

Intelligente Wärmepumpensysteme zur Trinkwassererwärmung durch Abwasserwärmerückgewinnung



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marten F. Brunk
Dipl.-Wirt.-Ing. Christopher Seybold
Dipl.-Wirt.-Ing. Alexander Vogt
Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik
RWTH Aachen University

Möglichkeiten der Trinkwassererwärmung

Der Endenergieverbrauch, welcher für die Trinkwarmwasserbereitstellung aufgewendet wird, betrug im Jahr 2010 ca. 12,5 Prozent des Energieverbrauchs der privaten Haushalte. Im Jahr 2000 betrug dieser Anteil ca. 10 Prozent. Während die Energie, die für die Trinkwarmwasserbereitung aufgewendet wird, unverändert bleibt, reduziert sich die zur Deckung des Heizwärmebedarfs eingesetzte Energie deutlich. [1] Hieraus ergibt sich, dass in der Trinkwarmwasserbereitung ein überproportional hohes Optimierungspotenzial liegt und so die Möglichkeit besteht, große Mengen an CO₂-Emissionen einzusparen. Wärmepumpen erreichen durch technologischen Fortschritt immer höhere Effizienzen. Durch den stetig steigenden Anteil der Erneuerbaren Energien am Strommix erhöht sich weiterhin die ökologische Vorteilhaftigkeit von elektrisch betriebenen Wärmepumpen. Daher bieten Wärmepumpen die Möglichkeit, den Warmwasserversorgungsbereich zukünftig deutlich energieschonender zu gestalten. Hierzu untersucht der Lehrstuhl für Baubetrieb und

Gebäudetechnik der RWTH Aachen in mehreren Forschungsvorhaben Möglichkeiten zum effizienten Einsatz von Wärmepumpen für die Trinkwasserbereitung. Es bietet sich an, die Energie, die zur Trinkwarmwasserbereitung verwendet wird, dem Abwasser direkt auf einem relativ hohen Temperaturniveau zu entziehen und wieder zur Trinkwassererwärmung einzusetzen. Weiterhin werden Systeme untersucht, die mittels Kleinstwärmepumpen sowohl die Hygiene als auch die Effizienz der Trinkwarmwasserbereitstellung deutlich steigern können.

Dezentrale Abwasserwärmenutzung

Die Energie, die für die Trinkwarmwasserbereitung verwendet wird, wird ungenutzt mit dem Abwasser in die Kanalisation eingeleitet. Um eine Rückgewinnung dieser Energie zu gewährleisten, untersucht der Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik der RWTH Aachen das Potenzial der häuslichen Abwasserwärmerückgewinnung. In den durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderten Forschungsvorhaben „Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser“¹ und „Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“² wird das Energiepotenzial der häuslichen Abwasserströme erforscht. Im Rahmen der Forschungsvorhaben wurden verschiedene Monitoringobjekte (Hotel mit 154 Zimmern, Krankenhaus mit 348 Planbetten, Studentenwohnheime mit 246 und

209 Plätzen sowie 2 Mehrfamilienhäuser mit 19 bzw. 49 Bewohnern) mit entsprechender Messtechnik (Messung von Trinkwassermenge, Abwassertemperaturen, Raumtemperaturen) ausgerüstet. Die Auswertungen weisen große Wärmemengen im Abwasser nach. Im Mittel beträgt die durchschnittliche Abwassertemperatur 23 bis 26 °C, jedoch mit geringen jahreszeitlichen Schwankungen. Gemessen wurden die Trinkkaltwassermengen und die Temperaturen an einem Abwasserstrang, an dem das gesamte Abwasser in die Kanalisation eingeleitet wird. Die Trinkkaltwassermengen dienen als Schätzer für die Abwassermengen. Sämtliche Messungen wurden im 5-Sekunden-Takt durchgeführt. In **Abbildung 1** ist der repräsentative Tagesgang für die Abwassertemperatur an einem Werktag für ein Mehrfamilienhaus in Düren dargestellt. Der Messzeitraum umfasst Mai bis Oktober 2012. Das Haus umfasst 8 Wohneinheiten und insgesamt 19 Bewohner. Der Durchfluss ist als Balken dargestellt und wird auf der linken Ordinate in Litern pro Stunde pro Person abgelesen. Die rote Linie zeigt die in der entsprechenden Stunde vorhandene durchschnittliche Temperatur und wird auf der rechten Ordinate abgelesen. Die Durchschnittstemperatur wurde anhand einer mengenmäßigen Gewichtung berechnet.

Im Schnitt weist das Haus einen Durchfluss von 118,5 Litern pro Person und Tag auf, bei einer durchschnittlichen Temperatur von 23 °C, die damit im Mittel geringfügig niedriger als die mittlere Abwassertemperatur aller vermessenen Gebäude ist. Die morgendlichen Wasserzapfungen beginnen um 04:00 Uhr und weisen ein morgendliches Maximum zwischen 07:00 Uhr und 08:00 Uhr auf. Der Wasserdurchfluss ist über den Tag relativ konstant und weist das Tagesmaximum um 17:00-18:00 Uhr auf. Nach 18:00 Uhr ist der Durchfluss stetig rückläufig bis dieser um 02:00 Uhr das Tagesminimum erreicht hat. Der Abwassertemperaturverlauf erreicht das morgendliche Maximum mit 24,7 °C um 07:00 Uhr. Ein weiteres Maximum zeigt die Temperatur zwischen 19:00 Uhr und 20:00 Uhr abends. Das Tagesminimum erreicht die Temperatur um 02:00 Uhr mit 20,4 °C.

¹ Förderkennzeichen: SF-10.08.18.7-10.4, Bewilligungszeitraum: Juni 2010 – Oktober 2011, Projektleitung: Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik RWTH Aachen University

² Förderkennzeichen: SF-10.08.18.7-11.38, Bewilligungszeitraum: Dezember 2011 – Mai 2013, Projektleitung: Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik RWTH Aachen University

Die im Abwasser gespeicherte Energie wird ungenutzt in die Kanalisation eingeleitet. Bilanzell betrachtet eignet sich die Energie, um die Trinkwarmwasserbereitung des Mehrfamilienhauses sicherzustellen. Ausgehend von einem 40 Liter Trinkwarmwasserbedarf pro Person und Tag und einer Trinkkaltwassertemperatur von 10 °C ergibt sich ein Energiebedarf von 2,32 kWh pro Person und Tag. Aufgrund der hohen Abwassertemperatur kann mit einer hohen Jahresarbeitszahl (JAZ) bei einem Wärmepumpenbetrieb gerechnet werden. Bei einer Wärmepumpennutzung mit einer Jahresarbeitszahl von 3,5 müssten dem Abwasser 1,66 kWh Energie pro Person und Tag entzogen werden. Ausgehend von der durchschnittlichen Abwassertemperatur von 23 °C und 118,5 Litern pro Person und Tag ergibt sich, dass das Abwasser auf eine Temperatur von ca. 11 °C abgekühlt werden müsste, um eine vollständige Abdeckung der Trinkwarmwasserbereitung mit der Abwasserenergie zu gewährleisten.

Abbildung 2 zeigt ein mögliches Anlagenkonzept zur Nutzung der Abwasserwärme zur Trinkwassererwärmung. Das Abwasser wird in einem Abwasserspeicher gesammelt und mittels Abwasserwärmeübertragern wird dem Abwasser Energie entzogen. Mittels einer Wärmepumpe wird die Energie in einen Trinkwassererwärmer eingespeist. Die Trinkwasserversorgung kann zum einen monovalent durch die Wärmepumpe erfolgen, zum anderen kann eine Nacherwärmung des Trinkwassers mittels Gas-Brennwerttechnik erfolgen. Durch die bivalente Ausführung kann die Wärmepumpe zur Grundlastabdeckung genutzt werden oder lediglich zur Vorerwärmung. Eine Vorerwärmung hat den Vorteil, dass die Wärmepumpe aufgrund des niedrigen Temperaturhubs mit hohen Leistungszahlen eingesetzt werden kann. Als problematisch bei der dezentralen Abwasserwärmenutzung kann die sich auf den Wärmeübertragern bildende Biofilmschicht angesehen werden. Es ist davon auszugehen, dass diese den Wärmeübertrag deutlich mindert. Um einen möglichst großen Energieübertrag zu erzielen, sind daher praxisnahe Verfahren zur Reinigung von hausinternen Abwasserwärmeübertragern zu entwickeln.

Hygiene bei der Trinkwarmwasserbereitung

Zur Gewährleistung von hygienisch einwandfreien Bedingungen in Trinkwasserleitungen ist insbesondere das Legionellenwachstum zu beachten. Zur Kontrolle des Legionellenwachstums in Trinkwasserspeichern lässt sich unterscheiden zwi-

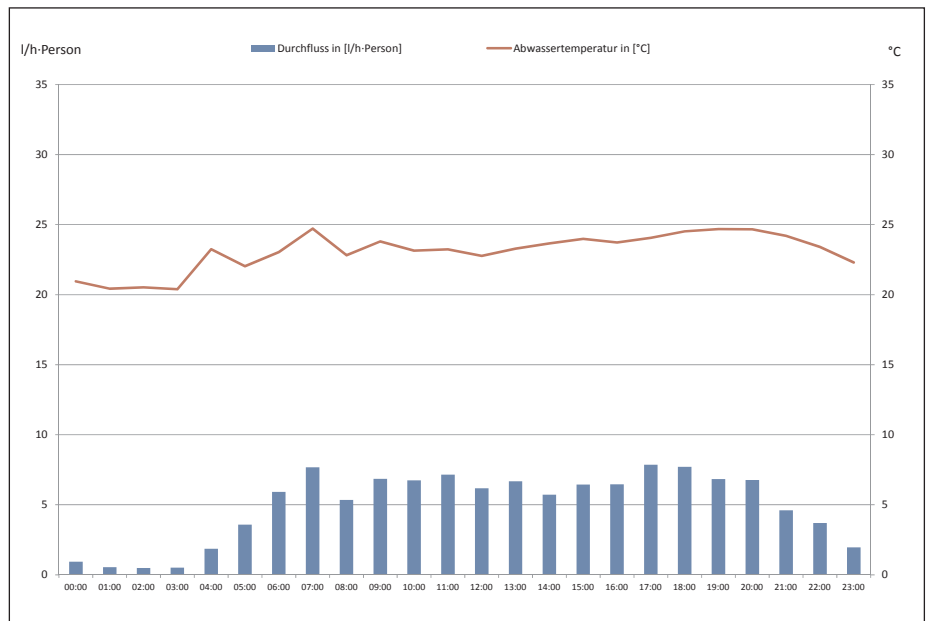


Abbildung 1: Mehrfamilienhaus in Düren, Ganglinie werktags.

schen der Verhinderung des Wachstums (Temperaturen ab 55 °C – 60 °C) und der Abtötung bereits vorhandener Legionellenbesiedlungen. (mindestens 70°C). Daher schreibt das DVGW Arbeitsblatt W 551 vor, dass für Trinkwassererwärmer und zentrale Durchfluss-Wassererwärmer am Wasseraustritt eine Temperatur von $\geq 60\text{ °C}$ eingehalten werden muss. Weiterhin müssen Speicher-Trinkwassererwärmer mit einem Inhalt $> 400\text{ l}$ eine gleichmäßige Erwärmung des Trinkwassers sicherstellen. Bei bivalenten Speichern mit Vorwärmstufen

und Trinkwassererwärmungsanlagen muss der gesamte Speicherinhalt einmal am Tag auf über 60 °C erhitzt werden. [2] Die geforderten Temperaturen von $\geq 60\text{ °C}$ führen dazu, dass die Effizienz einer Wärmepumpennutzung zur Trinkwarmwasserbereitung eingeschränkt wird. Die Leistungszahl einer Wärmepumpe hängt wesentlich von der Differenz der Quellen- und Senkentemperatur ab. Je höher diese Differenz desto schlechter ist die Leistungszahl. Ausgehend von einem CARNOT-Gütegrad von 50 Prozent ergibt sich bei einer Abwasserwärmenutzung bei einer

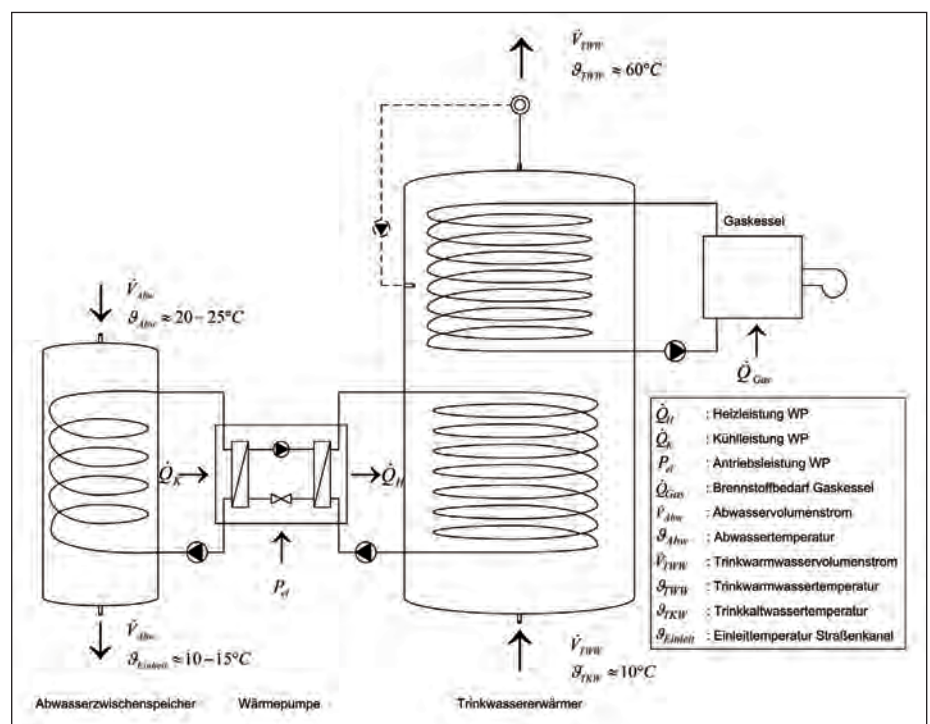


Abbildung 2: Anlagenkonzept der Abwasserenergienutzung zur Trinkwassererwärmung.

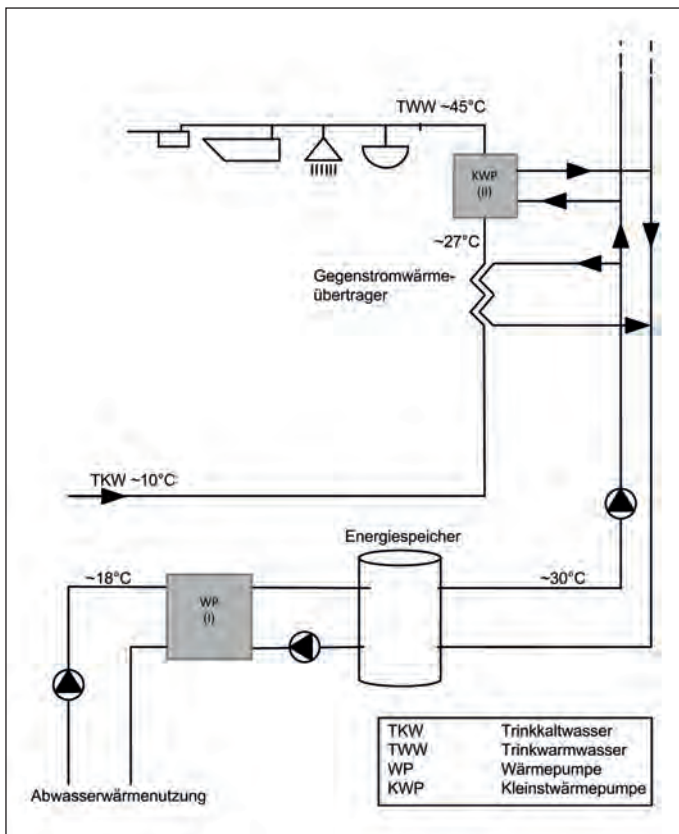


Abbildung 3: Systemskizze der dezentralen Trinkwassererwärmung mittels Wärmepumpen.

Verdampfungstemperatur von 15 °C und einer Kondensationstemperatur von 65 °C eine Leistungszahl von 3,4.

Eine Möglichkeit, die erforderliche Temperatur für die Trinkwarmwasserbereitung zu reduzieren, ergibt sich durch die dezentrale Durchführung der Trinkwarmwasserbereitung. Bei einer dezentralen Trinkwassererwärmung, wie z. B. bei elektrischen Durchlauferhitzern, Gasthermen oder Wohnungsstationen, reicht es aus thermischer und hygienischer Sicht aus, das Trinkwasser auf niedrigeren Temperaturen von ca. 45 °C bereitzustellen.

Dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer bieten deutliche hygienische Vorteile gegenüber konventionellen Systemen mit Trinkwarmwasserspeichern. Dies gilt insbesondere wenn die Nutzung für eine längere Zeit unterbrochen wurde. Durch kurze Verweildauern im Bereich der Erwärmung wird das Legionellenwachstum deutlich vermindert. Durch die kurze Anbindung der dezentralen Durchfluss-Trinkwassererwärmer ist außerdem das Risiko einer Legionellenbildung bei Stagnation in den Leitungen deutlich reduziert.

Der deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) bestätigt die hygienische Vorteilhaftigkeit dezentraler Durchfluss-

Trinkwassererwärmer und gibt daher in den Regeln des DVGW Arbeitsblattes W 551 vor: „Dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer können ohne weitere Maßnahmen verwendet werden, wenn das dem Durchfluss-Trinkwassererwärmer nachgeschaltete Leitungsvolumen 3 Liter nicht überschreitet.“ [2]

Durch die Trinkwarmwasserbereitstellung auf einer Temperatur von 45 °C ergeben sich deutliche Vorteile in der Effizienz von Wärmepumpen. So liegt die CARNOT-Leistungszahl bei 5,3 mit einem Gütegrad von 50 Prozent sowie einer Verdampfungstemperatur von 15 °C und einer Kondensationstemperatur von 45 °C.

Dezentrale Trinkwarmwasserbereitung mittels Wärmepumpen

Um diese günstigen Bedingungen für die Trinkwarmwasserbereitung durch den Einsatz von Wärmepumpen auszunutzen, untersucht das durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderte Forschungsvorhaben „Energieeffiziente Trinkwarmwassererzeugung durch dezentrale Wärmepumpensysteme und zentral regenerativ bereitgestellter Wärme“ die dezentrale Trinkwarmwassererzeugung mittels Wärmepumpen.³ Die zugrundeliegende Systemidee ist in **Abbildung 3** dargestellt. Ziel ist es, mittels regenerativer Energien, beispielsweise der hausinternen Abwasserenergienutzung, einen zentralen Wasserspeicher auf einem Temperatur-

veau von ca. 30 °C vorzuhalten. Dieser Energiespeicher speist ein Heizkreislaufsystem mit Vor- und Rücklaufleitung im Gebäude. An den dezentralen Trinkwarmwasserzapfstellen wird das Trinkkaltwasser zunächst durch einen an diesem Heizkreislaufsystem angeordneten Wärmeübertrager vorerwärmt und anschließend durch eine kompakte Kleinstwärmepumpe im Durchfluss auf eine Zapftemperatur von ca. 45 °C erwärmt. Um zu hohe Taktungen der Kleinstwärmepumpe zu vermeiden, ist geplant, einen kompakten Energiespeicher innerhalb der Wohnungen anzuordnen. Als Wärmequelle der Kleinstwärmepumpe dient ebenfalls das Heizkreislaufsystem.

Das Potenzial zur Energieeinsparung ergibt sich zum einen durch die niedrigen Vorlauftemperaturen und zum anderen durch die geringen Wärmeverluste in den Heizkreisläufen infolge der vergleichsweise niedrigen Umlauftemperaturen. Durch kurze Rohrleitungen zwischen den dezentralen Trinkwassererwärmern und den Zapfstellen sind keine zusätzlichen Maßnahmen zur Bekämpfung von Legionellen notwendig, da keine Speicherung des Trinkwarmwassers erfolgt.

Potenzialabschätzung

Für die folgende überschlägige Potenzialabschätzung wurde der erforderliche Energieaufwand für das vorgeschlagene System mit dezentraler Wärmepumpe und Abwasserwärmenutzung angesetzt. Die zugrunde liegenden Jahresarbeitszahlen wurden jeweils mit einem CARNOT-Gütegrad von 50 Prozent berechnet.

Der Energiebedarf wurde mit einem täglichen Bedarf von 40 Litern Trinkwarmwasser pro Person und Tag auf einem Niveau von 60 °C für ein Jahr angenommen. Demnach ergibt sich ein jährlicher Bedarf von 848 kWh pro Person und Jahr.

Für Wärmepumpe (I) wurde bei einer angenommenen Quellentemperatur aus dem Abwasser von 18 °C eine Verdampfungstemperatur von 15 °C und eine Kondensationstemperatur von 35 °C angesetzt. Bei einem CARNOT-Gütegrad von 0,5 ist mit einer Jahresarbeitszahl von 7,7 zu rechnen. Für die Wärmepumpe (II) wurden analog eine Kondensationstemperatur von 48 °C und eine Verdampfungstemperatur von 27 °C angesetzt. Bei einem CARNOT-Gütegrad von 0,5 ergibt sich hier eine Jahresarbeitszahl von 7,7.

Es wurden Verteilverluste von 5 Prozent angesetzt, wodurch sich der gesamte Energiebedarf der Wärmepumpe (I) erhöht. In **Tabelle 1** ist die Systemabschätzung dargestellt. Die zentral angeordnete Wärmepumpe

³) Förderkennzeichen: SWD-10.08.18.7-12.42, Bewilligungszeitraum: November 2012 – November 2014, Projektleitung: Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik RWTH Aachen University

stellt somit jährlich 891 kWh bereit. Unter Berücksichtigung der Verteilverluste werden durch den dezentral angeordneten Gegenstromwärmeübertrager 412 kWh und durch die Wärmepumpe (II) 436 kWh bereitgestellt. Das Gesamtsystem erfordert einen Einsatz von elektrischer Energie in Höhe von 173 kWh pro Person und Jahr. Hieraus ergibt sich eine System-Jahresarbeitszahl von 4,9.

In **Tabelle 2** ist zum Vergleich der Energiebedarf für die zentrale Trinkwarmwassererzeugung mittels Gas-Brennwerttechnik dargestellt. Geht man davon aus, dass aufgrund der höheren Temperaturen bei einer zentralen Trinkwarmwasserbereitung Verteilverluste in Höhe von 10 Prozent anfallen und die Gas-Brennwerttechnik einen Jahresnutzungsgrad von 97 Prozent aufweist, ergibt sich ein Energiebedarf von 962 kWh pro Person und Jahr.

Tabelle 3 zeigt den Vergleich der CO₂-Emissionen der Systeme der dezentralen Trinkwarmwasserbereitung mittels Wärmepumpen durch Abwasserenergienutzung und der konventionellen Trinkwarmwassererwärmung mittels Gas-Brennwerttechnik. Unter Verwendung von Gas würden die jährlichen CO₂-Emissionen bei 192 kg pro Person und Jahr liegen. Durch den Einsatz der dezentralen Trinkwarmwassererzeugung lassen sich diese um 48 Prozent auf 99 kg pro Person und Jahr reduzieren.

Bei der vorliegenden thermischen Betrachtung handelt es sich um eine theoretische Systembetrachtung unter Vernachlässigung des Einflusses der Energie für die Umwälzpumpen. Weiterhin werden aufgrund von unvollkommener Isolierung höhere Wärmeverluste in der Praxis auftreten. Die vorgestellte Analyse zeigt daher lediglich die Tendenz der zu erwartenden Systemleistung. Die Jahresarbeitszahlen werden in der hier ermittelten Höhe in der Praxis nicht erreicht werden.

Die Anordnung von dezentralen Kleinstwärmepumpen innerhalb von Wohneinheiten bietet die Möglichkeit weiterer CO₂-Einsparungen im Gebäudebereich und stellt gleichzeitig Trinkwarmwasser unter einwandfreien hygienischen Bedingungen bereit. Diese Kleinstwärmepumpen würden sich zudem für Systemkombinationen eignen, bei denen im Sommer Energie durch Solarthermie bereitgestellt wird und/oder in der Heizperiode der Vorlauf einer Niedertemperaturheizung, beispielsweise einer Fußbodenheizung, als weitere Wärmequelle genutzt wird. ◀

LITERATUR

- [1] Statistisches Bundesamt, Umweltnutzung und Wirtschaft, Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Wiesbaden 2012.
- [2] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Arbeitsblatt W 551, Trinkwassererwärmungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasserinstallationen, Bonn 2004.
- [3] Umweltbundesamt (Hrsg.), Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzung 2011, Dessau-Roßlau 2012.
- [4] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (Hrsg.).

Tabelle 1: System der Trinkwarmwasserbereitung mittels dezentraler Wärmepumpen.

Zentraler Energie-Pufferspeicher (Annahme 30 °C mittlere Temperatur)		Einheit	
Bedarfsenergie inkl. Verteilverlusten (Annahme: 5%)		[kWh]	891
Wärmepumpe (I) JAZ (15 °C auf 35 °C)		[-]	7,7
Benötigte elektrische Energie WP (I)		[kWh]	116
Dezentrale Kleinstwärmepumpe (II)			
Bedarfsenergie TWW bei 45 °C		[kWh]	848
Durch Gegenstromwärmeübertrager bereitgestellte Energie		[kWh]	412
Durch WP (II) bereitgestellte Energie		[kWh]	436
JAZ (27 °C auf 48 °C)		[-]	7,7
Benötigte elektrische Energie WP (II)		[kWh]	57
Benötigte elektrische Energie, WP (I) + WP (II) (ohne Umwälzpumpen)		[kWh]	173
Bereitgestellte Energie		[kWh]	848
System Jahresarbeitszahl (SJAZ) (Gesamtsystem ohne Umwälzpumpen)		[-]	4,9

Tabelle 2: System zentraler Trinkwarmwasserbereitung mittels Gas-Brennwerttechnik.

Konventionell mit Gas-Brennwerttechnik		Einheit	
Bedarfsenergie inkl. Verteilverlusten (Annahme: 10%)		[kWh]	933
Jahresnutzungsgrad Kessel		[-]	0,97
Brennstoffbedarf		[kWh]	962

Tabelle 3: Vergleich der Systemvarianten in Bezug auf die CO₂-Emissionen.

TWW-Erwärmung	Einheit	Wärmepumpen-system	Gas
Systemjahresarbeitszahl	[-]	4,9	/
Jahresnutzungsgrad Kessel	[-]	/	0,97
CO ₂ -Emission	[kg/kWh]	0,57 [3]	0,20 [4]
Brennstoffbedarf	[kWh/a]	/	962
Strombedarf	[kWh/a]	173	/
CO ₂ -Emission	[kg/a]	99	192
Reduktion CO ₂ -Emission bezogen auf Gas	[%]	48	0