmutzter Verflüssiger
Umwälzpumpe
Wassermangel Verflüssiger
unbekannt

Aus der Störungsdauer wird die Verfügbarkeit berechnet. Diese stellt das Verhältnis aus realer Laufzeit der Wärmepumpe und der in dieser Zeit eigentlich notwendigen Laufzeit dar.

$$V_{WP} = \frac{t_{WP}}{t_{WP} + t_S} \quad (9)$$

$V_{WP}$ : Verfügbarkeit der Wärmepumpenanlage

$t_{WP}$ : Laufzeit der Wärmepumpe (Aggregat)

$t_S$ : Zeit, in der eine Störung vorlag

Wie [Gl. 9](#) zeigt, wird zur Berechnung der theoretisch notwendigen Laufzeit, die gesamte Störungszeit zur realen Laufzeit addiert. Da in dieser Zeit aber wohl häufig kein dauernder Wärmebedarf besteht, wird die Verfügbarkeit unterschätzt. D.h. die so berechnete Verfügbarkeit ist tiefer als der tatsächliche Wert.

## 3.4 Normierung mit Modellwerten

### 3.4.1 Einführung

Die energetische Effizienz von Wärmepumpenanlagen wird insbesondere durch die Eigenschaften der Wärmepumpe an sich (Gütegrad) und die quellen- und senkenseitigen Temperaturen bestimmt. Bei den von FAWA gemessenen Anlagen variieren alle drei Faktoren über einen recht weiten Bereich. Aus diesem Grund ist entsprechend die Streuung der Jahresarbeitszahlen ebenfalls gross. Werden diese bekannten Einflüsse aus den gemessenen Arbeits- resp. Jahresarbeitszahlen eliminiert, so können die resultierenden Daten auf vermutete Zusammenhänge mit anderen Einflussgrössen (z.B. Taktverhalten) untersucht werden. Diese Untersuchungen wären zwar grundsätzlich auch mit den Originaldaten möglich, würden aber eben durch die Variabilität der eingangs genannten Faktoren erschwert.

Das Vorgehen, um die Einflüsse dieser Faktoren zu eliminieren, basiert auf einem Vergleich der gemessenen Arbeits- oder Jahresarbeitszahl einer Anlage mit dem entsprechenden Erwartungswert (EW). Dieser EW basiert auf einer modellbasierten Berechnung der AZ- resp. JAZ, bei welcher die zu eliminierenden Faktoren (WP-Aggregat und Temperaturen) abgebildet werden. Als Grundlage für diese Modellrechnungen dienen Prüfstandsmessungen des jeweiligen WP-Aggregats (vgl. [Kap. 3.4.2](#)).

Eingabegrössen in diese Modellrechnungen sind also die Systemtemperaturen, Ausgabegrössen entsprechend Wärmeleistung und elektrische Aufnahmeleistung, respektive deren Verhältnis (COP). Diese Ausgabegrössen (EW) können mit den entsprechenden Messwerten (MW) verglichen werden. Es kann nun angenommen werden, dass die so ermittelten Abweichungen zwischen Mess- und Erwartungswerten durch die nicht im Modell berücksichtigten Parameter verursacht werden. Nicht berücksichtigt bedeutet, dass diese Parameter keine Modellvariablen sind oder bei allen Anlagen mit dem gleichen Wert eingesetzt wurden.

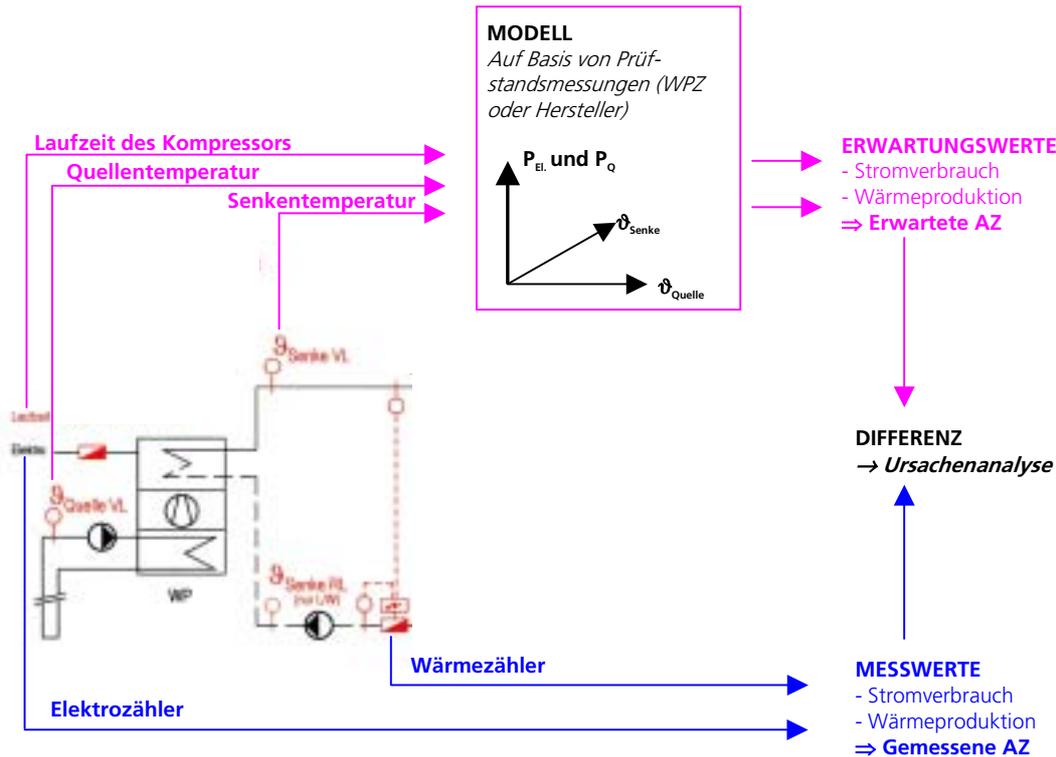


Abbildung 11: Auf Basis von gemessenen Quellen- und Senktemperatur sowie der WP-Laufzeit werden über das Modell die Erwartungswerte von Stromverbrauch und Wärmeleistung berechnet. Diese können dann mit den mittels Wärme- und Elektrozeigern gemessenen Werten verglichen werden.

Die Erwartungswert/Messwert-Vergleiche (Normierungen) geschehen einerseits auf dem JAZ- und andererseits auf dem AZ-Niveau.

- JAZ: Bei der JAZ-Normierung wird die gemessene JAZ einer Anlage mit dem entsprechenden Modellwert verglichen, welcher mit Jahresmitteltemperaturen berechnet wurde. Dabei geht es um die Analyse von Effekten der Anlagenkomponenten (z.B. Regler) auf die Systemtemperaturen und somit auf die JAZ (Kap. 3.4.3).
- AZ: Hier geht es um die Frage, ob und wie sich die energetische Effizienz von Wärmepumpen im Feld von Prüfstandsmessungen unterscheiden. Die gemessene AZ wird hier mit einem Modellwert verglichen, welcher mit in der betrachteten Periode (zwei bis drei Monate) exakt erfassten Systemtemperaturen ermittelt wurde (Kap. 3.4.4).

### 3.4.2 WP-Modell

Die Abhängigkeit der Wärmeleistung und der aufgenommenen elektrischen Leistung von Wärmepumpen kann durch die Interpolationsgleichungen 10 und 11 hinreichend genau errechnet werden. Die je 4 Koeffizienten dieser Gleichungen werden durch lineare Regression aus Prüfstandsmessungen (WPZ-Daten, wenn nicht vorhanden Hersteller-Daten) bestimmt. Dabei werden die Regressionskoeffizienten zunächst für Wertepaare gemäß der Tabelle 9 mit konstanten Quelltemperaturen ermittelt. Für SW-Anlagen sind dies beispielsweise die Wertepaare für  $-5/35$  und  $-5/50$ ,  $0/35$  und  $0/50$  sowie  $5/35$  und  $5/50$ . Dann wird eine zweite Regression für Wertepaare mit konstanten Senktemperaturen durchgeführt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die verwendeten Stützwerte (Temperatur von Quelle/Senke) aufgetragen.

Tabelle 9: Stützwerte für die Modellbildung von Heizleistung und elektrischer Aufnahmeleistung bei verschiedenen Temperaturverhältnissen (Quelle/Senke).

Typ	1	2	3	4	5	6
L/W	-7/35	-7/50	2/35	2/50	7/35	7/50
S/W	-5/35	-5/50	0/35	0/50	5/35	5/50
W/W	10/35	10/50	15/35	15/50	-	-

Das so erhaltene Modell hat für Wärmeleistung und elektrische Aufnahmeleistung folgende Form:

$$\dot{Q}_{\text{Modell}} = (a_w + b_w * \vartheta_q) + (c_w + d_w * \vartheta_q) * \vartheta_s \quad (10)$$

$$\dot{E}_{\text{Modell}} = (a_e + b_e * \vartheta_q) + (c_e + d_e * \vartheta_q) * \vartheta_s \quad (11)$$

- $\dot{Q}_{\text{Modell}}$  : Modellwert der Wärmeleistung
- $\dot{E}_{\text{Modell}}$  : Modellwert der elektrischen Aufnahmeleistung
- $a_w-d_w$  : Aggregatsspezifische Wärmeleistungs-Konstanten
- $a_e-d_e$  : Aggregatsspezifische Elektroleistungs-Konstanten
- $\vartheta_q$  : Quelltemperatur (Mittelwert im betrachteten Intervall)
- $\vartheta_s$  : Senktemperatur (dito)

Es entsteht so also ein Modell, welches auf der Metaebene linear ist ( $y = a + bx$ ). Achsenabschnitt (a) und Steigung (b) sind jeweils wieder lineare Funktionen mit der Quelltemperatur als Variablen.

Entsprechend ergibt sich für die Modellwerte der Arbeits- resp. Jahresarbeitszahl:

$$AZ_{\text{Modell}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Modell}}}{\dot{E}_{\text{Modell}}} * LZ_{AZ} \quad (12')$$

$$JAZ_{\text{Modell}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Modell}}}{\dot{E}_{\text{Modell}}} * LZ_{JAZ} \quad (12'')$$

$AZ_{\text{Modell}}$  und  $JAZ_{\text{Modell}}$  unterscheiden sich nur durch unterschiedliche Laufzeiten (LZ). Bei der JAZ entspricht die Laufzeit der Jahreslaufzeit, bei der  $AZ_{\text{Modell}}$  hingegen einer frei wählbaren Periode.

Die Modelle reproduzieren die Stützwerte, also die von WPZ oder Herstellern gelieferten Daten, mit mehr als ausreichender Genauigkeit. Die Standardabweichung der Differenzen aus Modell- und Stützwerten liegt bei 1.5% und keiner der Modellwerte weicht mehr als 4% vom entsprechenden Stützwert ab. Diese Angaben gelten nicht für die LW-Stützwerte mit Quelltemperatur 2°C (2/35 und 2/50), hier beträgt die Standardabweichung 5%. Grund ist, dass die Modellwerte durch die Linearisierung im Aussentemperaturbereich von LW-Aggregaten, in welchem Abtauung stattfindet (nichtlinearer Verlauf), geglättet werden.

Die Modelle haben, wie bereits erwähnt, zwei Anwendungsbereiche (Kap. 3.4.3 und 3.4.4). Beim Ersten sind die verwendeten Eingabegrößen Jahresmitteltemperaturen. Die Quelltemperatur bei LW-Anlagen liegt somit im Bereich von 1 bis 4°C, also genau im Bereich mit der stärksten Nichtlinearität der Stützwerte. Diese Nichtlinearität wird durch die Abtauung verursacht. Da aber ein Jahresmittelwert gesucht ist, führt die Linearisierung tendenziell zum gewünschten Effekt.

Würde das Modell die Stützwerte exakt abbilden, so müsste zusätzlich mit einer Häufigkeitsverteilung der Quelltemperatur gearbeitet werden.

An dieser Stelle soll ergänzend auf die von M. Wetter (FH Horw) entwickelte Handrechenmethode zur Abschätzung der Jahresarbeitszahl hingewiesen werden [3].

### **Fehlerrechnung: Messunsicherheit und Modellfehler**

In den beiden folgenden Tabellen wird die Unsicherheit bezüglich der Arbeitszahlberechnung mit dem oben beschriebenen WP-Modell analysiert. Den grössten Anteil am Fehler hat die Temperaturmessung. Sie geschieht mit NTC-Thermoelemente. Diese werden als Anlegefühler eingesetzt, unter Verwendung von Wärmeleitpaste und einer 15 mm starken Dämmung.

Tabelle 10: Bei Verwendung von Herstellerangaben bezüglich des Messfehlers der Temperatursensoren beträgt die Unsicherheit bei der Berechnung des modellbasierten AZ-Erwartungswertes  $\pm 4.9\%$ .

<b>Temperaturmessunsicherheit: Herstellerangaben</b>						
<b>Temperaturmessungen 1</b>	<b>Messpunkt</b>	<b>Fehler (Komponenten)</b>		<b>Totaler Fehler</b>	<b>AZ=f(Tq)</b>	<b><math>\pm</math>AZ</b>
NTC-Thermoelemente	Tq [°C]	absolut [K]	relativ [%]	absolut [K]	dAZ/K [%]	absolut [-]
Quellentemperatur	5.0	0.2		0.2	2.50	0.14
<b>Temperaturmessungen 2</b>	<b>Messpunkt</b>	<b>Fehler (Komponenten)</b>		<b>Totaler Fehler</b>	<b>AZ=f(Ts)</b>	<b><math>\pm</math>AZ</b>
NTC-Thermoelemente	Ts [°C]	absolut [K]	relativ [%]	absolut [K]	dAZ/K [%]	absolut [-]
Senktemperatur	35.0	0.2		0.2	1.60	0.09
<b>WP-Modell</b>	<b>Messpunkt</b>	<b>Fehler</b>		<b>Totaler Fehler</b>		<b><math>\pm</math>AZ</b>
Max.Fehler = 2*SD	[-]	relativ [%]		absolut [-]	relativ [%]	absolut [-]
Arbeitszahl (AZ): S/W 5/35	3.5	1.0		0.035	1.00	0.04
<b>Arbeitszahl (AZ)</b>	<b>Messpunkt [-]</b>			<b>Fehlerrechnung (<math>\pm</math>AZ)</b>		
	3.5			<b>absolut [-]</b>	<b>relativ [%]</b>	
<b>Total</b>				<b>0.17</b>	<b>4.9</b>	
<b>Vertrauensintervall (CI)</b>	<b>Anlagen [Stk.]</b>			<b>CI [%]</b>		
Annahme:	5			2.17		
Max.Fehler = 2*SD	10			1.53		
	50			0.69		

Wird mit dem Messfehler des Herstellers (0.2 K) gerechnet, so ergibt sich eine totale Unsicherheit bezüglich der AZ von  $\pm 5\%$  (Tab. 10). Da der Fehler des verwendeten WP-Modells nur 1% beträgt, erhöht sich die Gesamtunsicherheit bei der Annahme eines Temperaturfehlers von 0.4 K entsprechend auf 10% (Tab. 11).

Tabelle 11: Wird angenommen, dass die Temperaturmessung wegen der Trägheit und nicht optimaler Fühlerplatzierung eine Unsicherheit von 0.4 K aufweist, so resultierte eine Unsicherheit bezüglich des AZ-Erwartungswertes von  $\pm 9.7\%$ .

<b>Temperaturmessunsicherheit: "worst case"</b>						
<b>Temperaturmessungen 1</b>	<b>Messpunkt</b>	<b>Fehler (Komponenten)</b>		<b>Totaler Fehler</b>	<b>AZ=f(Tq)</b>	<b><math>\pm</math>AZ</b>
NTC-Thermoelemente	Tq [°C]	absolut [K]	relativ [%]	absolut [K]	dAZ/K [%]	absolut [-]
Quellentemperatur	5.0	0.4		0.4	2.50	0.29
<b>Temperaturmessungen 2</b>	<b>Messpunkt</b>	<b>Fehler (Komponenten)</b>		<b>Totaler Fehler</b>	<b>AZ=f(Ts)</b>	<b><math>\pm</math>AZ</b>
NTC-Thermoelemente	Ts [°C]	absolut [K]	relativ [%]	absolut [K]	dAZ/K [%]	absolut [-]
Senktemperatur	35.0	0.4		0.4	1.60	0.18
<b>WP-Modell</b>	<b>Messpunkt</b>	<b>Fehler</b>		<b>Totaler Fehler</b>		<b><math>\pm</math>AZ</b>
Max.Fehler = 2*SD	[-]	relativ [%]		absolut [-]	relativ [%]	absolut [-]
Arbeitszahl (AZ): S/W 5/35	3.5	1.0		0.035	1.00	0.04
<b>Arbeitszahl (AZ)</b>	<b>Messpunkt [-]</b>			<b>Fehlerrechnung (<math>\pm</math>AZ)</b>		
	3.5			<b>absolut [-]</b>	<b>relativ [%]</b>	
<b>Total</b>				<b>0.34</b>	<b>9.7</b>	
<b>Vertrauensintervall (CI)</b>	<b>Anlagen [Stk.]</b>			<b>CI [%]</b>		
Annahme:	5			4.27		
Max.Fehler = 2*SD	10			3.02		
	50			1.35		

Da sich die Aussagen von FAWA aber immer auf Messungen an mehreren Anlagen abstützen, ist eigentlich das resultierende Vertrauensintervall (CI) relevant. Dieses ist in den beiden Tabellen jeweils beispielhaft für 5, 10 und 50 Anlagen dargestellt. Das CI zeigt, dass auch im schlechten Fall die Messunsicherheit kaum mehr als 3% zur Unsicherheit bezüglich eines Mittelwertes über eine Anlagengruppe beiträgt.

### 3.4.3 Einfluss von Temperaturen und Anlagenkomponenten auf nJAZ

Hier geht es um die Analyse des Einflusses von Anlagenkomponenten wie Erdwärmesonde und Regelung auf die Systemtemperaturen und damit auf die energetische Effizienz von Anlagen. Ebenfalls wird der Einfluss von technischen Speichern auf das Betriebsverhalten (Takten) untersucht. Von diesem wird ebenfalls ein Einfluss auf die JAZ vermutet.

Als Mass für die energetische Effizienz wird die klimanormierte Jahresarbeitszahl verwendet. Um die Einflüsse einzelner Komponenten auf die nJAZ herauszuarbeiten, werden alle bekannten Einflüsse aus den gemessenen nJAZ-Werten eliminiert, damit die Abhängigkeit der nJAZ vom untersuchten Parameter umso deutlicher in Erscheinung tritt. Dazu wird mit der Gl. 14 eine so genannte Relative Energetische Performance (REP) berechnet. Die Formel stellt primär die gemessene nJAZ einer Anlage dem entsprechenden Modellwert gegenüber. Je nach Zielsetzung werden für die Berechnung des Modellwertes mittlere (über alle Anlagen) Quellen- resp. Senktemperaturen eingesetzt oder anlagenspezifische Werte (vgl. nachfolgenden Beschrieb der Varianten a bis d). Wird über alle Anlagen mit einem konstanten Wert (Mittelwert über alle Anlagen) gerechnet, dann verbleibt der Einfluss dieser Grösse in der resultierenden REP einer Anlage, da deren Einfluss nicht in den Modellwert ( $nJAZ_{Modell}$ , vgl. Gl. 14) und somit die REP einfließt. Wird andererseits mit anlagenspezifischen Temperaturen gerechnet, dann wird der durch das WP-Modell abgebildete Zusammenhang aus der nJAZ, resp. der REP eliminiert.

Durch die in Gl. 14 enthaltene Multiplikation mit dem Quotienten aus mittlerem Modellwert- zu Messwert wird das Mittel der REP auf 1 normiert. Dies bedeutet, dass Anlagen mit einer REP > 1 bezüglich der Zielgrösse besser als der Durchschnitt sind.

$$REP = \frac{nJAZ_{IST} * \overline{nJAZ}_{Modell}}{nJAZ_{Modell} * \overline{nJAZ}_{IST}} \quad (14)$$

$$\overline{nJAZ}_{Modell} = \frac{\sum_{m=1}^n nJAZ_{Modell\ m}}{n} \quad (15)$$

$$\overline{nJAZ}_{IST} = \frac{\sum_{m=1}^n JAZ_{IST\ m}}{n} \quad (16)$$

*REP: Relative Energetische Performance*

*nJAZ<sub>IST</sub>: Anlagenspezifischer JAZ-Messwert*

*$\overline{nJAZ}_{IST}$ : Mittlerer JAZ-Messwert über alle (n) LW- resp. SW-Anlagen*

*nJAZ<sub>Modell</sub>: Anlagenspezifischer JAZ-Modellwert (Erwartungswert)*

*$\overline{nJAZ}_{Modell}$ : Mittlerer JAZ-Modellwert über alle (n) LW- resp. SW-Anlagen*

Normiert wird für die LW- und SW-Anlagen getrennt, d.h. der mittlere Modellwert wird für LW- und SW-Anlagen getrennt bestimmt. Damit wird sichergestellt, dass der mittlere REP-Wert über alle LW- resp. über alle SW-Anlagen jeweils auf 1.0 zu liegen kommt.

Grundsätzlich werden hier mittlere Heizperioden-Systemtemperaturen für die Modellrechnung verwendet. Diese sind Regressionswerte bei  $T_a 3^\circ\text{C}$  der Loggermessungen gemäss Kap. 3.2.2. Ausnahme bildet die Quellentemperatur bei den LW-Anlagen. Für diese wird der Mittelwert aller bis heute erfassten wärmegewichteten Aussentemperaturen (vgl. Gl. 4) verwendet. Der so ermittelte Wert entspricht am besten den mittleren Verhältnissen bei einer Anlage. Die so resultierenden nJAZ-Modellwerte für mittlere Heizperioden-Systemtemperatur werden - nicht ganz korrekt - als Jahresarbeitszahl-Erwartungswerte bezeichnet. Nicht ganz korrekt ist die Bezeichnung bei Anlagen, welche auch im Sommer Warmwasser mittels Wärmepumpe bereitstellen und deren Jahresarbeitszahl nicht genau der Arbeitszahl in der Heizperiode entspricht. Es werden die folgenden vier Fälle unterschieden:

**a) Bezeichnung: Eliminierung Maschineneinfluss**

Normierte Grössen: Es wird nur der Einfluss des WP-Aggregats aus den gemessenen JAZ-Werten eliminiert. Die Effekte von unterschiedlichen Quellen- und Senkentemperaturen bleiben bestehen.

Anwendung: Bei der Entwicklung der Anlagenjahrgänge (Kap. 5.2.1) wird mit dieser Methode der Einfluss sich verändernder Systemtemperaturen untersucht.

Die Gründe, weshalb nicht direkt diese Temperaturen betrachtet werden ist einerseits, dass nur von der Hälfte der Anlagen entsprechende Messwerte vorliegen und andererseits direkt der Einfluss auf die Arbeitszahl interessiert.

Vorgehen: Für die Berechnung des anlagenspezifischen Modellwertes und entsprechend für dessen Mittelwert über alle Anlagen werden dieselben mittleren Quellen- und Senkentemperaturen (FAWA-Messungen) verwendet.

$$nJAZ_{Modell} \text{ und } \overline{nJAZ}_{Modell} = f(\overline{\vartheta}_q, \overline{\vartheta}_s) \quad (17)$$

Die folgenden Gleichungen gelten auch für die Fälle b bis d:

$\vartheta_{q, SW}$ : Regressionswert von  $\vartheta_{sole}$  aus Loggermessung bei  $T_a=3^\circ\text{C}$

$\vartheta_{q, LW}$ : Wärmeproduktionsgewichtetes Mittel der Aussentemperatur gemäss Meteostation (höhenkorrigiert)

$$\overline{\vartheta}_{q, LW} = \frac{\sum_{i=1}^k \vartheta_{a,i} * q_i}{\sum_{i=1}^k q_i}$$

$\vartheta_{a,i}$ : Aussentemperatur im Ableseintervall  $i$  (höhenkorr.)

$q_i$ : Produzierte Wärmemenge im Ableseintervall  $i$

$\vartheta_s$ : Regressionswert von  $\vartheta_{vl}$  aus Loggermessungen bei  $T_a=3^\circ\text{C}$

$$\bar{\vartheta}_q = \frac{\sum_{m=1}^n \vartheta_{q\ m}}{n} \quad (18)$$

$\vartheta_{q\ m}$ : Anlagenspezifische Quelltemperatur der Anlage  $m$

$m$ : Alle betrachteten LW- oder SW-Anlagen

$$\bar{\vartheta}_s = \frac{\sum_{m=1}^n \vartheta_{s\ m}}{n} \quad (19)$$

$\vartheta_{s\ m}$ : Anlagenspezifische Senktemperatur der Anlage  $m$

$m$ : Alle betrachteten LW- und SW-Anlagen

$$\bar{\vartheta}_{q,L/W} : 4.3^\circ\text{C}; \bar{\vartheta}_{q,S/W} : 4.8^\circ\text{C}; \bar{\vartheta}_s : 38.9^\circ\text{C}$$

**b) Bezeichnung: Eliminierung Maschinen- und Quelltemperatureinfluss**

Normierte Grössen: Neben dem Einfluss des WP-Aggregats wird auch der Einfluss der Quelltemperatur eliminiert. Für die Senktemperatur wird nicht der anlagenspezifische Messwert, sondern der entsprechende Erwartungswert gemäss Reglereinstellung verwendet.

Anwendung: Diese Methode wird bei der Untersuchung des Einflusses des Reglers (m/o Aufschaltung der Raumtemperatur) auf die Jahresarbeitszahl (Kap. 5.3.3) verwendet.

Vorgehen: Für alle Aggregate werden dieselben mittleren Senktemperaturen verwendet. Als Quelltemperaturen werden die anlagenspezifischen FAWA-Messwerte eingesetzt.

$$nJAZ_{Modell} \text{ und } \overline{nJAZ}_{Modell} = f(\bar{\vartheta}_q, \bar{\vartheta}_s) \quad (20)$$

**c) Bezeichnung: Eliminierung Maschinen- und Senktemperatureinfluss**

Normierte Grössen: Neben dem Einfluss des WP-Aggregats wird auch der Einfluss der Senktemperatur eliminiert.

Anwendung: Diese Methode wird bei der Untersuchung des Einflusses der Erdwärmesondentemperatur auf die Jahresarbeitszahl (Kap. 5.3.8.1) verwendet.

Vorgehen: Für alle Aggregate werden dieselben mittleren Quelltemperaturen verwendet. Als Senktemperaturen werden die anlagenspezifischen FAWA-Messwerte verwendet.

$$nJAZ_{Modell} \text{ und } \overline{nJAZ}_{Modell} = f(\bar{\vartheta}_q, \vartheta_s) \quad (21)$$

**d) Bezeichnung: Eliminierung Maschinen-, Quellen- und Senktemperatureinfluss**

Normierte Grössen: Neben dem Einfluss des WP-Aggregats wird auch der Einfluss der Quellen- und Senktemperatur eliminiert.

Anwendung: Diese Methode wird bei der Untersuchung des Einflusses der Speichereinbindung auf die Jahresarbeitszahl (Kap. 5.3.7) verwendet. Es wird vermutet, dass die Speichereinbindung das Betriebsverhalten (Takten) der Maschinen und damit die energetische Effizienz beeinflusst. Dies entspricht eigentlich der Betrachtungsweise, wie sie oben im Abschnitt Wärmepumpe, resp. im Kap. 3.4.4 beschrieben wird. Der Unterschied

liegt darin, dass hier bei fehlenden Temperaturmesswerten Annahmen für diese eingesetzt werden (vgl. Vorgehen).

Vorgehen: Für alle Aggregate werden möglichst anlagenspezifische Quellen- und Senktemperaturen verwendet. Liegen keine Messwerte vor, wird quellenseitig das Mittel dieser Gruppe (Unterscheidung zw. L/W und S/W) und senkenseitig der aus der Heizkurveneinstellung abgeleitete Wert eingesetzt.

$$nJAZ_{Modell} \text{ und } \overline{nJAZ}_{Modell} = f(\vartheta_q, \vartheta_s) \quad (22)$$

In der Überschrift der Abbildungen, in welche REP dargestellt sind, wird in der zweiten Zeile jeweils ausgewiesen, welche der oben beschriebenen Varianten gewählt wurde. Es steht dann jeweils  $nWP$  ( $Tq: x; Ts: y$ ), wobei  $nWP$  für normierten WP-Effekt steht. Bei  $x$  resp.  $y$  wird angegeben, ob mit anlagenspezifischen (spez.) oder mittleren Temperaturen (Mittel) gerechnet wurde.

#### **3.4.4 Einfluss von WP-Komponenten und Betriebweise auf AZ**

Ziel ist es zu erkennen, wie weit WP-Aggregate im Feld von denjenigen auf dem Prüfstand abweichen. Das Vorgehen entspricht weitgehend dem Fall d) im vorherigen Kapitel. Als Bezugsgrösse wird hier aber nicht die Jahresarbeitszahl verwendet, sondern die Arbeitszahl, resp. der Stromverbrauch und die Wärmeproduktion in der Periode, in welcher die anlagenspezifischen Quellen- und Senktemperaturen gemessen wurden. Damit werden also Messwerte mit Erwartungswerten verglichen, welche im exakt gleichen Zeitintervall ermittelt wurden. Unsicherheiten, wie sie oben durch das Umrechnen von Temperaturmesswerten in der Messperiode auf Heizperioden-Mittelwerte entstehen, sind dadurch ausgeschlossen.

Die Systemtemperaturen sind damit als Parameter, welche Mess- zu Erwartungswert-Differenzen verursachen könnten, vollständig eliminiert. Es verbleiben also nur noch Abweichungen des realen Aggregats zum Modell.

##### ***Vergleich von Mess- und Erwartungswerten***

Unterschiede können ihre Ursache innerhalb (intern) oder ausserhalb der Wärmepumpe (extern) haben. Diese beiden Fehlerquellen sind in [Abb. 12](#) näher beschrieben.

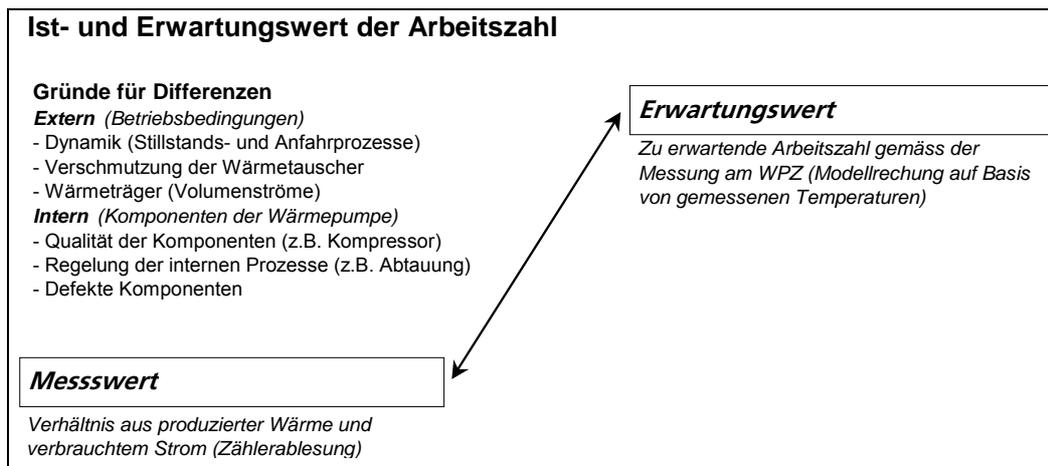


Abbildung 12: Verschiedene Gründe können zu einem Messwert führen, der sich vom Erwartungswert der Arbeitszahl unterscheidet. Einerseits entsprechen die Betriebsbedingungen in der Realität nicht jenen am WPZ, dazu gehört auch die Ablagerung von Schlamm aus dem Abgabesystem (alte Radiatoren) in den Wärmetauschern. Zu den internen Ursachen werden Abweichungen der Qualität der Komponenten, deren Regelung aber auch Defekte gezählt.

### Vorgehen

Die mit Datenloggern aufgezeichneten Systemtemperaturen (Kap. 3.2.2) werden mit der ebenfalls erfassten Kompressorlaufzeit im jeweiligen Intervall gewichtet. Mit dem resultierenden, gewichteten Mittel von Quellen- und Senkentemperatur wird über das WP-Modell (Kap. 3.4.2) auf die erwähnten Erwartungswerte geschlossen. In der gleichen Periode werden Stromverbrauch und Wärmeabgabe mittels Zählern erfasst und können so als Messwerte mit den Erwartungswerten verglichen werden. Da am WPZ nicht Arbeitszahlen sondern Leistungszahlen gemessen werden (EN 255), müssen die Erwartungswerte entsprechend auf die Systemgrenzen (JAZ 1) der Istwerte korrigiert werden, dies betrifft insbesondere die Energie für die Umwälzpumpen. Konkret werden die bei der EN 255 berücksichtigten Werte durch die realen Stromverbräuche der Umwälzpumpen ersetzt, diese können deshalb als Ursache für allfällige Differenzen zwischen Mess- und Erwartungswert ausgeschlossen werden.

$$\bar{\vartheta}_g = \frac{\sum_{n=1}^x \vartheta_n * t_n}{\sum_{n=1}^x t_n} \quad (23)$$

$$pE_{Mod} = f(\bar{\vartheta}_{g,q}, \bar{\vartheta}_{g,s}) \quad (24)$$

$$E_{EW} = pE_{Mod} * t \quad (25)$$

$\bar{\vartheta}_g$  : Mit der Laufzeit gewichteter Messwert der Systemtemperatur;

$\bar{\vartheta}_{g,q}$  : Quelle,  $\bar{\vartheta}_{g,s}$  : Senke

$\vartheta_n$  : Messwert der Systemtemperatur

$n$  :  $n$ -tes Intervall der Messperiode

$x$  : Letztes Intervall der Messperiode

$t_n$  : Laufzeit der WP im  $n$ -ten Messintervall

$pE_{Mod}$  : Modellwerte der elektrischen Leistungsaufnahme des WP-Aggregats

$E_{EW}$ : Erwartungswert für die Aufnahme an elektrischer Energie  
 $t$ : Gesamtlaufzeit in der Messperiode

Bei Luft/Wasser-Maschinen werden mit der FAWA-Messung während dem Abtauen vorlaufseitig Temperaturen aufgezeichnet, die nicht mit dem Modell kompatibel sind. Sie liegen insbesondere bei Maschinen mit Umkehrabtauung sehr tief. Das Modell „schließt“ damit fälschlicherweise auf eine hohe Wärmeproduktion. Real wird während dem Abtauen aber keine Wärme an den Nutzer abgegeben, bei Umkehrabtauung diesem sogar Wärme entzogen. Der Erwartungswert für die Wärmeproduktion wird bei den Luft/Wasser-Anlagen durch diesen Effekt also zu hoch berechnet. Andererseits tauen Anlagen im Feldbetrieb durchschnittlich weniger ab, als während einer Prüfstandsmessung nach EN 255. Gründe dafür sind natürliche Abtauung während Stillstandszeiten, die Regelung und real tiefere Luftfeuchten. Dieser Umstand führt zu einer real besseren energetischen Effizienz.

### Korrigierte Erwartungswerte

Abweichungen der Volumenströme über Verdampfer und Verflüssiger zwischen Modell (Prüfstand) und Realität (Feldmessung) führen zu Differenzen zwischen Mess- und Erwartungswert. Die so verursachten Differenzen sind kaum zu interpretieren.

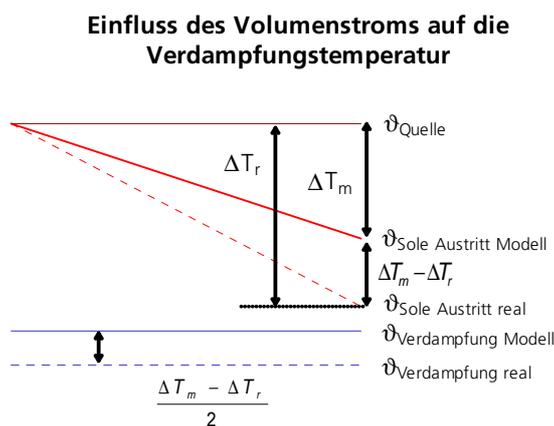


Abbildung 13: Die beiden roten Linien zeigen den Verlauf der Mediumtemperatur im Verdampfer: Die durchgezogene Linie steht für den Verlauf, der dem Modell zugrunde liegt; die gestrichelte Linie zeigt den Verlauf beim real geringeren Volumenstrom.

Wird eine Anlage beispielsweise mit einem kleineren quellenseitigen Volumenstrom betrieben, als er bei der Prüfstandsmessung vorlag, so ist die reale Differenz zwischen der Verdampfeintritts- und Verdampfungstemperatur grösser als bei der Prüfstandsmessung, die dem Modell zugrunde liegt (Abb. 13). Entsprechend verschiebt sich der Erwartungswert der Arbeitszahl bezüglich dem Messwert nach oben. Ohne Korrektur dieses Effektes würde in diesem Fall darauf geschlossen, dass die Maschine nicht optimal funktioniert, was aber nicht zutrifft. Aus diesem Grund wird dieser Effekt quellen- und senkenseitig im korrigierten Erwartungswert ( $EW_k$ ) eliminiert. Dazu wird die Differenz der Temperaturspannung über dem Wärmeübertrager zwischen Modell und Realität berechnet. Die für die Erwartungswertberechnung verwendeten Verdampfeintritts- resp. Verflüssigeraustrittstemperatur wird dann um die Hälfte dieser Differenz korrigiert (Gl. 26).

$$\vartheta_{\text{Ein},k} = \vartheta_{\text{Ein},m} + \frac{\Delta T_m - \Delta T_r}{2} \quad (26)$$

wobei

$$\Delta T_r = \frac{P_m}{V_r \cdot \rho_r \cdot c_r} \quad : \text{für Verdampfer nur näherungsweise gültig} \quad (27)$$

$\vartheta_{\text{Ein},k}$ : Gesuchte (korrigierte) Eintrittstemperatur in Verdampfer

$\vartheta_{\text{Ein},m}$ : Nicht korrigierte Eintrittstemperatur in Verdampfer

$\Delta T_m$ : Nicht korrigierte Temperaturspreizung der Quelle oder Senke

$\Delta T_r$ : Korrigierte Temperaturspreizung der Quelle oder Senke

$P_m$ : Nicht korrigierte Leistung des Wärmeübertragers  
(Modellwert bei nicht korrigierten Temperaturen)

$V_r$ : Volumenstrom durch Wärmeübertrager

$\rho_r$ : Dichte des Mediums

$c_r$ : Wärmekapazität des Mediums

Die Messung von Sole- oder Wasservolumenströmen wurde mit Ultraschallgeräten durchgeführt. Senkenseitig konnte dazu der Wärmezähler verwendet werden, quellenseitig wurden mobile Geräte eingesetzt. Luftvolumenströme wurden mit Flügelrad- oder Hitzdrahtanemometer vorgenommen.

Liegen auch Modell- und Messwerte der Frostschutzmittelart und -konzentration in Erdwärmesonden vor, so werden diese einbezogen. Der Einfluss veränderter Wärmeübergänge in Verdampfer und Verflüssiger bei Abweichungen von Volumenströmen und Frostschutz hingegen wird nicht berücksichtigt.

### 3.5 Rechenwerkzeuge

In FAWA werden alle Daten einer Wärmepumpenanlage in einem Anlagenfile erfasst und für den Export in die Auswertedatei aufbereitet (Abb. 14). Bei dieser Aufbereitung werden anlagenspezifische oder allgemeingültige Definitionen verwendet. Erstere befinden sich im Anlagenfile, Letztere in der Datei FAWA-Zentral.

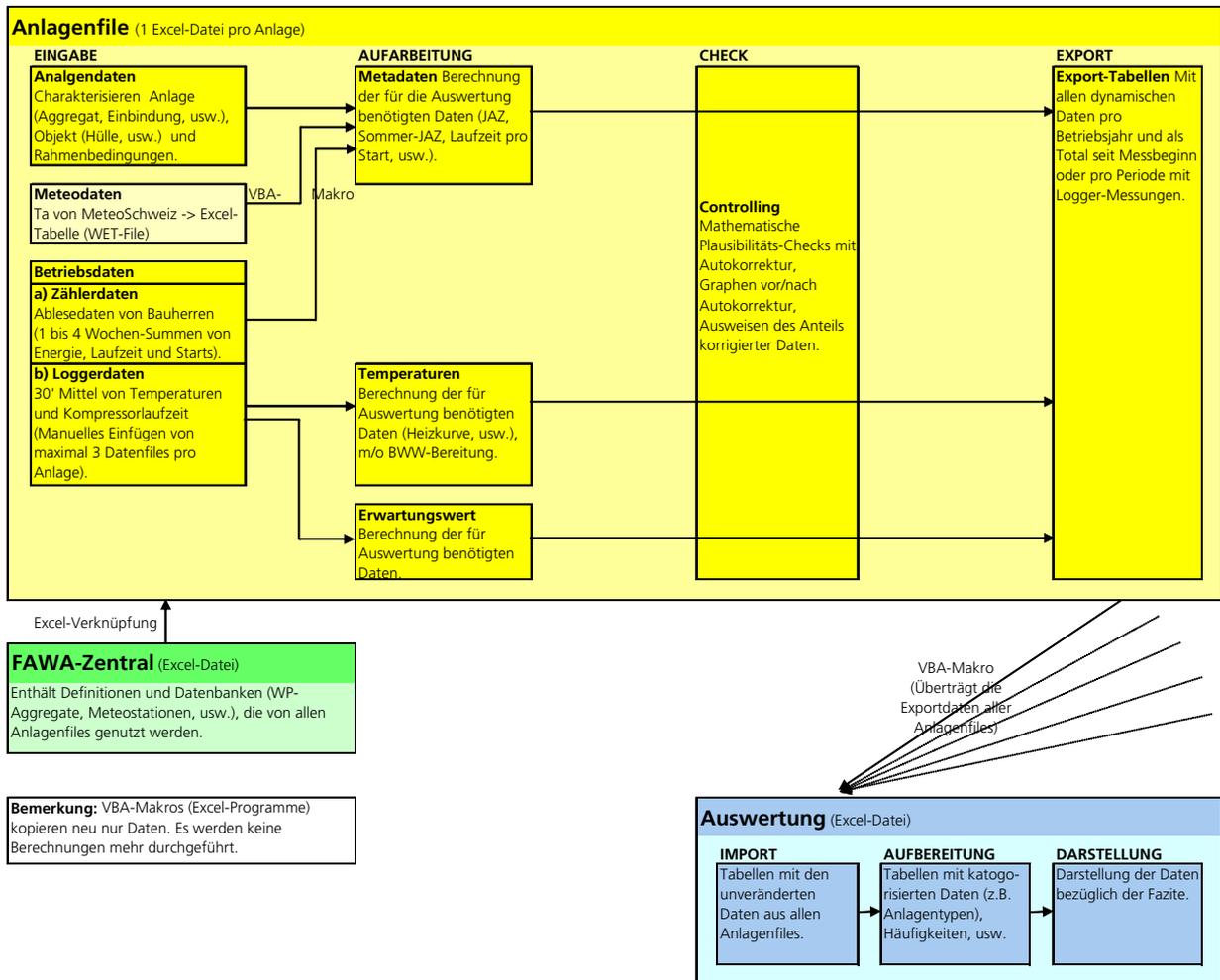


Abbildung 14: Elemente und Ablauf des Datenmanagements in FAWA.

Das Transportfile ist ein Hilfsmittel, um beim Austausch von Anlagendaten innerhalb der ARGE nicht ganze Anlagenfiles (60 MB) verschicken zu müssen. Es enthält alle Rohdaten eines Anlagenfiles (Anlagen- und Betriebsdaten) und hat nur eine Grösse von maximal 1.2 MB, abhängig von der Anzahl Loggerdatensätze.

### 3.5.1 Anlagenfile

Das Anlagenfile ist eine Arbeitsmappe mit verschiedenen Blättern, auf welche vom Blatt „Zentrale“ mittels Hyperlink zugegriffen werden kann (Tab. 12).

Tabelle 12: Blatt „Zentrale“ des Anlagenfiles. Von hier kann auf alle in der Arbeitsmappe enthaltenen Blätter mittels Hyperlink zugegriffen werden.

Zentrale					
Hyperlinks					
Input	Log u. EW	Graph	Check	Export	Diverse
Bauherren-Info	Logger.1	Graph aller Daten	Input.Check	Jahreswerte_E	Definitionen
	Logger.2	Graph Jahreswerte	Rohdaten.Check	Loggerdaten_E	Bemerkungen
Fingerprint 2	Logger.3	Graph Check (o/m Korr.)			
Rohdaten_I	AZ-Erwartung.1				
Objektdaten_I	AZ-Erwartung.2				
Adressen_I	AZ-Erwartung.3				
Anlage_I	HK mit Graph 1				
Messung_I	HK mit Graph 2				
Var.-Anlagendaten_I	HK mit Graph 3				
Systemdaten_I					
Erdsonde_I					
Störungen_I					
Invest. & Doku_I					

Ein ausführlicher Beschrieb des Anlagenfiles findet sich im Anhang ([Kap. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.](#)).

### 3.5.2 Allgemeine Daten

Die Datei „FAWA-Zentral“ enthält Daten, die von allen Anlagenfiles über externe Verknüpfungen genutzt werden. Es handelt sich dabei um Definitionen und Datenbanken:

- Verzeichnis der Kenndaten aller in FAWA erfassten WP-Aggregate
- Liste der Schweizer Meteostationen
- Kalibrierdaten von in FAWA eingesetzten Wärmezählern

Zusätzlich befinden sich hier alle in FAWA benutzten Visual Basic Makros sowie deren Steuerelemente. Diese kleinen Programme besorgen primär den Übertrag der Anlagendaten in die Gesamtauswertung und von einer alten Anlagenfileversion in eine neue. Ebenfalls über ein VBA-Makro werden auf Basis der Aussentemperaturdaten (MeteoSchweiz) die entsprechenden Mittelwerte für die Periode zwischen zwei Zählerablesungen eines Anlagenbesitzers berechnet und ins Anlagenfile eingetragen.

Ein ausführlicher Beschrieb von FAWA-Zentral findet sich im Anhang.

## 3.6 Datenkontrolle

### 3.6.1 Fehlerdetektion und -korrektur

Durch die lange Zeitspanne, in der FAWA Anlagen ausmisst, ist es unvermeidlich, dass Zähler ersetzt oder revidiert werden müssen, oder dass den Anlagenbesitzern Fehler bei der Ablesung unterlaufen. Insbesondere Zählerprobleme (Ausfälle) führen dazu, dass Datenlücken entstehen, die bei absoluten Grössen wie Energiemengen oder der Kompressorlaufzeiten zu scheinbaren Differenzen zwischen den einzelnen Messjahren führen. Um dies zu vermeiden, werden die Ablese-daten einer automatischen Fehlerdetektion mit anschliessender Fehlerkorrektur unterzogen.

Grundannahme der Prozedur ist, dass im Winter die wichtigsten Messgrössen (Stromverbrauch, Wärmeproduktion, Laufzeit und Starts) mit der Aussentemperatur linear korrelieren, da diese direkt vom Wärmebedarf des Objekts abhängen. Aus den Differenzen zweier Ablese-datenätze werden in einem ersten Schritt intensive resp. relative Grössen berechnet. Energiemengen werden dabei zu mittleren Leistungen, die Laufzeit zu einem Auslastungsgrad und die Starts zu Laufzeit pro Start umgerechnet. Anschliessend wird von diesen Werten ein lineares Modell bezüglich der Aussentemperatur erstellt und von jedem Datenpunkt die Abweichung zum Modell berechnet. Liegt ein Wert weiter als eine anlagenspezifisch definierte Anzahl von Standardabweichungen (Defaultwert: 3) vom Modellwert entfernt, so wird dieser durch den Modellwert ersetzt. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass nur wirkliche Fehler (Zählerausfall/-ersatz, Zählerrückstellung oder nicht manuell korrigierbare Fehlablesungen) als solche erkannt und ersetzt werden. Die Daten, die für die Modellbildung verwendet werden, müssen einen ‚Grobfilter‘ passieren, welcher un-mögliche Werte eliminiert (z.B. Werte < 0).

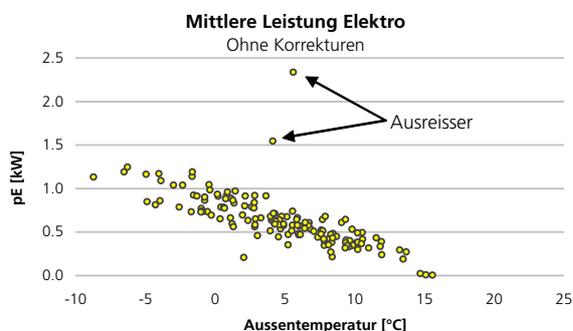


Abbildung 15: Mittlere elektrische Leistungsaufnahme zwischen zwei Ablesungen in Abhängigkeit der Aussentemperatur. Es sind zwei klare Ausreisser sichtbar, die durch die Rückstellung des Elektrozählers verursacht werden.

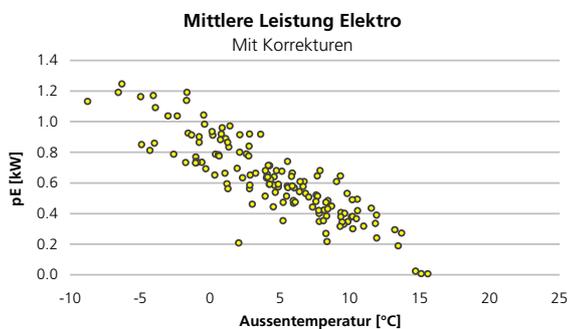


Abbildung 16: Da die beiden Ausreisser ausserhalb der Toleranzgrenze liegen, wurden sie durch den Modellwert (lineare Regression) ersetzt.

Für Sommerwerte kommt das Prozedere in einer abgewandelten Form zur Anwendung. Sommerdaten basieren auf dem Warmwasserbetrieb und unterscheiden sich meist deutlich von den Winterdaten. Aus diesem Grund wird als Modell einfach der Mittelwert über alle Sommerdatenätze verwendet. Der Rest bleibt gleich.

### 3.6.2 Wärmehählerkalibrierung

Die Wärmehähler, die vor 1999 in Betrieb genommen wurden, sind durch eine zertifizierte Prüfstelle (Industrielle Werke Basel) ausgemessen worden. Dabei wurden die Zähler einer messtechnischen Eingangsprüfung unterzogen (Abb. 17 bis 19). Nach einer Reinigung wurden die Zähler

nochmals gemessen (Abb. 20). Lagen die Abweichungen bei der Eingangskontrolle ausserhalb des zulässigen Bereichs, wurden die defekten Teile ersetzt. Die so produzierten Messdaten werden zur Korrektur der FAWA-Daten verwendet. Dabei wird zwischen einem Sockelfehler (Fehleranteil, der auch nach der Revision noch vorhanden ist und damit wohl seit Start der Messung vorhanden war) und einem Alterungsfehler (durch Verschmutzung über die Einsatzzeit entstanden) unterschieden. Der Sockelfehler wird über die Gesamteinsatzzeit als konstant angenommen, resp. korrigiert. Der Alterungsfehler wird mit der seit Messbeginn registrierten Wärmemenge gewichtet, so dass zum Zeitpunkt der Kalibrierung die gesamte Korrektur dem totalen Fehler gemäss der Messung vor der Reinigung entspricht.

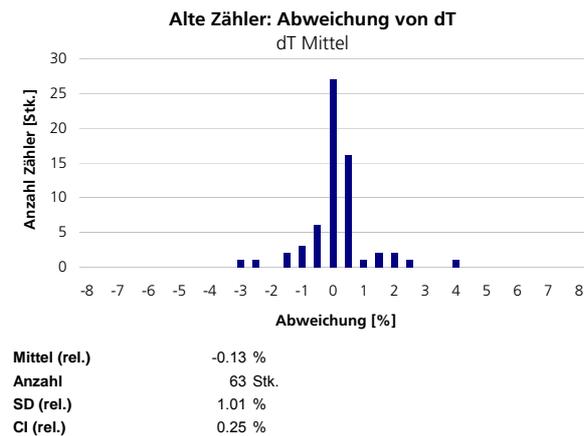


Abbildung 17: Fehler der Temperaturdifferenzmessung bei den alten (gebrauchten, nicht revidierten) Wärmezählern. Sie entspricht dem mittleren Fehler der Messungen an den Messpunkten 25/35°C, 35/50°C und 50/65°C.

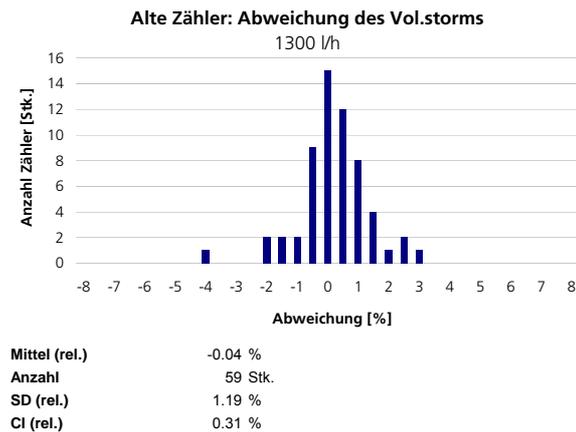


Abbildung 18: Fehler der Volumenstrommessung bei den alten (gebrauchten, nicht revidierten) Wärmezählern bei 1'300 l/h.

Wie die Auswertungen der Kalibriermessungen zeigen, verursachen die Wärmezähler im Anlagensample keinen systematischen Fehler. Im Mittel weicht die registrierte Wärmemenge um weniger als 0.2% vom realen Wert ab. Einige wenige Geräte weisen Abweichungen bis zu 4% auf. Interessanterweise hat die Revision diese Ausreisser nicht zu eliminieren vermocht.

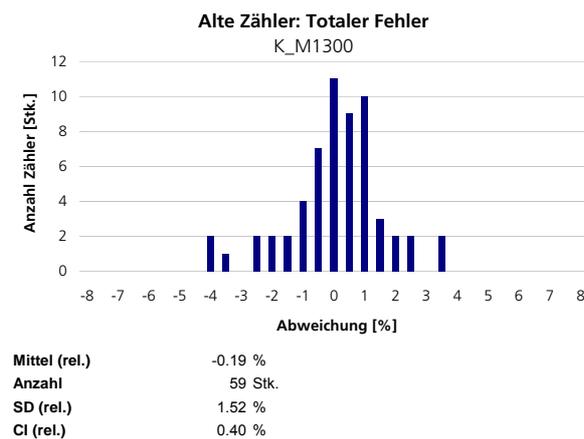


Abbildung 19: Totaler Fehler (Wärmemenge) bei den alten (gebrauchten, nicht revidierten) Wärmezählern. Sie entspricht der Summe aus den Fehlern bei Temperaturdifferenz und Volumenstrom.

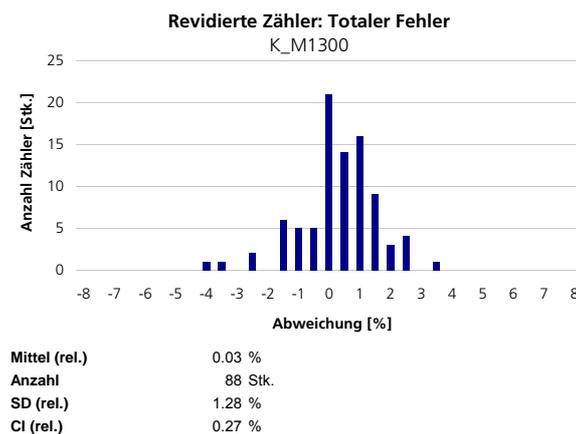


Abbildung 20: Dito Abb. **Fehler! Keine gültige Verknüpfung.** bei den revidierten Zählern.

## 3.7 Übergeordnete Qualitätssicherung

Ein Projekt dieser Grössenordnung und zeitlichen Ausdehnung bedarf eines Instrumentariums zur Qualitätssicherung und Kurshaltung. Darauf wurde bei FAWA besonderes Gewicht gelegt. Dazu dienten vor allem fünf Massnahmen:

- Begleitgruppe
- Experte
- Externe Software-Überprüfung
- Kalibrierung der Messmittel
- Plausibilitätskontrollen

### 3.7.1 Begleitgruppe

Im Projektkonzept und im Projektvertrag war die Einsetzung einer von der Arbeitsgemeinschaft Hubacher Engineering & Dr.Eicher+Pauli AG unabhängigen Begleitgruppe vorgesehen. Die Aufgabe der Begleitgruppe bestand darin, die Arbeiten der ARGE kritisch zu begleiten, empfehlend oder, falls notwendig, korrigierend einzugreifen. Die Begleitgruppe war aus erfahrenen Planern, Wärmepumpen-Herstellern, Installateuren und Wissenschaftlern zusammengesetzt. Der Vorsitz lag während der ganzen Projektdauer bei Markus Real (Alpha Real AG, Zürich).

Die ARGE musste ihre Vorgehensweise, die Mess- und Auswertemethodik und die Ergebnisse periodisch der Begleitgruppe vorstellen und begutachten lassen.

Aus den Arbeiten ergaben sich seitens der ARGE weitere Erhebungswünsche, die seitens der Begleitgruppe überprüft wurden.

### 3.7.2 Experte

Das Projekt enthielt eine Reihe von wissenschaftlichen Fragestellungen. So bedurfte es einer sorgfältigen Abklärung der Erhebungsziele: Was soll beantwortet werden, was ist wirklich nötig, was kann weg gelassen werden?

Sodann musste die Messmethodik festgelegt werden. Auch hier bestand das Dilemma, einen tragbaren Kompromiss zwischen dem Wunsch nach möglichst zuverlässigen Aussagen und der Begrenzung durch das Budget zu finden.

Welche Anzahl Anlagen soll erfasst werden. Man wollte einerseits statistisch gesicherte Aussage haben, was eine möglichst grosse Zahl von Anlagen bedingt hätte. Andererseits standen wieder die Budgetrestriktionen im Wege. Wo lag die noch vertretbare untere Zahl von Anlagen? Welche Unsicherheit soll bei den Mittelwerten noch zugelassen werden? Welches ist die minimale Anzahl Anlagen pro Merkmalsgruppe (Sample)?

Oder es stellte sich die Frage, wie die Leistungszahlen aus den publizierten Typenprüfungen des WPZ mit den Jahresarbeitszahlen aus den Feldmessungen verglichen werden können.

Oftmals waren auch Normierungen durchzuführen, um den Einfluss einzelner Parameter hervortreten zu lassen oder zu eliminieren. Wie waren solche Normierungen durchzuführen?

Schliesslich waren die Ergebnisse zu interpretieren. Sind sie plausibel oder nicht. Können unerwartete Ergebnisse physikalisch gedeutet werden oder nicht. Wie gross ist die Ergebnisunsicherheit?

Für all diese Fragen wollten sich Auftraggeber, ARGE und Begleitgruppe absichern. Zu diesem Zweck wurde ein wissenschaftlich orientierter Experte mit langjähriger Facherfahrung in die Begleitgruppe aufgenommen, der zu all diesen Fragen Stellung zu nehmen hatte.

### **3.7.3 Externe Software-Überprüfung**

Die Auswertesoftware wurde im Laufe der Zeit komplexer und umfangreicher. Dadurch wurde es immer schwieriger, allfällige Fehler (Ablesefehler, Übertragungsfehler, algorithmische Fehler, methodische Fehler, Modellfehler, Softwarefehler) zu erkennen. Die Software enthält unzählige Detailmodelle, Verknüpfungen, Plausibilitätstests, Fehlereliminationsroutinen, etc. Es bestand die Notwendigkeit, die Software durch eine neutrale externe Stelle, also unabhängig von der ARGE, zu überprüfen.

Es wurde eine doppelte Kontrollstrategie angewendet:

#### *a) Kontrolle „Zeile für Zeile“*

Die erste Kontrollmethode bestand darin, die Berechnungsprozesse „Zeile für Zeile“ zu verfolgen. Erschwerend war dabei, dass keine systematische wissenschaftliche Darstellung der verwendeten Algorithmen vorhanden war. Diese existierten nur im Kopf des Sachbearbeiters und im Programm selbst. Die Begleitgruppe hat veranlasst, dass dies im Schlussbericht nachgeholt wird.

Diese Art der Software-Prüfung stellte eine extreme Anstrengung an den Prüfer dar. Mit dieser Methode war es möglich, die Algorithmen, Berechnungsprozesse und mathematischen Modelle zu erkennen und auf physikalische und softwaretechnische Richtigkeit zu prüfen. Es zeigten sich eine Reihe von kleineren Unzulänglichkeiten, die aber nur einen unbedeutenden Einfluss auf die Ergebnisse hatten.

#### *b) Kontrolle mit „Testdatenfile“*

Trotz dieser detaillierten und aufwendigen Kontrolle „Zeile für Zeile“ war nicht mit absoluter Sicherheit auszuschliessen, dass noch unerkannte Fehler vorhanden waren. Zudem musste die Software immer wieder neuen Erfordernissen angepasst werden (z.B. zwecks Fehlerbehebung). Dies hätte jedes Mal erneut einer aufwendigen „Zeile-für-Zeile“-Kontrolle bedurft. Es wurde daher eine zweite Kontrollmethodik angewendet, die Methode mit Testdatenfiles. Testdatenfiles sind Files mit Eingabedaten, die aber ohne Verlust an Aussagekraft so konzipiert sind, dass sie von Hand durchgerechnet werden können. Zudem konnte man gezielt Fehler einbauen (z.B. Ablesefehler) und deren Wirkung auf die Fehlererkennungsmechanismen verfolgen. Diese Methode hat zudem den Vorteil, dass bei Software-Änderungen sofort mit wenig Aufwand ein Testlauf mit dem Testdatenfile durchgeführt werden konnte, um die Korrektheit der Software-Änderung zu erkennen. Nachteil dieser Methode ist, dass die Software eine „black box“ bleibt und man somit keine Einblicke in die „Innereien“ erhält. Aber dieser Nachteil wurde ja mit der ersten Kontrollmethode aufgehoben.

### **3.7.4 Plausibilitätskontrolle**

Fehler können viele Ursachen haben. Es kann sich um Ablesefehler durch den Bauherrn, um Abschreibfehler beim Eintippen der Ablesedaten in den PC, um algorithmische Fehler beim Erken-

nen, Ausscheiden oder korrigieren von Ausreißern handeln. Es lässt sich nicht umgehen, dass bei so grossen Datenmengen, diese Prozesse automatisiert werden müssen. Das Erkennen von nicht plausiblen Daten ist seinerseits mit Risiken behaftet. Eine ergriffene Massnahme bestand darin, die Originaldaten und die korrigierten Daten graphisch darzustellen und „optisch“ zu vergleichen und zu beurteilen. Wenn offensichtlich unplausible Korrekturen auftraten, und solche gab es, so war den Ursachen nachzugehen und diese zu beheben. In vielen Fällen half einfach die Erfahrung der beteiligten Fachleute, unplausible Ergebnisse zu erkennen.

## 4. Anlagenübersicht

### 4.1 Gebäude

Die zurzeit von FAWA untersuchten 235 Anlagen befinden sich zu 60% in Neubauten und zu 40% in Sanierungsobjekten. Der Anteil der Sanierungsobjekte wurde so gewählt, dass sich in dieser Gruppe genügend Anlagen befinden, um statistisch gesicherte Aussagen machen zu können.



Abbildung 21: Verteilung der Gebäudebaujahre aller in FAWA untersuchten Objekte.

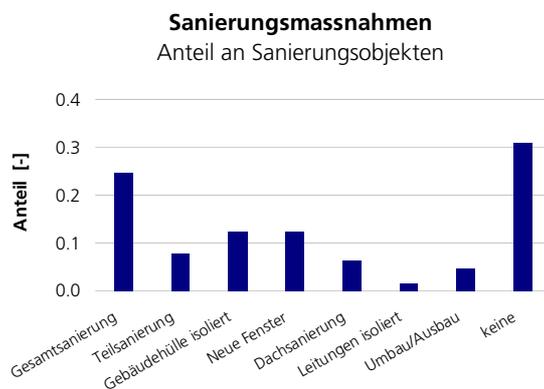


Abbildung 22: Bei 70% der Objekte wurden beim Einbau der WP auch eine energetische Sanierung der Gebäudehülle durchgeführt.

Bei den Sanierungsobjekten ist zu beachten, dass die Hälfte von ihnen nach 1970 erstellt wurde, und bei 70% energetisch relevante Sanierungsmassnahmen vorgenommen wurden. Bei 25% wurde sogar eine Gesamtsanierung des Gebäudes durchgeführt, bevor die Wärmepumpe installiert wurde.

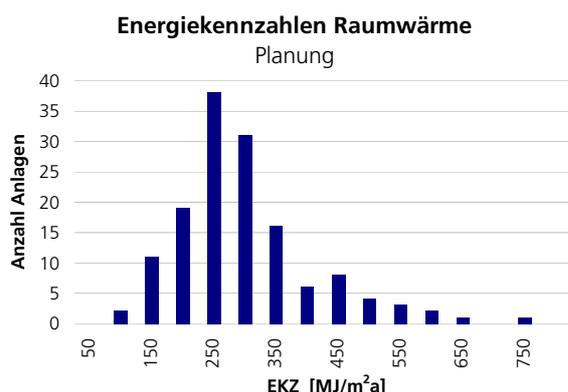


Abbildung 23: Die Planungswerte der Energiekennzahlen der untersuchten Objekte sind über einen breiten Bereich verteilt.

Die Planungswerte der Energiekennzahlen (EKZ) der untersuchten Objekte sind über einen breiten Bereich verteilt. Im Mittel liegen Sie bei  $270 \text{ MJ/m}^2$  (SD 40%).

In FAWA unterscheiden sich Sanierungsobjekte und Neubauten bezüglich Art des Abgabesystems sehr deutlich. Neubauten weisen in 92% der Fälle eine Fussbodenheizung auf, die teilweise

durch Radiatoren ergänzt wird. In Sanierungsobjekten liegt der Anteil der Fussbodenheizungssysteme bei 53%.

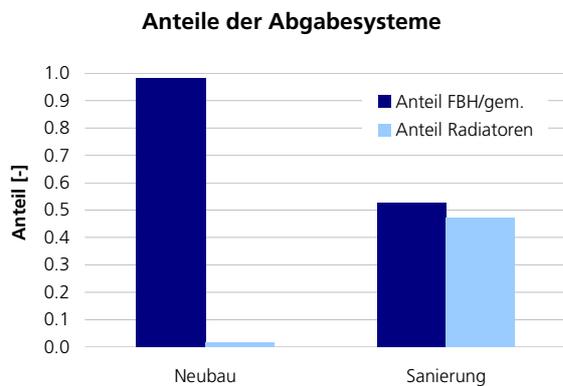


Abbildung 24: Neubauten weisen fast ausschliesslich Fussbodenheizungen oder gemischte Systeme auf. Wobei in Sanierungsobjekten in knapp der Hälfte der Fälle eine reine Radiatorenheizung vorhanden ist.

## 4.2 Anlagentypen

Von insgesamt 221 Anlagen liegen heute Jahresarbeitszahlen vor. Diese verteilen sich auf 105 Luft/Wasser (LW), 94 Sole/Wasser (S/W), 10 Wasser/Wasser (W/W), 8 Erdregister/Wasser, 3 Energiepfahlanlagen und einer Anlage mit Direktverdampfer.

Bei 50% der Anlagen ist die WP zumindest an der Warmwassererwärmung beteiligt. Bei 22% geschieht die Warmwasserbereitung rein über die WP. Die restlichen 50% der Anlagen haben einen separaten Elektroboiler.

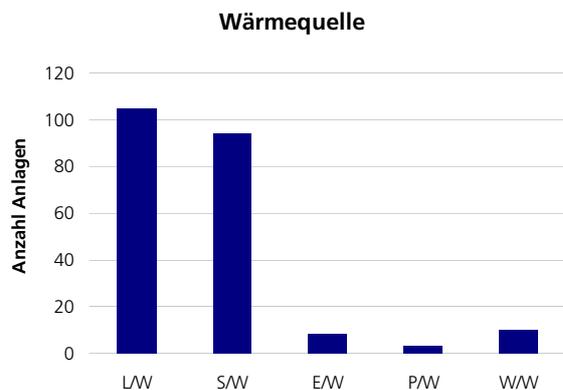


Abbildung 25: Anzahl der in FAWA untersuchten Anlagentypen bezüglich Umweltwärmequelle. LW: Luft; S/W: Erdwärmesonde; E/W: horizontales Erdregister; P/W: Energiepfähle; W/W: Wasser.

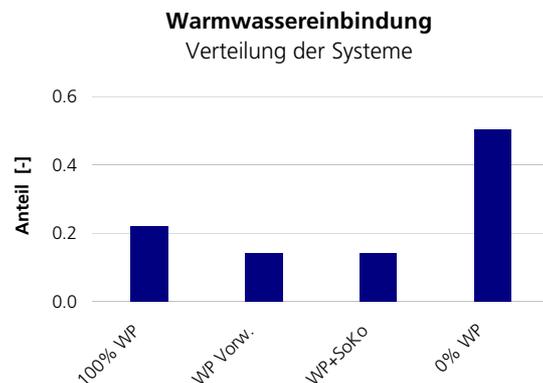


Abbildung 26: Anteile der verschiedenen Systeme zur Warmwasserbereitung. 100% WP: WW wird ausschliesslich mit der WP erwärmt; WP Vorw.: WP wärmt WW vor; WP+SoKo: Kombination aus WP und Sonnenkollektoren; 0% WP: WW wird zu 100% vom Elektroboiler erwärmt.

## 5. Resultate

Die folgenden Resultate (exkl. [Kap. 5.1](#)) basieren auf dem Datenbestand vom Sommer 2003. Zu diesem Zeitpunkt befanden sich wie erwähnt 235 Anlagen im Programm. 6 Anlagen verfügten zu diesem Zeitpunkt noch nicht über genügend Ablesewerte, um eine klimanormierte Jahresarbeitszahl (nJAZ) zu berechnen, und 8 Anlagen befinden sich in Abklärung bezüglich unplausibler Ablesedaten. Von 221 Anlagen liegt heute also mindestens eine nJAZ vor, insgesamt sind es 916 nJAZ-Werte. Unplausible Ablesedaten haben ihre Ursache meist in defekten Zählern. Die höchste Störungsanfälligkeit wurde bei den Laufzeit/Start-Zählern festgestellt, aber auch die Wärmezähler sind, insbesondere in Sanierungsobjekten (Verschmutzung), von Ausfällen betroffen. Ein weiterer Grund für unvollständige Betriebsdatensätze ist, wenn Anlagenbesitzer die Zählerstände nicht oder nicht genügend oft protokollieren. Insgesamt führen diese Ursachen dazu, dass knapp 10% weniger nJAZ-Werte vorliegen, als dies im Idealfall möglich gewesen wäre. Wie im [Kap. 3.6.1](#) beschrieben, wird durch die Algorithmen in den Auswerteeinstrumenten aber verhindert, dass fehlende oder falsche Daten zu Ausreißern führen können.

Zu beachten ist, dass es sich bei den verschiedenen Auswertungen bezüglich eines bestimmten Kriteriums um heterogene Gruppen handelt. Es wurde zwar versucht, diese Gruppen so zu bilden, dass die verbleibenden differierenden Eigenschaften möglichst wenig Streuung beim Zielparаметer (meist JAZ) hervorrufen. Wo sinnvoll, wurden aus dem gleichen Grund die bereits beschriebenen Normierungen bezüglich Klima und WP-Kenndaten vorgenommen. Trotzdem ist es nicht zu vermeiden, dass die so berechneten Mittelwerte mit einer Unsicherheit behaftet sind, die über die Ungenauigkeit der Messungen hinausgeht. Als Mass für die Unterschiede in einer Anlagengruppe wird, wo nötig, die Standardabweichung (SD) angegeben. Basierend auf SD und Anzahl Messwerten (Anlagen) wird das Vertrauensintervall (CI) berechnet. Es gibt die Unsicherheit bezüglich der Lage des Mittelwertes einer Anlagengruppe an. Wenn sich also die Mittelwerte zweier Anlagengruppen unterscheiden, muss jeweils auch das CI berücksichtigt werden, welches einen Anhaltspunkt dafür gibt, ob Differenzen zufällig aufgetreten sind, oder ob es wahrscheinlich ist, dass sich die beiden Anlagengruppen tatsächlich unterscheiden. Weitergehende Erklärungen zu den verwendeten Begriffen befinden sich im Glossar ([Kap. 9](#)).

### 5.1 Zufriedenheit

Bei der 1997 durchgeführten Umfrage gaben 78% der Befragten WP-Besitzer an, sehr zufrieden zu sein. Weitere 17% waren ziemlich zufrieden. Lediglich 3% meldeten Vorbehalte und 2% waren gar nicht zufrieden mit ihrer Wärmepumpe.

Die wichtigsten Gründe für die Beschaffung einer Wärmepumpenanlage wurden anlässlich der gleichen Befragung ermittelt. Das Argument „Umweltfreundlichkeit des Systems“ dominiert mit 57% der Antworten eindeutig. Weitere Antworten waren 11% „vorhandene Platzverhältnisse“ und 8% „andere Gründe“.

**Zufriedenheit der WP-Besitzer**  
Repräsentative Umfrage von 1997

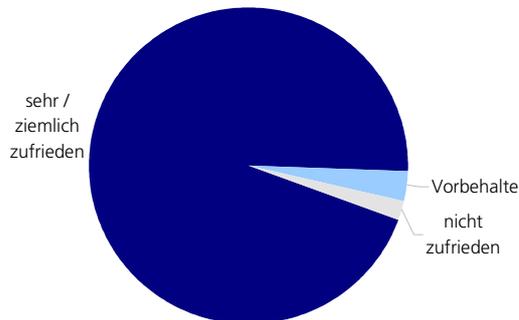


Abbildung 27: Eine Nutzerumfrage ergab, dass 95% der WP-Besitzer zufrieden bis sehr zufrieden sind.

Die zweite Befragung wurde direkt vor Ort bei 52 Anlagenbesitzern vom FAWA-Team durchgeführt. Die Auswertung der vorgegebenen Kurz-Antworten ist in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Table 13: Resultate einer Umfrage des FAWA-Teams bei 52 WP-Besitzern zu den Themen Zufriedenheit, Betrieb und Service.

Parameter	Beurteilung		
	sehr zufrieden	zufrieden	weniger zufrieden
Zufriedenheit	73%	27%	0%
Bedienung	einfach 86%	tw. Anspruchsvoll 14%	anspruchsvoll 0%
Komfort	angenehm warm 75%	warm 16%	tw. Schwankungen 9%
Betrieb der Wärmepumpe	vollautomatisch 95%	gelegentlich manuelle Eingriffe 2%	öfters manuelle Eingriffe 2%
Betriebsregime	normaler Tag/Nacht Betrieb 74%	vorwiegend Nachtbetrieb 26%	0%
Brauchwarmwasserbereitung mit WP (18 Anlagen mit El.boiler)	genügend WW 70%	selten vorkom. Spitzen (WW knapp) 26%	öfters manuelle Nachladung nötig 4%
Überwachung der WP	eigene Kontrolle 73%	Kontrolle mit Lieferant zusammen 14%	keine Kontrolle 14%
Wahl des Heizsystems	würden wieder eine WP kaufen 95%	würden anderes System vorziehen 2%	keine Antwort 2%

Die Resultate sind sehr überzeugend. Mit der Wärmepumpenanlage sind 73% sehr zufrieden und 27% zufrieden. Kein einziger Anlagenbesitzer ist weniger oder gar nicht zufrieden. Auf die Frage, ob sie wieder eine Wärmepumpe kaufen würden, antworteten über 95% mit ja und nur ein Anlagenbesitzer würde bei einer neuen Entscheidung ein anderes System vorziehen. Auch die Bedienung wird stark mehrheitlich als einfach bezeichnet und die meisten Anlagen laufen vollautomatisch. Die Kontrolle und Überwachung der eigenen Wärmepumpe wird vorwiegend selbst durchgeführt, d.h. die Anlagenbesitzer benötigen keine fremde Hilfe für die Beurteilung des Betriebs- und Bereitschaftszustands der Wärmepumpenanlage. Es gibt auch einige Besitzer, die kei-

ne regelmässige Kontrolle durchführen und voll auf die richtige Funktion der Wärmepumpe vertrauen.

Tabelle 14: Umfrage des FAWA-Teams bei 52 WP-Besitzern zum Thema Störungen.

Störungen	Anlagen ohne Störungen	Anlagen mit Störungen, resp. Servicegänge (bei einigen Anlagen bis 3 Störungen)	
	40%	60%	
Service	zufrieden	weniger zufrieden	nicht zufrieden
	88%	12%	0%

Diese Auswertung von 52 Anlagen wurde auch bezüglich Störungen und Service gemacht. Die 46 Anlagen sind bis heute rund 474'000 Betriebsstunden gelaufen. Die Auswertung dieses Bereichs „Störungen und Service“ schneidet ebenfalls gut ab.

Bei 21 Anlagen gab es nie eine Störung oder einen Grund, den Service der Lieferfirma zu beanspruchen. Wenn man davon ausgeht, dass eine Anlage bei der Inbetriebnahme nicht immer optimal eingestellt werden kann, widerspiegelt dieses Resultat auch die in der oberen Tabelle gemachten Aussage, dass die Bedienung der Anlagen einfach ist.

Die Zusammenfassung der beiden Befragungen ist positiv und spricht für die Wärmepumpe. Sicher ist dieses gute Resultat auch eine Folge der sehr konsequenten Qualitätssicherung, die seit mehr als 10 Jahren bei der Wärmepumpe angewendet wird, zu verdanken.

## 5.2 Energetische Effizienz

Von insgesamt 221 Anlagen liegen heute klimanormierte Jahresarbeitszahlen (nJAZ 2) vor. Die gewählte Methode zur Klimanormierung (vgl. [Kap. 3.3.5](#)), insbesondere die Wahl der Aussen-temperatur, führt dazu, dass die mittlere nJAZ 2 um 3.5% tiefer liegt, als die JAZ 2 (vgl. [Abb. 28](#)). Dies ist aber auch so zu erwarten, da die nJAZ 2 als Mittelwert über die Heizperiode definiert wurde. Entsprechend ist die Differenz zwischen nJAZ 2 und JAZ 2 bei LW-Anlagen mit 4% höher als bei SW-Anlagen (3%), da die für die nJAZ nicht berücksichtigten Heizperiodenendwerte und Sommerdaten (Warmwasserbetrieb) bei den LW-Anlagen wegen der hohen Quelltemperatur sich stärker von den Winterdaten unterscheiden, als bei den SW-Anlagen. Die drei Anlagen in [Abb. 28](#), bei welchen sich die beiden Grössen um mehr als 20% unterscheiden, ist dies immer auf den Sommerbetrieb der Wärmepumpe (Warmwasser) zurück zu führen.

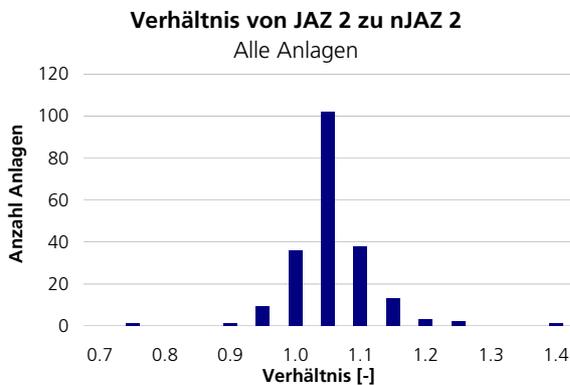


Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der Verhältnisse aus JAZ 2 und der klimanormierten nJAZ 2. Im Mittel liegt die nJAZ um 3% tiefer als die JAZ (Warmwasserbetrieb im Sommer).

Einer genaueren Analyse werden nur die Daten der Luft/Wasser und Sole/Wasser-Anlagen unterzogen, da die geringe Zahl in den anderen Gruppen (Abb. 25) keine auch nur annähernd statistisch gesicherten Aussagen zulässt.

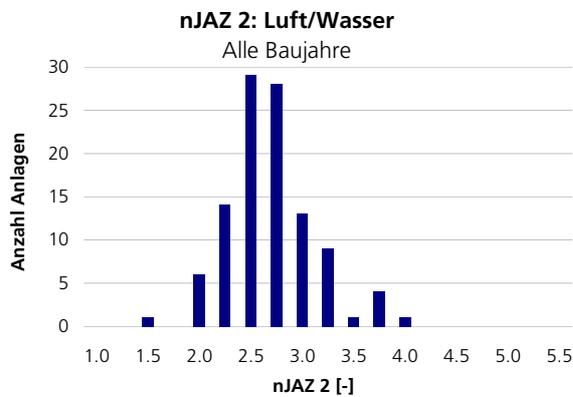


Abbildung 29: Häufigkeiten der klimanormierten JAZ 2 aller in FAWA untersuchten Luft/Wasser Anlagen. Die Beschriftung der Abszisse bezieht sich jeweils auf die Klassenobergrenze. Das Mittel liegt bei 2.6 (SD 0.4).

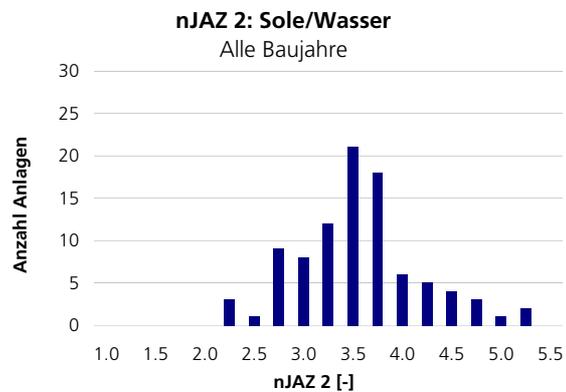


Abbildung 30: Bei den Sole/Wasser-Anlagen beträgt der Mittelwert 3.4 (SD 0.7).

Wie die COP-Kenndaten der Maschinen erwarten lassen, liegt der Mittelwert der klimanormierten Jahresarbeitszahlen (nJAZ 2) über alle Messjahre von SWW und WW Anlagen mit einer nJAZ 2 von 3.4 deutlich über dem Wert von LW Anlagen mit 2.6. Dies bedeutet, dass LW Anlagen pro produzierter Kilowattstunde Wärme durchschnittlich 25% mehr Strom verbrauchen. Die nicht klimanormierten Daten finden sich im Anhang.

Die Verteilung der Daten, insbesondere der beiden intensiv untersuchten Gruppen LW und SWW, entspricht recht gut einer Normalverteilung. Dies lässt vermuten, dass die beiden Anlagengruppen gut dem schweizerischen Gesamtbestand entsprechen. Interessant ist weiter die knapp doppelt so hohe Standardabweichung (SD) bei SWW und WW im Vergleich mit LW Anlagen. Dies deutet daraufhin, dass durch die Umweltenergiegewinnung induzierte Stromverbrauch (Temperaturniveau und Aufnahmeleistung der Umwälzpumpe) bei diesen beiden Systemen viel stärker variieren, als bei den LW Anlagen und besonderer Sorgfalt bei Planung und Ausführung bedürfen.

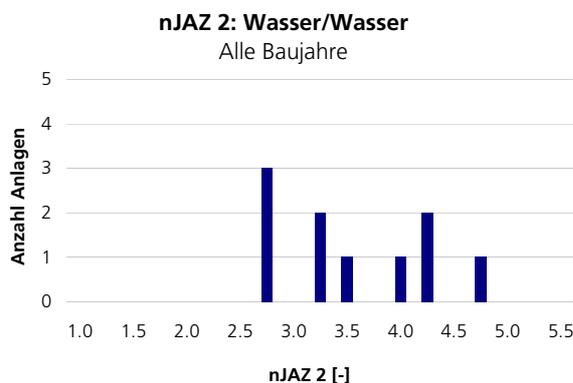


Abbildung 31: Zu Beginn des Projektes wurden auch ein paar wenige Wasser/Wasser Anlagen aufgenommen. Deren Mittelwert beträgt 3.4 (SD 0.7).

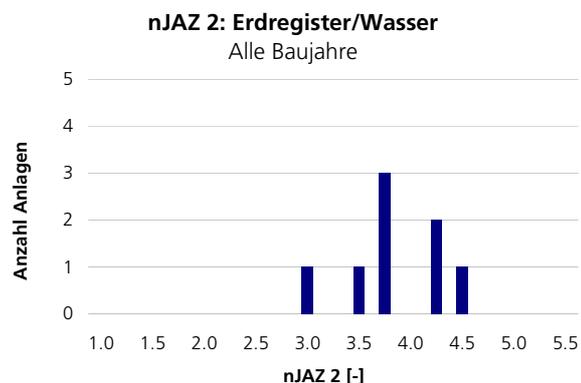


Abbildung 32: Bei den acht Erdregister/Wasser Anlagen beträgt der Mittelwert 3.7 (SD 0.4). Die Daten sind nicht repräsentativ.

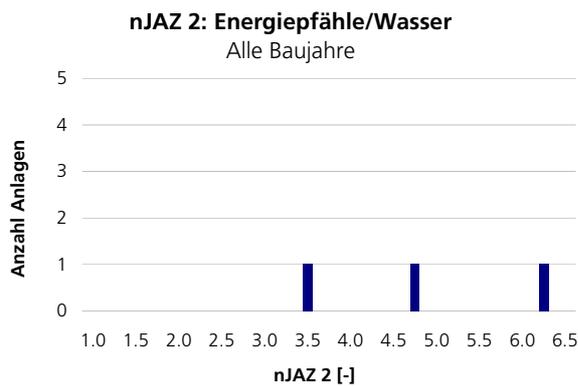


Abbildung 33: Bei den drei Energiepfahl Anlagen beträgt der Mittelwert 4.8 (SD 1.4). Die Daten sind nicht repräsentativ.

## 5.2.1 Zeitliche Entwicklung Anlagengruppen

Auf Basis der Gesamtheit von Neubau- und Sanierungsanlagen, kann bei den LW-Anlagen eine ziemlich stetige Zunahme der nJAZ von 2.3 (1994/95) auf 2.7 (2002) festgestellt werden (Abb. 34), was einer Zunahme von rund 17% entspricht. Unter Annahme eines linearen Verlaufs findet eine Verbesserung der nJAZ gegenüber 1994/95 um 1.7% pro Jahr statt. Das Vertrauensintervall CI der einzelnen Jahrgänge, liegt bei den LW bei durchschnittlich  $\pm 8\%$ . CI bezeichnet das Intervall, in welchem der wahre Wert, also der Mittelwert wenn alle in der Schweiz installierten Anlagen gemessen worden wären, mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegt.

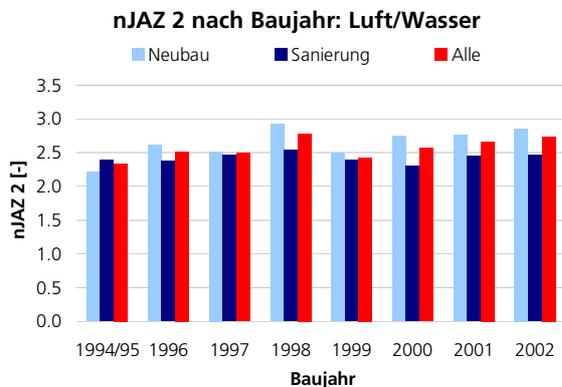


Abbildung 34: Mittlere nJAZ 2 der LW-Anlagen nach Baujahr und Gebäudetyp. Die lineare Regression zeigt eine mittlere jährliche Verbesserung von 1.7%.

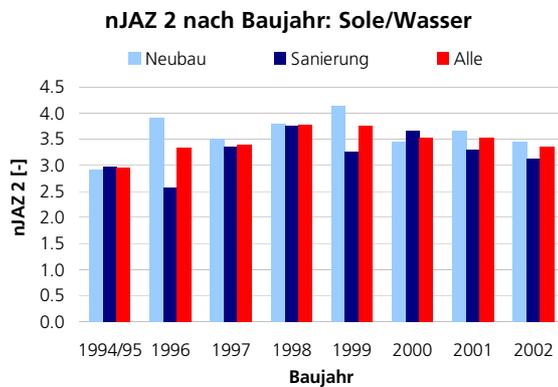


Abbildung 35: Mittlere nJAZ 2 der S/W-Anlagen nach Baujahr und Gebäudetyp. Die Regression zeigt eine jährliche Verbesserung um 1.5%.

Bei den S/W-Anlagen (Abb. 35) wurde eine Zunahme der nJAZ von 3.0 (1994/95) auf 3.4 (2002) festgestellt, also +14%. Das CI beträgt  $\pm 11\%$ . Seit 2000 sind die Sole/Wasser-Anlagen konstant.

Bei beiden Anlagengruppen schneiden die Anlagen in Neubauten im Mittel um 9% besser ab als in Sanierungsobjekten. Die nicht klimanormierten Daten im Anhang zeigen kaum Differenzen zu den nJAZ-Verläufen.

Die gemessenen nJAZ wurden nun mit den Erwartungswerten normiert (Kap. 3.4.3). Diese Normierung wurde jeweils bei mittleren Quellen- und Senkentemperaturen durchgeführt (Variante a). Durch die Normierung der nJAZ werden also nur die Effekte der Verbesserung der Wärme-

pumpenaggregate (z.B. Scroll- statt Kolbenverdichter) rechnerisch eliminiert. Die so resultierenden REP (Relative Energetische Performance) zeigen also nur noch Unterschiede bezüglich:

- Systemtemperaturen,
- Einbindung des Aggregats in die gesamte Anlage (inklusive Regelung) respektive deren Konsequenzen (Takten und Stillstandsverluste),
- Abweichungen der realen Aggregate zu den erwähnten Modellwerten.

Die Resultate dieser Normierung sind in den [Abb. 36](#) und [37](#) dargestellt. Der bei den LW Anlagen eingangs festgestellte positive Trend von +1.7% pro Jahr sinkt auf -0.6% ab, bei den SW von +1.5 auf +1.2% pro Jahr. Diese Resultate deuten darauf hin, dass bei den LW-Anlagen insbesondere die Aggregate zum positiven Trend beitragen, bei den SW eher die Erdwärmesondenanlagen. Ein möglicher Grund für die technische Verbesserung ist die Einführung von Wärmepumpen mit Scrollverdichter. Diese dominieren heute bei den SW-Aggregaten (100%), haben bei den LW jedoch nur einen Anteil von ca. 50%. Vergleicht man die Kenndaten von Kolben- und Scrollverdichtern bei LW resp. SW, so zeigt sich, dass ihr Vorteil bei 9% resp. 13% liegt. Die 9% der LW gelten für den Punkt 2/35, bei 2/50 schrumpft der Vorteil auf 1% zusammen. Werden nun in FAWA gemessene nJAZ-Werte verglichen, so zeigt sich bei den LW-Anlagen ein Vorteil der Scrollverdichter von 4%, resp. 22% bei den SW-Anlagen. Aus diesen Daten lässt sich nun ableiten, dass die technische Verbesserung bei den LW wohl nur zu einem kleinen Teil auf die Einführung der Scrollverdichter zurückgeführt werden kann. Bei den SW-Anlagen liegt die nJAZ-Steigerung (14%) sehr nahe beim Erwartungswert (13%), was nun wieder eher daraufhin weist, dass die Verbesserung der Aggregate doch auch hier einen hohen Anteil an der realen JAZ-Verbesserung haben.

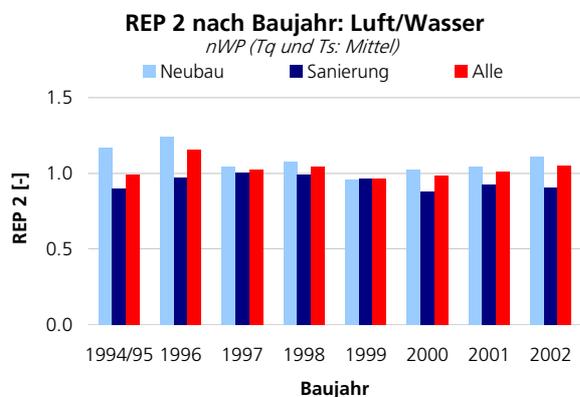


Abbildung 36: Mittlere REP der LW-Anlagen nach Baujahr und Gebäudetyp. Die Regression zeigt eine jährliche Verbesserung um -0.6%. Für die WP-Normierung der JAZ zu REP wurden die mittleren von FAWA gemessenen Quellen- und Senktemperaturen verwendet.

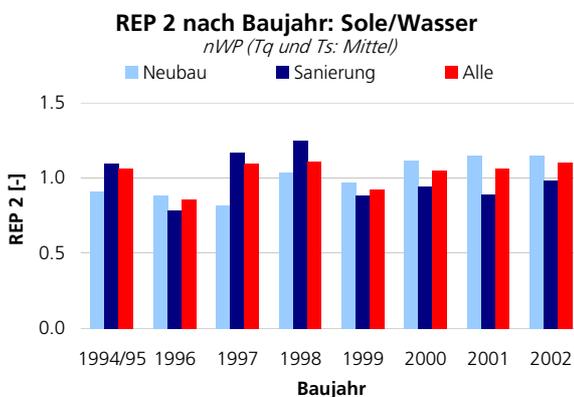


Abbildung 37: Mittlere der SW-Anlagen nach Baujahr und Gebäudetyp. Die Regression zeigt eine jährliche Verbesserung um 1.2%.

## 5.2.2 Entwicklung CH-Anlagenpark

In [Abb. 38](#) sind die auf den Anlagenpark Schweiz hochgerechneten nJAZ 2 (FAWA-Messwerte) und COP (WPZ-Prüfresultate) dargestellt. Dazu wurde die im [Kap. 3.3.6](#) beschriebene Methode angewendet. Die COP-Daten des WPZ wurden auf Systemtemperaturen, wie sie im Mittel in FAWA festgestellt wurden, umgerechnet. Dazu wurde das WP-Normierungsmodell gemäss [Kap. 3.4.3](#) verwendet. Gerechnet wurde mit einer Quellentemperatur von 2°C bei den LW und

5°C bei den SW Anlagen und einer Senkentemperatur von 40°C. Die daraus resultierenden Jahresmittelwerte sind in den [Abb. 39](#) und [40](#) dargestellt.

Die hochgerechneten FAWA Daten ergeben für 1994/95 eine JAZ von 2.5 und für 2002 von 3.0, was einer Zunahme um total 20% entspricht. Dieser Wert liegt also um 4.5% über dem Mittel aus den Messwerten für Luft/Wasser und Sole/Wasser Anlagen. Der Grund dafür ist die Zunahme des Marktanteils der energetisch besseren SW-Anlagen. Gemäss Verkaufsstatistik der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS) betrug 1995 der Marktanteil der Aggregate mit weniger als 20 kW<sub>th</sub> von Luft/Wasser 67% und Sole/Wasser 28%. 2002 lagen die Luft/Wasser bei 52% und die Sole/Wasser bei 43%.

Die hochgerechneten WPZ Daten zeigen zwischen 1994/95 eine Zunahme um 21%, also sehr ähnlich dem FAWA-Wert ([Abb. 38](#)). Sehr ähnlich ist auch der zeitliche Verlauf von WPZ und FAWA, wobei die FAWA-Werte um ca. ein Jahr nach hinten verschoben sind. D.h. die Maschinentypen, die im Jahr x am WPZ geprüft werden, werden bereits im Jahr x+1 in Betrieb genommen.

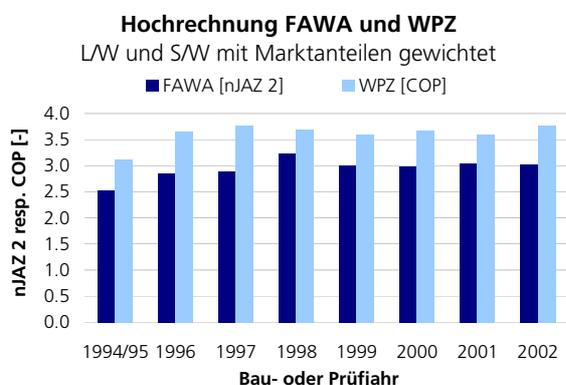


Abbildung 38: Hochrechnung der JAZ 2 resp. des COP (WPZ) auf die Gesamtheit der CH-Neuanlagen durch Gewichten mit den Verkaufszahlen der LW- und SW-Anlagen.

Die absolute Differenz zwischen WPZ (COP) und FAWA (nJAZ 2) von 20% liegt zu einem Teil an der unterschiedlichen Definition der beiden Grössen. Der COP von SW Anlagen enthält beispielsweise keinen Pumpenstromverbrauch zur Überwindung des Druckabfalls über der Erdwärmesonde, was in FAWA im Mittel ca. 5% der Differenz erklärt. Weitere ca. 8% werden durch die Abweichung der realen Wärmepumpen von den Kenndaten (EN 255) erklärt (vgl. [Kap. 5.3.9.2](#)). Von einer gewissen Bedeutung sind auch Speicherverluste. Dazu kommt, dass Bauherren und Installateure nicht unbedingt immer die aktuell am WPZ geprüften Wärmepumpen einsetzen können, da zwischen Prüfung und Vermarktung eine gewisse Zeit verstreicht, also die aktuell geprüften Modelle nicht sofort verfügbar sind.

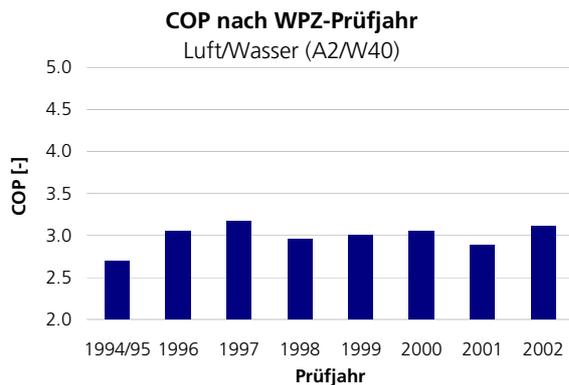


Abbildung 39: Interpolation der COP-Daten des WPZ auf Systemtemperaturen, wie sie im Mittel in FAWA gemessen wurden.

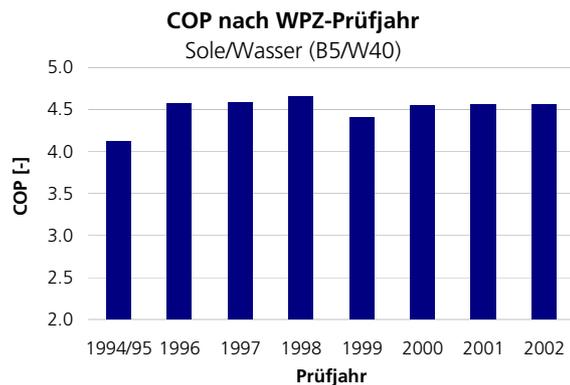


Abbildung 40: Interpolation der COP-Daten des WPZ auf Systemtemperaturen, wie sie im Mittel in FAWA gemessen wurden..

## 5.3 Vertiefte Analysen

### 5.3.1 Verfügbarkeit

Die in FAWA untersuchten Anlagen weisen bis Mitte 2003 eine akkumulierte Laufzeit von 1.3 Mio. Stunden auf. In dieser Zeit lag während 6'500 Stunden eine Störung vor. Daraus ergibt sich eine mittlere Verfügbarkeit aller Anlagen von 99.5%. Wichtig festzustellen ist auch, dass mehr als 70% der Anlagen bisher ohne Störungen betrieben wurden. Die mittlere Störungsdauer (Zeit ab Eintritt bis Behebung einer Störung) lag bei knapp 40 Stunden pro Störung, wobei Werte von wenigen Stunden bis mehr als zwei Wochen aufgetreten sind.

Es muss bei diesen Zahlen berücksichtigt werden, dass das mittlere Anlagenalter zurzeit bei 3.8 Jahren liegt. Da Störungen häufig in den ersten Monaten auftreten, kann angenommen werden, dass die Verhältnisse über die gesamte Anlagenlebensdauer eher besser sind als hier dargestellt.

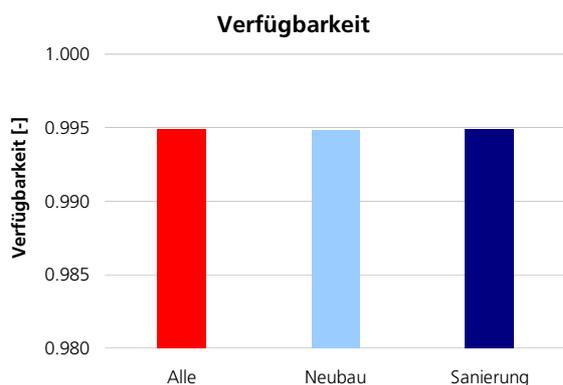


Abbildung 41: Die Verfügbarkeit von Anlagen in Neubauten und Sanierungsobjekten ist gleich.

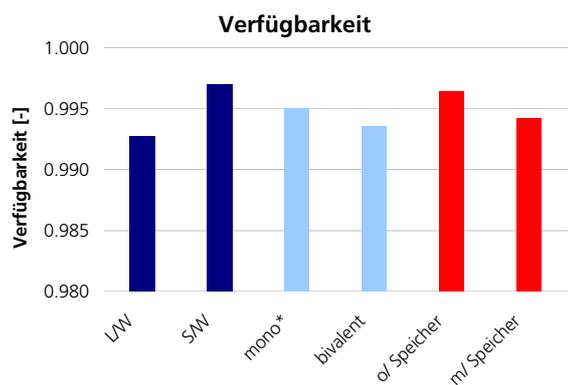


Abbildung 42: SW-Anlagen haben eine höhere Verfügbarkeit als LW-Anlagen. Dies gilt auch für einfache Anlagen (ohne Speicher oder monovalent) gegenüber Anlagen mit Speicher oder Zusatzheizung (bivalent).

Die Verfügbarkeit ist bei allen Anlagentypen hoch. Überdurchschnittlich gute Werte zeigen sich bei SW- (99.7%) gegenüber LW-Anlagen (99.3%). Leichte Unterschiede können auch zwischen einfachen und eher komplexen Anlagentypen gefunden werden. So weisen Anlagen ohne Spei-

cher eine Verfügbarkeit von 99.6% und jene mit Speicher von 99.4% auf. Diese Resultate widersprechen also der verbreiteten Meinung, dass speicherlose Anlagen störungsanfälliger seien.

Wie erwähnt beträgt die mittlere Störungsdauer 40 Stunden. Wird das vorliegende Verhältnis von Störungen pro Laufzeit auf ein Betriebsjahr umgerechnet, so ergeben sich 0.33 Störungen pro Jahr. Werden nur jene Störungen berücksichtigt, bei welchen die Behebung durch den Wärmepumpenservice durchgeführt wurde, so reduziert sich die Zahl auf 0.26 Störungen pro Jahr.

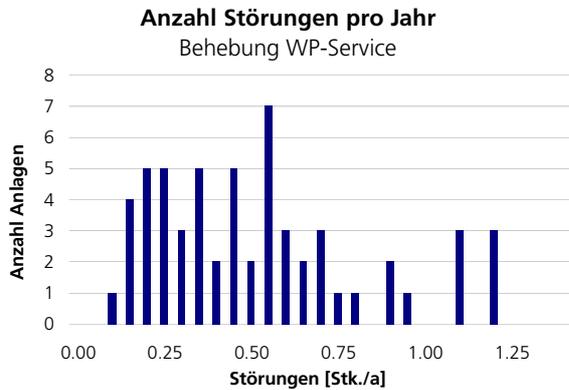


Abbildung 43: Die mittlere Störungshäufigkeit liegt bei 0.26 pro Jahr, wenn nur jene Störungen betrachtet werden, welche durch den WP-Service behoben wurden.

Die nachfolgende Tabelle enthält eine Übersicht über Störungstypen, -dauer und Anzahl betroffener Anlagen. Die anfälligsten Komponenten sind Regelung und Kompressor. Auch Fehlbedienungen führen häufig zu Störungen. Diese Störungen stehen wohl häufig auch mit den Reglern in Zusammenhang, da diese für den Laien häufig kaum zu verstehen sind.

Tabelle 15: Übersicht über Störungstypen, -dauer und Anzahl betroffener Anlagen. Die anfälligsten Komponenten sind Regelung und Kompressor. Unter „Störungen“ ist einerseits die totale in FAWA festgestellte Anzahl Störungen des jeweiligen Typs enthalten, andererseits die Anzahl von dieser Störung betroffenen Anlagenzahl. „Störungsdauer“ steht für die mittlere Dauer einer Störung.

Störungen Typ	Störungen		Störungsdauer Dauer [h/Störung]
	Total [Stk.]	Anlagen [Stk.]	
Hochdruck	19	15	33
Niederdruck	12	9	32
Wassermangel Verdampfer	6	6	120
Regelung	42	29	70
Vereisung Verdampfer	11	9	22
Verdichter	16	14	128
Kältemittelverlust	8	7	44
Verschmutzter Verdampfer	1	1	48
Verschmutzter Verflüssiger	4	4	10
Umwälzpumpe	12	12	98
Wassermangel Verflüssiger	2	2	
unbekannt	109	54	12

### 5.3.2 Alterung

Um herauszufinden, ob die energetische Qualität der Anlagen mit den Jahren abnimmt, wurden die Abweichungen zwischen dem ersten und  $n$ -ten Betriebsjahr berechnet. In [Abb. 44](#) und [45](#) ist beispielhaft die Situation für die Differenzen aller Anlagen zwischen dem ersten und dem zweiten, resp. fünften Betriebsjahr dargestellt. Der Mittelwert liegt hier bei jeweils +1% (CI  $\pm 1.2$  resp. 1.8%). Bereits in dieser Abbildung wird klar, dass bei mehr als 80% der Anlagen nur sehr geringe Abweichungen im Bereich von weniger als  $\pm 5\%$  festzustellen sind.

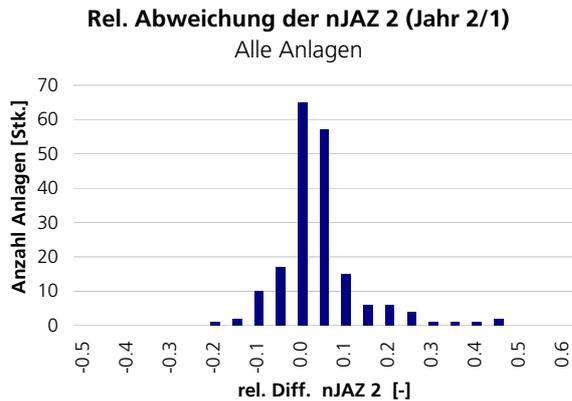


Abbildung 44: Histogramm der relativen Abweichungen der nJAZ 2 zwischen dem ersten und zweiten Betriebsjahr aller Anlagen.

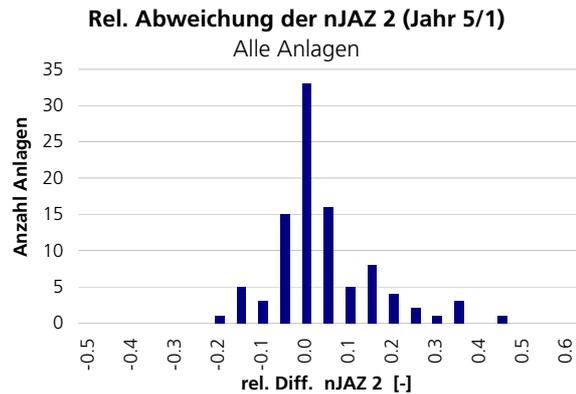


Abbildung 45: Wie [Abb. Fehler! Keine gültige Verknüpfung.](#) aber für das fünfte Betriebsjahr. Die statistischen Daten der Verteilung (Mittelwert, SD, CI) sind fast identisch mit dem Fall 2/1.



Abbildung 46: Relative Abweichung der nJAZ 2 vom ersten Betriebsjahres für alle Anlagen. Das 9. Jahr basiert auf Daten von nur 4 Anlagen, ist also noch nicht gesichert.

Die in [Abb. 46](#) dargestellten mittleren Differenzen zwischen dem ersten und  $n$ -ten Betriebsjahr zeigen keinen Trend, weder nach unten noch nach oben. Die JAZ bleiben also über die Jahre konstant. Wegen der noch geringen Anlagenzahl liegt das Vertrauensintervall im siebten und achten Betriebsjahr bei  $\pm 4$  resp.  $\pm 6\%$  und steigt im neunten Jahr sogar auf  $\pm 12\%$  an, da erst 4 Anlagen über so lange Zeit Daten geliefert haben.

Tabelle 16: Relative Abweichung der nJAZ 2 vom *n*-ten zum ersten Betriebsjahres für alle Anlagen. Das 9. Jahr basiert auf Daten von nur 4 Anlagen, ist also noch nicht gesichert, entsprechend hoch ist hier noch das Vertrauensintervall.

Jahr n/1	Mittel [%]	Anzahl [Stk.]	SD [-]	CI [-]
2/1	0.8	182	0.10	0.01
3/1	0.1	151	0.12	0.02
4/1	0.9	115	0.11	0.02
5/1	1.6	97	0.12	0.02
6/1	-0.5	61	0.11	0.03
7/1	-0.8	27	0.11	0.04
8/1	-1.8	11	0.10	0.06
9/1	-0.3	4	0.12	0.12

Sehr ähnlich wie beim Verlauf über alle Anlagen präsentiert sich die Situation bei den Sole/Wasser Anlagen (Abb. 48), d.h. die Jahresarbeitszahlen bleiben konstant. Die erwartete Auskühlung der Sondenumgebung, resp. der dadurch verursachte JAZ-Rückgang in den ersten Betriebsjahren kann also nicht festgestellt werden. Bei den LW-Anlagen (Abb. 47) wurde im sechsten, aber insbesondere im siebten Betriebsjahr ein kleiner Einbruch festgestellt. Da die Werte im achten und neunten Jahr (statistisch ungesichert: nur 4 resp. 1 Anlage(n)) Jahr aber wieder besser werden, kann von keinem Trend gesprochen werden.

Die nicht klimanormierten Daten im Anhang zeigen kaum Differenzen zu den nJAZ-Verläufen.

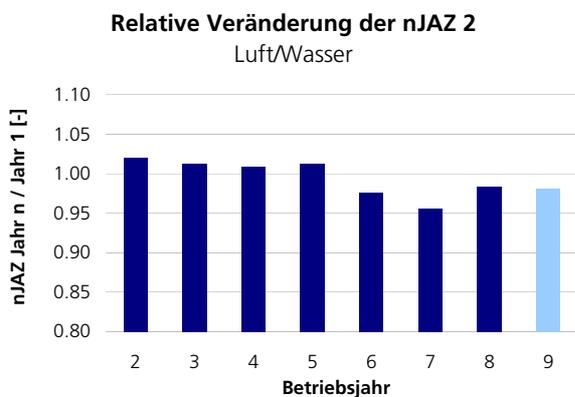


Abbildung 47: Relative Abweichung der nJAZ 2 vom ersten Betriebsjahre für die Luft/Wasser Anlagen. Das 8. und 9. Jahr basiert auf Daten von nur 4 resp. 1 Anlage(n), sind also noch mit sehr grosser Zurückhaltung zu interpretieren.

Abbildung 48: Relative Abweichung der nJAZ 2 vom ersten Betriebsjahre für die Sole/Wasser Anlagen. Das 9. Jahr basiert auf Daten von nur 3 Anlagen und somit sehr unsicher.

### 5.3.3 Regelung

Grundsätzlich werden die Anlagen über eine 2-Punkt-Regelung geschaltet. Das Schaltkriterium resp. die direkt damit verbundenen Ein- und Ausschaltpunkte (Hysterese) beziehen sich also bei Anlagen ohne Parallelspeicher auf die Rücklauftemperatur. Ist ein Parallelspeicher vorhanden, wird häufig mit einem Einschaltfühler oben und einem Ausschaltfühler unten im Speicher gearbeitet.

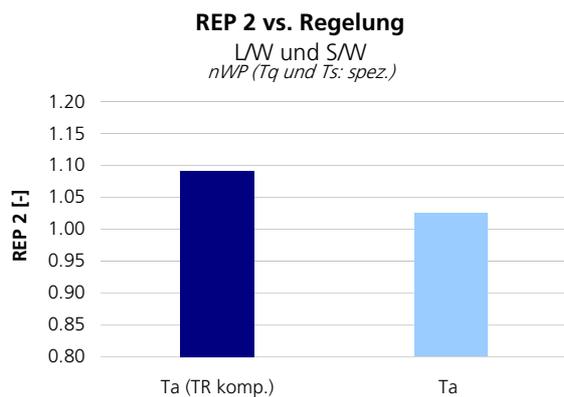


Abbildung 49: Die Regler mit Raumtemperaturkompensation zeigen bezüglich der REP einen Vorteil von 6.5% (CI: je  $\pm 5\%$ ).

Bei nahezu allen Anlagen ist diese Schalttemperatur aussentemperaturabhängig, d.h. es wird am Regler eine Funktion  $T_{RL}$  resp.  $T_{\text{Speicher}}$  vs.  $T_a$  definiert. Dadurch ist es möglich, die Rück- resp. die Vorlauftemperatur dem aussentemperaturabhängigen Heizleistungsbedarf anzupassen. Die Aussentemperatur ist zwar eine gute aber nicht ideale Führungsgrösse. Störfaktoren wie Sonnenschein und interne Wärmequellen führen zu Abweichungen von der angestrebten konstanten Raumtemperatur. Diese Störgrössen führen insbesondere bei Leichtbauten zu Raumtemperaturen über dem gewünschten Wert. Damit diese Abweichung möglichst gering bleibt, wird durch ca. 40% der Regler die aktuelle Raumtemperatur in einem Referenzraum erfasst. Liegt diese über dem Soll-Wert, wird entweder die Heizkurve nach unten verschoben oder einfach die WP ausgeschaltet. Dies führt im Mittel zu einer tieferen Vorlauftemperatur und es ist somit zu erwarten, dass die so geregelten Anlagen eine bessere JAZ aufweisen.

In der [Abb. 49](#) ist die REP der LW- und SW-Anlagen dargestellt. Die REP basieren auf nJAZ-Werte, bei denen der Einfluss der Wärmepumpe an sich und der Quelltemperatur eliminiert wurde. Dabei zeigt sich für die Anlagen mit Raumtemperaturaufschaltung ein mittlerer Vorteil von 6.5%. Dieser Effekt entspricht einer Reduktion der mittleren Vorlauftemperatur um etwa 4 K. Dieser Effekt kann nicht alleine durch die (teilweise) Eliminierung von Übertemperaturen durch Störgrössen (externe- und interne Lasten) erklärt werden. Eine Simulationsrechnung hat gezeigt, dass die Differenz zwischen einer korrekt eingestellten Heizkurve und einem idealen Regler nur zu einer Reduktion der mittleren Vorlauftemperatur um knapp 2.5 K führt. Der festgestellte Effekt ist deshalb wohl zu einem Teil auf nicht optimal eingestellte Heizkurven zurück zu führen. Ein weiteres Indiz für zu hoch eingestellte Heizkurven ist, dass Anlagen mit thermostatischer Einzelraumregulierung um 4 K höhere mittlere Vorlauftemperaturen aufweisen, wird nur die Gruppe der Neubauten verwendet, sind es immer noch gut 2 Kelvin. Dies kann so interpretiert werden, dass bei Einzelraumregelungen zu hoch eingestellte Heizkurven von den Nutzern nicht bemerkt, resp. korrigiert werden.

### 5.3.4 Betriebsart und Auslegung

Bei Luft/Wasser-Anlagen sinkt mit abnehmender Aussentemperatur die Wärmeleistung. Bei zwei Dritteln der von FAWA erfassten Anlagen sind aus diesem Grund häufig Elektroeinsätze eingebaut. Seit Projektbeginn (1994) ist dieser aber nur bei einem Drittel der so ausgerüsteten Anlagen je einmal in Betrieb gewesen und dies meist auch nur für wenige Stunden. Ob der Betrieb des Elektroeinsatzes in diesen Fällen auch tatsächlich notwendig war, kann aus den Daten nicht abgeleitet werden. Die Auslastungsdaten belegen, dass auch im monovalenten Betrieb kaum je

geleitet werden. Die Auslastungsdaten belegen, dass auch im monovalenten Betrieb kaum je eine Unterdeckung bezüglich des Wärmebedarfs stattgefunden hat.

Table 17: Links: Betriebsart der L/W-Anlagen mit deren Anteil an FAWA sowie die mittleren Jahresarbeitszahlen. Rechts: Betriebsdaten der Anlagen mit realem Betrieb des Elektroinsatzes.

Geplante Betriebsart der L/W-Anlagen	Anzahl [Stk.]	Anteil [%]	Auslastung <sup>a</sup> [%]	JAZ 2 [-]	Anlagen mit Betrieb des Elektroinsatzes (EE)	
monovalent <sup>b</sup>	37	38	66	2.74	Anlagen mit Betrieb des Elektroinsatzes (EE)	35 Stk.
monoenergetisch	47	48	72	2.67	Anteil des EE am max. Heizleistungsbedarf	40 %
bivalent	13	13	52	2.55	Mittlere Wärmemenge ab EE	359 kWh/a
<b>Total</b>	<b>97</b>	<b>100</b>			Mittlere Wärmemenge ab WP	24'008 kWh/a
					Anteil EE an Wärmeproduktion	1.5 %
					Auslastung (WP) dieser Anlagen bei Ta -8°C	77 %

<sup>a</sup>Bei Dimensionierungsbedingungen (Ta -8°C)

<sup>b</sup>Anlagen, bei welchen nicht ein zusätzlicher Erzeuger automatisch einschaltet

Mehr als 75% der Luft/Wasser-Anlagen funktionieren in der Praxis also monovalent, d.h. die Wärmepumpe deckt auch bei tiefen Aussentemperaturen den gesamten Heizleistungsbedarf ab.

Bei den Sole/Wasser-Anlagen wird der überwiegende Teil (88%) für monovalenten Betrieb geplant. Wie bei den Luft/Wasser beträgt der Anteil jener Anlagen, bei welchen der vorhandene Elektroinsatz je einmal betrieben wurde, einen Drittel.

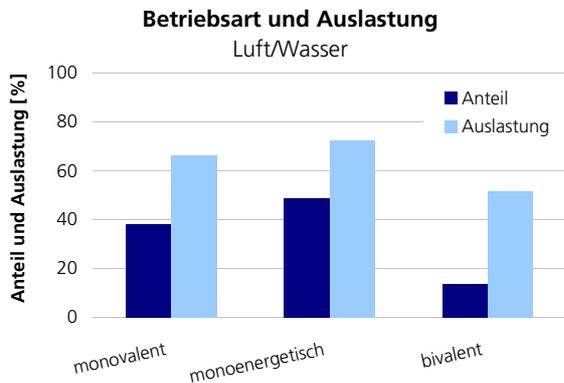


Abbildung 50: Geplante Betriebsart und gemessene Auslastung bei Auslegebedingungen der Luft/Wasser Anlagen.

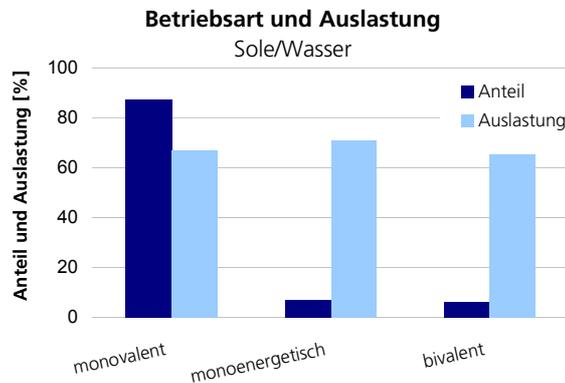


Abbildung 51: Geplante Betriebsart und gemessene Auslastung bei Auslegebedingungen der Sole/Wasser Anlagen.

Die Auslastung bei Auslegebedingungen beträgt bei den monovalent geplanten Anlagen beider Gruppen 66%. Mögliche Sperrzeiten sind dabei nicht berücksichtigt (vgl. Kap. 3.3.7).

In den beiden nachfolgenden Abbildungen ist die Verteilung der Auslastung bei Auslegebedingungen dargestellt und zwar für monovalent oder monoenergetisch geplante Anlagen. Neben dem insbesondere für S/W-Anlagen tiefen Mittelwert (0.68) ist auch die grosse Streuung von ca. 0.2 auffällig. Eine Erklärung, weshalb bei beiden Gruppen zwei lokale Maxima auftreten, konnte nicht gefunden werden. Diese sind möglicherweise auch rein zufällig.

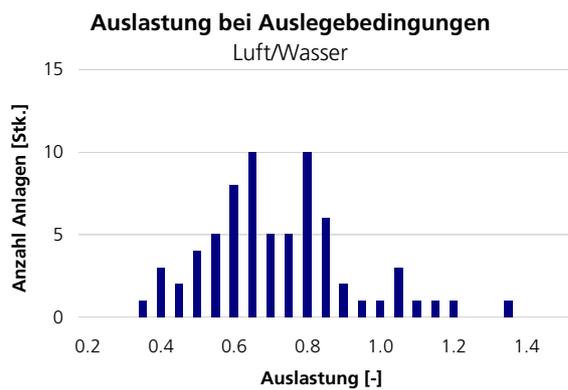


Abbildung 52: Die mittlere Auslastung der monovalent und monoenergetisch geplanten LW-Anlagen liegt bei 70% (SD 0.22).

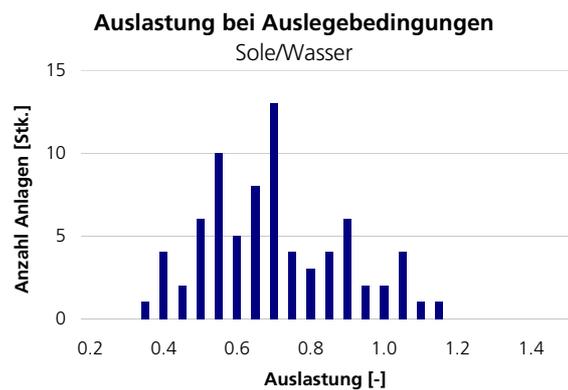


Abbildung 53: Die mittlere Auslastung der monovalent und monoenergetisch geplanten SW-Anlagen liegt bei 68% (SD 0.19).

Im Projekt Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen [2] wurden Planungshilfen ausgearbeitet, mit welchen Überdimensionierungen vermieden werden können.

### 5.3.5 Energiekennzahlen und Vorlauftemperaturen

Die von FAWA aus den gemessenen Jahresenergiebezügen errechneten Energiekennzahlen (EKZ) liegen bei den Neubauten im Mittel bei 260 MJ/m<sup>2</sup>, resp. 330 MJ/m<sup>2</sup> bei Sanierungsobjekten. Bei Sanierungsobjekten entspricht das Mittel der gemessenen EKZ exakt dem Planungswert, wobei der Messwert von Neubauten 6% über dem Planungswert liegt. In den Einzelfällen unterscheiden sich Planungs- und Messwerte teilweise erheblich (Abb. 54 und 55), was wohl primär durch das unterschiedliche Benutzerverhalten verursacht wird.

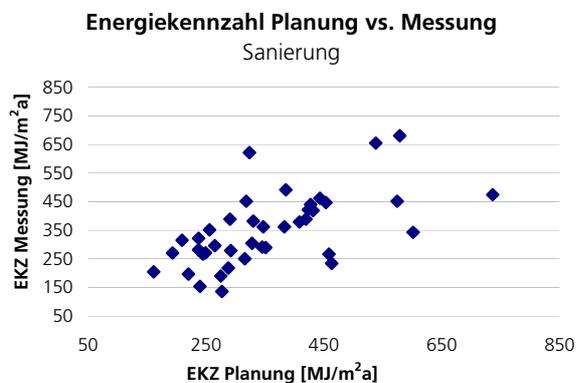


Abbildung 54: Bei Sanierungsobjekten entspricht im Mittel die gemessene EKZ genau dem Planungswert.

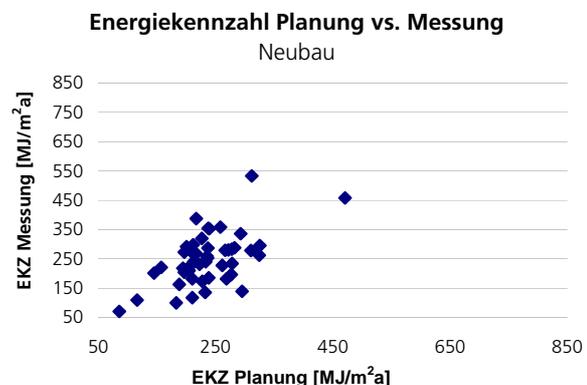


Abbildung 55: Im Mittel liegen bei Neubauten die Messwerte bezüglich der EKZ um 6% über dem Planungswert.

Es wäre nun zu erwarten, dass die Planungswerte bezüglich der Vorlauftemperatur bei Auslegebedingungen mit der Energiekennzahl korrelieren, d.h. dass Objekte mit niedrigerem flächenbezogenem Leistungsbedarf auch tiefere Temperaturen aufweisen würden. Wie die Abb. 56 und 57 aber zeigen, ist dem nicht so. Das Mittel der geplanten Vorlauftemperaturen (Auslegung) liegt bei Sanierungen bei 46°C und knapp 41°C bei Neubauten.

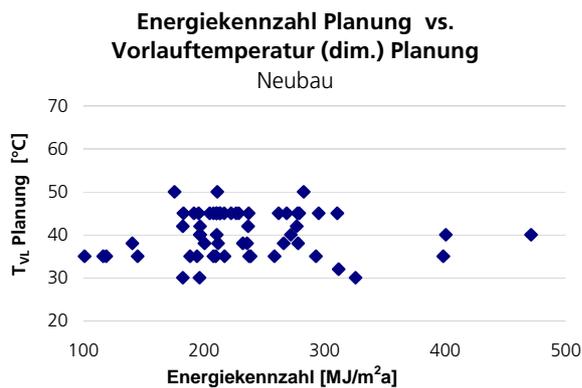


Abbildung 56: Planungswerte von Energiekennzahlen und Vorlauftemperaturen bei Neubauten korrelieren nicht. Das Mittel der Vorlauftemperatur liegt bei 41°C.

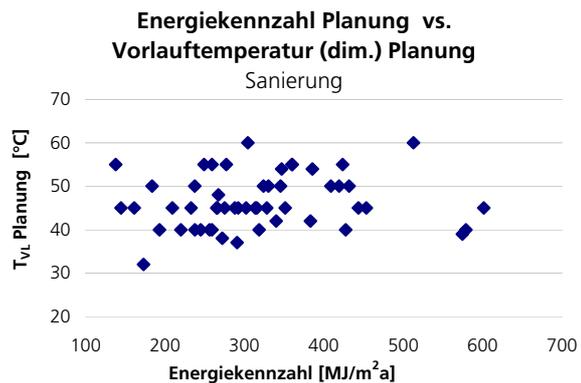


Abbildung 57: Planungswerte von Energiekennzahlen und Vorlauftemperaturen korrelieren auch bei Sanierungsobjekten nicht. Das Mittel der Vorlauftemperatur liegt bei 46°C.

Das Mittel der geplanten Vorlauftemperaturen bei Auslegebedingungen liegt im Mittel über alle Anlagen bei 43,0°C, der entsprechende Messwert beträgt 41,5°C. Geplante und gemessene Werte stimmen also recht gut überein.

Die Planungs- und Messwerte zeigten bis etwa 2000 einen Trend nach unten. Die letzten beiden Jahre liegen aber wieder deutlich höher. Ob dies eine zufällige Schwankung im Zusammenhang mit der Anlagenauswahl oder eine Trendumkehr ist, kann auf Basis der heute vorliegenden Daten nicht beurteilt werden.

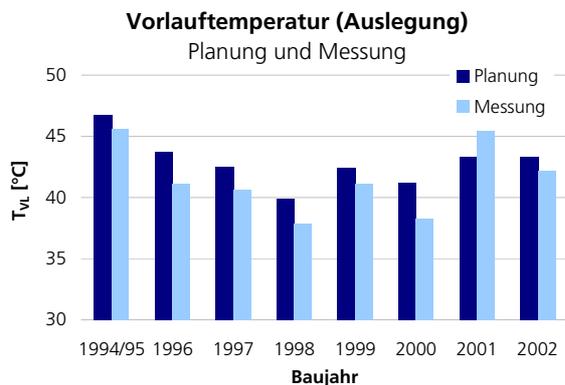


Abbildung 58: Geplante und gemessene Vorlauftemperaturen bei Auslegebedingungen stimmen recht gut überein.

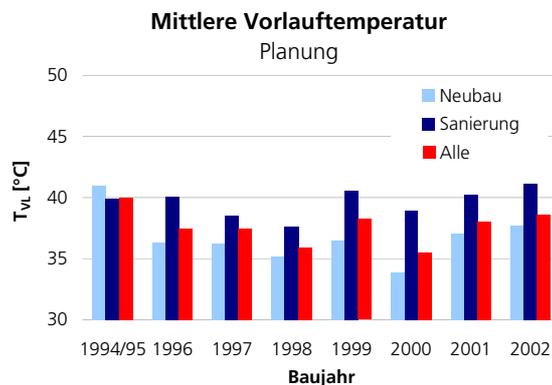


Abbildung 59: Für die JAZ ist insbesondere die mittlere Vorlauftemperatur über die Heizperiode relevant. Neubauten liegen diesbezüglich um 3 K tiefer.

Zur Beurteilung des Effekts der Vorlauftemperatur auf die energetische Effizienz ist die über die Heizperiode gemittelte Vorlauftemperatur (Abb. 59) zu betrachten. Der hier dargestellte Mittelwert entspricht der geplanten Temperatur (Annahme einer linearen Heizkurve) bei einer Aussentemperatur von 3°C. Im Mittel kann davon ausgegangen werden, dass sich der COP resp. die JAZ bei einer Absenkung der mittleren Vorlauftemperatur um ein Kelvin um 1,6% verbessert.

Wie zu erwarten, liegen die Vorlauftemperaturen bei Anlagen in Sanierungsobjekten über jenen in Neubauten. Im Mittel über alle Anlagenbaujahre beträgt die Differenz bei den Planungswerten 3 K. Die Messungen haben aber gezeigt, dass die realen Heizkurven flacher verlaufen, als geplant. Sanierungsobjekte unterscheiden sich deshalb bei Auslegungsbedingungen um gut 6 K und im Mittel um knapp 5 K von Anlagen in Neubauten. Die mittlere Temperatur beim Fusspunkt der Heizkurve beträgt 36,5°C. Dabei wurde angenommen, dass die Heizgrenze (Fusspunkt der

Heizkurve) bei einer Aussentemperatur von 14°C liegt. Dies bedeutet, dass die Vorlauftemperatur bei der Heizgrenze (36.5°C) nur um 5 K tiefer liegt als beim Auslegungspunkt (41.5°C). Wird angenommen, dass die minimal mögliche Vorlauftemperatur nach dem Verflüssiger an der Heizgrenze bei 30°C liegt (minimale Rücklauftemperatur = Raumtemperatur = 20°C plus Temperaturspreizung über dem Verflüssiger = 10 K), so reduziert sich die Übertemperatur bezüglich der Raumtemperatur (20°C) nur um knapp 40%. Bezüglich des Heizkurvenverlaufs bestehen grosse Differenzen zwischen den einzelnen Anlagen. Das Spektrum reicht von optimalen Verläufen bis hin zu deutlichem Ansteigen der Vorlauftemperatur mit steigender Aussentemperatur.

### 5.3.6 Warmwasser

Knapp die Hälfte der untersuchten Anlagen erwärmt zumindest teilweise auch das Brauchwarmwasser (WW). Ein Fünftel tut dies sogar zu 100%. Vergleicht man nun die JAZ von Anlagen mit und ohne WW-Bereitung, so zeigt sich im Durchschnitt über alle Anlagentypen, dass je grösser der Anteil der WP an der WW-Bereitung, desto besser die JAZ. Wird der Effekt der unterschiedlichen energetischen Qualität der Wärmepumpen durch Normierung eliminiert, schneiden alle Kategorien etwa gleich ab. Es ist hier zu beachten, dass bei den FAWA-Anlagen der Warmwasseranteil am gesamten Wärmebedarf nur ca. 20% beträgt.

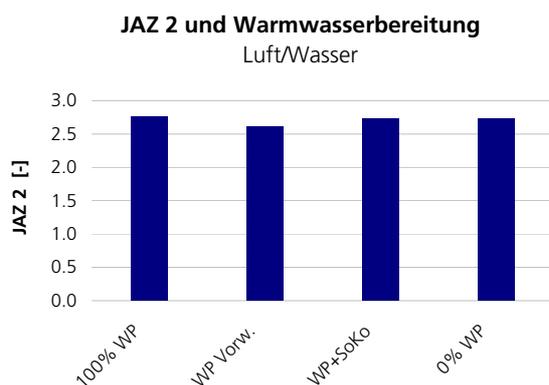


Abbildung 60: JAZ von LW-Anlagen, welche das Warmwasser mit der WP zu 100%, teilweise, in Kombination mit Sonnenkollektoren oder zu 0% bereitstellen.

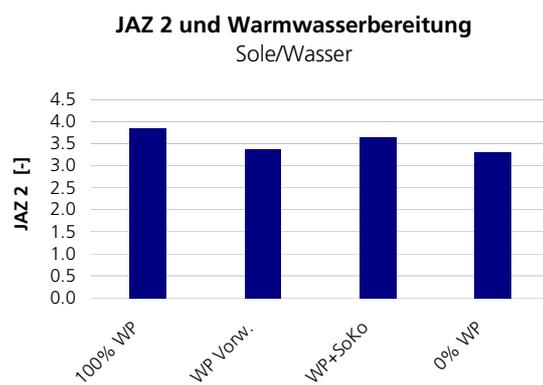


Abbildung 61: JAZ von SW-Anlagen, welche das Warmwasser mit der WP zu 100%, teilweise, in Kombination mit Sonnenkollektoren oder zu 0% bereitstellen.

Für die Beurteilung entscheidender als die JAZ ist jedoch der Systemnutzungsgrad (SNG), welcher die erzeugte Wärmemenge für Raumheizung und Warmwasser in Beziehung zum totalen Stromverbrauch der Anlage, inkl. Elektroboiler, setzt (Abb. 62). Hier zeigt sich klar der Vorteil einer Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpe, im Mittel aller Anlagen liegt der SNG der Warmwassersysteme 50% über dem SNG mit elektrischer Warmwasserbereitung.

$$SNG = \frac{Q_{\text{Heiz}} + Q_{\text{BWW}}}{\sum E_{\text{el}}} \quad (28)$$

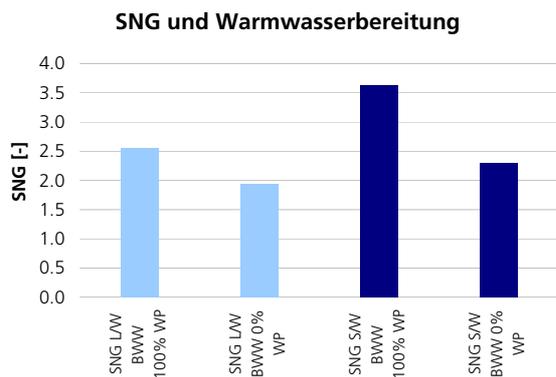


Abbildung 62: Systemnutzungsgrad (SNG) von LW- und SW-Anlagen, welche das Warmwasser zu 100% resp. zu 0% (Elektroboiler) bereitstellen.

In einem zweiten Schritt soll nun geklärt werden, welche Systeme sich zur Warmwasserbereitung besonders eignen. Dabei interessieren grundsätzlich die energetische Qualität des Ladevorgangs und die erzielte Warmwassertemperatur. In FAWA wurde primär der Frage nach den Vorlauftemperaturen während des Ladevorgangs nachgegangen, da diese von grosser Bedeutung für die energetische Effizienz sind. Dazu wurden die mit Datenlogger aufgezeichneten Vorlauftemperaturen anhand ihres Verlaufs der Raumheizung resp. der Warmwasserbereitung zugeordnet. Übergangsintervalle (Raumheizung und Warmwasser) wurden dabei nicht berücksichtigt. In [Abb. 63](#) und [64](#) sind die mittleren Temperaturen aus dem Start- resp. Endintervall für verschiedene Warmwassersysteme dargestellt.

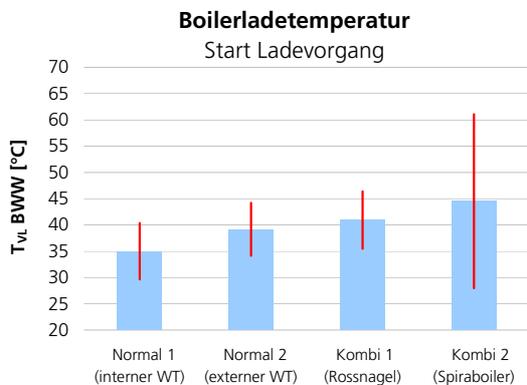


Abbildung 63: Mittlere Vorlauftemperatur und SD im Aufzeichnungsintervall, in welchem die Boilerladung beginnt. Mit Normal sind separate Boiler mit internem oder externem Wärmetauscher bezeichnet.

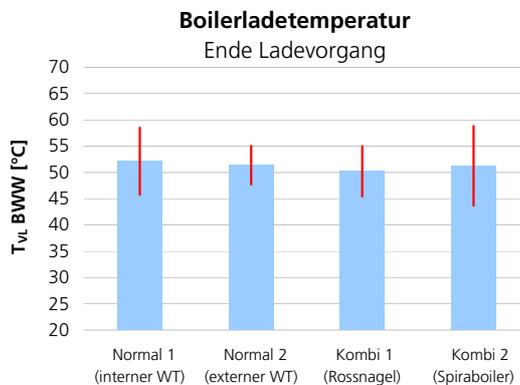


Abbildung 64: Mittlere Vorlauftemperatur und SD im Aufzeichnungsintervall, in welchem die Boilerladung endet.

Mit Normal 1 und 2 sind hier separate Boiler mit internem resp. externem Wärmetauscher bezeichnet. Rossnagel- und Spiraboiler sind Kombispeicher, d.h. Speicher in Speicher Systeme (vgl. [Abb. 65](#)). Das Brauchwarmwasser wird bei diesen durch das sie umgebende Wasser aufgeheizt. Rossnagel steht für Boiler, die sich im oberen Teil des Wärmespeichers befinden. Sie besitzen einen Fortsatz, der bis in den unteren Teil des Speichers reicht. Dieser dient der Vorwärmung des Warmwassers. Spiraboiler bestehen aus einem spiralförmigen Rippenrohrwärmetauscher, der sich über die gesamte Höhe des Speichers erstreckt.

Normal 1 (innenliegender Wärmetauscher)

Normal 2 (ausenliegender Wärmetauscher)

Rossnagel-Kombispeicher

Spira-Kombispeicher

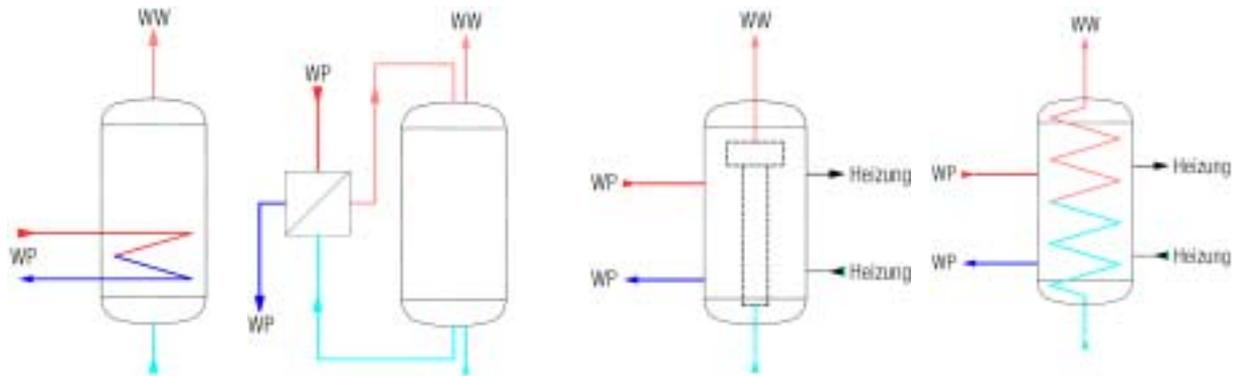


Abbildung 65: Die verschiedenen Warmwassersysteme, die bezüglich der Ladetemperaturen untersucht wurden. Die mit Normal 1 und 2 bezeichneten Typen sind reine Brauchwarmwasserboiler. Rossnagel und Spira sind Kombispeicher, welche als technische Speicher für die WP und auch als Speicher für Energie aus Solaranlagen oder Holzöfen dienen können.

Bezüglich der Ladeendtemperaturen unterscheiden sich die Systeme kaum. Alle liegen hier bei ca. 50°C. Bei Anlagen mit geeigneten Kältemittel/Verdichter-Kombinationen wurden auch deutlich höhere Temperaturen gemessen. Hingegen sind sehr deutliche Unterschiede in den Starttemperaturen festzustellen. Die tiefsten Starttemperaturen wurden bei Normal 1 Systemen gemessen. Mit 35°C liegen sie 10 K unter den Spiraboilern. Entsprechend weisen sie auch die tiefsten mittleren Ladetemperaturen auf. Die grosse Standardabweichung bei den Spiraboilern deutet schon darauf hin, dass hier nur wenige (2) Systeme gemessen wurden und der Wert deshalb mit einer grossen Unsicherheit behaftet ist.

Die zapfseitigen Warmwassertemperaturen wurden in Einzelfällen ebenfalls gemessen. Dabei zeigte sich, dass die Rossnagel- und Spiraboiler deutlich unter den Werten der Normal-Systeme liegen. In einzelnen Fällen ergaben sich daraus auch Reklamationen der Nutzer.

Bei den sehr häufig eingesetzten Normal 1 Systemen wurde nun die Frage der Dimensionierung noch genauer angeschaut. Dabei zeigt sich erwartungsgemäss ein starker Zusammenhang zwischen Dimensionierung und mittlerer Ladetemperatur, d.h. energetischer Effizienz. Überdimensionierte Boiler weisen viel höhere mittlere Ladetemperaturen auf, als solche, die dem Bedarf angepasst sind. Grund dafür ist, dass die Boiler in der Regel einmal pro Tag auf die Solltemperatur aufgeheizt werden. Normalerweise wird dabei der Boilerinhalt kurz nach Beginn des Ladevorgangs vollständig durchmischt. Je grösser die Restladung im Boiler, desto höher die resultierende Durchmischungstemperatur und somit auch die mittlere Ladetemperatur. Zu erwähnen bleiben die hier nicht näher untersuchten Speicherverluste, die bei zu grossen Boilern ebenfalls grösser als notwendig ausfallen.

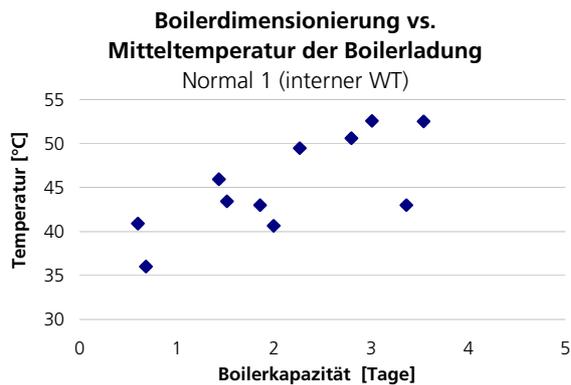


Abbildung 66: Zu gross dimensionierte Boiler haben nicht nur höhere Speicherverluste, sondern verursachen auch viel höhere Ladetemperaturen.

### 5.3.7 Speichereinbindung

Die meisten Anlagen werden mit einem technischen Speicher ausgerüstet. Von der Branche werden dafür folgende Gründe angegeben:

- **Hydraulische Entkoppelung:** Mit parallel eingebundenem Speicher kann die Wärmepumpe von der Abgabeseite hydraulisch entkoppelt werden. Nötig wird dies, wenn der abgabeseitige Volumenstrom stark von jenem über dem Verflüssiger abweichen kann. Dies ist beispielsweise beim Einsatz von thermostatischen Einzelraumregelungen (Thermostatventile) der Fall, insbesondere wenn ein grosser Teil der Abgabefläche, resp. des Volumenstroms, auf diese Weise geregelt wird. Als Alternative zur Speicherlösung werden auch Überströmventile eingesetzt. Durch eine hydraulische Entkoppelung können auch Verantwortlichkeiten zwischen Unternehmern (WP-Lieferanten und Installateuren) klar getrennt werden. Bei einigen Produkten sind Speicher fester Bestandteil des Regelkonzepts.
- **Erhöhung der Trägheit:** Insbesondere wenn abgabeseitig wenig Masse vorhanden ist (Radiatoren), werden Speicher zur Erhöhung der Systemträgheit eingesetzt. Damit soll hauptsächlich das Takten der Verdichter verhindert werden (vgl. [Kap. 5.3.7](#)).
- **Inbetriebnahme:** Luft/Wasser-Maschinen mit Umkehrabtauung lassen sich bei tiefen Aussen- und gleichzeitig tiefen Rücklauftemperaturen nicht in Betrieb nehmen. Um die Rücklauftemperatur anzuheben, wird ein Seriespeicher mit Elektroinsatz eingebaut.
- **Wärmespeicher:** Sehr selten werden Speicher zur Speicherung von Wärme über mehrere Stunden, z.B. um Niedertarifzeiten zunutzen, verwendet.

Die JAZ 2 Daten ([Abb. 67](#) und [68](#)) zeigen, dass Anlagen mit Speicher im Mittel tiefere Werte aufweisen und zwar insbesondere bei den Sole/Wasser-Anlagen. Bei der wärmepumpennormierten nJAZ wird die Differenz geringer.

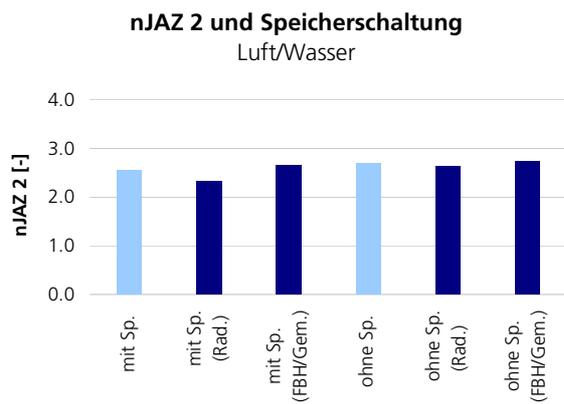


Abbildung 67: LW-Anlagen ohne Speicher weisen eine leicht bessere JAZ auf.

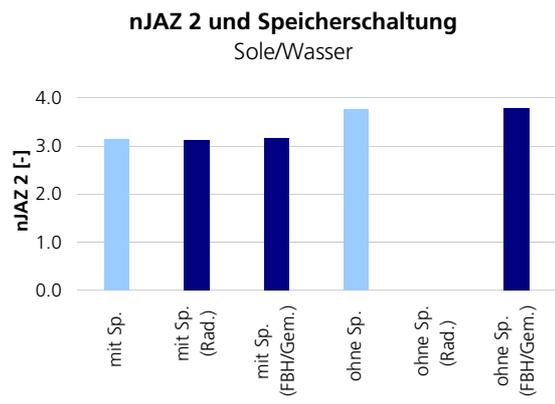


Abbildung 68: SW-Anlagen ohne Speicher haben eine deutlich besser JAZ.

Auch die Zahl der Ein-/Ausschaltzyklen ist bei Anlagen mit Speicher kaum geringer (Abb. 71 und 72).

Wie die WW- ist auch die Speicher-Einbindung kein Faktor, der die REP in einem relevanten Mass beeinflussen würde. In den Abb. 69 und 70, in welchen der Einfluss des WP-Aggregats eliminiert wurde, zeigen sich kaum Differenzen zwischen Anlagen mit und ohne Speicher.

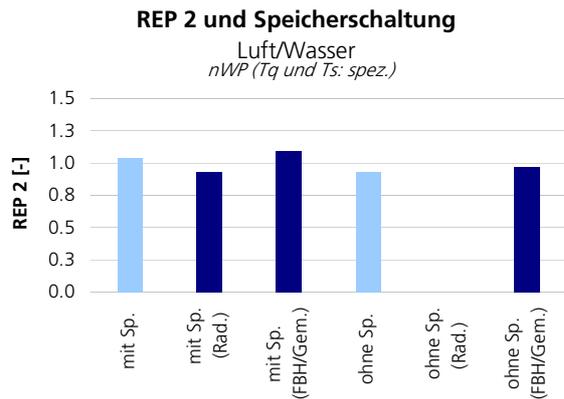


Abbildung 69: Bezüglich der REP sind zwischen LW-Anlagen mit oder ohne Speicher kaum Differenzen festzustellen.

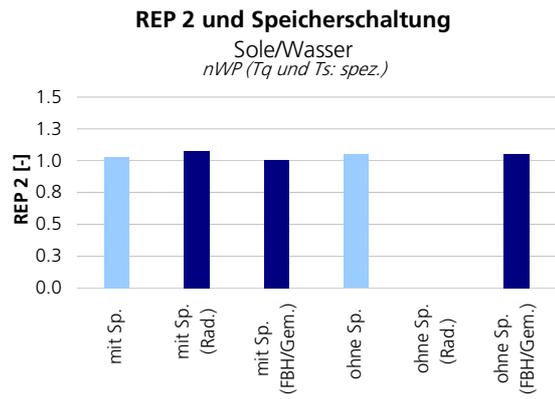


Abbildung 70: Bei SW- zeigt sich wie bei den LW-Anlagen kaum ein Unterschied zw. Anlagen mit und ohne Speicher.

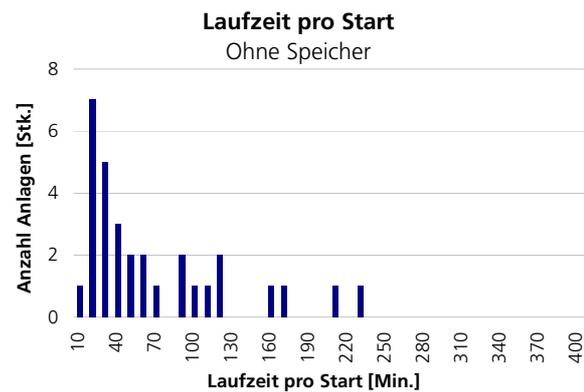
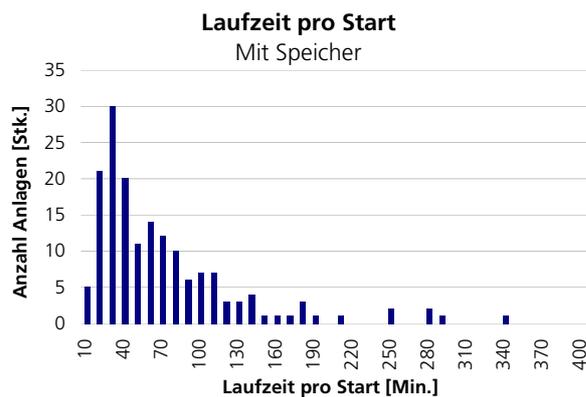


Abbildung 71: Anlagen mit Speicher weisen mittlere Laufzeiten auf, wie sie auch bei den Speicherlosen gemessen wurden.

Abbildung 72: Anlagen ohne Speicher laufen im Mittel ähnlich lange wie Anlagen mit Speicher.

m/ Speicher	Alle	L/W	S/W	o/ Speicher	Alle	L/W	S/W
LZ [Min./Start]	65	54	79	LZ [Min./Start]	63	42	72
Anlagen [Stk.]	167	87	66	Anlagen [Stk.]	31	8	14
SD [Min.]	59	48	66	SD [Min.]	59	46	75
CI [Min.]	9	10	16	CI [Min.]	22	38	43

### 5.3.8 Erdwärmesonden

Das Ziel der folgenden Analysen ist es, Erklärungen für die im Vergleich zu den L/W-Anlagen grosse Streuung der Jahresarbeitszahlen bei den S/W-Anlagen zu finden. Die beiden Anlagentypen unterscheiden sich primär durch die Wärmequelle, also sollten die Eigenschaften der Erdwärmesondensysteme (inkl. Verbindungsleitungen und Umwälzpumpe) zumindest einen Teil der Streuung erklären können. Im Folgenden werden deshalb die relevanten Erdwärmesondereigenschaften und Betriebsdaten auf Korrelationen untersucht. In den Graphiken sind jeweils auch die entsprechenden physikalisch zu erwartenden Zusammenhänge als Regressionsgeraden aufgetragen. Sie werden jeweils als „Modell“ bezeichnet und basieren auf einer Sensitivitätsanalyse, die mit dem Programm EWS [6] durchgeführt wurde (vgl. Anhang). In der nachstehenden Tabelle sind die Standardwerte enthalten, die bei der Sensitivitätsanalyse verwendet wurden. Sie entsprechen, soweit bekannt, ungefähr den in FAWA gemessenen Mittelwerten.

Tabelle 18: Konstanten bei der Sensitivitätsanalyse. Die jeweiligen Werte gelten natürlich nur für die Fälle, bei denen nicht gerade der entsprechende Parameter untersucht wurde.

Mittlere Ta	8.4 °C
Sondenlänge	120 m
$\lambda_{ER}$	2.0 W/m-K
$\lambda_{HF}$	0.8 W/m-K
Energieentzug	9'600 kWh/a

#### 5.3.8.1 Anlagenpark

##### Heutige Auslegegrössen

Die heutige Praxis geht bei der Sondendimensionierung von einem Zusammenhang aus, der bei tiefer Sondenbelastung (Entzugskälteleistung pro Sondenmeter) eine hohe Jahresarbeitszahl er-

warten liesse. Werden die entsprechenden in FAWA gemessenen Grössen einander gegenüber gestellt ([Abb. 73](#)), so kann dieser Zusammenhang nicht bestätigt werden. Dies bedeutet aber nicht, dass im Einzelfall eine schwächere Sondenbelastung nicht zu einer Verbesserung der JAZ führen kann. Da sich aber die FAWA-Anlagen nicht nur bezüglich der Sondenbelastung unterscheiden, wird der erwartete Effekt wohl durch die anderen Variablen überdeckt. Interessant ist auch, dass kaum eine Korrelation zwischen Sondenentzugsleistung (Kälteleistung pro Sondenmeter, also der heutigen Dimensionierungsgrösse) und gemessener Sondenbelastung (pro Sondenmeter real entzogene Energiemenge) besteht. Der Grund dafür ist wohl, dass die Aggregatsleistung stark vom realen Leistungs- und damit Energiebedarf abweicht (vgl. Auslastung in [Abb. 53](#)). Daraus ergibt sich entsprechend eine grosse Streuung bei der Entzugsenergie pro Sondenlänge. Letzteres wäre aber energetisch betrachtet bei monovalenten Anlagen die bessere Dimensionierungsgrösse als die spezifische Sondenentzugsleistung. Dies wird in den [Abbildungen 79](#) und [80](#) bestätigt, wo zwar ein Zusammenhang zwischen spezifischer Sondenentzugsleistung und Soletemperatur nicht aber zwischen spezifischer Sondenentzugsleistung und Soletemperatur nachgewiesen wird.

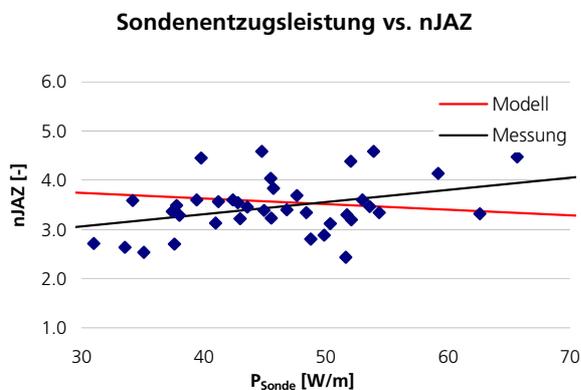


Abbildung 73: Die gemessene Sondenentzugsleistung korreliert „verkehrt“ mit der Jahresarbeitszahl.

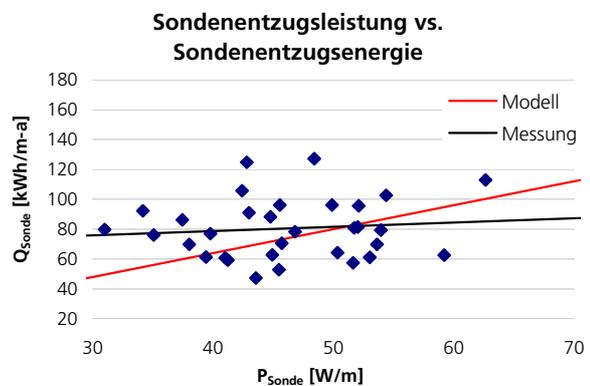


Abbildung 74: Wegen der sehr unterschiedlichen Auslegung der Aggregate korreliert die Sondenentzugsenergie kaum mit der Sondenentzugsleistung. Die Modelldaten beruhen auf einer konstanten Laufzeit der Wärmepumpe.

### Bohrprofile

Bei 79 der in FAWA untersuchten SW-Anlagen konnten Bohrprofile beschafft werden. Die Unterlagen wurden insbesondere bezüglich der gefundenen Untergrundstypen ausgewertet. Darauf basierend konnte die mittlere Wärmeleitfähigkeit der Sondenumgebung berechnet werden. Im Mittel liegt der Wert bei genau 2.0 W/m-K, im Mittelland wird im Allgemeinen von Werten zwischen 2.2 und 2.5 W/m-K ausgegangen.

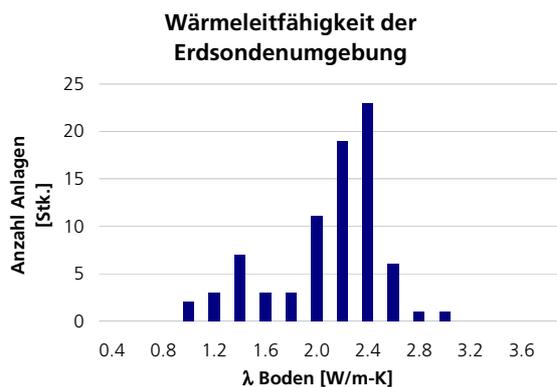


Abbildung 75: Histogramm der Wärmeleitfähigkeit aus den Bohrprofilen von FAWA Erdwärmesondenanlagen.

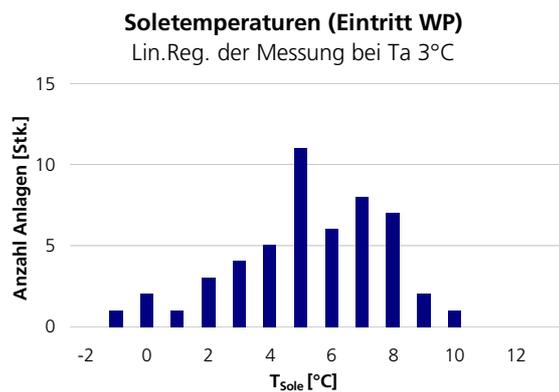


Abbildung 76: Histogramm der Soletemperaturen vor dem Eintritt in die WP. Die Daten wurden zu verschiedenen Zeitpunkten in der Heizperiode gemessen. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit wurde deshalb eine lineare Regression mit der Aussen-temperatur durchgeführt und hier der Wert bei  $T_a$  3°C verwendet.

### JAZ und Soletemperatur

Zurzeit liegen von 45 Anlagen repräsentative Messungen bezüglich der Soletemperatur vor (Abb. 76), ihr Mittel liegt bei knapp 5°C (SD 2.5 K, CI  $\pm 0.7$  K). Die grosse Streuung weist auf die sehr unterschiedliche energetische Qualität der Gesamtsysteme (Sonde-Hinterfüllung-Erdreich) hin.

Die Soletemperaturen zeigen eine der Erwartung (Modell) entsprechende Korrelation mit der REP2. Wie in Kap. 3.4.3 (Fall c) beschrieben, entsprechen die hier dargestellten REP einer auf 1 normierten JAZ, in welchen die Effekte von unterschiedlichen Maschinen und Senkentemperaturen eliminiert wurden. Somit verbleiben als Variablen noch die Quellentemperaturen und Abweichungen der realen Maschine zum WP-Modell. Eigentlich wäre eine Steigung von ca. + 2.5% zu erwarten gewesen, d.h. mit dem Anstieg der Soletemperatur um ein Kelvin verbessert sich die JAZ um 2.5%. Die REP2-Daten in Abb. 77 zeigen eine Steigung von 2.1% ( $r$  0.34), also leicht tiefer als erwartet.

In der Abb. 78 wurden die Maschineneffekte auch noch aus den REP eliminiert und zwar, in dem diese mit den Quotienten aus Mess- zu Erwartungswerten (vgl. Kap. 3.4.4) dividiert wurden. Erwartungsgemäss wird die Korrelation mit den Soletemperaturen nun besser ( $r$  0.51) und die Steigung entspricht exakt dem Erwartungswert 2.5% pro Kelvin Soletemperatur.

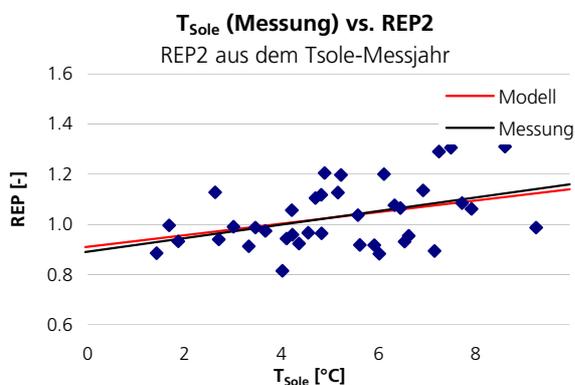


Abbildung 77: Die gemessene Soletemperatur zeigt den erwarteten Verlauf (Steigung Messung: 2.1%, Modell: 2.5%).

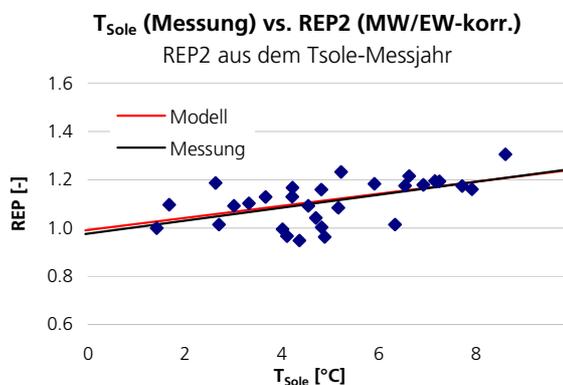


Abbildung 78: Die gemessene Soletemperatur zeigt den erwarteten Verlauf (Steigung Messung: 2.5%, Modell: 2.5%).

### Soletemperatur vs. Nutzung und Geologie

Die Messungen wurden durchschnittlich nach 2.0 Betriebsjahren (SD 1 Jahr) durchgeführt. Im Mittel liegt die gemessene Soletemperatur bei 4.8°C, das Maximum liegt bei knapp 9°C und das Minimum bei -1.5°C. Für diese beiden Extrema ist aufgrund der  $T_{\text{Sole}}$ -Differenz ein Unterschied bezüglich der JAZ von knapp 30% zu erwarten. Es stellt sich nun die Frage, welche Parameter zu solch grossen Differenzen führen.

Die dem Erdreich pro Meter Sonde entzogene Energie korreliert einigermaßen ( $r -0.4$ ) mit  $T_{\text{Sole}}$  (Abb. 79). Die Steigung einer linearen Regressionsgerade ist mit  $-0.04 \text{ K/(kWh/m)}$  erwartungsgemäss negativ, d.h. je höher die Sondenbelastung, desto tiefer die resultierende Soletemperatur. Deutlich schlechter ist die Korrelation bei der in der Abb. 80 dargestellten Beziehung zur spezifischen Sondenentzugsleistung ( $r -0.05$ ). Diese Verhältnisse machen deutlich, dass die Entzugsenergie die bessere Dimensionierungsgrösse für die Sondenlänge ist, als die spezifische Sondenentzugsleistung. Hauptgrund dafür ist, dass die Entzugsenergie kaum mit der spezifischen Sondenentzugsleistung korreliert, sprich die Wärmepumpen häufig nicht korrekt dem Leistungsbedarf angepasst sind (Überdimensionierung).

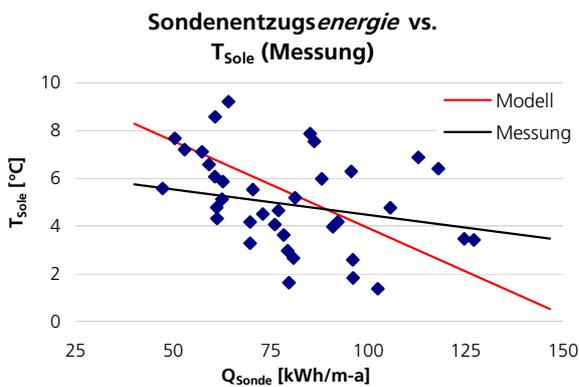


Abbildung 79: Die der Erdwärmesonde pro Meter und Jahr entzogene Wärmemenge korreliert zwar im erwarteten Sinn mit der Soletemperatur, doch ist der Korrelationskoeffizient ( $r -0.2$ ) eher tief.

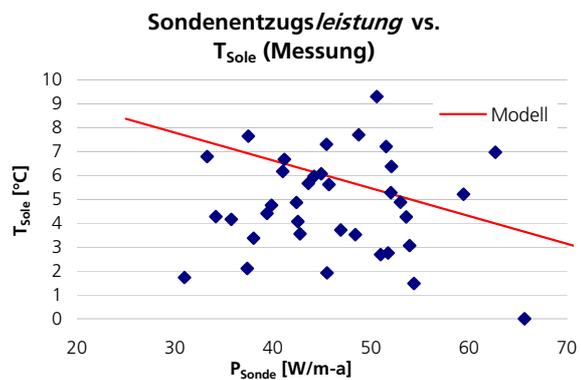


Abbildung 80: Die spezifische Sondenentzugsleistung korreliert nicht mit der Soletemperatur ( $r 0.02$ ). Der wohl zufällige Verlauf der Regressionsgerade widerspricht der Erwartung (Modell).

Der gemessene Mittelwert der spezifischen Sondenentzugsleistung pro Meter Erdwärmesonde (Abb. 81) beträgt 48 W, die Streuung ist aber relativ hoch (SD 28%).

Abb. 82 zeigt, dass die Sondentiefe einigermaßen mit der  $T_{\text{Sole}}$  korreliert ( $r 0.41$ ). Interessant ist dabei auch, dass die Steigung im Mittel recht gut dem Wert der geologischen Tiefenstufe entspricht.

Die geologische Tiefenstufe beschreibt die Zunahme der ungestörten Erdreichtemperatur pro 100 m, welche im Schweizerischen Mittelland bei 2.5 bis 4.0 K (Modell: 3.3 K) liegt. Die Steigung der gemessenen Daten in Abb. 82 liegt bei 4.4 K/100m, bezogen auf die mittlere Sondentiefe (0.5 x Sondentiefe).

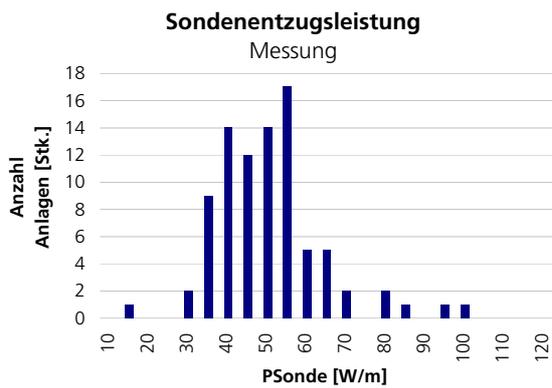


Abbildung 81: Im Mittel liegt die spezifische Sondenentzugsleistung pro Meter Sonde mit 48 W/m sehr nahe bei empfohlenen Wert von 50 W/m. Die Streuung ist mit 28% aber relativ hoch.

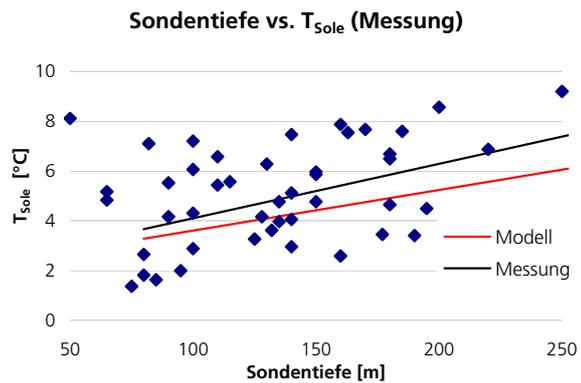


Abbildung 82: Die  $T_{\text{sole}}$  nimmt mit der Tiefe der Sonde erwartungsgemäss zu ( $r$  0.41).

In Abb. 83 sind die Resultate der Soletemperatursimulationen (Programm EWS [6]) den gemessenen Werten gegenübergestellt. Alle  $T_{\text{sole}}$ -Mess- und Simulationswerte sind Jahresmittel, d.h. sie entsprechen der für die JAZ relevanten Grösse.

Grundsätzlich ist die Korrelation der beiden Datensätze gut ( $r$  0.62), d.h. die verwendeten Informationen bezüglich Beschaffenheit und Betrieb der Erdwärmesondensysteme erklären die gemessene Soletemperaturen hinreichend. Die jeweiligen Mittelwerte sind mit je 5.0 K identisch.

Es fällt aber auf, dass die Steigung bei nur 0.5 (Erwartungswert: 1.0) liegt und der Y-Achsenabschnitt 3°C (Erwartungswert: 0°C) beträgt. Dies bedeutet, dass im unteren Temperaturbereich die Messwerte tendenziell über der Simulation und im oberen Bereich unter der Simulation liegen. Die Soletemperaturen können in drei Gruppen gegliedert werden:

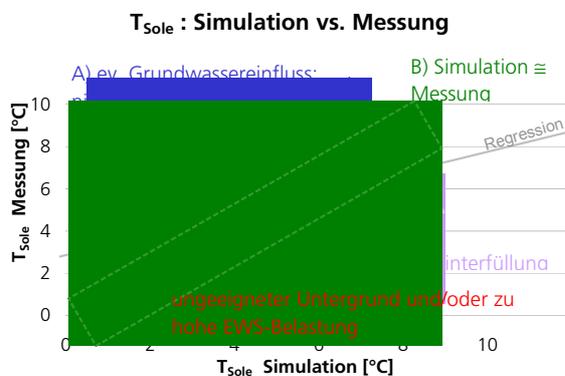


Abbildung 83: Die Korrelation von Simulation- und Messwerten ist recht gut ( $r$  0.5), hingegen liegt die Steigung Regressionsgerade bei nur 0.5 und der Achsenabschnitt bei 2°C.

#### A) Messung > Simulation

Bei 20% der Anlagen liegt der Messwert mehr als 2K über dem Simulationswert. Mit grosser Wahrscheinlichkeit führt hier Grundwasser zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs, als die Daten im Bohrprotokoll erwarten lassen. Interessanterweise wurde in Protokollen kaum Grundwasservorkommen erwähnt, und somit beruhen alle Simulationen auf trockenem Untergrund.

#### B) Messung ≅ Simulation

Bei 60% der Anlagen beträgt die Differenz zw. Messung und Simulation weniger als  $\pm 2$  K,

und somit kann davon ausgegangen werden, dass hier keine unbekanntenen Faktoren einen relevanten Einfluss auf die Soletemperatur haben.

### C) Messung < Simulation

Für diese 20% der Fälle können nur Vermutungen über die Ursachen der real zu tiefen Soletemperaturen angestellt werden. Möglich ist, dass die Hinterfüllung keinen optimalen Kontakt zwischen Sonde und Umgebung herstellt, aber auch, dass die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Erdreichs nicht den Werten entspricht, wie sie aus den Bohrprotokollen abgeleitet wurden.

Drei Anlagen weisen mittlere Soletemperaturen  $< 2^{\circ}\text{C}$  auf. Bei zwei dieser Anlagen war dies auch zu erwarten (Simulationswert ebenfalls tief), da bei beiden eine hohe Belastung der Sonde (96 resp. 103 kWh/m Sondenlänge) bei gleichzeitig schlechtem Untergrund ( $\lambda < 1.4 \text{ W/m-K}$ ) festgestellt wurde. Bei der dritten Anlage liegt der Simulationswert 3.5 K über dem Messwert, es kann deshalb angenommen werden, dass hier möglicherweise ein Problem mit der Hinterfüllung vorliegt.

### Solepumpen

An dieser Stelle soll ergänzend erwähnt werden, dass bei der Dimensionierung der Solepumpen kaum ein standardisiertes Verfahren angewendet wird. Entsprechend streuen die Pumpenaufnahmeleistungen pro Meter Erdwärmesonde sehr stark. Im Mittel liegt die Aufnahmeleistung bei knapp 2 W/m mit einer SD von 47%. Der Anteil der Stromaufnahme der Solepumpe an der mittleren Aufnahmeleistung des Wärmepumpenaggregats liegt bei 13%, wobei Werte bis 37% gemessen wurden.

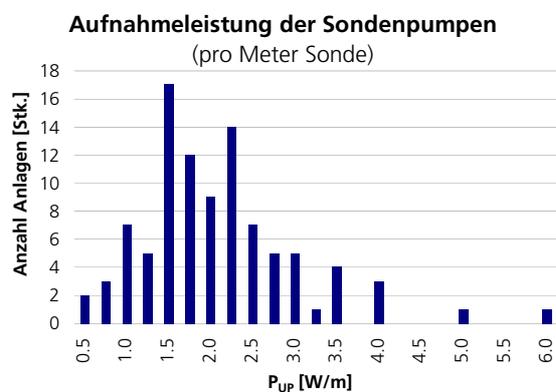


Abbildung 84: Die relativen Aufnahmeleistungen der Solepumpen streuen extrem stark. Hier liegt mit Sicherheit ein beträchtliches Optimierungspotential.

### 5.3.8.2 Fallstudien

Die im vorangehenden Kapitel beschriebenen Vergleiche zwischen Mess- und Simulationswerte der Soletemperaturen werden hier anhand von fünf Fallbeispielen dokumentiert. Die gewählten Anlagen decken bezüglich der  $T_{\text{sole}}$  den gesamten Bereich von sehr hohen bis sehr tiefen Werten ab (Tab. 19). Zusätzlich wird durch Parametervariation versucht, die festgestellten Abweichungen plausibel zu erklären.

Tabella 19: Überblick über Anlagen- und Betriebskenngrößen der untersuchten Anlagen. In den mit „Messung“ bezeichneten Spalten sind die realen Eigenschaften resp. Messresultate dargestellt.  $\lambda_{ER}$  steht für die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs (Bohrprofil), Energie ist die jährlich dem Boden entzogene Wärmemenge pro Sondenmeter und Jahr steht für die Anzahl Betriebsjahre vor der Messung. Die  $T_{Sole}$  wurde aus einer ca. einen Monat dauernden Messung ermittelt (Messwerte sind mit der Wärmemenge gewichtet).

Anlage		Messung						
Nr.	Baujahr	$\lambda_{ER}$	Länge Sonde	Anzahl Sonde	Energie Sonde	Jahr	Monat Periode	$T_{Sole}$ Periode
		[W/m-K]	[m]	[Stk.]	[kWh/m]	[-]	[-]	[°C]
1	1996	2.12	220	1	115	2	Dez.	6.8
2	1996	2.28	220	2	75	2	Nov.-Dez.	6.4
3	2000	1.96	128	1	75	1	Feb.	4.9
4	1998	1.96	150	2	107	2	Feb.-März	1.4
5	2000	0.87	120	2	53	1	Feb.-März	0.2
Mittelwert		1.84	168	1.6	85	1.6		3.9

In Tab. 20 und 21 resp. Abb. 85 sind die Messwerte den Simulationsresultaten gegenüber gestellt. In der Simulation 'Standard' wurde mit dem auf dem Bohrprofil basierenden Wert für die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ( $\lambda_{ER}$ ) gerechnet. Die Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung ( $\lambda_{HF}$ ) wurde auf dem EWS-Default-Wert von 0.81 W/m-K belassen, ein Wert, der einer üblichen Zement-Bentonit Hinterfüllung entspricht. Das EWS-Resultat entspricht jeweils genau der Periode, die auch gemessen wurde (Betriebsjahr und Monat).

Mit einer Ausnahme sind die realen Temperaturen höher als die Simulationsresultate, was wohl eher ein zufälliges Ergebnis ist. Die Ausnahme ist eine Anlage, bei der kein Bohrprofil vorhanden war und deshalb nur Aussagen des Bohrmeisters als Grundlage für die Berechnung des  $\lambda_{ER}$  verwendet werden konnten.

Tabella 20: Vergleich der Betriebskenngrößen aus Messung und Simulationen. Die Resultate der EWS-Berechnungen basieren auf den Anlagenkenngrößen. Bei 'Standard' wurde das  $\lambda_{HF}$  auf einen üblichen Standard-Wert gesetzt ( $\lambda_{HF}$  0.81 W/m-K). Für die Variante 1 der Simulation wurde  $\lambda_{HF}$  so weit verändert, bis die  $T_{Sole}$  aus Messung und Simulation möglichst übereinstimmten, maximal aber auf 4 W/m-K. Mit  $dT_{Sole}$  ist die Differenz zwischen Simulation und Messung bezeichnet.

Anlage		Messung		Simulation (EWS)					
Nr.	Baujahr	$\lambda_{ER}$	$T_{Sole}$ Periode	$T_{Sole}$ Standard	$dT_{Sole}$ Standard	$\lambda_{HF}$ Var1	$\lambda_{ER}$ Var1	$T_{Sole}$ Var1	$dT_{Sole}$ Var1
		[W/m-K]	[°C]	[°C]	[K]	[W/m-K]	[W/m-K]	[°C]	[K]
1	1996	2.12	<b>6.8</b>	2.8	<b>-4.0</b>	<b>4.00</b>	2.12	4.4	<b>-2.4</b>
2	1996	2.28	<b>6.4</b>	5.0	<b>-1.4</b>	<b>4.00</b>	2.28	5.9	<b>-0.5</b>
3	2000	1.96	<b>4.9</b>	4.9	<b>0.0</b>				
4	1998	1.96	<b>1.4</b>	1.0	<b>-0.4</b>	<b>1.15</b>	1.96	1.4	<b>0.0</b>
5	2000	0.87	<b>0.2</b>	2.2	<b>2.0</b>	<b>0.30</b>	0.87	0.2	<b>0.0</b>
Mittelwert		1.84	3.9	3.2	<b>-0.7</b>	2.36	1.81	3.0	-0.7

Mit den Varianten 1 (Var1) wurde mit der EWS-Software iterativ untersucht, welche  $\lambda_{HF}$  zu den gemessenen  $T_{Sole}$  führen würden. Der maximale Wert wurde auf 4 W/m-K festgelegt, weil höhere Werte, bei den vorliegenden  $\lambda_{ER}$ , zu keinem weiteren Ansteigen der  $T_{Sole}$  mehr führen.

### T<sub>Sole</sub> Messung vs. Simulationen

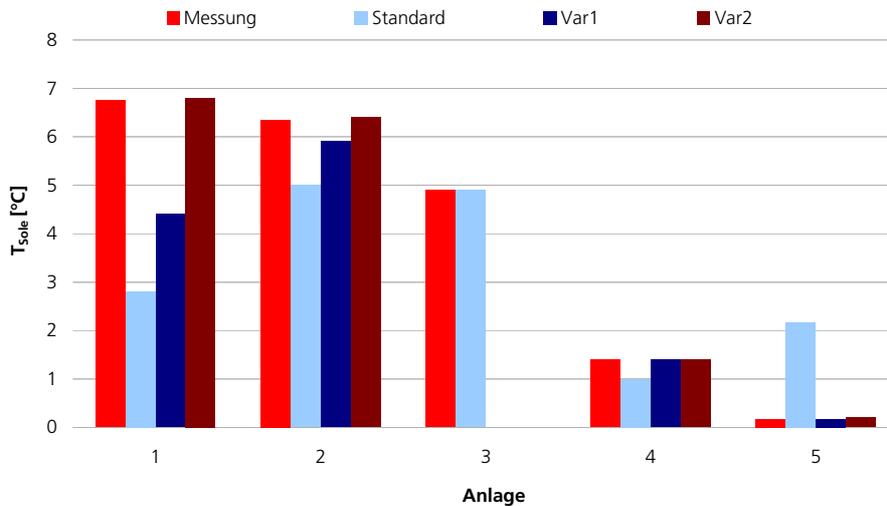


Abbildung 85: Vergleich der T<sub>Sole</sub> aus Messung und den Simulationen Standard, Var1 und Var2.

Bei den Anlagen 1 und 2 konnte der Messwert auch mit dem maximalen  $\lambda_{HF}$  nicht erreicht werden. Bei Anlage 3 war keine Iteration notwendig, da die Standard-Variante die gemessene Temperatur genau reproduzierte. Bei 4 war nur eine geringe und somit realistische Korrektur nach oben notwendig. Wie erwähnt besteht bei 5 eine gewisse Unsicherheit bezüglich des  $\lambda_{ER}$ . Die Sonde steht hier in einem Schotterfeld, was einerseits zu tiefen  $\lambda_{ER}$  führt (Annahme 0.9 W/m-K). Andererseits ist es auch vorstellbar, dass mit der Hinterfüllung kein genügender Kontakt zwischen Umgebung und Sonde hergestellt wurde. Das Hinterfüllungsmaterial könnte beispielsweise durch nur periodisch fließendes Wasser weggespült werden. Vorstellbar ist auch, dass das Material auch ohne Wassereinfluss bereits beim Hinterfüllen teilweise in den umgebenden Schotter eindringt. Beide Prozesse führen dazu, dass die Sonde von nachrutschendem Schotter und nicht Hinterfüllungsmaterial umgeben wäre. Da aber die unmittelbare Sondenumgebung den Flaschenhals des Energieflusses darstellt, führte dies zu einer noch grösseren Spreizung zwischen der Temperatur des ungestörten Erdreichs und der Sole.

Tabelle 21: Wie Tab. 20, als Ausgleichsgrösse wurde hier aber  $\lambda_{ER}$  verwendet.

Anlage Nr.	Baujahr	Messung		Simulation (EWS)					
		$\lambda_{ER}$ [W/m-K]	T <sub>Sole</sub> Periode [°C]	T <sub>Sole</sub> Standard [°C]	dT <sub>Sole</sub> Standard [K]	$\lambda_{HF}$ Var2 [W/m-K]	$\lambda_{ER}$ Var2 [W/m-K]	T <sub>Sole</sub> Var2 [°C]	dT <sub>Sole</sub> Var2 [K]
1	1996	2.12	<b>6.8</b>	2.8	<b>-4.0</b>	0.81	<b>4.30</b>	6.8	<b>0.0</b>
2	1996	2.28	<b>6.4</b>	5.0	<b>-1.4</b>	0.81	<b>3.50</b>	6.4	<b>0.0</b>
3	2000	1.96	<b>4.9</b>	4.9	<b>0.0</b>				
4	1998	1.96	<b>1.4</b>	1.0	<b>-0.4</b>	0.81	<b>2.15</b>	1.4	<b>0.0</b>
5	2000	0.87	<b>0.2</b>	2.2	<b>2.0</b>	0.81	<b>0.60</b>	0.2	<b>0.0</b>
Mittelwert		1.84	3.9	3.2	-0.7	0.81	2.64	3.7	0.0

In der Variante 2 wurde anstelle der  $\lambda_{HF}$  die  $\lambda_{ER}$  variiert und  $\lambda_{HF}$  auf den EWS-Default-Wert von 0.81 W/m-K gesetzt. Die beiden Anlagen 1 und 2 zeigen auch hier, dass nur sehr hohe Werte zu den gemessenen T<sub>Sole</sub> führen. Daraus kann geschlossen werden, dass diese beiden Erdwärmesondenanlagen im Wasser stehen, obwohl auf dem Bohrprotokoll nur bei Anlage 2 (wenig) Grund-

wasservorkommen erwähnt wird. Bei Anlage 4 war wiederum nur eine geringe Korrektur notwendig.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass bei zwei der fünf untersuchten Anlagen der Standard-Simulationswert von  $T_{\text{sole}}$  ziemlich genau dem Messwert entspricht. Bei zwei Anlagen liegt der Messwert über der Erwartung (Simulation). Hier ist die Ursache wohl der Einfluss von Wasser, welches Wärmeleitfähigkeit und/oder Wärmefluss positiv beeinflusst. Anlage 5 steht in einem Schotterfeld, zu dessen genauer Beschaffenheit und somit Wärmeleitfähigkeit keine Information vorhanden ist. Der tiefe Messwert kann einerseits durch eine instabile Hinterfüllung oder die real tiefere Wärmeleitfähigkeit des Schotters selbst gut erklärt werden. Die Fallstudien bestätigen somit die Erkenntnis aus den Analysen des Anlagenparks (Kap. 5.3.8.1). D.h. selbst mit relativ guten Kenntnissen des Untergrundes (Bohrprofil) lässt sich häufig keine zuverlässige Aussage über die resultierende Soletemperatur machen.

### 5.3.9 Erwartungswert

Wie in Kap. 3.4.4 beschrieben, ist es das Ziel der Erwartungswertuntersuchungen zu erkennen, wie weit die energetische Effizienz realer WP-Aggregate von Prüfstandsmessungen abweichen und welche Gründe dafür verantwortlich sind.

#### 5.3.9.1 Volumenströme

Da unterschiedliche Volumenströme zwischen Prüfstandsmessung und realem Betrieb auch zu vermeintlichen Differenzen bezüglich des Erwartungswertes führen, wird deren Effekt im korrigierten Erwartungswert  $EW_k$  (vgl. Kap. 3.4.4) soweit möglich rechnerisch korrigiert. Bei vielen Anlagen wurden deshalb die realen quellen- und senkenseitigen Volumenströme gemessen. Quellenseitig (Verdampfer) zeigt sich eine Tendenz zu Werten über den Vorgaben (Herstellerangaben, resp. Messbedingungen bei der Prüfung am WPZ). Im Mittel liegen die realen Werte 3% (SD 25%) höher als vorgegeben, wobei die SW durchschnittlich 5% und die LW 2% über den Vorgaben liegen. Insbesondere bei den SW-Anlagen bedingt ein zu grosser Volumenstrom im Solekreis eine überdimensionierte Umwälzpumpe, was sich deutlich negativ auf die Jahresarbeitszahl auswirkt.

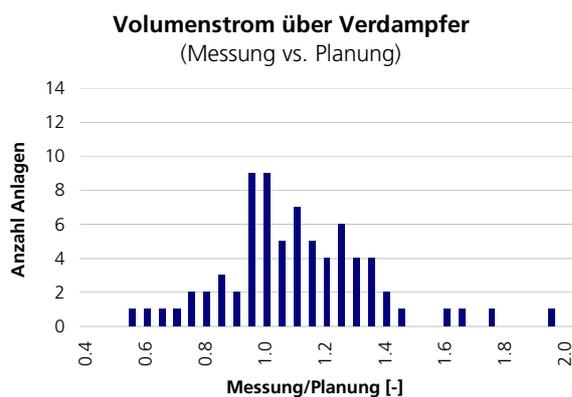


Abbildung 86: Histogramm der Abweichung der quellenseitigen Volumenströme von LW- und SW-Anlagen. Durchschnittlich liegen diese 3% über den Vorgaben.

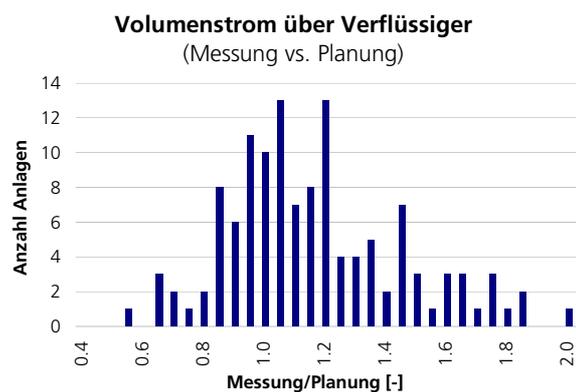


Abbildung 87: Histogramm der Abweichung der senkenseitigen Volumenströme von LW- und SW-Anlagen. Durchschnittlich liegen diese 14% über den Vorgaben.

Auch bei den senkenseitigen Volumenströmen (Verflüssiger) findet sich über alle Anlagen eine positive Abweichung von 14% (SD 36%). Interessanterweise wurden sehr grosse Unterschiede zwischen den Systemvarianten LW (6%), SW (16%) und WW (60%, nur drei Anlagen) festge-

stellt. Zu bemerken bleibt weiter die grosse Streuung der Werte, d.h. die häufig massiven Abweichungen der realen Volumenströme von den Vorgaben.

### 5.3.9.2 Erwartungswerte

Die Abweichung der Istwerte von den nicht korrigierten Erwartungswerten beträgt bei den Sole/Wasser-Anlagen -8% (CI 4%), resp. -4% (CI 5%) für die korrigierten Erwartungswerte (Abb. 88 und 89). Da nicht von allen Anlagen quellenseitige Volumenströme vorliegen, reduziert sich die Anzahl der Anlagen, für welche ein korrigierter Erwartungswert berechnet werden kann, auf die Hälfte.

Wie im Kap. 3.4.4 erwähnt, entsteht bei den Luft/Wasser-Anlagen durch die beiden Modellgenauigkeiten im Abtaubetrieb eine Unsicherheit bezüglich der Abweichung von Mess- zu Erwartungswert. Die Differenz des nicht korrigierten Erwartungswertes zum Istwert liegt bei -10% (CI  $\pm 6\%$ ), und beim korrigierten Erwartungswert bei -9% (CI  $\pm 7\%$ ). Wegen der erwähnten Unsicherheiten werden aber für weitere Betrachtungen nur S/W-Maschinen berücksichtigt.

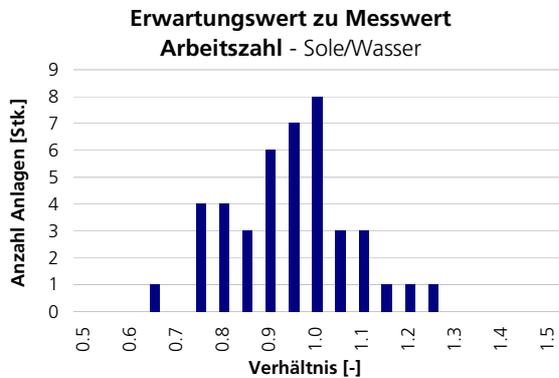


Abbildung 88: Verhältnis des MW zum nicht korrigierten EW der Arbeitszahl von Sole/Wasser Anlagen. Im Mittel liegt das Verhältnis bei 92% (CI  $\pm 4\%$ ).

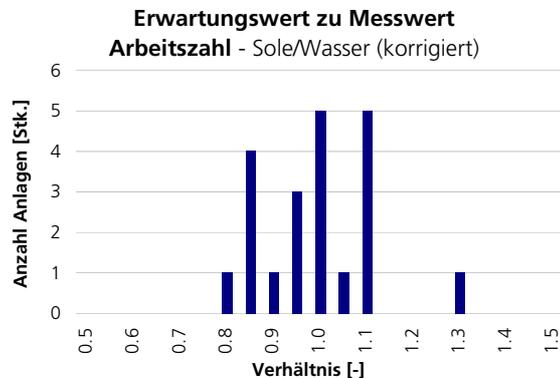


Abbildung 89: Verhältnis des MW zum korrigierten EW der Arbeitszahl von Sole/Wasser Anlagen. Im Mittel liegt das Verhältnis bei 96% (CI  $\pm 5\%$ ).

Interessanterweise liegt der Istwert bei 25% der Anlagen über dem Erwartungswert.

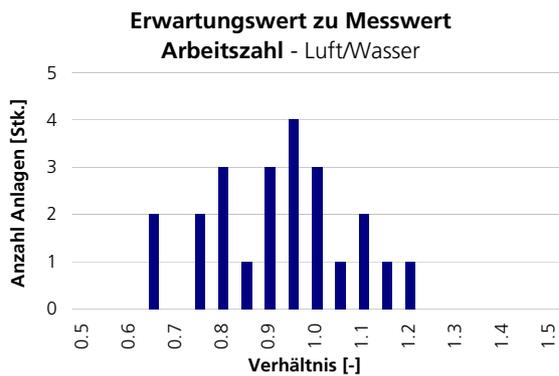


Abbildung 90: Verhältnis des MW zum nicht korrigierten EW der Arbeitszahl von Luft/Wasser Anlagen. Im Mittel liegt das Verhältnis bei 90% (CI  $\pm 6\%$ ).

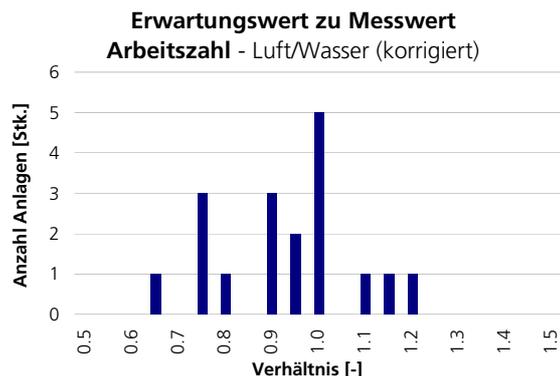


Abbildung 91: Verhältnis des MW zum korrigierten EW der Arbeitszahl von Luft/Wasser Anlagen. Im Mittel liegt das Verhältnis bei 91% (CI  $\pm 7\%$ ).

Bei vielen Anlagen, bei welchen die Differenz mehr als -20% beträgt, konnten Gründe in Form von Maschinendefekten gefunden werden. Diese führten kurz nach Abschluss der Messung zu Störungen und es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass sie bereits während der Mes-

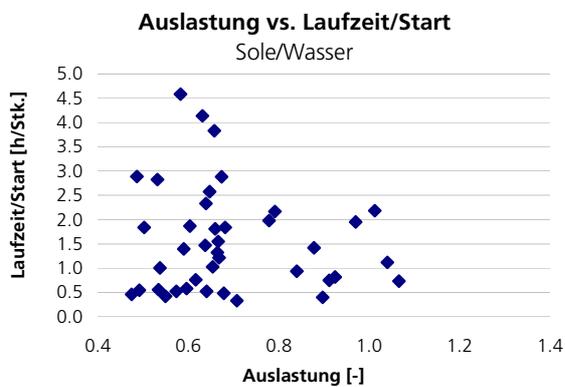
sung einen suboptimalen Betrieb verursacht haben. Beispiele sind Verdichterausfälle oder Hochdruckstörungen wegen verschmutztem Verflüssiger.

### 5.3.9.3 Dynamik

Prüfstandmessungen haben gezeigt, dass Stillstands- und Anfahrprozesse einen negativen Einfluss auf die Arbeitszahl haben können [10]. Hier wurde deshalb der Frage nachgegangen, ob dieser Effekt im realen Betrieb relevant ist, respektive festgestellt werden kann.

#### *Erwartungswerte über lange Intervalle*

Die oben dargestellten Abweichungen von Mess- zu Erwartungswerten von Sole/Wasser-Anlagen sind in den beiden folgenden Abbildungen dem Takten (Laufzeit pro Start) und der Auslastung bei Auslegebedingungen gegenüber gestellt. Das Takten soll zeigen, ob die energetischen Eigenschaften der Wärmepumpe während des Einschaltprozesses so stark vom Gleichgewichtszustand (Erwartungswertmodell) abweichen, dass sie sich auf die Arbeitszahl auswirken. Mit der Auslastung soll der Effekt von Stillstandsverlusten untersucht werden. Wie Abb. 92 zeigt, korrelieren die beiden Größen nicht miteinander.



*Abbildung 92:* Die Auslastung bei Auslegebedingungen und die mittlere Laufzeit pro Einschaltung korrelieren erstaunlicherweise nicht miteinander. Da die Auslastung mittels linearer Regression der Messwerte ermittelt wird, können auch Auslastungen  $> 1$  resultieren.

Wie in den folgenden beiden Abbildungen unschwer zu erkennen ist, zeigt keine der Dynamikgrößen eine Korrelation mit der Abweichung von Mess- zu Erwartungswert, die Steigungen der linearen Regressionen sind nahe bei Null und der Korrelationskoeffizient sehr tief.

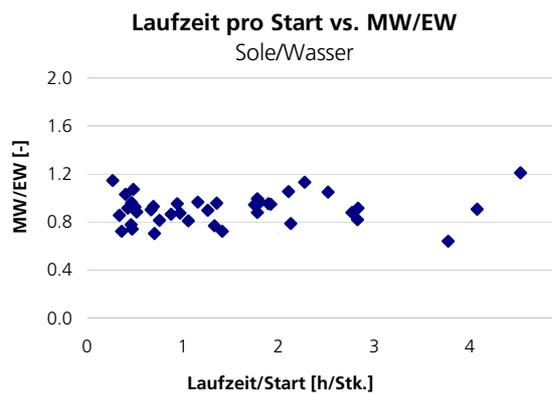


Abbildung 93: Verhältnis von MW zu EW der Arbeitszahl für die Sole/Wasser-Anlagen in Relation zur Laufzeit pro Start (EW nicht korrigiert). Eine Korrelation ist nicht vorhanden (Steigung 0.01 -/(h/Stk.),  $r$  0.13)

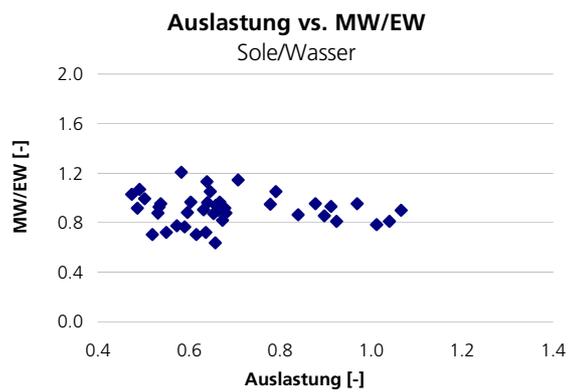


Abbildung 94: Verhältnis von MW zu EW der Arbeitszahl für die Sole/Wasser-Anlagen in Relation zur Auslastung (EW nicht korrigiert). Eine Korrelation ist nicht vorhanden (Steigung -0.04,  $r$  -0.05)

### Erwartungswerte über kurze Intervalle

Bei zwei Sole/Wasser-Anlagen ([Abb. 95](#) und [96](#)) wurden diese Abhängigkeiten über kürzere Beobachtungsintervalle untersucht. Grund dafür ist, dass oben keine Zusammenhänge festgestellt wurden, da die Dynamikgrößen ja aus Zählerablesungen ermittelt wurden, welche eine Auflösung von ein bis zwei Wochen haben. Es wäre deshalb möglich, dass durch die Mittelung über diesen relativ langen Zeitraum eine mögliche Korrelation stark abgeschwächt wird.

Bei der hier gemachten Untersuchung betrug die Intervalllänge 10 Minuten, d.h. alle notwendigen Größen (Temperaturen, Laufzeiten, Starts, Stromverbrauch und Wärmeproduktion) wurden über 10 Minutenintervalle gemittelt. Die folgenden Graphiken enthalten Darstellungen des Erwartungswertes für die Wärmeproduktion, den Stromverbrauch und die Arbeitszahl. Diese Größen sind einerseits gegen das Takten (Laufzeit pro Start) und die Auslastung aufgetragen. Da die Wärmezähler eine zu geringe Auflösung (1 kWh) besitzen, wurde die Wärmemenge aus der Differenz von Vor- und Rücklauftemperatur und dem Volumenstrom berechnet. Nachteil dieser Lösung ist, dass bei Laufzeiten von weniger als 30 Minuten die Trägheit der Temperaturmessung (Anlegefühler) eine zusätzliche Streuung und evtl. einen systematischen Fehler verursacht, diese Werte sind aus diesem Grund nicht in den Graphiken dargestellt. In den Auslastungsgraphiken wurden Mittelwerte über 4 h gebildet. Für die Graphen mit der Laufzeit pro Start wurde keine Mittelung vorgenommen, sondern direkt die gemessenen Laufzeitintervalle verwendet.

Objekt	
Anlagennummer	2083
Jahr der Aufnahme in FAWA	2000
Baujahr Gebäude	1976
Höhe Gebäudestandort	480 m.ü.M.
Leistungsbedarf Gebäude (Auslegung)	7.7 kW
Vorlauftemperatur (Auslegung)	n/ def. °C
Anzahl Personen	2 Pers.

#### Wärmepumpe und Wärmeabgabe

Wärmequelle	Erdsonde
WPZ-Prüfung	Nein
Leistungscharakteristik	einstufig
Kompressor	Scrollkompressor
Standort WP	Innenaufstellung
Heizleistung der WP	8.7 kW
Art des Abgabesystems	Fussbodenheizung
Thermostatventile	n/ def.
Warmwasserbereitung	Winter WP+Elektro+Solar Sommer WP+Elektro+Solar

#### Hydraulikschema

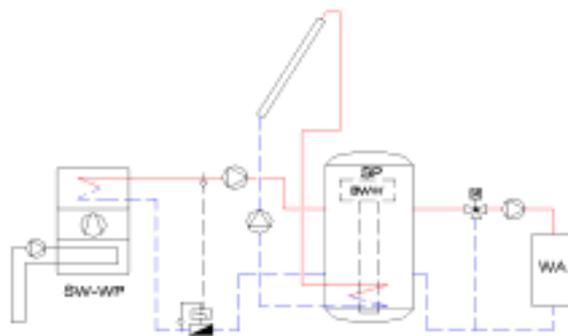


Abbildung 95: Objekt- und Anlagendaten von Anlage 1.

Die Anlage 1 weist aufgrund der Einbindung des Rossnagelspeichers und der Regelung auch sehr kurze Laufzeiten auf. Aus den obgenannten Gründen sind diese in den Laufzeitgraphiken aber nicht dargestellt. Bei den auswertbaren Wärmemengen ( $\geq 30$  Min.) ist kein Zusammenhang zwischen Laufzeiten und Verhältnissen von MW zu EW festzustellen. Die 4-Stundenmittel in der Abbildung daneben (Auslastung) zeigen ein Absinken der gemessenen unter die erwartete Wärmeleistung bei Auslastungswerten von  $< 0.4$ .

Objekt	
Anlagenkürzel	OBEMOO27
Anlagennummer	2105
Jahr der Aufnahme in FAWA	2002
Baujahr Gebäude	1995
Höhe Gebäudestandort	490 m.ü.M.
Leistungsbedarf Gebäude (Auslegung)	3.2 kW
Anzahl Personen	3 Pers.

#### Wärmepumpe und Wärmeabgabe

WP-Fabrikat (inkl. Version)	CTA
WP-Modell	Optiheat 10
WPZ-Prüfung	Nein
Leistungscharakteristik	einstufig
Wärmequelle	Erdsonde
Kompressor	Scrollkompressor
Standort WP	Innenaufstellung
Heizleistung der WP	n/ def. kW
Art des Abgabesystems	Radiatoren
Thermostatventile	Ja

#### Hydraulikschema

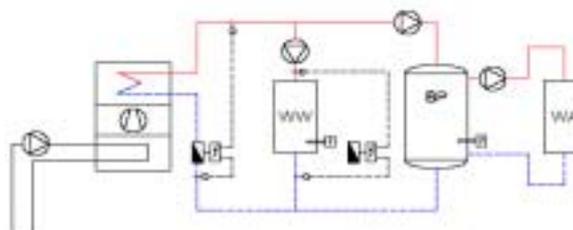


Abbildung 96: Objekt- und Anlagendaten von Anlage 2.

**Laufzeit pro Start vs. MW/EW Wärme** Anlage 1

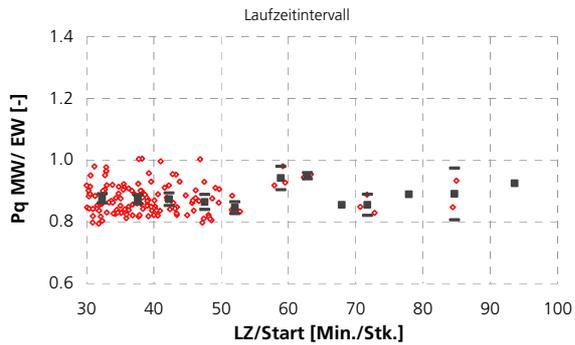


Abbildung 97: Bei den auswertbaren Laufzeiten von  $\geq 30'$  bleibt MW/EW konstant. Die schwarzen Quadrate zeigen das Mittel einer 5-Minuten Klasse und die schwarzen Striche die entsprechende SD.

**Auslastung vs. MW/EW Wärme** Anlage 1

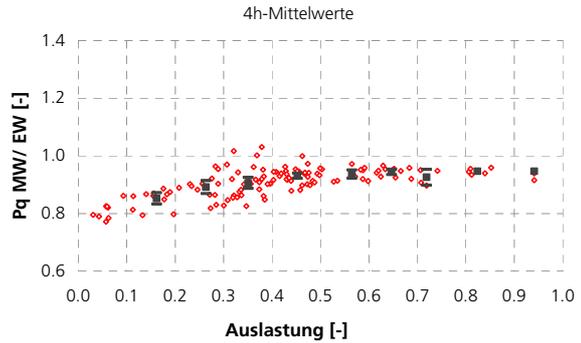


Abbildung 98: Auslastungsgrade von  $< 0.4$  führen bei dieser Anlage zu einer Verschlechterung der Verhältnisses aus Mess- und Erwartungswert der Wärmeproduktion.

Bei Anlage 1 steigt das Verhältnis aus gemessener zu erwarteter Stromaufnahme bei starkem Takten, resp. kleiner Auslastung an.

**Laufzeit pro Start vs. MW/EW Strom** Anlage 1

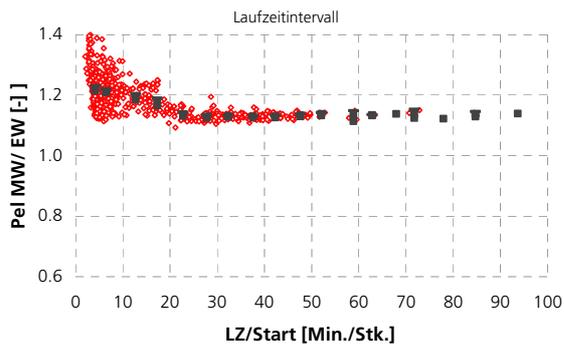


Abbildung 99: Kurze Laufzeiten ( $< 20$  Min./Start) führen zu einem Anstieg von MW/EW des Stromverbrauches.

**Auslastung vs. MW/EW Strom** Anlage 1

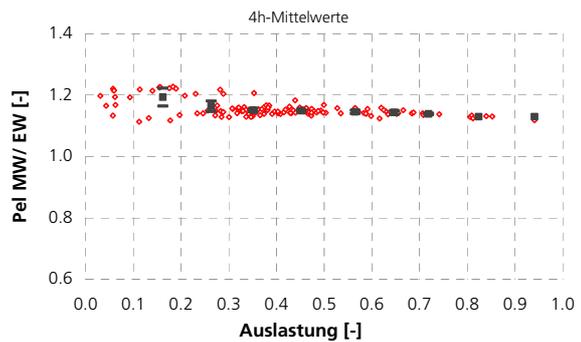


Abbildung 100: Ähnlich wie das Takten führen auch tiefe Auslastungsgrade zu einem (schwachen) Anstieg von MW/EW des Stromverbrauches.

Die auswertbaren Laufzeiten zeigen bezüglich der Arbeitszahl ein konstantes Verhältnis von MW/EW. Das starke Ansteigen der Stromaufnahme bei kurzen Laufzeiten (Abb. 99) lässt aber vermuten, dass sich die Arbeitszahl bei Laufzeiten unter 30 Minuten pro Start verschlechtert. Nachweisbar ist hingegen die relative Abnahme der Arbeitszahl bei kleiner Auslastung, da hier auch korrekte Wärmemengen bei kleinen Auslastungen vorliegen.

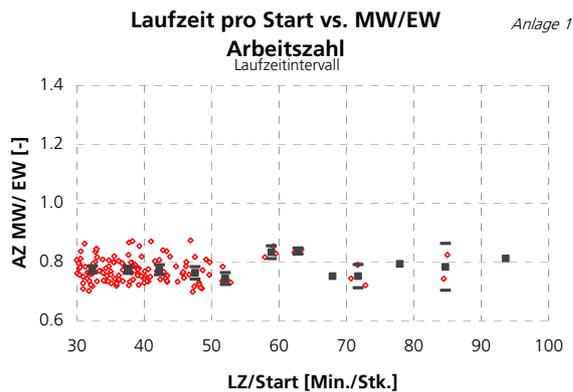


Abbildung 101: Im auswertbaren Bereich ist kein Effekt des Takten auf die Arbeitszahl zu erkennen.

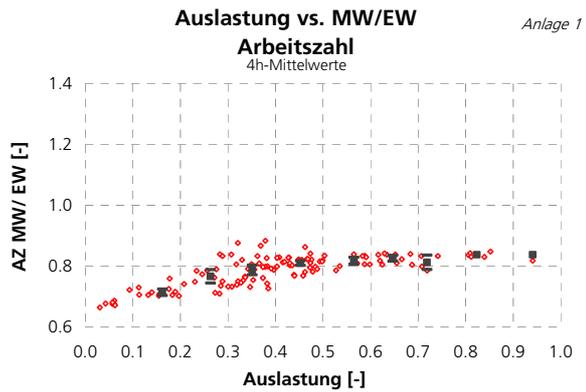


Abbildung 102: Bei tiefen Auslastungen führt die Summe aus relativ abnehmender Wärmeleistung und zunehmender Stromaufnahme zu einem deutlichen Abfall der Arbeitszahl.

Die Anlage 2 hat einen Parallelspeicher, dessen Ladezeit im Bereich von 20 bis 40 Minuten liegt. Laufzeiten von über 40 Minuten resultieren aus der Warmwasserbereitung in einem separaten Boiler mit innenliegendem Wärmetauscher. Auch hier wurde die Wärmemenge wie bei Anlage 1 berechnet. Weshalb die Streuung dieser Punkte grösser ist als bei Raumheizung (Abb. 103) konnte nicht geklärt werden. Eine Korrelation der EW/MW-Verhältnisse kann weder mit dem Takten (Abb. 103, 105 und 107) noch der Auslastung (Abb. 104; 106 und 108) festgestellt werden. Eine Abnahme der relativen Wärmeleistung (Abb. 103) bei kurzen Laufzeiten kann höchstens erahnt werden.

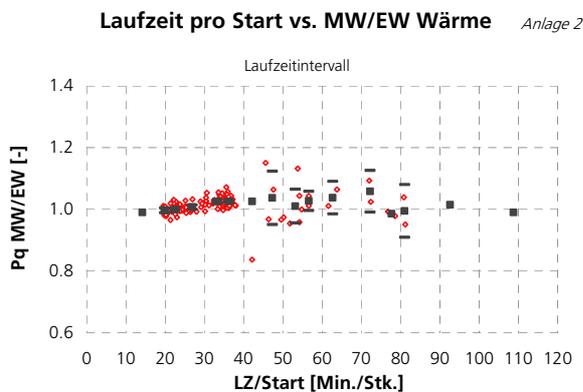


Abbildung 103: Die geringe Streuung deutet darauf hin, dass die hier festgestellten ziemlich konstanten Verhältnisse vertrauenswürdig sind.

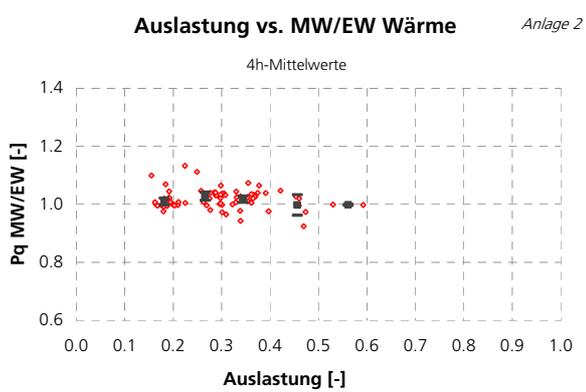


Abbildung 104: Da die Anlage keinen wirklich tiefen Auslastungsgrad aufweist, kann der bei Anlage 1 festgestellte Effekt hier nicht beobachtet werden.

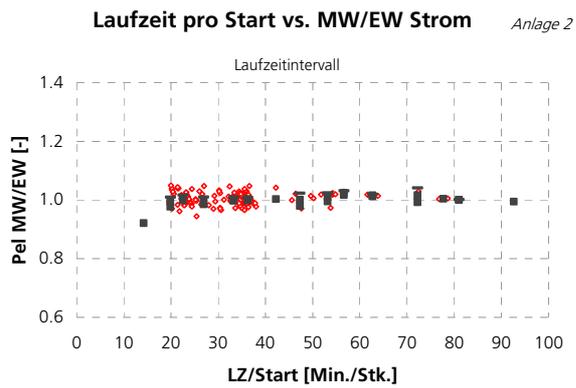


Abbildung 105: Die gemessene Stromaufnahme entspricht über den ganzen Bereich dem Erwartungswert.

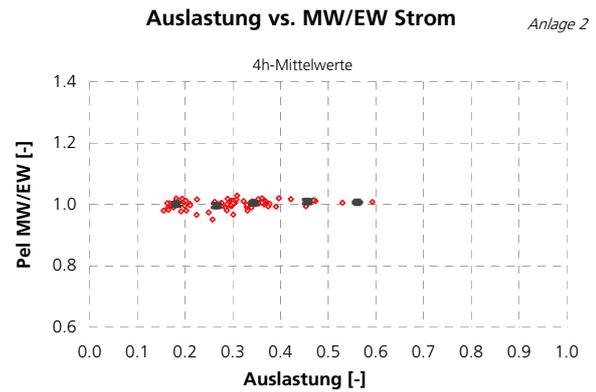


Abbildung 106: Auch die Auslastung zeigt keinen Zusammenhang mit der Stromaufnahme.

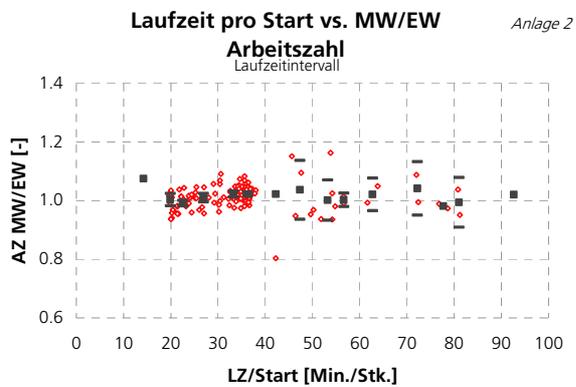


Abbildung 107: Bei den hier festgestellten Taktzeiten ist kein Effekt auf die Arbeitszahl festzustellen.

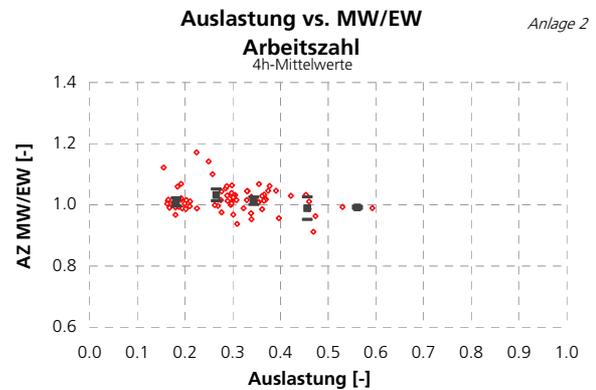


Abbildung 108: Anders als bei Anlage 1 kann hier keine Abnahme der Arbeitszahl bei Auslastungen < 0.3 festgestellt werden.

## 6. Interpretation und Empfehlungen

Die folgenden Ausführungen sind in erster Linie ein Beschrieb der Verhältnisse, welche bei den von FAWA ausgemessenen Anlagen gefunden wurden. Sie sind somit als Feedback der Realität an das Fachpublikum zu verstehen.

Es handelt sich um statistische Daten. Deren Interpretation beruht auf statistischen Grössen wie Mittelwerten, Standardabweichungen und Vertrauensintervallen. Die Schlussfolgerungen sind folglich nicht mit letzter Sicherheit zu belegen. Mittels Diskussion in der Begleitgruppe, welche das ganze Spektrum an Fachkenntnissen im Wärmepumpenbereich abdeckt, wurden aber alle Ergebnisse und Empfehlungen bezüglich Plausibilität, resp. Praxistauglichkeit geprüft.

### 6.1 Objekte und Vorlauftemperaturen

Rund 40% der in FAWA untersuchten Wärmepumpen sind Sanierungs-Anlagen, d.h. sie befinden sich in Sanierungsobjekten. Dies entspricht nicht exakt den Marktverhältnissen in der Schweiz, wo heute nur knapp 20% der Maschinen mit weniger als 20 kW Heizleistung auf Sanierungssysteme entfallen.

Bezüglich der für die JAZ relevanten mittleren Vorlauftemperatur unterscheiden sich die beiden Gruppen um 5 K. Eine um 5 K höhere Vorlauftemperatur hat im Mittel eine Verschlechterung von COP resp. JAZ von 8% zur Folge. In FAWA wurde eine Differenz zwischen Neubau und Sanierungsanlagen von 9% festgestellt und zwar bei Luft/Wasser wie bei Sole/Wasser Anlagen. Dass diese beiden Werte so nahe beieinander liegen, lässt den Schluss zu, dass sich Neubau- und Sanierungs-Anlagen bezüglich der JAZ nur bei den Vorlauftemperaturen unterscheiden.

Im Mittel liegt die Vorlauftemperatur an der Heizgrenze ( $T_a$  14°C) bei gut 36°C und zwar bei Luft/Wasser, wie bei Sole/Wasser Anlagen. Insbesondere bei Sole/Wasser Anlagen, deren Heizleistung weitgehend unabhängig von der Aussentemperatur ist, lassen diese Verhältnisse auf ein Optimierungspotential schliessen.

Am Auslegungspunkt stimmen Planungs- und Messwerte der Vorlauftemperatur gut überein. Ob die Planungswerte hingegen dem realen Bedarf entsprechen, kann nicht schlüssig beurteilt werden. Es wurden jedoch zwei starke Hinweise auf Optimierungspotentiale gefunden:

- Die Energiekennzahlen der Objekte korrelieren nicht mit den jeweiligen Vorlauftemperaturen, die wohl meist zu hoch sind. Als Ursachen können verschieden Gründe in Betracht gezogen werden:
  - Komfort: Nutzer wünschen erhöhte Bodentemperaturen. Es werden deshalb nur jene Fussbodenbereiche beheizt, welche häufig genutzt werden. Die beheizte Fläche wird so gewählt, dass diese mit der gewünschten Temperatur durchströmt werden kann.
  - Kosten: Der Preisdruck hat in den letzten Jahren zugenommen. Geringere Verlegedichten der Bodenheizungsverteilerrohre sind ein Mittel, diesem Druck zu begegnen, bedingen aber entsprechend höhere Vorlauftemperaturen.
- Anlagen mit Raumtemperaturaufschaltung weisen deutliche Vorteile (8%) bezüglich der JAZ auf. Neben einer zu hohen Heizkurveinstellung führen auch ex- und interne Lasten zu einem Vorteil dieser Regelkonzepte. Das Ausmass des Vorteils deutet aber stark auf nicht op-

timale Heizkurveneinstellung hin. Ein weiterer Schritt in Richtung bedarfsgerechter und somit tieferer Vorlauftemperaturen könnte mit einem modellbasierten Regelkonzept erreicht werden [11].

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Ein beträchtliches energetisches Optimierungspotential besteht bei der Auslegung des Abgabesystems. Die eingestellten Heizkurven liegen i.b. bei den Sole/Wasser-Anlagen häufig über dem heiztechnisch erforderlichen Niveau, was energetisch nachteilig ist.</b>
<b>EMPFEHLUNG</b>	<b>Die Vorlauftemperatur hat einen grossen Einfluss auf die energetische Effizienz einer Anlage, sie sollte deshalb so niedrig wie möglich geplant werden. Die Komfortansprüche der Kunden (Bodenoberflächentemperaturen) müssen dabei berücksichtigt werden. Bei vielen der untersuchten Anlagen kann durch entsprechende Reglereinstellung leicht eine energetische Verbesserung erreicht werden.</b>

## 6.2 Energetische Effizienz

### 6.2.1 Luft- vs. Erdwärmesondenanlagen

Die Luft/Wasser-Anlagen verbrauchen im Schnitt 25% mehr Strom als die Sole/Wasser Anlagen. Die mittlere Quelltemperatur unterscheidet sich aber höchstens um 2 K. Der Grund für die schlechtere Performance von Luft/Wasser-Anlagen liegt in der grösseren Differenz zwischen Quelle- und Verdampfungstemperatur, da der Wärmeübergang bei luftbeaufschlagten Wärmeübertragern viel geringer ist. Eine Differenz im festgestellten Umfang war deshalb zu erwarten.

Ein Vorteil der Luft/Wasser-Anlagen ist, dass eine deutlich grössere Sicherheit bezüglich der im Einzelfall zu erreichenden JAZ besteht. Ihre SD ist nur gut halb so gross wie jene bei Sole/Wasser Anlagen. Der Grund liegt in den sehr variablen Eigenschaften der Erdreich-Erdwärmesonden-Solekreislauf-Systeme. Die Auslegung von Erdwärmesondenanlagen stellt hohe Anforderungen an den Planer. Aber auch bei korrekter Planung ist eine Voraussage der resultierenden Soletemperatur nur bedingt möglich. Bei Luftfassungen ist die mittlere Temperatur über dem Verdampfer nur durch grobe Fehler negativ zu beeinflussen, z.B. durch zu enge oder zu lange Kanäle resp. Schläuche, was in der Praxis kaum auftritt. Die resultierende Qualität von Erdwärmesondenanlagen hängt hingegen von verschiedenen Faktoren ab, wobei die lokale Geo- und Hydrologie wohl eine wichtige Rolle spielen. Somit hängt die resultierende JAZ der Sole/Wasser-Anlagen auch von nicht beeinflussbaren Grössen ab, welche also ein gewisses Unsicherheitspotential darstellen.

### 6.2.2 JAZ-Entwicklung

Luft/Wasser- wie Sole/Wasser-Anlagen haben sich seit Projektbeginn um ca. 15% verbessert. Da die einzelnen Jahrgänge mit einem relativ grossen CI behaftet sind, ist eine Interpretation von einzelnen Jahrgängen kaum möglich. Die am WPZ geprüften Maschinen zeigen bei LW und S/W ab 1999 im Mittel gleich bleibende COP Werte. Dieser Verlauf zeigt sich auch im Feld, aber mit ca. einem Jahr Verzögerung.

Die auf den Schweizerischen Anlagenpark hochgerechneten Jahresarbeitszahlen zeigen seit Projektbeginn eine Zunahme um 20% von 2.5 auf 3.0. Seit etwa 1999 hat sich dieser Wert kaum mehr verändert. Dass die JAZ-Zunahme des Anlagenparks höher ist als bei den beiden untersuchten Gruppen, liegt an der Verschiebung der Marktanteile hin zu den S/W-Anlagen.

Sich heute in Entwicklung befindliche technische Verbesserungen der Wärmepumpenaggregate (z.B. Elektromotoren, Zwischeneinspritzung) lassen auf künftig weitere Verbesserungen der Jahresarbeitszahlen schliessen.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Die durchschnittlichen JAZ der gemessenen Anlagen verbessern sich über die Jahre. Der am WPZ festgestellte Verlauf widerspiegelt sich auch im Feldbetrieb. Die im Feld gemessenen Verbesserungen sind primär auf bessere Maschinen zurückzuführen.</b>
---------------------	---

## 6.3 Vertiefte Analysen

### 6.3.1 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von Wärmepumpenanlagen ist mit 99.5% hoch. Wegen fehlender Daten ist ein quantitativer Vergleich mit konkurrierenden Systemen, i.b. mit Gas- und Ölkesseln nicht möglich. Die mittlere Störungsdauer liegt bei 40 Stunden pro Störung. Im Mittel ist mit 0.26 Störungen pro Betriebsjahr zu rechnen. Diese Zahl bezieht sich auf Störungen, welche durch den WP-Service behoben werden müssen.

Überdurchschnittlich gut haben S/W-Anlagen und Anlagen ohne technischen Speicher abgeschnitten. Vergleiche zwischen anderen Gruppen, z.B. Neubauten vs. Sanierungen, haben keine markanten Unterschiede gezeigt.

Die anfälligsten Komponenten sind Regelung und Kompressor.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Wärmepumpenanlagen haben sehr wenige Störungen. Sole/Wasser-Anlagen und Anlagen ohne technischen Speicher schneiden diesbezüglich am besten ab.</b>
---------------------	--

### 6.3.2 Alterung

Bis heute liegen gesicherte Daten für Anlagen mit acht Betriebsjahren vor, für das neunte Jahr ist die Datenlage wegen der geringen Anlagenzahl noch unsicher. Bei den Luft/Wasser-Anlagen zeigt sich ein schwacher Einbruch im Jahr sechs und sieben. Die geringe Anzahl der Daten in den Jahren acht und neun, welche auf eine Erholung hinweisen, ist schwach.

Die Sole/Wasser-Anlagen zeigen keinen Trend, weder nach oben noch nach unten. Bei den Sole/Wasser-Anlagen wäre eigentlich zu erwarten gewesen, dass bis etwa zum dritten oder vierten Jahr durch die Abkühlung der Erdwärmesondenumgebung eine JAZ-Einbusse um 5 bis 9% stattfinden würde. Die Messdaten entsprechen dieser Erwartung aber nicht. Vorstellbar wären auch sich gegenseitig kompensierende Einflüsse. Beispielsweise könnte der Wärmeübergang vom Erd-

reich auf die Erdwärmesonde durch Einspülprozesse während der ersten Betriebsjahre verbessert werden und damit den Effekt der Auskühlung des Erdreichs kompensieren.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Über 8 Messjahre wurde bisher keine Verschlechterung der JAZ festgestellt. Verschmutzung des Verdampfers und Abkühlung der Erdwärmesonden sind also bisher keine Themen.</b>
---------------------	---

### 6.3.3 Regelung

Regler mit Raumtemperaturkompensation führen zu einer deutlichen Verbesserung der JAZ von gut 6.5%. Dieser Effekt entspricht einer Reduktion der mittleren Vorlauftemperatur um etwa 4 K. Dieser Effekt kann aber nur zur Hälfte durch die Kompensation von externen Lasten (z.B. Sonnenschein) erklärt werden. Der festgestellte Effekt ist deshalb wohl zu einem grossen Teil auf nicht optimal eingestellte Heizkurven zurück zu führen. Dass die Heizkurven sehr häufig zu hoch liegen, wird auch durch den Umstand bestätigt, dass die mittleren gemessenen Vorlauftemperaturen bei Objekten mit Einzelraumregulierung um 2 bis 4 K über den Werten von Objekten ohne Einzelraumregulierung liegen.

Ein Vergleich der gemessenen mit den geplanten Energiekennzahlen zeigt weiter, dass Objekte mit Einzelraumregulierung absolut nicht weniger, sondern eher mehr Energie benötigen. Dieser Effekt ist aber statistisch noch nicht erhärtet.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Regler mit Raumtemperaturkompensation führen zu tieferen Vorlauftemperaturen und damit zu Energieeinsparungen ohne Komforteinbusse.</b>
---------------------	--

<b>EMPFEHLUNG</b>	<b>Regler mit Raumtemperaturaufschaltung sind empfehlenswert.</b>
-------------------	---

### 6.3.4 Betriebsart und Auslegung

Bei Luft/Wasser-Anlagen werden meist Elektroeinsätze eingebaut. In der Realität werden diese im normalen Heizbetrieb kaum verwendet. Aus diesem Grund funktionieren 75% der Anlagen monovalent, d.h. die Wärmepumpe deckt den gesamten Raumwärmebedarf ab. Hersteller weisen aber darauf hin, dass Elektroeinsätze bei Luft/Wasser-Anlagen insbesondere aus folgenden Gründen eingesetzt werden:

- Die Inbetriebnahme von Anlagen mit Umkehrabtauung ist bei kalter Senke (Speicher, Fussbodenheizung) nicht möglich. Mit dem Elektroeinsatz kann der Speicher aufgeheizt werden.
- Häufig muss noch während der Bauphase geheizt werden. Die staubige Aussenluft kann hier Probleme verursachen.
- In der Bauaustrocknungsphase ist der Wärmeleistungsbedarf erhöht. Mit dem Elektroeinsatz kann dieser Bedarf abgedeckt werden.

Die Auslastung bei Auslegebedingungen liegt im Mittel aller Anlagen bei 66%. Dieser Wert berücksichtigt allfällige Sperrzeiten des Elektrizitätswerks nicht. Wird eine Sperrzeit von vier Stunden pro Tag angenommen, so erhöht sich die Auslastung auf 80%. Bei Aussentemperaturen unterhalb des Auslegepunkts steigt der Leistungsbedarf kaum mehr an. Grund dafür ist, dass bei sehr

kalter Witterung die Sonnenscheindauer meist hoch ist und somit die höheren Transmissionsverluste durch Strahlungsgewinne kompensiert werden. Es kann deshalb festgestellt werden, dass insbesondere die Sole/Wasser-Maschinen zu gross ausgelegt werden. Bei den Luft/Wasser Aggregaten sinkt bei abnehmender Aussentemperatur die Heizleistung und deshalb kann die Überdimensionierung dieser Anlagen als vertretbar bezeichnet werden.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Luft/Wasser-WP können im Mittelland problemlos monovalent betrieben werden. Im normalen Heizbetrieb wird keine elektrische Zusatzheizung benötigt. Für die Inbetriebnahme und Bauaustrocknung kann ein Elektroeinatz sinnvoll sein. Sole/Wasser-WP werden häufig zu gross ausgelegt, was sich negativ auf die Kosten auswirkt.</b>
<b>EMPFEHLUNG</b>	<b>Sicherheitszuschläge bei der Auslegung von Sole/Wasser-WP sind zu vermeiden.</b>

### 6.3.5 Warmwasser

Bei den in FAWA untersuchten Anlagen beträgt der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung ca. 20% am gesamten Wärmebedarf. Wie die Analysen der Boilerladetemperaturen gezeigt haben, liegen diese im Normalfall nur um wenige Kelvin über der mittleren Vorlauftemperatur des Heizbetriebs. Diese beiden Umstände erklären, weshalb sich Anlagen mit und ohne Brauchwarmwassereinbindung bezüglich der Jahresarbeitszahl kaum unterscheiden. Wird hingegen der Systemnutzungsgrad betrachtet, so liegt der Stromverbrauch von Anlagen mit Elektroboilern um 50% über den Anlagen, welche das Warmwasser zu 100% über die Wärmepumpe abdecken.

Deutliche Unterschiede konnten bezüglich der verschiedenen Typen der Warmwassereinbindung festgestellt werden. Bezüglich energetischer Effizienz haben sich separate, knapp dimensionierte Boiler (1 Tagesbedarf) mit innenliegendem Wärmetauscher am besten bewährt. Die Wärmetauscherfläche im Boiler muss dabei auf die Wärmeleistung der Wärmepumpe abgestimmt werden - je grösser die WP-Leistung desto grösser die Wärmetauscherfläche. Für Objekte mit grossem Heizleistungsbedarf aber geringer Belegung ist es deshalb schwierig, kleine Boiler mit genügender Wärmetauscherfläche zu finden. Für Neubauten, insbesondere wenn in Niedrigenergiebauweise erstellt, ergeben sich diesbezüglich aber keine Probleme.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Die Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpe hat im Vergleich zu Elektroboilern deutliche ökologisch-energetische Vorteile.</b>
<b>EMPFEHLUNG</b>	<b>Die Warmwasserbereitung sollte in die WP-Anlage integriert werden. Am besten bewährt haben sich dabei einfache Boiler mit innenliegendem Wärmetauscher. Kombispeicher sollten nur bei Einbindung von anderen Energiequellen (Sonne, Holz) verwendet werden.</b>

### 6.3.6 Speichereinbindung

Die nJAZ 2 von Anlagen ohne technischen Speicher ist leicht höher als von Anlagen mit Speicher. Wird aber der Maschineneffekt eliminiert, so sind kaum mehr Differenzen zwischen diesen Kategorien festzustellen. Auch bezüglich des Taktens, welches notabene keinen nachweisbaren Effekt auf die JAZ hat, konnten keine Differenzen gefunden werden. Technische Speicher kosten aber Geld und benötigen Platz. Sie sollten deshalb nur dort verwendet werden, wo sie tatsächlich benötigt werden. Von einer Kombination mit dem Boiler (Kombispeicher) ist, wie in [Kap. 6.3.5](#) beschrieben, abzuraten.

<b>FESTSTELLUNG</b>	<b>Technische Speicher haben keinen Einfluss auf die Jahresarbeitszahl.</b>
<b>EMPFEHLUNG</b>	<b>Technische Speicher verteuern und komplizieren die Anlagen und sollten deshalb nur dort verwendet werden, wo sie auch tatsächlich notwendig sind.</b>

### 6.3.7 Erdwärmesonden

Die gemessenen Soletemperaturen korrelieren erwartungsgemäss mit den Jahresarbeitszahlen. Wird die bezüglich Wärmepumpenaggregat (inkl. Abweichung zum Erwartungswert) und Vorlauftemperatur normierte nJAZ 2, also die REP 2, verwendet, so zeigt sich exakt der erwartete Zusammenhang von +2.5% pro Kelvin  $T_{\text{sole}}$ . Damit ist klar, dass die unterschiedliche Soletemperatur Ursache für die grosse Streuung der JAZ von S/W-Anlagen ist. Als Einflussgrössen wurden die Sondenbelastung (Betrieb) und die Beschaffenheit der Sondenumgebung (Geo- und Hydrologie) untersucht. Bei der Sondenbelastung zeigt sich, dass die Korrelationen zwischen den Messwerten von  $T_{\text{sole}}$  und der Sondenbelastung in Kilowattstunden pro Meter tendenziell der Erwartung entspricht, wobei der Korrelationskoeffizient bei nur -0.4 liegt. Wird stattdessen die spezifische Sondenentzugsleistung verwendet (häufig verwendete Auslegegrösse), kann nicht mehr von einer Korrelation gesprochen werden. Das gleiche gilt auch für die Wärmeleitfähigkeit der Sondenumgebung. Insbesondere die schlechte Korrelation zwischen Sondenbelastung und  $T_{\text{sole}}$  macht klar, dass weder Entzugsenergie noch spezifische Sondenentzugsleistung als alleinige Dimensionierungsgrösse für die Erdwärmesondenlänge verwendet werden sollten. Die Sensitivitätsanalyse auf Basis von Simulationsdaten bestätigt diesen Befund. In der Sensitivitätsanalyse konnte gezeigt werden, dass die drei folgenden Faktoren bei der Erdwärmesondenauslegung berücksichtigt werden sollten:

- Energieentzug durch Erdwärmesonde
- Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Erdreichs

- Sondentiefe

Der Vergleich von Simulationsdaten und Messwerten der  $T_{\text{sole}}$  bestätigt generell diese Zusammenhänge (Mittelwerte von Simulation- und Messung sind identisch). Werden die Einzelfälle betrachtet, so stimmen Messung und Simulation sehr gut überein, d.h. aufgrund von Betrieb Verhältnissen der Sondenumgebung (Geo- und Hydrologie) kann die gemessene Soletemperatur gut erklärt werden. Bei jeweils 20% der Fälle weicht die Simulation deutlich nach oben, resp. nach unten ab, was durch nicht im Bohrprotokoll erwähnte Grundwasservorkommen, resp. möglicherweise nicht optimale Hinterfüllung erklärt werden kann.

Bei drei der fünf genauer untersuchten Anlagen (Fallstudien) traten solche markante Abweichungen zwischen Mess- und Erwartungs- d.h. Simulationswert der  $T_{\text{sole}}$  auf. Diese Differenzen konnten in allen Fällen durch plausible Abweichungen der geologischen und hydrologischen Verhältnisse von den nach Bohrprotokoll abgeleiteten Wärmeleitfähigkeiten erklärt werden. Bei diesen Anlagen wird die  $T_{\text{sole}}$  also kaum durch noch unbekannte Parameter markant beeinflusst. Die aber geringe Zahl auf diese Weise untersuchter Anlagen lässt noch nicht definitiv darauf schliessen, dass solche Parameter nicht existieren. Die Fallstudien zeigen aber weiter, dass die Unsicherheit bzgl. der Wärmeleitfähigkeiten der bekannten Grössen Wärmeleitfähigkeit von Untergrund und Hinterfüllung zu deutlichen Abweichungen bei der Soletemperatur führen können.

Die heute praktizierte Methode zur Sondendimensionierung führt dazu, dass einige Sonden zu kurz und andere zu lang sind, respektive Soletemperaturen in einem sehr weiten Bereich resultieren, mit entsprechender Kostenfolge bei Investition und Betrieb. Abhilfe ist wegen der Komplexität des Problems und Mangels detaillierter Kenntnisse der Verhältnisse an der Bohrstelle nicht in Sicht. Ein Ansatzpunkt wäre, wenn Bohrfirmen nicht primär eine Erdwärmesonde lieferten, sondern eine thermische Leistung auf einem bestimmten Temperaturniveau. Dieses Vorgehen würde dazu führen, dass die Firmen je nach angetroffener geologischer und hydrologischer Situation die Sondenlänge entsprechend anpassen würden. Dadurch würde die energetische Qualität der Sonden einheitlicher, resp. das Risiko des Anlagenbesitzers, eine „schlechte“ Sonde zu erhalten, geringer.

Ein grosses und relativ einfach zu erschliessendes Optimierungspotential liegt bei den Umwälzpumpen im Solekreis. Die durch FAWA festgestellten Verhältnisse zeigen, dass hier kaum eine Auslegung mittels Druckverlustberechnung stattfindet, sondern eine Pumpe gewählt wird, die sicher nicht zu klein ist. Damit der Volumenstrom über dem Verdampfer dem Sollwert entspricht, muss die Pumpe dann häufig auf Teillast gefahren werden. Dies hat eine massive Wirkungsgradreduktion zur Folge. Im Rahmen eines BFE-Projektes wurde zur optimalen hydraulischen Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen ein Excel-Werkzeug entwickelt, welches von [www.waermepumpe.ch/fe](http://www.waermepumpe.ch/fe) heruntergeladen werden kann [12].

<b>FESTSTELLUNG</b>	<p>Die Sole/Wasser-Wärmepumpen werden meist zu gross gewählt. Wird die Erdwärmesonde gemäss der WP-Leistung ausgelegt, so ist auch diese meist zu lang.</p> <p>Die Soletemperatur wird von verschiedenen, i.b. geologischen Faktoren, bestimmt. Liegen hierzu keine detaillierten Informationen vor, so besteht ein beträchtliches Unsicherheitspotential.</p> <p>Solekreispumpen sind häufig überdimensioniert, was einen deutlich negativen Einfluss auf die energetische Effizienz der Anlagen hat.</p>
<b>EMPFEHLUNG</b>	<p>Nur eine bedarfsgerechtere Auslegung der Erdwärmesonde führt zu einem ökonomisch und energetisch optimalen Resultat. Bohrfirmen sollten sich stärker bei dieser Aufgabe engagieren.</p> <p>Es ist auf eine korrekte Auslegung der Solekreispumpe zu achten.</p>

### 6.3.8 Erwartungswert

Die von den realen Maschinen im Feld erreichten Arbeitszahlen sind nur 4% schlechter als die Werte, die gemäss den Kenndaten der Aggregate (EN 255) zu erwarten wären. Dieser Wert basiert auf Auswertung der Sole/Wasser Maschinen. Die Daten von Luft/Wasser-Maschinen können wegen der Abtauproblematik (vgl. [Kap. 3.4.4](#)) nicht genügend genau ausgewertet werden.

Im Einzelfall können aber markante Abweichungen zum Erwartungswert auftreten und zwar nach unten wie nach oben. Grundsätzlich können alle in [Abb. 12](#) erwähnten Faktoren zu Abweichungen führen. Die wenigen Fälle mit Abweichungen grösser als -20% konnten meist durch Defekte erklärt werden. Die Vermutung, dass die Betriebsdynamik (Takten und Stillstandsverluste) eine wichtige Einflussgrösse ist, kann anhand der Analyse über einen Zeitraum von ein bis mehrere Wochen nicht bestätigt werden. Die intensiven Untersuchungen an zwei Anlagen, wo Erwartungswerte über viel kürzere Intervalle (4 Stunden) ermittelt wurden, ergaben keine schlüssigen Resultate. Bei einer Anlage führten Auslastungen von weniger als 0.4 zu einer Abnahme der Wärmeleistung und der Arbeitszahl. Bei der zweiten Anlage konnte dieser Zusammenhang aber nicht gefunden werden. Das Takten scheint bei beiden Anlagen nicht zu einer Abnahme der energetischen Effizienz zu führen. Es kann also festgestellt werden, dass im normalen Betrieb die Dynamik mit Sicherheit keine dominante Grösse bezüglich Wärmeleistung, Stromverbrauch und Arbeitszahl darstellt.

Daraus kann geschlossen werden, dass die festgestellten Abweichungen nach oben wie nach unten durch die Qualität der Komponenten bestimmt wird. Mit den vorliegenden Daten können die Abweichungen jedoch nicht einzelnen Komponenten zugeordnet werden. Aus nicht gesicherter Quelle konnte in Erfahrung gebracht werden, dass insbesondere die Verdichter eine relativ grosse Streuung aufweisen. Abweichungen vom Mittel sollen sich im Bereich von  $\pm 10\%$  bewegen. Diese Streuung ist auch ein möglicher Grund dafür, dass bei einigen Anlagen der Istwert über dem Erwartungswert liegt. Grundsätzlich tritt dieser Fall auf, wenn die realen Komponenten eine bessere energetische Performance aufweisen, als jene, welche im Prüfling eingesetzt wurden. Verbessert ein Hersteller beispielsweise eine Maschine durch den Einsatz von besseren Komponenten, ohne eine neue Prüfung vorzunehmen resp. andere Kenndaten zu veröffentlichen, dann kann der Istwert der verbesserten Maschine über dem Erwartungswert zu liegen kommen.

***FESTSTELLUNG*** Im realen Betrieb ist die energetische Effizienz von Wärmepumpen-Aggregaten so, wie dies Prüfstandsmessungen (WPZ oder Herstellerangaben) erwarten lassen.

## 7. Schlusswort und Ausblick

Als Anfang der 90er Jahre der Entschluss gefasst wurde, Wärmepumpen im Feldbetrieb zu untersuchen, war der Antrieb vor allem die Qualitätsprobleme mit Wärmepumpenanlagen zu Beginn des ersten Aufschwungs anfangs der 80er Jahre. Diese sollten sich bei einem erneuten Markterfolg nicht noch einmal wiederholen.

In den Diskussionen über den Inhalt einer solchen Feldanalyse zeigten sich die damals grossen Unsicherheiten. Dutzende von möglichen Ursachen für eine ungenügende Performance von Wärmepumpen im praktischen Betrieb wurden genannt und alle Beteiligten erwarteten, dass Wärmepumpenanlagen häufig nicht das erreichten, was die Wärmepumpenaggregate gemäss den ersten Messungen am WPZ versprochen. Für einige Fachleute war es gar unabdingbar, dass jede Wärmepumpe mit einer Elektrizitäts- und Wärmemessung ausgerüstet sein müsste, um die Effizienz kontrollieren und sicherstellen zu können. Auch die Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpen war heftig umstritten, wohl vor allem, weil früher damit zahlreiche Betriebsstörungen verbunden waren.

Von all diesen Bedenken ist heute nichts mehr übrig geblieben. Die Wärmepumpenanlagen erreichen das, was gemäss den Messungen auf dem Prüfstand des WPZ möglich ist, auch im praktischen Betrieb. Warmwasserbereitstellung mit der Wärmepumpe ist praktisch zum Normalfall geworden, negative Alterungseffekte konnten bisher nicht festgestellt werden und niemand würde mehr ernsthaft fordern, Wärmepumpen mit teuren Kontrolleinrichtungen auszurüsten.

Auch harte Kritiker der WP-Heizung haben zu Kenntnis nehmen müssen, dass mit den heute erreichten Jahresarbeitszahlen von deutlich über 3, Wärmepumpen in jedem Fall ein ökologisch vorbildliches Heizsystem darstellen.

Auch in der Statistik der erneuerbaren Energien haben die Daten von FAWA Eingang gefunden. Früher wurde für alle Wärmepumpen ein Durchschnittswert der Jahresarbeitszahl von 2.5 verwendet. Heute werden nach Leistungsgrösse und Wärmequelle differenzierte, effektiv gemessene Zahlen eingesetzt.

Last but not least konnte aufgrund der FAWA-Messungen mit dem BUWAL eine Ausnahmeregelung für die Dichtigkeitsprüfung gefunden werden. Statt einer jährlichen Dichtigkeitsprüfung ist diese nun nur alle sechs Jahre notwendig.

Ist damit die Entwicklung bei den Wärmepumpen beendet und gibt es keine offenen Fragen beim Betrieb der Wärmepumpenanlagen mehr?

Nicht ganz:

Die Wärmepumpen als Aggregate werden sich weiterentwickeln und mit steigendem Marktvolumen wahrscheinlich auch noch kostengünstiger werden.

Wärmepumpenanlagen können noch verbessert werden, indem die Vorlauftemperaturen bei Häusern mit geringem Energieverbrauch weiter gesenkt werden. Bereits mit der heutigen WP-Technik können Objekte, die mit thermoaktiven Bauteilheizungen beheizt werden, Jahresarbeitszahlen von 5 bis 6 erreichen.

Mehr und mehr werden Wärmepumpen nicht nur im Winter zu Heizzwecken, sondern im Sommer zur Kühlung eingesetzt und bieten damit dem Bauherrn einen Zusatzkomfort, der mit Heiz-

kesseln nicht erreicht werden kann. Auch ökologisch kann eine solche Kühlung von Vorteil sein, wenn zum Beispiel das Warmwasser damit aufbereitet wird.

Zudem wird der zunehmende Einsatz natürlicher Kältemittel effizientere Wärmepumpen für die Warmwasserbereitstellung für Temperaturen von über 70°C ermöglichen, die innert 5 Jahren wohl auf dem Markt erscheinen werden.

Ganz wichtig ist auch die Frage, welche durchschnittliche Nutzungsdauer moderne Wärmepumpenanlagen erreichen können. Daher ist es auch sinnvoll, dass die FAWA-Messungen am bisherigen Anlagenpark weiterlaufen.

Nachdem nun vor allem bei den kleinen Wärmepumpen ein Markterfolg eingetroffen ist, werden in Zukunft auch die Wärmepumpen mit einer höheren Leistung am Markt mehr Erfolge aufweisen. Vor allem das Contracting und die kombinierte Wärme-Kälteerzeugung könnte diesen Anlagen zum Durchbruch verhelfen.

Diese Anlagen unterscheiden sich jedoch in einigen Merkmalen von den Klein-Wärmepumpen. Die wichtigsten: Sie haben mehrere Kompressoren, werden vielfach auch bivalent betrieben, sind nicht WPZ geprüft und werden meist von anderen Herstellern gefertigt. Gerade deshalb wäre es interessant, mehr über die Performance von Grosswärmepumpen im Leistungsbereich ab 100 kW zu wissen. Während früher solche Messungen sehr aufwändig waren, kann heute auf die von FAWA erarbeiteten Methoden zurückgegriffen und damit mit vernünftigem Aufwand auch ein relevantes Bild über die Grosswärmepumpen erarbeitet werden. Dies würde nicht zuletzt das Vertrauen der zukünftigen Bauherren in diese Technik verstärken und den Markterfolg auch bei den grossen Wärmepumpen unterstützen.

## 8. Literatur

- [1] Rognon, F. (Hrsg.). 1999. *Wärmepumpen – heute und morgen*. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW) des Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Art. Nr. 30931.
- [2] Gabathuler, H.R.; H. Mayer, T. Afjei. 2002. *Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen; Teil 1: STASCH-Planungshilfen*. Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Nr. 220216.
- [3] Afjei, Th. et al.. 1998. *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche*. Bundesamt für Energie 1998. Anhang 7.2. ENET-Nr. 194994.
- [4] BFE. 1998. *Geothermie – Praktische Nutzung von Erdwärme; Leitfaden für Planer, Bauherrschaften, Investoren und Entscheidungsträger*. Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Nr. 190388.
- [5] Hellström, G., B. Sanner. 1994. *PC-Programm zur Auslegung von Erdwärmesonden*. IZW-Bericht 1/94. S. 341 - 350, Karlsruhe.
- [6] Huber, A.; O. Schuler. 1997. *Berechnungsmodul für Erdwärmesonden*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Nr. 9658807/1.
- [7] Erb, M.; P. Hubacher. 2001. *Erfahrungen an Retrofit-Anlagen im Betrieb*. Tagungsband zur 8. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW). Bundesamt für Energie, Bern.
- [8] FWS, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz. 2001. *Gütesiegel für Erdwärmesonden – Bohrfirmen*. Version Juni 2001.
- [9] Weber, H.; M. Brack; J.-M. Suter. 1982. *Energetische Optimierung eines Warmwasserspeichers in Theorie und Praxis: Wärmeverluste, Schichtung und Auswirkungen der Zirkulation*. Tagungsband des 2. ‚Statusseminar Wärmeschutzforschung im Hochbau‘. ETH-Zürich, 19.-20. Oktober 1982.
- [10] Hubacher, B.; M. Ehrbar. 2001. *Dynamischer Wärmepumpentest. Entwicklung und Validierung einer Prüfprozedur für den Prüfstand WPZ in Töss*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie, Bern.
- [11] Gabathuler, H.R.; H. Mayer, E. Shafai. 2002. *Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpen, Phase 2: Erprobung in einem Wohnhaus*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Nr. 220186.
- [12] Huber, A. 1999. *Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen*. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie, Bern. ENET-Nr. 9934023.

## 9. Symbolverzeichnis und Glossar

Anlage	Umfasst die gesamte Heiztechnikinstallation, i.B. Wärmequelle, WP-Aggregat (vgl. Aggregat), Speicher, Boiler, Wärmeverteilung und Hilfsantriebe.
Aggregat	Bezeichnet die eigentliche Wärmepumpe, inkl. Regelung.
AZ	Die Arbeitszahl entspricht der Definition der Jahresarbeitszahl (JAZ, vgl. unten) mit dem Unterschied, dass die Beobachtungsperiode kürzer als ein Jahr ist.
BHZ/gem.	Abgabesystem Bodenheizung oder Bodenheizung gemischt mit Radiatoren
bivalent	Zur Abdeckung des Raumwärmebedarfs wird ein zweiter, nicht elektrisch betriebener, Wärmeerzeuger eingesetzt (z.B. Holz-, Gas- oder Ölkessel).
WW	Brauchwarmwasser >0%: WW teilweise oder total mit WP Wi_o_So 100% WP: WP erwärmt WW im Winter oder Sommer zu 100% WP Vorw.: nur Vorwärmung des WW durch WP WP+SoKo: WW durch WP und Sonnenkollektoren
COP	Coefficient of performance Verhältnis aus Heizleistung zu elektrischer Aufnahmeleistung von Verdichter, Abtauvorrichtung und Förderorganen (vgl. EN 255)
CI	Vertrauensintervall Bezeichnet das Intervall, in welchem der wahre Wert, also der Mittelwert des betreffenden Merkmals (z.B. JAZ) mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von (hier = 5%) liegt. Der wahre Mittelwert bezeichnet den Mittelwert der Grundgesamtheit, in FAWA also das Mittel über alle in der Schweiz installierten Anlagen der betreffenden Kategorie (z.B. LW oder S/W).
	$CI = \hat{M} \pm z \sqrt{Var(\hat{M})}$ $Var(\hat{M}) = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{SD^2}{n}$
	<p><math>\hat{M}</math> : geschätzter Mittelwert</p> <p><math>z</math> : oberes <math>\frac{\alpha}{2}</math> Quantil der Normalverteilung</p> <p>Var : Varianz (Schätzung des wahren Wertes)</p> <p><math>n</math> : Stichprobenumfang</p> <p><math>N</math> : Umfang der Grundgesamtheit</p> <p>SD : Standardabweichung</p>
EKZ	Energiekennzahl (Raumwärme): Heizenergiebedarf pro m <sup>2</sup> Energiebezugsfläche.
FBH	Fussbodenheizung
$\vartheta_q$	Quellentemperatur vor dem Eintritt in die Wärmepumpe

$\vartheta_s$	Senktemperatur nach dem Austritt aus der Wärmepumpe
JAZ 1	Verhältnis zwischen der Wärmemenge ab WP, ohne Speicherverluste (sofern vorhanden) 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. Konkret wird bei Anlagen mit parallel geschaltetem Speicher der Stromverbrauch der Ladepumpe voll eingerechnet. Bei den restlichen Anlagen wird der Pumpenstromverbrauch des Verflüssigers über dessen Druckverlustkennlinie, den realen Volumenstrom und einen angenommenen Pumpenwirkungsgrad (15%) abgeschätzt.
JAZ 2	Verhältnis zwischen der Wärmemenge ab WP resp. ab Speicher, sofern vorhanden und dem WP spezifischen Elektrizitätsbedarf, inklusive der Hilfsaggregate wie Umwälzpumpen (senkenseitig nur Druckabfall über Verflüssiger) und Carterheizung. Bei speicherlosen Anlagen entspricht also die JAZ 1 der JAZ 2. Speicherverluste gemäss <u>Kap. 3.3.8</u> .
JAZ 3	Verhältnis zwischen der Wärmemenge ab WP resp. ab Speicher, sofern vorhanden, inklusive elektrischer Zusatzheizungen (für Raumheizung und WW, Letzteres nur, wenn WW in WP-Anlage eingebunden) und dem WP spezifischen Elektrizitätsbedarf, inklusive aller Hilfsaggregate wie Umwälzpumpen (total) und Carterheizung.
L/W	Luft/Wasser-Anlagen
LZ	Laufzeit
$\lambda_{ER}$	Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs
$\lambda_{HF}$	Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllungsmaterials (Verpressung) einer Erdwärmesonde
Maschine	<i>vgl. Aggregat</i>
monoenergetisch	Zur Abdeckung des Raumwärmebedarfs wird ein zweiter, elektrisch betriebener, Wärmeerzeuger eingesetzt (Elektroeinsatz).
monovalent	WP-Aggregat deckt den gesamten Raumwärmebedarf
m/	mit
nJAZ 2	Klimanormierte JAZ 2 Regressionswert ( $T_a = 4^\circ\text{C}$ ) aus Arbeitszahlen in Perioden unterschiedlicher mittlerer Aussentemperatur (vgl. <u>Kap. 3.3.5</u> ).
o/	ohne
Par.	parallel
Q	Wärmemenge

r Pearsonscher Korrelationskoeffizient. Dieser Koeffizient ist ein dimensionsloser Index mit dem Wertebereich  $-1.0 \leq r \leq 1.0$  und ist ein Mass dafür, inwieweit zwischen zwei Datensätzen eine lineare Abhängigkeit besteht.

Wert (absolut)	Korrelationsstärke
0.00	kein Zusammenhang
> 0.00 bis 0.40	niedriger Zusammenhang
0.40 bis 0.70	mittlerer Zusammenhang
0.70 bis < 1.00	hoher Zusammenhang
1.00	vollständiger Zusammenhang

Rad. Abgabesystem Radiatoren

REP Relative Energetische Performance: WP-normierte JAZ (vgl. [Kap. 3.4.3](#))

S/W Sole/Wasser-Anlagen

SD Standardabweichung  
Ist ein Mass für die Streuung eines Merkmals um den Mittelwert. Berechnungen der SD auf Basis einer Stichprobe ( $n < N$ ) sind immer nur Schätzungen des wahren Wertes, folglich auch alle auf ihr basierenden Grössen (z.B. das Vertrauensintervall).

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

$y_i$ : Wert des Datenpunktes  $i$   
 $\bar{y}$ : Mittelwert der Datenreihe  $y$

Ser. seriell

SNG Systemnutzungsgrad: Erzeugte Wärmemenge für Raumheizung und WW in Beziehung zum totalen Stromverbrauch der Anlage (inkl. Elektroboiler).

$$SNG = \frac{Q_{\text{Heiz}} + Q_{\text{WW}}}{\sum E_{\text{el}}}$$

Sp. Speicher

System *vgl. Anlage*

Ta Aussentemperatur

Th.v. Thermostatventile

TRkp. Regler mit Raumkompensation

$T_{\text{sole}}$  Temperatur der Sole beim Eintritt in die Wärmepumpe.

TVL (dim.) Vorlauftemperatur bei Dimensionierungsbedingungen (meist  $T_a - 8^\circ\text{C}$ )

## 10. Anhang

### 10.1 Nichtklimanormierte Jahresarbeitszahlen (JAZ)

Nachfolgend einige der wichtigsten JAZ-Graphiken aus dem Hauptteil, hier aber ohne Klimanormierung. Die nicht normierten JAZ liegen durchschnittlich um 3.5% höher als die normierten. In den Überblickshistogrammen ([Abb. 1](#) und [2](#)) zeigen gewisse Abweichungen zu den klimanormierten Daten, da bei Einzelanlagen wie erwähnt Differenzen auftreten können. Werden aber Mittelwerte von Anlagengruppen betrachtet (z.B. Jahresreihen) so stimmen JAZ und nJAZ-Graphen sehr gut überein.

Bei den nachfolgenden Graphiken wird eingangs jeweils auf die entsprechenden Abbildungen im Hauptteil verwiesen, welche die klimanormierten JAZ zeigen.

#### Überblick Anlagengruppen

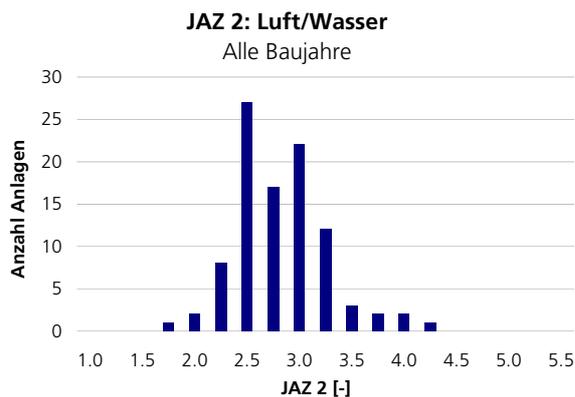


Abbildung 109: Häufigkeiten der JAZ 2 aller in FAWA untersuchten Luft/Wasser Anlagen. Das Mittel liegt bei 2.7 (SD 0.4).

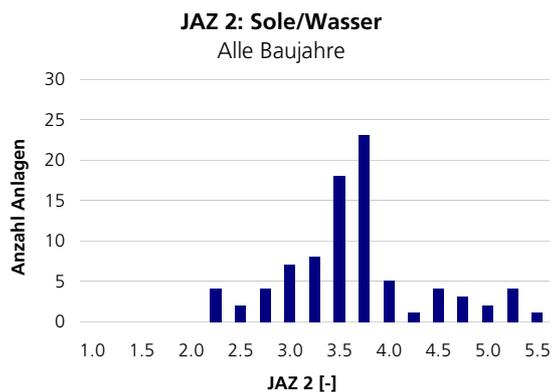


Abbildung 110: Bei den Sole/Wasser-Anlagen beträgt der Mittelwert 3.5 (SD 0.7).

## Zeitliche Entwicklung Anlagengruppen

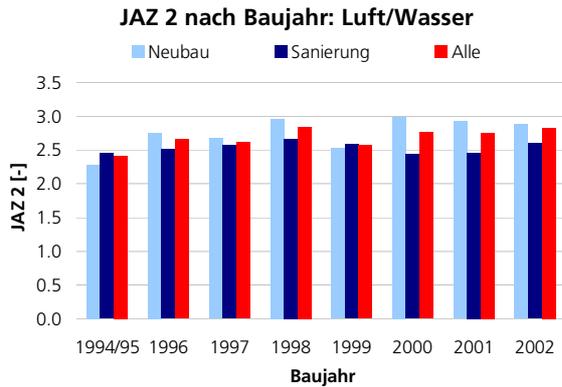


Abbildung 111: Mittlere JAZ 2 der LW-Anlagen nach Baujahr und Gebäudetyp. Die lineare Regression zeigt eine mittlere jährliche Verbesserung von 1.7%.

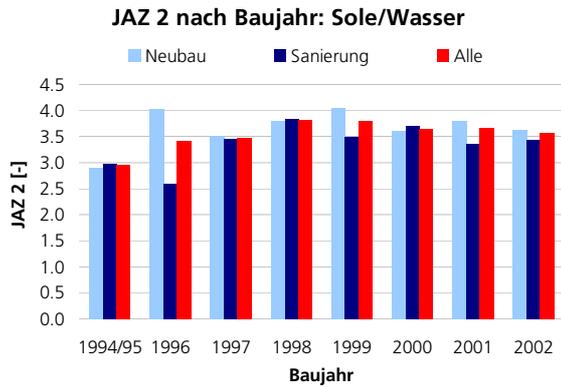


Abbildung 112: Mittlere JAZ 2 der S/W-Anlagen nach Baujahr und Gebäudetyp. Die Regression zeigt eine jährliche Verbesserung um 2.2%.

## Alterung

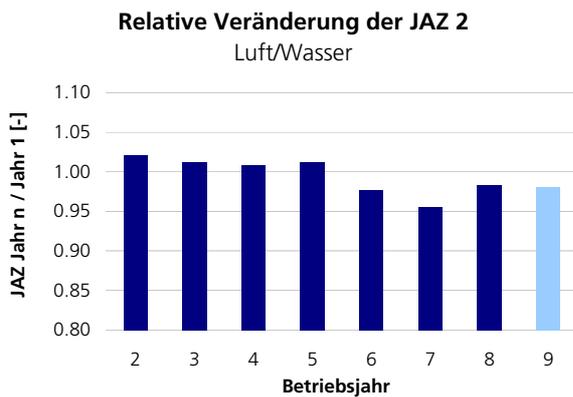


Abbildung 113: Relative Abweichung der JAZ 2 vom ersten Betriebsjahre für die Luft/Wasser Anlagen. Das 9. Jahr basiert auf Daten von nur 1 Anlage, ist also noch mit sehr grosser Zurückhaltung zu interpretieren.

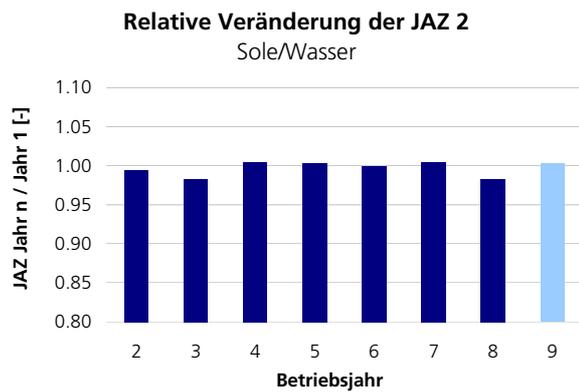


Abbildung 114: Relative Abweichung der JAZ 2 vom ersten Betriebsjahre für die Sole/Wasser Anlagen. Das 9. Jahr basiert auf Daten von nur 3 Anlagen und somit sehr unsicher.

## 10.2 EWS-Sensitivitäten

Nachdem festgestellt wurde, dass mit dem Programm EWS praxisrelevante Informationen zu den  $T_{\text{sole}}$  erreicht werden können, wurde das Programm genutzt, um die Sensitivitäten folgender Parameter auf die  $T_{\text{sole}}$  zu klären:

1. Betriebsjahr und Energieentzug bei konstanter Geologie
2. Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und Energieentzug bei konstantem Betriebsjahr
3. Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung und Energieentzug bei konstantem Betriebsjahr
4. Sondenlänge und Energieentzug bei konstantem Betriebsjahr
5. Aussentemperatur und Energieentzug bei konstantem Betriebsjahr
6. Pulsbreite (Laufzeit der WP pro Start) und Energieentzug bei konstantem Betriebsjahr

### **Betriebsjahr und Energieentzug**

In Tab. 1 sind die konstanten Anlagen- und Geologiedaten sowie die mit der Software EWS errechneten  $T_{\text{sole}}$  bei variablem Betriebsjahr und Energieentzug dargestellt. Die Werte sind energiegewichtet, entsprechen also dem für die JAZ relevanten Wert.

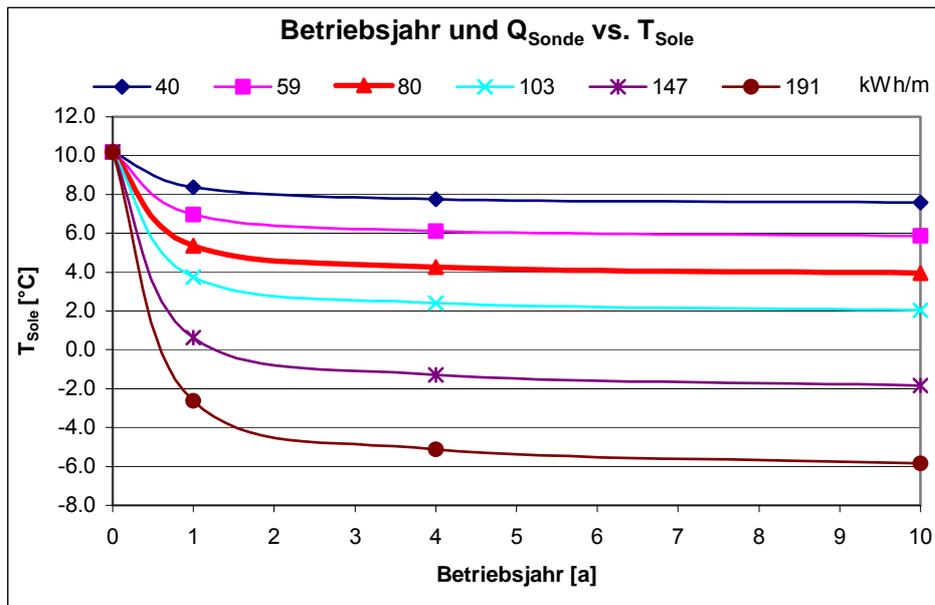
Tabelle 22: Ausgangsdaten und Resultate der Sensitivität der  $T_{\text{sole}}$  auf Betriebsjahr und Energieentzug.

Anlagedaten		Geologie				
Anlage	Engsil07	$\lambda_{\text{ER}}$	2.00 W/m-K			
Höhe ü.M.	695 MüM	Dichte	2309 kg/m <sup>3</sup>			
Ta	8.4 °C	Wärmekapazität	1045 J/kg-K			
Sondenlänge	120 m	$\lambda_{\text{HF}}$	0.81 W/m-K			
Anzahl Sonden	1	Dichte	1180 kg/m <sup>3</sup>			
Betriebsdauer	1600 h	Wärmekapazität	3040 J/kg-K			

$Q_{\text{EWS}}$ [kWh]	4'800	7'038	9'600	12'316	17'594	22'873
$Q_{\text{EWS spez.}}$ [kWh/m]	<b>40</b>	<b>59</b>	<b>80</b>	<b>103</b>	<b>147</b>	<b>191</b>
$p_{\text{EWS}}$ [W/m]	25	37	50	64	92	119
Jahr	$T_{\text{sole}}$ [°C] EWS					
0	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
1	8.38	6.96	5.36	3.74	0.61	-2.63
4	7.75	6.11	4.26	2.42	-1.28	-5.12
10	7.57	5.86	3.95	2.04	-1.83	-5.83
20		6.02		2.29	-1.47	-5.32

Die 80 kWh/m Kurve (Abb. 7) entspricht im Mittel ungefähr der in FAWA gemessenen Anlagen. Sie reproduziert einerseits die gemessenen  $T_{\text{sole}}$  (Mittelwert) und zeigt andererseits die nur geringe Abnahme der  $T_{\text{sole}}$  zwischen dem ersten und  $n$ -ten Betriebsjahr von knapp zwei Kelvin.



G:\2000\025\3\_EWS\Auswertung EWS\EWS\_Alles\_04.xls\Sens\_Zeit

Abbildung 115: Sensitivität der  $T_{\text{Sole}}$  (energiegewichtet) gegenüber dem Betriebsjahr und der Sondenbelastung (jährliche Entzugsenergie).

### Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und Energieentzug

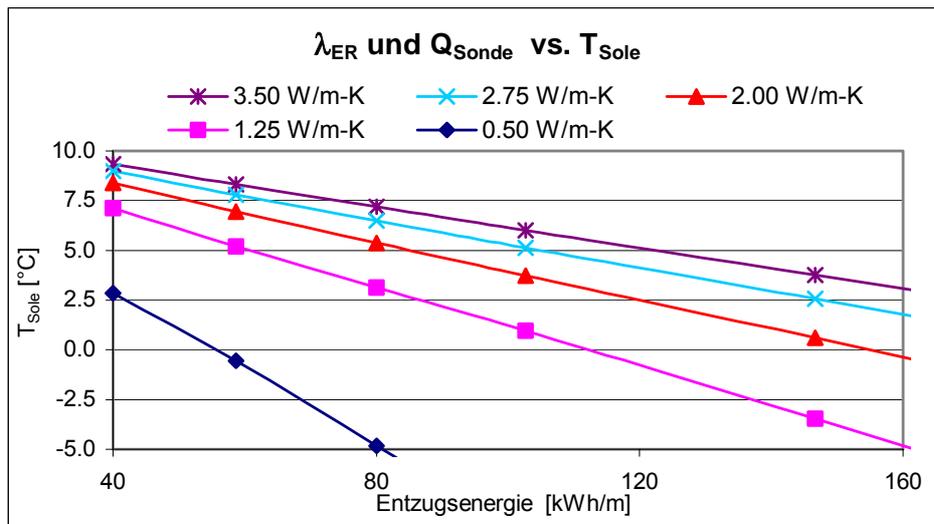
Bei den restlichen Sensitivitätsanalysen wurde jeweils das vierte Betriebsjahr einer Anlage mit einer 120 m langen Sonde berechnet.

Tab. 2 und Abb. 8 zeigen den deutlichen Zusammenhang zwischen Sondenbelastung sowie Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und der  $T_{\text{Sole}}$ .

Tabelle 23:  $T_{\text{Sole}}$  (energiegewichtet) gegenüber der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ( $\lambda_{\text{ER}}$ ) und der Sondenbelastung  $Q_{\text{Sonde}}$  (Entzugsenergie pro Jahr).

$P_{\text{EWS}}$ [W/m]		25	37	50	64	92	119
$E_{\text{EWS}}$ [kWh/m]		40	59	80	103	147	191
$\lambda_{\text{ER}}$	$T_{\text{Sole}}$ [°C]						
0.50 W/m-K		2.9	-0.6	-4.8	-9.5	-18.7	-28.0
1.25 W/m-K		7.1	5.2	3.1	1.0	-3.5	-8.0
2.00 W/m-K		8.4	7.0	5.4	3.7	0.6	-2.6
2.75 W/m-K		9.0	7.8	6.5	5.1	2.6	0.0
3.50 W/m-K		9.3	8.3	7.2	6.0	3.8	1.5

In FAWA werden Anlagen untersucht, die bezüglich der Sondenbelastung Werte von unter 30 bis über 200 kWh/m aufweisen, was die  $T_{\text{Sole}}$ -Differenzen von mehr als 10 K erwarten lässt.



G:\2000\025\3\_EWS\Auswertung EWS\EWS\_Alles\_04.xls\Sensitivitäten

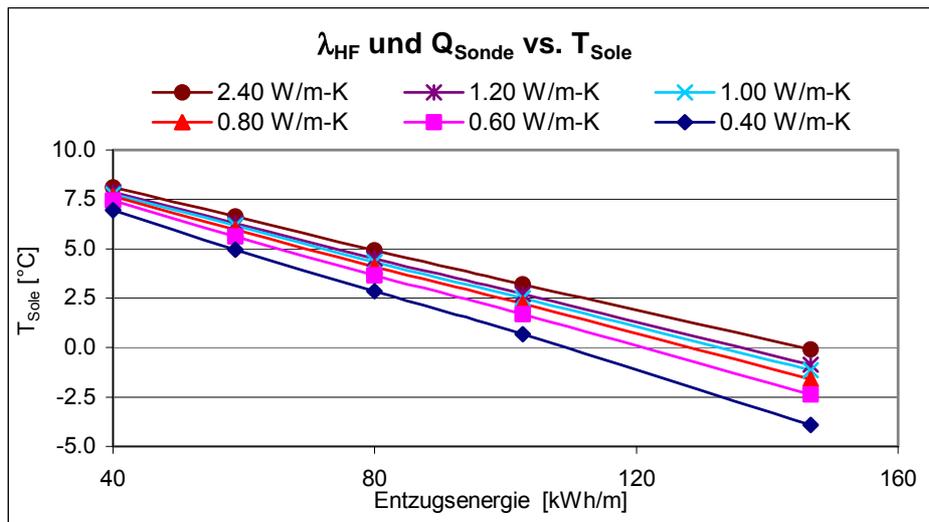
Abbildung 116: Sensitivität der  $T_{\text{Sole}}$  gegenüber der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ( $\lambda_{\text{ER}}$ ) und der Sondenbelastung  $Q_{\text{Sonde}}$  (Entzugsenergie pro Jahr). Berechnet wurde das vierte Betriebsjahr der Anlage mit  $T_a$  8.4°C und einer Sondenlänge von 120 m. Die Hinterfüllung wurde mit 0.81 W/m-K angenommen.

### Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung und Energieentzug

Die nachfolgend dargestellten Daten zeigen, dass die Qualität und damit die Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung nur in extremen Fällen zu deutlichen  $T_{\text{Sole}}$ -Differenzen führt. Wichtig ist also, dass die Sonde fachgerecht hinterfüllt wird, wie dies in [8] beschrieben ist. Hingegen haben die geringen Differenzen der Wärmeleitfähigkeit der geeigneten Hinterfüllungsmaterialien (Zement-Opalit- oder Zement-Bentonitsuspensionen) keinen relevanten Einfluss auf die resultierende  $T_{\text{Sole}}$ .

Tabelle 24:  $T_{\text{Sole}}$  gegenüber der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung und der Energieentzugsleistung der Sonde.

$P_{\text{EWS}}$ [W/m]		25	37	50	64	92
$E_{\text{EWS}}$ [kWh/m]		40	59	80	103	147
$\lambda_{\text{HF}}$	$T_{\text{Sole}}$ [°C]					
0.40 W/m-K		7.0	5.0	2.9	0.7	-3.9
0.60 W/m-K		7.4	5.6	3.7	1.7	-2.4
0.80 W/m-K		7.7	6.0	4.1	2.2	-1.6
1.00 W/m-K		7.8	6.2	4.3	2.5	-1.1
1.20 W/m-K		7.9	6.3	4.5	2.7	-0.8
2.40 W/m-K		8.1	6.6	4.9	3.2	-0.1



G:\2000\025\3\_EWS\Auswertung EWS\EWS\_Alles\_04.xls\Sensitivitäten

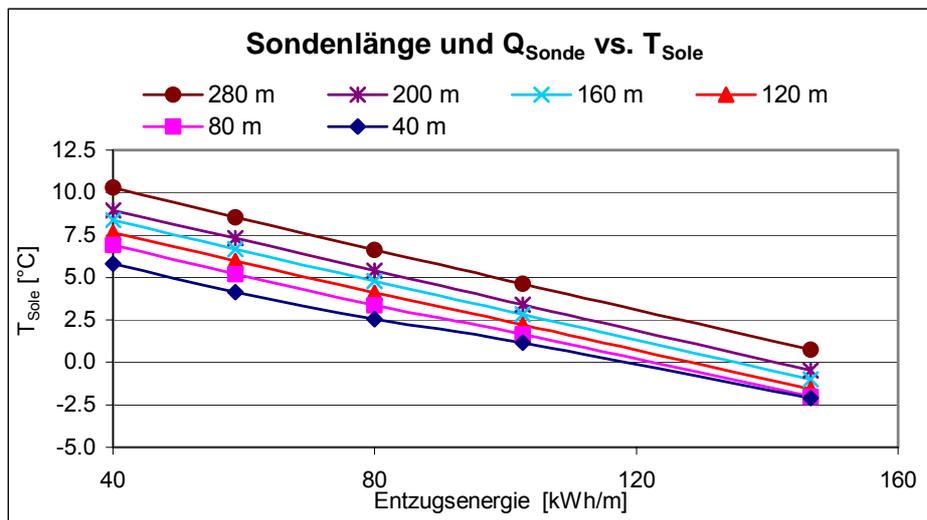
Abbildung 117: Sensitivität der  $T_{\text{Sole}}$  (energiegewichtet) gegenüber der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung ( $\lambda_{\text{HF}}$ ) und der Sondenbelastung (Entzugsenergie pro Jahr). Berechnet wurde das vierte Betriebsjahr einer Anlage mit einer Sondenlänge von 120 m. Das Erdreich wurde mit 1.94 W/m-K angenommen.

## Sondenlänge und Energieentzug

Die Daten zeigen den gemäss geologischer Tiefenstufe erwarteten Zusammenhang. Pro 100 m-Mittlerer Sondentiefe nimmt die  $T_{\text{Sole}}$  um 3.5 bis 4.0 K zu, wobei sich die Sondenbelastung nur wenig auf den Gradienten auswirkt.

Tabelle 25:  $T_{\text{Sole}}$  gegenüber der Sondenlänge und der Energieentzugsleistung der Sonde.

$P_{\text{EWS}}$ [W/m]		25	37	50	64	92
$E_{\text{EWS}}$ [kWh/m]		40	59	80	103	147
Länge [m]	$T_{\text{Sole}}$ [°C]					
40 m		5.8	4.2	2.5	1.2	-2.1
80 m		6.9	5.2	3.4	1.6	-2.0
120 m		7.7	6.0	4.1	2.2	-1.6
160 m		8.4	6.7	4.8	2.8	-1.0
200 m		9.0	7.3	5.4	3.4	-0.5
280 m		10.3	8.6	6.6	4.6	0.7

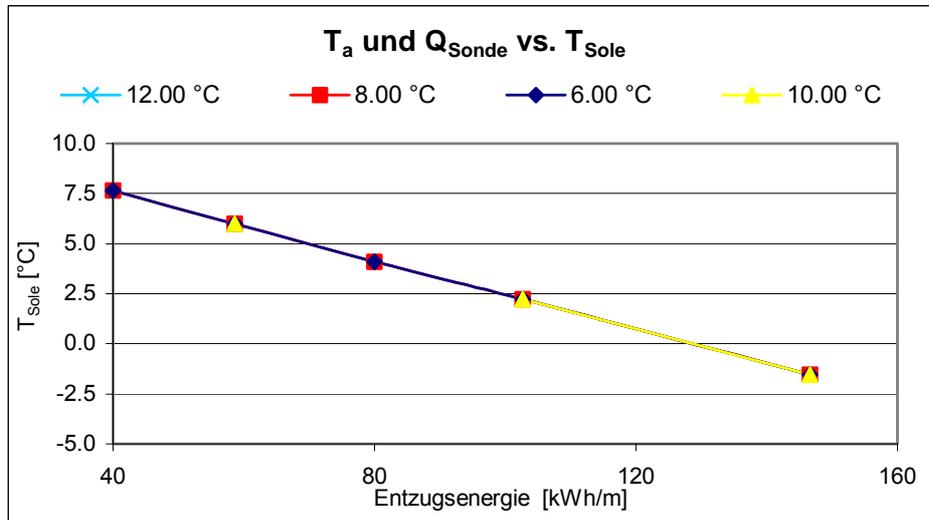


G:\2000\025\3\_EWS\Auswertung EWS\{EWS\_Alles\_04.xls}Sensitivitäten

Abbildung 118: Sensitivität der  $T_{\text{Sole}}$  gegenüber der Sondenlänge und der Sondenbelastung (Entzugsenergie pro Jahr). Berechnet wurde das vierte Betriebsjahr Anlage mit  $T_a$  8.4°C. Das Erdreich wurde mit 1.94 W/m-K angenommen.

### Aussentemperatur und Energieentzug

Wie erwartet hat die Aussentemperatur in den hier relevanten Tiefen keinen Einfluss auf die Erdreich- und somit auf die Soletemperatur.



G:\2000\025\3\_EWS\Auswertung EWS\EWS\_Alles\_04.xls\Sensitivitäten

Abbildung 119: Sensitivität der  $T_{\text{Sole}}$  gegenüber der mittleren Aussentemperatur und der Sondenbelastung (Entzugsenergie pro Jahr). Berechnet wurde das vierte Betriebsjahr einer Anlage mit einer Sondenlänge von 120 m. Das Erdreich wurde mit 1.94 W/m-K angenommen.

### Pulsbreite und Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung

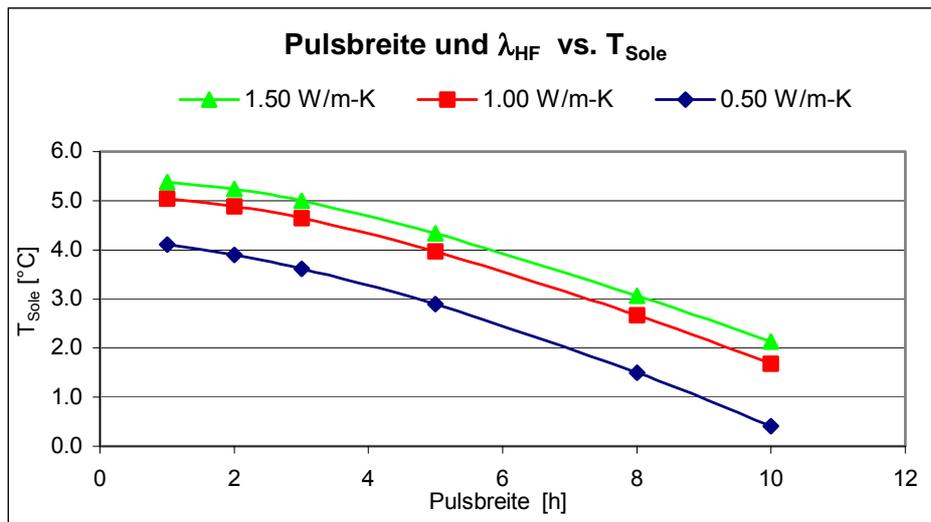
Bei dieser Variante wurde das Entzugsprofil (Stundenwerte) so verändert, dass der Sonde jeweils die benötigte Energiemenge von zwei bis acht Stunden in nur einer Stunde entzogen wird. Damit sollte der Effekt von taktenden Anlagen auf die  $T_{\text{Sole}}$  abgeschätzt werden.

Es zeigt sich, dass bis 3 Stunden nur ein geringer Effekt zu erwarten ist. In Realität liegt die Laufzeit pro Start im Bereich von 0.2 bis 2.0 Stunden. Mit EWS können aber nur Stundenwerte gerechnet werden. Aus dem Verlauf der Kurven in [Abb. 37](#) kann aber leicht geschlossen werden, dass der Effekt bei kleineren Intervallen noch geringer ist. Lange Laufzeiten pro Start der WP führen also kaum zu tieferen  $T_{\text{Sole}}$ . In Realität wird der hier als klein beurteilte Einfluss sogar noch durch den Umstand reduziert, dass bei tieferer  $T_{\text{Sole}}$  ein grösserer Teil des Heizbedarfs durch Strom (tieferer COP) abgedeckt wird und somit die Sondenbelastung abnimmt, was die  $T_{\text{Sole}}$  erhöht.

Tabelle 26:  $T_{\text{Sole}}$  gegenüber der Pulsbreite und der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung.

Pulsbreite [h]	1	2	3	5	8	10
$E_{\text{EWS}}$ [kWh/m]	47					
$\lambda_{\text{HF}}$	$T_{\text{Sole}}$ [°C]					
0.50 W/m-K	4.1	3.9	3.6	2.9	1.5	0.4
1.00 W/m-K	5.0	4.9	4.6	4.0	2.7	1.7
1.50 W/m-K	5.4	5.2	5.0	4.3	3.1	2.1

Die Sondenbelastung war bei dieser Analyse mit 47 kWh/m unterdurchschnittlich. Bei grösseren Belastungen kann mit einem leicht grösseren Effekt gerechnet werden.



G:\2000\025\3\_EWS\Auswertung EWS\[EWS\_Alles\_04.xls]Sensitivitäten

Abbildung 120: Sensitivität der  $T_{\text{sole}}$  gegenüber der Pulsbreite (Laufzeit pro Start der WP) und der Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung. Berechnet wurde das vierte Betriebsjahr einer Anlage mit einer Sondenlänge von 120 m. Das Erdreich wurde mit 1.94 W/m-K angenommen und die Sondenbelastung mit 47 kWh/m-a.