

Simulationsstudie zum Potenzial netzdienlicher Betriebsweisen von Biomasse-Einzelraumfeuerstätten in TRNSYS – Methodik, Randbedingungen und Modelle

Oliver Mercker¹, Peter Pärisch¹, Daniel Büchner²

¹ Institut für Solarenergieforschung GmbH, Hameln

² Deutsche Biomasseforschungszentrum gGmbH, Leipzig

Abstract

Das dem Beitrag zu Grunde liegende Forschungsprojekt: „Optionen zum netzdienlichen Betrieb von Einzelraumfeuerstätten“ (kurz: OptDienE) untersucht anhand von TRNSYS-Simulationen, welchen Beitrag die schon heute installierten und marktgängigen Einzelraumfeuerstätten zur Vermeidung von Lastspitzen im Strom und/oder Gasnetz leisten könnten. Hierfür werden typische Gebäude samt ihrer Wärmeversorgung in TRNSYS abgebildet und mit Einzelraumfeuerungen mit unterschiedlichen Betriebskonzepten ausgestattet. Der Vergleich des Strom und/oder des Gasbezugsprofils von Simulationen mit und ohne Einzelraumfeuerung gibt Aufschluss über das Potenzial zur Vermeidung von Lastspitzen, auf dessen Grundlage über Strategien zur Hebung dieses Potenzials diskutiert wird. Im vorliegenden Beitrag werden, neben Details zum Projekthintergrund, -ziel und -methode, das verwendete Gebäudemodell sowie die Anlagenmodelle und wesentliche Randbedingungen erläutert. Abschließend wird anhand erster Simulationsergebnisse die Analysemethode beschrieben.

1. Hintergrund

Die Transformation der Energieversorgung im Zuge der Energiewende ist durch einige Megatrends gekennzeichnet: die Dezentralisierung der Energiebereitstellung, die Digitalisierung aller Lebensbereiche, die dominierende Rolle von Solar- und Windenergie im Stromsektor und, damit einhergehend, eine hohe Volatilität der Erzeugung und zunehmende Verschränkung der Energienutzungsbereiche: Strom, Wärme und Mobilität (Sektorenkopplung).

Da die Solarenergienutzung vor allem saisonal azyklische Erzeugungsmaxima in Bezug auf die Wärmebedarfsspitzen in Deutschland und auch die Windenergienutzung im Winter Lücken (zum Beispiel durch Hochdruckwetterlagen im Januar) aufweisen, braucht es für diese Zeiträume eine Absicherung der im Winter gleichzeitig hohen Bedarfe an Strom und Wärme – selbst bei einer sehr starken Zunahme der installierten Leistung an Erneuerbarer Energien.

Vor diesem Hintergrund wird meist über kosten- und investitionsintensive Speicherverfahren zur Überbrückung dieser Lücken diskutiert. Dabei wird das Potenzial der bereits im Markt etablierten Biomassefeuerungen als sektorenübergreifende Flexibilitätsoption übersehen, obwohl diese Anlagen aus technischer Sicht einen signifikanten Beitrag zur Deckung von Lastspitzen leisten könnten. Denn nach neuesten Angaben ist davon auszugehen, dass es in Deutschland rund 10 bis 11 Millionen Einzelraumfeuerungen¹ (ERF) gibt [Len17]. Das heißt, dass es im Schnitt in jedem zweiten Wohngebäude und in etwa einem Viertel aller Wohnungen eine ERF gibt. Bei einer konservativ geschätzten durchschnittlichen Heizleistung einer ERF von 8 kW steht eine thermische Leistung von 80 bis 90 GW im deutschen Wohngebäudebestand zur Verfügung, die schon heute regelmäßig zum (Zu-)Heizen oder aus Komfortgründen genutzt wird².

¹ Als Einzelraumfeuerstätten gelten entsprechend der 1. BImSchV Kamin- und Dauerbrandöfen, Pelletöfen sowie Heiz- und Kamineinsätze die dazu dienen, „vorrangig“ den Aufstellraum zu beheizen.

² Zum Vergleich: Von 675 TWh Endenergieverbrauch in privaten Haushalten im Jahr 2017 entfallen 68,8 % auf die Raumwärmebereitstellung. Würden diese ca. 464 TWh von verlustfreien Wärmeerzeugern im halbjährigen Dauerbetrieb mit konstanter Leistung geliefert werden, wäre eine Gesamtheizleistung von 106 GW notwendig.

2. Ziel und Methode

Ziel der Studie ist es, sowohl das derzeitige als auch das zukünftige Potenzial der Biomasse-ERF zur Vermeidung von Strombedarfsspitzen durch Kompressionswärmepumpen und Gasnachfragespitzen durch Gasfeuerungen für den Status Quo sowie für die Vergleichsjahre 2030 und 2050 zu ermitteln.

Dazu werden bis zu drei Gebäudetypen, die den heutigen und zukünftigen Gebäudebestand in Deutschland „repräsentieren“ sollen, inklusive einer Auswahl an ERF-Hybridwärmeversorgungskonzepten¹, wie bspw.: (i) ERF + Wärmepumpe (WP); (ii) ERF + WP + Solarthermie (ST); (iii) ERF + Gastherme; sowie (iv) ERF + Gastherme + ST, in der dynamischen Systemsimulationsumgebung TRNSYS modelliert. Anhand der damit simulierten Potenziale zur Vermeidung von Lastspitzen im Strom- und/oder Gasnetz werden in einem Folgeschritt die technische Machbarkeit von Instrumenten zur Aktivierung der Anlagenbetreibenden aufgezeigt und darauf aufbauende politische Handlungsempfehlungen abgeleitet.

3. Gebäudemodell

Das diesem Beitrag zu Grunde liegende Gebäudemodell bildet ein Einfamilienhaus in Bungalow-Bauweise ab, welches hinsichtlich seines Wandaufbaus und Zuschnitts der Bauweise im Zeitraum von 2010 bis 2015 entspricht [Log15]. Der Gebäudetyp wird als typisch für barrierearmes Wohnen betrachtet. Der Grundriss des Gebäudes sowie eine 3D-Ansicht sind in **Abbildung 1** zu sehen.

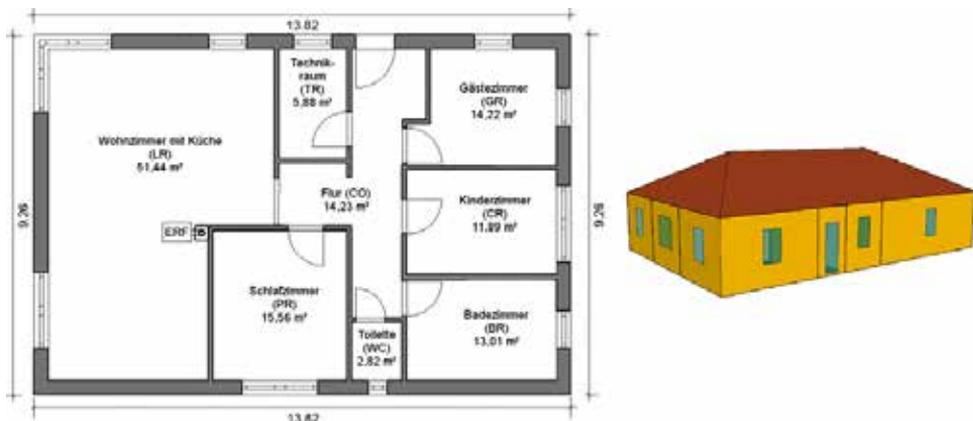


Abbildung 1: Grundriss und 3D-Ansicht des simulierten EFH in Bungalow-Bauweise

Die Grundfläche des EFH beträgt ca. 128 m² (geometrisch) und ca. 113 m² nach EnEV². Die Außenwandfläche beträgt ebenfalls ca. 127 m². Die Dachfläche beläuft sich auf rund 144 m². Die U-Werte der wesentlichen Außenflächen entsprechen den Angaben aus der TABULA-Datenbank für den Gebäudetyp DE.N.SFH.12.Gen: Bodenplatte = 0,35 W/(m² K); Außenwand = 0,28 W/(m² K) und Dachfläche = 0,20 W/(m² K) [Log15]. Die wärmeschutzverglasten Fenster haben einen U-Wert von 1,27 W/(m² K) und einen g-Wert von 0,591. Der Fensterflächenanteil beträgt rund 1/8 der Grundfläche (sowie der Außenwandfläche). Die Fensterhöhe beträgt jeweils 1,28 m und die Breite variiert mit der Grundfläche der einzelnen Zimmer, so dass jeweils etwa 1/8 der Grundfläche des Zimmers an Fensterfläche erreicht werden. Die Brüstungshöhe aller Fenster beträgt 0,90 m. Neben den sieben beheizten Räumen mit jeweils individuellen Raumsolltemperaturen werden ein unbeheizter Flur sowie ein Dachboden abgebildet.

¹ Die genannten Wärmeversorgungskonzepte weisen eine hohe Relevanz im heutigen (Gasbrennwertthermen) und/oder zukünftigen Wärmesektor (Wärmepumpen) auf, wobei das Potenzial der Solarthermie zur Steigerung der Wärmeversorgungseffizienz stets mitbetrachtet wird.

² Die Gebäudenutzfläche eines Wohngebäudes mit einer Geschosshöhe zwischen 2,5 und 3 m wird nach EnEV als 0,32-Faches des beheizten Gebäudevolumens V_e (einzusetzen in m³) bestimmt.

Der Luftwechsel in den einzelnen Räumen variiert zwischen einem Sockelwert von $0,4 \text{ h}^{-1}$ und einem Maximalwert von $1,2 \text{ h}^{-1}$ zur Abbildung von Fensterlüftung (siehe **Abschnitt 5**).

Da für das beschriebene EFH die UA-Werte von Bodenplatte und Außenwand annähernd identisch sind, wird die Relevanz des Wärmetransports durch die Bodenplatte genauer analysiert. Die transiente thermische Anbindung des Gebäudes an das Erdreich erfolgt mit dem Type 1244 (*Soil Model for Type 56 Floors*), der die Wärmeleitung durch die Bodenplatte in das bzw. aus dem Erdreich mit der Finite Differenzen Methode in jedem Zeitschritt berechnet. Somit wird die dynamische Wechselwirkung zwischen den einzelnen Räumen mit ihrer jeweiligen Temperatur und dem Erdreich ($\lambda = 2,42 \text{ W/(m K)}$; $\rho = 3200 \text{ kg/m}^3$; $c_p = 840 \text{ J/(kg K)}$) hinreichend berücksichtigt. Das Berechnungsgitter, mit welchem das Erdreich überzogen wird, weist eine minimale Gitterweite von $0,1 \text{ m}$ und einen Gitterfaktor¹ von 3 auf.

Da die Simulationsdauer mit Type 1244 signifikant ansteigt und der Einfluss unterschiedlich genauer Erdreichtemperaturen in Vergleichssimulationen als gering identifiziert wurde, wird die dynamische Wechselwirkung zwischen Gebäude und Erdreich nur für eine exemplarische Simulation (ideale Beheizung des Gebäudes auf je raumweise variable Solltemperatur) berechnet und im Folgenden mit dem damit gewonnen Erdreichtemperaturverlauf als „fixe“ Randbedingungen für alle weiteren Simulationen (anstelle von Type 1244) verwendet. Der Jahresverlauf der resultierenden (mittleren) Erdreichtemperatur am Standort Zürich – direkt an der Bodenplatte – sowie des gesamten Wärmestroms durch die Bodenplatte ist in **Abbildung 2** dargestellt. Der mittlere Wärmeverlust durch die Bodenplatte beträgt 341 W .

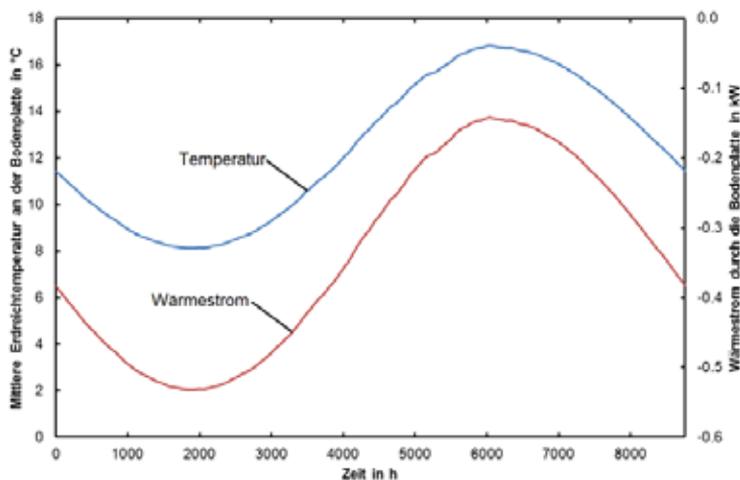


Abbildung 2: Verlauf der mittleren Erdreichtemperatur an der Bodenplatte sowie des Wärmestroms durch die Bodenplatte im zweiten Jahr der Simulation

4. Anlagenmodell

Zur Erzeugung von Trinkwarmwasser (TWW) und Raumheizwärme (RH) für das in **Abschnitt 3** beschriebene Gebäude werden die nachfolgend erläuterten Wärmeversorgungs-konzepte umgesetzt. Der grundsätzliche Aufbau der Wärmezentrale ist in **Abbildung 3** dargestellt, wobei je nach Konzept die Gasbrennwerttherme durch eine Luft-Wasser-Kompressionswärmepumpe ersetzt sowie die Solarthermieanlage und/oder die Einzelraumfeuerung hinzugenommen oder weggelassen wird.

¹ Der Gitterfaktor gibt an, um welchen Faktor der Abstand zwischen zwei Gitterpunkten bzw. -linien – ausgehend von der im Text genannten minimalen Gitterweite von $0,1 \text{ m}$ – vergrößert wird. An den Rändern unterschiedlicher thermischer Zonen (hier: Bodenplattenbereiche unter den einzelnen thermischen Zonen) entspricht der Gitterabstand jeweils der minimalen Gitterweite. Innerhalb der thermischen Zone vergrößert sich der Gitterabstand jeweils linear mit der Größe des Gitterfaktors.

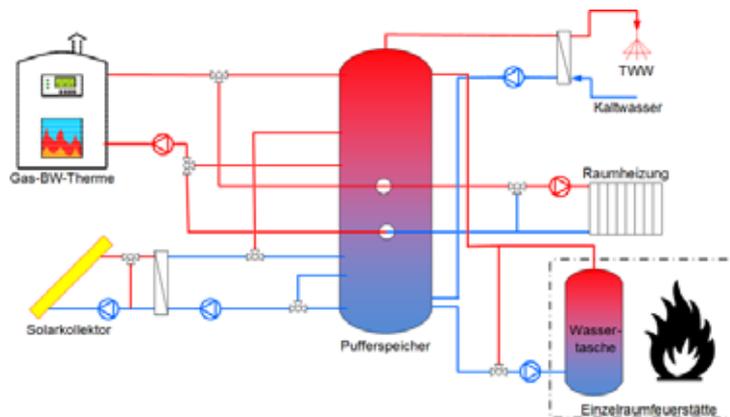


Abbildung 3: Schematische Darstellung des untersuchten Wärmeversorgungssystems

Betrachtet werden demnach sechs Wärmeversorgungskonzepte, die alle durch Ersetzung und/oder Weglassung einzelner Komponenten aus der obigen **Abbildung 3** hervorgehen:

- **Basisfälle:** Zentrale Wärmeversorgung mit WP oder Gasbrennwerttherme und zentraler TWW-Bereitung im Durchflussprinzip (Frischwasserstation)
- **Variation I:** Mit oder ohne Einzelraumfeuerung
- **Variation II:** Mit oder ohne Solarthermieanlage

Bei allen genannten Wärmeversorgungskonzepten steht der Pufferspeicher im Zentrum. Dieser wird – je nach Variante – von einem (monovalent) bis drei (multivalent) Wärmeerzeugern beladen. Dabei ist einerseits das im oberen Speicherbereich gelegene Bereitschaftsvolumen den Anforderungen der TWW-Bereitung gemäß auf Temperatur zu halten. Andererseits ist ein darunter liegendes Volumen für die jahreszeitlich variierenden Anforderungen der Raumheizung (außentemperaturgeführte Vorlauf-temperaturregelung) zu temperieren. Das weiter darunter befindliche verbleibende Speichervolumen dient zum einen der Einbindung des kalten Rücklaufs aus der Frischwasserstation zur TWW-Bereitung (zur Vermeidung von Durchmischung) sowie als Puffervolumen für den Teil des Solarwärmeangebots, der nur auf niedrigerem Temperaturniveau zur Verfügung steht.

Die Speicherbeladung mit Wärme aus der Gasbrennwerttherme oder der WP erfolgt über vier Speicheranschlüsse, sodass je nach Speichertemperaturverteilung und Erzeugertemperaturangebot unterschiedliche Speicheranschlüsse über Umschaltventile genutzt werden können. Dies verringert die Durchmischung im Speicher, was die Speichereffizienz erhöht. Dem Effizienzgewinn stehen jedoch ein höherer apparativer Aufwand (Umschaltventile, Regler, etc.) sowie höhere Speicheranschlussverluste [Kli14] gegenüber, weshalb Simulationsstudien zur Bewertung dieses Einbindungskonzepts erfolgen.

Eine weitere Besonderheit besteht in der Verwendung von T-Stücken am Speicher. Diese erlauben eine direkte Wärmelieferung an den Heizkreis bzw. eine Umgehung des Pufferspeichers. Sofern die Betriebsbedingungen es erlauben, wird der direkten Wärmenutzung somit vor der Speicherung Vorrang eingeräumt (vgl., [WPS17]). Die damit verbundenen Probleme bei der Umsetzung in TRNSYS (der Speicher-Type 340 erlaubt keine zwei Anschlüsse auf derselben Höhe) konnten gelöst werden.

Um die Einhaltung der Temperaturanforderungen des Bereitschaftsvolumens für die TWW-Bereitung sowie des Speichervolumens zur Raumwärmebereitstellung sicherzustellen, dienen die weitgehend flexiblen zentralen Wärmeerzeuger: Gasbrennwerttherme oder Kompressionswärmepumpe. Diese springen ein, wenn die Solarthermieanlage und/oder die ERF (mit Wassertasche) gerade keine Wärme liefern (können).

Die Anbindung der Solarthermieanlage an den Speicher erfolgt über einen externen Wärmetauscher. Die Einspeisung von in den Anbindeleitungen zwischen Kollektorausstritt und Wärmetauscher stehendem „kaltem“ Fluid kann somit vermieden werden, was wiederum der Speichereffizienz zu Gute kommt. Eine Einspeiseregulierung kann in diesem Fall auf die tatsächliche Vorlauftemperatur des Solarkollektors erfolgen – anstelle einer „einfachen“ Kollektortemperaturregelung.

Der Solarkollektor kann auf je zwei verschiedenen Speicherhöhen Wärme einspeisen und entnehmen, sodass eine – im Vergleich zu einem einfachen Anschluss – höhere Endenergieeinsparung erzielt werden kann. Gleichzeitig kann die Durchmischung des Speichers verringert werden, was die Effizienz des Speichers steigert. Zur Bewertung des damit verbundenen apparativen Zusatzaufwandes (zwei Umschaltventile plus Regler sowie zusätzliche Rohrstücke) und der erhöhten Speicheranschlussverluste [Kli14] werden im Projekt diesbezügliche Parameterstudien in TRNSYS durchgeführt.

Die TWW-Bereitung erfolgt im Durchlaufprinzip über eine Frischwasserstation, wodurch die Verluste eines zusätzlichen TWW-Speichers vermieden werden. Eine Zirkulation ist aufgrund der Unterschreitung des Rohrinhalts von 3 l zu jeder Zapfstelle nicht vorhanden.

Die Einbindung der Wärmelieferung der ERF mit Wassertasche erfolgt derart, dass durch ein Mischventil die Einhaltung einer Rücklauftemperatur von mindestens 55 °C sichergestellt wird (Rücklaufhochhaltung), sodass eine Kondensation des Rauchgases in der ERF sicher vermieden wird. Diese energetisch nachteilige Einbindung (kein Brennwertnutzen) schützt die ERF vor Korrosion.

Die Einzelraumfeuerungen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Technologie in automatisch startende Pelletöfen und händisch betriebene Scheitholzöfen (wahlweise jeweils auch mit einer Wassertasche). Hinsichtlich der Scheitholzbeschaffung kann ferner zwischen Selbstwerbern, die über kostengünstiges Scheitholz mit niedrigerem Heizwert verfügen, und Einkäufern, die über teureres Scheitholz mit höherem Heizwert verfügen, unterschieden werden. Zuletzt lassen sich die Betriebsführungen differenzieren, also bspw. hinsichtlich der Fragen, ob diese tageszeitliche (Betrieb morgens/abends oder ganztags) sowie saisonale (ganzjähriger Betrieb oder nicht) Besonderheiten aufweisen, wie viele Holzscheite pro Auflage verwendet werden und wie viele Auflagen je Ofenstart vorgenommen werden.

Die im TRNSYS-Softwarepaket enthaltenen Modelle zur Abbildung von ERF werden zur Berücksichtigung dieser Aspekte als ungenügend erachtet. Daher wurden am DBFZ eigene Modelle für einen automatisch betriebenen Pelletofen und einen händisch bestückten Scheitholzofen entwickelt [Pet14].

5. Randbedingungen

Um die Spezifik der Wärmeabgabe der ERF an eine Zone und die sich anschließende Wärmeverteilung im gesamten Gebäude realistisch abzubilden, wird eine detaillierte Zonierung und Modellierung des Luftwechsels angewendet. Ergänzend zu dem im TRNSYS-Gebäudemodell Type 56 vorgesehenen Luftwechsel, der als variable Eingangsgröße für jeden einzelnen Raum berücksichtigt werden kann, wurde daher ein Ansatz zur stark vereinfachten Abbildung der Fensterlüftung sowie des gebäudeinternen Wärmetransports durch Türen zwischen benachbarten Zonen implementiert. Im Folgenden werden diese beiden Modelle zur Berücksichtigung des konvektiven Wärmetransports kurz erläutert. Daran anschließend wird das Zusammenwirken bzw. die Priorisierung der beiden Lüftungsvarianten beschrieben.

Jeder thermischen Zone (und somit auch jedem Raum) des Gebäudemodells kann eine variable Luftwechselrate als Eingangsgröße aufgeprägt werden. Schon in vorangegangenen Gebäudesimulationen (wie bspw. in [Mer17]) wurde diese Eingangsgröße genutzt, um den Einfluss der Fensterlüftung stark vereinfacht abzubilden. Anstelle einer ganzjährig konstanten Luftwechselrate wird hierbei eine „zweistufige Luftwechselrate“ eingeführt, die zwischen einem Sockelwert von $0,4 \text{ h}^{-1}$ (vgl. [Mün03]) und einem Spitzenwert von $1,2 \text{ h}^{-1}$ (entspricht dem geöffneten Fenster, vgl. [Rec07]) wechseln kann.

Der Übergang zwischen diesen beiden Luftwechselraten hängt dabei von der Differenz zwischen dem

Soll- und dem Istwert der jeweiligen Raumtemperatur sowie der Höhe der Außentemperatur T_{amb} ab. In jedem Simulationszeitschritt wird die Differenz ΔT zwischen der Raumsolltemperatur $T_{R,Soll}$ und der Raumisttemperatur $T_{R,i}$ bestimmt. Wenn diese Differenz ΔT einen Wert $dT_{over,vent}$ von 2 K überschreitet (und somit eine Überhitzung vorliegt), wird geprüft, ob die Außentemperatur T_{amb} um einen Wert $dT_{amb,vent}$ von größer oder gleich 1 K unterhalb der Raumisttemperatur $T_{R,i}$ liegt – also, eine Abkühlung des Raumes durch Außenluftzufuhr erreicht werden kann. Wenn dies der Fall ist, so wird der Raumlftwechsel von einem Sockelwert von $0,4\ h^{-1}$ auf einen Spitzenwert von $1,2\ h^{-1}$ erhöht. Dieser Spitzenwert des Raumlftwechsels wird solange beibehalten bis die Temperaturdifferenz ΔT auf einen Wert $dT_{under,vent}$ von 0 K abgesunken ist – oder aber die Differenz zwischen Raumisttemperatur und Außentemperatur kleiner als $dT_{amb,vent}$ geworden ist. Ansonsten wird der Raumlftwechsel stets mit dem konstanten Sockelwert von $0,4\ h^{-1}$ simuliert. Dieses Regelkonzept für die Fensterlüftung ist im Folgenden nochmals in **Abbildung 4** dargestellt.

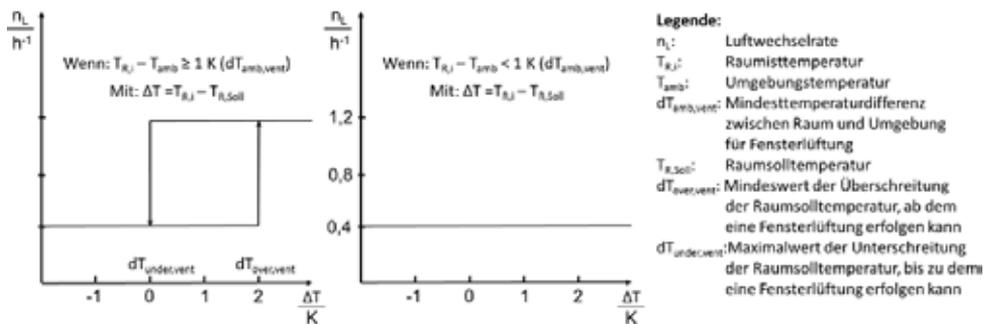


Abbildung 4: Raumlftwechselrate in Abhängigkeit der Raumsolltemperaturüberschreitung und der Differenz zwischen Raumist- und Umgebungstemperatur bei ausreichend geringer Umgebungstemperatur (links) und bei hoher Umgebungstemperatur (rechts).

Eine detaillierte Modellierung des thermohydraulischen Problems der konvektiven Wärmeübertragung durch große Öffnungen (hier: Innentüren), wie sie bspw. in [Maa92] erfolgt, ist in TRNSYS nicht praktikabel. Eine vereinfachte Abbildung mit der (unter anderem) hierfür entwickelten TRNSYS-Erweiterung TRNFLOW wird ebenso verworfen, da der Modellierungsaufwand den Projektfokus unzulässig verschieben würde.

In der Literaturstudie [Bar86] werden analytische Ansätze vorgestellt, die eine komfortable Einbindung in TRNSYS erlauben – wobei der hierfür zu schließende Kompromiss zwischen Berechnungszeit und –genauigkeit den Anforderungen des vorliegenden Projekts genügt. Der Wärmestrom zwischen zwei Räumen \dot{Q} kann demnach als Funktion der Breite der Türöffnung W , der Höhe der Türöffnung D , der Temperaturdifferenz zwischen beiden Räumen ΔT , der Erdbeschleunigung g und eines Koeffizienten C – dieser erlaubt die Anpassung des allgemeinen Berechnungsansatzes an ein konkretes Problem – sowie der thermischen Eigenschaften¹ der Luft gemäß **Gleichung 1** bestimmt werden:

$$\dot{Q} = C \cdot c_p \cdot \rho \cdot W \cdot \sqrt{g \cdot D^3 \cdot \beta \cdot \Delta T^3} \tag{1}$$

Laut [Bar82] kann der Koeffizient C Werte zwischen 0,2 und 0,4 annehmen. Um nun die Höhe des konvektiven Wärmetransports in den Simulationen nicht zu überschätzen², wird hier die untere Grenze

¹ Hierbei handelt es sich um die isobare spezifische Wärmekapazität c_p , die Dichte ρ und den Ausdehnungskoeffizienten β – für diesen wurde der Wert für ideale Gase von $0,00341\ K^{-1}$ bei $10\ ^\circ C$ verwendet.

² Eine Überschätzung dieses Wärmetransportmechanismus ist hier deswegen zu vermeiden, da dies zu einer zu starken Dämpfung von Überhitzungen bspw. durch den ERF-Betrieb führen würde, was eine zu positive Bewertung des Energieeinsparpotenzials durch einen geeigneten ERF-Betrieb nach sich ziehen würde.

des angegebenen Wertebereichs von $C = 0,2$ angesetzt. **Abbildung 5** zeigt den resultierenden Wärmestrom für unterschiedliche Werte von C in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz ΔT zwischen zwei Räumen, wobei als feste Maße der Türöffnung $W = 0,83$ m und $D = 1,98$ m zu Grunde liegen:

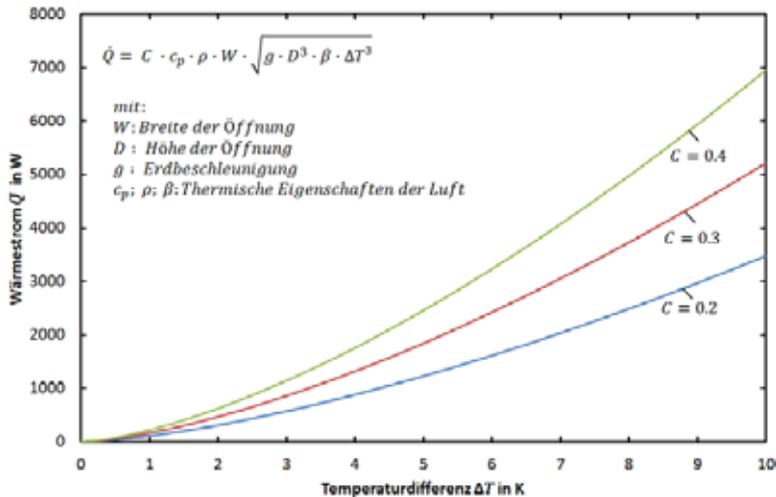


Abbildung 5: Wärmestrom durch eine Türöffnung mit einer Breiten von 0,83 m und einer Höhe von 1,98 m in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen den benachbarten Räumen

Eine Temperaturdifferenz von 5 K, die bspw. dann auftreten kann, wenn im Wohnzimmer die ERF betrieben wird und die Tür zum unbeheizten Flur geöffnet wird, verursacht so einen konvektiven Wärmestrom von knapp 1 kW. Eine im Regelfall häufiger auftretende Temperaturdifferenz von 1 K sorgt hingegen lediglich für einen Wärmestrom von knapp 100 W.

Um darüber hinausgehend auch unterschiedliche Türstellungen berücksichtigen zu können, wird zusätzlich ein Türöffnungsgrad Δ_{door} eingeführt, der an die obige **Gleichung 1** heranmultipliziert wird. Der Türöffnungsgrad kann zwischen 0 und 100 % variieren – wobei hier eine geschlossene Tür mit einem Öffnungsgrad von 5 % berücksichtigt wird, da ein tatsächlich „dichter“ Abschluss als nicht realistisch betrachtet wird (bspw. aufgrund von Schlüsseloch und Türspalt).

Dieser Türöffnungsgrad wiederum ist dann die Größe, die durch eine separate Regelung beeinflusst wird. Diese prüft, ob die Raumsolltemperatur um einen Wert größer gleich 1 K überschritten wird. Herrscht zugleich im angrenzenden Raum eine um den Wert 0,5 K geringere Temperatur, so wird der Türöffnungsgrad von seinem Sockelwert von 5 % auf einen Wert von 100 % erhöht – solange bis die Raumisttemperatur wieder auf ihren Sollwert zurückgekehrt ist.

Zur Steigerung der Energieeffizienz eines Gebäudes¹ wäre eine gebäudeinterne Lüftung dem „Ab-lüften“ an die Umgebung vorzuziehen – also, erst die Türen zu angrenzenden Räumen öffnen und, wenn das nicht ausreicht, dann erst die Fenster öffnen. Die beiden Lüftungsvarianten sind somit mit einer Priorisierung versehen worden. Im Rahmen von Simulationsstudien lässt sich der Einfluss einer solchen Priorisierung quantifizieren.

Das Gebäudemodell erlaubt die Vorgabe von (jahres-)zeitlich variablen und raumweise unterschiedlichen Raumsolltemperaturen, da jeder Raum als separate thermische Zone abgebildet ist. Die Parametrierung der in **Abschnitt 6** diskutierten Referenzsimulationen sieht dabei ganzjährig konstante Raumsolltemperaturen vor, die in den Räumen Elternzimmer (PR) und Technikraum (TR) 17 °C, in

¹ Andere bauphysikalische Aspekte des Lüftens, wie bspw. die Abfuhr von Feuchte und/oder „verbrauchter“ Luft, werden in der vorliegenden Untersuchung vernachlässigt.

Wohnzimmer (LR), Kinderzimmer (CR) und Gästezimmer (GR) 20 °C sowie zuletzt in Toilette (WC) und Bad (BR) 23 °C betragen (in Anlehnung an [Mer17]). Die Erreichung dieser Raumsolltemperaturen durch einen geregelten Wärmeeintrag der Heizkörper oder eine aktive Kühlung durch Fensterlüftung und/oder Öffnung der Innentüren wird in den Referenzsimulationen ganzjährig angestrebt. Zudem wird angenommen, dass das Gebäude eine ganzjährig konstante Belegung durch zwei Personen aufweist, was zunächst ausschließlich in Form flächenspezifischer interner Gewinne von 2,1 W/m² sowie im TWW-Bedarf berücksichtigt wird [Log15].

Als meteorologische Randbedingungen werden die Wetterdaten aus den Testreferenzjahren für die Standorte Zürich (Breitengrad: 47.38°; Längengrad -8.57°; Höhe: 556 m) und Potsdam (Breitengrad: 52.39°; Längengrad: -13.06°; Höhe: 34 m) aus dem Jahr 2004 verwendet. In Anlehnung an [Hei07] sind in **Tabelle 1** die wesentlichen Kenngrößen dieser beiden Wetterdatensätze zusammengetragen.

Tabelle 1: Wesentliche Parameter der verwendeten Wetterdatensätze für Zürich und Potsdam

| Standort | T _{mean} °C | T _{min} °C | T _{max} °C | I _{total} kWh/m ² | I _{beam} kWh/m ² | I _{diff} kWh/m ² | Relative Feuchte | Wind m/s |
|----------|-------------------------|------------------------|------------------------|--|---|---|---------------------|-------------|
| Zürich | 9.07 | -9.70 | 29.20 | 1086.5 | 456.8 | 629.7 | 75.3 % | 2.2 |
| Potsdam | 8.75 | -17.99 | 32.60 | 1001.0 | 424.9 | 576.1 | 75.8 % | 4.6 |

Die zeitabhängige Kaltwassertemperatur T_{CW} wird nach [Hei07] durch eine Sinusfunktion gemäß **Gleichung 2** bestimmt. Hierin ist T_{CW,Av} der Jahresmittelwert der Kaltwassertemperatur (bspw. 9,7 °C in Zürich), dT_{CW,AMP} die Amplitude der sinusförmigen Schwankung der Kaltwassertemperatur im Jahresverlauf (bspw. 6,3 °C in Zürich) und dt_{CW,shift} der Zeitversatz bis zum Tag mit der niedrigsten Kaltwassertemperatur bezogen auf den 1. Januar (bspw. 60 Tage in Zürich).

$$T_{CW}(t) = T_{CW,Av} + dT_{CW,AMP} * \sin(360 * (t + 24 * (273.75 - dt_{CW,Shift})) / 8760) \quad (2)$$

Das Zapfprofil für das Einfamilienhaus wurde mit dem frei verfügbaren Programm DHWcalc (Version 2.02b) erstellt (siehe [Jor17]). Der Zeitraum, für den das Zapfprofil erstellt wurde, beträgt 365 Tage und beginnt mit dem ersten Tag des Jahres, wobei eine Zeitschrittweite von 1 min berücksichtigt wurde. Der Einfluss der Zeitumstellung wurde dabei vernachlässigt. Die durchschnittliche Zapfmenge eines Tages beträgt 95,3 Liter. Die Zapfereignisse verteilen sich auf 4 Kategorien gemäß **Tabelle 2**: Als minimale Zapfrate wird ein Wert von 1 l/h angesetzt, während das Maximum 1200 l/h beträgt.

Tabelle 2: Wesentliche Parameter der vier Kategorien von Zapfereignissen

| Kategorie | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-----|-----|-----|-----|
| Mittlere Zapfrate (Erwartungswert) in l/h | 60 | 360 | 840 | 480 |
| Dauer einer Zapfung in min | 1 | 1 | 10 | 5 |
| Anteil der Zapfkategorie an Gesamtzapfmenge in % | 14 | 36 | 10 | 40 |
| Streuung der Zapfraten-Normalverteilung (Sigma) | 120 | 120 | 12 | 24 |

Zur Erzeugung des Zapfprofils wird die „Standard-Wahrscheinlichkeitsverteilung“ (GAUß-Verteilung) verwendet, wobei das Verhältnis der Zapfmenge an einem Tag am Wochenende zu der an einem Wochentag 120 % beträgt. Die saisonale Variation der täglichen Zapfmenge wird mit einer Sinusfunktion approximiert, die eine Amplitude von 10 % und ein Maximum am 45 Tag des Jahres aufweist.

Der Einfluss von Urlaubs-/Ferienzeiten wird in diesem Fall nicht berücksichtigt. Das sich ergebende Zapfprofil ist in **Abbildung 6** exemplarisch als Zapfrate über der Zeit für die erste Woche des Jahres dargestellt. Neben einer Häufung von Zapfungen zu Zeiten des Mittag- und Abendessens ist hierin eine geringere Zapfhäufigkeit in den Nachstunden erkennbar.

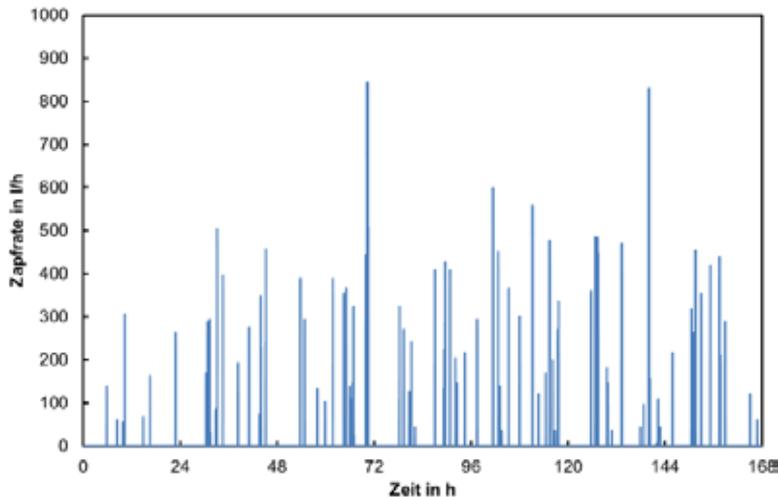


Abbildung 6: Zeitreihe der Zapfrate in der ersten Woche des Jahres

Entgegen alternativer Zapfprofile (wie bspw. in [DIN17]) sind den hier erzeugten Zapfraten keine Zapftemperaturen zugeordnet. Daher wird vereinfachend eine ganzjährig konstante Zapftemperatur von 45 °C unterstellt, wodurch die Vergleichbarkeit mit [Mer17] gewährt ist. Der TWW-Nutzenergiebedarf dieses Zapfprofils beträgt 12,8 kWh/(m² a), was rund 2,4 % über dem als Referenz angesehenen EnEV-Wert von 12,5 kWh/(m² a) liegt. Um diese Differenz zu nivellieren wird jeder einzelne Wert der Zapfraten des TWW-Zapfprofils abschließend nochmals mit einem Faktor von rund 0,976 skaliert.

6. Erste Ergebnisse

Die bisherigen Simulationsergebnisse beschränken sich auf das obige EFH in Bungalow-Bauweise, wobei anstelle der finalen Anlagentechnik zunächst noch eine idealisierte Wärmeversorgung (über wärmekapazitätslose Heizkörper mit unbeschränkter Heizleistung) ohne und mit ERF (konkret: Scheitholzofen ohne Wassertasche) berücksichtigt wurde. Diese Simulationen erlauben jedoch, neben grundlegenden Aussagen zum Gebäudeenergiebedarf und Plausibilitätsbetrachtungen, bereits eine erste Analyse des prinzipiellen Untersuchungsansatzes zur Vermeidung von Strom- und/oder Gasbezugsspitzen durch einen geeigneten Betrieb der ERF:

In **Abbildung 7** werden zuerst die Monatswerte der in das EFH eingetragenen Wärmemengen für Raumheizung und TWW zusammen mit der Wärmelieferung der ERF dargestellt, wobei die jeweils linken Balken die Simulation ohne ERF und die rechten Balken den Fall mit ERF repräsentieren. Trotz des idealisierten Wärmeabgabesystems sorgt der ERF-Betrieb für einen Mehrwärmeeintrag¹ von 3,4 % bzw. 442 kWh/a in das Gebäude – was (auch) dem noch simplen Betriebskonzept geschuldet ist: Die ERF wird täglich – unabhängig vom Wetter – von 16:30 bis 19 Uhr betrieben und gibt etwa 7,5 kWh/d an den Aufstellraum ab, womit die durchschnittliche Heizleistung während der ERF-Betriebszeit – eine Sommerpause von Mai bis September wird berücksichtigt – rund 3 kW beträgt. Der spezifische Heizenergiebedarf des Gebäudes ist mit rund 100 kWh/(m² a) relativ hoch, was jedoch wegen dem „schlechten“ A/V-Verhältnis der Bungalow-Bauweise des EFH und der teilweise „überdurchschnittlichen“ Raumsolltemperaturanforderungen von 23 °C als nicht unrealistisch bewertet wird.

¹ Der Mehrwärmeeintrag verursacht eine Erwärmung einzelner Zonen über die jeweilige Raumsolltemperatur.

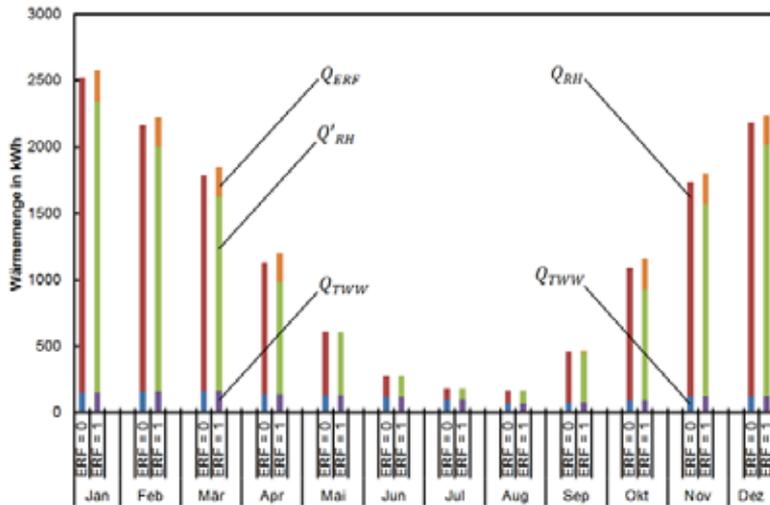


Abbildung 7: Vergleich der Wärmeeinträge in das EFH zur Bereitstellung von Raumheizwärme und TWW für eine Simulation ohne (linke Balken) und mit ERF (rechte Balken)

In der nachfolgenden **Abbildung 8** ist die Heizlast des Gebäudes (inkl. TWW) in Anlehnung an die Methode zur Energieanalyse aus dem Verbrauch dargestellt (siehe [Wol19]). Hierfür wird der Tagesmittelwert der Heizleistung (für Raumheizung und TWW) über dem jeweils zugehörigen Tagesmittelwert der Außentemperatur aufgetragen. Die Steigung des linken Kurvenabschnitts korreliert mit den aus der EnEV bekannten Wärmeverlusten durch Lüftung und Transmission) und beträgt hier ca. 189 W/K. Bezogen auf die Grundfläche des EFH ergibt sich ein Wert von 1,4 W/(m² K), was nach [Wol19] auf ein Gebäude mit „mittlerer“ Effizienz hindeutet. Der rechte Kurvenabschnitt wiederum gibt Aufschluss über die Höhe der Grundlast, die im vorliegenden Fall durch die TWW-Bereitung bestimmt wird – dabei ist zu beachten, dass sich der relativ geringe Wert von 200 W durch die Mittelung der TWW-Last über einen Tag ergibt. Zudem ist unmittelbar ersichtlich, dass die Unsicherheit bei der Bestimmung der Heizgrenztemperatur großen Einfluss auf die ermittelte Heizsteigung sowie die Grundlast hat. Dieser Einfluss sollte im Rahmen zukünftiger Simulationsstudien quantifiziert werden.

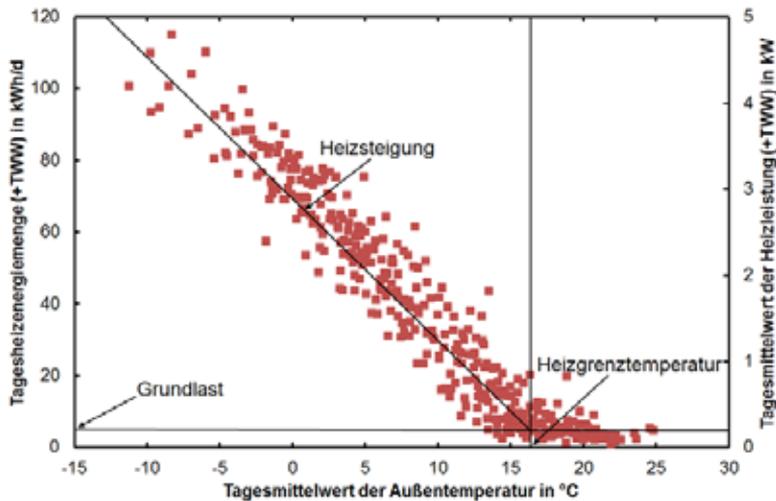


Abbildung 8: Tagesheizenergiemenge und -leistung in Abhängigkeit der Außentemperatur in Anlehnung an die Energieanalyse aus dem Verbrauch nach [Wol19]

Die nachfolgende **Abbildung 9** zeigt die geregelte Wärmeabgabe der Heizkörper sowie den Wärmeeintrag der ERF für den 15. Tag des Jahres am Standort Zürich – der den höchsten Minutenwert der Heizleistung aufweist – für eine Simulation mit sowie eine Simulation ohne ERF. Zudem ist der Verlauf der Umgebungstemperatur zusammen mit der Einstrahlung auf die Horizontale dargestellt. An diesem Tagesverlauf lässt sich die Projektidee exemplarisch darstellen. Während kurz nach 16 Uhr das Solarenergieangebot wegfällt und die Außentemperatur weiterhin deutlich unter 0 °C verbleibt, kann durch die Inbetriebnahme der ERF der Heizleistungsbedarf über die Heizkörper beinahe halbiert werden.

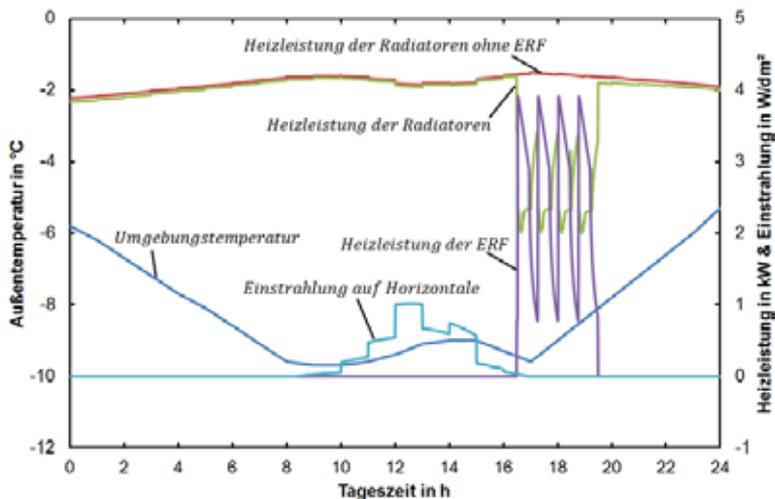


Abbildung 9: Geregelter Wärmeabgabe der Heizkörper einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung einer ERF für den 15. Tag des Jahres am Standort Zürich

In der zu Grunde liegenden Simulation wurde noch keine Anlagentechnik gemäß **Abschnitt 4** (Pufferspeicher; WP oder Gasbrennwerttherme) berücksichtigt, weshalb noch keine Aussage über die zeitliche und quantitative Veränderung des Endenergiebezugs durch den Einsatz der ERF möglich ist. Dennoch belegen die gezeigten Verläufe die Plausibilität der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen bei der Modellbildung und stellen somit die Voraussetzung zur Erreichung der in **Abschnitt 2** aufgeführten Projektziele dar.

6. Danksagung

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Verbundprojekt „Optionen zum netzdienlichen Betrieb von Einzelraumfeuerstätten (OptDienE)“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen 03KB138 A und B aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert.

Die Arbeiten erfolgen in Kooperation mit dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

7. Literaturverzeichnis

- [Bar87] **Barakat, S. A. (1987):** *Inter-Zone Convective Heat Transfer in Buildings: A Review.* Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 109/71
- [DIN17] **DIN EN 16147: Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Prüfungen, Leistungsbemessung und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser; Deutsche Fassung EN 16147:2017 + AC:2017.** Beuth Verlag, Berlin (2017)

- [Hei07] **Heimrath, R.; Haller, M.:** *The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32, A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme - Task 32: "Advanced storage concepts for solar and low energy buildings"*. Report A2 of Subtask A. Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology, Graz (2007)
- [Jor17] **Jordan, U.; Vajen, K.:** *Werkzeug zur Generierung von Trinkwasser-Zapfprofilen auf statistischer Basis*. Version 2.02b (März 2017), Universität Kassel (2017)
- [Kli14] **Kliem, F.; Steinweg, J.; Rockendorf, G.:** *Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation*. Institut für Solarenergieforschung Hameln (2014)
- [Len17] **Lenz, V.; Müller-Langer, F.; Denysenko, V.; Daniel-Gromke, D.; Rensberg, N.; Rönsch, C.; Janczik, S.; Kaltschmitt, M.:** Erneuerbare Energien BWK 69 (2017) Nr. 5, S. 54-77
- [Log15] **Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N. und Born, R.:** *Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. Zweite erweiterte Auflage, Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt (2015)
- [Maa92] **van der Maas, J. (1992):** *Air flow through large openings in buildings*. Technical Report zum Annex 20: Air Flow Patterns within Buildings – Subtask 2: Air Flow between Zones. International Energy Agency, Lausanne (Schweiz)
- [Mer17] **Mercker, O.; Arnold, O.:** *Abschlussbericht zum Vorhaben: Ansätze zur Reduktion der konventionell erzeugten Wärmeverteilverluste in solar unterstützten Mehrfamilienhäusern*. Institut für Solarenergieforschung Hameln (2017)
- [Mün03] **Münzenberg, U.; et al.:** *Luftwechsel im Gebäudebestand*. Stuttgart (2003)
- [Pet14] **Petzold, J.; Büchner, D.; Ortwein, A.:** *Model development and experimental parameter identification for biomass pellet boilers in buildings*. 9th International Conference on System Simulation in Buildings, Liege (2014)
- [Rec07] **Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek; E.:** *Taschenbuch für Heizung und Klima*. Oldenbourg Industrieverlag, München (2007)
- [Wol19] **Wolff, D.; Unverzagt, A.; Schünemann, A.; Rasche, S.:** *Entwicklung und Erprobung der Grundlagen für das Partnerschaftsmodell „Alliance Contracting“ in der Wohnungswirtschaft*. DBU-Projekt Abschlussbericht, Wolfenbüttel (2019)
- [WPS17] **WP Systemmodul:** *Effiziente Wärmepumpen mit System – Funktionsschemata*. URL: <https://www.wp-systemmodul.ch/files/Downloads%20DE/Installateure/Funktionsschemata--Vers.-27.04.2018.pdf>, Zuletzt abgerufen am: 11.12.2019, 15:19 Uhr