Energetische Bewertung von Maßnahmen zur hygienischen Absenkung der Trinkwarmwassertemperatur in Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpen

Oliver Mercker, Modar Yasin, Christoph Büttner, Peter Pärisch

Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal

1 Einleitung

Raumwärme und Trinkwarmwasser machen zusammen etwa ein Drittel des deutschen Endenergieverbrauchs (kurz: EEV) aus. Pro Einwohner sind dies etwa 10 MWh/a. Etwa die Hälfte davon (entspricht insgesamt 15 % des gesamten EEV) entfällt auf Mehrfamilienhäuser (vgl. **Abb. 1**).

Der personenbezogene Heizwärmebedarf ist aufgrund steigender Wärmeschutzanforderungen, milder Winter und trotz steigender Wohnflächenansprüche leicht rückläufig. Der Endenergieverbrauch für Trinkwassererwärmung beträgt weitgehend konstant ca. 5 %, sodass seine Bedeutung für den Wärmesektor zunimmt. Der damit zusammenhängende jährliche CO_2-Ausstoß beträgt immerhin 36 Mio. t.

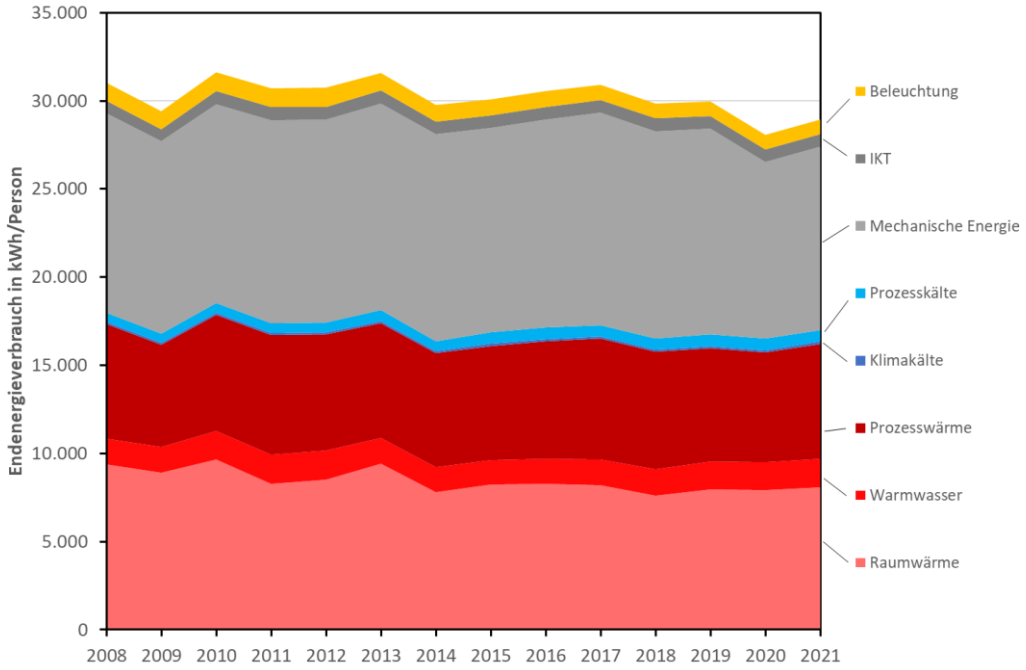


Abb. 1: *Endenergieverbrauch nach Anwendungsgebieten für die Jahre 2008-2021 (nach AG Energiebilanzen)*

Darüber hinaus bestimmt die Trinkwassererwärmung immer häufiger das zu erreichende Mindest-Temperaturniveau des Wärmeerzeugers. Aus hygienischen Gründen ist eine um 15 bis 20 K höhere Temperatur des Trinkwarmwassers gegenüber der eigentlichen Nutztemperatur von etwa 40 bis 45 °C für häusliche Anwendungen notwendig. Für Großanlagen mit zentraler Trinkwassererwärmung fordern die allgemein anerkannten Regeln der Technik (kurz: a.a.R.d.T.) 60 °C am Austritt des Wassererwärmers. Für Kleinanlagen und Einfamilienhäuser werden lediglich 50 °C empfohlen (vgl. [Dvgw04], [Dine05], [Din12] und [Vdid13]).

Diese Temperaturüberhöhung ist einer der Gründe dafür, warum regenerative Wärmeerzeuger, wie Wärmepumpe und Solarthermie, nur sehr geringe Marktanteile im Mehrfamilienhaus (MFH) oder anderen großen Trinkwasserinstallationen erreichen. Um dieses Hemmnis zu überwinden, sind geeignete Konzepte zur TWW-Bereitung mit WP-Systemen erforderlich, wie sie im vorliegenden Beitrag eingehend vorgestellt und analysiert werden.

1.1 Projektziele

Zielstellung des zugrunde liegenden Projekts „WP-HYG“ ist der simulationstechnische Vergleich von Transformationsmaßnahmen zur Absenkung der Trinkwarmwassertemperatur in MFH mit hohen Dämmstandards und deren Bewertung anhand eines erdgekoppelten, Inverter-geregelten Wärmepumpensystems. Die Transformationsmaßnahmen werden mit zwei Referenzsystemen verglichen.

Als **erstes Referenzsystem** wird ein zentraler TWW-Speicher mit Vier-Leiter-Netz verwendet und gemäß den a.a.R.d.T. mit $T_{VL}/T_{Zirkulation}$ von 60/55 °C betrieben. Aufgrund der geringen Übertragungsleistung innenliegender Wärmeübertrager sowie der ungenügenden Verfügbarkeit von Wärmepumpen (WP), die über 65 °C im Vorlauf erreichen können, wird hier ein Gas-Brennwertkessel eingesetzt. Das System wird mit einer Solarthermieanlage zur Trinkwassererwärmung kombiniert, die gemäß GEG 15 % des Wärmebedarfs des Gebäudes abdeckt.

Das **zweite Referenzsystem** ist eine vollelektrische Durchfluss-Trinkwassererwärmung auf 45 °C. Eine modulierende erdreichgekoppelte WP deckt den über einen Heizungspufferspeicher vermittelten Raumwärmebedarf der Fußbodenheizung.

Die beiden folgenden Versorgungsoptionen werden als Transformationsmaßnahmen untersucht und mit den Referenzsystemen verglichen.

1. Umstellung auf zentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmung (DTE) mit Vier-Leiter-Netz. Die höhere Übertragungsleistung des DTE ermöglicht eine bivalente, monoenergetische Wärmepumpenlösung. Für den Spitzenbedarf unterstützt ein Elektro-Heizstab.
    a. Betrieb gemäß den in Deutschland a.a.R.d.T. (60/55 °C)
    b. Betrieb gemäß SIA 385-1 bei hygienisch optimalen Betriebsvoraussetzungen (55/52 °C)[1]
    c. Betrieb bei 48/45 °C mit Ultrafiltration im Bypass zur Zirkulation, unter der Annahme parallelen hygienischen Monitorings
2. Umstellung auf dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmung. Aufgrund der niedrigeren Vorlauftemperatur ins Zwei-Leiter-Netz für die Trinkwassererwärmung kann eine monovalente WP eingesetzt werden. Als Alternativkonzept wird zudem auch ein Vier-Leiter-Netz betrachtet.
    a. Betrieb gemäß SIA 385-1 (52 °C), was für Deutschland eine Verschärfung wäre
    b. Betrieb gemäß den a.a.R.d.T. (45 °C), bei weniger als 3 l bis zur entferntesten Zapfstelle
    c. Vorheizung auf 38 °C und elektrische Nacherhitzung auf 45 °C mit Durchlauferhitzer

Die Ergebnisse werden hinsichtlich energetischer und ökologischer Kennzahlen miteinander verglichen. Es ist davon auszugehen, dass gegenüber dem fossil versorgten Referenzsystem eine CO_2-Einsparung von 75 % erzielt werden kann. Dies ist durch einen Wechsel des Wärmeerzeugers und geringere Wärmeverluste im System begründet.

1.2 Projektmethode

Die eben genannten Versorgungsoptionen werden in einer Simulationsstudie mit der Software TRNSYS (Version 18.04.0001) miteinander verglichen[2]. Dazu wird eine gekoppelte, dynamische Jahressimulation von Gebäude und Anlagentechnik mit einer zeitlichen Auflösung von 1 min durchgeführt. Eine kurze Beschreibung der verwendeten Gebäude- und Systemmodelle sowie der aufgeprägten Randbedingungen findet sich im Folgenden.

---

[1] Hygienisch optimale Betriebsvoraussetzungen sind gemäß der Schweizer Norm *SIA 385-1* die thermische Trennung von Kalt- und Warmwasser, die Ringinstallation von Kaltwasser, der hydraulische Abgleich von Zirkulationssträngen sowie der Verzicht auf Dämmung in nicht warmgehaltenen Leitungen.

[2] TRNSYS bietet eine umfangreiche, modular aufgebaute Simulationsumgebung zur Untersuchung dynamischer Systeme. Besonders geeignet ist es zur integrierten Betrachtung des thermischen Verhaltens von Anlagentechnik und Gebäuden mit mehreren „thermischen Zonen“ [TRN17].

2 Gebäudemodell

Das Gebäudemodell bildet ein repräsentatives freistehendes Mehrfamilienhaus mit acht Wohneinheiten à 84 m² auf vier Etagen ab. Die Wandaufbauten sind dabei so gewählt, dass sie einem sanierten Gebäude mit Baujahr 1960 entsprechen. Die Gebäudehöhe beträgt 12 m über der Geländeoberkante – weitere 1,75 m befinden sich unterhalb der Geländeoberkante. Zudem werden ein unbeheizter Keller mit 183 m² sowie ein durchgehendes Treppenhaus berücksichtigt – beide jeweils als eine zusammenhängende thermische Zone. Die nachfolgende **Abb. 2** zeigt eine dreidimensionale Ansicht des Gebäudes (links) sowie eine Draufsicht mit Bezeichnungen für die einzelnen Räume einer Etage (rechts). Das Gebäude ist zudem symmetrisch aufgebaut (siehe horizontale Symmetrieachse).

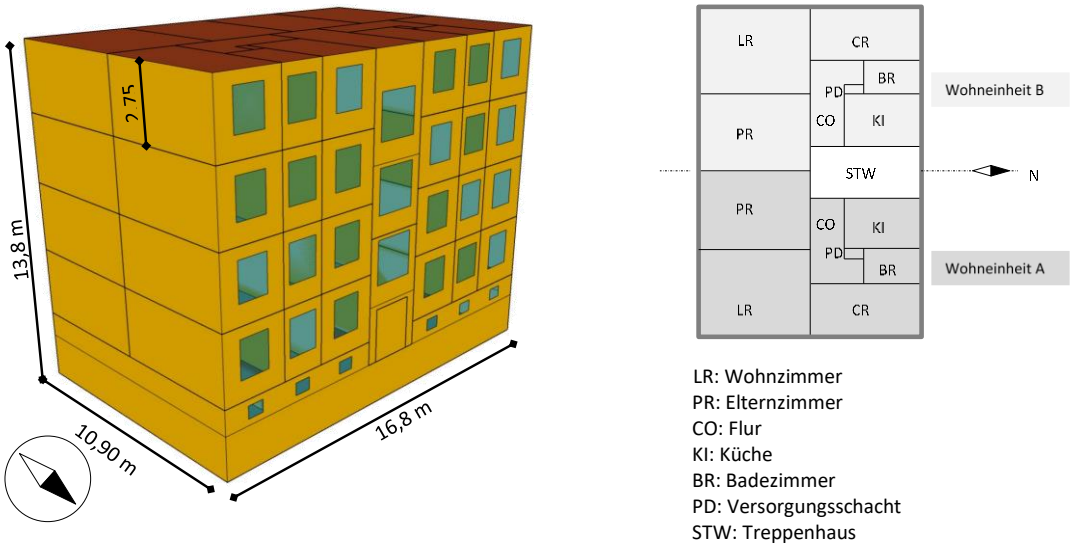


Abb. 2: *3D-Modell des untersuchten Gebäudes mit Außenmaßen (links) und Grundriss der Wohnungen (rechts)*

Im Gegensatz zu anderen Simulationsstudien werden die Verteilungs- und Speicherverluste mit dem Gebäude gekoppelt. Dadurch wird auch der nutzbare Anteil der Wärme aus den Rohrleitungen und Speichern berücksichtigt (vgl. [Merc17]). Die Wärmeverluste aus den Steigleitungen der jeweiligen Systeme werden in den Versorgungsschächten (PD) eingekoppelt, während die Speicherverluste im unbeheizten Keller anfallen. Die Verluste der Anbindeleitungen der Fußbodenheizungen werden im unbeheizten Flur (CO) einer jeden Wohnung berücksichtigt. Weitere bauphysikalische Details zum Gebäudemodell (bspw. Wandaufbauten) sind dem bald erscheinenden Bericht zum Projekt „WP-HYG“ zu entnehmen[3].

3 Randbedingungen

Die für die sich noch anschließenden Betrachtungen relevante **Heizlast** des obigen Gebäudemodells beträgt etwa 13 kW und ergibt sich aus der eben dargestellten Gebäudegeometrie, den bauphysikalischen Gebäudeeigenschaften und den Raumsolltemperaturen sowie den verwendeten Klimadaten.

Die **Raumsolltemperaturen** werden wie folgt vorgegeben: Im Badezimmer werden 23 °C, im Wohnzimmer 22 °C, im Kinderzimmer 21 °C, in der Küche 20 °C und im Schlafzimmer 17 °C angestrebt, sofern der Tagesmittelwert der Umgebungstemperatur einen Wert von 15 °C nicht überschreitet. Die **Wetterdaten**: Umgebungstemperatur sowie Strahlungsdaten und Windgeschwindigkeiten entsprechen dem Testreferenzjahr (TRY) 2015-Datensatz für den Standort Hannover.

Neben der Raumheizlast ist die Vorgabe eines **TWW-Verbrauchs** erforderlich. Die TWW-Zapfprofile wurden mit der freien Software DHWcalc erzeugt (siehe [Jord17]). Zugrunde liegt eine Zapfmenge von

[3] Der Bericht wird in Kürze auf der Homepage des Solarforschungsinstituts www.isfh.de veröffentlicht.

28 l/(Person d) – bezogen auf eine Zapftemperatur von 45 °C. Im Gebäude verteilen sich 16 Personen auf 8 Wohneinheiten mit Belegungen zwischen 1 und 4 Person(en) gemäß **Abb. 3** (links). Für das Einzelprofil einer Wohneinheit ergibt sich eine maximale Zapfrate von 15 l/min. Die Überlagerung der Wohnungszapfprofile ergibt eine maximale Gesamtzapfrate im MFH von 1454 l/h (entspricht 24,2 l/min), was einer Gleichzeitigkeit von 21,7 % entspricht. Ein exemplarisches Zapfprofil einer Wohneinheit mit 2 Personen für die erste Woche des Jahres ist in **Abb. 3** (rechts) dargestellt. Neben Spitzen bzw. einer Häufung an Zapfungen am Morgen und gegen Mittag ist eine verminderte Zapfaktivität in den Nachtstunden erkennbar.

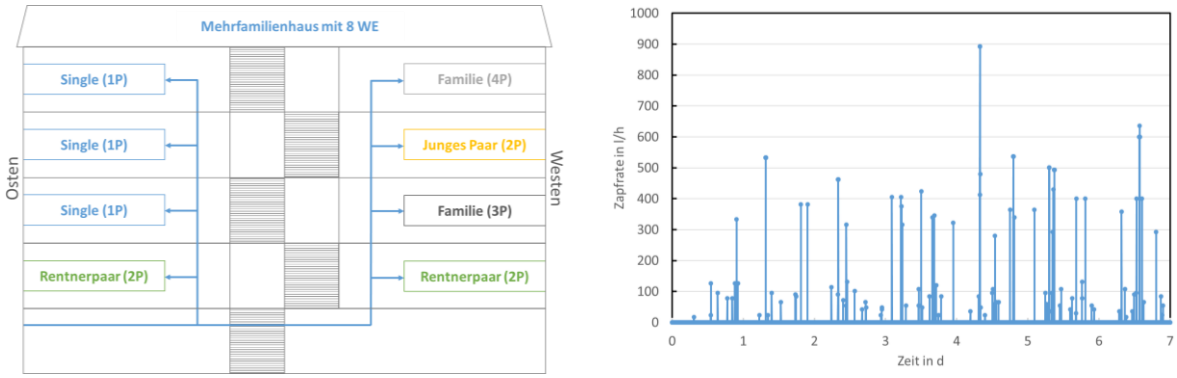


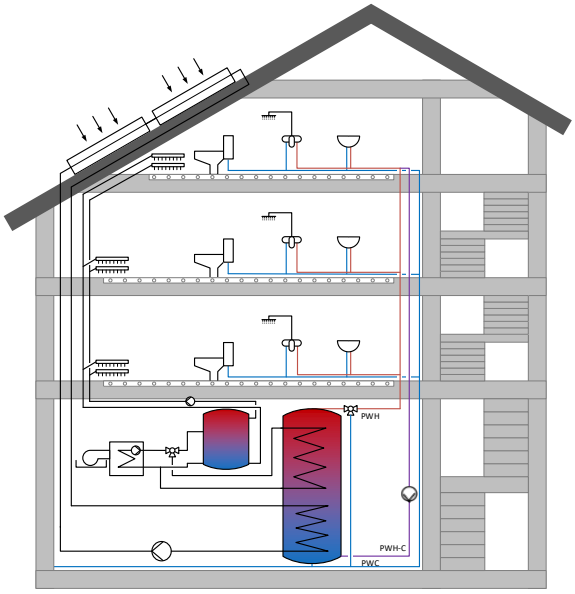
Abb. 3: *Belegung der 8 Wohneinheiten (links) und erste Woche des Zapfprofils für 2-Personen-Haushalt (rechts)*

Weitere Details zu den hier in aller Kürze umrissenen sowie zu weiteren Simulationsrandbedingungen (bspw. Lüftung und Verschattung) sind ebenso dem bald erscheinenden Projektbericht zu entnehmen.

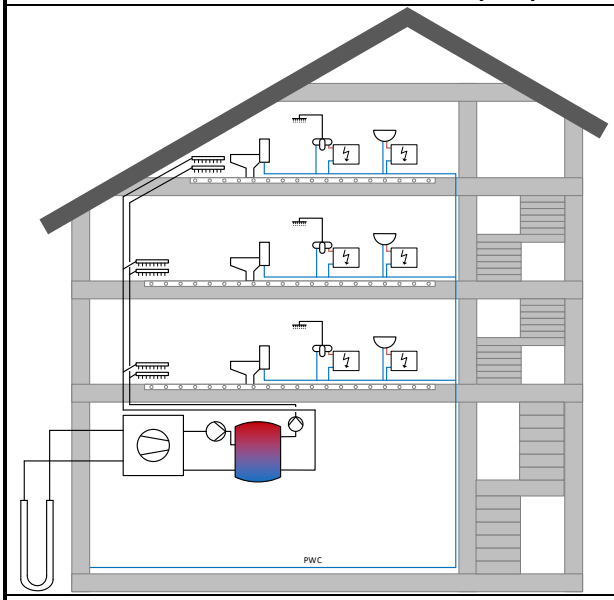
4 Systemmodelle

In der Simulationsstudie werden fünf Wärmeversorgungskonzepte samt entsprechender Varianten bzgl. der Versorgungstemperaturen betrachtet. In der folgenden **Tab. 1** sind in Form von Prinzipschaltbildern und Kurzbeschreibungen zunächst die beiden Referenzsysteme dargestellt.

Tab. 1: *Prinzipschaltbilder und Kurzbeschreibungen der Referenzsysteme der Simulationsstudie*

Zentraler Speicher-Wassererwärmer (SWE) – Referenzsystem I	
	Ein zwischen 4 und 20 kW modulierender Gas-Brennwertkessel versorgt sowohl einen 400 l Heizungspuffer als auch einen 800 l TWW-Speicher. Die Wärmeverteilung im Gebäude erfolgt über ein Vier-Leiter-Netz mit Rohrdämmung nach Norm (DIN 1988-200:2012). Die Raumheizwärmeabgabe erfolgt über Fußbodenheizungen mit witterungsgeführten Vorlauftemperaturen zwischen 25 und 35 °C. Die TWW-Versorgung erfolgt mit einer Vorlauftemperatur von 60 °C und einer minimalen Zirkulationsrücklauftemperatur von 55 °C, wobei an den Zapfstellen stets auf eine Nutztemperatur von 45 °C heruntergemischt wird. Als Effizienzmaßname wird eine Solarthermieanlage berücksichtigt, die zu einer Wärmebedarfseinsparung von 15 % nach GEG führt.
Hinweis: Das Konzept SWE stellt die Referenzsituation bezüglich der CO_2-Emissionen dar.	

Dezentrale Elektro-Durchlauferhitzer (DLE) – Referenzsystem II



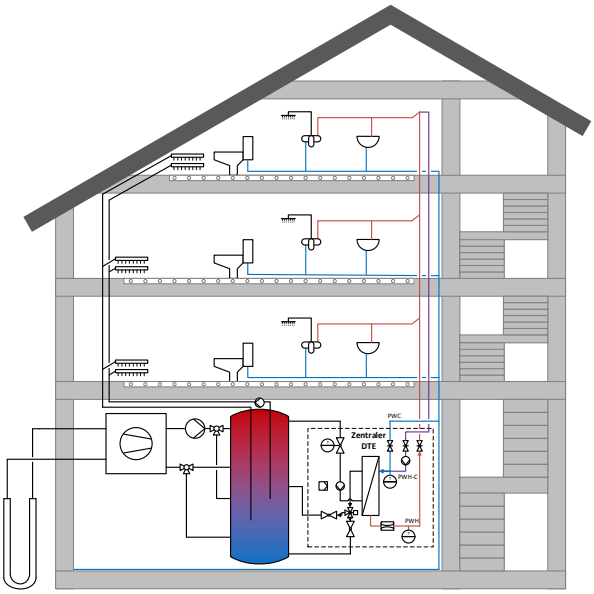
Eine zwischen 5 und 22 kW stufenlos modulierende Erdwärmepumpe versorgt einen 400 l Heizungspuffer. Von diesem ausgehend erfolgt die Wärmeverteilung im Gebäude über ein Zwei-Leiter-Netz mit Rohrdämmung nach Norm (DIN 1988-200:2012). Die Raumheizwärmeabgabe erfolgt über Fußbodenheizungen mit witterungsgeführter Vorlauftemperatur zwischen 25 und 35 °C. Die TWW-Bereitung erfolgt ausschließlich über ausreichend leistungsstarke, dezentrale elektrische Durchlauferhitzer (DLE), wobei ein konstantes TWW-Nutztemperaturniveau von 45 °C sichergestellt wird.

Hinweis: Das Konzept DLE stellt die Referenzsituation bezüglich der WP-Effizienz und des minimalen Wärmebedarfs (mit minimalen Verteil- und Speicherverlusten) dar.

Diesen beiden Referenzsystemen werden drei Transformationsmaßnahmen gegenübergestellt, deren Prinzipschaltbilder und Kurzbeschreibungen in der nachfolgenden **Tab. 2** zusammengefasst sind.

Tab. 2: *Prinzipschaltbilder und Kurzbeschreibung der simulierten Transformationsmaßnahmen (inkl. Varianten)*

Zentraler Durchfluss-Trinkwassererwärmer (FWS4L)



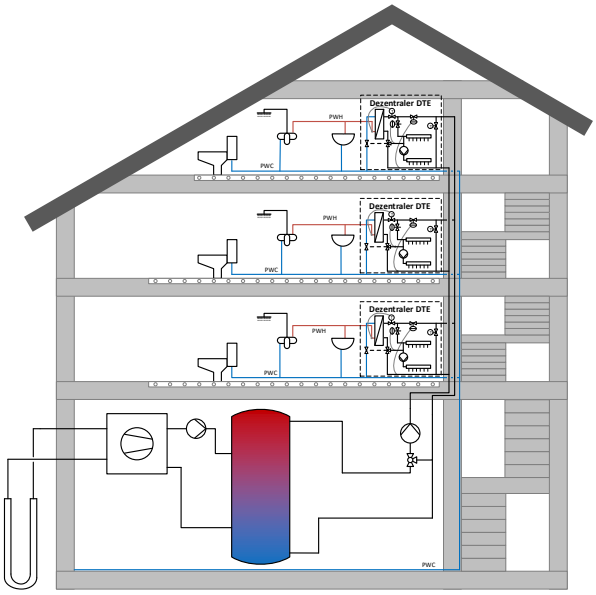
Eine zwischen 5 und 22 kW stufenlos modulierende Erdwärmepumpe versorgt einen 1600 l Pufferspeicher. Aus diesem erfolgt die Wärmelieferung an die Raumheizung und TWW-Bereitung. Die Wärmeverteilung erfolgt dabei über ein Vier-Leiter-Netz mit Rohrdämmung nach Norm (DIN 1988-200:2012). Die Raumheizwärmeabgabe erfolgt über Fußbodenheizungen mit witterungsgeführter Vorlauftemperatur zwischen 25 und 35 °C. Die TWW-Bereitung erfolgt über einen zentralen Durchflusstrinkwassererwärmer (DTE, oder auch „Frischwasserstation“, kurz: FWS), wobei drei Varianten der sekundärseitigen Austrittstemperatur aus der FWS und Zirkulationsrücklauftemperatur zur FWS betrachtet werden:

(1) 60/55 °C gemäß a.a.R.d.T.;
(2) 55/52 °C gemäß SIA 385-1;
(3) 48/45 °C mit Ultrafiltration.

Die Zapftemperatur bleibt dabei stets 45 °C.

Hinweis: Die drei in der Kurzbeschreibung genannten Varianten werden im Folgenden mit den Kürzeln FWS4L_60 für (1); FWS4L_55 für (2) und FWS4L_48 für (3) bezeichnet.

Dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer (WST2L)



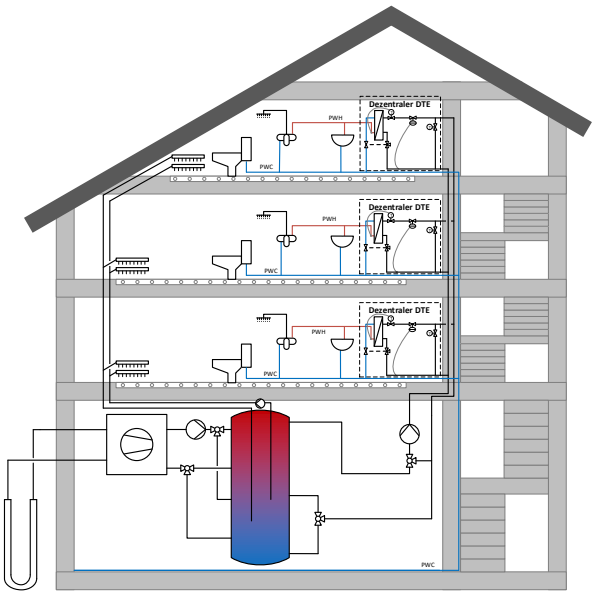
Eine zwischen 5 und 22 kW stufenlos modulierende Erdwärmepumpe versorgt einen 1600 l Pufferspeicher. Die Wärmeverteilung erfolgt über ein Zwei-Leiter-Netz mit Rohrdämmung nach Norm (DIN 1988-200:2012) zu den dezentralen DTE (sog. „Wohnungsstationen“, kurz WST), wo ein Teil der Wärme an die Fußbodenheizungen mit konstanter T_{VL} von 35 °C ausgekoppelt wird. In den dezentralen DTE erfolgt auch die TWW-Bereitung, wobei drei Varianten der sekundärseitigen Vorlauftemperatur aus der Wohnungsstation betrachtet werden:

(1) T_{VL} 52 °C gemäß SIA 385-1
(2) T_{VL} 45 °C gemäß a.a.R.d.T.
(3) T_{VL} 38 °C mit E-Heizstab

Die Zapftemperatur des TWW ist stets 45 °C.

Hinweis: Die drei in der Kurzbeschreibung genannten Varianten werden im Folgenden mit den Kürzeln WST2L_52 für (1); WST2l_45 für (2) und WST2L_38 für (3) bezeichnet.

Dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer (WST4L)



Eine zwischen 5 und 22 kW stufenlos modulierende Erdwärmepumpe versorgt einen 1600 l Pufferspeicher. Aus diesem erfolgt die Wärmelieferung an die Raumheizung und TWW-Bereitung. Die Wärmeverteilung erfolgt über ein Vier-Leiter-Netz mit Rohrdämmung nach Norm (DIN 1988-200:2012). Die Raumheizung erfolgt über Fußbodenheizungen mit witterungsgeführter T_{VL} zwischen 25 und 35 °C. In den dezentralen DTE erfolgt die TWW-Bereitung, wobei drei Varianten der sekundärseitigen Vorlauftemperatur aus der Wohnungsstation betrachtet werden:

(1) T_{VL} 52 °C gemäß SIA 385-1
(2) T_{VL} 45 °C gemäß a.a.R.d.T.
(3) T_{VL} 38 °C mit E-Heizstab

Die Zapftemperatur des TWW ist stets 45 °C.

Hinweis: Die drei in der Kurzbeschreibung genannten Varianten werden im Folgenden mit den Kürzeln WST4L_52 für (1); WST4l_45 für (2) und WST4L_38 für (3) bezeichnet.

Eine ausführlichere Darstellung der Systemmodelle sowie der Parametrierung der einzelnen Systemkomponenten (bspw. Speicher, Rohre oder Wärmeübertrager) und der Regelungsstrategien (bspw. zur Speicherbeladung und zur WP-Modulation) sind ebenfalls im Projektbericht nachlesbar.

5 Auswertegrößen

Die Bewertung der Simulationen erfolgt anhand von drei wesentlichen Auswertegrößen, deren Berechnung und notwendige Eingangsgrößen im Folgenden kurz dargestellt werden.

5.1 Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe JAZ_{WP} bewertet die Effizienz des Wärmepumpenbetriebs an sich und ist daher definiert als der Quotient von dessen Nutzen zu dessen Aufwand. Der Nutzen besteht hierbei in der gelieferten Kondensatorwärmemenge Q_{cond}, während der Aufwand im Kompressorstromverbrauch $W_{el,WP}$ liegt. Somit ergibt sich die folgende Berechnungsgleichung:

$$JAZ_{WP} = \frac{Q_{cond}}{W_{el,WP}}$$

5.2 Jahresarbeitszahl des Gesamtsystems

Auch für das Gesamtsystem lässt sich eine Jahresarbeitszahl JAZ_{SYS} als Quotient von dessen Nutzen zu dessen Aufwand bestimmen, welche als Maß für dessen Effizienz geeignet ist. Als Nutzen ist hierbei der „tatsächliche" Bedarf an TWW Q_{DHW} und Raumheizwärme Q_{SH} anzusehen, wobei als Wert für Q_{SH} der minimale Raumheizwärmeeintrag aller Simulationen verwendet wird. Als Aufwand ist die Summe aller mit der jeweiligen Systemkonfiguration verbundenen Stromverbräuche anzusehen. Dies sind die Stromverbräuche des WP-Kompressors $W_{el,WP}$, aller jeweils vorhandenen Pumpen[4] $\sum_i W_{pump,i}$ und zuletzt der ggfs. vorhandenen Elektro-Durchlauferhitzer $W_{TWW,el}$ in den Wohnungen oder Wohnungsstationen. Der Energieverbrauch der Ultrafiltration W_{UF} setzt sich aus elektrischer Energie (50 W) und Spülverlusten (40 l/d) zusammen, die von der Wärmepumpe gedeckt werden. Somit ergibt sich die folgende Berechnungsgleichung:

$$JAZ_{SYS} = \frac{Q_{DHW} + Q_{SH}}{W_{el,WP} + \sum_i W_{pump,i} + \mathrm{W_{TWW,el}} + \mathrm{W_{UF}}}$$

5.3 CO_2-Emissionen

Als letzte Auswertegröße, die eine Bewertung der ökologischen Aspekte der Wärmeversorgungskonzepte ermöglichen soll, werden die CO_2-Emissionen betrachtet. Diese ergeben sich anhand der Stromverbräuche und im Falle von System SWE auch des Gasverbrauchs der einzelnen Varianten. Diese werden mit den jeweiligen CO_2-Faktoren für Gas und Strom multipliziert. Die CO_2-Faktoren geben an, wie viel CO_2 im Zuge der Nutzung einer Kilowattstunde eines Endenergieträgers emittiert wird. Für Gas beträgt der CO_2-Faktor aktuell 240 g/kWh, während für Strom ein Wert von 560 g/kWh verwendet wird (gemäß [Gese20]). Somit ergibt sich folgende Berechnungsgleichung:

$$m_{CO_2} = (W_{el,WP} + W_{TWW,el} + \sum_i W_{pump,i} + W_{UF}) \cdot 560 \frac{g_{CO_2}}{kWh} + Q_{Gas} \cdot 240 \frac{g_{CO_2}}{kWh}$$

6 Simulationsergebnisse

In **Abb. 4** sind einerseits die drei „Quellen" für Wärmeeinträge in das Gebäude als breite Säulen im Hintergrund dargestellt: der Kondensatorwärmeeintrag $Q_{WP,cond}$ in hellgrün (entspricht im Konzept SWE der Kesselwärmeabgabe), der Wärmeeintrag der dezentralen Elektrodurchlauferhitzer $Q_{TWW,el}$ in hellrot und der Wärmeeintrag der Solarthermieanlage Q_{SOL} in orange; während andererseits die „Wärmesenken" im Gebäude – einschließlich der Verlustpfade – aufgeführt werden: die Speicherverluste $Q_{St,Loss}$ in dunkelgrau, die Raumheizwärmemenge Q_H in braun, die Verteilverluste des Heizungssteigleitungen $Q_{d,loss}$ in lila, die Verteilverluste der TWW-Steigleitungen $Q_{d,loss,DHW}$ in rot, die Zirkulationswärmeverluste $Q_{d,loss,circ}$ in beige sowie zuletzt die Wärmemenge $Q_{TWW,th}$, die zur Erwärmung des TWW eingesetzt wurde[5], in blau.

---

[4] Welche Pumpen in den jeweiligen Varianten berücksichtigt werden, ist im Projektbericht dokumentiert.

[5] In den Fällen wo elektrische TWW-Bereitung bzw. Nacherwärmung auftritt, ergibt sich die TWW-Nutzwärme als Summe von $Q_{TWW,el}$ und $Q_{TWW,th}$.

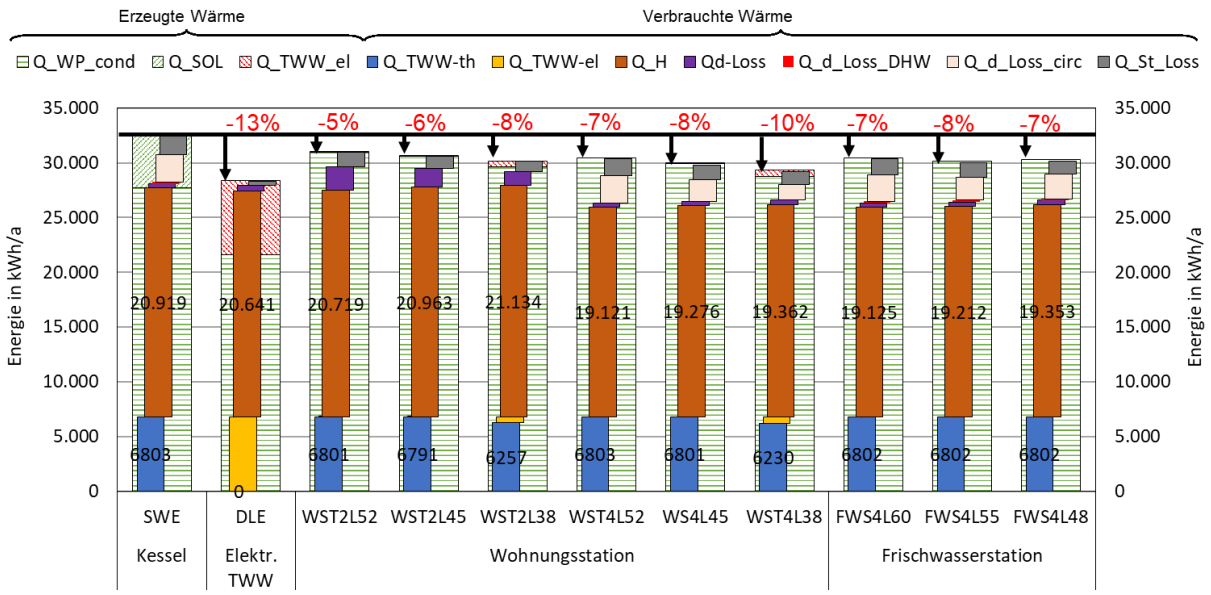


Abb. 4: *Vergleich aller simulierten Systeme und ihrer Varianten anhand des Wärmebedarfs*

Der TWW-Nutzen aller Systeme ist stets gleich (6,8 MWh/a) und bildet daher den Sockel der Wärmeeinträge ins MFH. Darüber liegen unterschiedlich hohe Raumheizwärmeeinträge und Verlustpfade. Den minimalen Raumheizwärmeeintrag verzeichnet das Konzept DLE, wobei es nur 3 % unter dem Wert von WST4L38 aber um 13 % unter dem Wärmeeintrag des SWE-Konzepts liegt. Zudem lässt sich die Tendenz erkennen, dass WST2L-Varianten höhere Wärmeeinträge als FWS4L-Varianten und zuletzt WST4L-Varianten aufweisen. In jedem Falle sorgt eine Verringerung der Systemtemperaturen für geringere Verteil- und Speicherverluste und somit für geringere Gesamtwärmeeinträge ins Gebäude.

Insgesamt ist jedoch ersichtlich, dass alle Versorgungskonzepte (außer System SWE) relativ ähnliche Gesamtwärmeeinträge ins Gebäude aufweisen, womit die Bewertung der Effizienz als wesentliches Bewertungskriterium in den Vordergrund rückt. In **Abb. 5** sind daher die jeweiligen Stromverbräuche aller WP-gestützten Versorgungsvarianten (Wärmepumpenstrom $W_{el,WP}$ in grau, dezentraler Elektro-Heizstab $W_{TWW,el}$ in dunkelgelb und Pumpenstromverbräuche $W_{el,Pump}$ in schwarz) zusammen mit der Jahresarbeitszahl der WP JAZ_{WP} als Dreieck und des Systems insgesamt JAZ_{SYS} als Kreis dargestellt. Konzept SWE wurde herausgelassen, da es die Darstellung mit einem Gasverbrauch von 30,3 MWh/a, einem Pumpenstromverbrauch von 204 kWh/a und einem Nutzungsgrad von 93 % verzerrt hätte und für die noch folgenden Auswertungen nicht erforderlich ist.

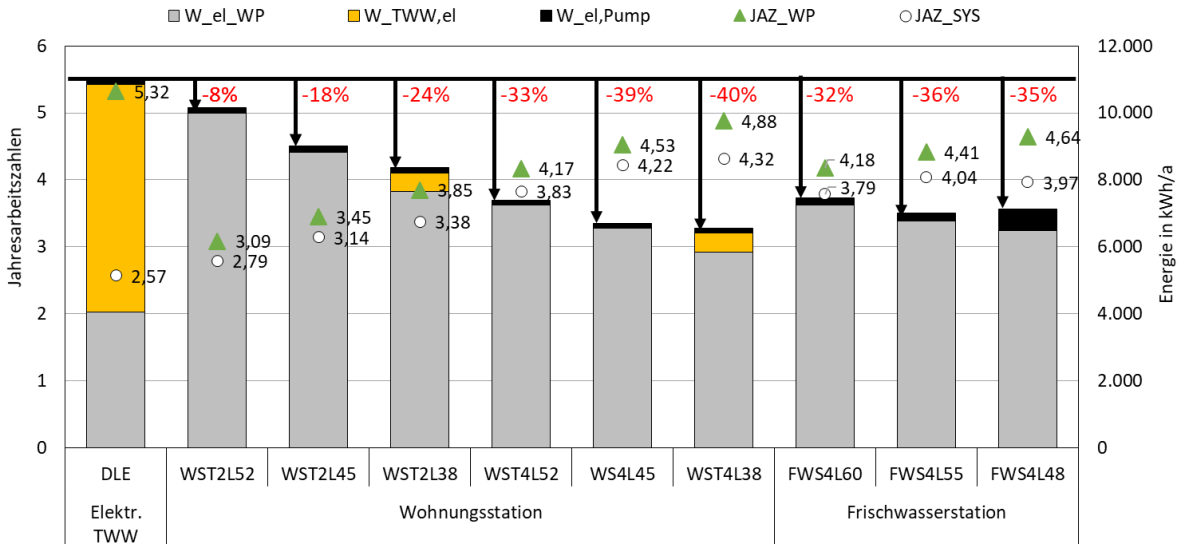


Abb. 5: *Vergleich aller untersuchten Systeme anhand der Strombedarfe sowie JAZ_{WP} und JAZ_{SYS}*

Die höchste JAZ_{WP} hat mit einem Wert von 5,32 das System DLE, während zugleich der Anteil der WP an der Gesamtwärmeversorgung in diesem Fall am geringsten ist (nur für Raumheizung). Die zweithöchste JAZ_{WP} schafft das System WST4L38 mit einem Wert von 4,88, wohingegen dieses System zugleich den Höchstwert der Systemjahresjahresarbeitszahl JAZ_{SYS}von 4,32 aufweist. Der Stromverbrauch von WST4L38 liegt trotz dezentraler elektrischer Nacherwärmung des TWW um – 40 % unterhalb des Referenzwerts von 11,1 MWh/a des Konzepts DLE[6].

Als nächstes folgt **Abb. 6**, in der die flächenspezifischen CO_2-Emissionen der untersuchten Versorgungskonzepte als graue Balken dargestellt sind. Um diese zu ermitteln wurden die jeweiligen Verbräuche an Strom und Gas mit den zugehörigen CO_2-Faktoren multipliziert und durch die Gebäudenutzfläche (nach [Gese20] entspricht diese hier 800 m²) dividiert. Im Falle von Strom wird ein Wert von 560 g/kWh und im Falle von Gas von 240 g/kWh verwendet.

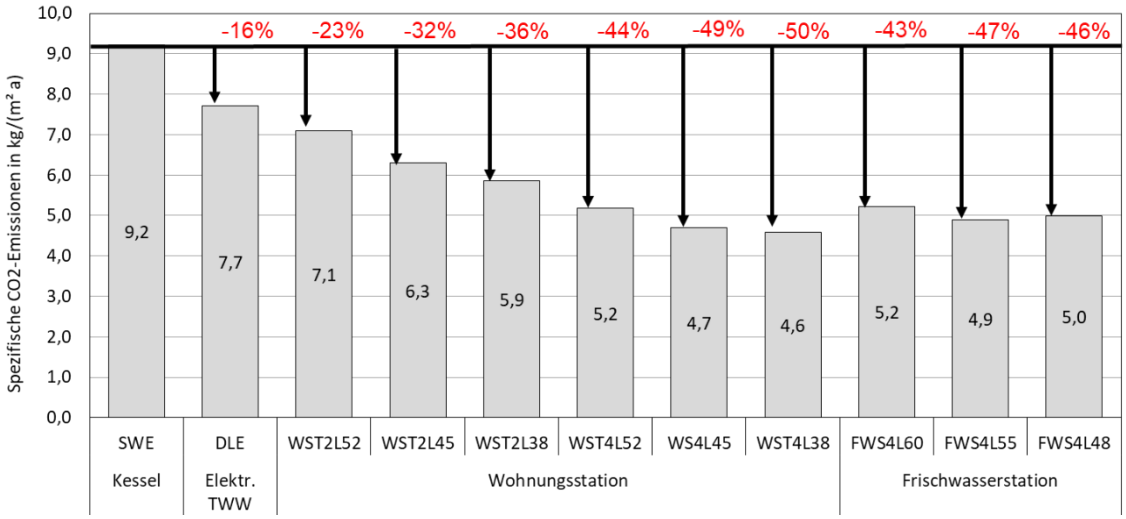


Abb. 6: *Vergleich der CO2-Emissionen der betrachteten Versorgungsoptionen*

Die maximalen CO_2-Emissionen treten beim Konzept SWE (trotz 15 % Endenergieeinsparung durch den Einsatz einer Solarthermieanlage) auf. Die minimalen CO_2-Emissionen treten beim Konzept WST4L38 auf (- 50,0 % gegenüber SWE). Zudem ist die Tendenz erkennbar, dass die WST2L-Varianten schlechter abschneiden als die FWS4L-Varianten und zuletzt die WST4L-Varianten. Zudem ergeben sich durch die Absenkung der Systemtemperaturen bei jedem Konzept niedrigere CO_2-Emissionen.

7 Zusammenfassung und Fazit

Für MFH-Neubauten ist der Einsatz von Fußbodenheizung empfohlen, wenn mit Wärmepumpen geheizt werden soll. Allerdings kommt der Trinkwassererwärmung und den damit in Zusammenhang stehenden Zirkulationsverlusten eine große Bedeutung zu. In vorliegendem Beitrag sind daher verschiedene Versorgungsoptionen miteinander verglichen worden. Eine zentrale Speicher-Wassererwärmung und eine zentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmung („Frischwasserstation“) mit Vier-Leiter-Netz wird mit fünf dezentralen Trinkwassererwärmern verglichen. Erstens elektrische Durchlauferhitzer, zweitens dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer („Wohnungsstationen“) im 2-Leiter-Netz, drittens „Wohnungsstationen“ im 4-Leiter-Netz sowie jeweils eine hybride Wohnungsstation mit elektrischer Nacherwärmung.

[6] Das Konzept FWS4L48 mit Ultrafiltration gehört trotz Dauerbetriebs einer 50 W Umwälzpumpe im Zirkulationsbypass zu den effizientesten Konzepten. Die thermischen Verluste bei den Spülvorgängen wurden zwar nicht dynamisch simuliert, jedoch rechnerisch berücksichtigt: Geht man überschlägig von 40 Litern Spülwasser pro Tag aus, das von ca. 10 auf 48 °C erwärmt werden muss und unterstellt, dass diese Erwärmung bei einer Leistungszahl der WP von 2,8 erfolgt, ergibt sich ein Zusatzkompressorstromverbrauch von ca. 230 kWh pro Jahr.

Darüber hinaus sind verschiedene Austrittstemperaturen des Trinkwassererwärmers (52 & 45 °C) für die Wohnungsstationen sowie 60, 55 & 48 °C bei den Frischwasserstationen betrachtet worden. Letztere ist auszuklammern, weil eine Ultrafiltration bei einem solch kleinen Gebäude ökologisch und ökonomisch keinen Sinn ergibt. Die Varianz der Trinkwarmwassertemperatur soll einen Beitrag zur energetischen Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung von Legionellenwachstum leisten.

Es zeigt sich, dass die Wärmepumpe einen Großteil des Trinkwarmwassers erwärmen sollte, aber auch der gezielte Einsatz von direkt-elektrischer Nacherwärmung durchaus noch leichte Verbesserungen der WP- und Systemeffizienz durch eine Reduzierung von Speicher- und Verteilverlusten erzielen kann. Die Vier-Leiter-Varianten mit Durchfluss-Trinkwassererwärmung schneiden in dem untersuchten Gebäude besser ab als die Zwei-Leiter-Varianten. Dies liegt daran, dass die Wärmepumpeneffizienz stark davon profitiert, wenn die niedrigeren Vorlauftemperaturen der Fußbodenheizung bis zur Wärmepumpe geführt werden.

Sollte es zu einer Verschärfung der Betriebsregeln für Wohnungsstationen (auf 52 °C wie in der Schweiz) kommen, ist die zentrale Frischwasserstation ökonomisch wie ökologisch vorteilhaft.

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben WP-HYG wurde mit Mitteln des enercity-Fonds proKlima gefördert. Das Institut für Solarenergieforschung Hameln erhält zudem eine Grundfinanzierung vom Land Niedersachsen. Die Autoren möchten sich daher bei proKlima und dem Land Niedersachsen für die Unterstützung bedanken. Die Autoren sind für den Inhalt des Beitrags verantwortlich.

Quellenverzeichnis

[Din12] DIN 1988-200: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) - Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe, Beuth, 2012

[Dine05] DIN EN 806-2: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 2: Planung, Beuth, 2005

[Dvgw04] Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen - Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums - Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen. In: DVGW W551 (Hrsg.) Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., 2004

[Gese20] Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze, PDF-Dokument, URL: GEG 2020, Seite 62 genommen: https://geg-info.de/geg/2020.08.13._bundesgesetzblatt_geg_2020_verkundung.pdf, letzter Aufruf am: 02.11.2023

[Jord17] Jordan, U.; Vajen, K.: Handbuch „DHWcalc“ - Werkzeug zur Generierung von Trinkwasser-Zapfprofilen auf statistischer Basis, Version 2.02b. Universität Kassel, März 2017

[Merc17] Mercker, O.; Arnold, O.: Ansätze zur Reduktion der konventionell erzeugten Wärmeverteilverluste in solar unterstützten Mehrfamilienhäusern. Abschlussbericht, Hameln, 2017

[TRN17] Klein, S.A.; Beckmann, W.A.; Mitchell, J.W.; et al.: TRNSYS 17 Documentation – Volume 1 „Getting Started“. Solar Energy Laboratory – University of Wisconsin-Madison, Wisconsin-Madison, USA, 2012

[Vdid13] VDI/DVGW 6023: Hygiene in Trinkwasser-Installationen - Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung, 2013