

WaRalph Kuster, Manuel Prinzing, Matthias Berthold, Mick Eschmann, Prof. Stefan Bertsch  
Institut für Energiesysteme, NTB Buchs

# Feldmessung von Wärmepumpen-Anlagen Ergebnisse Periode 2016-2019

## *Zusammenfassung:*

*Der vorliegende Bericht stellt Methodik, Technologie und die verwendeten Systemgrenzen der Wärmepumpen-Feldtests vor, wie sie derzeit vom Wärmepumpen-Testzentrum (WPZ) in Buchs durchgeführt werden. Ausserdem werden zusammenfassende Ergebnisse zu Jahresarbeitszahlen und weiteren Leistungskennziffern aus der aktuellen Studie präsentiert. Es wird auch vertieft auf das Thema Warmwasserbereitung und die Optimierung solcher Systeme eingegangen. Die seit 2016 laufende Studie umfasst mittlerweile über 20 Wärmepumpenanlagen zum Heizen und zur Warmwasserbereitung mehrheitlich verbaut in Einfamilienhäusern. Für jede Wärmepumpenanlage werden über 40 Datenpunkte in einem Zeitintervall von 100 ms mit kalibrierten Sensoren erfasst und einer sehr geringen Messunsicherheit alle 10 s aufgezeichnet. Das Ziel der Feldstudie ist es, die tatsächliche Effizienz der Systeme im Betrieb aufzuzeichnen und Vergleiche mit Labormessungen und Herstellerdaten zu ziehen. Weitere Ziele sind die Identifizierung von Optimierungspotentialen in der Planung und Installation sowie in der Handhabung der Wärmepumpenanlagen. Daraus sollen auch Richtlinien für Planer, Installateure und Anwender abgeleitet werden.*

## *Summary:*

*This report presents the methodology, technology and the system boundaries used for heat pump field tests, as currently carried out by the Heat Pump Test Center (WPZ) in Buchs. In addition, it presents summary results on annual performance factors and other performance indicators from the current study. The topic of hot water production and the optimization of such systems will also be dealt with in more detail.*

*The study, running since 2016, now comprises more than 20 heat pump systems for heating and hot water production, most of which are installed in Swiss single-family homes. For each heat pump system, more than 40 data points are recorded in a time interval of 10 s with calibrated sensors and a very low measurement uncertainty.*

*The aim of the field study is to record the actual efficiency of the systems in operation and to draw comparisons with laboratory measurements and manufacturer data. Further aims are the identification and optimization of possible deficiencies in the planning and installation as well as in the handling of the heat pump systems. Guidelines for planners, installers and users will also be derived from this.*

## Einleitung und Motivation

Der Einsatz von Wärmepumpen (WP) in Schweizer Haushalten für Heizung und Warmwasserbereitung ist auf dem Vormarsch. 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 empfindlich auf ihre Integration in das Heizungssystem und die Einstellungen des Wärmepumpenreglers reagiert. 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 über zwei Jahre gemessenen und ausgewerteten Daten Analysen durchzuführen. Anschliessend sollen durch Vergleiche Optimierungspotenziale der Systeme aufgezeigt werden, die dann umgesetzt werden können. Jährlich werden etwa fünf neue Wärmepumpen neu in die Messreihe aufgenommen.

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

- Untersuchung der realen Leistung von Wärmepumpensystemen im Feld.
- Identifikation von Optimierungspotentialen.
- Jährliche Erweiterung der Kampagne 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, die kürzlich über das Jahr 2020 hinaus verlängert wurde, umfasst derzeit über 20 Wärmepumpensysteme, welche sich hauptsächlich im deutschsprachigen Flachland der Schweiz befinden.

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

## Messtechnik, Datenerfassung und Methodik

Im Vergleich zu den ersten in der Schweiz durchgeführten Feldmessstudien wie z.B. die Feldanalysen von Wärmepumpenanlagen (FAWA) [4], aus den 1990er Jahren haben sich die Messmethodik und die Datenerfassungstechnologie erheblich verändert. Dank der Digitalisierung stehen heute viel mehr Daten zur Verfügung. Durch kurze Aufzeichnungsintervalle (10 s) können zeitliche Abläufe in Wärmepumpenanlagen detailliert beschrieben werden, wodurch Fehler wie Wärmeverluste und unerwünschte Zirkulation leichter erkannt werden können. Basierend auf den gesammelten Datenreihen ist es auch möglich, die folgenden Prozesse tiefer zu untersuchen, was früher mit manuellen Messungen (Handablesungen) nicht möglich war [3].

- Anlaufverhalten
- Abtauungen
- Taktverhalten
- 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 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 Heizwasserladung getrennt betrachtet werden. Es ist auch möglich, Prozesse zu kategorisieren, bei denen der Verdichter abgeschaltet ist (Standby-Stromverbrauchsanalyse) [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 abgegeben können. Aufgrund der globalen Erwärmung und der daraus resultierenden heißen Sommer wird die Nachfrage nach Wärmepumpensystemen mit Kühlfunktion in Zukunft auch in der Schweiz deutlich zunehmen.

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 aufgezeichnet, 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 dazu neigen, sich nur langsam zu verändern.

Die Leistungswerte selbst werden nach der allgemein bekannten Methodik aus den effektiven Messgrößen gebildet. Durch die Verwendung eines Volumenstromsensors und Temperaturmessungen wird der Massenstrom über die Dichte bestimmt, wobei  $\rho_w = f(T)$ . Die Wärmeleistung wird dann z.B. wie folgt berechnet:

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

Der Volumenstrom wird im Rücklauf gemessen. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf wird aus 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 sowie auf verschiedene Leistungsfaktoren. Aus diesem Grund wird einer möglichst genauen Temperaturmessung große Bedeutung beigemessen. Ziel ist eine Gesamtunsicherheit der Zielwerte von <10 %. Um dieses Ziel zuverlässig zu erreichen, muss eine Messunsicherheit der Temperaturmessung von  $\pm 0.1$  K (absolut) und  $\pm 0.02$  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 im *Bild 1* zu sehen. Selbstverständlich kann die tatsächliche Positionierung je nach Art der WP-Anlage oder des Gebäudes leicht unterschiedlich sein [3].

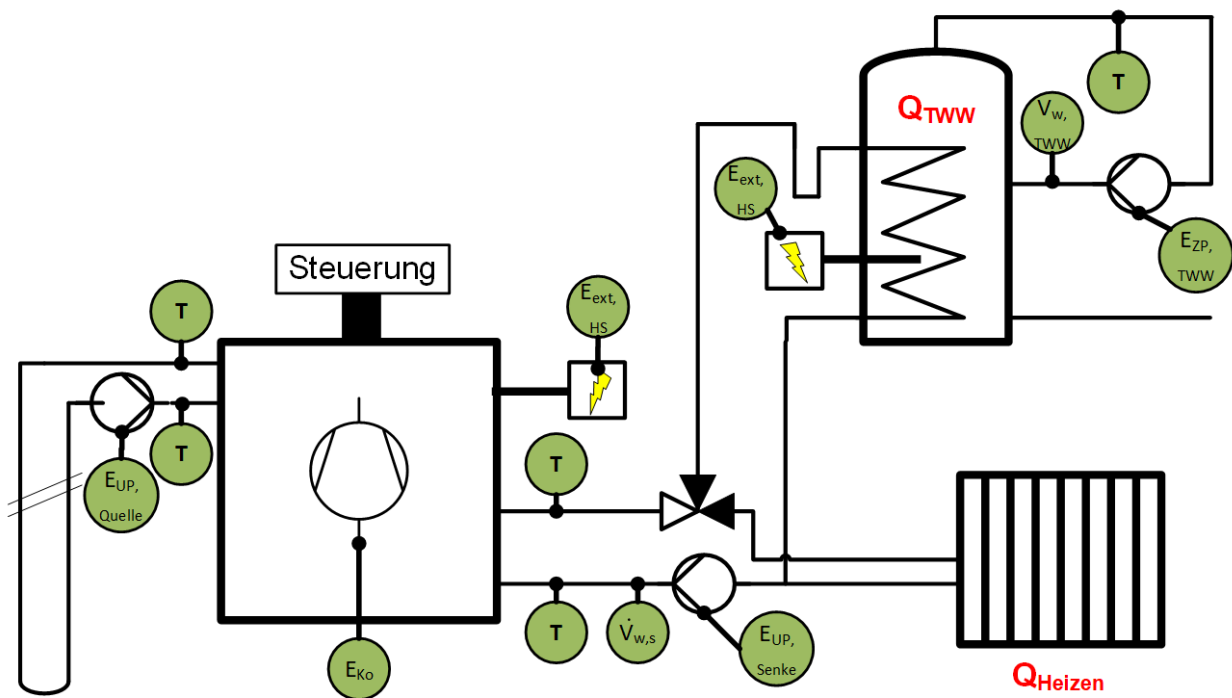


Bild 1: Übersichts-Schema Platzierung der wichtigsten Sensoren

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 und nicht im Klartext ersichtlich sind. Darüber hinaus ist das Datenbanksystem auch für die Auswertung von externen Messdaten ausgelegt.

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 der Wärmepumpe mit Feldmessgeräten im WPZ in Buchs unter Laborbedingungen.
3. Vergleich der Labormessungen mit den Herstellerangaben (Datenblatt).
4. Installation der Wärmepumpenanlage vor Ort, wobei auch die vorgesehene Feldmesseinrichtung installiert wird.
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 Feldtestdaten.
8. Empfehlungen zur Optimierung und Verbesserung nach zwei Jahren der Datenerfassung.
9. Umsetzung der vorgeschlagenen Optimierung in Abstimmung mit dem Kunden.
10. Kontrollmessung zur Erfassung der Verbesserungen des Wärmepumpensystems.
11. Feldmessgeräte bleiben beim Kunden vor Ort und die Datenaufzeichnung wird fortgesetzt.

Unzulässige Defekte und Schwächen der Wärmepumpe 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 die Installation oder Inbetriebnahme, können mit Hilfe der Messdaten während der Auswertephase erkannt werden. Dem Kunden werden geeignete Verbesserungsmaßnahmen oder Optimierungen vorgeschlagen, die dann, erneut unter der Verantwortung des WP-Installateurs durchgeführt werden können.

## Kennzahlen und Systemgrenzen

Leistungs-Kennzahlen wie der COP oder die JAZ aus Wärmepumpen-Feldversuchen sind nur unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Systemgrenzen aussagekräftig.

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]:

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

$$WNG = \frac{Q_{\text{Heizen}} + Q_{\text{Aufladung}}}{E_{\text{tot}}} \quad (2)$$

$$SNG_{\text{TWW}} = \frac{Q_{\text{TWW}}}{E_{\text{Aufladung}}} \quad (3)$$

$$QH_{\text{HWB}} = \frac{Q_{\text{Heizen}}}{EBF} \quad (4)$$

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

$$TWWB = \frac{Q_{\text{Aufladung}}}{EBF} \quad (6)$$

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

Die Jahresarbeitszahl JAZ bestimmt hauptsächlich die Effizienz der Wärmepumpe. Nur die elektrische Energie des Verdichters, des Ventilators (LWVP), der Quellenpumpe (SWVP) 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  $SNG_{\text{TWW}}$  (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 BWVP verwendet werden. Der Index «Aufladung» bezieht sich dabei immer auf die Warmwasserbereitung.

*Bild 2* zeigt die entsprechenden Systemgrenzen [3]. Es ist zu erkennen, dass die SEPEMO (Seasonal Performance factor and Monitoring) -Systemgrenzen  $SPF_{\text{H1}}$  und  $SPF_{\text{H2}}$  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  $SPF_{\text{H3}}$  beinhaltet jedoch nicht wie der WNG die Umwälzpumpe und die Zusatzheizung des Warmwasserspeichers [8]. Im Gegensatz zur äusseren Grenze  $SNG_{\text{TWW}}$  umfasst der  $SPF_{\text{H4}}$  das gesamte WP-System mit Warmwasser- und Heizungspufferspeicher und ist deshalb im untenstehenden Schema nicht enthalten.

Die Warmwassernutzung wird über den Warmwasserwärmebedarf TWWB pro Gebäude eingestuft. Der Einfluss des Gebäudes selbst bzw. des Nutzerverhaltens und seiner Lage zu beurteilen, werden die Kennwerte  $QH_{\text{HWB}}$  und  $GWB$  ermittelt und dargestellt. Da jedoch für keines der untersuchten Objekte die Innen(raum)-Temperatur erfasst wird, ist die Ermittlung der Nutzereinflüsse begrenzt.

Die Heizgradtage  $HGT_{20,12}$  werden bei einer Heizgrenztemperatur von  $12\text{ °C}$  und einer Zielinnentemperatur von  $20\text{ °C}$  ermittelt. Der  $HGT_{20,12}$  wird dann aus der Differenz zwischen der durchschnittlichen Tagestemperatur und  $20\text{ °C}$  berechnet. Die Heizgradtage werden nur gezählt, wenn die mittlere Tagestemperatur unter der Heizgrenze (hier  $12\text{ °C}$ ) liegt, wobei die  $HGT_{20,12}$  für neue Gebäude und die  $HGT_{20,16}$  für Renovationen gilt [3].

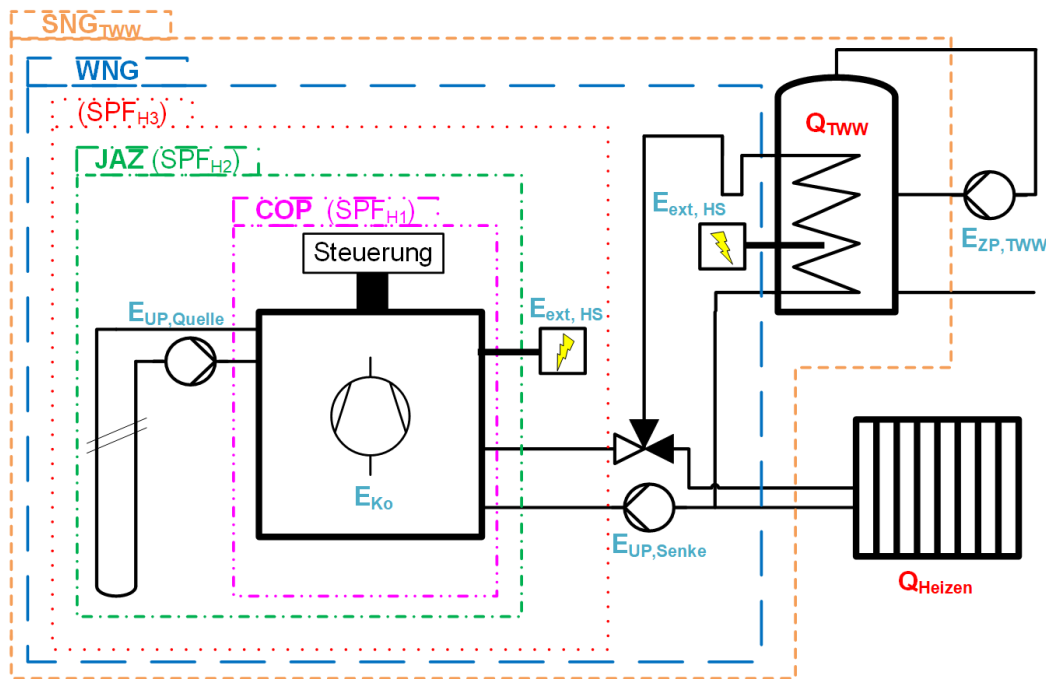


Bild 2: Schema Systemgrenzen

## 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 [5] [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 entsprachen Standardinstallationen, die noch nicht auf der Grundlage dieser Feldstudien optimiert wurden.

Bild 3 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 ca.  $30\text{ °C}$  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 Radiator-Heizungen 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.

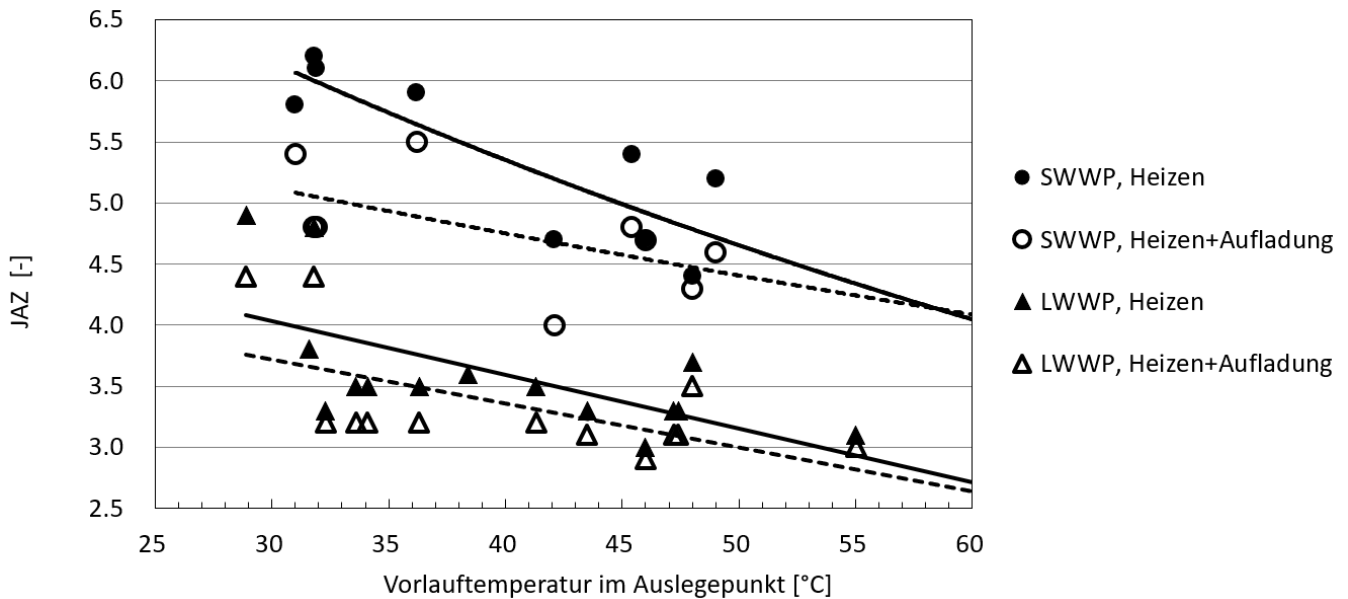


Bild 3: Diagramm Jahresarbeitszahl versus Vorlauftemperatur im Auslegepunkt

Table 1 zeigt eine Zusammenfassung der gemessenen Jahresarbeitszahlen (JAZ) von LWWP und SWWP je nach Gebäudeart [3].

Vorlauftemperatur im Auslegepunkt	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

Table 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 4 ist der Vergleich der mittleren Jahresarbeitszahl (JAZ), des Wärmenutzungsgrad (WNG) für die Warmwasserbereitung (Aufladung) sowie der Systemnutzungsgrads ( $SNG_{TWW}$ ) 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].



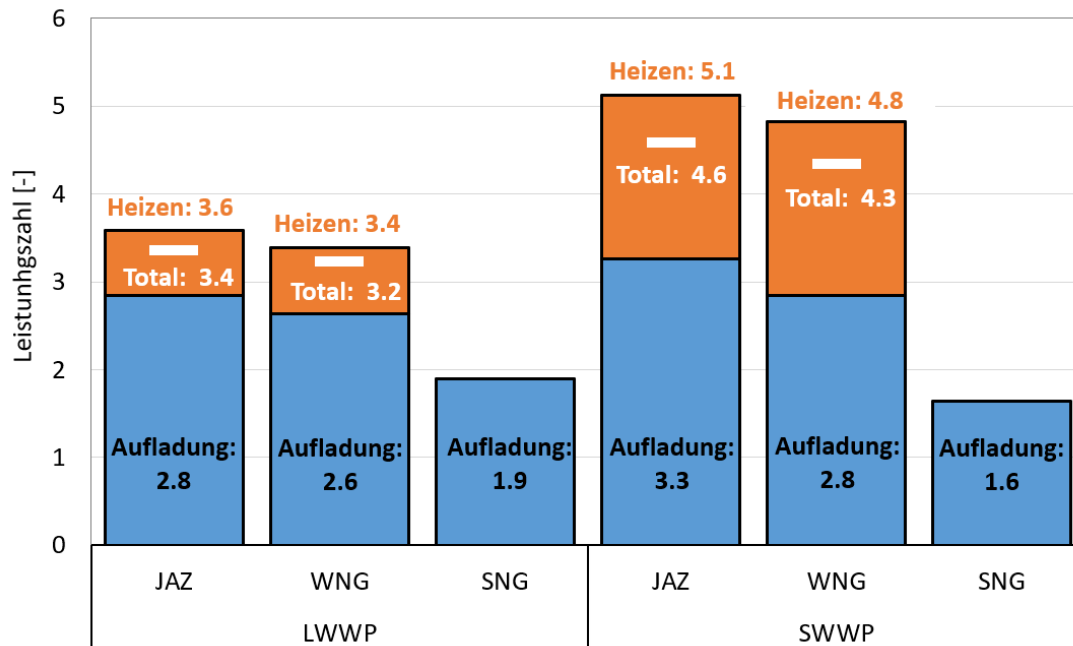


Bild 4: Diagramm Übersicht Leistungszahlen

Bemerkenswert ist auch, dass der WNG um 0.1 oder 0.3 Punkte niedriger ist als die JAZ. Dies ist hauptsächlich auf die elektrischen Heizelemente (Legionellenprogramm) und die Senkenpumpe der WP zurückzuführen.

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) ca. 3 % betrug.

Der Systemnutzungsgrad ( $SNG_{TWW}$ ) 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 eindeutig nicht zu empfehlen.

## Warmwasserbereitung, Nebenaggregate und Optimierungen

Die Warmwasserbereitung bekommt auch 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 Effekt von Wärmepumpe und Heizstab auch die Güte des Speichers und einer eventuellen Warmwasserzirkulation enthalten. *Bild 5* 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.

Typ	Anlage Eigenschaften	JAZ	WNG	$SNG_{TWW}$	Vol. [m <sup>3</sup> ]	Temp [°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 5: 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)*

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

Die SWWP-Anlage D in der obersten, grün markierten Zeile von *Bild 5* 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 ( $SNG_{TWV}$  deutlich unter 1 obwohl der  $WNG > 4$  und der Heizstabanteil klein ist) [3].

Wie angemerkt ist eine Zirkulation des Warmwassers im Einfamilienhaus wenn immer möglich zu vermeiden. Dies kann zum Beispiel durch kurze Ausstossleitungen erreicht werden.

Weiter kann sich auch eine geringe Warmwasserbezugsmenge negativ auf den  $SNG_{TWV}$  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 5* handelt es sich um Wärmepumpenboiler-Anlagen (BWBP) bei denen systemintern keine Wärmeströme gemessen werden können. Daher ist auch nur der Systemnutzungsgrad angegeben. Bei der Anlage G handelt es sich um eine keller-aufgestellte Version, die durch den höchsten Systemnutzungsgrad aller Anlagen hervorsteicht. Sehr positiv wirkt sich hier die geringe Leistung bei der Aufladung aus, die zu geringen Temperaturdifferenzen im System führt.

Neben der Warmwasserbereitung ist auch ein genauerer Blick auf den Energieverbrauch der Nebenaggregate einer WP-Anlage aufschlussreich.

In *Bild 6* ist der elektrische Energieverbrauch der Anlagen aufgeschlüsselt auf die einzelnen Nebenverbraucher zu sehen [3]. Während der Energiebedarf der Pumpen (Quelle/Senke) im unteren Prozentbereich liegt, ist der Anteil für die Elektro-Heizstäbe durchaus signifikant. Besonders Anlage M sticht dabei mit einem Heizstabanteil von fast 50 % des Gesamtenergieverbrauchs hervor. Dies weil besagte Anlage das Legionellenprogramm komplett ohne Verdichter fährt.

Der sehr hohe Heizstabanteil der Anlage J indes ist durch einen Verdichterschaden begründet, weshalb nur der Heizstab eingesetzt werden konnte.



Bild 6: Elektrische Energieanteile der Nebenverbraucher

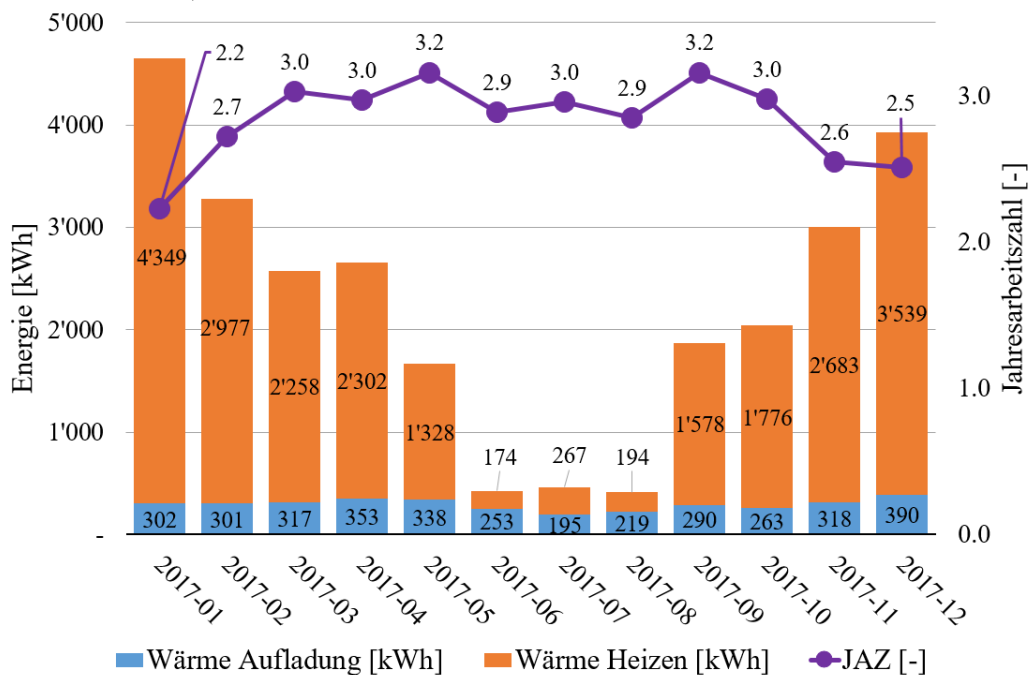
Bei den anderen Anlagen mit aktivierter Legionellenschaltung (1x wöchentlich) liegt der Heizstabanteil bei ca. 20 % bis 30 % des Gesamtstrombedarfs.

In der Praxis liegt hier noch ein signifikantes Verbesserungspotential. So ist z.B. bei den meisten Anlagen der Heizstabeinsatz für die Legionellenschaltung nicht durch die Wärmepumpe angesteuert, sondern er wird direkt mit einer Zeitschaltuhr aktiviert. Dies hat zur Folge, dass der Heizstab oft bei einem nicht voll durchgeladenen Speicher zum Einsatz kommt. Idealerweise würde erst die Wärmepumpe eingesetzt, um den Speicher so gut wie möglich vorzuwärmen, sodass der Heizstab die Temperatur nur noch geringfügig anheben muss. Dies setzt jedoch die direkte Ansteuerung durch die Wärmepumpe voraus.

Des Weiteren ist eine neuerdings oft umgesetzte Optimierung des Eigenverbrauchs von Photovoltaikanlagen durch ausschliesslichen Elektroinsatz aus energetischer Sicht stark zu hinterfragen.

Sinnvoll dagegen ist die Zeitsteuerung einer Luft/Wasser-Wärmepumpe, sodass die normale Warmwasserbereitung tagsüber erfolgt, da zu dieser Zeit die Aussentemperaturen höher liegen, was der Effizienz zugutekommt. Die Empfehlung für eine gute Legionellenschaltung ist somit: Aufheizung des Speichers mittels Wärmepumpe auf die maximal mögliche Temperatur während einer Zeit ohne Bezug (Nacht), dann Nacherwärmung mit dem Heizstab.

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 zwischensaisonalen  $JAZ=2.7$  (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 therm. Energien und der JAZ eines Messobjekts*

## Schlussfolgerungen

Die sorgfältige Definition von Kennzahlen und insbesondere deren Systemgrenzen sind Grundvoraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse von Feldmessstudien, wie sie zurzeit am Wärmepumpen-Testzentrum 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 und teure Messeinrichtung.

Die aktuelle Studie, die inzwischen fast 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 mit Fußbodenheizung ( $35\text{ }^\circ\text{C}$ ), während Sole/Wasser Wärmepumpen auf eine JAZ von durchschnittlich 5.7 kommen. Bei höheren Vorlauftemperaturen wie etwa  $50\text{ }^\circ\text{C}$  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 Leistungszahlen (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 Software-Updates konnte die Jahresarbeitszahl teilweise um 10-20 % gesteigert werden. Typische Optimierungsmaßnahmen sind:

- Anpassung der Heizkurve und der Heizgrenze.
- Ladezeit 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, dennoch gibt es weiteres Verbesserungspotential, insbesondere bei der Warmwasserbereitung.

**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]
$E_{Ko}$	Elektrische Aufnahmeenergie Verdichter	[kWh]
$E_{\text{tot}}$	Gesamte elektrische Aufnahmeenergie des WP-Systems	[kWh]
$E_{TWW}$	Elektrische Aufnahmeenergie des WP-Systems bei Aufladung	[kWh]
$E_{UP,Quelle}$	Elektrische Aufnahmeenergie Umwälzpumpe Quelle	[kWh]
$E_{UP,Senke}$	Elektrische Aufnahmeenergie Umwälzpumpe Senke	[kWh]
$E_{ZP,TWW}$	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]
$QH_{HWB}$	Heizwärmebedarf	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$Q_{\text{Heizen}}$	Wärmeenergie im Heizbetrieb	[kWh]
$Q_{TWW}$	Wärmeenergie der Warmwassernutzung	[kWh]
$Q_{h,i}$	Thermische Energie, i	[kW <sub>th</sub> ]
SEPEMO	<u>SE</u> asonal <u>PE</u> formance factor and <u>M</u> onitoring	
SNG <sub>TWW</sub>	Systemnutzungsgrad gemäss der Definition vom BFE	[-]
SPF <sub>H1-H4</sub>	Seasonal performance factors nach SEPEMO Definition	[-]
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	
SWWP	Sole/Wasser Wärmepumpe	
$T_{\text{rücklauf}}$	Rücklauftemperatur	[°C]
$T_{\text{vorlauf}}$	Vorlauftemperatur	[°C]
TWW	Warmwasser	
$\xi_{WWB}$	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	
$\eta_{TWW}$	Wirkungsgrad der Warmwassernutzung	[-]
$\rho_w(T)$	Dichte von Wasser (Temperaturabhängig)	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta T$	Temperatur-Differenz	[K]

## Quellen

- [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.