

Auszug aus dem Schlussbericht, Oktober 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 (ehrbar@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

Auszug aus dem Schlussbericht, Oktober 2004

Vertrieb: ENET-Nr. 240017. Für den kompletten Schlussbericht: 240016

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

Vertrieb: ENET Nr. 240017

Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.energie-schweiz.ch

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG.....	2
2.	ZIELE UND VORGEHEN	3
2.1	Kriterien der Anlagenwahl	4
2.2	Messmethodik	5
2.2.1	Langzeitmessungen	5
2.2.2	Nutzerbefragung	7
2.3	Definitionen und Modelle	7
2.3.1	Heizperiode	7
2.3.2	Aussentemperatur	7
2.3.3	Arbeits- und Jahresarbeitszahl	8
3.	ANLAGENÜBERSICHT	10
3.1	Gebäude	10
3.2	Anlagentypen	11
4.	RESULTATE UND EMPFEHLUNGEN	12
5.	BIBLIOGRAPHIE	17
6.	SYMBOLVERZEICHNIS UND GLOSSAR.....	18

1. Einleitung

Der vorliegende Bericht (ENET Bestell-Nr. 240017) ist ein Auszug aus dem vollständigen Schlussbericht vom April 2004 (ENET Bestell-Nr. 240016). Die Nummerierung der Abbildungen wurde wie im Schlussbericht belassen. Daher ist sie ab und zu unterbrochen. So kann der Leser aber in der Vollfassung diese leicht wieder finden.

Hingegen wurden die Kapitel neu nummeriert, um die Leserfreundlichkeit zu sichern.

Die Publikationen um das FAWA-Projekt sind auch bei der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz erhältlich, unter www.fws.ch.

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.

2. Ziele und Vorgehen

Ziele

Ursprüngliches Ziel von FAWA (Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen) war es, die energetische Effizienz von Kleinwärmepumpen bis 20 kW_{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.

FAWA hat also zum Ziel, statistisch gesicherte Aussagen zur Qualität im Feldbetrieb von in der Schweiz installierten Wärmepumpenanlagen mit einer Leistung bis maximal 20 kW_{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.

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.

2.1 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 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:

Thermische Leistung

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

Wärmequellen

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

Produktionsart

Seriegeräte, keine Sonderanfertigungen.

Betriebsart

Monovalent, monoenergetisch oder bivalent mit erfassbarer zweiter Wärmeerzeugung.

Standort

Geographisch unterschiedliche Lagen.

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.

Warmwasser

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

Besitzverhältnisse

Es werden nur private Anlagenbesitzer berücksichtigt, keine öffentlichen Objekte.

Prüfung

Die Wärmepumpenaggregate sind möglichst nach EN 255 geprüft worden.

Instrumentierung

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

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.

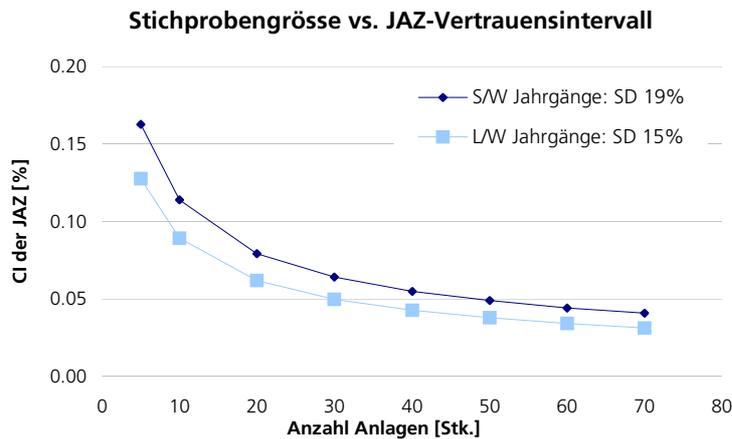


Abbildung 1: Je nach Standardabweichung und gewünschtem Vertrauensintervall (CI) verändert sich die notwendige Stichprobengrösse drastisch.

2.2 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 andererseits die Wärmepumpenanlage selbst.

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

Messgeräte: Mit wenigen Ausnahmen sind Wärmehähler im Einsatz, die den Durchfluss mit einem Ultraschallsensor bestimmen. Die Temperaturfühler befinden sich direkt im Medium (keine Tauchhülsen). Neben der Wärmemenge liefert der Wärmehähler auch den Volumenstrom über dem Verflüssiger. In 75% der Fälle wurde der Wärmehähler 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 $\pm 2.2\%$.

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 Impulszähler. Zur Messunsicherheit können keine Angaben gemacht werden.

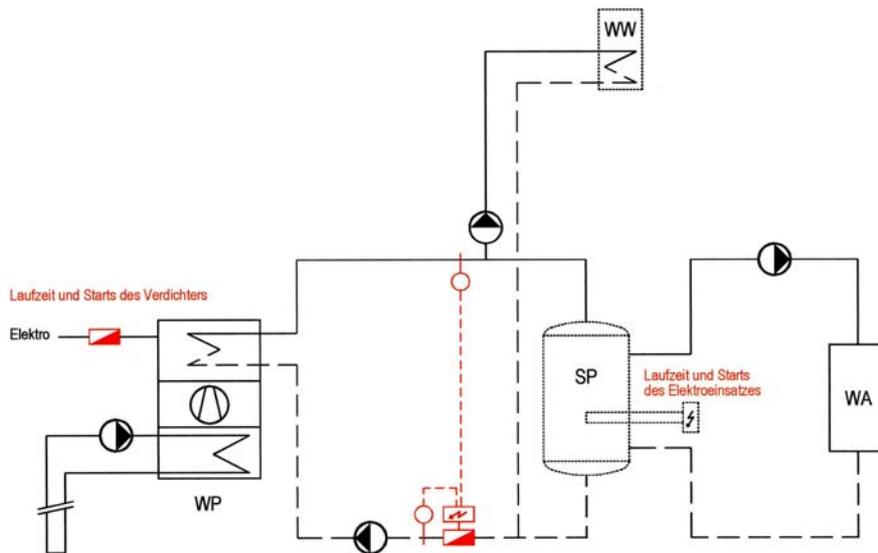


Abbildung 2: FAWA Messschema für der Langzeituntersuchung. Wärmehähler, Elektrozähler, Laufzeiten und Starts werden von den Anlagenbetreibern periodisch abgelesen.

2.2.2 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 ersetzen. 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.

2.3 Definitionen und Modelle

2.3.1 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.

2.3.2 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 $-0.5 \text{ K pro } 100 \text{ m}$ gerechnet.

2.3.3 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 Wärmehähler). 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 liegt die Systemgrenze der JAZ 1 zugrunde.

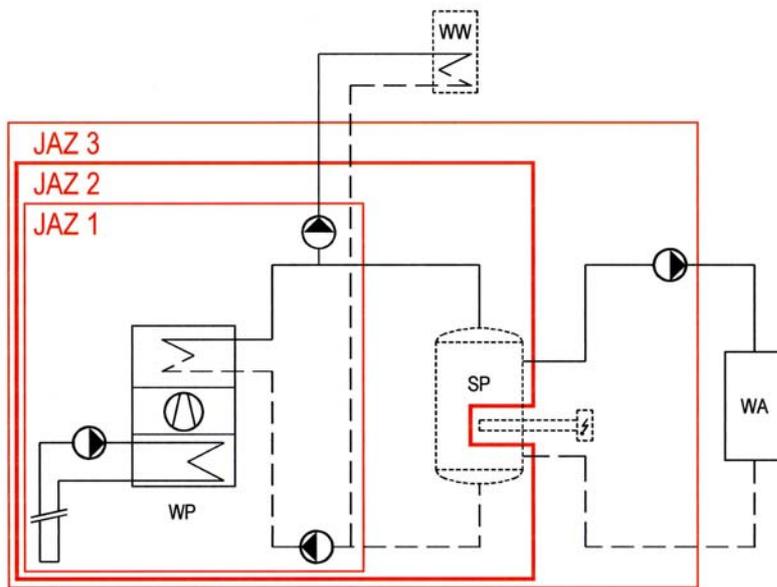


Abbildung 6: In FAWA verwendete Systemgrenzen zur Berechnung der JAZ 1, 2 und 3. In den allermeisten Fällen wird die JAZ 2 verwendet, welche allfällige Speicherverluste berücksichtigt. Bei Anlagen ohne Speicher wird der abgabeseitige Umwälzpumpenstromverbrauch gemäss Druckverlust über dem Verflüssiger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

3. Anlagenübersicht

3.1 Gebäude

Die zurzeit von FAWA untersuchten 236 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.

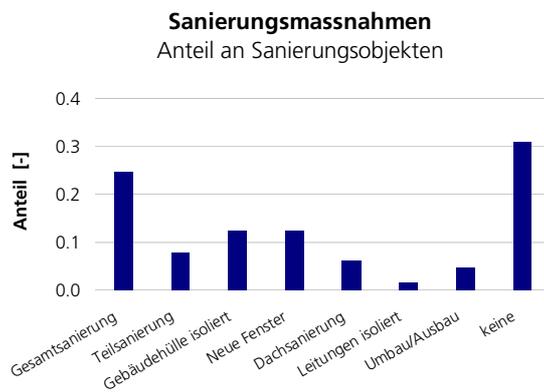


Abbildung 22: Bei 70% der Objekte wurden beim Einbau der WP auch eine energetische Sanierung der Gebäudehülle durchgeführt.

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.

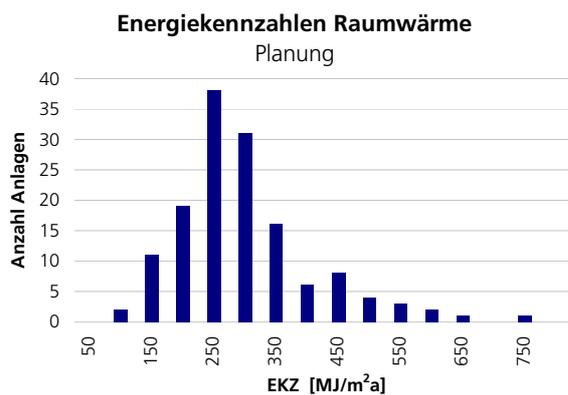


Abbildung 23: Die Planungswerte der Energiekennzahlen der untersuchten Objekte sind über einen breiten Bereich verteilt.

Die Planungswerte der Energiekennzahlen (EKZ) der untersuchten Objekte sind über einen breiten Bereich verteilt. Im Mittel liegen Sie bei 270 MJ/m² (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%.

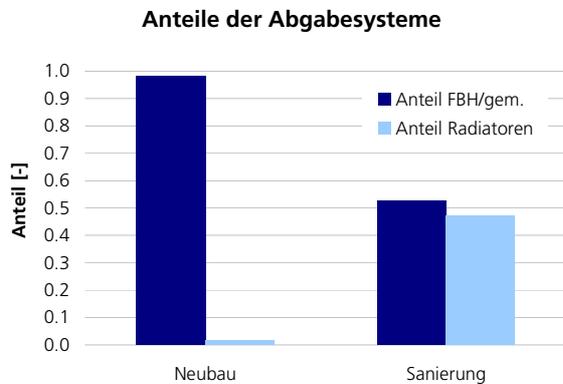


Abbildung 24: Neubauten weisen fast ausschliesslich Fussbodenheizungen oder gemischte Systeme auf. Wobei in Sanierungsobjekten in knapp der Hälfte der Fälle eine reine Radiatorenheizung vorhanden ist.

3.2 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.

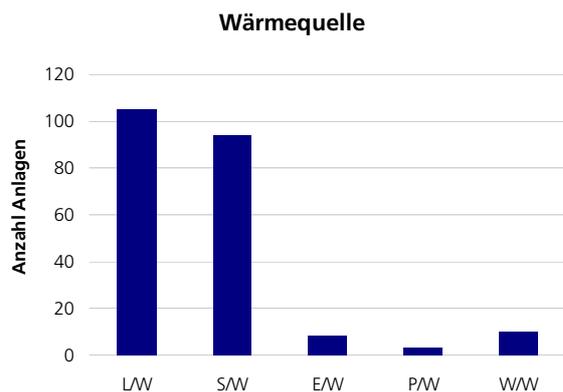


Abbildung 25: Anzahl der in FAWA untersuchten Anlagentypen bezüglich Umweltwärmequelle. LW: Luft; S/W: Erdwärmesonde; E/W: horizontales Erdregister; P/W: Energiepfähle; W/W: Wasser.

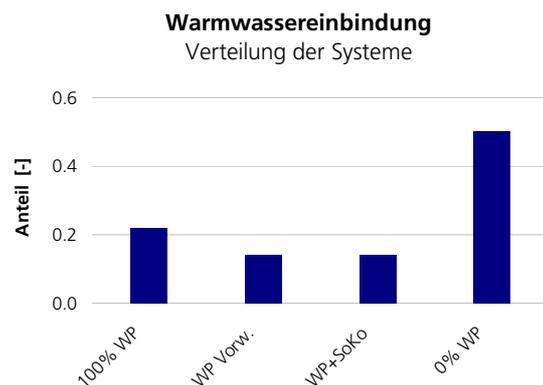


Abbildung 26: Anteile der verschiedenen Systeme zur Warmwasserbereitung. 100% WP: WW wird ausschliesslich mit der WP erwärmt; WP Vorw.: WP wärmt WW vor; WP+SoKo: Kombination aus WP und Sonnenkollektoren; 0% WP: WW wird zu 100% vom Elektroboiler erwärmt.

4. Resultate und Empfehlungen

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 Auslegepunkt 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.

FESTSTELLUNG	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.
EMPFEHLUNG	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.

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.

FESTSTELLUNG	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.
---------------------	---

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.

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

Alterung

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

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

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.

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

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

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.

FESTSTELLUNG	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 Elektroeingriff sinnvoll sein. Sole/Wasser-WP werden häufig zu gross ausgelegt, was sich negativ auf die Kosten auswirkt.
EMPFEHLUNG	Sicherheitszuschläge bei der Auslegung von Sole/Wasser-WP sind zu vermeiden.

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.

FESTSTELLUNG	Die Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpe hat im Vergleich zu Elektroboilern deutliche ökologisch-energetische Vorteile.
EMPFEHLUNG	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.

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.

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

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.

FESTSTELLUNG	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.
EMPFEHLUNG	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.

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.

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

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.

5. Bibliographie

- [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.

6. 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).

$$CI = \hat{M} \pm z \sqrt{\text{Var}(\hat{M})}$$

$$\text{Var}(\hat{M}) = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \frac{SD^2}{n}$$

\hat{M} : geschätzter Mittelwert
 z: oberes $\frac{\alpha}{2}$ Quantil der Normalverteilung
 Var: Varianz (Schätzung des wahren Wertes)
 n: Stichprobenumfang
 N: Umfang der Grundgesamtheit
 SD: Standardabweichung

EKZ Energiekennzahl (Raumwärme):
 Heizenergiebedarf pro m² Energiebezugsfläche.

FBH Fussbodenheizung

ϑ_q Quelltemperatur vor dem Eintritt in die Wärmepumpe

ϑ_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.
- 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
- λ_{ER} Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs
- λ_{HF} Wärmeleitfähigkeit des Hinterfüllungsmaterials (Verpressung) einer Erdwärmesonde
- Maschine vgl. Aggregat
- 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. Kap. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).
- 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. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.)

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).

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

Ser. seriell

y_i : Wert des Datenpunktes i

\bar{y} : Mittelwert der Datenreihe y

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

$$SNG = \frac{Q_{\text{Heiz}} + Q_{\text{WW}}}{\sum E_{\text{Sp. Speicher}}}$$

System vgl. Anlage

Ta Aussentemperatur

Th.v. Thermostatventile

TRkp. Regler mit Raumkompensation

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

TVL (dim.) Vorlauftemperatur bei Dimensionierungsbedingungen (meist Ta -8°C)