

# Einfluss der Trinkwarmwasser-Systemvariante auf die Performance von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern

Michael Kropp<sup>1\*</sup>, Oliver Hörnle<sup>1</sup>, Manuel Lämmle<sup>2</sup>, Jeannette Wapler<sup>2</sup>, Stefan Hess<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme – INATECH,  
Emmy-Noether-Str. 2, 79110 Freiburg  
[michael.kropp@inatech.uni-freiburg.de](mailto:michael.kropp@inatech.uni-freiburg.de)

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

\* Korrespondenzautor

## Kurzfassung

Wärmepumpen haben ein hohes Potential zur Verringerung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebäudesektor. In Mehrfamilien (MFH)-Bestandsgebäuden bestehen für deren Einsatz jedoch technische Herausforderungen wie hohe Vorlauf-Temperaturen für die Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser (TWW). Dies hemmt derzeit eine weitere Verbreitung der Wärmepumpe als Hauptwärmeerzeuger in Bestands-MFH. Durch Wärmeschutz-Maßnahmen an der Gebäudehülle lässt sich hier der Bedarf an Raumwärme und in der Regel auch deren erforderliche Vorlauf-Temperatur erheblich reduzieren. Dadurch nimmt der Anteil der TWW-Bereitung am Gesamt-Wärmebedarf zu und damit auch die Auswirkung der erforderlichen TWW-Vorlauf-Temperatur auf die Performance von Wärmepumpen-Systemen.

Um diesen Einfluss auf die Effizienz einer monoenergetischen Außenluft/Wasser-Wärmepumpe als Hauptwärmeerzeuger für Heizung und TWW (jeweils mit elektrischem Heizstab) zu untersuchen, wurde ein Vergleich von vier Systemvarianten für ein repräsentatives, teil-saniertes MFH in Karlsruhe Durlach durchgeführt. Dort entfällt etwa ein Drittel des Gesamtwärmebedarfs auf die Trinkwassererwärmung. Der Vergleich basiert auf Systemsimulationen in der Software Dymola Modelica.

Referenzfall für die TWW-Bereitung ist ein zentraler Frischwasserspeicher mit internem Wärmeübertrager. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen durch den Einsatz einer zentralen Frischwasserstation die Jahresarbeitszahl (Wärmepumpe + Heizstab) der TWW-Bereitung von 1,5 (Referenz) auf 2,0 gesteigert werden kann. Der Einbau einer Ultrafiltrationseinheit im Zirkulationsrücklauf oder alternativ die Umstellung auf dezentrale Wohnungsstationen erhöhen die Jahresarbeitszahl für die TWW-Bereitung weiter auf 3,2. Dies ist auf die bei beiden Varianten erheblich niedrigere bereitzustellende Vorlauf-Temperatur von etwa 50 °C zurückzuführen.

Im untersuchten Beispiel kann durch Einsatz von Ultra-Filtration oder dezentraler Wohnungsstationen die Gesamt-Jahresarbeitszahl für TWW und Raumwärme von 2,4 auf 3,3 erhöht werden. Der Gesamtjahresstromverbrauch für die Wärme-Bereitstellung sinkt dabei um fast 30 %.

## Stichwörter:

Trinkwarmwasser, Ultrafiltration, Wärmepumpe, Mehrfamilienhaus, LowEx-Bestand

## 1 Einleitung

In Deutschland entfiel auf private Haushalte im Jahr 2018 mit ca. 644 TWh etwa ein Viertel des gesamten Endenergieverbrauchs. Die größten Anteile am Endenergieverbrauch in Gebäuden entfallen auf die Bereiche Raumwärme (67,6 %) und Trinkwassererwärmung (TWE) (15,9 %) [1]. Zur Reduzierung des Energieverbrauchs für Raumwärme durch bauliche Maßnahmen stehen seit der Einführung der Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzV) und der Weiterführung durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) sowie durch das neue Gebäudeenergiegesetz (GEG) wichtige und effektive Instrumente der deutschen Energie- und Klimaschutzpolitik zur Verfügung. Mit steigenden bautechnischen Anforderungen und dem damit verbundenen verminderten Raumwärmebedarf nimmt der Anteil der TWE am Gesamt-Endenergieverbrauch zu und damit die Bedeutung der TWE auf dem Weg zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand.

Der Bedarf an Trinkwarmwasser (TWW) auf komfortablem Temperaturniveau ist durch die Nutzer vorgegeben und lässt sich nicht ohne Weiteres reduzieren. Er muss deshalb perspektivisch durch erneuerbare Energien gedeckt werden, beispielsweise mit Hilfe von Wärmepumpen (WP), welche erneuerbar erzeugten Strom nutzen. Hier ist das hohe Temperaturniveau bei zentraler TWE, das den gesetzlichen Hygieneanforderungen in Mehrfamilienhäusern (MFH) geschuldet ist, ein Hemmnis. Je höher die bereitgestellte Temperatur, desto niedriger die Effizienz der Wärmepumpe. Zusätzlich kann auch die technisch maximal mögliche Vorlauftemperatur den Deckungsanteil der WP begrenzen und damit die (primär-)energetischen und emissionsseitigen Einsparmöglichkeiten limitieren. Deshalb gewinnen Maßnahmen zur Temperaturabsenkung bei der TWE zunehmend an Bedeutung und rücken verstärkt in den Fokus energieeffizienter Anlagentechnik.

Das Gelingen der Energiewende beruht auf drei wesentlichen Maßnahmen: Energieeinsparung, Energieeffizienz und Ausbau Erneuerbarer Energien. Im Folgenden wird gezeigt, wie durch den Einsatz von WP und anderen LowEx-Maßnahmen zur TWE im MFH im Zusammenspiel mit erneuerbar erzeugtem Strom die Energieeffizienz gesteigert werden kann, sodass Endenergie eingespart wird und Emissionen reduziert werden. Dazu werden vier Systemvarianten zur TWE mit WP an einem typischen Bestandsgebäude mit Hilfe thermo-hydraulischer Systemsimulationen in Dymola Modelica untersucht und verglichen.

## 2 Beispiel-Gebäude und Systemvarianten

### 2.1 Beispielgebäude

Das betrachtete Referenzgebäude (vgl. Bild 1) befindet sich im Karlsruher Stadtteil Durlach. Es wurde 1963 erbaut und 1995 energetisch saniert (neue Fenster, Dämmung der Gebäudehülle, Installation zentraler Gaskessel).



**Bild 1:** Typisches MFH-Bestandsgebäude in Karlsruhe mit insgesamt 30 Wohneinheiten aufgeteilt auf drei Treppenhäuser mit 5 Vollgeschossen (jeweils Zweispänner).

Das ausgewählte Gebäude befindet sich in einem Quartier, bestehend aus fünf Mehrfamilienhäusern mit jeweils 30 - 40 Wohneinheiten. Im Forschungsprojekt „Smartes Quartier Durlach“ wird im Kontext des thematischen

Forschungsverbundes „LowEx-Bestand“ ein neues Wärme- und Stromversorgungskonzept für dieses Quartier entwickelt und umgesetzt. Das Ziel dieses Vorhabens ist es, durch die intelligente Integration etablierter Technologien wie Photovoltaik, Wärmepumpen und BHKW eine größtmögliche Einsparung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einem wirtschaftlichen Geschäftsmodell für den Energiedienstleister zu erzielen [2].

Zur Klassifizierung relevanter Sanierungsfälle im MFH-Bestand wurden im Projekt „LowEx im Bestand“ die aggregierten Baualtersphasen I bis IV eingeführt (vgl. [3], S. 57 ff.). Die beiden mittleren Baualtersphasen II und III nehmen mit 60 % einen großen Anteil am gesamten MFH-Bestand ein und bieten ein hohes Einsparpotential: in den nächsten Jahren müssen voraussichtlich Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden und es sind im Vergleich zu älteren Gebäuden der Baualtersphase I weniger Sanierungsrestriktionen (bspw. aufgrund von Denkmal- und Ensembleschutz) zu erwarten. Das ausgewählte Gebäude entspricht aufgrund seines Alters und der Dimensionen einem typischen großen Mehrfamilienhaus der Baualtersphase II.

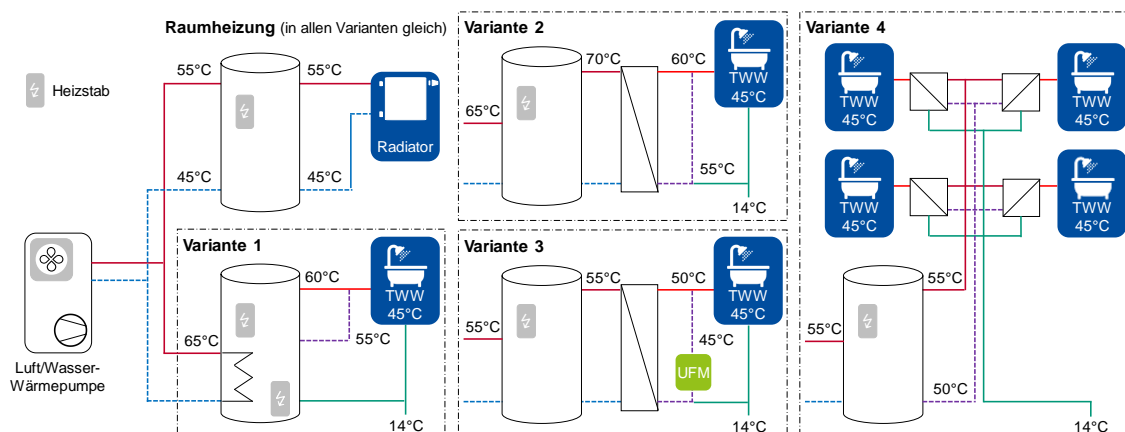
Das Beispielgebäude weist eine beheizte Grundfläche von 2.113 m<sup>2</sup> verteilt auf drei Hauseingänge (Zweispänner) mit je 5 Vollgeschossen (insgesamt 30 Wohneinheiten) auf. Der gemessene spezifische Wärmeverbrauch des Gebäudes (Mittelwert der Jahre 2016 - 2018) liegt bei ca. 61 kWh/(m<sup>2</sup>·a) für die Raumheizung und 32 kWh/(m<sup>2</sup>·a) für die TWE (incl. Verteilverluste). Die Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 [4] ergibt eine Heizlast von ca. 66 kW bei einer Norm-Außentemperatur von -12 °C, was die Verbrauchsanalyse bestätigt. Die rechnerisch notwendige Leistung zur TWE (bei konstanter Zapfung über den gesamten Tag) beträgt 8 kW. Die gemessene Wärmemenge zur TWE liegt im Bereich der vorliegenden Literaturwerte (s. Tabelle 1). Die angegebenen Werte sind Mittelwerte, die eine hohe Streuung innerhalb der Studien aufweisen, z.B. Techem 2018 [5]: < 5 bis 65 kWh/(m<sup>2</sup>·a) [6].

**Tabelle 1:** Vergleichswerte zum spezifischen Wärmebedarf für die Trinkwassererwärmung (TWE)

Studie	Mittlerer spezifischer Wärmebedarf zur TWE
Optimus-Studie [7]	38 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)
Techem 2018 (Erdgasanlagen mit WMZ) [5]	32 kWh/(m <sup>2</sup> ·a)

## 2.2 Systemvarianten

Bild 2 zeigt die vereinfachten Hydraulikschemata der vier untersuchten Systemvarianten zur TWE. Alle Varianten sind als 4-Leiter-System (jeweils separate Vor- und Rücklaufleitung für TWW und Heizung) mit zentraler Außenluft/Wasser-Wärmepumpe ausgeführt. Das System wird monoenergetisch mit je einem elektrischen Heizstab in den Speichern zur Raumheizung und zur TWE betrieben. Aufgrund der Größe des Systems muss bei zentraler TWE zur Legionellen-Prävention eine TWW-Vorlauftemperatur am Austritt des Trinkwasser (TW)-Erwärmers von min. 60 °C mit einem maximalen Temperaturabfall von 5 K im Zirkulationsrücklauf sichergestellt werden. Außerdem muss die gesamte Vorwärmstufe einmal am Tag auf über 60 °C erwärmt werden. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit auch mit anderen technische Maßnahme die Legionellen-Prävention zu gewährleisten [8].



**Bild 2:** Vereinfachtes Hydraulikschema des WP-Systems: Heizkreis mit Plattenheizkörpern zur Raumheizung und die vier untersuchten TWE-Varianten. Variante 1: TWW-Speicher mit internem Wärmeübertrager. Variante 2: Durchflusssystem (Frischwasserstation) mit Speicher. Variante 3: Mit zusätzlichem Ultrafiltrationsmodul (UFM). Variante 4: Dezentrales Durchflusssystem (dez. Frischwasserstation) mit zentralem Speicher.

In der Referenzvariante 1 erfolgt die TWE mit Hilfe eines TWW-Speichers mit internem Wärmeübertrager. Variante 2 und 3 nutzen eine Frischwasserstation mit Speicher (Durchflusssystem). In Variante 3 ist zusätzlich eine Ultrafiltrationseinheit zur mechanischen Bekämpfung von Legionellen im Zirkulationsrücklauf (Bypass-Betrieb) verbaut. Dadurch kann laut Hersteller die Systemtemperatur im TWW-Kreis bis fast auf die Temperatur des gezapften Wassers (45 °C) gesenkt werden [9]. In Variante 4 erfolgt die TWE durch den Einsatz von dezentralen Frischwasserstationen (Wohnungsstationen) mit zentralem Speicher. Aufgrund der geringen Volumina der mit TWW befüllten Leitungen kann hier ebenfalls die Temperatur abgesenkt werden [8]. In Tabelle 2 sind die Spezifikationen der untersuchten Systeme zusammengefasst.

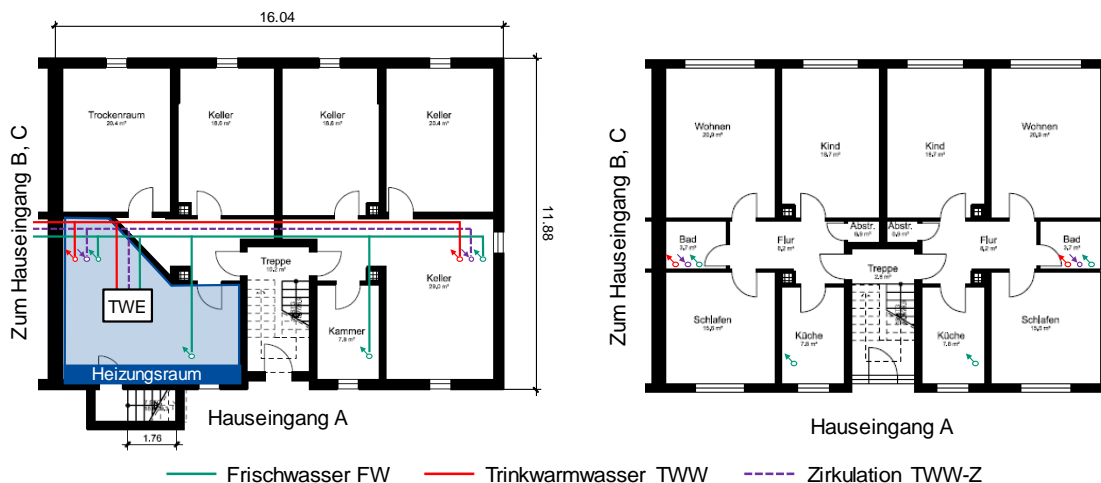
**Tabelle 2:** Übersicht der untersuchten Systemvarianten.

Var.	Bezeichnung	Zieltemperatur		Zirkulation	Medium	
		WP (VL)	Speicher		Speicher	Zirkulation
1	TWW-Speicher	65 °C	65 °C	60 / 55 °C	TWW	TWW
2	FriWa zentr.	65 °C	70 °C	60 / 55 °C	Heizwasser	TWW
3	FriWa + UFM	55 °C	55 °C	50 / 45 °C	Heizwasser	TWW
4	Whg.-Stat.	55 °C	55 °C	55 / 50 °C	Heizwasser	Heizwasser

Es wird ein monoenergetisches System betrachtet, d.h. wenn die Heizleistung der Wärmepumpe zur Deckung der Last nicht ausreicht oder die geforderte Temperatur die maximale Vorlauftemperatur der Wärmepumpe von 65 °C überschreitet, stellen elektrische Heizstäbe die fehlende Leistung bereit. Der Einsatz des Heizstabes erfolgt zur Raumheizung bivalent-parallel; der Heizstab wird bei Temperaturen unterhalb des Bivalenzpunktes parallel zur Wärmepumpe zugeschaltet. Aufgrund der hohen geforderten Temperatur bei der TWW-Erwärmung in Variante 1 und 2 deckt die WP nur die Energiemenge bis zum Erreichen der maximalen Vorlauftemperatur. Der darüberhinausgehende Bedarf, der zum Erreichen der vorgeschriebenen Warmwassertemperatur erforderlich ist, wird direkt elektrisch durch einen Heizstab im TWW-Speicher gedeckt. Um das Einhalten der hygienischen Mindesttemperatur von 60 °C im Vorlauf der TWW-Leitung zu gewährleisten ist in Variante 2 die Temperaturdifferenz zur eig. TWW-Temperatur mit mehr Sicherheit ausgelegt.

### 2.3 Trinkwarmwasser-Verteilung

In Bild 3 ist der zugehörige Grundriss des Hauseingangs A (Kellergeschoss und 1. Obergeschoss) mit den verbauten TW-Versorgungsleitungen dargestellt.



a) Kellergeschoss mit Heizraum und Trinkwasser-Versorgungsleitungen

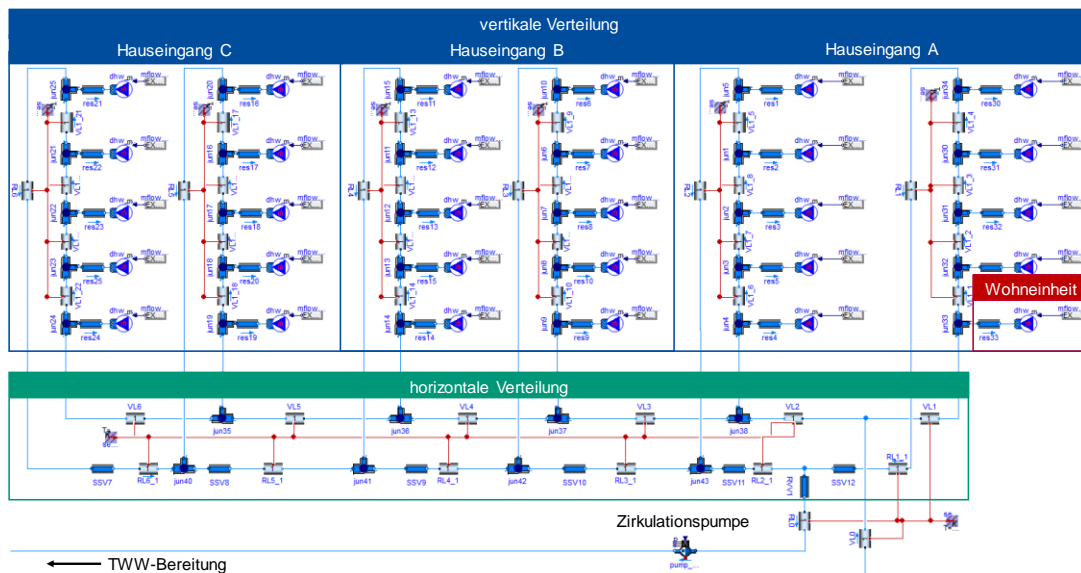
b) 1. OG mit Zapfstellen für TWW im Bad und für Frischwasser in Bad und Küche

**Bild 3:** Grundriss Hauseingang A des in Bild 1 dargestellten MFH

Die Wärmebereitstellung erfolgt zentral im Keller des Hauseingangs A. Die Komponenten der Wärmebereitstellung (Wärmepumpe, Pufferspeicher, TW-Erwärmer sowie die dazugehörigen Pumpen) sind im Heizraum un-

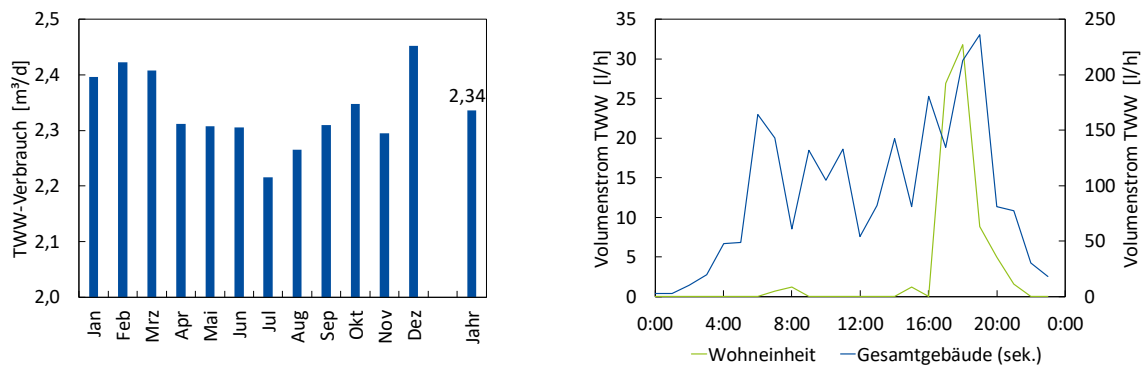
tergebracht. Das TWW-Verteilssystem ist als Zirkulationssystem mit unterer Verteilung aufgebaut. In jedem Hauseingang versorgen jeweils zwei Steigstränge die übereinanderliegenden Wohneinheiten (insgesamt sechs Steigstränge). Die Küchen grenzen nicht an die Bäder und sind nicht an die zentrale TWE angebunden. Die TWE erfolgt hier dezentral mit Hilfe eines elektrischen Durchlauferhitzers. Da im Folgenden die Performance von zentralen WP zur TWE untersucht wird, wird der Verbrauch in den Küchen nicht mit betrachtet.

Zur detaillierteren Untersuchung der TWE-Varianten wurde in Modelica das TWW-Verteilssystem des Beispielgebäudes nachgebildet. Dazu wurden die einzelnen Rohrabschnitte des Zirkulationssystems sowie die Zirkulationspumpe nach DIN 1988-300 [10] ausgelegt. Das Hydraulik-Schema des Modells ist in Bild 4 dargestellt.



**Bild 4:** Hydraulik-Schema des Trinkwarmwasser (TWW)-Verteilsystems in Dymola Modelica (je Hauseingang zwei Steigleitungen (Zweispänner) und 5 Vollgeschosse).

Für die Simulation des Verteilsystems wurde ein TWW-Profil (Stundenwerte) auf Basis real gemessener Werte (Volumenstrommessung in der Frischwasserzuleitung des TWW-Bereiters im Zeitraum 10.07.2019 bis 20.02.2020) eines benachbarten Gebäudes im Quartier generiert. Dazu wurden zum einen die gemessenen Werte mit Hilfe von aus den Messdaten erzeugten Typ-Tagen (Werktag, Samstag und Sonntag für Sommer, Winter und Übergangszeit) zu einem Jahresprofil erweitert. Es erfolgte auch eine statistische Aufteilung des Tagesprofils in drei verschiedene Entnahmetypen anhand der Zapfmenge und des Anteils am Gesamtverbrauch in Anlehnung an [11]: kurze Entnahme, z.B. Händewaschen (21,9 %), Dusche (62,5 %) und Bad (15,6 %). Die so generierten Zapfereignisse werden zufällig auf die 30 Wohneinheiten verteilt. Die Umrechnung auf das hier betrachtete Gebäude erfolgte über den jährlichen Durchschnittsverbrauch der Jahre 2016 - 2018 der beiden Gebäude. In Bild 5 ist das verwendete TWW-Jahresprofil dargestellt.



a) Mittleres Tages-Zapfvolumen je Monat des Gesamtgebäudes

b) Zapfprofile Gebäude und Wohneinheit an einem Beispieltag im Winter (30. Januar)

**Bild 5:** Zapf-Volumen Trinkwarmwasser (TWW) des Beispiel-Gebäudes

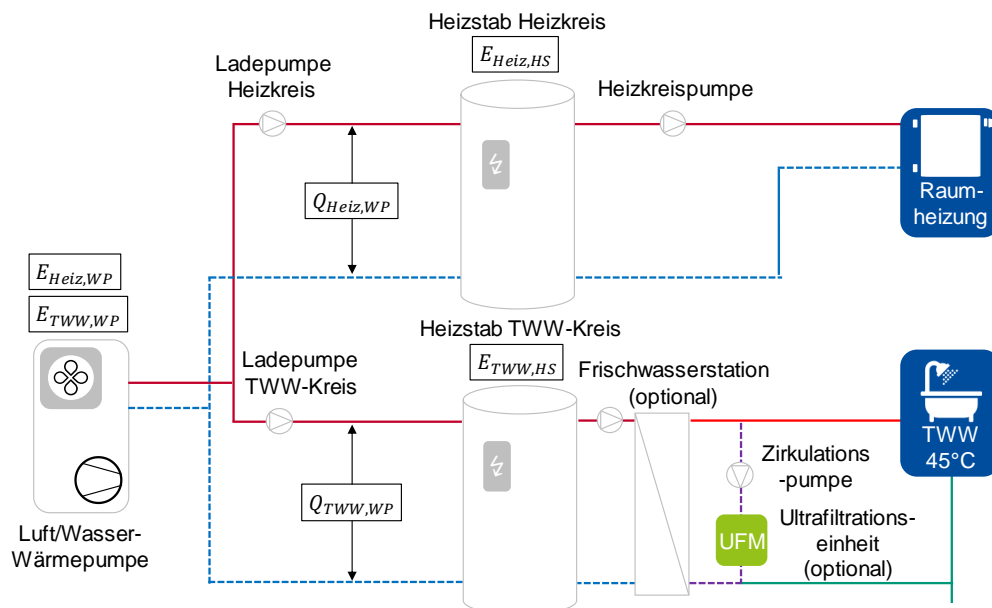
Das mittlere TWW-Zapfvolumen pro Wohneinheit beträgt etwa 28,4 m<sup>3</sup>/a bei einer Spreizung von 27,2 m<sup>3</sup>/a bis 30,5 m<sup>3</sup>/a. Dies entspricht einer Zapfenergie des Gesamtgebäudes von 45,8 MWh/a bzw. 21,7 kWh/(m<sup>2</sup>·a). Mit dem mittleren Wärmeverbrauch für die TWE des Gebäudes von 31 kWh/(m<sup>2</sup>·a) ergibt sich ein Nutzungsgrad von etwa 70 %, d.h. 30 % Verluste durch Speicherung und Zirkulation.

Je Wohneinheit wird der Zapfvolumenstrom des TWW über das generierte Zapfprofil in Abhängigkeit der vorherrschenden TWW-Temperatur vorgegeben. Der nach DIN 1988-300 [10] ermittelte Volumenstrom zur Deckung der Zirkulationsverluste wird durch die Zirkulationspumpe dauerhaft bereit gestellt. Tritt in einer Wohneinheit eine Zapfung auf, wird heißes TWW aus der TWW-Leitung an der Zapfstelle in der jeweiligen Wohneinheit entnommen und je nach Temperatur mit kaltem Frischwasser auf die gewünschte Zapftemperatur gemischt. Gleichzeitig strömt kaltes Frischwasser in den TWW-Bereiter und wird anschließend auf die gewünschte TWW-Temperatur erwärmt.

### 3 Thermo-hydraulische Systemsimulation

#### 3.1 Systemgrenzen und Bewertungsgrößen

Die Effizienz der Wärmepumpe im Betrieb wird durch die Arbeitszahl AZ, dem Quotienten aus bereitgestellter thermischer Energie  $Q$  und aufgewendeter elektrischer Energie  $E$ , ausgedrückt (vgl. Bild 6). Grundsätzlich sind für die Ermittlung einer Arbeitszahl verschiedene Bilanzgrenzen denkbar. Im Folgenden werden für zwei unterschiedliche Bilanzgrenzen Arbeitszahlen, jeweils für Gesamtsystem, Raumheizung und TWE, ermittelt. Die Arbeitszahl AZ1 berücksichtigt die von der WP dem Speicher zugeführte Wärme und den elektrischen Verbrauch von Verdichter und Steuerung der WP sowie den des Ventilators (vgl. Gleichung (1) - (3)). Die Arbeitszahl AZ2 berücksichtigt zusätzlich die vom Heizstab dem Speicher zugeführte Wärme und die dafür notwendige elektrische Energie (vgl. Gleichungen (4) - (6)).



**Bild 6:** Schematische Darstellung des Wärmepumpensystems mit bereitgestellter thermischer Energie  $Q$  und aufgewendeter elektrischer Energie  $E$  sowie elektrischen Verbrauchern zur Bestimmung der Arbeitszahl AZ.

Neben den vorgestellten Arbeitszahlen als Energieeffizienzkriterium wird der jeweilige Endenergiebedarf der Systemvarianten nach Gleichung (7) bestimmt. Zur Berechnung des Endenergiebedarfs wird der Strombezug des Verdichters, der Steuerung, des Ventilators im Primärkreis, der entsprechenden elektrischen Zusatzheizstäbe sowie aller weiteren Verbraucher berücksichtigt. In allen Varianten ist je eine Speicherladepumpe zur Raumheizung und TWE sowie eine Heizkreispumpe und eine Zirkulationspumpe installiert. Zusätzlich dazu ist in Variante 2 und 3 eine Pumpe zur TWE in der Frischwasserstation und in Varianten 4 jeweils eine Pumpe pro Wohneinheit in der Wohnungsstation notwendig. In Variante 3 wird darüber hinaus der Strombezug der Ultrafiltrationseinheit berücksichtigt.

$$AZ1_{Gesamt} = \frac{Q_{Heiz,WP} + Q_{TWW,WP}}{E_{Heiz,WP} + E_{TWW,WP}} \quad (1)$$

$$AZ1_{TWW} = \frac{Q_{TWW,WP}}{E_{TWW,WP}} \quad (2)$$

$$AZ1_{Heiz} = \frac{Q_{Heiz,WP}}{E_{Heiz,WP}} \quad (3)$$

$$AZ2_{Gesamt} = \frac{Q_{Heiz,WP} + Q_{TWW,WP} + Q_{Heiz,HS} + Q_{TWW,HS}}{E_{Heiz,WP} + E_{TWW,WP} + E_{Heiz,HS} + E_{TWW,HS}} \quad (4)$$

$$AZ2_{TWW} = \frac{Q_{TWW,WP} + Q_{TWW,HS}}{E_{TWW,WP} + E_{TWW,HS}} \quad (5)$$

$$AZ2_{Heiz} = \frac{Q_{Heiz,WP} + Q_{Heiz,HS}}{E_{Heiz,WP} + E_{Heiz,HS}} \quad (6)$$

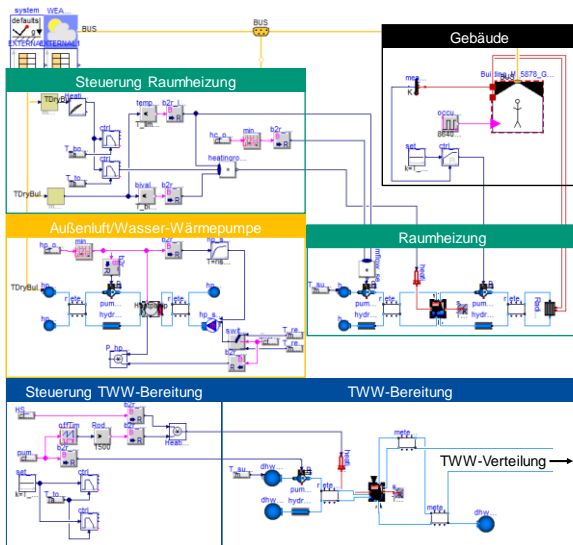
$$E_{end} = E_{Heiz,WP} + E_{TWW,WP} + E_{Heiz,HS} + E_{TWW,HS} + E_{Pumpen} + E_{UFM} \quad (7)$$

Mit:

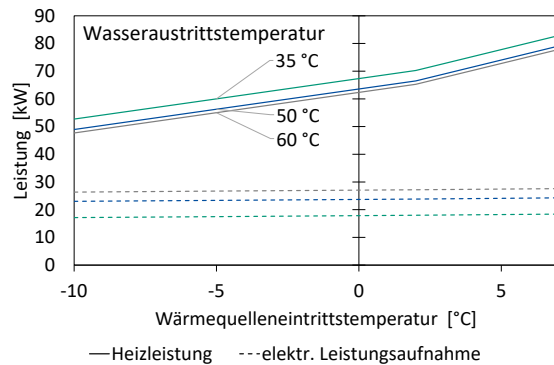
- AZ                   Arbeitszahl
- $Q_{Heiz,WP}$         von der WP bereitgestellte Wärmemenge zur Raumheizung
- $Q_{TWW,WP}$         von der WP bereitgestellte Wärmemenge zur TWE
- $Q_{Heiz,HS}$         vom Heizstab bereitgestellte Wärmemenge zur Raumheizung
- $Q_{TWW,HS}$         vom Heizstab bereitgestellte Wärmemenge zur TWE
- $E_{Heiz,WP}$         Strombezug der Wärmepumpe (Verdichter + Steuerung) + Ventilator im Raumheizbetrieb
- $E_{TWW,WP}$         Strombezug der Wärmepumpe (Verdichter + Steuerung) + Ventilator im TWW-Betrieb
- $E_{Heiz,HS}$         Strombezug des Heizstabes im Raumheizbetrieb
- $E_{TWW,HS}$         Strombezug des Heizstabes im TWW-Betrieb
- $E_{Pumpen}$         Strombezug der Pumpen (je Speicherladepumpe zur Raumheizung und zur TWE, Heizkreispumpe, Zirkulationspumpe, Pumpe der zentralen Frischwasserstation, Pumpen der dez. Frischwasserstationen)
- $E_{UFM}$             Strombezug der Ultrafiltrationseinheit
- $E_{end}$             Endenergieverbrauch des WP-Systems

### 3.2 Simulationsmodell und Parameter

Die Bewertung der Energieversorgungssysteme erfolgt mit Hilfe von Jahressimulationen eines Gesamtsystemmodells in Dymola Modelica. Bild 7 zeigt dieses Gesamtmodell (zur besseren Darstellung ist das TWW-Verteilssystem nicht dargestellt; das detaillierte Hydraulik-Schema ist Bild 4 zu entnehmen).



**Bild 7:** Gesamtmodell des WP-Systems mit TWW-Speicher mit internem Wärmeübertrager.



**Bild 8:** Leistungsdiagramm des verwendeten WP-Modells

Das System wird mit einer TWW-Vorrangschaltung betrieben. Die Regelung der Vorlauftemperatur im Heizkreis erfolgt außentemperaturabhängig per Heizkurve. Die Steuerung der Anlage ist ebenfalls in Modelica implementiert. Die Randbedingungen der Simulationen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht Randbedingungen der Systemsimulationen in Dymola Modelica

Parameter	Beschreibung	Wert
<b>Wetterdaten</b>	Meteonorm (Version 7.1.11), Standort: Karlsruhe	- Standard Test-Referenz-Jahr (TRY)
<b>Heizbedarf</b>	MFH in Karlsruhe: 1963 erbaut und 1995 energetisch saniert; Modifiziertes Ein-Zonen-Gebäudemodell nach ISO 13790 [12]	- 30 Wohneinheiten - 2.113 m <sup>2</sup> beheizte Wohnfläche - Spezifischer Wärmebedarf: 61 kWh/(m <sup>2</sup> ·a) - Heizsystem: Radiatoren - Auslegung: 55 °C / 45 °C / 20 °C bei -12 °C - Auslegungsheizleistung: 66 kW - Heizgrenztemperatur: 17 °C
<b>Raumheizung</b>	Soll-Vorlauftemperatur über Heizkurve [13]; Hysterese-Schaltung zur Speicherladung; Anforderung Heizstab nur unterhalb des Bivalenzpunktes	Wärmepumpe: - Temperatursensor auf 20 % des Speichers - Hysterese-Grenzen: unten 1 K, oben 4 K Heizstab: - Temperatursensor auf 80 % des Speichers - Hysterese-Grenzen: unten 1 K, oben 2 K
<b>TWE</b>	Generisches TWW-Profil auf Basis real gemessener Werte	- Spezifischer Wärmebedarf: 32 kWh/(m <sup>2</sup> ·a) - Detailliertes Verteilnetzwerk (s. Bild 4) - Speicherladung vgl. Tabelle 4
<b>TWW-Zirkulation</b>	Zirkulationsleitung mit unterer Verteilung; Auslegung nach DIN 1988-300 [10]	- Konstanter Zirkulationsvolumenstrom: 320 l/h (Variante 1 + 2), 240 l/h (Variante 3 + 4) - Konstante Frischwasser-Temperatur: 14 °C [14] - Wärmeverluste Verteilleitung (konstante Temperatur) [10]: - beheizt (Steigleitung im Schacht): 25 °C - unbeheizt (vertikale Verteilung): 10 °C
<b>WP</b>	Fixed-Speed Wärmepumpen-Modell; monoenergetische Betriebsweise	- $\dot{Q}_{th}, P_{el}$ : Außen- und vorlauftemperaturabhängig (vgl. Bild 8) - Minimale Lauf- und Pausenzeiten - Auslegungs-Heizleistung: 70 kW (A2/W35) [15] - Bivalenzpunkt: -5 °C (47 kW RH, 8 kW TWE)
<b>HS</b>	Elektrischer Zusatzheizer im Speichermodell integriert	- Auslegungs-Heizleistung: 17,5 kW RH, 8 kW TWE - Effizienz: 100 %
<b>Speicher</b>	10-Schichten Pufferspeichermodell	- 1.000 l Heizung und - 2.000 l TWW nach DIN 4645 [15] - Wärmeübertragung zwischen den Schichten durch Wärmeleitung und Durchmischung durch Auftrieb
<b>FriWa zentral/dezentral</b>	Wärmeübertrager-Modell mit konstanter Effizienz	- Effizienz: 80 % - Regelung über Volumenstrom Sekundärseite [16]
<b>UFM</b>	Kein Simulationsmodell	- Dauerbetrieb mit durchschnittlicher Leistungsaufnahme von 50 W [9]

Durch das Verteilsystem-Modell können die Verluste in TWW- und Zirkulationsleitung detaillierter ausgewertet werden. So können die Verluste in nicht nutzbar (horizontale Verteilrohre im unbeheizten Keller) und teilweise nutzbar (vertikale Steigstränge im Versorgungsschacht) unterteilt werden. Im Modell ist derzeit aber noch keine Verlinkung zwischen Verteilsystem und Raumheizung implementiert. Die Verteilverluste tragen demnach hier bilanziell nicht zur Deckung des Wärmebedarfs zur Raumheizung bei.

Die Regelung zur Speicherladung im TWW-Betrieb erfolgt wie auch im Raumheiz-Betrieb per Hysterese-Schaltung. Aufgrund der hohen geforderten Temperaturen im Speicher zur TWE in Variante 1 und 2 übernimmt die



WP nur die Vorwärmung. Zum Erreichen der vorgeschriebenen Warmwassertemperatur wird der Heizstab zugeschaltet. Um die Einsatzzeit der Wärmepumpe zu verlängern erfolgt die Zuschaltung des Heizstabes (rel. Einbauhöhe 70 %) über einen zweiten Temperatursensor auf 90 % der Speicherhöhe. So springt der Heizstab nur an, wenn die minimal zulässige VL-Temperatur unterschritten wird. In Variante 1 ist die Legionellschaltung durch einen zusätzlichen Heizstab implementiert, der den gesamten Speicherinhalt einmal am Tag auf 60 °C aufheizt. Die Hysterese-Grenzen der Regelung zur TWE (Speichertemperaturen) sowie die relativen Einbauhöhen der zur Regelung der WP verwendeten Temperatursensoren der untersuchten Varianten sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

**Tabelle 4:** Parameter zur Regelung der Speicherladung der vier TWE-Varianten

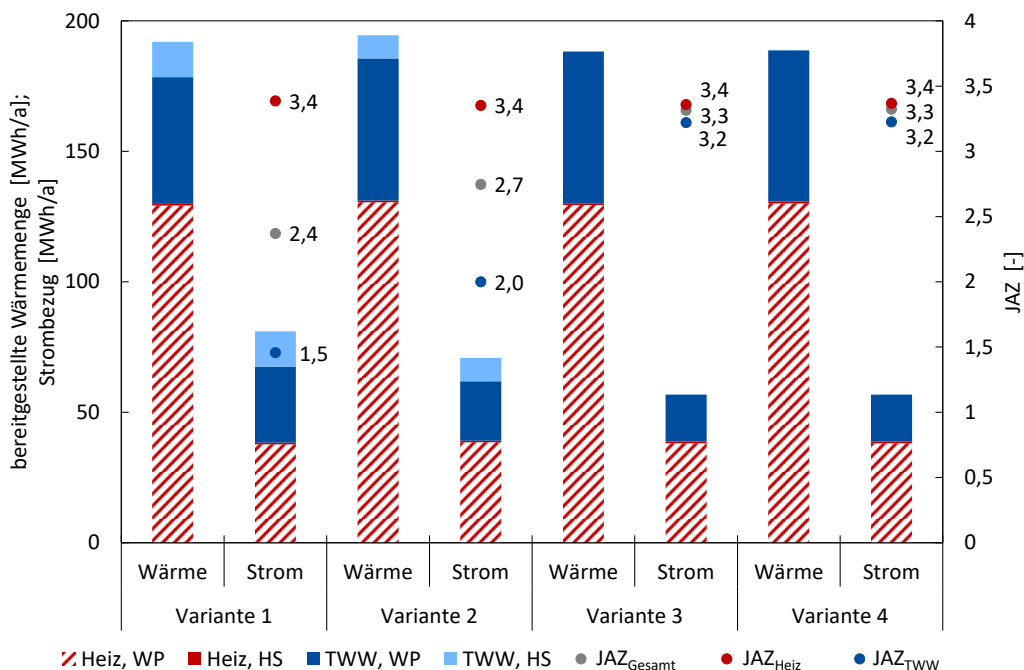
Variante	1	2	3	4
<b>Wärmepumpe</b>				
Höhe VL / RL (relativ)	60 / 10 %	50 / 0 %	50 / 0 %	50 / 0 %
Temperatursensorhöhe (relativ)	50 %	70 %	70 %	70 %
Obere Hysterese-Grenze	64 °C	64 °C	55 °C	55 °C
Untere Hysterese-Grenze	58 °C	57 °C	48 °C	48 °C
<b>Heizstab</b>				
Obere Hysterese-Grenze	65 °C	70 °C	55 °C	55 °C
Untere Hysterese-Grenze	60 °C	63 °C	48 °C	48 °C

## 4 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der oben beschriebenen Jahressimulationen der vier TWE-Anlagen mit WP-System dargestellt. Dazu werden zunächst die Auswirkungen auf das gesamte Wärmebereitungssystem betrachtet und anschließend erfolgt ein detaillierter Vergleich der Varianten.

### 4.1 Gesamtsystem

Die Ergebnisse der Jahressimulationen sind in Bild 9 und Tabelle 5 dargestellt.



**Bild 9:** Bereitgestellte Wärmemenge und dafür notwendiger Strombezug für Raumheizung (Heiz) und Trinkwarmwasser (TWW) mit Aufteilung in Wärmepumpe (WP) und elektrischer Zusatzheizung (HS) sowie Jahresarbeitszahl des WP-Systems (JAZ2) der vier untersuchten TWW-Varianten.

Die benötigte Zapfenergie ist in allen vier Varianten in etwa gleich. Durch die unterschiedlichen Systemtemperaturen variieren jedoch die Speicher- und Verteilverluste (siehe auch Kapitel 4.2) und damit die bereitgestellte Wärmemenge. Außerdem sind Unterschiede in der Aufteilung zwischen WP und Heizstab zu erkennen. Während in den Varianten 1 und 2 aufgrund der hohen notwendigen Temperaturen der Heizstab in etwa 22 % (davon 60 % zur Legionellschaltung) bzw. 15 % des TWW-Bedarfs deckt, kann die WP in den Varianten 3 und 4 nahezu den gesamten Wärmebedarf bereitstellen. Der Anteil des Heizstabes aber auch die bereitgestellte Temperatur der WP haben einen Einfluss auf die  $JAZ2_{TWW}$  der TWE und damit auch auf die des Gesamtsystems. So kann die  $JAZ2_{TWW}$  durch den Einsatz einer Frischwasserstation (Variante 2) von etwa 1,5 in der Referenzvariante 1 aufgrund des fehlenden Wärmeübertragers auf Seiten der Wärmepumpe und aber vor allem aufgrund des fehlenden Aufheizens der Vorwärmstufe (Aufheizen des gesamten Speicherinhalts einmal am Tag auf min. 60 °C) auf 2,0 gesteigert werden.

Durch die Verminderung der TWW-Temperatur in Variante 3 und 4 kann die  $JAZ2_{TWW}$  weiter bis auf 3,2 erhöht werden. Dadurch verbessert sich die Performance des Gesamtsystems ( $JAZ2_{Gesamt}$ ) von 2,4 in der Referenzvariante auf 3,3 in Variante 3 und 4. Der Endenergieverbrauch (Stromverbrauch des Gesamtsystems) verringert sich von etwa 83 MWh/a um fast 30 % auf etwa 60 MWh/a.

Tabelle 5: Gesamtübersicht der vier Systemvarianten (Jahreswerte).

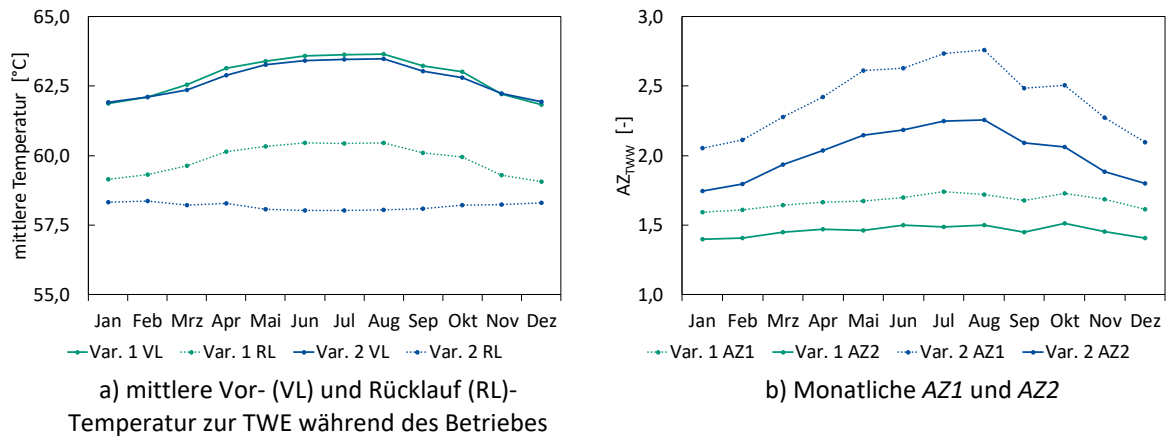
Variante		1	2	3	4
<b>Bereitgestellte Heizwärme</b>	MWh	129,9	131,1	130,1	130,8
- Wärmepumpe	MWh	129,2	130,5	129,4	130,0
- Heizstab	MWh	0,7	0,6	0,7	0,7
<b>Strombezug zur Raumheizung</b>	MWh	38,3	39,1	38,7	38,8
- Wärmepumpe	MWh	37,7	38,5	38,1	38,1
- Heizstab	MWh	0,7	0,6	0,7	0,7
<b>Mittlere Raumtemperatur Heizperiode (Okt. – Mrz.)</b>	°C	19,7	19,9	19,8	19,8
<b>Zapfenergie (Gesamtgebäude)</b>	MWh	46,9	46,8	46,9	45,6
<b>Bereitgestellte Wärme zur TWE</b>	MWh	62,1	63,4	58,2	58,0
- Wärmepumpe	MWh	48,6	54,5	58,1	58,0
- Heizstab	MWh	13,5	8,9	0,1	0,1
<b>Strombezug zur TWE</b>	MWh	42,6	31,7	18,1	18,0
- Wärmepumpe	MWh	29,1	22,8	18,0	17,9
- Heizstab	MWh	13,5	8,9	0,1	0,1
<b><math>JAZ2_{Gesamt}</math></b>	-	2,4	2,7	3,3	3,3
<b><math>JAZ2_{Heiz}</math></b>	-	3,4	3,4	3,4	3,4
<b><math>JAZ2_{TWW}</math></b>	-	1,5	2,0	3,2	3,2
<b><math>JAZ1_{Gesamt}</math></b>	-	2,7	3,0	3,3	3,4
<b><math>JAZ1_{Heiz}</math></b>	-	3,4	3,4	3,4	3,4
<b><math>JAZ1_{TWW}</math></b>	-	1,7	2,4	3,2	3,2
<b>Mittlere Temperatur WP zur Raumheizung</b>	°C	40,8	40,9	40,7	40,9
<b>Mittlere Temperatur WP zur TWE</b>	°C	61,3	60,4	51,0	51,0
<b>Anteil WP Gesamt</b>	%	92,6	95,1	99,6	99,6
<b>Anteil WP Heizung</b>	%	99,5	99,5	99,5	99,4
<b>Anteil WP TWW</b>	%	78,2	85,9	99,9	99,9
<b>Strombezug Gesamt (incl. Pumpen)</b>	MWh	82,8	73,1	59,6	59,8

Für den Gesamtsystemvergleich wird neben der Erwärmung von TWW auch die Raumheizung analysiert. In allen vier Varianten liegt die bereitgestellte Wärmemenge unter dem gemessenen Mittelwert der Jahre 2016 - 2018. Dies ist stark von den verwendeten Wetterdaten abhängig: die Tagesmitteltemperatur fällt nur an drei Tagen im Jahr unter -5 °C. Daraus leitet sich auch der geringe Einsatz des elektrischen Zusatzheizers ab. Die Unterschiede der bereitgestellten Wärmemenge zur Raumheizung zwischen den vier Varianten resultieren aus der TWW-Vor-rangschaltung im Zusammenspiel mit der Regelung der einzelnen TWW-Varianten und den damit verbundenen Einsatzzeiten der WP. Der Heizbedarf wird jedoch in allen Varianten gedeckt: die mittlere Raumtemperatur in der Heizperiode liegt in allen Varianten knapp unter 20 °C. Aufgrund der nicht veränderten Raumheizung ist die

Jahresarbeitszahl des WP-Systems bei Heizwärme-Bereitstellung ( $JAZZ_{Heiz}$ ) der vier Varianten annähernd gleich bei ca. 3,4.

## 4.2 Detaillierter Vergleich

Für einen detaillierten Vergleich zur TWE werden im Folgenden zunächst die beiden Hochtemperatur-Varianten 1 und 2 eingehend untersucht. Dazu ist die neben der Performance des Systems im TWW-Betrieb auch die der WP (mittlere Vor- und Rücklauftemperaturen während des Betriebes sowie die Monatswerte der  $AZ1_{TWW}$  und  $AZ2_{TWW}$ ) im Jahresverlauf dargestellt (siehe Bild 10).



**Bild 10:** Performance der WP zur TWE der Varianten 1 und 2.

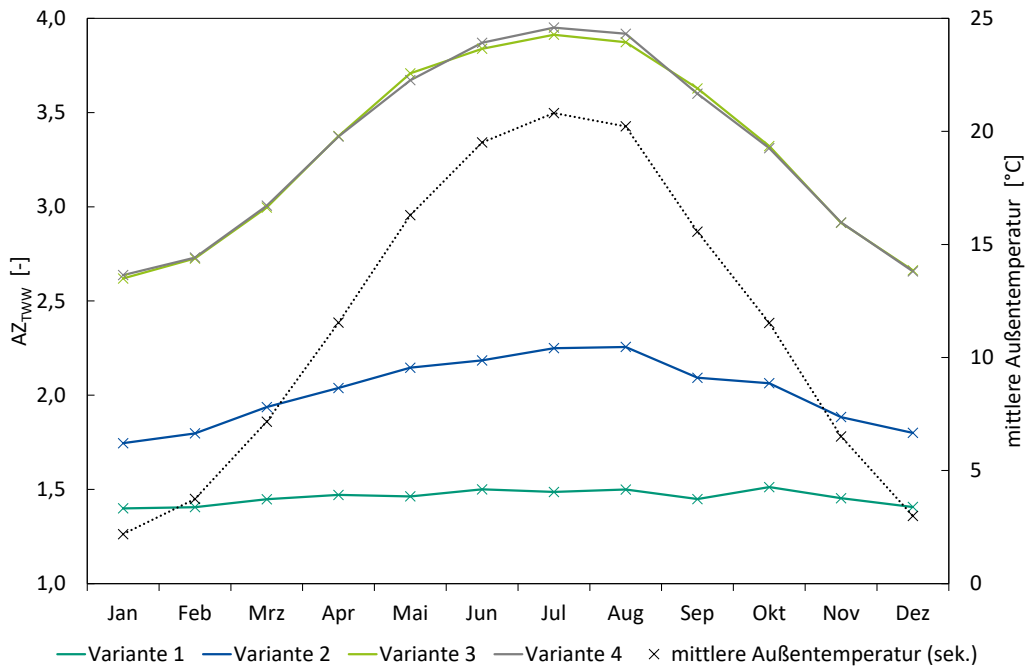
Es ist zu erkennen, dass sich die  $AZ1_{TWW}$  bei der Variante 1 im Jahresverlauf kaum ändert. Mit steigender mittlerer Außentemperatur im Sommer nimmt die theoretische Heizleistung der Wärmepumpe bei annähernd konstanter el. Leistungsaufnahme zu (vgl. Bild 8). Diese wird jedoch durch die begrenzte Leistung des internen Wärmeübertragers im TWW-Speicher beschränkt. Somit kann sich der positive Effekt der höheren Außentemperaturen in den Sommermonaten nur gering auswirken und die Übertragungsleistung der WP im TWE-Betrieb variiert im Jahresverlauf kaum. Mit einer ebenfalls konstanten el. Leistungsaufnahme ergibt sich daher eine annähernd konstante  $AZ1_{TWW}$ .

Aufgrund der leicht erhöhten Heizleistung in den Sommermonaten erreicht die WP schneller ihre maximale VL-Temperatur. Dadurch steigt die mittlere Vorlauf (VL)-Temperatur zur TWE an. Auch hier ist die Limitierung durch den Wärmeübertrager im TWW-Speicher erkennbar: die Temperaturdifferenz zwischen VL und Rücklauf (RL) der WP nimmt mit erhöhter Außentemperatur nur gering zu. Somit steigt die mittlere RL-Temperatur auch im Sommer an. Dies wirkt sich zusätzlich negativ auf die  $AZ1_{TWW}$  der WP aus.

Durch das Aufheizen der Vorwärmstufe einmal am Tag verändert sich der Anteil des Heizstabes zur TWE in Variante 1 im Jahresverlauf kaum, wodurch auch die  $AZ2_{TWW}$  annähernd konstant bleibt. Bei Variante 2 nimmt die  $AZ1_{TWW}$  mit steigender Außentemperatur zu. Durch die höheren VL-Temperaturen in den Sommermonaten sinkt der Anteil des Heizstabes zur TWE, wodurch die  $AZ2_{TWW}$  ebenfalls ansteigt.

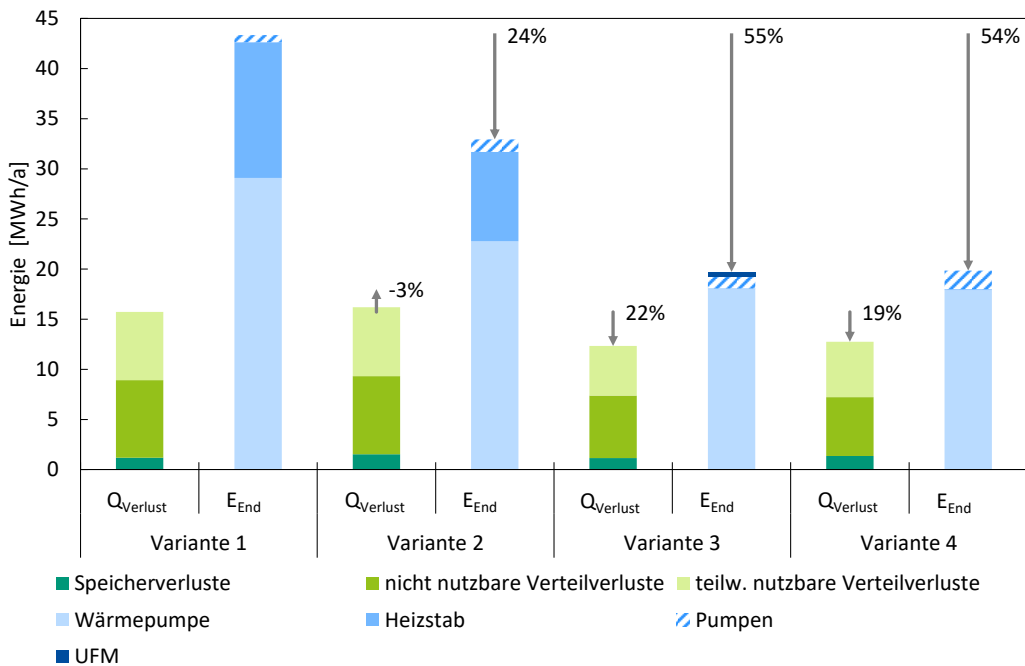
Zwischen den beiden Niedertemperatur-Varianten 3 und 4 lassen sich aufgrund ähnlicher Temperaturniveaus und einer annähernd gleichen Regelung kaum Unterschiede im Jahresverlauf der mittleren Temperaturen während des Betriebes und der AZ erkennen. Da die WP zudem nahezu den gesamten Wärmebedarf zur TWE deckt, unterscheiden sich hier die  $AZ1_{TWW}$  kaum von der  $AZ2_{TWW}$ . In Bild 11 ist daher die Performance des WP-Systems zur TWE ( $AZ2_{TWW}$ ) der vier untersuchten Varianten im Jahresverlauf dargestellt.

Vor allem in Variante 3 und 4 lässt sich gut die Abhängigkeit der  $AZ_{TWW}$  von der mittleren Außentemperatur erkennen: mit steigender mittlerer Außentemperatur nimmt auch die  $AZ_{TWW}$  zu. Durch die geringere notwendige Vorlauf-Temperatur kann die WP in beiden Niedertemperatur-Varianten auf einem ähnlichen Niveau wie bei der Wärmebereitstellung zur Raumheizung arbeiten. Vor allem bei hohen Außentemperaturen in den Sommermonaten kann die Wärmepumpe dadurch Werte der monatlichen  $AZ_{TWW}$  von über 3,9 erreichen.



**Bild 11:** Performance der WP zur TWE (AZ<sub>TWW</sub>) der untersuchten Varianten.

Neben der AZ sollen zur Bewertung der Performance der vier Varianten die Verluste sowie die benötigte Endenergie zur TWE verglichen werden. Dazu sind in Bild 12 und Tabelle 6 die Jahressummen der Verluste (Speicher- verluste, nicht nutzbare Verluste im unbeheizten Bereich und teilweise nutzbare Verluste im beheizten Bereich des Gebäudes) und der benötigten Endenergie (Strombezug WP, Heizstab, Pumpen und UFM) dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturniveaus der TWE unterscheiden sich die Verluste der vier Systeme. Variante 2 hat durch die hohe notwendige Temperatur im Pufferspeicher der TWW-Bereitung die höchsten Speicher- und Verteilverluste. Durch die Temperaturabsenkung in Variante 3 und 4 können im Gegensatz zu Variante 1 und 2 in etwa 20 % der Speicher- und Verteilverluste eingespart werden. Die bereitgestellte Wärmemenge zur TWE verringert sich um etwa 6 %.



**Bild 12:** Verluste und Endenergieverbrauch der TWE-Varianten.

Aufgrund der geringeren bereitgestellten Wärmemenge aber vor allem aufgrund der deutlich besseren AZ der WP und dem geringeren Einsatz des Heizstabes kann der Endenergieverbrauch zur TWE deutlich gesenkt werden. So können in Variante 3 und 4 über 50 % des Endenergieverbrauchs im Vergleich zur Referenzvariante 1 eingespart werden. Der zusätzliche Stromverbrauch durch den Einsatz der UFM bzw. der Wohnungsstationen hat aufgrund der relativ geringen mittleren Leistungsaufnahme von 50 W [9] bei der UFM und 5 W [17] pro Wohnungsstation trotz Dauereinsatz kaum einen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

**Tabelle 6:** Übersicht über die TWE der vier Systemvarianten (Jahreswerte).

Variante		1	2	3	4
<b>Wärmebedarf TWW</b>	MWh	46,9	46,8	46,9	45,6
<b>Bereitgestellte Wärme zur TWE</b>	MWh	62,1	63,4	58,2	58,0
- <b>Wärmepumpe</b>	MWh	48,6	54,5	58,1	58,0
- <b>Heizstab</b>	MWh	13,5	8,9	0,1	0,1
<b>Mittlere VL-Temp. während des Betriebes</b>	°C	62,8	62,8	53,6	53,6
<b>Mittlere RL-Temp. während des Betriebes</b>	°C	59,8	58,2	48,5	48,5
<b>Verluste</b>	MWh	15,7	16,2	12,3	12,7
- <b>Speicherverluste</b>	MWh	1,2	1,5	1,1	1,4
- <b>Nicht nutzbare Verluste</b>	MWh	7,7	7,8	6,2	5,9
- <b>Teilw. Nutzbare Verluste</b>	MWh	6,8	6,9	4,9	5,5
<b>Einsparung ggü. Variante 1</b>	%	0,0	-3,0	21,6	18,9
<b>Strombezug zur TWE</b>	MWh	43,3	32,9	19,7	19,9
- <b>Wärmepumpe</b>	MWh	29,1	22,8	18,0	17,9
- <b>Heizstab</b>	MWh	13,5	8,9	0,1	0,1
- <b>Pumpen</b>	MWh	0,7	1,3	1,2	1,9
- <b>UFM</b>	MWh	0,0	0,0	0,4	0,0
<b>Einsparung ggü. Variante 1</b>	%	0,0	24,0	54,5	54,0

## 5 Fazit und Ausblick

### 5.1 Fazit

Die Ergebnisse der Jahressimulationen zeigen, dass:

- Durch eine Absenkung der Temperatur im TWW-Verteilssystem von 60 °C auf 50 °C können die thermischen Speicher- und Verteilverluste um etwa 20 % gesenkt werden.
- Durch den Einsatz einer Frischwasserstation kann die  $JAZZ_{TWW}$  von etwa 1,5 in der Referenzvariante mit internem Wärmeübertrager auf 2,0 gesteigert werden. Dies ist auf den fehlenden Lade-Wärmeübertrager und das fehlende Aufheizen der Vorwärmstufe (Aufheizen des gesamten Speicherinhalts einmal am Tag auf 60 °C) zurückzuführen. Durch die Verringerung der TWW-Temperatur durch Ultra-Filtration bzw. durch dezentrale Frischwasserstationen kann diese noch weiter bis etwa 3,2 gesteigert werden. Die Performance des internen Wärmeübertragers ist stark vom gewählten Wärmeübertragungskoeffizienten abhängig: Mit einem verbesserten Wärmeübertragungskoeffizienten kann die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der WP vergrößert und somit der Betrieb optimiert werden.
- Der Anteil der Wärmepumpe zur TWE kann durch die Temperaturabsenkung von etwa 78 % auf nahezu 100 % gesteigert werden kann. In Variante 2 liegt der Anteil des Heizstabes bei 15 %. Um die Performance des Gesamtsystems weiter zu verbessern sollte der Heizstab möglichst selten zugeschaltet werden.
- Die Performance des Gesamtsystems ( $JAZZ_{Gesamt}$ ) kann von 2,4 in der Referenzvariante mit internem Wärmeübertrager auf 3,3 in den Varianten mit geringer TWW-Temperatur (Ultrafiltrationseinheit bzw. dezentrales TWW-System) gesteigert werden. Damit verringert sich der Stromverbrauch des Gesamtsystems von etwa 83 MWh/a um fast 30 % auf etwa 60 MWh/a.

Die hier gezeigten Jahressimulationen wurden für ein beispielhaftes MFH in Karlsruhe durchgeführt. Aufgrund der Dimensionierung und der energetischen Eigenschaften repräsentiert das Gebäude einen signifikanten Anteil des Mehrfamilienhausbestandes in Deutschland. Dennoch sind die Ergebnisse stark von der implementierten Regelung des Gesamtsystems, der Auslegung der Komponenten sowie dem Anteil der TWE am Gesamtenergiebedarf abhängig. Für die Jahressimulationen wurden die Regelparameter so gewählt, dass die Last zu jedem Zeitpunkt gedeckt werden kann. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden außerdem die Wärmepumpen- und Heizleistung sowie das Speichervolumen zwischen den Varianten nicht verändert.

Neben den reinen Betriebsparameter (JAZ, Endenergieverbrauch) unterscheiden sich die untersuchten Varianten auch in den Invest- und Wartungskosten. So müssen für den Einsatz einer Ultrafiltrationseinheit vor allem zu Beginn die hygienischen Anforderungen regelmäßig überprüft werden.

Da der Einsatz der Ultrafiltration bisher noch nicht ausreichend erprobt ist, sind Vorgaben zum Schutz der Verbraucher notwendig. Diese Vorgaben wurden durch den DVGW erarbeitet und in den Rahmenbedingungen für die wissenschaftlich begleiteten Feldversuche niedergelegt. Damit kann unter Praxisbedingungen die Leistungsfähigkeit und die Sicherheit des Betriebs von Ultrafiltrationsanlagen zum Zweck der Verhinderung einer Legionellen-Kontamination bei abgesenkter Trinkwassertemperatur weitgehend untersucht und nachgewiesen werden. So muss z.B. das zuständige Gesundheitsamt einbezogen werden, die Verbraucher schriftlich informiert und die erforderlichen Probenahmestellen durch einen externen Gutachter festgelegt werden. Nach einer erfolgreichen Erstuntersuchung kann mit der stufenweisen Temperaturabsenkung begonnen werden. Hier erfolgt ebenfalls eine regelmäßige Betriebsüberwachung. Bei dem hier betrachteten Gebäude sind mindestens 9 Probenahmestellen vorzusehen. Zur Betriebsüberwachung sind etwa 100 Beprobungen in den ersten 12 Monaten notwendig. [18]

Die Umstellung auf ein dezentrales TWE-System ist aufgrund des erhöhten Aufwandes (Bauarbeiten in allen Wohneinheiten) und höheren Investkosten herausfordernd. Müssen allerdings im Sanierungsfall die Verteilungen sowieso erneuert werden, ergibt sich durch diese Umstellung eine energieeffiziente und hygienische Variante zur TWE.

## 5.2 Ausblick

Für einen aussagekräftigeren Vergleich der TWE-Varianten sollen Auslegung, Betriebsführung und Regelung der Varianten durch eine umfassende Parameter-Variation weiter optimiert werden. So kann z.B. durch eine temperaturabhängige Einschichtung des Rücklaufs die Performance einer Frischwasserstation verbessert werden.

Das Verteilsystem soll außerdem mit einer Verknüpfung zum Gebäudemodell erweitert werden. So können die nutzbaren Verluste quantifiziert und das Verteilsystem dementsprechend optimiert werden. In diesem Zuge soll auch die jahreszeitliche Schwankung der Frischwassertemperatur implementiert und der Einfluss einer Abschaltung der Zirkulationspumpe in der Nacht untersucht werden.

Ein umfassender Vergleich der Varianten ist nur durch eine Vollkosten-Rechnung (Invest- und Betriebskosten) für den Fall der Sanierung der Wärmeversorgung im Bestand möglich.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt / Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Energieverbrauch privater Haushalte, 2020. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>, abgerufen am: 22.09.2020
- [2] Lämmle, M., Hess, S. u. Herkel, S.: Smart Urban Energy Concept: Integration of Heat Pumps, PV, Cogeneration, and District Heating in existing Multi-Family Buildings. In: EuroSun 2020, Athen, S. 1–12
- [3] Ebert, B.: Systematische Analyse von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden, Abschlussbericht zu AP 1.1 des Projekts LowEx im Bestand, Karlsruhe 2018
- [4] DIN EN 12831-1:2017. Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017
- [5] Techem Energy Services GmbH: Techem Studie: Techem Energiekennwerte 2018. 2018
- [6] Jank, R., Lämmle, M., Hess, S. u. Kropp, M.: Verbundprojekt Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach (SQ-Durlach). Projektbericht Phase A: Konzeptentwicklung, unveröffentlichter Projektbericht, 2020

- [7] Jagnow, K. u. Wolff, D.: Abschlussbericht: Umweltkommunikation in der mittelständigen Wirtschaft am Beispiel der Optimierung von Heizungssystemen durch Information und Qualifikation zur nachhaltigen Nutzung von Energieeinsparpotenzialen. Teil 2: Technische Optimierung und Energieeinsparungen. Wilhelmshaven: Im Auftrag der OPTIMUS-Gruppe 2008
- [8] Technische Regel Arbeitsblatt W551:2004-04. Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen
- [9] Solvis GmbH: SolvisClean. Energieeffiziente Trinkwasserhygiene, Produktbroschüre, 2016. <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/solvis-files/downloads/broschueren/solvisclean-produktbroschuere.pdf>, abgerufen am: 01.11.2020
- [10] DIN 1988-300:2012-05, Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 300: Ermittlung der Rohrdurchmesser; Technische Regel des DVGW
- [11] Jordan, U. u. Vajen, K.: Influence of the DHW load profile on the fractional energy savings. Solar Energy 69 (2001), S. 197–208
- [12] DIN EN ISO 13790:2008. Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung
- [13] Albers, K.-J. (Hrsg.): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Einschließlich Trinkwasser- und Kälte-technik sowie Energiekonzepte. Recknagel Edition. Augsburg: ITM InnoTech Medien GmbH 2018
- [14] Stadtwerke Karlsruhe GmbH: Online Messwerte des Trinkwassers in Karlsruhe. [https://www.stadtwerke-karlsruhe.de/swk/privatkunden/trinkwasser/wasserqualitaet.php#anchor\\_e2694e1a\\_Accordion-1-Temperatur-](https://www.stadtwerke-karlsruhe.de/swk/privatkunden/trinkwasser/wasserqualitaet.php#anchor_e2694e1a_Accordion-1-Temperatur-), abgerufen am: 28.10.2020
- [15] VDI 4645:2018. Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern. Planung, Errichtung, Betrieb
- [16] Austria Email AG: Frischwasserkombination ECO FRESH-E (EZ), Produktbroschüre. [https://www.solfio.de/media/pdf/2b/61/07/AustriaEmail\\_FRISCHWASSERKOMBINATION\\_ECO-FRESH-E\\_Prospekt\\_Daten.pdf](https://www.solfio.de/media/pdf/2b/61/07/AustriaEmail_FRISCHWASSERKOMBINATION_ECO-FRESH-E_Prospekt_Daten.pdf), abgerufen am: 29.10.2020
- [17] Bosch Thermotechnik GmbH: Frischwasserstation Logalux, Installations- und Wartungsanleitung, 2017. [https://productsde.buderus.com/buderus/productsde.buderus.com/products\\_de/15--freshwaterstation/01-fs-2/installationsanleitung-logalux-fs2](https://productsde.buderus.com/buderus/productsde.buderus.com/products_de/15--freshwaterstation/01-fs-2/installationsanleitung-logalux-fs2), abgerufen am: 09.12.2020
- [18] DVGW: Absenkung der Temperatur des Trinkwassers (warm) bei mikrobiologisch und technisch einwandfreien Trinkwasser-Installationen. Rahmenbedingungen für die hygienisch sichere Erprobung der Ultrafiltration bei wissenschaftlich begleiteten Feldversuchen innerhalb von Forschungsprojekten, die vom DVGW begleitet werden, DVGW-Position, 2018