

Wärmepumpen Effizienz

Messtechnische Untersuchung von
Wärmepumpenanlagen zur Analyse und
Bewertung der Effizienz im realen Betrieb

Kurzfassung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 0327401A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren

Dipl.-Ing. Marek Miara

Dipl.-Wi.-Ing. (FH) Danny Günther

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Kramer

Dipl.-Ing. Thore Oltersdorf

Dipl.-Ing. (FH) Jeannette Wapler

Projektförderer

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
(Kennzeichen 0327401A)

Projektträger

Projektträger Jülich (PTJ)

Projektdauer

01.10.2005 bis 30.09.2010

Projektpartner

Alpha InnoTec GmbH, Bosch Thermoteknik AB,
Hautec GmbH, NIBE Systemtechnik GmbH, Stiebel El-
tron GmbH, Vaillant GmbH, Viessmann Wärmepumpen
GmbH, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, E.ON
Energie AG

Projektleitung

Dipl.-Ing. Marek Miara (Fraunhofer ISE)

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Bereich Thermische Anlagen und Gebäudetechnik
Abteilung Solares Bauen
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
Telefon ++49 761 4588-5529
Telefax ++49 761 4588-9529
E-Mail marek.miara@ise.fraunhofer.de

Freiburg, 27. Mai 2011



Dipl.-Ing. Marek Miara
Projektleiter



Dipl.-Wi.-Ing. (FH) Danny Günther
Projektmitarbeiter

Inhalt

1	Ergebnisse und Ausblick auf Langfassung	2
2	Projektziele und Rahmenbedingungen	4
3	Durchführung des Projektes	6
3.1	Der Monitoring-Prozess	6
3.2	Erste und zweite Projektphase	8
3.3	Messtechnik	9
3.3.1	Elektroenergiezähler	10
3.3.2	Wärmemengenzähler	10
4	Charakterisierung der Monitoring Objekte	11
4.1	Gesamter Projektumfang und Datenbasis zur Auswertung	11
4.2	Datenbasis für die anonymisierte Auswertung	12
4.2.1	Wärmequellen und Wärmesenken	12
4.2.2	Leistungszahlen (COP)	15
4.2.3	Heizenergieverbrauch	16
5	Anonymisierte Auswertung der Messdaten	17
5.1	Bilanzgrenzen und Arbeitszahlberechnung	17
5.2	Anlageneffizienz nach unterschiedlichen Kriterien	20
5.2.1	Erdreich/Wasser-Wärmepumpen	21
5.2.2	Luft/Wasser-Wärmepumpen	27
5.3	Bewertung der Arbeitszahl - Effizienz vs. Effektivität	31
6	Festgestellte Fehler sowie Verbesserungsvorschläge bei Auslegung, Installation und Betrieb	35
7	Verantwortung für Effizienz und Effektivität	39
	Literatur- und Quellenverzeichnis	41

1 Ergebnisse und Ausblick auf Langfassung

Das Projekt „WP-Effizienz“ wurde im Zeitraum Oktober 2005 bis September 2010, mit dem Hauptziel der unabhängigen Ermittlung der Effizienz der Wärmepumpenanlagen von deutschen Wärmepumpenherstellern, durchgeführt. Alle Ziele des Projektes werden detailliert im Kapitel 2 beschrieben.

Vor dem Beginn der Messung wurden die notwendigen Schritte bezüglich Auswahl der Anlagen, Zusammenstellung der entsprechenden Messtechnik sowie Kooperation der an dem Projekt beteiligten Seiten, unternommen. Das Projekt wurde in zwei Phasen realisiert. Die ausführliche Beschreibung der Projektdurchführung erfolgt in Kapitel 3.

Im Rahmen des Projektes wurden insgesamt 112 Wärmepumpenanlagen untersucht. In der anonymisierten Auswertung der Messdaten wurden 56 Erdreich/Wasser-, 18 Luft/Wasser, sowie 3 Wasser/Wasser-Wärmepumpenanlagen berücksichtigt. Der überwiegende Anteil der Heizwärmeverteilungsanlagen nutzt eine Fußbodenheizung. Die mittlere beheizte Fläche der untersuchten Gebäude beträgt 199 m², der mittlere Heizwärmeverbrauch im Jahr 2009 72 kWh/m²a. Eine genaue Charakterisierung der Monitoring-Objekte erfolgt in Kapitel 4.

Die Gesamtauswertungsperiode der untersuchten Wärmepumpenanlagen reicht von Juli 2007 bis Juni 2010. In diesem Zeitraum wurden mittlere Arbeitszahlen von 3,9 für Erdreich- und von 2,9 für Luft-Wärmepumpen ermittelt. Die Anlagen aus der zweiten Projektphase zeichnen sich durch höhere Effizienzwerte als die Anlagen aus der ersten Messperiode aus. Weitere Effizienzwerte hinsichtlich anderen zeitlichen Fokussierungen oder Bilanzgrenzen werden im Kapitel 5 vorgestellt.

Das Kapitel 5.3 widmet sich den Unterschieden zwischen Effizienz und Effektivität. Hierbei wird hervorgehoben, dass die reine Effizienzbetrachtung der Anlage in Form von Arbeitszahlen für eine ganzheitliche Betrachtung des Systems Wärmepumpenanlage plus Gebäude nicht ausreichend ist.

Die festgestellten Fehler sowie Verbesserungsvorschläge bei Auslegung, Installation und Betrieb werden im Kapitel 6 beschrieben. Eine sorgfältige Planung sowie Durchführung der Installation der Wärmepumpenanlage hatte, neben der Wärmequelle, den größten Einfluss auf die Effizienz der untersuchten Wärmepumpenanlagen.

Weiterhin wird im Kapitel 7 versucht, die Verantwortung für Effizienz und Effektivität auf die Wärmepumpen-Hersteller, die Planer und Installateure sowie den Nutzern der Wärmepumpe zu verteilen.

Die Ausführungen der Kapitel 6 und 7 beziehen sich bereits auf die in der Langfassung des Berichtes erzielten Erkenntnisse.

Die vorliegende Kurzfassung des Berichtes ist lediglich auf die Hauptauswertung der Messdaten für Erdreich- und Luft-Wärmepumpen begrenzt. Auf Wasser-Wärmepumpen wird diesbezüglich in der Langfassung eingegangen. Die Grundlagenkapitel sind dem Umfang der Kurzfassung angepasst. Der Hauptunterschied zur Langfassung des Berichtes liegt jedoch in der ausführlichen Betrachtung diverser Einflüsse auf die Effizienz der Wärmepumpensysteme. Ferner behandelt die Langfassung das Projektziel der Kältemittelverlustmessung und den Inhalt der im Projektrahmen verfassten Diplomarbeiten.

Die anonymisierte Auswertung der Messdaten in der Langfassung des Berichtes widmet sich unter anderem der ausführlichen Betrachtung möglicher Einflüsse auf die Effizienz. Hierbei werden bspw. Relationen der Effizienz zur Wärmequelle, dem Aufbau der Wärmesenkenanlage oder der elektrischen Zusatzheizung untersucht. Anschließend wird unabhängig von der Effizienz auf die Betriebszeiten der Heizstäbe eingegangen. Ein weiteres Kapitel widmet sich den Wärmquellentemperaturen der vermessenen Anlagen, getrennt nach Erdreich-Sonden- und Erdreich-Kollektor-Anlagen sowie Luft- und Wasser-Wärmepumpen. Ausführlich wird auch auf regelungsbasierte Problem eingegangen. Hierbei stehen unter anderem der Ladepumpenbetrieb, der Heizbetrieb im Sommer und die Beladung der Kombispeicher im Mittelpunkt. Weiterhin werden die Wärmepumpen mit Solaranlagen mit Hilfe einer Systemarbeitszahl bilanziert.

2 Projektziele und Rahmenbedingungen

Mit den Hauptzielen einer unabhängigen Ermittlung der Effizienz sowie der Analyse, dem Verständnis und der Optimierung des Systemverhaltens von elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen wurde zwischen dem 01.10.2005 und dem 30.09.2010 das Projekt „WP-Effizienz“ durchgeführt. Die Federführung oblag dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE (nachfolgend: Fraunhofer ISE) in Freiburg. Das Projekt wurde sowohl finanziell als auch fachlich von sieben Wärmepumpenherstellern (Alpha-Innotec, Bosch Thermotechnik, Haotec, Nibe, Stiebel Eltron, Vaillant und Viessmann) und den Energieversorgungsunternehmen EnBW Energie Baden-Württemberg AG und der E.ON Energie AG unterstützt. Eine finanzielle Förderung von 50 % erfuhr das Projekt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi (Kennzeichen 0327401A). Weitere Ziele wurden vor Projektbeginn definiert und konnten mit zunehmender Projektdauer noch ergänzt werden.

Das Projekt wurde in zwei Phasen realisiert. In der ersten Phase erfolgte ab Januar 2007 die Vermessung von etwa 75 Wärmepumpen der genannten sieben Hersteller. Im Rahmen einer zweiten Phase wurden ab Oktober 2008 von jedem Hersteller zusätzlich fünf weitere Anlagen untersucht. Insgesamt sind somit etwa 110 Anlagen vermessen worden.

Der Schwerpunkt der Untersuchung lag bei der Vermessung von Wärmepumpen in überwiegend neuen, energieeffizienten Wohngebäuden. Letztlich wurden Objekte ausgewählt, deren gemessener Jahresheizwärmebedarf im Jahr 2009 zwischen 32 und 169 kWh/m² und im Durchschnitt 72 kWh/m² betrug. Ursprünglich sollte eine Gebäudeklasse untersucht werden, deren Heizwärmebedarf zwischen jenen von Passivhäusern und KfW-60-Häusern liegt.

Ein weiteres ambitioniertes Teilziel von „WP-Effizienz“ lag in der messtechnischen Quantifizierung der tatsächlich in modernen stationären Wärmepumpenanlagen durch Undichtheiten der Geräte auftretenden Kältemittelverluste. Bisher wird bei der Bestimmung des TEWI-Wertes (total equivalent warming impact) mit einem durchschnittlichen Verlust von 2 % der Füllmenge pro Jahr gerechnet. Die Exaktheit dieses Wertes wurde jedoch noch nicht experimentell bestätigt, so dass die diesbezüglichen Umweltwirkungen der Wärmepumpen schlecht eingeschätzt werden können. Mit zunehmendem Projektfortschritt musste die Quantifizierung von Kältemittelverlusten unter realen Betriebsbedingungen zusehends der Ermittlung und Prüfung von Möglichkeiten zur Erreichung dieses Projektzieles weichen.

Die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse und gesammelten Erfahrungen flossen in weitere nationale und europäische Projekte ein. So konnte unter anderem durch die Mitarbeit im Annex 32 (Economical heating and cooling systems for low energy houses) des Heat Pump Program der Internationalen Energieagentur IEA beigetragen werden. Das Fraunhofer ISE konnte relevante Teilergebnisse dieses Projektes in den IEA-Annex einbringen und die Erfahrungen mit den anderen internationalen Teilnehmern austauschen. Auf nationaler Ebene leisteten die Ergebnisse einen Beitrag in den Ausschüssen der Normen- und Richtlinienarbeit, unter anderem bei der VDI 4650 und der neuen VDI 4645.

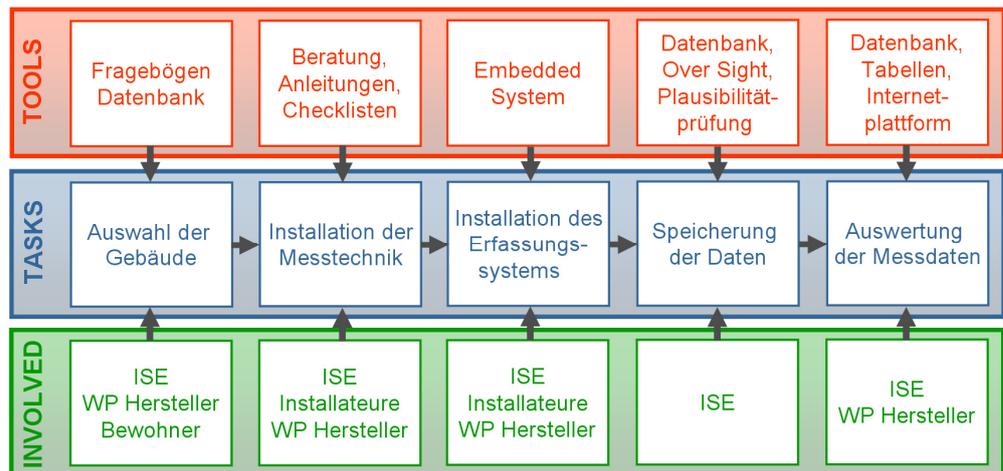
Das Fraunhofer ISE hatte bereits vor diesem Projekt langjährige Erfahrung in der Durchführung von anlagenorientiertem Monitoring haustechnischer Systeme in bewohnten Gebäuden. So wurde über mehr als vier Jahre hinweg in über 50 mit Wärmepumpen versorgten Passivhaus-Wohngebäuden eine messtechnische Begleitung durchgeführt. Einige der Häuser waren mit einer intensiven, permanenten Messdatenerfassung mit Fernabruf ausgestattet. Aus diesen Messungen konnten viele Erkenntnisse für die Weiterentwicklung, insbesondere von Abluftwärmepumpen, gewonnen werden.

3 Durchführung des Projektes

3.1 Der Monitoring-Prozess

In diesem Abschnitt werden kurz die Arbeitspakete von Projektbeginn bis zum Auswerten der Messdaten beschrieben. Der Text orientiert sich dabei am Ablaufdiagramm in Bild 1. Auf drei Ebenen werden dabei Werkzeuge (rot), Aufgaben (blau) sowie Beteiligte (grün) dargestellt. Auf die Einzelheiten zur Arbeitszahlbilanzierung oder der eingesetzten Messtechnik wird noch näher in den nachfolgenden Abschnitten von Kapitel 3 eingegangen.

Bild 1: Der Monitoring-Prozess



Task 1 - Auswahl der Gebäude

Den Projektbeginn bildete die Auswahl der zu untersuchenden Objekte. An diesem Prozess waren das Fraunhofer ISE, die Hersteller und die Bewohner beteiligt. In einem ersten Versuch Projektteilnehmer zu finden, haben die Hersteller dem Fraunhofer ISE Vorschläge für Teilnehmer unterbreitet. Geeignete Systeme wurden in das Projekt aufgenommen. Nach einer langen Anlaufphase haben die Hersteller und das Fraunhofer ISE parallel nach geeigneten Objekten gesucht und letztlich eine ausreichende Anzahl akquiriert.

Task 2 – Installation der Messtechnik

In einem zweiten Schritt wurden die gewählten Objekte mit der Messtechnik ausgestattet. Die Hersteller stellten dem Fraunhofer ISE das Anlagenschemata sowie technische Unterlagen des zu vermessenden Systems zur Verfügung. Das Fraunhofer ISE lokalisierte die Messstellen und plante die benötigte Messtechnik. Nach Rücksprache mit den Herstellern und deren Einwilligung hinsichtlich der Messtechnik, nahm das Fraunhofer ISE Kontakt mit dem Installateur vor Ort auf. Einbau und Vorbereitung für den Anschluss der Messtechnik erfolgte durch den Installateur und den Elektriker.

Task 3 – Installation des Erfassungssystems

Das Anbringen des Messdatenerfassungssystems und das Anschließen der M-Bus und Impulsleitungen erfolgten von Seiten des Fraunhofer ISE. Um schnell auf falsche oder fehlende Elektroinstallationen reagieren zu können, war in diesem Schritt auch der zuständige Elektriker vor Ort. Vor allem bei Anlagen der zweiten Phase wurde ein Messkomponentencheck in Form eines Relaischecks durchgeführt, um absolute Sicherheit bezüglich der Zuordnung von Verbraucher und Zähler erlangen. Hierfür musste auch ein Werksmonteur des jeweiligen Herstellers vor Ort sein. Die Abnahme wurde protokolliert.

Tasks 4 und 5 – Speicherung und Auswertung der Daten

Vom Messdatenerfassungssystem wird von jeder Anlage täglich der Rohdatensatz per GSM-Verbindung an einen Server des Fraunhofer ISE gesendet. Anschließend werden die Daten gefiltert und einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. In verschiedenen Tabellen werden die Arbeitszahlen berechnet und anschließend zusammengeführt und verglichen. Dies gewährleistet eine hohe Sicherheit hinsichtlich der Ermittlung korrekter Werte.

Monatliche detaillierte Auswertungen der Arbeitszahlen sowie aller übrigen Messwerte konnten die Partner von der Projekthomepage abrufen. Gleichzeitig stand für sie online ein Tool zur Visualisierung verschiedener Messgrößen über beliebige Zeiträume zur Verfügung. Auch die Bewohner konnten durch eine monatliche Auswertung der Arbeitszahlen und der hierfür notwendigen elektrischen und thermischen Energien vom Projekt profitieren.

3.2 Erste und zweite Projektphase

In einer ersten Projektphase wurden etwa 75 Wärmepumpen, teilweise seit der Heizperiode 2006/07, vermessen. Diese Messperiode führte sowohl auf Seiten der Wärmepumpenhersteller als auch des Fraunhofer ISE zu Lerneffekten. Die gesammelten Erfahrungen wurden bei der Vermessung weiterer 35 Anlagen im Rahmen einer zweiten Projektphase in Form diverser Verbesserungen umgesetzt.

Das Fraunhofer ISE war für die korrekte Vermessung der Anlagen sowie die unabhängige Auswertung der Messdaten verantwortlich. Vor allem im Bereich der Messtechnik wurde von den Erfahrungen aus der ersten Phase profitiert. Durch eine Überarbeitung dieses Arbeitsfeldes konnte einerseits die Organisation und andererseits die Messtechnik an sich verbessert werden. Bezüglich der Organisation wurden Anleitungen für Einbau und Anschluss der Messtechnik für die Installateure verbessert. Zum zweiten wurde die Dokumentation in Form von Protokollen ausgebaut. Der größte Qualitätssprung wurde jedoch durch die Abnahme der Messtechnik vor Ort erzielt. Zusammen mit dem Installateur und einem Werksmonteur des Herstellers wurde für jede Anlage ein Reliastest zur Überprüfung der korrekten Zuordnung von zu vermessender Komponente und entsprechendem Messgerät durchgeführt. Im Bereich der Messtechnik gab es im Wesentlichen zwei Änderungen. Zum einen wurde die Counterplatine zum Zählen der Elektrozählerimpulse durch ein WAGO-System ersetzt. Durch diese robuste Industrielösung wurde der Umgang mit den Messdaten vereinfacht. Im Bereich der Elektrozähler wurde von Produkten der Firma Saia-Burgas auf Zähler von EMU Elektronik umgestiegen.

Auch die Wärmepumpenhersteller konnten die gesammelten Erfahrungen in die zweite Projektphase einbringen. Im Zuge der ersten Phase wurden viele effizienzmindere Probleme erkannt, welche in einer zweiten Phase beseitigt werden konnten. Diese betrafen in erster Linie Verbesserungen in Auslegung und Installation. Gleichzeitig konnten einige Hersteller die Gelegenheit nutzen, auf aktuellere Seriengeräte zurückzugreifen.

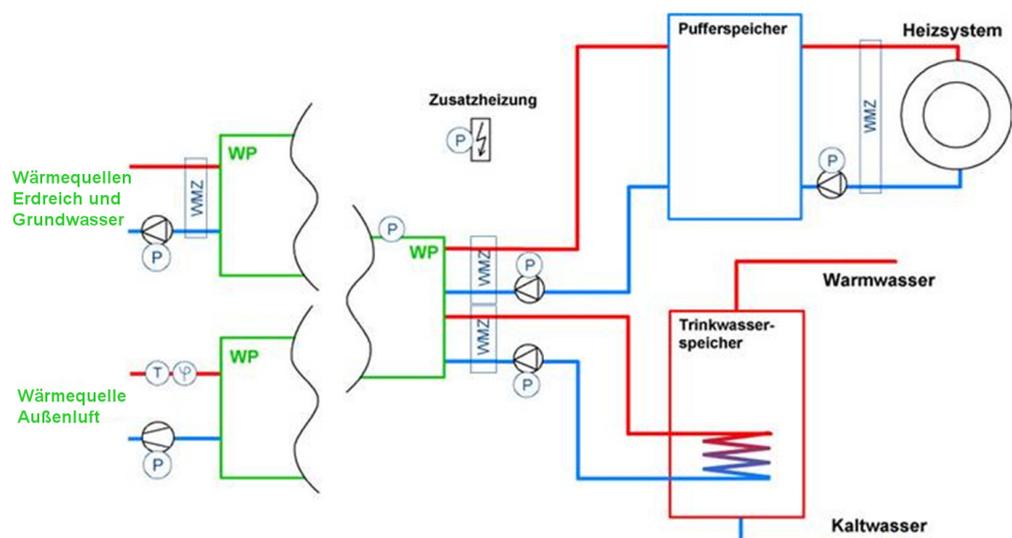
Weiterhin wurde in der zweiten Projektphase Wert darauf gelegt, mehr Wärmepumpen mit Außenluft als Wärmequelle zu vermessen. So stieg deren Anteil von einem knappen Viertel in der ersten Projektphase auf etwa die Hälfte in der zweiten Projektphase.

3.3 Messtechnik

Dieser Abschnitt widmet sich den zu vermessenden Komponenten sowie den hierfür eingesetzten Messinstrumenten. Die Fehlergrenzen der Messtechnik werden in der Langfassung des Berichtes behandelt.

Das Bild 2 zeigt mit einem einfachen Anlagenschema die im Feld vermessenen Komponenten, wobei auch zusätzliche Messstellen, die nicht für die Effizienzbestimmung notwendig waren, optional eingebaut wurden. Mit einem P sind die elektrischen Verbraucher gekennzeichnet. Hierzu zählen die Wärmepumpe (Verdichter und Steuerung), die Solepumpe, der Ventilator sowie die Ladepumpen und der Heizstab. Bei individuelleren Systemen wurden teilweise zusätzlich die Zirkulations- und Solarkreispumpe sowie Abluftventilatoren vermessen. Weiterhin sind mit WMZ (Wärmemengenzähler) jene Komponenten bezeichnet, bei denen hydraulisch-thermische Größen zu messen sind. In der Grafik sind hierfür auf der Wärmesenkenseite die Beladungskreise für den Heizungspuffer- sowie den Trinkwarmwasserspeicher eingezeichnet. Zudem wurde optional die Beladung des Heizkreises bilanziert. Auf der Seite der Wärmequelle wird der Solekreis vermessen. Weitere mögliche Komponenten sind diesbezüglich die Trinkwasserentnahme, der Solarkreis oder aufgetrennte Solekreise, welche bspw. zusätzlich durch die Abluft erwärmt werden. Für Anlagen mit Außenluft als Wärmequelle sollten ursprünglich Ansaugtemperatur (T) sowie –Feuchte (φ) gemessen werden. Probleme mit den Messinstrumenten führten jedoch bei ersten Anlagen zum Abbau und später zu keiner weiteren Berücksichtigung dieser Messkomponenten.

Bild 2: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Wärmepumpenheizungsanlage mit obligatorischen und optionalen Messstellen



3.3.1 Elektroenergiezähler

Auf Seiten der elektrischen Messgrößen werden Stromzähler eingesetzt, die über ein mechanisches Zählwerk sowie einen Impulsausgang verfügen. Je nach Verbraucher wurden Wechsel- oder Drehstromzähler eingebaut. Die Nennleistung der zu vermessenden Komponenten gab die notwendige Auflösung hinsichtlich der Impulse pro Kilowattstunde vor. Das Ziel dieser Abstimmung war die Ermittlung von Minutenwerten der elektrischen Größen um das Systemverhalten relativ präzise abbilden zu können. Verwendet wurden Elektroähler mit Auflösungen von 100, 1.000 und 10.000 Impulsen pro Kilowattstunde.

Zu Beginn des Projektes wurden Elektroähler der Firma Saia-Burgess verwendet. Für die zweite Projektphase (vgl. Kapitel 3.2) wurde die Messtechnik überarbeitet. Im Zuge dessen wurde auf Elektroähler von EMU Elektronik umgestiegen.

3.3.2 Wärmemengenzähler

Wärmemengenzähler bestehen aus einem Durchflusssensor, einem Temperaturfühlerpaar sowie einem Rechenwerk. Das Rechenwerk ermittelt über den Volumenstrom und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf sowie gespeicherten, temperaturabhängigen Stoffwerten, die Energie- und Leistungsgrößen. Zur Temperaturmessung kamen nach DIN EN 1434-1 paarweise kalibrierte PT100 Temperatur-Sensoren zum Einsatz. Das Rechenwerk musste mit einer M-Bus Schnittstelle ausgestattet sein.

Die beiden Ladekreise, der Heizkreis (ggf. vor und nach Pufferspeicher) sowie der Trinkwasserladekreis wurden jeweils mit Ultraschall-Wärmemengenzähler des Typs F 96 ausgestattet. Der F 96 ist der einzige im Feldtest verwendete Wärmemengenzähler mit integriertem Rechenwerk. Die Bilanzierung der Energiemenge für Trinkwarmwasser gestaltete sich bei Wärmepumpen in Kompaktauweise als komplizierter. Bei dieser Bauform war der notwendige Platz zwischen Kondensator und Trinkwarmwasserspeicher nicht vorhanden. Die Lösung lag in der Bilanzierung der Entnahme aus dem Trinkwasserspeicher. Hierfür wurden trinkwassergeeignete Ringkolbenzähler sowie das Rechenwerk F 22 verwendet.

Die Wärmequellenseite wurde bei Erdreich-Anlagen mit Industriezählern der Bauart MTH-I und dem Rechenwerk MF 4 vermessen. Bei Grundwasser als Wärmequelle kamen mit dem F 96 die gleichen Ultraschall-Wärmemengenzähler wie bei den Wärmesenken zum Einsatz. Bei solarthermischer Unterstützung der Wärmepumpe wurde die zusätzliche Energie mit Hilfe von einstrahligen Flügelradzählern vom Typ ETDA-KGmHM und Rechenwerken F 4 erfasst.

4 Charakterisierung der Monitoring Objekte

Vorab sei darauf hingewiesen, dass die Wärmepumpen in diesem Bericht meist vereinfachend nur mit ihrer Wärmequelle bezeichnet werden. Eine Unterscheidung nach Wärmeträgermedium der Senke ist ohnehin nicht notwendig, da die Heizkreise aller vermessenen Anlagen Wasser führen.

4.1 Gesamter Projektumfang und Datenbasis zur Auswertung

Durch das Fraunhofer ISE wurden etwa 110 Wärmepumpenanlagen untersucht. Das Verhältnis zwischen den sieben Herstellern war dabei mit mindestens 14 und maximal 18 Anlagen recht ausgewogen. In die anonymisierte Auswertung im Kapitel 5 wurden zu Beginn 88 Anlagen aufgenommen. Die Differenz zum gesamten Umfang der vermessenen Anlagen kann auf folgende Punkte zurückgeführt werden:

- Jeder Hersteller konnte zwei Anlagen benennen, die nicht in der Gesamtauswertung berücksichtigt wurden. Meist handelte es sich um Anlagen, die zu Testzwecken vermessen wurden. Die Möglichkeit wurde nicht von allen Herstellern wahrgenommen.
- fehlerhafte Installation der Messtechnik bei Anlagen aus der ersten Phase
- Anlagen, die aufgrund ihrer Wärmequelle nicht mit den übrigen vergleichbar waren
- Solaranlage und integrierter Trinkwasserspeicher ließen keine Bilanzierung zu
- Wärmepumpen, die nur im Heizmodus arbeiten
- mangelnde Kooperationsbereitschaft der Bewohner

Die übrigen 88 Wärmepumpenanlagen wurden im Projektverlauf kontinuierlich ausgewertet und die Ergebnisse präsentiert. Hierbei ist nicht zwischen Anlagen mit und ohne Solaranlage unterschieden worden. Nur bei der Darstellung von durchschnittlichen Monatsarbeitszahlen wurden die teilweise auftretenden Extremwerte der gekoppelten Anlagen bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt. Auf die Jahresarbeitszahl hingegen konnte keine relevante Einwirkung festgestellt werden. Die monatsweise Herausnahme dieser Anlagen aus der Ge-

samtauswertung war letztlich auch keine zufriedenstellende Lösung, da der verbleibende Einfluss der Wärmepumpen mit Solaranlagen in den einzelnen Auswertungen nicht quantifizierbar war. Daher werden im Rahmen des Projektabschlusses solar unterstützte Wärmepumpen gesondert ausgewertet. Hierdurch wird zwar die Datenbasis noch einmal um 11 Anlagen geschmälert, die Auswertung verspricht jedoch wesentlich konsistentere Ergebnisse. Die Auswertung der Wärmepumpen mit Solaranlage umfasst sechs Systeme. Fünf Systeme mit Solaranlage konnten aufgrund fehlender Messwerte oder unklarer Bilanzierung keiner der beiden Gruppen zugeordnet werden.

4.2 Datenbasis für die anonymisierte Auswertung

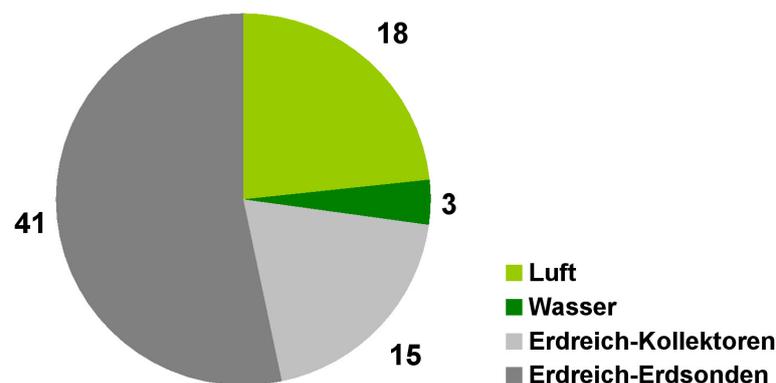
Die im Kapitel 5 folgende anonymisierte Auswertung der Messdaten erfolgt nicht über alle in der Projektlaufzeit vermessenen Anlagen (vgl. Kapitel 4.1). Die Eigenschaften der insgesamt 77 auswertbaren Objekte ohne solare Unterstützung werden in den folgenden Unterpunkten beschrieben.

Die statistischen Angaben beruhen auf den Stammdaten, welche von den Herstellern, den Bewohnern und den Installateuren zur Verfügung gestellt wurden.

4.2.1 Wärmequellen und Wärmesenken

Die Struktur der ausgewerteten Wärmepumpen hinsichtlich der genutzten Wärmequellen wird in Bild 3 dargestellt.

Bild 3: Wärmequellen der ausgewerteten Wärmepumpenanlagen

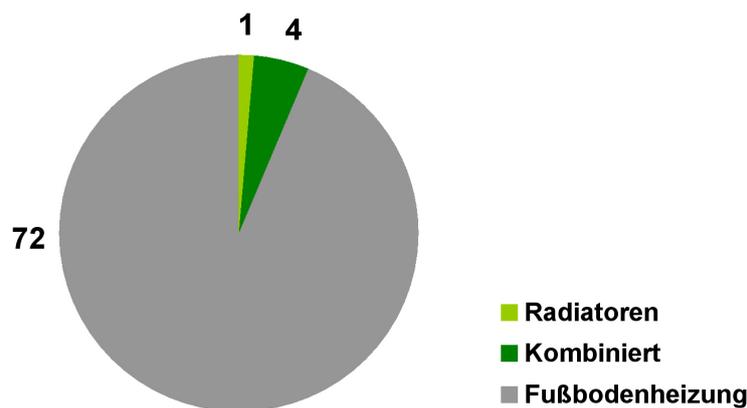


Hinsichtlich der Wärmequellen war angedacht, eine ausgeglichene Verteilung zu erzielen. Der Anteil von Anlagen mit Erdreich als Wärmequelle überwiegt jedoch deutlich. Diese umfassen fast dreiviertel aller Wärmepumpen, wobei 15 Anlagen mit Flachkollektoren und 41 Anlagen mit Tiefensonden ausgestattet sind. Den Erdreich-Anlagen folgen mit knapp einem Viertel die Wärmepumpen mit Außenluft als Wärmequelle. Mit drei Anlagen sind Wasser-Wärmepumpen

nur im geringen Maß vertreten und können daher nicht fundiert ausgewertet werden. Unter anderem aufgrund dieser Verteilung der Wärmequellen wurde in der zweiten Phase darauf Wert gelegt, einen höheren Anteil an Luft-Wärmepumpen als in der ersten Phase zu vermessen.

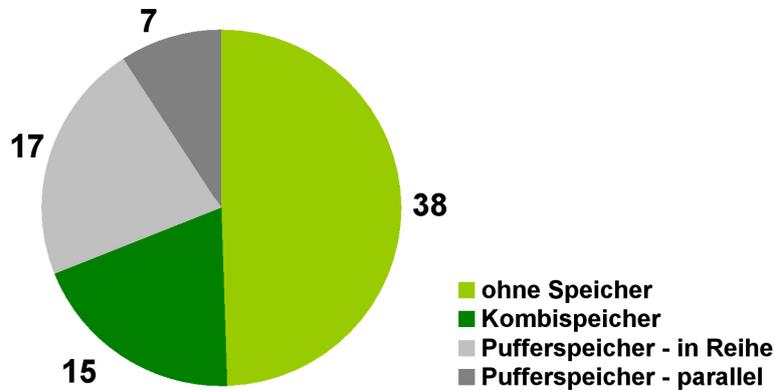
Im Bereich der Wärmesenke zeichnet sich deutlich ab, dass mit Fußbodenheizungen überwiegend die für die Wärmepumpen günstigen großflächigen Wärmeübertrager installiert werden (vgl. Bild 4). Das ermöglicht den Wärmepumpen durch geringere Vorlauftemperaturen einen effizienteren Betrieb. Über 90 % der Anlagen sind mit Fußbodenheizungen ausgestattet. Nur eine Anlage wird ausschließlich mit Radiatoren betrieben und vier Anlagen verfügen über Mischsysteme. Die Berücksichtigung der Anlage mit den Radiatoren führt nicht zu einer Beeinträchtigung der Gesamtergebnisse, da deren Heizkreisvorlauf-temperaturen von durchschnittlich 36 °C relativ gering sind.

Bild 4: Verteilung der Arten von Übertragungssystemen auf Seite der Wärmesenke



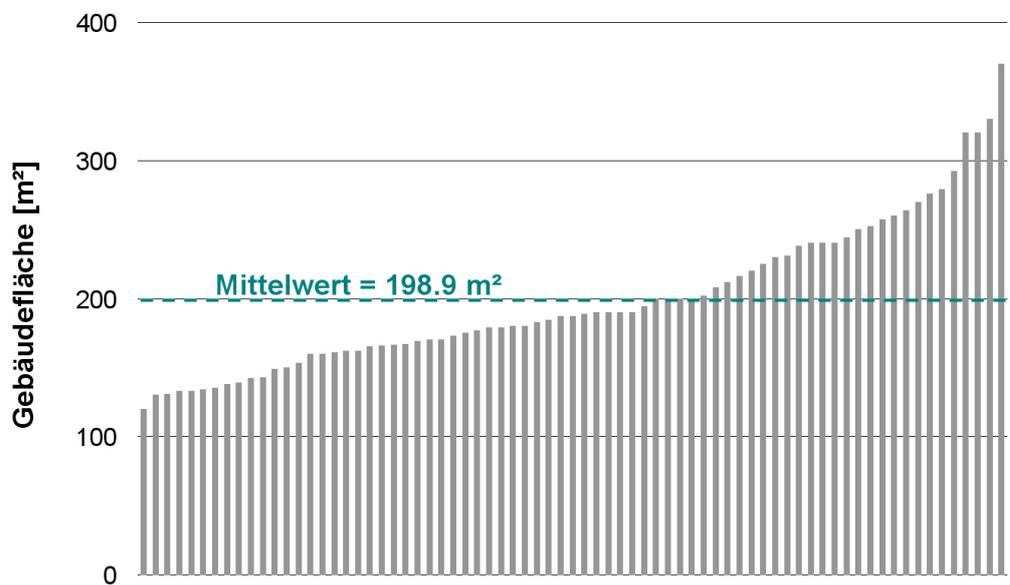
Eine weitere Charakterisierungsmöglichkeit des Heizkreises ist durch das Speicher-konzept gegeben. Einen Überblick gibt diesbezüglich das Diagramm im Bild 5. Demnach wird bei etwa der Hälfte aller Anlagen (38) der Heizkreis direkt, das heißt ohne zusätzlichen Pufferspeicher, versorgt. Eine kombinierte Speicherung von Trinkwarmwasser und Heizenergie (ein Speicher für beide Funktionen) wurde bei 15 Anlagen realisiert und bei nahezu jeder dritten Anlage ist ein Puffer-speicher in das Heizsystem integriert. Weiterhin werden diese Anlagen hinsichtlich der Speicher unterteilt, die zum einen ausschließlich das Volumen des Heizkreises erhöhen (in Reihe) und zum anderen die Heizkreis und Wärmeer-zeuger hydraulisch entkoppeln (parallel). Im Feldtest sind bei 17 Anlagen die Pufferspeicher parallel und bei 7 Anlagen in Reihe geschaltet.

Bild 5: Verteilung der Speicherkonzepte



Hinsichtlich der Gebäudefläche (Bild 6) zeigen sich große Unterschiede. Während das kleinste Gebäude eine Fläche von 120 m² hat, werden auch Wärmepumpen in Gebäuden mit bis zu 370 m² vermessen. Die durchschnittliche Gebäudefläche beträgt knapp 200 m².

Bild 6: Wohnflächen von 73 Gebäuden



4.2.2 Leistungszahlen (COP)

Jede Wärmepumpe verfügt über eine individuelle Effizienz, die auf Testständen für mehrere definierte Betriebspunkte ermittelt und als Leistungszahl (ϵ) sowie „coefficient of performance“ (COP) bezeichnet wird. Diese Leistungszahlen der im Feldtest untersuchten Wärmepumpen sind im Bild 7 dargestellt.

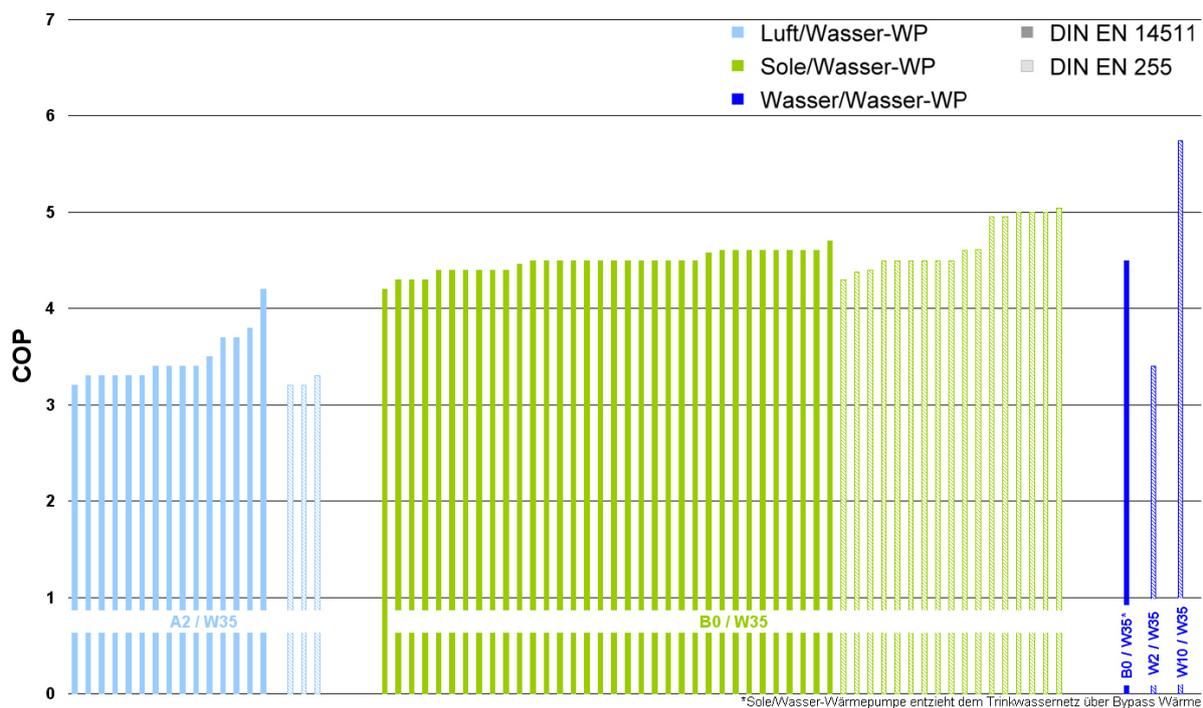


Bild 7: Leistungszahlen (COPs) der untersuchten Wärmepumpen unterteilt nach den Wärmequellen sowie zu Grunde liegender Zertifizierungsnorm.

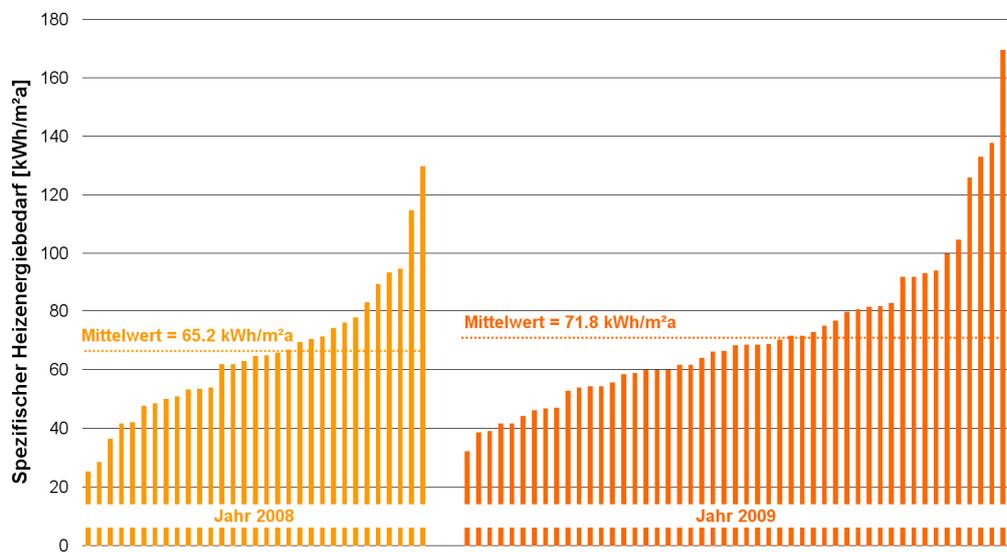
Bei den Luft- und Wasser-Wärmepumpen waren die Werte von allen Anlagen bekannt, bei den Erdreich-Anlagen nur bei 51 von 56. Die Betriebspunkte für die dargestellten COPs werden auf den Balken dargestellt. Die Zahl vor dem Strich entspricht der Wärmequellen-, jene hinter dem Strich der Wärmesenktemperatur. Soweit möglich, wurde auf Leistungszahlen zurückgegriffen, die auf Grundlage der aktuellen Zertifizierungsnorm DIN EN 14511 ermittelt wurden, andernfalls wurden die COPs nach der Vorgängernorm DIN EN 255 dargestellt. Der Hauptunterschied zwischen beiden Normen liegt in der Temperaturdifferenz zwischen Heizkreisvor- und Heizkreisrücklauf. Während dieser in der DIN EN 255 noch 10 K betrug, werden die Leistungszahlen nach DIN EN 14511 mit einer Temperaturdifferenz von 5 K ermittelt, was aufgrund der im Mittel höheren Wärmesenktemperatur bei gleichbleibender Wärmequellentemperatur zu größerem Temperaturhub und folglich zu einen geringen COP führt. Die COPs von Luft-Wärmepumpen liegen nach DIN EN 14511 zwischen 3,2 und 4,2 (Durchschnitt 3,48) und zwischen 3,2 und 3,3 nach der Vorgängernorm DIN EN

255. Erdreich-Anlagen erreichen naturgemäß höhere Werte. Nach der Vorgängernorm liegen sie zwischen 4,30 und 5,04 (Durchschnitt 4,66) und nach DIN EN 14511 zwischen 4,20 und 4,70 (Durchschnitt 4,49). Die Wasser-Wärmepumpen sind hinsichtlich ihrer theoretischen Leistungsfähigkeit nicht miteinander vergleichbar, da sie einerseits in den Betriebspunkten als auch in den Medien des Primärkreises differieren. Der äußerst rechte Balken zeigt mit einem Wert von 5,76 das große Potenzial von Wasser-Wärmepumpen.

4.2.3 Heizenergieverbrauch

Zur Einordnung der Objekte hinsichtlich ihres Energieverbrauchs wurden die Anlagen in Bezug auf den spezifischen Heizenergiebedarf ausgewertet. Aufgrund der Datenauswertung bis Juni 2010 und der sukzessiven Installation der Anlagen zu Beginn des Projektes bietet sich die Analyse der Jahre 2008 und 2009 an. Entsprechend werden im Bild 8 auf der linken Seite die verfügbaren Werte für 2008 und rechts die Werte für 2009 dargestellt. Bemerkenswert ist der große Unterschied in den beiden Jahren. Bei einem Mittelwert von 65 kWh/m²a im ersten Betrachtungsjahr liegen das Minimum bei nur 25 und das Maximum bei 130 kWh/m²a. Im Jahr 2009 ist der Mittelwert mit 72 kWh/m²a etwas höher. Ebenso die Minima und Maxima mit 32 bzw. 169 kWh/m²a.

Bild 8: Gemessener spezifischer Heizenergiebedarf von diesbezüglich auswertbaren Anlagen in den Jahren 2008 und 2009

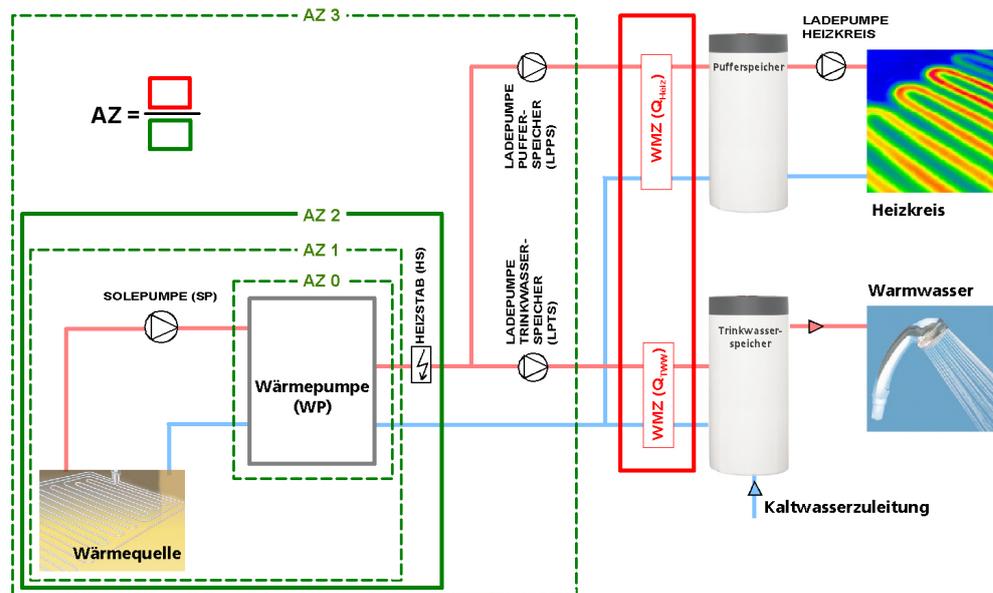


5 Anonymisierte Auswertung der Messdaten

5.1 Bilanzgrenzen und Arbeitszahlberechnung

Die Effizienz der Wärmepumpe im realen Betrieb wird durch die Arbeitszahl, dem Quotienten aus bereitgestellter thermischer sowie aufgewendeter elektrischer Energie, ausgedrückt. Grundsätzlich sind sowohl für die Input- als auch für die Output-Energie verschiedene Bilanzgrenzen denkbar. Je nachdem, ob man verschiedene Effizienzstufen eines Einzelsystems ermitteln oder bspw. die Vergleichbarkeit zu einer anderen Technologie herstellen möchte. Im Rahmen dieses Projektes soll beiden genannten Aspekten Rechnung getragen werden. Daher werden insgesamt vier Bilanzgrenzen definiert, die im Bild 9 dargestellt sind.

Bild 9: Schematische Darstellung einer Wärmepumpenanlage mit den Bilanzgrenzen für die Ermittlung der Arbeitszahl



Für die Erläuterung der Bilanzgrenzen wird ein Standard-Hydraulikschema einer Wärmepumpe abgebildet. Der rote Rahmen kennzeichnet die von der Wärmepumpe bereitgestellte thermische Energie. Gemessen wird diese, getrennt für Trinkwarmwasser und Heizenergie, mit Wärmemengenzählern. Beide Größen werden in der Regel unmittelbar nach der Wärmepumpe ermittelt. Eine Ausnahme erforderten zum Teil Kompaktgeräte mit integriertem Trinkwasserspeicher. Aufgrund von Platzmangel konnte eine Installation des Wärmemengenzählers vor dem Speicher nicht realisiert werden. In solchen Fällen wurde die Trinkwasserentnahme gemessen und zur Wahrung der Bilanzgrenze (Vergleich-

barkeit mit übrigen Systemen) der Verlust berechnet und hinzuaddiert. Bei bekannter Speichergröße wurden Verlustwerte¹ (ggf. interpoliert) von [1] verwendet. Bei unbekannter Speichergröße wurde ein Jahresverlust von 645 kWh angenommen.²

Wie die Grafik in Bild 9 zeigt, variieren die Bilanzgrenzen in Abhängigkeit von der Berücksichtigung verschiedener elektrischer Verbraucher. Nachfolgend werden diese Bilanzgrenzen durch die Berechnungsformeln für die Arbeitszahl und im Text erläutert. An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich alle später genannten Arbeitszahlen ohne nähere Bezeichnung auf die dritte Bilanzgrenze beziehen und der AZ 2 entsprechen.

$$AZ0 = \frac{Q_{Heiz,WP} + Q_{TWW,WP}}{W_{Verd+St}} \quad 1$$

$$AZ1 = \frac{Q_{Heiz,WP} + Q_{TWW,WP}}{W_{Verd+St} + W_{SP / Vent / BP}} \quad 2$$

$$AZ2 = \frac{Q_{Heiz,WP} + Q_{TWW,WP} + Q_{Heiz / TWW,HS}}{W_{Verd+St} + W_{SP / Vent / BP} + W_{HS}} \quad 3$$

$$AZ3 = \frac{Q_{Heiz,WP} + Q_{TWW,WP} + Q_{Heiz / TWW,HS}}{W_{Verd+St} + W_{SP / Vent / BP} + W_{HS} + W_{LPTS+LPPS}} \quad 4$$

AZ...	Arbeitszahl
$Q_{Heiz,WP} \dots$	Heizenergie von der Wärmepumpe
$Q_{TWW,WP} \dots$	Trinkwarmwasserenergie von der Wärmepumpe
$Q_{Heiz/TWW,HS} \dots$	Energiebereitstellung vom Heizstab
$W_{Verd+St} \dots$	Elektroenergieverbrauch durch Verdichter und Steuerung
$W_{SP/Vent/BP} \dots$	Elektroenergieverbrauch durch Solepumpe oder Ventilator oder Brunnenpumpe
$W_{HS} \dots$	Elektroenergieverbrauch durch Heizstab
$W_{LPTS+LPPS} \dots$	Elektroenergieverbrauch durch Ladepumpen

¹ Verlustleistungen in Abhängigkeit von der Speichergröße: 100l, 0,43W/l; 200l, 0,34W/l; 500l, 0,25W/l

² üblicher Ansatz für 300l-Speicher bei Simulationen

Die Arbeitszahl 0 (AZ 0) berücksichtigt einzig den Verdichter und die Steuerung der Wärmepumpe. Sie dient vor allem den Vergleich mit der Arbeitszahl 1 (AZ 1) um den Einfluss des Antriebes im Primärkreis einschätzen zu können. Wie bereits erwähnt, wird im Rahmen dieser Arbeit meist die Arbeitszahl 2 (AZ 2) bilanziert und kommentiert. Deren Differenz zur AZ 1 liegt in der Berücksichtigung der elektrischen Zusatzheizung. In der Regel muss hierfür einzig dessen elektrischer Energieverbrauch als Aufwand hinzuaddiert werden. Wird die durch den Heizstab bereitgestellte thermische Energie jedoch nicht über die Wärmemengenzähler erfasst (bspw. bei Heizstab im Speicher), wird diese zusätzlich, gleich dem Verbrauch von Elektroenergie, angesetzt. Der Elektroenergiebedarf im Nenner der Formel bezieht sich auf den Verdichter, der Steuerung, dem Antrieb im Primärkreis (Solepumpe, Ventilator oder Brunnenpumpe) sowie der elektrischen Zusatzheizung. Mit diesen Größen wird der DIN EN 14511 zur Ermittlung und Zertifizierung der Effizienz von Wärmepumpen zu großen Teilen entsprochen. Die Norm berücksichtigt zusätzlich den Aufwand an Elektroenergie durch die Ladepumpe im Sekundärkreis für den anteiligen Druckverlust im Kondensator. Indem der Aufwand für diese Pumpe nicht berücksichtigt wird, kann die letztlich ermittelte Effizienz (und daraus resultierende Größen) besser mit konventioneller Technologie wie bspw. Gas-Brennwert verglichen werden. Auf der Primärseite ergibt sich eine Abweichung von der Norm, da diese für den Primärkreis Antrieb bei Sole- und Wasser-Wärmepumpen „nur“ den anteiligen Energieaufwand für den Druckverlust im Verdampfer berücksichtigt.

In einer weiteren Effizienzkennzahl, der Arbeitszahl 3 (AZ 3), werden zusätzlich die Ladepumpen berücksichtigt. Aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten bezogen auf Anzahl und Einbauort der Pumpen, muss die AZ 3 näher erläutert werden. Grundsätzlich wird in Systemen mit direkter Heizkreisbeladung und mit Pufferspeicherbeladung unterschieden. Letzterer wird als Wärmepumpentypischer Aufbau betrachtet, da konventionelle Heizsysteme in der Regel nicht über Pufferspeicher verfügen. Eine solche Konfiguration zeigt das Anlagenschema in Bild 9. Die AZ 3 wird unter Berücksichtigung der beiden Pumpen für den Heiz- sowie den Trinkwasserladekreis berechnet. Im Falle einer gemeinsamen Ladepumpe wird diese berücksichtigt. Die Heizkreispumpe nach dem Pufferspeicher wird nicht beachtet, da sie in jedem anderen Heizsystem auch benötigt werden würde. Nicht in der Grafik dargestellt wird der Fall der direkten Heizkreisbeladung bzw. der Verwendung eines seriellen Pufferspeichers. Dabei wird die Ladepumpe für den Pufferspeicher als Heizkreispumpe betrachtet und geht demzufolge nicht mit in die Berechnung ein. Bei direkter Beladung des Heizkreises und nur einer Ladepumpe, wird die verbrauchte Elektroenergie um jene gemindert, die überschlägig als Anteil für die Beladung des Heizkreises notwendig war.

Zur Abbildung des Systemverhaltens werden einerseits weitaus mehr Komponenten vermessen, als zur eigentlichen Effizienzbestimmung notwendig wären, andererseits die entsprechenden Größen minutengenau ermittelt. Auf elektrischer Seite sind dies die Leistung und die Arbeit. Im hydraulischen System werden neben Energie und Leistung auch die jeweiligen Vor- und Rücklauftemperaturen sowie die Volumenströme gemessen. Eine zusätzlich erfasste Komponente ist der Primärkreis, wobei bzgl. der Erdreich- und Wasser-Anlagen die thermischen Größen von Sole bzw. Wasser und die elektrischen Kennwerte der Sole- bzw. Wasserpumpe gemessen werden. Bei Luftanlagen war ursprünglich die Vermessung von Temperatur und Feuchte der Ansaugluft geplant. Dies konnte aufgrund unzureichender Messtechnik nicht realisiert werden. Um das Systemverhalten besser abzubilden wurden weiterhin die Ladepumpen, teilweise auch jene nach einem Heizungspufferspeicher, vermessen.

5.2 Anlageneffizienz nach unterschiedlichen Kriterien

Eine wesentliche Größe zur Quantifizierung der Effizienz einer Wärmepumpe ist die Jahresarbeitszahl. Hierbei werden alle auftretenden Betriebszustände innerhalb eines Jahres berücksichtigt. Aufgrund der großen Einflussnahme durch die jeweiligen Witterungsbedingungen eines Jahres sollten immer mehrere Jahre zur Bewertung herangezogen werden. Im Gegensatz dazu dienen kleinere Betrachtungszeiträume dem Abbilden von Arbeitszahlen unter eben jenen individuellen Bedingungen. Da die Betriebszustände auf der Primärseite wesentlich von den Wärmequellentypen abhängen, werden die Arbeitszahlen entsprechend unterteilt, sowie für verschiedene Zeiträume (Tag, Monat, Jahr, 3 Jahre) erläutert. Ferner werden die Effizienzkennwerte für verschiedene Bilanzgrenzen (vgl. Kapitel 5.1) ermittelt.

In der anonymisierten Auswertung wird darauf Wert gelegt, dass nur vergleichbare Systeme zusammengefasst werden. Dies betrifft vor allem die Einbindung von zusätzlichen Wärmequellen. Folglich werden alle Systeme mit solarthermischer Unterstützung separat ausgewertet. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in der Langfassung des Berichtes.

In den nachfolgenden Abschnitten werden verschiedene Größen häufig mit Hilfe der Außenlufttemperatur interpretiert. Daher zeigt das Bild 10 deren Verlauf als Tageswerte für den gesamten Auswertungszeitraum von Juli 2007 bis Juni 2010. Die Werte entsprechen den Mittelwerten von 44 Messstationen des Deutschen Wetterdienstes [2].

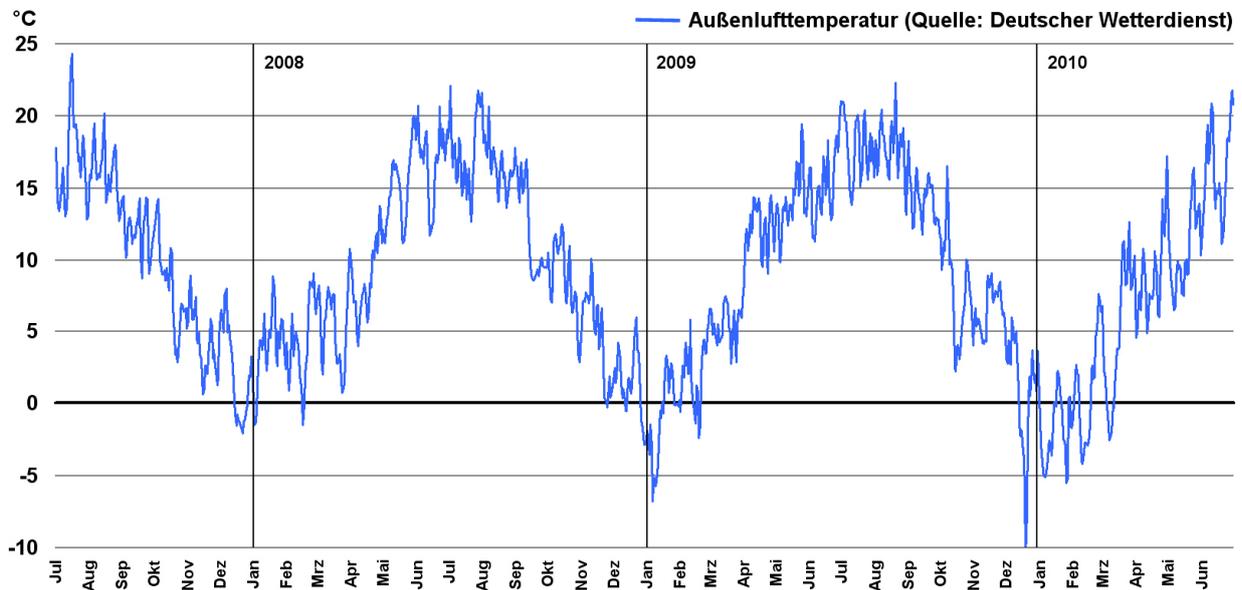


Bild 10: Minimale und maximale Tagesdurchschnittstemperaturen der Außenluft der Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD)

5.2.1 Erdreich/Wasser-Wärmepumpen

Das Bild 11 veranschaulicht den Verlauf der monatlichen sowie jährlichen Arbeitszahlen von Erdreich-Wärmepumpen und zeigt ferner die Effizienz über den kompletten Betrachtungszeitraum von Juli 2007 bis Juni 2010. Die Monatsarbeitszahlen und die Gesamtarbeitszahl werden in grünen, die Jahresarbeitszahlen in grauen Balken dargestellt. Die Jahresarbeitszahlen beziehen sich jeweils auf einen Zeitraum von Juli bis Juni. Die Zahlen auf den Balken entsprechen der Anzahl der jeweils ausgewerteten Wärmepumpen. Die Aufteilung der monatlich bereitgestellten thermischen Energie, getrennt in Energie für Heizwärme und Trinkwarmwasser, wird mittels rot-blauen Balken (absolut) und Kreisen (relativ) dargestellt.

Über den gesamten Projektzeitraum erreichen die Erdreich-Wärmepumpen eine mittlere Arbeitszahl von 3,88. Mit dieser Effizienz wurde in den drei Jahren thermische Energie bereitgestellt, die zu 82 % für Heizwärme und zu 18 % für die Trinkwassererwärmung genutzt wurde. Die Anzahl der in der Auswertung berücksichtigten Wärmepumpen stieg von zehn zu Beginn der Untersuchung auf maximal 56 Anlagen an.

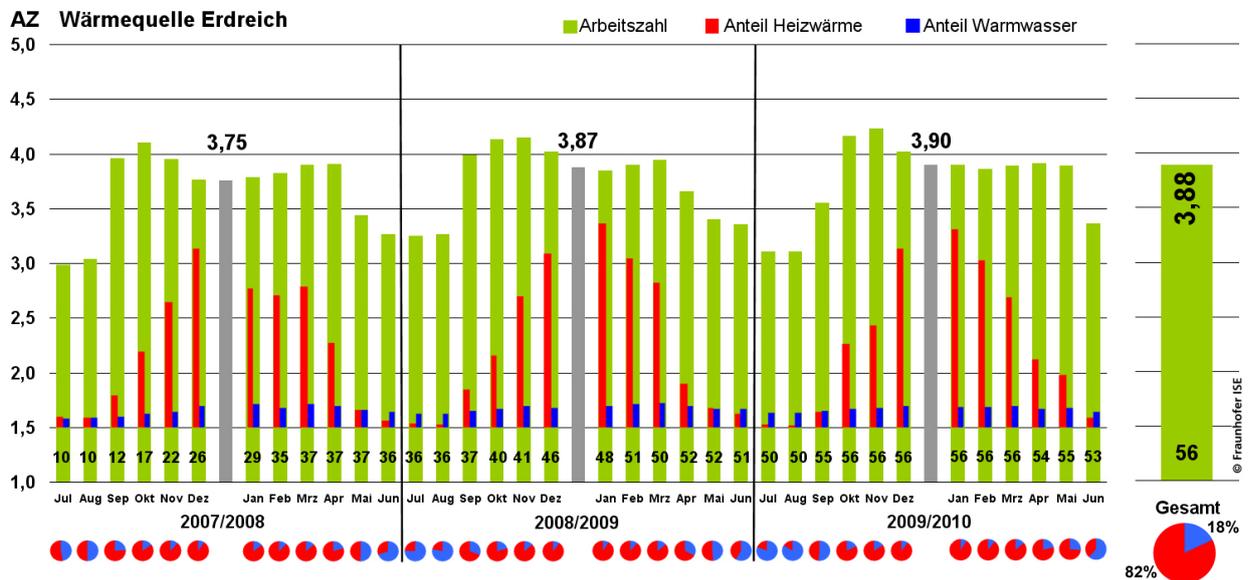


Bild 11: Arbeitszahlen von Erdreich-Wärmepumpen für verschiedene Zeitperioden im Betrachtungszeitraum Juli 2007 bis Juni 2010 mit der Struktur von bereitgestellter thermischer Energie sowie der Anzahl der jeweils ausgewerteten Wärmepumpen.

Die Betrachtung der Jahresarbeitszahlen zeigt eine Steigerung um 0,12 vom ersten zum zweiten Jahr, sowie um 0,03 vom zweiten zum dritten Jahr. Diese Unterschiede sind relativ gering und könnten unter anderem auf die kontinuierlich steigende Anlagenzahl mit ggf. unterschiedlichen Effizienzen zurückgeführt werden. Dieser Einfluss wird durch die Unterteilung des Projektes in zwei Phasen noch verstärkt. An dieser Stelle sei zudem erwähnt, dass die mittleren Außenlufttemperaturen der letzten drei Jahre sowie die der Heizperioden gesunken sind.

Während sich die Jahresarbeitszahlen auf gleichbleibendem Niveau bewegen, veranschaulichen die Monatsarbeitszahlen die sich im Jahresverlauf ändernden Betriebspunkte in welchen die Wärmepumpen arbeiten. Deutlich grenzen sich Sommer- und Heizperioden ab. Während im Sommer monatliche Arbeitszahlen von durchschnittlich 3,2³ erreicht werden, bewegen sich die Arbeitszahlen in der Heizperiode um einen Wert von 3,9⁴, wobei zu Beginn der Heizperiode höhere Arbeitszahlen als am Ende zu verzeichnen sind. In diesem Zeitraum kann die Wärmepumpe bei langsam einsetzendem Heizbetrieb ein gut regeneriertes Erdreich und entsprechend hohe Solevorlauftemperaturen nutzen. Der Blick auf die Gesamtarbeitszahl verdeutlicht das Gewicht der in der Heizperiode erreichten Effizienzen. Dies veranschaulichen die rot-blauen Balken auf den monatli-

³ Monate Juni, Juli und August über kompletten Auswertungszeitraum

⁴ Monate Oktober bis April über den kompletten Auswertungszeitraum

chen Arbeitszahlen, welche neben der Aufteilung von Heizung und Trinkwarmwasser, auch die Gewichtung der monatlich erzielten Arbeitszahlen wiedergeben. Im Umkehrschluss ergibt sich ein wesentlich geringerer Einfluss in der heizfreien Zeit. Bei den Erdreich-Wärmepumpen ist die Änderung der Wärmequellentemperatur im Jahresverlauf nicht so ausgeprägt wie die mittlere Wärmesenktemperatur. Der überwiegende Einsatz von Flächenheizungen gewährleistet niedrige Vorlauftemperaturen von durchschnittlich 36 °C in der Heizperiode, während im Sommer fast nur Trinkwarmwasser bei durchschnittlich 52 °C bereitet wird. Die mittlere Wärmesenktemperatur liegt somit überwiegend zwischen diesen beiden Werten wobei die jeweilige Gewichtung anhand der Kreisdiagramme (Betriebsmodi Heizen oder Trinkwassererwärmung) für jeden Monat im Bild 11 nachvollzogen werden kann. Deutlich zeigen sich direkte Abhängigkeiten zur Arbeitszahl, z.B. in den Übergangszeiten. Der Beginn der Heizperiode erfolgt in den ersten beiden Jahren äußerst abrupt, die Arbeitszahl stieg auf fast 4,0 an, der Energieanteil für die Heizung lag bei etwa dreiviertel. Der September 2009 hingegen war wärmer, daher wurde nur etwa die Hälfte der bereitgestellten Energie für die Heizwärme benötigt und entsprechend gering war die Arbeitszahl. Die Übergänge in den einzelnen Jahren zwischen Heiz- und Sommerperiode waren ebenfalls sehr verschieden. Während im ersten Jahr der Monat Mai als Übergangsmontat definiert werden kann (Heizenergie ca. 50 %), ist dies 2009 der Monat April (Heizenergie ca. 70 %). Im Jahr 2010 lässt sich fast kein Übergang feststellen, da die Außenlufttemperaturen sehr gering waren und der Anteil der Heizenergie bis Mai fast 75 % betrug.

Die bereits angesprochene zweite Phase brachte einige Änderungen mit sich (vgl. Kapitel 3.2). Diese hatten auch Auswirkungen auf die Effizienz der Wärmepumpen. Daher werden die Arbeitszahlen in Bild 12 noch einmal getrennt nach Anlagen der ersten und zweiten Phase dargestellt. Die Anzahl der auswertbaren Anlagen je Monat der ersten Phase beträgt zwischen 10 und 41, in der zweiten Phase zwischen einer und 15.

Bei den Gesamtarbeitszahlen ist eine deutliche Entwicklung erkennbar. Die Wärmepumpen der zweiten Phase erreichen eine um 0,28 höhere Arbeitszahl und weisen mit 4,09 einen sehr hohen Wert auf.

Auch die beiden Jahresarbeitszahlen erreichen mit 4,08 und 4,07 dieses Niveau. Hierbei fällt auf, dass die beiden Jahreswerte unterhalb der Gesamtarbeitszahl liegen. Dieses Phänomen kann auftreten, wenn Anlagen in verschiedenen Bilanzperioden unterschiedliche Betriebszeiten sowie Arbeitszahlen aufweisen. Die Jahresarbeitszahlen der Anlagen aus der ersten Phase variieren stärker als die der zweiten Phase. Auf einen Anstieg von 0,06 vom ersten zum zweiten, folgt ein Anstieg um 0,03 vom zweiten zum dritten Auswertungsjahr.

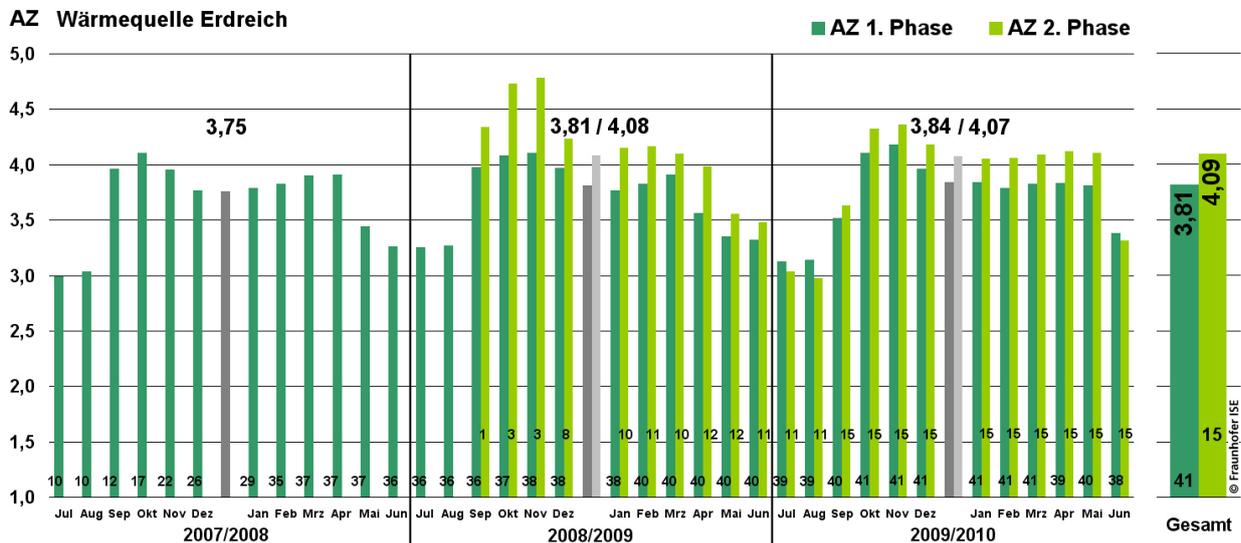
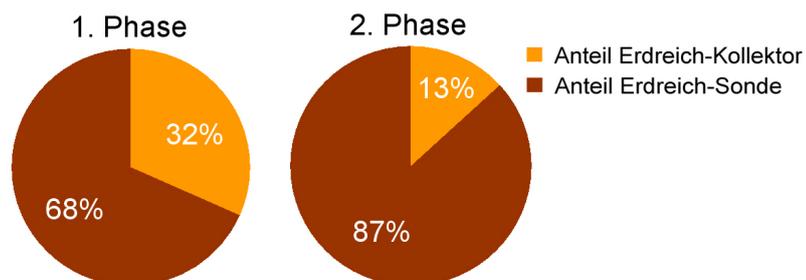


Bild 12: Arbeitszahlen von Erdreich-Wärmepumpen für verschiedene Zeitperioden im Betrachtungszeitraum Juli 2007 bis Juni 2010, getrennt nach erster und zweiter Phase

Die Betrachtung der Monatsarbeitszahlen verdeutlicht, dass das Mittel der Arbeitszahlen der Wärmepumpen der zweiten Phase fast immer über denen der ersten Phase liegt. Einzig in den Monaten Juli und August 2009 sowie Juni 2010 liegen die Arbeitszahlen darunter. Die Höhe der monatlichen Differenzen der Arbeitszahlen deutet stark auf einen Zusammenhang mit den verwendeten Erdreichwärmetauschern in den einzelnen Phasen hin. Dieses Verhältnis wird im Bild 13 grafisch verdeutlicht.

Bild 13: Aufteilung der verwendeten Erdwärmetauscher in den beiden Projektphasen



Demnach kamen in der ersten Phase nahezu ein Drittel Erdreich-Kollektoren zum Einsatz, in der zweiten Phase nur 13 %. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass sich die geringen Differenzen in den Arbeitszahlen der Monate Mai bis November auf die hier überwiegend effizienter arbeitenden Erdreich-Kollektoren zurückführen lassen. Die extremen Abweichungen der Arbeitszahlen in den Monaten zu Beginn der zweiten Phase sind auf die geringe Anzahl der Anlagen, von denen eine Wärmepumpe zudem sehr hohe Arbeitszahlen aufweist, zurückzuführen.

Die bisher vorgestellten Arbeitszahlen repräsentieren hinsichtlich ihrer Bilanzgrenze die Arbeitszahl 2. Im Kapitel 5.1 wurden drei weitere Bilanzgrenzen vorgestellt. Entsprechend dieser Bilanzgrenze werden im Bild 14 die jeweiligen Jahresarbeitszahlen und die Gesamt-Arbeitszahlen über den kompletten Zeitraum dargestellt.

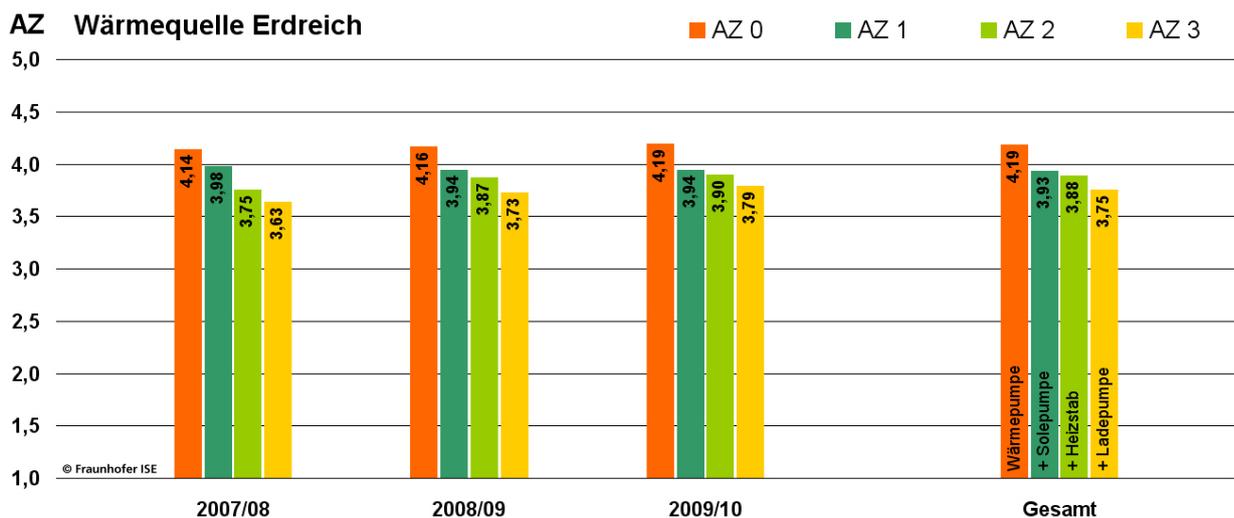


Bild 14: Arbeitszahlen von Erreich-Wärmepumpen in verschiedenen Zeitperioden im Betrachtungszeitraum Juli 2007 bis Juni 2010 unter Berücksichtigung vier verschiedener Bilanzgrenzen (Erläuterung in Kapitel 5.1)

Für jeden Bezugszeitraum lassen sich, mit Ausweitung der Bilanzgrenze auf Seite der elektrischen Verbraucher, die zwangsläufig fallenden Arbeitszahlen feststellen. Die Werte der Gesamt-Arbeitszahlen verdeutlichen, welche elektrischen Verbraucher in welchem Maß Einfluss auf die Arbeitszahl nehmen. Die größte Differenz von 0,26 lässt sich zwischen AZ 0 (4,19) und AZ 1 (3,93) ausmachen. Dieser Unterschied ist auf den Stromverbrauch der Solepumpen zurückzuführen. Der sich durch die Heizstabaktivität ergebende Einfluss ist mit einer Differenz zwischen AZ 1 und AZ 2 (3,88) mit 0,05 relativ gering. Einen etwas größeren Einfluss mit einer Differenz zur AZ 2 von 0,13 haben die Ladepumpen. Die AZ 3 liegt bei einem Wert von 3,75.

Bei den bisherigen Betrachtungen standen durchschnittliche Arbeitszahlen für eine Gruppe von allen Anlagen im Mittelpunkt. Das Bild 15 stellt die Bandbreite der von einzelnen Anlagen erreichten Arbeitszahlen dar. Das Balkendiagramm veranschaulicht die Effizienzwerte der 56 Erreich-Wärmepumpen für den Gesamtzeitraum sowie die jeweilige Jahresarbeitszahl für das letzte Auswertungsjahr. Mit dieser Auswahl soll einerseits die Präsentation der Gesamteffizienz der einzelnen Anlagen, ohne Beachtung derer individuellen Betriebszeiten, sowie andererseits eine jahresgenaue Bilanzierung gewährleistet werden.

AZ Arbeitszahlen einzelner Erdreich-Wärmepumpen

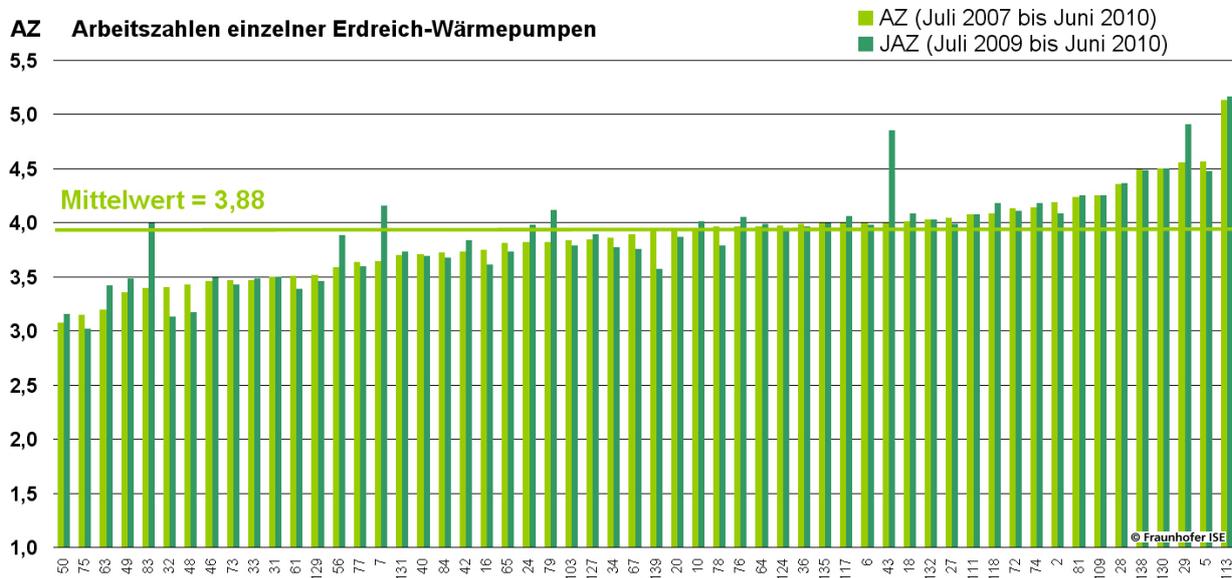


Bild 15: Arbeitszahlen von Erdreich-Wärmepumpen für die Zeiträume Juli 2007 bis Juni 2010 sowie Juli 2009 bis Juni 2010; die Anlagenbezeichnungen entsprechen den Herstellern bekannten ID-Nummern

In den Arbeitszahlmittelwert von 3,88 fließen Einzelwerte zwischen 3,1 und 5,1 ein, dargestellt als hellgrüne Balken im Diagramm. Der Höchstwert liegt auf einem generell höheren Niveau von über 5,0. Diesbezüglich sei zu erwähnen, dass es sich hinsichtlich der Zuordnung zwar um eine Erdreich-Anlage handelt, diese jedoch mit einer 300 m tiefen Erdsonde ausgestattet ist, die es gleichzeitig ermöglicht, Wasser als Wärmeträgermedium einzusetzen. Die Gesamtarbeitszahl wird von dieser Wärmepumpe nur gering beeinflusst und würde ohne sie mit einem Wert von 3,85 um 0,03 geringer ausfallen. Dieser Wert entspricht genau dem Mittelwert aus geringster und zweithöchster Arbeitszahl (4,6), was für eine gleichmäßige Verteilung der Arbeitszahlen spricht. Zum Vergleich zeigen die dunkelgrünen Balken die Jahresarbeitszahlen für die Auswertungsperiode 2009/10. Bei den meisten Anlagen liegen diese auf ähnlichem Niveau wie die Gesamtarbeitszahlen, wenige Anlagen zeigen aber auch große Unterschiede. So ist die Jahresarbeitszahl der Anlage Nummer 139 mit 3,6 um 0,4 geringer als die Gesamtarbeitszahl. Im positiven Sinne wurden sogar Veränderungen der Arbeitszahl von bis zu 0,9 (Nummer 43) bilanziert. Eine Sortierung der Jahresarbeitszahlen in der Periode 2009/10 würde eine Spannweite von 3,0 bis 5,2 aufzeigen, wobei der zweithöchste Wert in diesem Fall 4,9 betrage. Es bleibt hervorzuheben, dass sowohl in der Gesamt- als auch die Jahresbetrachtung kein Wert unter 3,0 bilanziert wurde. Weiterhin erreichten 20 von 56 Anlagen (36 %) einen Wert von 4,0 oder höher.

5.2.2 Luft/Wasser-Wärmepumpen

Aufgrund ihrer Nachteile hinsichtlich der Wärmequelle haben Luft-Wärmepumpen zwangsläufig geringere Arbeitszahlen als Erdreich- und Wasser-Wärmepumpen. Das Diagramm in Bild 16 stellt die entsprechende Auswertung für Luft-Wärmepumpen dar. Der Aufbau der Grafik ist analog zur Grafik in Bild 11 und wurde zu Beginn des Kapitels 5.2.1 erklärt.

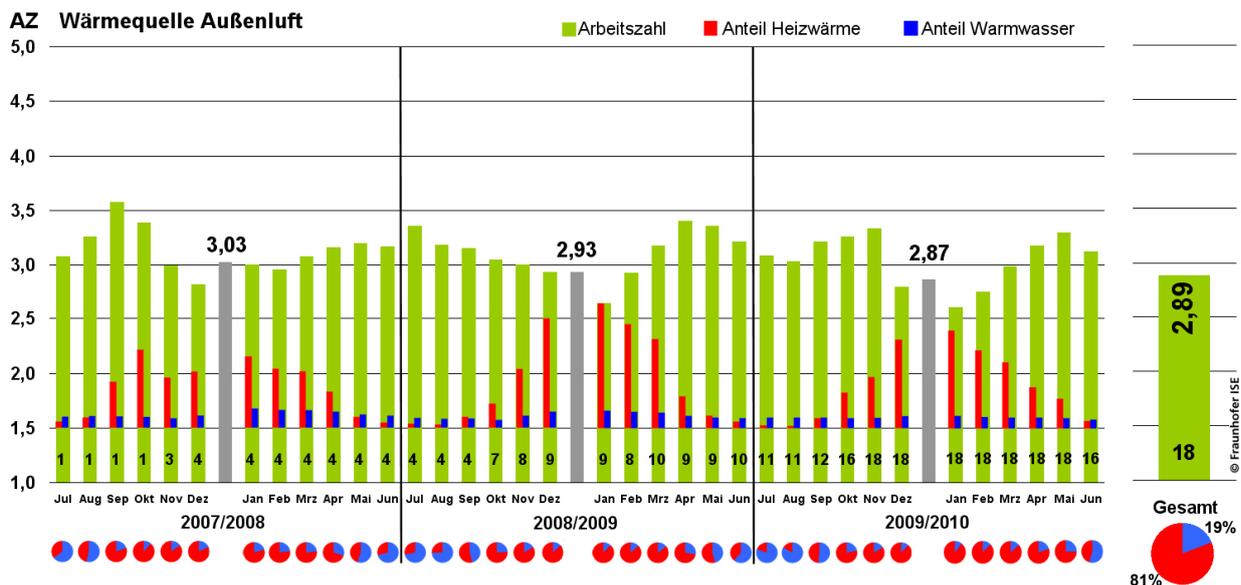


Bild 16: Arbeitszahlen von Luft-Wärmepumpen für verschiedene Zeitperioden im Betrachtungszeitraum Juli 2007 bis Juni 2010 mit der Struktur der bereitgestellten thermischen Energie sowie der Anzahl der jeweils ausgewerteten Wärmepumpen.

Die Datenbasis bei den Luft-Anlagen war geringer als bei den Erdreich-Anlagen. Zu Beginn wurde eine Wärmepumpe, nach sukzessivem Zubau von Anlagen wurden maximal 18 Wärmepumpen ausgewertet. Diese 18 Anlagen erreichten insgesamt eine Effizienz von 2,89. Da der Wärmebedarf von Gebäuden unabhängig von der Wärmequelle ist, verhalten sich die jeweils erzeugten Energien für Heizung und Trinkwassererwärmung, relativ wie absolut, wie jene der Erdreich-Anlagen.

Die Jahresarbeitszahlen sinken über den Betrachtungszeitraum kontinuierlich ab. Von 07/08 zu 08/09 verringerte sie sich um 0,10, von 08/09 zu 09/10 um 0,06. Dies korreliert mit dem leichten Absinken der Außenlufttemperatur. Diese verringerte sich von 2007 auf 2008 um 0,4 K, von 2008 auf 2009 um 0,2 K. Prinzipiell könnte diese Entwicklungen auch mit der sehr geringen Datenbasis und der daher leichten Beeinflussbarkeit durch Extremwerte interpretiert werden. Den Haupteinfluss haben jedoch die Wärmepumpen der ersten Phase, die erst ab dem letzten Jahr ausgewertet werden konnten. Diese erreichten eine

generell geringere Effizienz als die übrigen Anlagen. Auf dieses Thema wird im aktuellen Kapitel anhand von Bild 17 noch tiefer eingegangen.

Der Vergleich der Grafiken von Luft- und Erdreich-Anlagen offenbart große Unterschiede bei den monatlichen Arbeitszahlen im jahreszeitlichen Verlauf. Während man bei Erdreich-Anlagen die Heizperiode eindeutig an den wesentlich höheren Arbeitszahlen erkennt, arbeiten die Luft-Anlagen gerade in diesem Zeitraum am ineffizientesten. Extremwerte mit rund 2,6 werden in beiden Januarmonaten der Jahre 2009 und 2010 erreicht. Betrachtet man aufgrund der höheren Anlagenzahl die Grafik ab Oktober 2008, so ergibt sich ein zweites Minimum im Sommer. Die Arbeitszahl übersteigt im August 2009 nur knapp einen Wert von 3,0.

Die Gründe für die mäßige Effizienz im Sommer und der äußerst niedrigen im Winter ist wieder auf den Temperaturhub zurückzuführen. Einen weiteren negativen Einfluss auf die Effizienz im Sommer übt der Energieverbrauch der Steuerung aus. Aufgrund des sonst geringen Elektroenergieverbrauchs in dieser Periode fällt er besonders stark ins Gewicht. Während dieser bei Erdreich-Anlagen im Wesentlichen durch Änderungen der mittleren Wärmesenktemperatur im Jahresverlauf beeinflusst wird, trägt bei Luft-Anlagen zudem die Wärmequelle stark bei. In der Heizperiode stehen der Wärmepumpe nur geringe Wärmequellentemperaturen zur Verfügung. Im Sommer sind zwar die Lufttemperaturen wesentlich höher, fast gleichermaßen aber auch Vorlauftemperaturen für die nun fast ausschließlich benötigte Trinkwarmwasserbereitung. Die höchsten Arbeitszahlen sind somit in der Übergangszeit zu finden. Wird die Heizgrenze geradeso unterschritten ist die Wärmequellentemperatur relativ hoch, während der Heizkreis noch mit geringen Temperaturen beladen wird. Somit werden die höchsten Arbeitszahlen im April 09 (3,40), November 09 (3,29) sowie im Mai 10 (3,23) erreicht. Der Anteil der bereitgestellten Energie für die Heizwärme betrug in diesen drei Monaten etwa zwischen 75 % und 80 %.

Auch bei den Luft-Wärmepumpen gab es Änderungen bzgl. der Effizienz durch die neuen Anlagen der zweiten Phase (zu den Projektphasen vgl. Kapitel 3.2). Die Arbeitszahlen, getrennt nach erster und zweiter Phase, liefert die Grafik im Bild 17. Hierbei ist zu beachten, dass die ohnehin geringe Anzahl von Anlagen sich noch einmal in etwa gleichen Teilen auf die erste und zweite Phase verteilt. Ähnlich wie bei den Erdreich-Wärmepumpen der zweiten Phase verzeichnen auch Luft-Wärmepumpen jener Phase eine höhere Arbeitszahl (Differenz beträgt 0,17).

Während die Anlagen der ersten Phase in der jährlichen Betrachtung zuerst relativ konstant bleiben, gibt es eine Minderung um 0,24 von 08/09 zu 09/10. Im gleichen Zeitraum bleiben die Arbeitszahlen von Anlagen der zweiten Phase nahezu konstant. Die bereits beschriebenen Einflüsse durch Witterungsbedin-

gungen korrelieren zu den Arbeitszahlen der Anlagen der ersten Phase leicht, zu Anlagen der zweiten Phase überhaupt nicht.

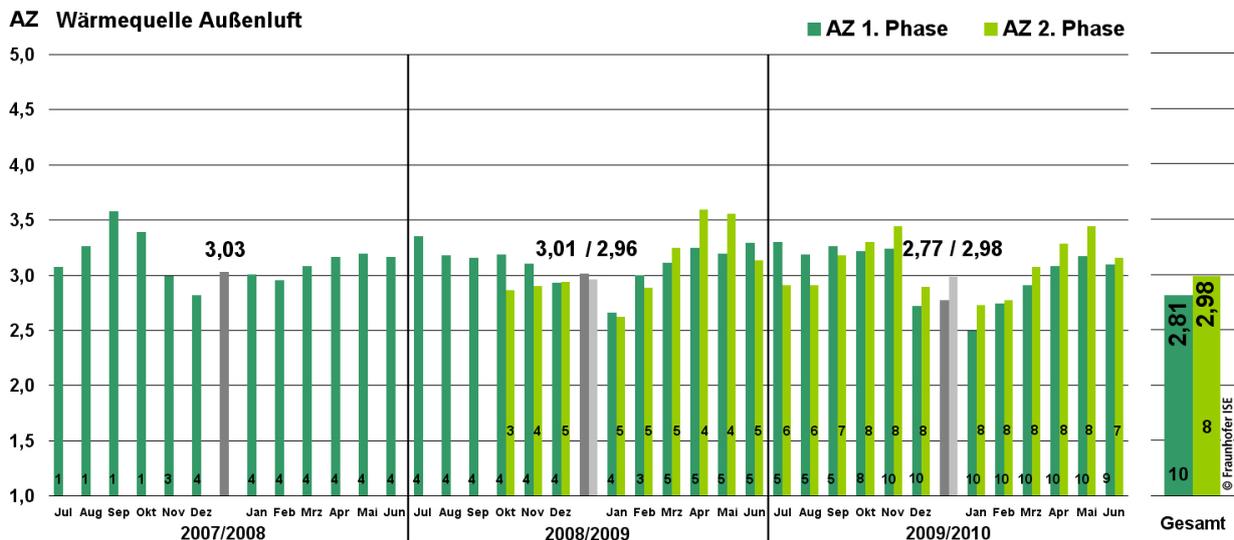


Bild 17: Arbeitszahlen von Luft-Wärmepumpen für verschiedene Zeitperioden im Betrachtungszeitraum Juli 2007 bis Juni 2010, getrennt nach erster und zweiter Phase

In der ersten Phase waren einige Anlagen erst ab Oktober 2009 und somit verspätet auswertbar. Genau jene Wärmepumpen arbeiteten im Vergleich weniger effizient. Ohne die Berücksichtigung dieser Anlagen wäre eine Gesamtarbeitszahl von 2,92 erzielt worden. Dies relativiert einerseits den Vorsprung der Anlagen der zweiten Phase, andererseits erklärt sich hiermit zum Großteil die Verringerung der Jahresarbeitszahl 09/10 in der Gesamtbetrachtung im Bild 16.

Die Monatsarbeitszahlen zeigen, dass in der für Luft-Wärmepumpen vorteilhaften Übergangszeit (April, Mai 09) Werte von über 3,5 erreichbar sind. Auch im darauffolgenden Jahr wird dieser Wert mit einer doppelt so großen Datenbasis fast erreicht. Den niedrigsten Wert erzielen die Wärmepumpen der ersten Phase im sehr kalten Januar 2009 mit einer Arbeitszahl von 2,5. Solche witterungsbedingten Tiefstwerte werden bei Luft-Wärmepumpen in der Regel auch durch vermehrte Heizstabaktivität beeinflusst.

Im Bild 18 werden die Arbeitszahlen von Luft-Wärmepumpen für verschiedene Bilanzgrenzen dargestellt. Diese wurden für den gesamten Zeitraum, von Juli 2007 bis Juni 2010, sowie den drei einzelnen Jahren gebildet. Ähnlich den Erdreich-Wärmepumpen ergeben sich die größten Differenzen zwischen jeweils kleinsten und größten Bilanzkreisen. Die AZ 0, welche nur den Verdichter berücksichtigt, beträgt 3,17. Die AZ 1 erzielt inklusive Ventilatoren mit 2,95 einen um 0,22 geringeren Wert. Der Unterschied zwischen AZ 1 und AZ 2 ist mit 0,06 relativ gering. Ein größerer Sprung ist wieder bei der Berücksichtigung der Ladepumpen zu beobachten. Hier beträgt die Differenz 0,15. Die Jahresarbeits-

zahlen der verschiedenen Bilanzgrenzen verhalten sich ähnlich zueinander wie bei den Gesamt-Arbeitszahlen.

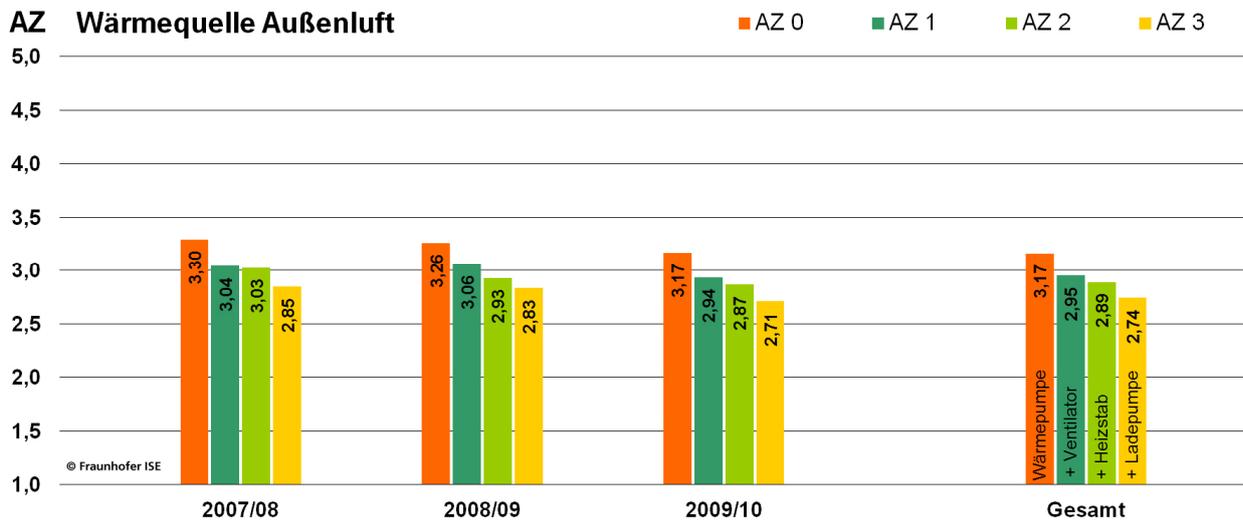


Bild 18: Arbeitszahlen von Luft-Wärmepumpen in verschiedenen Zeitperioden im Betrachtungszeitraum Juli 2007 bis Juni 2010 unter Berücksichtigung vier verschiedener Bilanzgrenzen (Erläuterung in Kapitel 5.1)

Das Balkendiagramm im Bild 19 lenkt den Fokus auf die Effizienzen der einzelnen Luft-Wärmepumpen. In hellem grün werden dabei die Gesamtarbeitszahlen für den Auswertungszeitraum, in dunklem grün die Jahresarbeitszahlen für das letzte Jahr der Auswertung dargestellt.

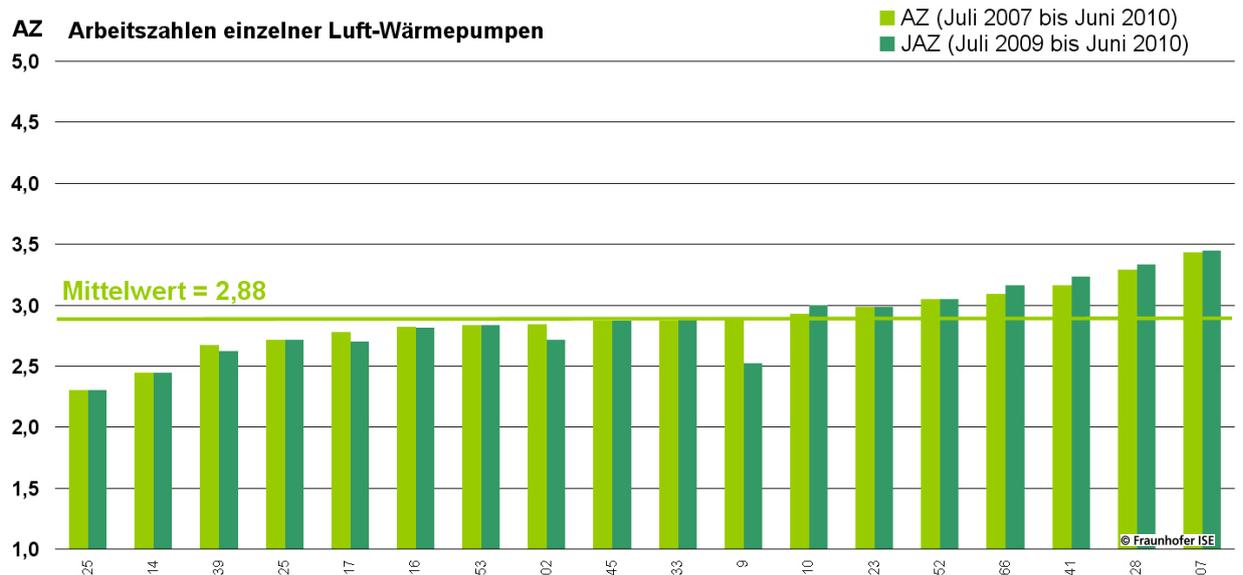


Bild 19: Arbeitszahlen von Luft-Wärmepumpen für die Zeiträume Juli 2007 bis Juni 2010 sowie Juli 2009 bis Juni 2010; die Anlagenbezeichnungen entsprechen den Herstellern bekannten ID-Nummern

In den Mittelwert von 2,88 gehen Werte ein, die mindestens 2,3 und höchstens 3,4 betragen. Ausreißer wie bei den Erdreich-Wärmepumpen sind nicht zu erkennen. Eine Einordnung bezüglich oft zitierter Schwellenwerte zeigt, dass 6 der 18 Anlagen (33 %) über 3,0 und 16 von 18 Wärmepumpen (89 %) oberhalb von 2,6 (Primärenergiefaktor Elektroenergie nach EnEV 2009 [3]) liegen. Ein Vergleich zwischen Gesamtarbeitszahl sowie Jahresarbeitszahl zeigt, dass nur bei der Anlage Nummer 9 signifikante Differenzen (-0,4) auftreten. Die Bandbreite der Jahresarbeitszahlen entspricht somit jener der Gesamtarbeitszahlen.

5.3 Bewertung der Arbeitszahl - Effizienz vs. Effektivität

Das Hauptziel des Projektes „WP-Effizienz“ war die unabhängige Bestimmung der Effizienz von serienmäßigen Wärmepumpen geringer Leistungsklassen. Aufgrund der Anlagenzahl konnten fundierte Ergebnisse für Erdreich- sowie Luft-Wärmepumpen erzielt werden. Erdreich-Anlagen erreichen eine durchschnittliche Arbeitszahl von 3,9 während Luft-Wärmepumpen einen Wert von durchschnittlich 2,9 erzielen. Lässt man die Wärmequellen außer Acht, so wurden im Feldtest Effizienzkennwerte einzelner Wärmepumpen zwischen 2,3 und 5,1 ermittelt.

Die Wärmepumpen stellen Energie für Heizung und Trinkwassererwärmung somit sehr unterschiedlich effizient zur Verfügung. In der Langfassung des Abschlussberichtes wird eine Vielzahl verschiedener Einflussgrößen auf die Effizienz beschrieben. Deren Vielfältigkeit macht deutlich, dass die Effizienz ohne Nennung der Rahmenbedingungen keine Wertung zulässt. Gleiches gilt für Aussagen hinsichtlich der ökologischen oder ökonomischen Betrachtung des Versorgungssystems. Um dies dennoch zu ermöglichen und gleichzeitig die Arbeitszahlen von Wärmepumpen besser einordnen zu können, wird im Rahmen dieses Abschnitts die Effizienz um den Begriff der Effektivität erweitert. Während die Effizienz eine Input/Output-Relation darstellt, spricht man bei der Effektivität vom Maß einer Zielerreichung. In diesem Abschnitt sollen diese Ziele die Einsparung von Heiz- und Primärenergie sein. Solche Überlegungen erfordern unter anderem die Berücksichtigung der energetischen Qualität der Gebäudehülle.

Durch diesen umfassenden Ansatz wird gleichzeitig der Energieeinsparverordnung (bspw. EnEV 2009 [3]) Rechnung getragen. Bei der EnEV wird einem Gebäudetyp ein maximaler Primärenergiebedarf vorgegeben, der durch entsprechende Anlagentechnik und/oder Qualität der Gebäudehülle eingehalten werden muss. Mögliche Konstellationen von Effizienz und Effektivität werden nachfolgend anhand von drei Beispielen aus dem Feldtest vorgestellt. Die Effizienz der Wärmepumpe wird mit der Arbeitszahl 2 (Bilanzgrenzen vgl. Kapitel 5.1) wiedergegeben. Heizenergie- und Primärenergieverbrauch werden gemäß den Formeln 5 und 6 wie folgt berechnet.

$$q_{\text{Heiz}} = \frac{Q_{\text{Heiz}}}{A_{\text{Gebäude}}} \quad 5$$

$$q_{\text{PE}} = \frac{W_{\text{EL}} \cdot f_{\text{PE}}}{A_{\text{Gebäude}}} \quad 6$$

q_{Heiz}	spezifischer Heizenergieverbrauch
Q_{Heiz}	Heizenergieverbrauch
$A_{\text{Gebäude}}$	beheizte Gebäudefläche
q_{PE}	spezifischer Primärenergieverbrauch
W_{EL}	Elektroenergieverbrauch der Wärmepumpe
f_{PE}	Primärenergiefaktor Elektroenergie (2,6 nach [3])

Ein Beispiel für Wärmepumpeneffizienz und energetischer Effektivität wird im Bild 20 veranschaulicht. Hier versorgt eine Erdreich-Wärmepumpe mit Tiefensonden ein Gebäude mit Energie zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung. Das Gebäude hat eine beheizte Fläche von 252 m². Die Wärmepumpe erreichte 2009 eine für die untersuchten Erdreich-Anlagen überdurchschnittliche Jahresarbeitszahl von 4,11. Gleichzeitig liegt der spezifische Heizwärmeverbrauch des Gebäudes mit einem Wert von 52,7 kWh/m²a unter dem Durchschnitt der im Feldtest untersuchten Objekte. Der Primärenergieverbrauch liegt bei 39,1 kWh/m²a. Man kann somit festhalten, dass in diesem Beispiel eine effiziente Wärmepumpe in einem, unter energetischen Gesichtspunkten, effektiven Gesamtsystem arbeitet.

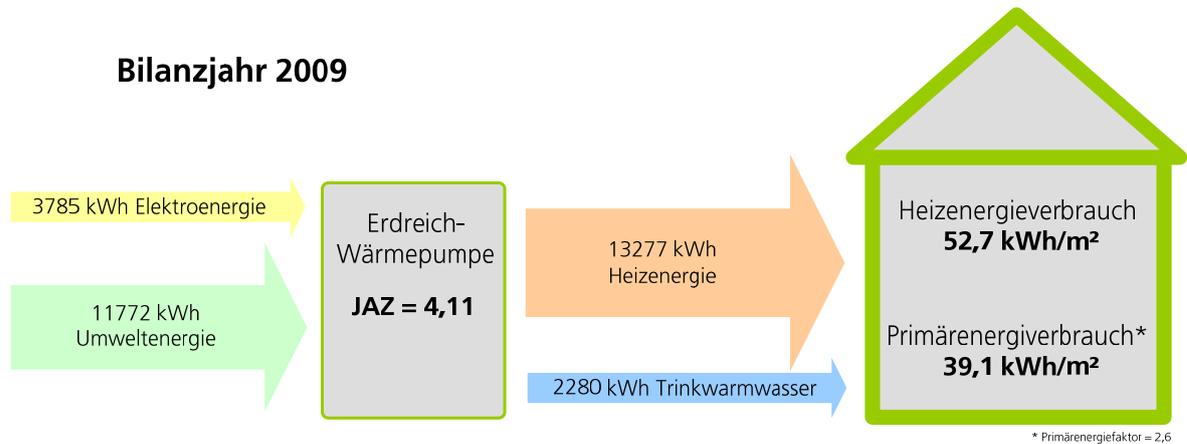


Bild 20 : Betrachtung von Wärmepumpeneffizienz und energetischer Effektivität des Gesamtsystems (Beispiel 1)

Im Vergleich zum ersten Beispiel geht es im Folgenden um eine noch effizientere Erdreich-Wärmepumpe mit Tiefensonden in einem Gebäude mit einer Fläche von 130 m², grafisch dargestellt im Bild 21. Die Wärmepumpe erreichte im Jahr 2009 eine Arbeitszahl von 4,24. Da die Qualität der Gebäudehülle jedoch geringer ist, liegt der spezifische Heizenergieverbrauch mit einem Wert von 99,8 kWh/m²a entsprechend höher, ebenso der Primärenergieverbrauch mit einem Wert von 74,1 kWh/m²a. Aufgrund der letzten beiden Werte kann die Effektivität des Gesamtsystems in diesem Beispiel als negativ bewertet werden, obwohl die Effizienz sehr gut ist.

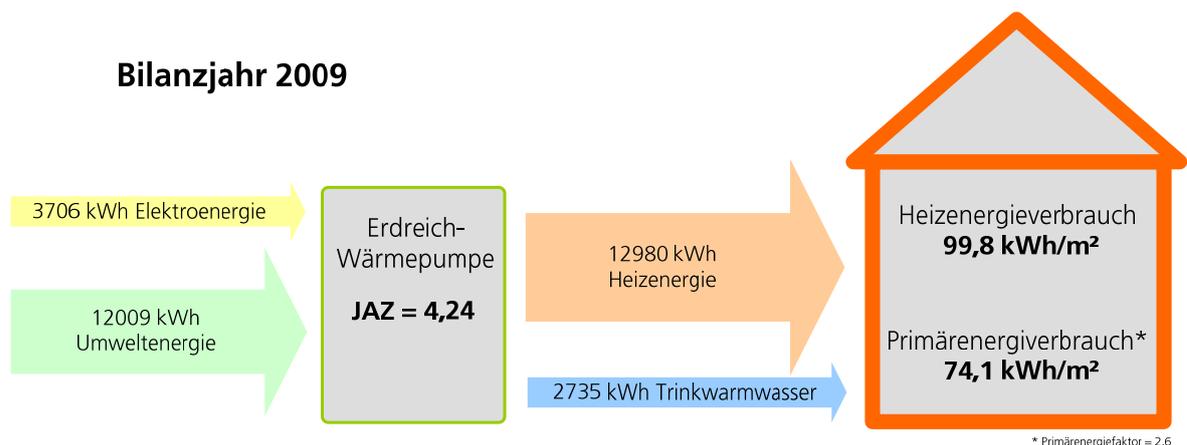


Bild 21 : Betrachtung von Wärmepumpeneffizienz und energetischer Effektivität des Gesamtsystems (Beispiel 2)

Im dritten Beispiel (Bild 22) wird eine Luft-Wärmepumpe in einem relativ gut isolierten Gebäude mit einer beheizten Fläche von 161 m² vorgestellt. Mit einem Heizenergieverbrauch von 46,7 kWh/m² kann das Gesamtsystem unter energetischen Gesichtspunkten als effektiv bewertet werden. Die Effizienz der

Wärmepumpe ist aufgrund der genutzten Wärmequelle jedoch sehr gering (wenn auch im Kontext Luft-Wärmepumpen sehr hoch). Der spezifische Primärenergieverbrauch beträgt 56,8 kWh/m². Im Gegensatz zum ersten Beispiel übersteigt hier der Primärenergieverbrauch, infolge der geringen Anlageneffizienz, den spezifischen Heizenergieverbrauch.

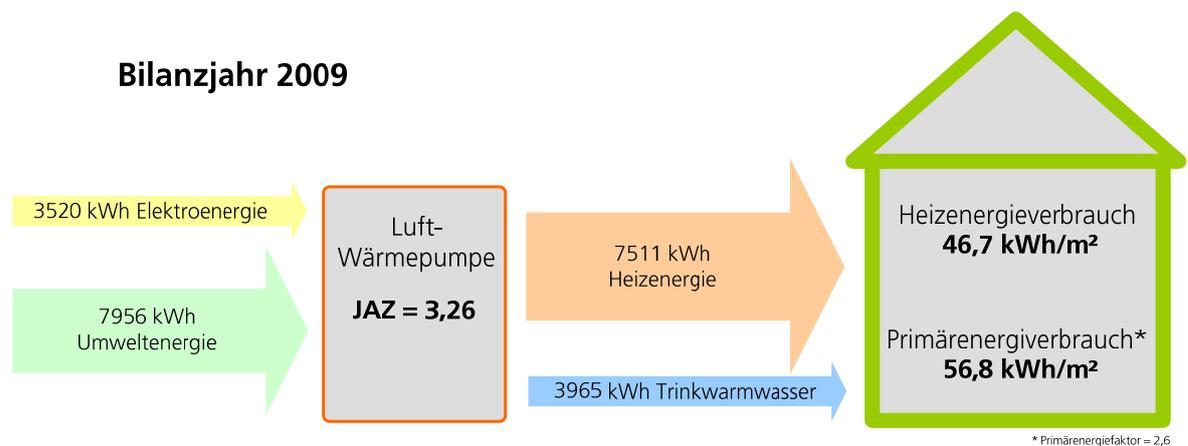


Bild 22 : Betrachtung von Wärmepumpeneffizienz und energetischer Effektivität des Gesamtsystems (Beispiel 3)

Zusammenfassend ist die Effizienz der Wärmepumpenanlage immer im Zusammenhang mit den Randbedingungen zu betrachten, während die Effektivität des Gesamtsystems die eigentlich maßgebliche Zielgröße darstellt. Die Senkung des Energiebedarfes sollte daher bei Verbesserungsmaßnahmen immer der erste Schritt sein, da dieser in jedem Fall die Effektivität des Gesamtsystems erhöht. Der verbleibende Bedarf sollte mit möglichst hoher Effizienz gedeckt werden. Je höher diese Effizienz ist, desto größer ist der Beitrag der Wärmepumpe an einer effektiven Energieversorgung.

6 Festgestellte Fehler sowie Verbesserungsvorschläge bei Auslegung, Installation und Betrieb

Dieses Kapitel widmet sich den im Rahmen des Feldtestes erkannten Problemen und versucht Verbesserungsvorschläge für die Teilbereiche Auslegung, Installation sowie Betrieb zu geben. Der Text bezieht sich auf die Langfassung des Berichtes.

Wie an vielen Stellen dieses Berichtes beschrieben, liegt die Grundvoraussetzung für effizienten Wärmepumpenbetrieb in der Gewährleistung geringer Temperaturdifferenzen zwischen Wärmequelle und Wärmesenke. Im Kapitel 0 wird weiterhin erläutert, dass dem Ziel der Effizienz jenes der Effektivität, also der generellen Energieeinsparung, vorangestellt werden sollte. Auf beide Ziele kann am wesentlichsten im Vorfeld bei der **Auslegung** eingewirkt werden.

Vor dem Einbau einer Wärmepumpe sollten **Energieeinsparpotenziale**, vor allem hinsichtlich der **Gebäudehülle**, mit dem Ziel eines geringeren Heizwärmebedarfs analysiert und so gut wie möglich realisiert werden. Diese Maßnahmen treffen auf Neubauten ebenso zu wie auf Bestandsgebäude. Die positiven Effekte spiegeln sich in der Installation einer Wärmepumpe mit geringerer Leistung mit einem gleichzeitig geringeren Stromverbrauch wider. Eine bedachte Wirtschaftlichkeitsanalyse unter Berücksichtigung der genannten Optionen sollte diesem Prozedere vorangestellt werden.

Auch in einem energetisch verbesserten Gebäude hängt die Effizienz der Wärmepumpe im Wesentlichen vom Temperaturhub ab. Auf Seiten der **Wärmesenke** (Heizkreisseite) sollten möglichst **geringe Temperaturen** angestrebt werden. Den größten Effekt erzielt man mit der Vergrößerung der wärmeübertragenden Fläche durch den Einsatz von Fußboden- oder Wandheizungen. In Bestandsgebäuden mit geringem Umbaupotenzial können spezielle Niedertemperatur-Radiatoren eingesetzt werden. An dieser Stelle sei ein untersuchtes Objekt mit Luft-Wärmepumpe erwähnt, welche 2009 eine überdurchschnittliche Jahresarbeitszahl von 3,3 erreichte. Auf jedem der 113 m² des versorgten Reihenhauses ist eine Fußbodenheizung verlegt, welche durchschnittliche Temperaturen von 31,5 °C im Vorlauf sowie 27,0 °C im Rücklauf aufweist. Die im Rahmen der Felduntersuchung festgestellten geringsten durchschnittlichen Vorlauftemperaturen für den Heizkreis betragen 28,8 °C. Die **Wärmequellen-temperatur** sollte, vor allem in der Heizperiode, **möglichst hoch** sein. In erster Linie wird diese mit der Wahl der Wärmequelle bzw. der Ausführung der eingesetzten Wärmetauscher beeinflusst. Die in der Heizperiode höchsten und gleichzeitig im Jahresverlauf konstantesten Temperaturen erreichen Wärme-

pumpen mit Grundwasser als Wärmequelle. Etwas niedrigere Temperaturen und stärker von Schwankungen betroffen sind Erdreich-Anlagen. Diese werden unterschieden in Sonden- und Kollektor-Anlagen, wobei die Temperaturen von letztgenannten im Durchschnitt geringer sind und im Jahresverlauf intensiver variieren. Die Wärmequellentemperaturen von Luft-Wärmepumpen bieten die vergleichsweise schlechtesten Voraussetzungen für die Effizienz. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer Divergenz zwischen Außenlufttemperatur und Heizwärmebedarf. Letztlich müssen bei der Auswahl einer geeigneten Wärmequelle neben der Effizienz und den daraus resultierenden ökologischen sowie ökonomischen Vorteilen während der Nutzungszeit, noch weitere Aspekte berücksichtigt werden. Diese umfassen beispielsweise die örtlichen Gegebenheiten wie das Platzangebot, rechtliche Genehmigungsverfahren (vor allem für Wasser-Anlagen), oder finanzielle Voraussetzungen in Bezug auf die Investitionskosten.

Die Auslegung umfasst weiterhin den Aufbau der Wärmeverteilungsanlage. Neben der direkten Beladung des Heizkreises besteht die Möglichkeit einen Pufferspeicher seriell oder parallel zu installieren. Solche Speicher werden in der Regel mit der Begründung eingesetzt, Sperrzeiten zu überbrücken oder längere Verdichterlaufzeiten (kein Takten) zu ermöglichen. Vor allem letztgenannter Punkt kann für die Übergangszeit, in der geringer Wärmebedarf einer für den Extremfall angepassten Wärmepumpenleistung gegenübersteht, unterstrichen werden. Von Luft-Wärmepumpen mit Prozessumkehr für die Abtauung beladene Heizkreise, werden in der Regel mit einem Pufferspeicher ausgestattet. Ebenfalls durch Volumenerhöhung gewährleisteten Pufferspeicher die von der Wärmepumpe benötigte Mindestwasserdurchsatzmenge. Weiterhin können unterschiedliche Speicher zur individuellen Einbindung weiterer Wärmeerzeuger, wie bspw. einer Solaranlage, dienen. Im Rahmen des Feldtestes konnte ein Zusammenhang zwischen Aufbau des Wärmesenkensystems und der Effizienz der Wärmepumpe festgestellt werden. **Am effizientesten schnitten Wärmepumpen mit direkter Heizkreisbeladung, also ohne Pufferspeicher, ab.** Die Effizienz von Anlagen mit Pufferspeicher war etwas geringer. Aufgrund der geringen Anlagenzahl wurden seriell und parallel eingebaute Pufferspeicher keiner weiteren Effizienzbewertung unterzogen. Der Unterschied zwischen den durchschnittlichen Arbeitszahlen von Systemen ohne Speicher und mit Kombispeicher ist wesentlich signifikanter. Ein Grund hierfür liegt in der teilweise mangelhaften Beladungsstrategie. Häufig konnte beobachtet werden, dass eine Anforderung aus dem Heizkreis mit einer Beladung im Trinkwassermodus beantwortet wurde. Die höheren Vorlauftemperaturen führen zu einem Absinken der Effizienz. Es bleibt somit festzuhalten, dass bei der Frage nach einer eventuellen Installation eines Speichers die Vor- und Nachteile genau abgewogen werden müssen. Ein Speicher jeder Art ist verlustbehaftet und muss daher ausreichend positive Effekte erzielen, dass diese Verluste mindestens ausgeglichen werden. An dieser Stelle sei weiterhin erwähnt, dass den Speichern im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung der Energieversorgung eine tragende Rolle bei

der Verlagerung von Wärmepumpenbetriebszeiten zur besseren Ausnutzung Erneuerbarer Energien im Stromnetz spielen könnte (Stichwort Smart Grid).

Ein weiteres die Auslegung betreffendes Problem ist der Einsatz **zu leistungsstarker Primärpumpen**. Dies betrifft besonders die Brunnenpumpen bei den Wasser-Wärmepumpen. Bei Sole-Wasser-Wärmepumpen laufen die Solepumpen manchmal auf einer zu hohen Arbeitsstufe, was den Stromverbrauch erhöht welcher wiederum negativ in die Berechnung der Arbeitszahl eingeht. Der **Einsatz von Hocheffizienzpumpen** ist an dieser Stelle dringend zu empfehlen.

Wärmepumpenheizungsanlagen verlangen nach einer **integralen und objektspezifischen Planung** welche das Gebäude mit einschließt. Eine sorgfältige Auslegung der gesamten Anlage sowie eine gute Anpassung der einzelnen Komponenten (Wärmequelle, Wärmepumpe, Wärmesenke) müssen gewährleistet sein. Weiterhin sind bei der Auslegung die höheren Anforderungen an die Installation und die Regelung der Wärmepumpe bei steigender Komplexität des hydraulischen Aufbaus zu berücksichtigen.

Einer sorgfältigen Auslegung muss sich eine ebenso sorgfältige **Installation** des Wärmepumpenheizsystems anschließen. Hierbei stehen die Gewährleistung der Funktionalität hydraulischer Bauteile sowie ein korrekter Einbau regelungsbezogener Komponenten im Mittelpunkt.

Die Aufteilung in Heiz- und Trinkwasserladekreis erfolgt in der Regel entweder mittels **3-Wege-Ventil** und einer Pumpe oder ohne Ventil und zwei Pumpen. Bei den 3-Wege-Ventilen konnte nicht vollständiges schließen beobachtet werden. Dies führte unter anderem zur kontinuierlichen Entladung des Trinkwasserspeichers. Ein Effekt, der durch **unnötigen Ladepumpenbetrieb** noch verstärkt wurde. Das vollständige Schließen sollte somit bei der Installation geprüft werden. Die Beladung eines Teilkreises bei der Nutzung zweier Pumpen ohne den Einbau von Rückschlagklappen hat teilweise einen negativen Volumenstrom im jeweils anderen Teilkreis hervorgerufen.

Bei der Verwendung von Speichern sind der **korrekte Einbau von Temperaturfühlern** sowie eine zweckmäßige Parametrierung der Wärmepumpenregelung erforderlich. Eine stufenlose Positionierung von Temperaturfühlern erlauben Klemmleisten, Eintauchfühler sind zwar fixiert, messen jedoch genauer. Ziel sind hierbei alle Voraussetzungen für eine optimale Speicherbeladung, vor allem von Kombispeichern, zu bieten.

Bei der Installation könnten zudem die Heizstäbe der Erdreich-Wärmepumpen deaktiviert werden. **Korrekt ausgelegte Erdreich-Wärmepumpen erfordern keine zusätzliche Elektroheizung**. Die Elektroheizung ist nur bei Störfällen

oder der Bauaustrocknung notwendig. Eine zu hohe Beanspruchung der Erdsonde könnte im schlimmsten Fall zu deren Schädigung führen.

Neben diesen Ausführungen sollte ein **hydraulischer Abgleich** sowie sorgfältige und **lückenlose Dämmung** der Rohrleitungen und anderer Komponenten standardmäßig erfolgen.

Eine Wärmepumpe sollte nicht als eine Heizungstechnologie verstanden werden, die nach ihrer Installation unbeachtet im Keller steht. Auch während dem **Betrieb** kann ihre Effizienz noch positiv beeinflusst werden.

Eine wesentliche Einflussnahme kann durch die Anpassung der Heiz- und Trinkwarmwassertemperaturen erfolgen. Zwar werden beide Größen in der Auslegung schon individuell ermittelt, dennoch können reales Nutzerverhalten und reale Nutzerbedürfnisse von ihr abweichen. Optimale Voraussetzungen für die Effizienz der Wärmepumpe bietet die jeweils geringste mögliche Temperatur. Die Heizkreistemperatur kann in der Regel sehr komfortabel über eine schrittweise **Absenkung der Heizkurve** angepasst werden.

Eine weitere Option besteht in der Anpassung der Pumpenleistungen im Primär- sowie Sekundärkreis. Hierbei sollte das Ziel sein, über geeignete Volumenströme optimale Temperaturdifferenzen an den Wärmeübertragern zu erreichen.

7 Verantwortung für Effizienz und Effektivität

Es sind hauptsächlich drei Gruppen dafür verantwortlich, das theoretisch hohe Potenzial in Form von realer, hoher Effizienz zu verwirklichen und zur Effektivität des Gesamtsystems beizutragen – die Wärmepumpenhersteller, die Planer und die Installateure sowie die Benutzer der Wärmepumpenanlagen.

Bei den **Herstellern** liegt die Verantwortung, effiziente und zuverlässige Wärmepumpen anzubieten. Der Feldtest hat gezeigt, dass Wärmepumpenanlagen sehr zuverlässig arbeiten. Weiteres Optimierungspotenzial liegt vor allem im Bereich der Effizienz von Wärmepumpen. Dies kann einerseits mit kontinuierlicher Anhebung der COPs, etwa durch die Verbesserung einzelner Komponenten, sowie der Weiterentwicklung geeigneter Regelalgorithmen realisiert werden. Auch die Schulung und Weiterbildung der entsprechenden Fachkräfte liegt im Verantwortungsbereich der Hersteller. Eine weitere Aufgabe liegt in der Aufklärung der Wärmepumpennutzer zum effizienten Betrieb ihrer Wärmepumpe. Weiterhin müssen von den Herstellern zukünftige Herausforderungen, wie etwa durch die Einbindung von Wärmepumpen in ein intelligentes Stromnetz, dem steigenden Bedarf an Kühlleistung im Sommer oder die Kombination mit weiteren Wärmeerzeugern, in der Entwicklung berücksichtigt werden.

Bei den **Planern** und **Installateuren** liegt für die Realisierung einer bestmöglichen Effizienz die größte Verantwortung. Die richtige Planung sowie die sorgfältige und fachgerechte Installation der Wärmepumpenanlagen sind entscheidend für die korrekte und effiziente Arbeit der Systeme. Nur unter diesen Bedingungen können die Wärmepumpen die ökonomischen und ökologischen Vorteile und Erwartungen erfüllen. Vor allem die Bandbreite an Jahresarbeitszahlen zeigt, dass hier noch ein großes Optimierungspotenzial besteht. Wie auch die Hersteller, sind die Planer und Installateure verpflichtet, dem Nutzer Ratschläge für einen effizienten Wärmepumpenbetrieb mitzuteilen.

Die **Bewohner** können im Wesentlichen auf zwei Ebenen Einfluss auf die Effizienz einer Wärmepumpenanlage und den Energieverbrauch nehmen. Auf übergeordneter Ebene entscheiden letztlich die Nutzer über eine Investition. Hierunter zählen somit deren Möglichkeiten sowie ihre Bereitschaft ein Gebäude mit geringem Heizwärmebedarf zu bauen bzw. ein bestehendes Gebäude energetisch zu sanieren oder die bessere Wärmequelle auszuwählen. Nutzungsdauern des gesamten Wärmepumpenheizsystems und somit auch der Wärmequellenanlage ist hierbei zu berücksichtigen. Dem untergeordnet kann der Bewohner bei bestehender Gebäude-/Anlagen-Konfiguration vor allem die Wärmesenktemperatur beeinflussen. Das Einstellen der Heizkurve ist in vielen

Fällen auf komfortabler Weise über eine einfache Menüführung im Display der Wärmepumpe möglich. Weiterhin kann der Bewohner eine eventuelle elektrische Zusatzheizung abstellen und nur zuschalten, wenn ein realer Bedarf besteht. Hierdurch würden ungewollte Aktivitäten gleich vermieden. Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, steht vor der aktiven Teilnahme des Nutzers dessen Aufklärung. Die notwendigen Informationen zum effizienten Wärmepumpenbetrieb und die Einstellmöglichkeiten sollten die Nutzer sowohl von den Herstellern, als auch von den Anlagenplanern erhalten. An dieser Stelle sei erwähnt, dass im Rahmen des Feldtestes im Wesentlichen zwei Gruppen von Nutzererhalten beobachtet werden konnten. Eine Gruppe war geprägt von wenig Interesse und entsprechend geringem Wissen über ihre Wärmepumpe. In der anderen Gruppe befanden sich Nutzer mit großem Interesse und entsprechend aktiven Auftreten bezüglich der Effizienzverbesserung ihres Systems.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Jagnow, Horschler, Wolff
Die neue Energieeinsparverordnung 2002
Deutscher Wirtschaftsdienst, 2002

- [2] Homepage des Deutschen Wetterdienstes www.dwd.de
→ CDC – climate data center → freie Klimadaten → Klimadaten von 44 Stationen
→ Zeitreihen an Stationen Tageswerte
Stand: 11.02.2011

- [3] Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 29. April 2009
(Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009)
Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 23