

## Feldmessung Wärmepumpen

Manuel Prinzing, Matthias Berthold, Mick Eschmann, Ralph Kuster, Stefan Bertsch

Kontaktperson: Manuel, Prinzing, NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs, manuel.prinzing@ost.ch, www.wpz.ch

### Zusammenfassung

### Abstract

Die seit 2016 laufende Studie im Auftrag von EnergieSchweiz umfasst mittlerweile über 20 Wärmepumpenanlagen zum Heizen und zur Warmwasserbereitung, mehrheitlich verbaut in Einfamilienhäusern. Insgesamt kann eine gute und effiziente Betriebsweise der Anlagen bestätigt werden. Auswertungen zeigen deutlich die Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (JAZ) von der Vorlauftemperatur und der gewählten Wärmequelle. Luft/Wasser-Wärmepumpen (LWWP) in Neubauten erreichen eine durchschnittliche JAZ von 3.7 mit Fussbodenheizung (35 °C), während Sole/Wasser-Wärmepumpen (SWWP) auf eine JAZ von durchschnittlich 5.7 kommen. Bei höheren Vorlauftemperaturen wie etwa 50 °C in Altbauten werden durchschnittliche JAZ-Werte von 4.4 für SWWP und etwa 2.9 für LWWP gemessen. Damit kann heute eine gut umgesetzte Wärmepumpenanlage in einem unsanierten Gebäude mit Radiatorenheizung eine bestehende fossil betriebene Heizungsanlage effizient ohne elektrischen Heizstabeinsatz ersetzen. Dennoch bleibt der um ein Vielfaches höhere Energiebedarf je Bezugsfläche gegenüber Neubauten bzw. wärmedämmten Bestandsgebäuden frappant. Mit der langjährigen Feldmessung werden zudem verschiedene Optimierungspotentiale (Heizkurve und -grenze, Warmwasser-bereitung, Reglereinstellungen, usw.) identifiziert und nach deren Umsetzung in der Wirksamkeit analysiert. Umfangreiche Publikationen ([www.wpz.ch](http://www.wpz.ch)) vertiefen die Erkenntnisse dieser Studie.

This ongoing study commissioned by EnergieSchweiz is running since 2016 and covers more than 20 heat pump systems for heating and hot water preparation, most of which are installed in detached houses. Overall a good operating performance can be confirmed. Evaluations clearly show the dependence of the annual performance factor (SPF) on the supply temperature and the selected heat source. Air-to-water heat pumps (AWHPs) in new buildings achieve an average SPF of 3.7 with underfloor heating (35 °C), while brine-to-water heat pumps (BWHPs) achieve an average SPF of 5.7. At high flow temperatures, such as about 50 °C in old buildings, average SPF values of 4.4 for BWHPs and about 2.9 for AWHPs are measured. Thus, today a well installed heat pump system in an unrenovated building with radiator heating can efficiently replace an existing fossil fuel-fired heating system without the use of an electrical backup heater. In addition, long-term field measurements are used to identify various optimisation potentials (heating curve and limit, hot water preparation, controller settings, etc.) which then were analyzed after their implementation. Extensive publications at [www.wpz.ch](http://www.wpz.ch) extend the findings of this study.

## 1. Ausgangslage

Die Anzahl von Wärmepumpen (WP) in Schweizer Haushalten für Heizung und Warmwasseraufbereitung steigt stetig. Die Zahl der in der Schweiz verkauften Wärmepumpen ist 2019 gegenüber 2018 um fast 10 % [1] und gegenüber 2017 um fast 20 % gestiegen [2]. Über 70 % der Wärmepumpen sind Luft/Wasser-Wärmepumpen (LWWP), 28 % Sole/Wasser-Wärmepumpen (SWWP) und rund 1 % sind Grundwasser-Wärmepumpen (GWWP). Fast 52 % dieser verkauften Warmwasser-Wärmepumpen liegen im Bereich zwischen 5-13 kW<sub>th</sub> und 84 % liegen unter 20 kW<sub>th</sub> Heizleistung [1].

Neben dem steigenden Absatz von Brauchwarmwasser-Wärmepumpen (BWWP)<sup>1</sup> gewinnt die Abschätzung der Feldleistung solcher Wärmepumpensysteme an Bedeutung, da die Effizienz von Wärmepumpen stark von der Integration in das Heizungssystem und den Einstellungen des Wärmepumpenreglers abhängt. Solche Leistungsunterschiede können nicht durch Messungen im Labor, sondern nur am tatsächlichen Nutzungsort ermittelt werden.

Das Wärmepumpen-Testzentrum WPZ an der Hochschule für Technik Buchs (NTB), ist eine nach EN 17025 zertifizierte Prüfstelle [3]. Es bietet einen umfassenden Prüfdienst im Bereich der Wärmepumpen- und Kältetechnik an. Zurzeit werden Feldmessungen aus der erweiterten Überwachungsperiode zwischen 2016 und 2019, die von EnergieSchweiz in Auftrag gegeben wurden, ausgewertet.

Hauptziel der Monitoring Studie ist es, auf der Basis der mehrjährig gemessenen und ausgewerteten Daten Analysen durchzuführen. Anschliessend sollen mögliche Optimierungspotenziale der Systeme identifiziert werden, welche dann umgesetzt werden können. Jährlich werden etwa fünf neue Wärmepumpen in die Messreihe aufgenommen.

Die aktuelle Wärmepumpen-Feldstudie am WPZ in Buchs verfolgt folgende Strategie [3]:

- Untersuchung der installierten Leistung von Wärmepumpensystemen im Feld
- Identifikation von Optimierungspotentialen
- Jährliche Erweiterung der Messkampagne um fünf Wärmepumpen
- Verlässliche Messdaten durch Vorkalibrierung jedes Feldmesssystems
- Aussagekräftige Messdaten durch hohe Abtastrate und genaue Messgeräte
- Umsetzung von Optimierungsvorschlägen nach zwei Jahren Aufzeichnung und Auswertung

Die laufende Studie, welche über das Jahr 2020 hinaus verlängert wurde, umfasst derzeit über 20 Wärmepumpensysteme, welche sich hauptsächlich im deutschsprachigen Mittelland der Schweiz befinden.

## 2. Vorgehen

### 2.1 Messtechnik, Datenerfassung

Im Vergleich zu den ersten in der Schweiz durchgeführten Feldmessstudien, wie z.B. die Feldanalysen von Wärmepumpenanlagen (FAWA) [4] aus den 1990er Jahren, hat sich die Messmethodik und die Datenerfassungstechnologie erheblich verändert. Dank der Digitalisierung stehen heute viel mehr Möglichkeiten zur Messdatenerfassung zur Verfügung. Durch kurze Aufzeichnungsintervalle (10 s Mittelwert der mit 100 ms Abtastrate gemessenen Werte) können zeitliche Abläufe in Wärmepumpenanlagen detailliert beschrieben werden. Basierend auf den gesammelten Datenreihen ist es auch möglich, die folgenden Prozesse genauer zu untersuchen, was früher mit manuellen Messungen (Handablesungen) nicht möglich war [3]:

- Anlaufverhalten
- Abtaungen

---

<sup>1</sup> Es wird darauf hingewiesen, dass anstelle des Begriffes «Brauchwarmwasser» im Folgenden die Bezeichnung «Warmwasser» verwendet wird.

- Taktverhalten bzw. Modulation bei leistungsvariablen Wärmepumpen
- Detaillierte Aufschlüsselung nach unterschiedlichen Nutzungsgraden
- Messung an den unterschiedlichen Systemgrenzen
- Aussagen über das Gebäude
- Einfluss der Nebenaggregate auf die Effizienz (Umwälzpumpen, Heizstäbe, usw.)

Aufgrund der kurzen Abtastzeit und der damit hochauflösenden Daten können Prozesse nicht nur energetisch, sondern auch in Bezug auf die Leistung im Zeitverlauf betrachtet werden. Die Messwerte können so einer klaren zeitlichen Abfolge zugeordnet werden. So kann beispielsweise die Effizienz der Warmwasserbereitung und der Heizbetrieb getrennt betrachtet werden. Es können auch Prozesse kategorisiert werden, bei denen der Verdichter abgeschaltet ist (Standby-Stromverbrauchsanalyse, Heizstabeinsätze, etc.) [3]. Eine solche zeitliche Differenzierung wird für die Berechnung aussagekräftiger Kennzahlen immer wichtiger. Ein weiterer Vorteil hochauflösender Daten ist die Möglichkeit, zwischen dem Heiz- und Kühlbetrieb einer Wärmepumpe zu unterscheiden. Dies ist insbesondere für SWWP-Anlagen interessant, welche im Free-Cooling die überschüssige Wärme direkt in das Erdreich abgeben können.

Thermische und elektrische Energiekennzahlen werden als numerische Integration mehrerer Leistungssensoren mit einem Abtastintervall von 100 ms gemessen, was die Erfassung schneller Änderungen im System möglich macht. Die Werte werden dann alle 10 s abgespeichert, was zu einer Mittelwertbildung von 100 Datenpunkten und einem kleinen, nicht vermeidbaren Diskretisierungsfehler führt. Dies kann zu Problemen führen, wenn sich eine Messgröße abrupt ändert. Es hat sich jedoch gezeigt, dass für die Mehrzahl der Messreihen ein Aufzeichnungsintervall von 30 s bereits ausreichend wäre, da thermodynamische Systeme eine gewisse Trägheit haben und sich daher relativ langsam ändern.

Die thermischen Leistungswerte werden nach der allgemein bekannten Methodik aus den effektiven Messgrößen Durchfluss und Temperaturdifferenz gebildet. Dabei wird der Massenstrom mithilfe eines Volumenstromsensors und einer Temperaturmessung über Volumen und Dichte bestimmt ( $\rho_w = f(T)$ ). Die Wärmeleistung wird dann wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{h,i} = \dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot \Delta T = \dot{V}_{w,s} \cdot \rho_w(T_{\text{rücklauf}}) \cdot c_{p,w}(T_{\text{rücklauf}}) (T_{\text{vorlauf}} - T_{\text{rücklauf}}) \quad (8)$$

In Bild 1 ist die Temperaturmessung mit zwei im Medium eingetauchten PT-100 Sensoren sowie die Volumenstrommessung mittels Ultraschallverfahren abgebildet.

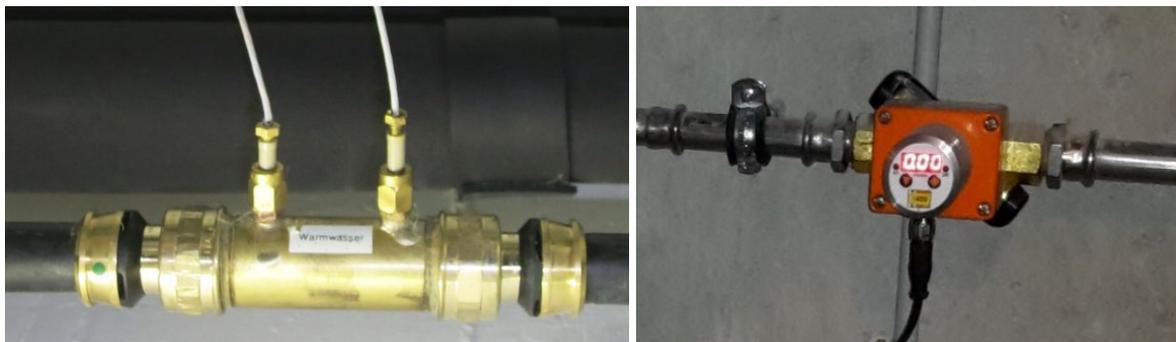


Bild 1 Links: Zweifach redundante Temperaturmessung im Medium. Rechts: Durchflussmessgerät

Auf jeder Anlage wird ein separater Schaltschrank mit einer SPS und diversen Messkarten für die Temperaturen, Volumenströme und Stromwandler für die Leistungsmessung verbaut.

Der Volumenstrom wird im Rücklauf gemessen. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf wird mit zwei separaten Temperaturmessungen ermittelt. Gleichung (8) zeigt, dass die Temperaturmessungen mehrfach in die Berechnung einbezogen werden, daher hat der Messfehler der Temperaturen einen starken Einfluss auf die Gesamtmessunsicherheit der Wärmeleistung und damit auf verschiedene Leistungsfaktoren. Deshalb müssen die Temperaturmessungen möglichst

exakt sein. Ziel ist eine Gesamtunsicherheit der Zielwerte von  $<10\%$ . Um dieses Ziel zuverlässig zu erreichen, muss eine Messunsicherheit bei der Temperaturmessung von  $\pm 0.1\text{ K}$  (absolut) und  $\pm 0.02\text{ K}$  (relativ) eingehalten werden [3]. Kalibrierte PT-100-Sensoren in Vierleitertechnik werden in die Strömung eingetaucht und sind daher thermisch entkoppelt. Aus Redundanzgründen werden wichtige Temperaturpunkte doppelt gemessen. Die grundsätzliche Anordnung der wichtigsten Sensoren im System ist in Bild 2 zu sehen. Selbstverständlich kann die tatsächliche Positionierung je nach Art der WP-Anlage oder des Gebäudes leicht unterschiedlich sein [3]. Die Anzahl von bis zu 30 Messsensoren je Anlage verdeutlicht nochmals die Grösse und Komplexität jedes einzelnen Feldmessobjektes. Mit dem erwähnten Speicherintervall von 10 s ergeben sich ca. 100 Mio. Messdatenpunkte und inkl. der Berechnungen werden ca. 400 MB an Daten pro Jahr und Anlage generiert.

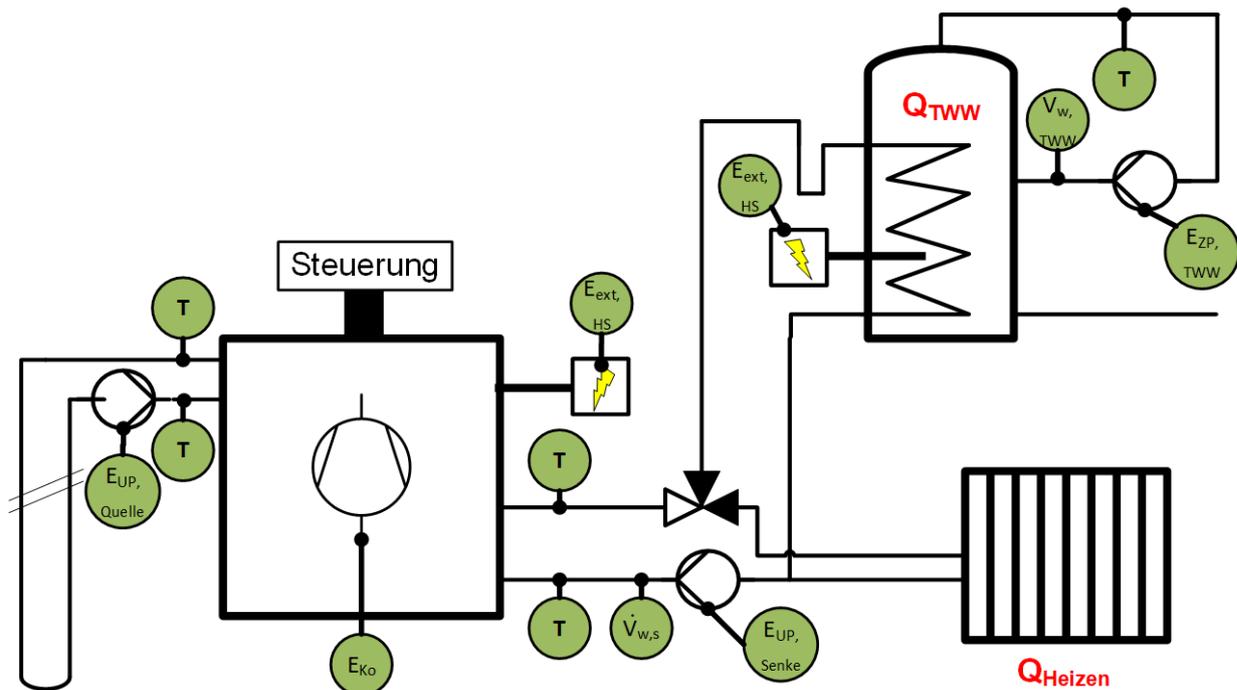


Bild 2 Übersichts-Schema Platzierung der wichtigsten Sensoren

Die Datenerfassung erfolgt vor Ort durch eine SPS, die auch einen Fernzugriff über WLAN, LAN oder GSM ermöglicht. Nach der Messung werden die Daten automatisch ausgelesen und täglich auf einem Server in der Schweiz zur Weiterverarbeitung gespeichert. Die Speicherstruktur umfasst 5 verschiedene Datenbanken und ist relational. Das heisst, jede Information wird nur einmal in einer der fünf Datenbanken gespeichert. Dies macht es sehr einfach, die Daten aktuell und konsistent zu halten [3]. Aus Datenschutzgründen erfolgt die Verknüpfung mit den Personendaten über speziell generierte ID's, wobei die Personendaten in separaten Datenbanken gespeichert werden. Das Datenbanksystem ist auch für die Auswertung von externen Messdaten ausgelegt.

## 2.2 Ablauf

Wie erwähnt, werden jedes Jahr etwa fünf neu installierte Wärmepumpenanlagen in die laufende Feldstudie aufgenommen. Arpagaus et al. [5] erläutert den Ablauf eines kompletten Mess- und Auswertezyklus für eine Neuinstallation einer Anlage wie folgt:

1. Bewerbung eines Kunden (der eine Wärmepumpenanlage privat installieren möchte und an einer Feldmessung interessiert ist).

2. Kalibrierung des Feldmesssystems an der Wärmepumpe, welche im WPZ in Buchs unter Laborbedingungen in Betrieb genommen und mit kalibrierten Messsystemen ausgemessen wird. Hierbei erfolgt auch der Abgleich des Feldmesssystems.
3. Vergleich der Labormessungen mit den Herstellerangaben (Datenblatt).
4. Installation der Wärmepumpenanlage und des Feldmesssystems vor Ort
5. Inbetriebnahme der Wärmepumpenanlage in Anwesenheit eines Mitarbeiters des WPZ.
6. Laufende, automatisierte Messung der Wärmepumpenanlage.
7. Vergleich und Analyse der gemessenen Daten mit Labor- und Feldmessdaten.
8. Analyse und Abschätzung des Optimierungspotentials nach zwei Jahren Messdauer
9. Umsetzung der vorgeschlagenen Optimierungsmassnahmen in Abstimmung mit dem Kunden.
10. Kontrollmessung zur Validierung der Optimierungsmassnahmen des Wärmepumpensystems.
11. Feldmessgeräte bleiben beim Kunden vor Ort und die Datenaufzeichnung wird fortgesetzt.

Unzulässige Defekte und Schwächen der Wärmepumpe selber werden in der Regel während den Labormessungen festgestellt, wobei ein Eingriff von Seiten des WPZ nur bei gravierenden Mängeln erfolgt. Es ist zu beachten, dass die Installation der Wärmepumpenanlage sowie deren Inbetriebnahme und Übergabe an den Kunden in der Verantwortung des Planungsbüros bzw. des Heizungsinstallateurs liegt. Die Mitarbeiter des WPZ koordinieren lediglich die Installation der notwendigen Sensoren und der Datenerfassung. Mögliche Fehler oder Mängel der WP-Anlagen, bei der Installation oder Inbetriebnahme, können mit Hilfe der Messdaten während der Auswertephase erkannt werden. Dem Kunden werden daraufhin geeignete Verbesserungsmassnahmen oder Optimierungen vorgeschlagen.

### 3. Resultate

#### 3.1 Kennzahlen und Systemgrenzen

Leistungskennzahlen wie der COP oder die JAZ aus Wärmepumpen-Feldversuchen sind nur unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Systemgrenzen aussagekräftig und vergleichbar. Es muss klar definiert werden, welche Energieparameter berücksichtigt werden und wie lang der Beobachtungszeitraum ist. EnergieSchweiz legt eigene Richtlinien für Kennzahlen und Systemgrenzen fest. Diese werden vom WPZ verwendet und sind in Bezug auf die Energiekennzahlen wie folgt definiert [3]:

$$JAZ = \frac{Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}}{E_{\text{tot}} - E_{\text{UP, Senke}} - E_{\text{ext, HS}}} \quad (1) \qquad WNG = \frac{Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}}{E_{\text{tot}}} \quad (2)$$

$$SNG_{TWW} = \frac{Q_{TWW}}{E_{\text{Aufladung}}} \quad (3) \qquad QH_{HWB} = \frac{Q_{\text{Heizen}}}{EBF} \quad (4)$$

$$GWB = \frac{Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}}{EBF} \quad (5) \qquad TWWB = \frac{Q_{\text{Aufladung}}}{EBF} \quad (6)$$

$$\eta_{TWW} = \frac{Q_{TWW}}{Q_{\text{Aufladung}}} \quad (7)$$

Die Jahresarbeitszahl JAZ bestimmt hauptsächlich die Effizienz der Wärmepumpe. Nur die elektrische Energie des Verdichters, des Ventilators (LWWP), der Quellenpumpe (SWWP) und der Steuerelektronik der Wärmepumpe werden in dieser Kennzahl berücksichtigt. Der

Wärmenutzungsgrad WNG umfasst zudem auch die elektrischen Energien der Wärmesenken-Umwälzpumpe und aller Zusatzheizelemente. Damit wird die Effizienz der kompletten Heizungsintegration dargestellt und mit anderen Heizsystemen vergleichbar gemacht. Der dritte Parameter, der  $SNG_{TWW}$  (Systemwirkungsgrad der Warmwassernutzung), zeigt die Warmwassereffizienz in Bezug auf die Nutzung, einschliesslich aller Speicher- und Verteilungsverluste. Darüber hinaus kann diese Kennzahl auch zur Beurteilung von BWWP verwendet werden. Der Index «Aufladung» bezieht sich dabei immer auf die Warmwasserbereitung.

Bild 3 zeigt die entsprechenden Systemgrenzen [3]. Es ist zu erkennen, dass die SEPEMO (SEasonal PERformance factor and MONitoring) -Systemgrenzen  $SPF_{H1}$  und  $SPF_{H2}$  mit dem COP respektive der JAZ gemäss EnergieSchweiz übereinstimmen. Diese harmonisierten Systemgrenzen wurden innerhalb des SEPEMO Projekts 2011 [6] eingeführt und von vielen europäischen Feldmessstudien verwendet [7]. Der  $SPF_{H3}$  beinhaltet jedoch nicht wie der WNG die Umwälzpumpe und die Zusatzheizung des Warmwasserspeichers [8]. Im Gegensatz zur äusseren Grenze  $SNG_{TWW}$  umfasst der  $SPF_{H4}$  das gesamte WP-System mit Warmwasser- und Heizungspeicher und ist deshalb im untenstehenden Schema nicht enthalten.

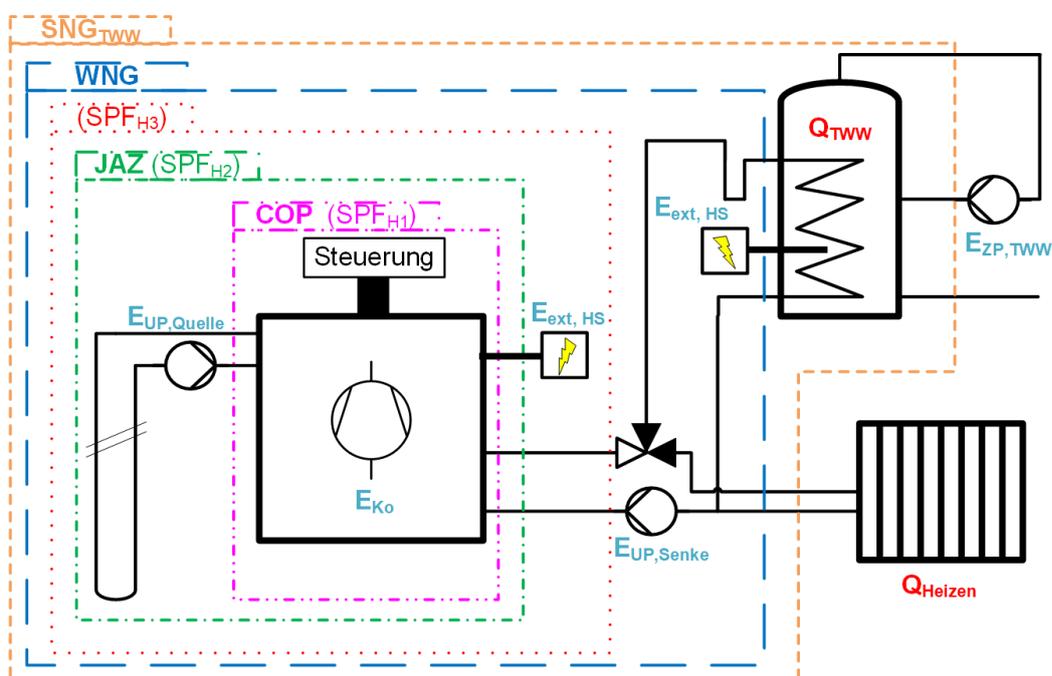


Bild 3 Schema Systemgrenzen

Die Warmwassernutzung wird über den Warmwasserwärmebedarf TWWB pro Gebäude eingestuft. Der Einfluss des Gebäudes selbst bzw. um das Nutzerverhalten und die Gebäudelage zu beurteilen, werden die Kennwerte  $QH_{HWB}$  und  $GWB$  ermittelt und dargestellt. Da jedoch für keines der untersuchten Objekte die Innenraumtemperatur erfasst wird, ist die Ermittlung der Nutzereinflüsse begrenzt.

### 3.2 Überblick Ergebnisse der Feldmessungen 2017-2019

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse umfassen Messungen, die in der Heizperiode 2017/18 bzw. 2018/19 (zwei Jahre) durchgeführt wurden [4] [3]. Insgesamt wurden im Rahmen der aktuellen Studie 13 Wärmepumpen in Einfamilienhäusern analysiert und verglichen, von denen 7 Luft/Wasser-Wärmepumpen (LWWP) und 6 Sole/Wasser-Wärmepumpen (SWWP) mit vertikalen Bohrungen sind. Insgesamt werden 9 von 13 Wärmepumpen mit drehzahlvariablen Verdichtern betrieben. Alle untersuchten Anlagen entsprechen Standardinstallationen, die noch nicht auf der Grundlage dieser Feldstudien optimiert wurden.

Bild 4 zeigt den Zusammenhang zwischen der Jahresarbeitszahl (JAZ) und verschiedenen Auslegetemperaturen [3]. Die Daten werden in Abhängigkeit von der an der Wärmepumpe voreingestellten Heizkurve angezeigt. Es ist zu erkennen, dass SWWP in Neubauten

(Vorlauftemperatur von unter 35 °C im Auslegungspunkt) im reinen Heizbetrieb eine JAZ von mehr als 6 erreichen. In Kombination mit der Warmwasserbereitung (Aufladung) sinkt die JAZ auf ca. 5.2. Dagegen erreichen LWWP eine JAZ von ca. 4.0 beim Heizen und 3.7 für Heizen und Warmwassererzeugung. Erwartungsgemäss sinkt der Wirkungsgrad mit höheren Vorlauftemperaturen. Insbesondere sanierte Gebäude benötigen aufgrund ihrer Radiatorheizungen höhere Vorlauftemperaturen. Mit einer JAZ von über 4.0 sind SWWP-Systeme jedoch immer noch sehr gut für sanierte Gebäude mit erhöhter Vorlauftemperatur geeignet. Selbst im Vergleich zu modernen drehzahlvariablen LWWP weisen SWWP noch einen deutlichen Effizienzvorteil von ca. 30 % auf.

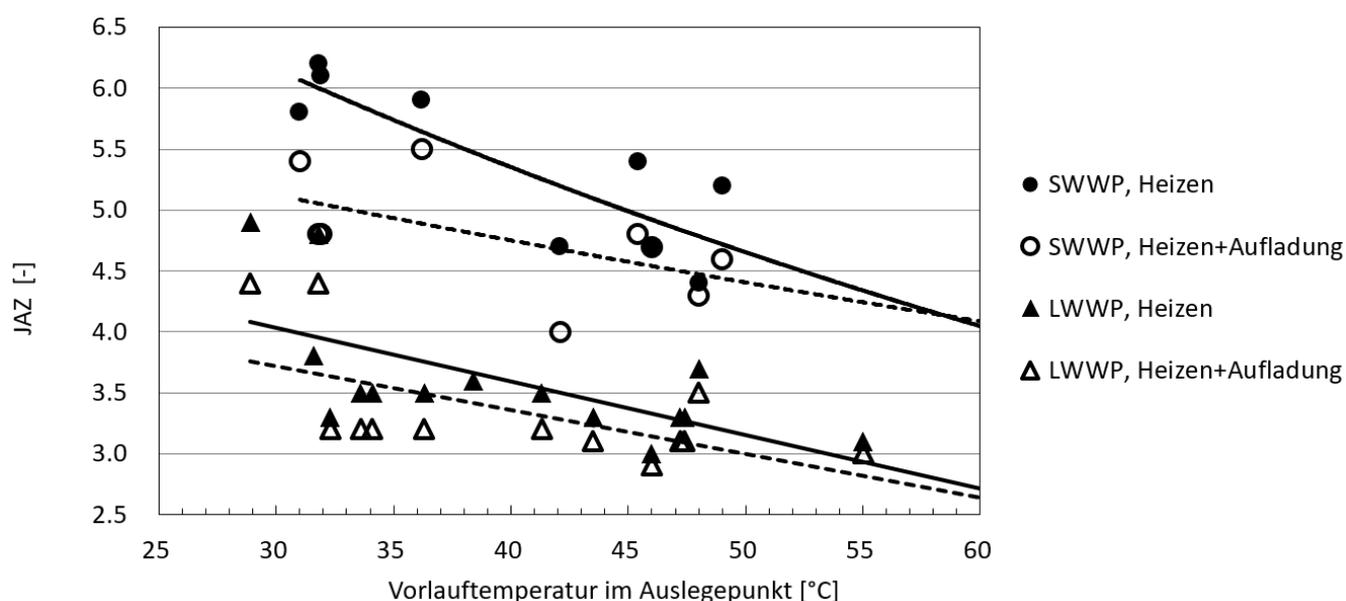


Bild 4 Jahresarbeitszahl versus Vorlauftemperatur im Auslegungspunkt

Eine Zusammenfassung der gemessenen Jahresarbeitszahlen (JAZ) von LWWP und SWWP je nach Gebäudeart ist in Tabelle 1 dargestellt [3]:

Vorlauftemperatur Auslegungspunkt	im	35 bis 30°C (Neubau)	45 bis 40°C (Sanierung)	55 bis 50°C (Altbau)
Heizen LWWP		3.7	3.3	2.9
Heizen SWWP		5.7	5.0	4.4
Heizen + Aufladung LWWP		3.5	3.1	2.8
Heizen + Aufladung SWWP		4.9	4.6	4.3

Tabelle 1: Jahresarbeitszahlen nach Gebäudeart

Wie bereits erwähnt, ist es in der Praxis unerlässlich beim Abgleich von Systemen vergleichbare Systemgrenzen zu verwenden. Insbesondere bei der Warmwasserbereitung (Aufladung) lassen sich erhebliche Unterschiede zwischen der Effizienz der Wärmeerzeugung und der tatsächlich genutzten Wärme feststellen. Dies ist zum Teil durch den Einsatz von elektrischen Heizelementen (z.B. Legionellenprogramm), vor allem aber durch Verteilverluste mittels Zirkulation und Speicherverlusten bedingt. In Bild 5 ist der Vergleich der mittleren Jahresarbeitszahl (JAZ), des Wärmenutzungsgrads (WNG) für die Warmwasserbereitung (Aufladung) sowie des Systemnutzungsgrads (SNGTWW) zusammenfassend für alle gemessene SWWP- und LWWP-Anlagen zu sehen [3].

Der Wirkungsgrad der Warmwasserbereitung ist aufgrund der höheren Senktemperaturen 17.5 % bis 19 % niedriger als der Gesamtwirkungsgrad für Heizung und Warmwasserbereitung. Für SWWP ist dieser Unterschied aufgrund der niedrigeren Quelltemperaturen im Vergleich zu LWWP im Sommer viel größer (28 % bis 35 %) [3].

Bemerkenswert ist auch, dass der «WNG» um 0.2 oder 0.3 Punkte niedriger ist als die JAZ (ausser bei der Aufladung der SWWP mit 0.5). Dies ist hauptsächlich auf die elektrischen Heizelemente (Legionellenprogramm) und die Senkenpumpe der WP zurückzuführen.

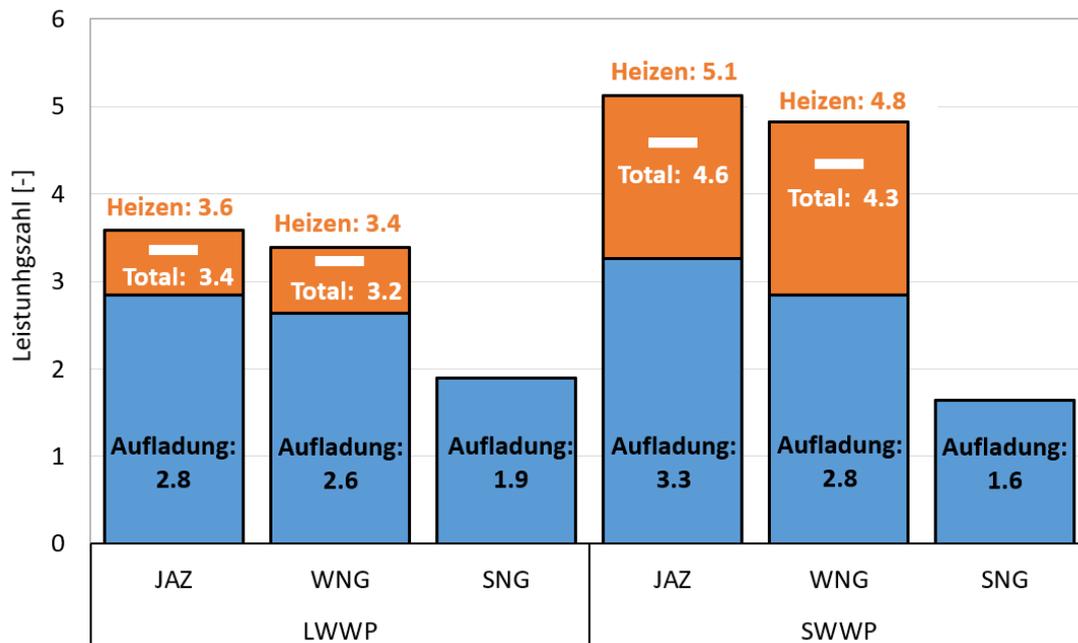


Bild 5 Diagramm Übersicht Leistungszahlen

Bei keiner der im Untersuchungszeitraum analysierten Wärmepumpen musste ein elektrisches Heizelement zur Unterstützung des Heizsystems eingesetzt werden. Dies gilt auch für die Kälteperioden Ende Februar/Anfang März 2018, in denen die durchschnittlichen Aussentemperaturen zwischen -6 bis -9 °C und damit bis zu 2 K unter der Auslegungstemperatur lagen [3]. Bei einzelnen (nicht modulierenden) Anlagen war der Verdichter dabei bis zu 24 h in Betrieb, wovon 20 h auf den Heizbetrieb entfielen, wobei der Abtauanteil (mit Verdichter) lediglich ca. 3 % betrug.

Der Systemnutzungsgrad ( $SNG_{T_{WW}}$ ) wird nur für die Warmwasserbereitung bestimmt und ist deutlich niedriger als der WNG. Dies wird vor allem durch Speicherverluste, insbesondere bei Gebäuden mit geringem Warmwasserbedarf, verursacht. Bei Einfamilienhäusern leidet die Gesamteffizienz des Systems insbesondere dann, wenn eine Warmwasserzirkulation zur Erwärmung der Verteilungsleitungen eingesetzt wird. Eine Warmwasserzirkulation ist aus energetischer Sicht daher nicht zu empfehlen.

### 3.3 Warmwasserbereitung, Nebenaggregate und Optimierungen

Die Warmwasserbereitung bekommt durch die stetige Verbesserung der Bausubstanz (Dämmung) ein immer grösseres Gewicht gegenüber dem Heizbetrieb einer WP-Anlage. Daher werden ihre Teilaspekte (auch in Bezug auf die Kennzahlen) im Folgenden genauer erläutert.

Einerseits wird das Brauchwasser durch die Wärmepumpe erwärmt. Das Verhältnis dieser Wärmemenge zur benötigten elektrischen Energie für Verdichter und Umwälzpumpen wird als Jahresarbeitszahl JAZ bezeichnet. Da einige Wärmepumpen Temperaturen von 60 °C nur knapp erreichen können, wird in vielen Fällen zur Durchführung des Legionellenprogramms ein elektrischer Heizstab eingesetzt. Dieser zusätzliche elektrische Energieaufwand ist im Wärmenutzungsgrad WNG enthalten, der somit tiefer als die JAZ liegt.

Schlussendlich kann aber auch die Wärmeenergie des bezogenen Warmwassers ins Verhältnis zum gesamten Strombedarf gestellt werden. Daraus berechnet sich der Systemnutzungsgrad  $SNG_{TWW}$ . In dieser Kennzahl ist somit neben dem Einfluss von Wärmepumpe und Heizstab auch die Güte des Speichers und einer eventuellen Warmwasserzirkulation enthalten. Bild 6 zeigt diese drei Kenngrößen für mehrere Wärmepumpen Anlagen in Einfamilienhäusern [3]. Es ist zu erkennen, dass die JAZ bei Luft/Wasser-Wärmepumpen für die Warmwasserbereitung bei knapp 3.0 liegt. Die Aufwände für den elektrischen Heizstab sind meistens klein und führen zu einem Wärmenutzungsgrad der um ca. 0.2 unter der Jahresarbeitszahl liegt. Bei Sole/Wasser - Wärmepumpen wird im Schnitt eine höhere Jahresarbeitszahl von 3.5 erreicht. Der Wärmenutzungsgrad ist jedoch auf demselben Niveau wie bei Luft/Wasser-Wärmepumpen. Der Grund dafür liegt vor allem im häufigeren Einsatz des Heizstabes für die Legionellenschaltung.

Der Systemnutzungsgrad liegt sowohl bei Luft/Wasser- als auch bei Sole/Wasser-Wärmepumpen signifikant tiefer. Hierfür gibt es verschiedene Gründe.

Typ	Anlage	Eigenschaften	JAZ	WNG	$SNG_{TWW}$	Vol. [ $m^3$ ]	Temp [ $^{\circ}C$ ]	Heizstab
SWWP	D	S, d, Zirk	4.38	4.06	0.25	5	38	5%
	I	S, d	3.39	2.84	1.78	26	48	22%
	F	S, fix	3.24	2.63	1.58	39	55	25%
	B	N, d, Zirk	3.07	2.90	1.59	62	46	2%
LWWP	K	S, d, FWS	3.43	3.32	2.17	39	40	0%
	C	S, d	2.99	2.93	2.32	79	55	0%
	E	N, fix	2.82	2.70	2.13	66	49	16%
	A	N, fix	2.81	2.77	2.42	94	49	0%
	M	S, d	2.68	2.00	1.33	27	49	48%
	L	S, d	2.67	2.52	1.36	54	49	8%
	H	S, fix	2.52	2.22	1.53	45	50	19%
BWWP	J	S, Aussenluft	nicht messbar		1.25	50	56	74%
	G	S, Keller	nicht messbar		2.28	44	51	0%

Bild 6 Periode 09/2018-08/2019 Effizienzwerte für die Warmwasserbereitung (S = Sanierung, N = Neubau, fix = on/off Verdichter, d = drehzahlregulierter Verdichter, Zirk = Zirkulationsleitung, FWS = Frischwasserstation, Vol. = Bezogene Warmwassermenge in der Periode, Temp.= Gemittelte Vorlauftemperatur während des Bezugs, Heizstab = Anteil des Heizstabs am Gesamtstrombezug für die Warmwassererzeugung)

Die SWWP-Anlage D in der obersten, grün markierten Zeile von Bild 6 zeigt beispielsweise gut, wie sich eine Warmwasserzirkulation auf den Systemnutzungsgrad auswirken kann. Durch das permanente Umwälzen von Warmwasser kühlt sich der Speicher rasch ab und reduziert die Effizienz der Anlage signifikant ( $SNG_{TWW}$  deutlich unter 1, obwohl der WNG grösser 4 und der Heizstabanteil klein ist) [3]. Wie angemerkt, ist eine Zirkulation des Warmwassers wenn immer möglich zu vermeiden. Dies kann zum Beispiel durch kurze Ausstossleitungen erreicht werden.

Weiter kann sich auch eine geringe Warmwasserbezugsmenge negativ auf den  $SNG_{TWW}$  auswirken, was ebenfalls bei der Anlage D beobachtet werden kann ( $Vol. \approx 5 m^3$ ). Dabei ist die bezogene Wärmemenge im Verhältnis zu den Wärmeverlusten des Speichers klein. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei der LWWP-Anlage M mit einem Warmwasserbezug ( $Vol. \approx 27 m^3$ ) [3]. Deshalb ist eine Beurteilung nur mit dem Systemnutzungsgrad mit Vorsicht zu betrachten, wenn die bezogene Warmwassermenge massiv unter der Auslegeleistung liegt.

Bei den letzten beiden Anlagen (J, G) in Bild 6 handelt es sich um Wärmepumpenboiler-Anlagen (BWWP), bei denen systemintern keine Wärmeströme gemessen werden können. Daher ist auch nur der Systemnutzungsgrad angegeben. Beim BWWP J mit direkter Aussenluftansaugung kam es zu einem Verdichterschaden, sodass die Anlage lange Zeit nur mit dem elektrischen Heizstab betrieben worden ist. Bei der Anlage G handelt es sich um eine kelleraufgestellte Version. Aufgrund

der warmen Kellerlufttemperatur als Quelle resultiert ein hoher Systemnutzungsgrad. Sehr positiv wirkt sich bei BWWP generell die kleine Leistung bei der Aufladung aus, die zu geringen Temperaturdifferenzen im System führt.

### 3.4 Energiebedarf im Jahresüberblick

Optimierungsmaßnahmen können nebst der täglichen Betrachtung auch aus dem Jahresverlauf bzw. dem Verlauf der Heizsaison abgeleitet werden. Bild 7 zeigt die aufgewendeten thermischen Energien (Wärme) zum Heizen und zur Warmwasserbereitung eines Sanierungsobjekts (Haushalt mit ca. 6 Personen) aus dem Jahr 2017. Da es sich um eine LWWP handelt ist der Einfluss der Aussentemperatur auf die Effizienz (JAZ) gut erkennbar. Auffallend ist der hohe Heizenergieanteil im Vergleich zur Warmwasserbereitung, weshalb klar ist, dass sich eine Optimierung letzterer kaum lohnt. Dagegen ist auch deutlich erkennbar, dass in den Sommermonaten Juni-August geheizt wurde. Hier konnte dank einer Anpassung der Heizkurve und der Heizgrenze mit wenig Aufwand eine Senkung der Vorlauftemperatur um über 10 K erreicht werden. Dies führte zu einer Steigerung der JAZ=2.7 (2017) auf JAZ =3.4 im folgenden Jahr (2018) [3], also um 25%, worin die klimatischen Einflüsse mitberücksichtigt sind (milderer Winter).

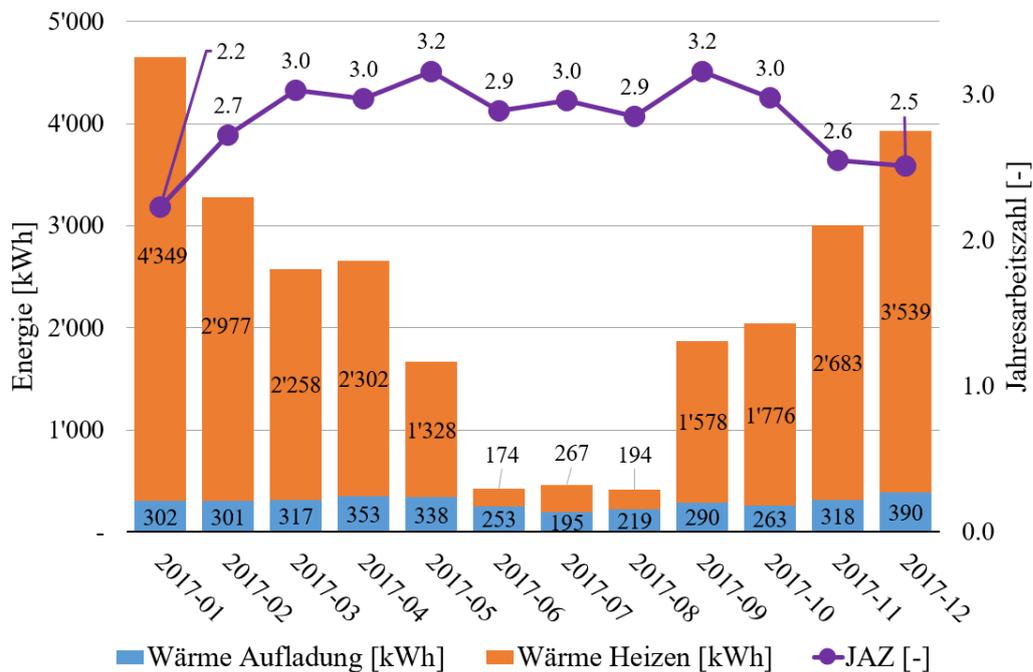


Bild 7 Jahresverlauf der thermische Energien und der JAZ einer Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage

Die Darstellung des gewichteten Heizenergieanteils nach mittlerer Tagesaussentemperatur zeigt Bild 8. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass der grösste Heizenergiebedarf bei eher milden Wintertagen zwischen 2 und 8 °C auftritt. Zusätzlich ist die Effizienz der Luft/Wasser-Wärmepumpe als JAZ und die gelieferte Vorlauftemperatur für eine Radiatorenheizung abgebildet.

Um bei kalter Witterung die Wohntemperatur zu gewährleisten, muss die Vorlauftemperatur für die Radiatoren kontinuierlich mit kälterer Aussentemperatur erhöht werden. Dies kann man deutlich an dieser gemessenen orangen Kurve, welche auch als Heizkurve bezeichnet wird, erkennen.

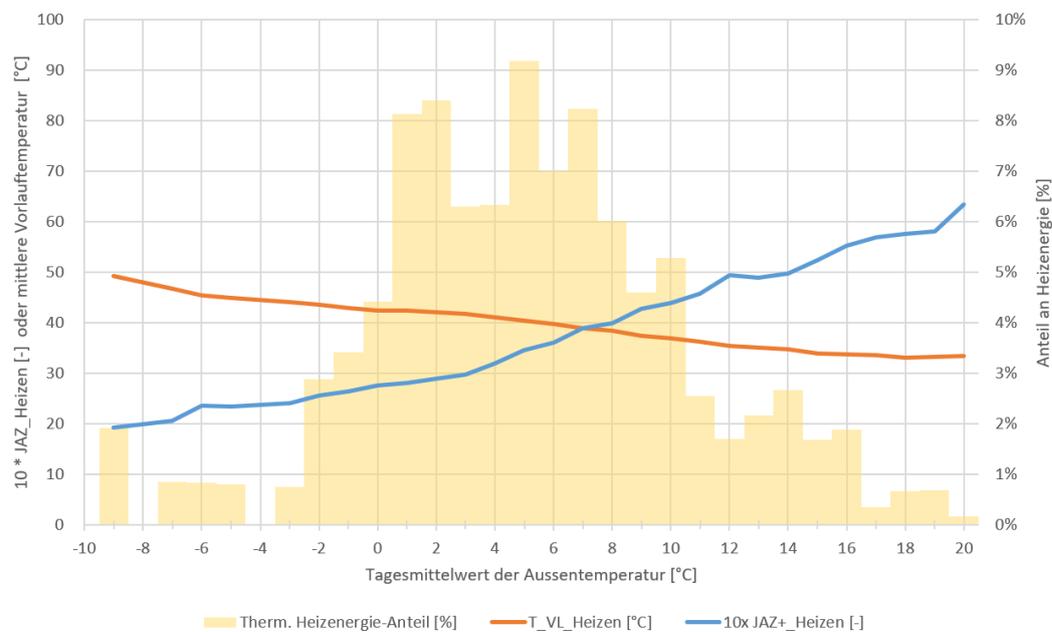


Bild 8 Gewichteter thermischer Heizenergieanteil, zugehörige Vorlauftemperatur und JAZ nach mittlerer Tagesaussentemperatur

Betrachtet man nun aber die die Effizienz einer LWWP, so nimmt diese mit der Aussentemperatur an kalten Wintertagen rapide ab. Aufgrund der Energiemengenverteilung ist es jedoch wichtig, dass die Anlage vor allem an milden Wintertagen effizient läuft, da hier die meiste Energie benötigt wird. Die gemessene Jahresarbeitszahl dieser Anlage beträgt für den Heizbetrieb 3.3. Eine verminderte Effizienz oder möglicher kurzer Einsatz eines Heizstabes zur Nachheizung bei extremer Kälte ist in der Jahresbilanz unbedeutend. Ein elektrisches Zuheizen mittels Heizstab aufgrund ungenügender Leistung konnte im gesamten Verlauf der Feldmessung noch bei keiner Anlage festgestellt werden.

#### 4. Diskussion

Die sorgfältige Definition von Kennzahlen und insbesondere deren Systemgrenzen sind Grundvoraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse von Feldmessstudien, wie sie zurzeit am Wärmepumpen-Testzentrum WPZ in Buchs durchgeführt werden.

Durch die Aufzeichnung von Leistungswerten anstelle von Energiewerten sind detaillierte Analysen von zeitlichen Abläufen möglich. Dies erfordert kurze Abtastintervalle (<30 s), um dynamische Prozesse adäquat abzubilden.

Der Messung der Temperatur wird wegen ihres starken Einflusses auf die Gesamtunsicherheit grosse Bedeutung beigemessen. Daher werden die Vor- und Rücklauftemperaturen mit einer Unsicherheit von  $\pm 0.1\text{K}$  /  $\pm 0,02\text{K}$  (absolut/relativ) mit PT-100-Sensoren in Vierleitertechnik gemessen. Zusammen mit der vorherigen Kalibrierung der gesamten Feldmesseinrichtung im Labor wird eine Gesamtunsicherheit der Zielwerte (z.B. COP, JAZ) von <10 % erreicht. Natürlich erfordern diese Messgenauigkeiten eine entsprechend komplexe Messeinrichtung.

Die aktuelle Studie, die inzwischen über 20 Wärmepumpen-Anlagen im Feld umfasst, zeigt deutlich die starke Abhängigkeit der Jahresarbeitszahl (JAZ) von der Vorlauftemperatur und der gewählten Wärmequelle. Daher erreichen Luft/Wasser-Wärmepumpen in Neubauten eine durchschnittliche JAZ von 3.7 im Heizbetrieb mit Fussbodenheizung (35 °C), während Sole/Wasser-Wärmepumpen auf eine JAZ von durchschnittlich 5.7 kommen. Bei höheren Vorlauftemperaturen wie etwa 50 °C in Altbauten werden durchschnittliche JAZ-Werte von etwa 2.9 für LWWP und 4.4 für SWWP gemessen.

Kombinierte Systeme für Heizen und Warmwasserbereitung weisen aufgrund der erhöhten Vorlauftemperaturen um 3 bis 9 % niedrigere Gesamtleistungszahlen (z.B. JAZ) auf.

Weiter sind bei der Warmwasserbereitung vor allem die Warmwasserzirkulation und ein sehr tiefer Warmwasserbezugswert als mindernde Faktoren auf den Systemnutzungsgrad zu nennen.

Nach einem Untersuchungszeitraum von mehr als einer Heizperiode wurden verschiedene Optimierungspotenziale identifiziert, wie z.B. intelligente Heizkurven oder das Legionellenprogramm mit Ansteuerung durch die Wärmepumpe. Durch Anpassung der Heizkurve mittels einfacher Einstellungen am Regler konnte die Jahresarbeitszahl teilweise um 10-20 % gesteigert werden. Typische Optimierungsmassnahmen sind:

- Anpassung der Heizkurve und der Heizgrenze
- Ladezeit der Warmwasserbereitung am Mittag bei Luft/Wasser-Wärmepumpen
- Vorwärmung des Warmwassers mit dem Verdichter (vor Legionellenprogramm)
- Verbesserte Effizienz durch reduzierte Leistung des Verdichters (drehzahlvariabel) bei der Warmwasserbereitung

Im Bereich von sanierten Gebäuden werden vor allem Sole/Wasser-Wärmepumpen empfohlen. Die aktuelle Feldstudie zeigt, dass die untersuchten Wärmepumpen insgesamt gut funktionieren und eine zuvor bestehende, fossil betriebene Heizungsanlage effizient ersetzen können. Dennoch gibt es weiteres Verbesserungspotential, insbesondere bei der Warmwasserbereitung und der Reglereinstellung.

## **5. Ausblick**

Mit der laufenden Studie und einer zunehmenden Anzahl an Feldmessobjekten und Messsaisonen können noch weitere Detailanalysen wie z.B. die Warmwasserbereitung, das Temperaturverhalten der Erdsonden, die Leistungsmodulation von leistungsgeregelten Wärmepumpen, etc. untersucht werden. Seit 2020 werden nun auch kleinere Mehrfamilienhäuser in die Feldmessung mit aufgenommen. Dadurch soll auch analysiert werden, wie gut grössere Wärmepumpenanlagen funktionieren und welche Unterschiede sowie Herausforderungen gegenüber den bereits etablierten Kleinanlagen bestehen. Des Weiteren werden die aufgedeckten und umgesetzten Optimierungspotenziale in ihrer Wirkung betrachtet und bewertet. Die Erkenntnisse der umfangreichen Feldmessstudie werden laufend in weiteren Publikationen in Form von Jahresberichten oder auch Artikeln in Fachzeitschriften publiziert. Eine Auflistung ist unter [www.wpz.ch](http://www.wpz.ch) abrufbar.

## Nomenklatur

BFE	Bundesamt für Energie	
BWWP	Brauchwarmwasser-Wärmepumpe	
COP	Coefficient of performance (Leistungszahl)	[-]
$c_{p,w}$	Spezifische Wärmekapazität Wasser	[J/kg-K]
$E_{\text{Aufladung}}$	Elektrische Aufnahmeenergie im Aufladebetrieb	[kWh]
EBF	Energiebezugsfläche des Gebäudes	[m <sup>2</sup> ]
$E_{\text{ext,HS}}$	Elektrische Aufnahmeenergie externer Heizstäbe	[kWh]
$E_{\text{Ko}}$	Elektrische Aufnahmeenergie Verdichter	[kWh]
$E_{\text{tot}}$	Gesamte elektrische Aufnahmeenergie des WP-Systems	[kWh]
$E_{\text{TWW}}$	Elektrische Aufnahmeenergie des WP-Systems bei Aufladung	[kWh]
$E_{\text{UP,Quelle}}$	Elektrische Aufnahmeenergie Umwälzpumpe Quelle	[kWh]
$E_{\text{UP,Senke}}$	Elektrische Aufnahmeenergie Umwälzpumpe Senke	[kWh]
$E_{\text{ZP,TWW}}$	Elektrische Aufnahmeenergie Zirkulationspumpe TWW	[kWh]
FAWA	Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen (Feldmessungsstudie CH)	
FWS	Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz	
GSM	Global System for Mobile communications	
GWB	Gesamtwärmebedarf	[kWh/m <sup>2</sup> ]
GWWP	Grundwasser/Wasser Wärmepumpe	
$HGT_{20,12}$	Heizgradtage 20, 12 °C (Heizgrenze) für Neubauten	[°C]
$HGT_{20,16}$	Heizgradtage 20, 16 °C (Heizgrenze) für Sanierungen	[°C]
ID	Identifikator	
JAZ	Jahresarbeitszahl gemäss der Definition vom BFE	[-]
LAN/WLAN	Local Area Network/Wireless Local Area Network	
LWWP	Luft/Wasser Wärmepumpe	
$\dot{m}_w$	Massenstrom wasserseitig	[kg/s]
NTB	Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, SG	
$Q_{\text{Aufladung}}$	Wärmeenergie im Aufladebetrieb (Warmwasserbereitung)	[kWh]
$QH_{\text{HWB}}$	Heizwärmebedarf	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$Q_{\text{Heizen}}$	Wärmeenergie im Heizbetrieb	[kWh]
$Q_{\text{TWW}}$	Wärmeenergie der Warmwassernutzung	[kWh]
$\dot{Q}_{h,i}$	Thermische Energie, i	[kW <sub>th</sub> ]
SEPOMO	SEasonal PErformance factor and Monitoring	
$SNG_{\text{TWW}}$	Systemnutzungsgrad gemäss der Definition vom BFE	[-]
$SPF_{\text{H1-H4}}$	Seasonal performance factors nach SEPOMO Definition	[-]
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	
SWWP	Sole/Wasser Wärmepumpe	
$T_{\text{rücklauf}}$	Rücklauftemperatur	[°C]
$T_{\text{vorlauf}}$	Vorlauftemperatur	[°C]
TWW	Warmwasser	
$\dot{T}_{\text{WWB}}$	Warmwasser-Wärmebedarf	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$\dot{V}_w$	Volumenstrom Wasserseitig	[m <sup>3</sup> /s]
WNG	Wärmenutzungsgrad gemäss der Definition vom BFE	[-]
WP	Wärmepumpe	
WPZ	Wärmepumpen Test Zentrum in Buchs, SG	
$\eta_{\text{TWW}}$	Wirkungsgrad der Warmwassernutzung	[-]
$\rho_w(T)$	Dichte von Wasser (Temperaturabhängig)	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta T$	Temperatur-Differenz	[K]

## Literatur/Referenzen

- [1] Fachvereinigung Wärmepumpen FWS, «Statistik 2018,» FWS, Bern, 2019.
- [2] Fachvereinigung Wärmepumpen FWS, «Statistik 2017,» FWS, Bern, 2018.
- [3] M. Prinzing, M. Berthold und M. Eschmann, «Jahresbericht WP-Feldmessung 2018,» EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie Schweiz, Ittigen, Bern, 2019.
- [4] M. Erb, P. Hubacher und M. Ehrbar, «FAWA Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen,» BFE, Bundesamt für Energie, 2004.
- [5] C. Arpagaus, M. Berthold und M. Eschmann, «Jahresbericht WP-Feldmessung 2017,» EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie Schweiz, Ittigen, Bern, 2018.
- [6] “SEPEMO-Build”, SEPEMO, 31 May 2012. [Online]. Available: <http://sepemo.ehpa.org/>. [Accessed 30 September 2019].
- [7] C. P. Gleeson und R. Lowe, «Meta-analysis of European heat pump field trial efficiencies,» Elsevier, London, 2013.
- [8] R. Nordman, K. Andersson, M. Axell und M. Lindahl, «Calculation methods for SPF for heat pump systems for comparison, system choice and dimensioning,» Technical Research Institute of Sweden, Sweden, 2010.

## Danksagung

Die in diesem Bericht veröffentlichten Ergebnisse wurden in enger Zusammenarbeit mit EnergieSchweiz erzielt und finanziert. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen dieses Berichts sind allein die Autoren verantwortlich.