

# Ein modularer Ansatz zur Bestimmung von DSM-Potentia- len für Raumwärme und Trinkwarmwasser von Wohnge- bäuden auf der Grundlage von Gebäudetypologien

Frank Wendel<sup>1,(1)</sup>, Georg Hurst<sup>(1)</sup>, Markus Blesl<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER),  
Universität Stuttgart, Heßbrühlstraße 49a, 70565 Stuttgart, www.ier.uni-stuttgart.de  
frank.wendel@ier.uni-stuttgart.de

## **Kurzfassung:**

Durch Demand-Side Management (DSM) können Spitzenlasten reduziert und somit sowohl die Integration von erneuerbaren Energien als auch die zukünftige Versorgungssicherheit in Strom- und Wärmenetzen im Zuge der Energiewende verbessert werden. Die ausgesprochene Inhomogenität des Gebäudebestands, verschiedene Sanierungszustände sowie unterschiedliche Nutzungsanforderungen erschweren jedoch die für eine erfolgreiche Umsetzung von DSM für Raumwärme und Trinkwarmwasser präzise zu bestimmenden DSM-Potentiale. Mit der in dieser Abhandlung präsentierten Methodik ist es möglich, für ein beliebiges, inhomogenes Wohngebiet die resultierenden DSM-Potentiale für Raumwärme und Trinkwarmwasser auf der Basis von Gebäudetypologien in hoher zeitlicher Auflösung abzuleiten. Angewandt auf ein Wohngebiet bestehend aus 195 einzeln simulierten Ein- und Mehrfamilienhäuser zeigt sich, dass durch DSM die Spitzenlasten für die Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser in Summe um etwa 8,8 % gegenüber dem Referenzfall gesenkt werden können.

**Keywords:** Demand-Side Management, Wärmebedarf, Gebäudesimulation, Modelica

## **1 Einleitung**

Am 24.06.2021 wurde im neuen Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) eine verpflichtende Treibhausneutralität bis 2045 beschlossen. Da mit 53 % der größte Anteil der in Deutschland gewandelten Energie auf die Wärmeerzeugung entfällt, obliegt der Wärmewende die größte Bedeutung im Erreichen der Klimaziele [1,2]. Der Ausbau von erneuerbaren Energien in Kombination mit einer steigenden Elektrifizierung der Wärmegewinnung, z.B. über den Einsatz von Wärmepumpen, steigt über die letzten Jahre konstant an und wird noch weiter ansteigen, um die Treibhausgasneutralität zu erreichen [3].

Besonders im Bereich privater Haushalte kommt es durch das Verbraucherverhalten zu starken zeitabhängigen Schwankungen im Wärmebedarf, die sich mit steigender Elektrifizierung der Wärmebereitstellung auf das elektrische Netz übertragen. Da eine steigende Anzahl an Lastextrema in Kombination mit ansteigender volatiler Einspeisung durch wetterabhängige Stromproduktion die Versorgungssicherheit bedrohen, [4] liegt in der Reduktion von Lastspitzen eine zentrale Rolle in der Energiewende.

---

<sup>1</sup> Jungautor

Um Lastspitzen in der Wärmeversorgung privater Haushalte zu minimieren, kann einerseits der Energieverbrauch durch z. B. energetische Sanierungsmaßnahmen dauerhaft gesenkt oder andererseits durch Demand-Side Management (DSM) und das damit verbundene intelligente Regeln des Heizungs- und Trinkwarmwasserkreislaufs temporär verschoben bzw. über einen längeren Zeitraum vergleichmäßig werden. Durch eine verbraucherseitig flexiblere Wärmebereitstellung können Leistungsspitzen geglättet sowie Potentiale zum Ausgleich von Lastspitzen gleichwohl in Strom- als auch in Wärmenetzen geschaffen werden. Eine Ausnutzung der DSM-Potentiale in Strom- und Wärmenetze erhöht die allgemeine Versorgungssicherheit, steigert die in den Netzen integrierbaren Kapazitäten erneuerbarer Einspeisung und bildet somit ein wichtiges Standbein im Erreichen der Treibhausgasneutralität Deutschlands.

### **1.1 Motivation und Forschungsfrage**

Für eine effektive und effiziente Integration von DSM-Maßnahmen müssen Betreiber von Strom- und Wärmenetzen verlässlich die in ihrem Einzugsgebiet regelbaren Wärmelasten quantifizieren können. Doch aufgrund der thermischen Trägheit von Gebäudehülle und Trinkwarmwasserspeicher erfordert die Bestimmung von DSM-Potentialen im Gegensatz zum Stromsektor, bei dem die verbraucherseitige Antwort auf DSM-Maßnahmen wie beispielsweise durch Spül- und Waschmaschinen zumeist unmittelbar und direkt erfolgt, andere Ansätze. Die Inhomogenität des Gebäudebestandes bezüglich verwendeter Baumaterialien und Gebäudegrößen, die unterschiedlichen Sanierungszustände sowie abweichende Nutzungsarten und subjektive Raumtemperaturanforderungen erschweren zusätzlich die Abschätzung von DSM-Potentialen.

Generelles Ziel ist es, eine modulare Methodik zu erarbeiten, mit der für ein beliebiges Wohnsiedlungsgebiet das zugrundeliegende DSM-Potential für Wärmeanwendung auf Basis von Typgebäuden abgeschätzt werden kann. Hierzu werden in einem ersten Schritt generische DSM-Potentiale von Raumwärme (RW) und Trinkwarmwasser (TWW) für den typisch deutschen Wohngebäudebestand gemäß der Gebäudetypologie nach [5] mittels mehrzonaler Gebäudesimulationen und Speicherfüllstandsoptimierungen quantifiziert. In einem zweiten Schritt werden anschließend die DSM-Potentiale auf ein beispielhaftes Wohnquartier angewandt und die resultierenden Wärmelastgänge hinsichtlich der erzielbaren Lastverschiebung bzw. -vergleichmäßigung analysiert. In dem abgeschlossenen Projekt [8] und dem aktuellen Forschungsvorhaben [9] werden die Effekte einer weitreichenden Digitalisierung von Kunden und die damit ggf. realisierbaren DSM-Potentiale auf den Betrieb eines Fernwärmenetzes untersucht.

### **1.2 Aufbau der Arbeit**

In Kapitel 2 werden einerseits die wissenschaftlichen Grundlagen zu DSM für Wärmeanwendungen gelegt sowie andererseits der aktuelle Stand der Wissenschaft bezüglich der Quantifizierung von DSM-Potentialen für RW und TWW im Wohnungssektor aufgezeigt. Aufbauend auf der Gebäudetypologie nach [5] wird im Kapitel 3 die Methodik zur Erstellung von mehrzonalen Gebäudemodellen und zur Ableitung sowohl von DSM-Potentialen als auch Lastganglinien erläutert. Die generischen DSM-Potentiale aus den Gebäudesimulationen werden in Kapitel 4 diskutiert und in Kapitel 5 deren Einfluss auf den Lastgang einer fiktiven Wohnsiedlung

analysiert. Im Fazit und Ausblick werden die Ergebnisse kritisch betrachtet und somit die Analyse thematisch abgerundet.

## **2 Demand-Side Management für Wärme in Wohngebäuden**

Generell versteht man unter Demand-Side Management (DSM) die Planung, Durchführung und Überwachung verschiedener Maßnahmen durch Netzbetreiber, um den Energieverbrauch der Kunden temporär zu beeinflussen. Hauptziel ist, den Lastgang so gut wie möglich mit der Erzeugung abzustimmen, bzw. diesen dahingehend zu verändern [6].

### **2.1 Definition und Stand der Technik**

Bei der Lastverschiebung wird versucht, Last von Zeiten hoher Nachfrage zu Zeiten geringerer Lasten verlagert wird. Thermische Energie kann in einem Gebäude auf unterschiedliche Weise gespeichert werden: Im Bereich der TWW-Bereitstellung fungieren Warmwasserspeicher als Puffer und entkoppeln die Warmwasserbereitstellung vom aktuellen Bedarf. Für die Raumwärmebereitstellung kann die Gebäudehülle als Zwischenspeicher von thermischer Energie fungieren. Die Menge an speicherbarer Energie hängt hierbei vor allem von der Bausubstanz ab und ist direkt proportional zur spezifischen Wärmekapazität des Baumaterials, der Masse sowie dem Temperaturunterschied zwischen Bausubstanz und Umgebung.

Aktive DSM-Maßnahmen auf der Betreiberseite spielen z. B. derzeit in Fernwärmesystemen keine Rolle. Nichtsdestotrotz kann eine nächtliche Temperaturabsenkung der Raumsolltemperaturen den Gesamttraumwärmebedarf senken und somit eine vorteilhafte DSM-Maßnahme im Fernwärmenetz sein [7]. Das klassische DSM, mit Verbrauchern die mittels intelligenter Steuerungsalgorithmen zu- und abgeschaltet werden, ermöglicht einen großen Bereich an Flexibilität für das Fernwärmeversorgungssystem. Bei Wohngebäuden mit elektrischer Wärmeversorgung ermöglicht DSM die Aufrechterhaltung einer hohen Versorgungssicherheit des Stromnetzes [10,11]. Das zeitliche Lastverschiebungspotential hängt dabei in erster Linie von der thermischen Trägheit des Gebäudes ab [12]. Der Nutzen durch die Netzstabilisierende Wirkung von DSM steht hingegen im Fall des Ausbaus der elektrisch basierten Wärmeversorgung mit dem hierdurch einhergehenden erhöhten Energiebedarf in der Wärmebereitstellung gegenüber [10,13,14].

### **2.2 Einordnung der Literatur**

In den letzten Jahren wurde eine beträchtliche Anzahl von Studien publiziert, die sich mit den Potentialen und Auswirkungen von DSM befassen (vgl. Abbildung 1).

Dargestellt sind insgesamt 4174 Publikationen, die seit 1990 als Artikel in Fachzeitschriften erschienen sind oder auf Konferenzen präsentiert wurden. Auffallend ist die Trendentwicklung der jährlichen Publikationen ab dem Jahr 2010, in der die Thematiken um Erneuerbare Energien, Sektorintegration und Flexibilisierung an allgemeinem Interesse zulegten und somit auch Forschungsfragen hinsichtlich DSM befeuerten. Hingegen wird mit Anteilen von etwa 3,2 % an der Gesamtanzahl publizierter Arbeiten den DSM-Anwendungen im Wärmemarkt wenig Rechnung getragen.

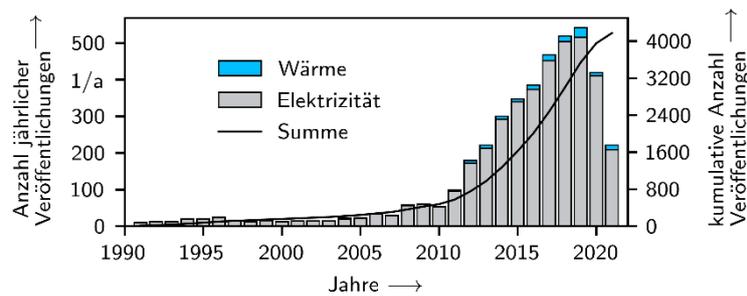


Abbildung 1: Quantitative Metaanalyse der zwischen den Jahren 1990 und 2021 durchgeführten Studien zu DSM, differenziert nach den Anwendungsfeldern Elektrizität und Wärme.

Im Folgenden werden ausgewählte Publikationen diskutiert, die sich explizit mit der Verschiebung von Wärmelasten beschäftigt haben, um einerseits den aktuellen Stand der Forschung abzustecken sowie andererseits die Relevanz dieser Untersuchung aufzuzeigen. Die Einordnung der Literatur richtet sich nach Art und Umfang der verwendeten Typgebäudemodelle sowie nach deren Anwendungsgebiet. Aufgrund des Projektschwerpunkts richtet sich die Literaturrecherche vorrangig auf Anwendungen in Wärmenetzen.

Im Hinblick auf den RW-Bedarf legten [15–17] besonderes Augenmerk auf die Reduzierung von Lastspitzen, die Aufrechterhaltung des thermischen Komforts sowie auf Energie- und Kosteneinsparungen durch intelligente Heizstrategien. Im Kontext von Wärmenetzen wurde in [18] ein Multi-Agenten-System vorgestellt, das die gesamte Wärmelast in einem Fernwärmenetz durch DSM dynamisch steuert und damit Spitzenlasten reduziert. Dies wurde durch Ausnutzung der thermischen Trägheit der Gebäude aufgrund ihrer individuellen thermischen Energiespeicherkapazitäten erreicht. In [19] wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Wärmespeicherkapazitäten von Wohngebäuden auf die Auslegung und den Betrieb von Fernwärmenetzen mit Hilfe von Gebäudesimulationen untersucht. Dazu wurde ein eingeschossiges dänisches Einfamilienhaus aus dem Jahr 1950 für drei Sanierungsstufen simuliert und bewertet. Neben den gebäudespezifischen Eigenschaften wurden in [20] auch bewohnerabhängige Einflüsse auf die Heizlastprofile von Wohngebäuden berücksichtigt. So wurde sowohl ein Einfamilien- als auch ein Mehrfamilienhaus mit insgesamt vier verschiedenen Nutzerprofilen modelliert. Ziel von [21] war es, eine Optimierungsstrategie zu entwickeln, die die Vorheizzeit von Gebäuden am Morgen nutzt, um eine Spitzenlastverschiebung zu erreichen. Die Gebäude wurden als einfache Ein-Punkt-Modelle durch die Rekombination verschiedener gebäudespezifischer Parameter dargestellt.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Gebäudemodelle, die zur Quantifizierung von DSM-Potentialen für RW Verwendung finden, entweder stark vereinfacht sind oder nur einen begrenzten Ausschnitt des allgemeinen Gebäudebestands abdecken. Dies ist vor allem eine Folge des arbeitsintensiven Prozesses, detaillierte, mehrzonale Gebäudemodelle anzufertigen und zu simulieren. Da die Transmissionswärmeverluste jedoch u.a. von den verwendeten Materialien, der Raumaufteilung und dem Nutzerverhalten abhängen, sind für eine genaue Abschätzung des DSM-Potentials detailliertere Gebäudemodelle erforderlich.

### 3 Methodik zur Quantifizierung des DSM-Potentials

Zur Quantifizierung des DSM-Potentials einer Wohnsiedlung findet eine dreiteilige Methodik Anwendung. Zu Beginn werden mehrzonale Gebäudemodelle gemäß der Wohngebäudetypologie nach [5] erstellt und simuliert. Im zweiten Schritt erfolgt die Anwendung eines gebäudescharfen Algorithmus zur Optimierung der TWW-Speicherbeladung. Abschließend fließen die ermittelten Potentiale in einen Lastgenerator ein, mit dem Zeitreihen der RW- und TWW-Nachfrage sowohl mit als auch ohne DSM simuliert werden.

#### 3.1 Wohngebäudetypologie nach TABULA

Wohngebäudetypologien verfolgen das Ziel der Klassifizierung von Wohngebäuden auf der Grundlage architektonischer bzw. baukonstruktiver Merkmale. Daher wurden die Gebäudemodelle an die in [5] gegebenen generischen Gebäuden der Größenklassen Einfamilien- (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) angelehnt. Die Typisierung basiert auf Werten, die den RW-Bedarf der Wohngebäude maßgeblich beeinflussen, wie beispielsweise Gebäudegeometrie, verwendete Baumaterial, Baualtersklasse, beheizte Wohnfläche, Sanierungszustand sowie der Art der Wärmeversorgung. Hinsichtlich des Sanierungszustands wird gemäß [5] unterschieden zwischen:

- (1) Es wurden keine zusätzlichen energetischen Sanierungsmaßnahmen nach der Errichtung des Gebäudes vorgenommen,
- (2) Das Gebäude wird konventionell saniert. Böden, Wände und das Dach/die obere Decke werden wärmegeklämt sowie die Fenster modernisiert und
- (3) der Sanierungszustand des Gebäudes wird faktisch an den eines Passivhauses angepasst. Die Dämmstärke wird erhöht und die Fenster

#### 3.2 Mehrzonale, transiente Gebäudesimulationen mittels Modelica

Modelica ist eine objektorientierte Programmiersprache, die zur Beschreibung komplexer, physikalischer Systeme verwendet wird und über eine große Anzahl an vorgefertigten Modellbibliotheken verfügt [23]. Die Open-Source-Bibliothek BuildingSystems ist speziell für die dynamische Simulation von Gebäuden konzipiert. Sie enthält u.a. Gebäudekonstruktionen (Wände, Fenster, Türen, etc.), verschiedene Heizquellen und Umgebungsmodelle. Die Simulation wurde mit JModelica 2.4 und Dymola 202x mit der Modelica Standard Library Version 4.0 und der BuildingSystems Library Version 2.0.0-beta durchgeführt.

##### 3.2.1 Gebäudekubaturen

Bei der Geometrie der Grundfläche unterscheidet [5] zwischen einer "kompakten" und einer "einfachen" Projektion. Der Einfachheit halber wird die "kompakte" Projektion mit einer rechteckigen und die "einfache" mit einer quadratischen Grundfläche modelliert. Darüber hinaus werden weitere Vereinfachungen vorgenommen, um die Komplexität der Modelle zu reduzieren und damit die Rechenzeiten in einen handhabbaren Umfang zu halten. Folgende Annahmen wurden hinsichtlich einer Vereinfachung der Modellkomplexität vorgenommen:

- die Gebäudehülle ist kastenförmig, ohne durch z. B. Treppenhäuser, Balkone, Wintergärten Überstände, etc. entstehenden Ausbuchtungen oder Vertiefungen,

- teilkonditionierte Dachböden werden anteilig als Wohnfläche gezählt und damit in der Energiebilanz berücksichtigt und
- teilkonditionierte Kellerräume werden in der Energiebilanz und bei allen weiteren Betrachtungen ausgeklammert, da sie nicht zur beheizten Wohnfläche zählen.

Das Längen-/Breitenverhältnis der Grundfläche und die Verteilung der Wohnungen wird mit den Typologien aus [22] über die allgemeine Planung von Gebäuden geschätzt. Für EFH und MFH erfolgt die Dimensionierung und Anordnung der Räume innerhalb der Wohnungen in Anlehnung an [23] für Standard-Badezimmer und -Schlafräume in Mehrfamilienhäusern. Bei Angabe einer Wertespanne wird das arithmetische Mittel gewählt. Für EFH sind die Längen- und Breitenverhältnisse sowie die Anordnung der einzelnen Räume anhand von generischen Bauplänen ermittelt.

Die Treppenhäuser werden nach den Vorschriften der DIN 18065 modelliert. Die Gebäudehülle und der Innenausbau bestehen aus verschiedenen, dem Gebäudetyp und dem Baualter entsprechenden Materialien. Ausgehend von den verwendeten Materialien und den in [5] angegebenen Wärmedurchgangskoeffizienten werden die resultierenden Dicken von Dach, Innen- und Außenwänden, Fußböden und Fenstern bestimmt.

### 3.2.2 Interne und externe Rahmenbedingungen

Die Umsetzung von DSM-Maßnahmen wird nur dann eine hohe Akzeptanz erfahren, wenn der Komfort der Nutzer nicht eingeschränkt wird. Thermische Behaglichkeit wird häufig definiert als "subjektive Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung" [24]. Die Bewertung ist subjektiv, da sie unter anderem von verschiedenen Faktoren wie Bekleidungsgrad, Geschlecht, Alter und Stoffwechselrate abhängt [25]. Es gibt verschiedene Modelle zur Beschreibung der thermischen Behaglichkeit auf der Grundlage physikalischer Parameter. Die Grenzbereiche der thermischen Komfortzone werden durch die Definition einer neutralen Komforttemperatur sowie einer unteren und oberen Komforttemperatur für jeden Raum bzw. jede Wohnung festgelegt. Die Definition der raumnutzungsartspezifischen Komforttemperaturen basiert auf der von [26] entwickelten Methodik, wobei eine mittlere, außentemperaturunabhängige Komforttemperatur angesetzt wurde.

Für die Simulationen wird ein allgemeines Wettermodell erstellt, bei dem die Umgebungstemperaturen schrittweise von 15 auf -10 °C in Inkrementen von 5 K abgesenkt wird. Bei jedem dieser Temperaturniveaus wird ein abruptes Abschalten der Heizungsanlage simuliert, wodurch die einzelnen Raumtemperaturen als Folge dessen von der mittleren Komforttemperatur aus abnehmen. Erreicht die mittlere Raumtemperatur die untere Temperatur des thermischen Komfortbandes, wird die Heizung im Modell wieder aktiviert. Das ermittelte DSM-Potential von RW setzt sich aus einer Abschaltdauer und einer abschaltbaren RW-Leistung zusammen und kann demnach als eine Energie in kWh/Zyklus angegeben werden.

### 3.3 DSM-Potentiale für Trinkwarmwasser

Im Gegensatz zur Lastverschiebung der RW-Nachfrage können die Wärmelasten für die TWW-Bereitung aufgrund der Unmittelbarkeit der Nachfrage nicht direkt verschoben werden. Die TWW-Speicher der Gebäude ermöglichen jedoch eine temporäre Entkopplung von Angebot und Nachfrage. Wird die Gesamtheit der TWW-Speicher eines Wohn- bzw. Versorgungs-

gebiets mittels intelligenter Kommunikationstechnologien über angepasste Regelungsalgorithmen zentral beladen, kann ein Lastverschiebungspotential realisiert werden, das, je nach zugrundeliegender Wärmeversorgungstechnologie, zu reduzierten Lasten in Strom- und Wärmenetzen führt. Mathematisch kann eine solche zentrale Regelung als gemischt Ganzzahliges Optimierungsproblem mit perfect-foresight beschrieben werden, bei dem die Kosten zum Befüllen der dezentralen TWW-Speicher durch fiktive monetäre Anreize aus Sicht der Endkunden minimiert werden. Bei der Optimierung wird ein maximaler Beladevolumenstrom von 15 l/min pro Wohnung angesetzt. Der Mindestfüllstand beträgt 15 % der Gesamtspeicherkapazität, die wiederum mit 90 % des Tagesbedarfs an TWW angenommen wird. Für Lade- und Entladeverluste werden pauschal Effizienzen von jeweils 95 % veranschlagt. Die Optimierung wird iterativ für jedes Gebäude des Quartiers durchgeführt, wobei sowohl der Gesamtwärmebedarf als auch die variablen Wärmebezugskosten in jedem Schritt aktualisiert werden. Je nach Verhältnis zwischen TWW-Speichergröße und TWW-Nachfrage variieren die Optimierungszeiten zwischen 10 s und 10 min.

### 3.4 Ableiten von Wärmebedarfszeitreihen

Um die Effekte von DSM auf die zugrundeliegenden Verteilnetze analysieren zu können, sind zeitlich aufgelöste Lastgänge erforderlich. Zu diesem Zweck wird der Lastprofilgenerator UrbanHeatPro zur Ableitung von Wärmebedarfszeitreihen verwendet<sup>2</sup>. UrbanHeatPro ist ein Bottom-up-Modellgenerator für die probabilistische Simulation von Zeitreihen des RW- und TWW-Bedarfs einzelner Gebäude oder ganzer Stadtteile und Städte [27]. Der Wärmebedarf der Gebäude wird unter Berücksichtigung von Grundfläche, Stockwerksanzahl, Wärmedurchgangswerten für Fenster, Wände, Decken und Böden sowie durch externe und interne Wärmegegewinne als auch durch Anwesenheitsprofile und weitere statistische Kenngrößen simuliert.

Die Funktionalität von UrbanHeatPro wird dahingehend erweitert, dass die im nachfolgenden Kapitel 4 erhobenen gebäude- und umgebungstemperaturspezifischen DSM-Potentiale bei der Simulation von Lastprofilen verwendet werden können. Die Methodik ist beispielhaft in Abbildung 2 skizziert. Hierbei findet ein Algorithmus Anwendung, der für jeden einzelnen Tag zuerst die mittlere Umgebungstemperatur berechnet, mit der anschließend für das jeweilige Gebäude unter Berücksichtigung des Sanierungszustandes das nächstgelegene diskrete DSM-Potential in kWh/Zyklus ermittelt wird. Anschließend wird für den ursprünglichen Lastverlauf ein gleitender Mittelwert berechnet, dessen Fensterweite bei jedem durchlauf um einen oder mehrere Zeitschritte erweitert wird (vgl. Abbildung 2,  $\bar{t} = 2$  bis  $\bar{t} = 6$ ). Hierdurch kommt es zu einer zunehmenden Glättung, wodurch Lasttäler gefüllt und Spitzen abgemildert werden. Für jede Iteration werden durch Integration die verschobenen RW-Energien ermittelt und mit dem diskreten DSM-Potential verglichen. Übersteigt die an diesem Tag rechnerisch verschiebbare RW für das Auskühlen des Gebäudes (hellblau) das zuvor bestimmte diskrete DSM-Potential, wird die Iteration abgebrochen und die Prozedur für alle nachfolgenden Tag wiederholt.

---

<sup>2</sup> UrbanHeatPro kann im Github-Repository des Lehrstuhls für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme der Technischen Universität München unter der GNU General Public License kostenfrei bezogen werden; <https://github.com/tum-ens/UrbanHeatPro> (letzter Zugriff am 15.07.2021).

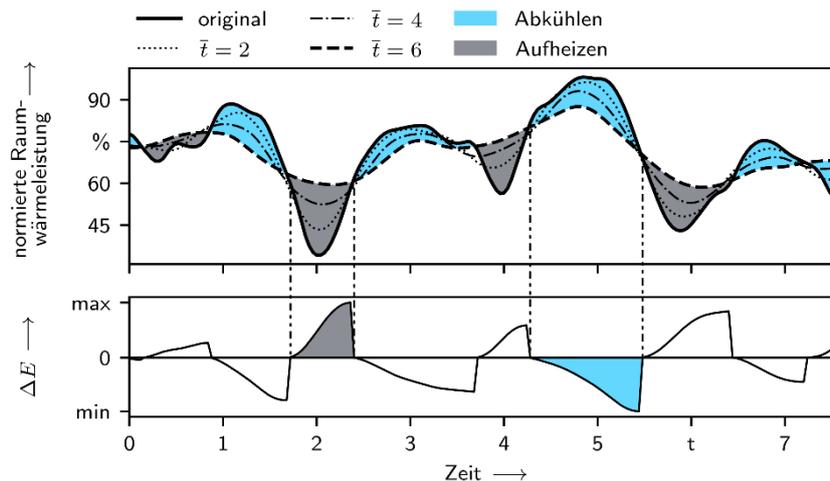


Abbildung 2: Schematisches Vorgehen zur Kombination der generischen DSM-Potentiale mit der simulierten Lastkurve des Status quo zur Ermittlung der maximal verschiebbaren RW-Leistung pro Zeitintervall.

#### 4 DSM-Potentiale der Wohngebäudetypen

Insgesamt werden zur modelltechnischen Abbildung des Wohngebäudebestands und dessen Sanierungsstufen 39 EFH- und 27 MFH-Modelle erstellt und simuliert. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Gebäudesimulationen für die Größenklassen EFH und MFH unter Berücksichtigung der jeweiligen Baualters- und Sanierungsklassen zusammengefasst. Jedes Rechteck stellt die maximale RW in kWh dar, die bei einer bestimmten Umgebungstemperatur und innerhalb eines einzigen DSM-Zyklus verschoben werden kann, ohne die thermische Komfortzone des jeweiligen Raumes, der Wohnung bzw. des Gebäudes zu verlassen. DSM-Potentiale bei positiven Umgebungstemperaturen sind auf der rechten Seite sowie DSM-Potentiale bei Temperaturen kleiner oder gleich 0 °C auf der linken Seite der Mittellinie aufgetragen.

Generell lässt sich für die EFH feststellen, dass die insgesamt verschiebbare RW mit neueren Baualters- und höheren Sanierungsklassen zunimmt. Ältere und unsanierte Gebäude (z.B. E A1 bis E E1) bieten lediglich bei Umgebungstemperaturen von größer gleich 5 °C Potentiale für DSM-Maßnahmen. Steigende DSM-Potentiale, auch bei Raumtemperaturen um 0 °C, zeigen sich bei Gebäuden mittleren Baualters (F bis I) und Gebäuden mit einer zweiten Sanierungsstufe. In neueren und vollständig energetisch sanierten Gebäuden (E J3 bis E L3) verschieben sich die nutzbaren DSM-Potentiale tendenziell von positiven zu negativen Umgebungstemperaturen. Mit verbesserter Energieeffizienz sinken die mittleren U-Werte der Gebäudehülle, wodurch im gleichen Zuge sich die Transmissionswärmeverluste reduzieren. Dies führt zu einer schrittweisen Erhöhung der Abschaltdauer der Heizungsanlage bei niedrigeren Umgebungstemperaturen von kleiner gleich 0 °C. Da mit sinkenden Umgebungstemperaturen die zur Aufrechterhaltung der Raumsolltemperatur notwendige Heizleistung ansteigt, führt dies bei moderneren Gebäuden zu einer Seitwärtsbewegung der realisierbaren DSM-Potentiale.

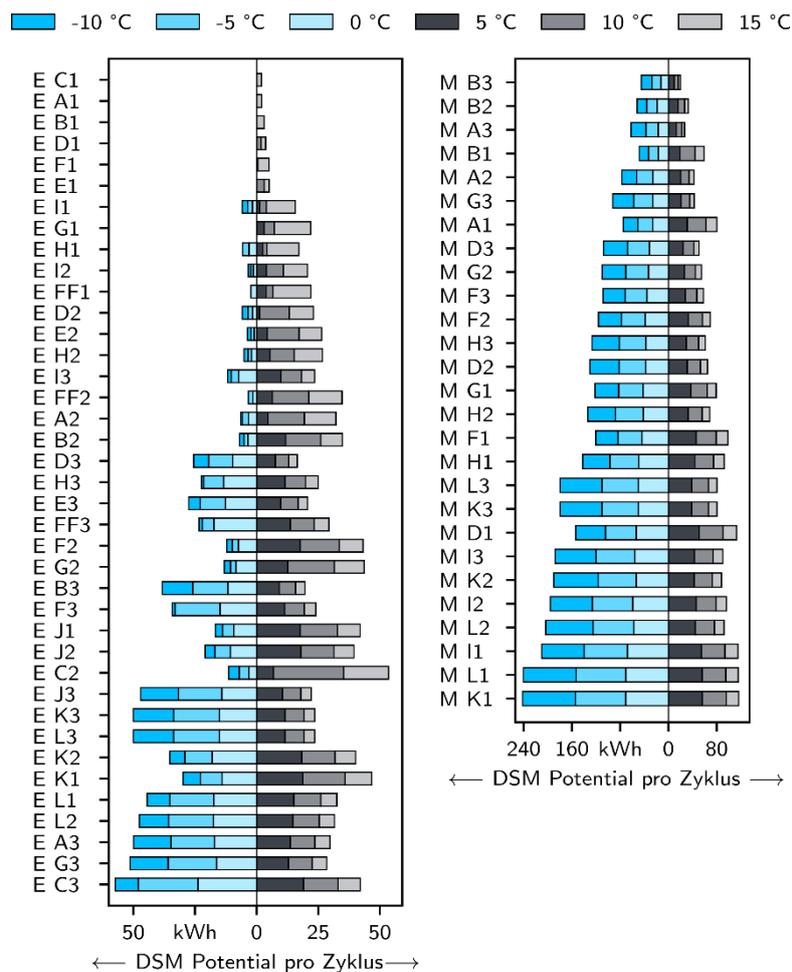


Abbildung 3: Absolutes DSM-Potential pro Zyklus in aufsteigender Reihenfolge für Wohngebäude des deutschen Wohngebäudebestands nach [5] unter Berücksichtigung unterschiedlicher Größenklassen (EFH=E und MFH=M), Baualtersklassen (A–L) und Sanierungsstufen (1–3) in Abhängigkeit diskreter Außentemperaturstufen von -10 bis 15 °C. Eigene Darstellung basierend auf der Zusammenarbeit mit [28,29].

Für die Gebäude der Größenklasse MFH werden aufgrund der komplexeren Architektur und dem damit einhergehenden Mehraufwand bei der Modellierung in einem ersten Schritt lediglich die Baualtersklassen außer E abgebildet. Im Gegensatz zu den Potentialen von EFH ist hier ein gradueller Anstieg der DSM-Potentiale in der sortierten Darstellung zu erkennen. Dies ist gleichwohl für DSM-Potentiale bei negativen sowie positiven Umgebungstemperaturen zu beobachten. Ebenso ist für neuere und modernisierte Gebäude keine eminente Verschiebung der DSM-Potentiale in Richtung negativer Umgebungstemperaturen zu beobachten, da auch bereits ältere Gebäude bei Umgebungstemperaturen kleiner 0 °C relativ hohe DSM-Potentiale realisieren können. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass mit zunehmender Sanierungsklasse von 1 auf 3 die DSM-Potentiale je Baualtersklasse gleichmäßig abnehmen, was dem allgemeinen Trend von steigenden DSM-Potentialen mit besseren energetischen Sanierungsstandards bei Gebäuden der Größenklasse EFH widerspricht. Ein größenklasseninterner Vergleich der Potentiale ist zwischen den einzelnen Baualtersklassen nicht nur durch die unterschiedlichen Wohnungsgrößen, sondern auch durch die stark variierende Anzahl an Wohnungen (z. B. vier Wohnungen in M B1 und 17 Wohnungen in M L1) gegenüber den homogenen Kubaturen der Größenklasse EFH erschwert.

## 5 Bestimmung der DSM-Potentiale für ein exemplarisches Wohnquartier

Im Folgenden wird die Methodik auf ein exemplarisches, mit Fernwärme versorgtes Wohnquartier angewandt. Im Wohnquartier befinden sich insgesamt 195 Gebäude, von denen 45 Ein- und Zweifamilienhäuser (EFH) sowie 150 Mehrfamilienhäuser (MFH) sind. Auf etwa 121.000m<sup>2</sup> beheizter Wohnfläche bietet es Wohnraum für insgesamt etwa 3.000 Personen. Die Verteilung der Baualters- und Größenklassen, die bei der Simulation der DSM-Potentiale Berücksichtigung fanden, ist in Abbildung 4 dargestellt. Bei der Einzelgebäudesimulation wurden historische Wetterzeitreihen von Unterhaching (Bayern, Deutschland) verwendet. Für die Bauteile Außenwand, Dach, Boden und Fenster wurden in Anlehnung an [5] die baualters- und größenklassenabhängige Sanierungsstufen derart definiert, dass sich im Mittel für das Wohnquartier ein spez. RW-Bedarf von etwa 80 kWh/m<sup>2</sup> a einstellt.

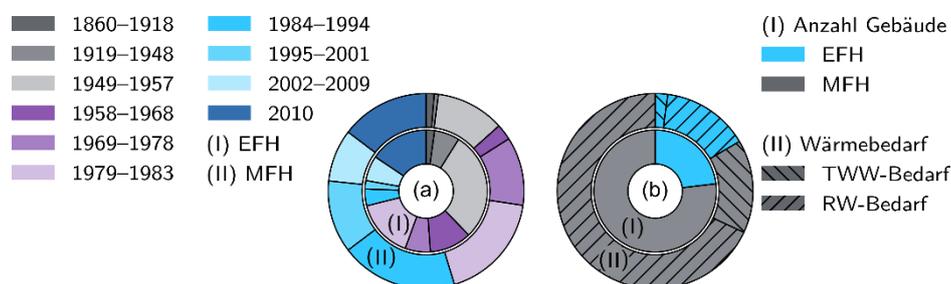


Abbildung 4: Verteilung der Baualters- (a) und Größenklassen (b) des exemplarischen Bilanzraums.

Abbildung 5 zeigt sowohl die für das Quartier simulierten Zeitreihen der gesamten TWW- und RW-Nachfrage (a) als auch die Gesamtwärmenachfrage je Gebäude in geordneter Reihung (b). Im Zeitraum eines Jahres werden in Summe etwa 11,4 GWh/a Wärme nachgefragt, wovon auf die TWW-Bereitstellung ca. 13,3 % entfallen. Ende Januar wird die maximale Spitzenlast von 5,3 MW erreicht. Im Jahresmittel liegt eine durchschnittliche Wärmelast von etwa 1,3 MW an. 17 Wohngebäude akkumulieren 25 % der Gesamtwärmenachfrage des Wohnquartiers, was einem Anteil am Gebäudebestand von etwa 8,7 % entspricht (vgl. Abbildung 5 (b)). 28 % Prozent des Wohngebäudebestands sind für 50 % der Gesamtwärmenachfrage des Quartiers verantwortlich.

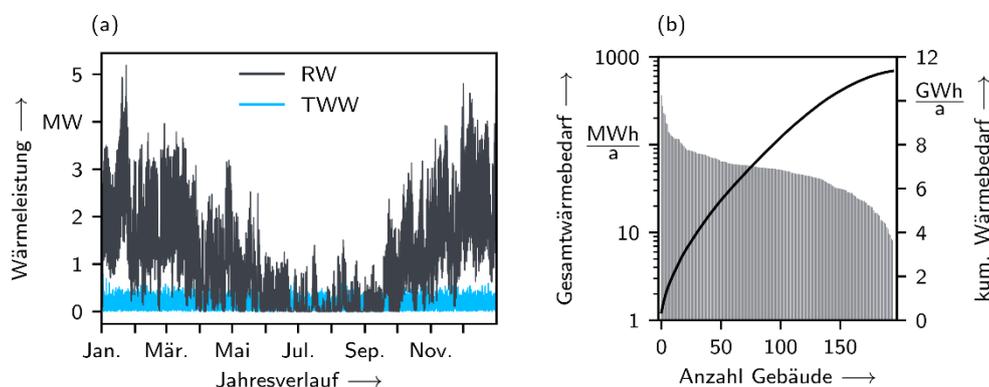


Abbildung 5: Simulierte RW- und TWW-Nachfrage sowohl in zeitlicher Auflösung für das gesamte Wohnquartier (a) als auch in auf gebäudeebene aggregierter Gesamtwärmenachfrage in geordneter Reihung (b).

## 5.1 Analyse der Lastverschiebungspotentiale

Werden die im Kapitel 3.2 und 3.3 ermittelten DSM-Potentiale auf den ursprünglichen Lastverlauf der RW- und TWW-Nachfrage des fiktiven Wohnquartiers angewandt, ergibt sich ein Verlauf gemäß Abbildung 6. Dargestellt ist die Gesamtwärmenachfrage als Summe der RW- und TWW-Nachfrage. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass durch DSM sowohl lokale Spitzenlasten abgemildert als auch die Last in Zeiten geringer Wärmenachfrage angehoben werden. Vor allem in der Heizperiode zwischen Oktober und April zeigen sich durch die tendenziell hohe RW-Nachfrage große realisierbare DSM-Potentiale. In den Sommermonaten werden verschiebbare Lasten zum Großteil durch die intelligente Regelung der TWW-Speicher bedingt.

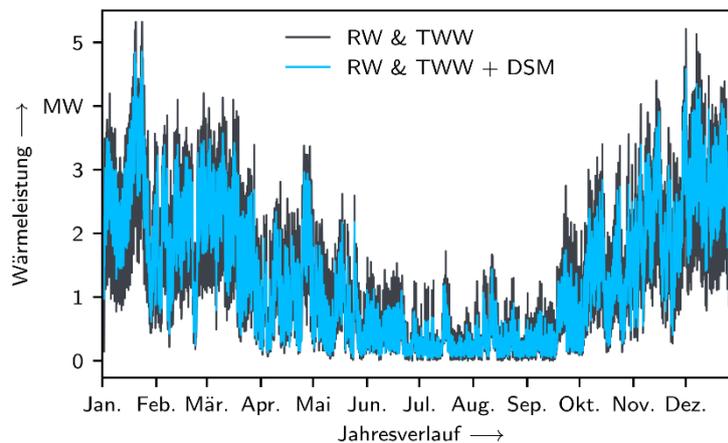


Abbildung 6: Simulierte Gesamtwärmenachfrage sowohl mit als auch ohne DSM in 60-minütiger Auflösung.

In Summe kann die Spitzenlast von ursprünglich 5,3 MW um 8,8 % auf 4,8 MW gesenkt werden. Mit Blick auf Abbildung 7 wird deutlich, dass nicht nur eine Reduktion der Spitzenlasten mittels DSM erzielt werden kann, sondern dass der generelle Lastverlauf eine Vergleichsmäßigung erfährt. Im Vergleich zur Jahresdauerlinie des Referenzfalls ohne DSM erfolgt in mehr als 2200 Betriebsstunden (bis zum Schnittpunkt beider Jahresdauerlinien) eine signifikante Lastreduktion. Die Reduktion der Spitzenlasten führt als Folge in etwa 4200 Betriebsstunden zu einer merklichen Anhebung der Wärmelast gegenüber dem Niveau des Referenzfalls. Hierdurch wird die Jahresauslastung von grundlastfähigen Anlagen, wie beispielsweise Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), erhöht, wohingegen die Laufzeiten von ökologisch schlechter gestellten Spitzenlastanlagen wie z. B. Elektrodenheiz- und Gaskesseln reduziert werden kann. Für sektorintegrierte Wärmesysteme bedeutet eine gleichmäßigere Wärmelast ebenfalls weniger in die Stromnetze eingebrachte Lastspitzen.

Die Zeiten, in denen DSM-Maßnahmen vorrangig Anwendung finden, kann aus Abbildung 8 entnommen werden. Die Farbgebung der ggü. dem ursprünglichen Lastverlauf vorgezogenen (grau) bzw. nachgeholten Lasten (hellblau) orientiert sich an derjenigen aus Abbildung 2. Für den wärmenetzseitigen Bezug von TWW zeigt sich unter Berücksichtigung des ursprünglichen Verlaufs, dass die TWW-Speicher vorrangig in den Nachtstunden zwischen 23:00 und 04:00 Uhr beladen werden, wobei hier die reduzierte Raumwärmelast infolge der Nachtabenkung ausgenutzt wird (vgl. Teilabbildung (a)).

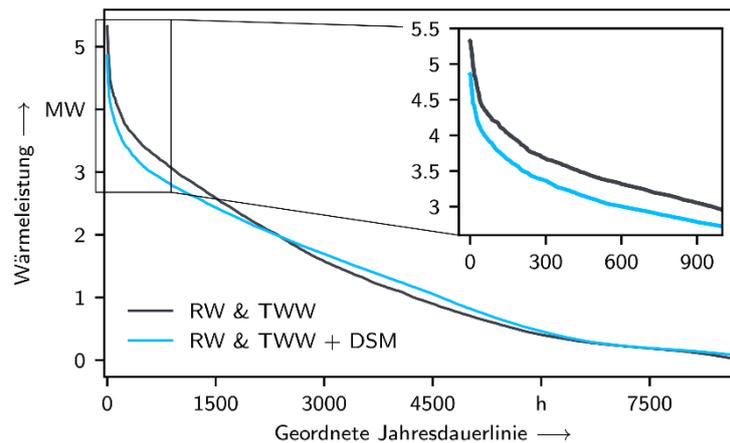


Abbildung 7: Jahresdauerlinien der Gesamtwärmenachfrage des Wohnquartiers sowohl mit als auch ohne DSM.

Durch Wegfall dieses Zeitfensters in den Sommermonaten werden die TWW-Speicher zwar dennoch vorrangig in den Morgenstunden beladen, jedoch weniger intensiv und in mehreren kleinen Intervallen.

Es ist zu erkennen, dass sich die DSM-Maßnahmen für RW hauptsächlich auf die Heizperiode beschränken und somit in den Monaten Juni bis September fast keine Anwendung finden (vgl. Abbildung 8 (b)). In der Heizperiode hingegen erfolgt aufgrund der Nachtabsenkung zwischen 23:00 und 04:00 Uhr ein „Aufheizen“ der Gebäude in den Morgenstunden, wobei die zusätzliche Wärmeenergie ausreicht, die Heizungsanlagen zwischen 04:00 und 08:00 Uhr zu drosseln. Über den weiteren Vor- und restlichen Nachmittag hinweg erfolgt erneut ein leichtes, graduelles Aufheizen, wodurch die Lastspitzen in den Abendstunden reduziert werden können. In der Hauptphase der Heizperiode finden somit zwei tägliche DSM-Zyklen statt.

Der Vergleich beider Teilabbildungen zeigt, dass die verschiebbare Wärmemenge sowohl für RW als auch für die Bereitstellung von TWW in einer ähnlichen Größenordnung liegen, wobei anzumerken ist, dass innerhalb des Quartiers annähernd etwa das sechsfache an Raumwärme konsumiert wird. Die intelligente Regelung dezentraler TWW-Speicher stellt sich daher als effiziente und vielversprechende Technologie zur Lastvergleichmäßigung heraus.

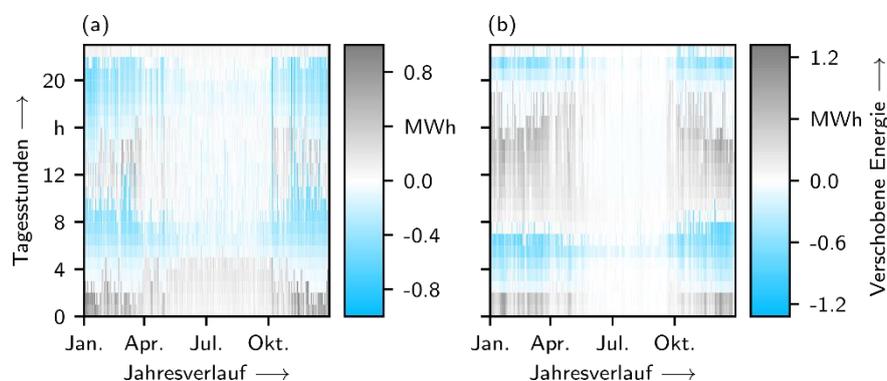


Abbildung 8: Tages- und Jahresverlauf der verschobenen TWW- (a) und RW-Nachfrage (b).

## 5.2 Kritische Würdigung

Da der Fokus ausschließlich auf der bauphysikalischen Beschaffenheit der Gebäude lag, wurden weder externe solare noch interne Wärmegewinne berücksichtigt. Gleichwohl konnten Einrichtungsgegenstände, die ebenfalls Einfluss auf die thermische Masse eines Gebäudes haben, in der Modellierung nicht mit integriert werden. Hierdurch wird das reale DSM-Potential gegenüber dieser Erhebung abweichen. Ferner zeigt sich auch eine große Abhängigkeit des erzielbaren DSM-Potentials für Raumwärme von den verwendeten Baumaterialien und Isolationsdicken. Dies ist besonders bei den DSM-Potentialen für das Typgebäude E C ersichtlich, dessen unsanierte Gebäudevariante E C1 die geringsten Potentiale aller EFH besitzt, wohingegen wiederum durch die Modernisierung auf E C3 die größten absoluten Potentiale realisiert werden können. Verstärkt wird dieser Effekt zudem durch die zugrundeliegende Raumaufteilung und -anordnung, die, zusammen mit unterschiedlichen Nutzungsprofilen und individuellen Komfortbedingungen, das real erzielbare DSM-Potential gegenüber dieser Erhebung weiter verzerren können. Des Weiteren wurden keine zusätzlichen Transmissionswärmeverluste bei überhitzten Gebäuden berücksichtigt. Um den resultierenden Fehler zu begrenzen, wurde das Zeitfenster für die Nutzung von DSM-Potential für RW für jedes Gebäude auf maximal 2 h begrenzt. Trotz aller Unsicherheiten kann die Methodik verwendet werden, die innerhalb eines Bilanzraums erzielbaren DSM-Potentiale in einem ersten Aufschlag zu approximieren und stellt hierdurch einen Zugewinn bzw. eine Ausgangsbasis für weiterführende Forschungsfragen dar.

Eine Validierung der vorgestellten DSM-Potentiale ist für die untersuchten Typgebäude nur indirekt über eine Hochrechnung der pro DSM-Zyklus verschobenen Wärmeenergie innerhalb der gegebenen Abschaltzeit auf den Gesamtwärmebedarf möglich. Hierbei zeigt sich jedoch eine gute Näherung. Werden die absoluten DSM-Potentiale in kWh auf das jeweilige Gebäudevolumen bezogen, so liegen die erzielbaren Potentiale in Wh/m<sup>3</sup> in einer ähnlichen Größenordnung wie diejenigen in der Untersuchung von [30].

## 6 Fazit und Ausblick

Der Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energien stellt mitunter die Versorgungsinfrastruktur von Strom- und Wärmenetzen vor große Herausforderungen. DSM kann hierbei eine probate Maßnahme zur regulierten Absenkung von Lastspitzen sein und somit zur generellen Vergleichmäßigung von Lasten beitragen. Eine effektive Implementierung von DSM-Maßnahmen setzt jedoch eine präzise Kenntnis über die technisch realisierbaren Potentiale voraus. Allerdings gestaltet sich die Quantifizierung von DSM-Potentialen der RW- und TWW-Nachfrage aufgrund der ausgesprochenen Inhomogenität des Gebäudebestands, verschiedener Sanierungszustände sowie unterschiedlicher Nutzungsanforderungen als schwer. Im Zuge dessen wird eine generelle Methodik präsentiert, mit derer Hilfe in einem ersten Schritt die DSM-Potentiale für RW und TWW für ein beliebiges Wohnquartier auf Basis von Typgebäuden ermittelt sowie in einem zweiten Schritt hochaufgelöste Bedarfszeitreihen sowohl mit als auch ohne die Option zur Lastverschiebung simuliert werden können.

In der Anwendung auf ein fiktives Wohnquartier, bestehend aus 195 Wohngebäuden, zeigt sich, dass durch DSM die Spitzenlast zur Bereitstellung von RW und TWW für den zugrundeliegenden Gebäudebestand um ca. 8,8 % ggü. dem Referenzfall abgesenkt werden kann. Hohe Wärmelasten können in einem Zeitraum von 2.200 Betriebsstunden reduziert werden;

in den restlichen Zeiten überwiegt eine leicht angehobene Wärmelast im Vergleich zum Ausgangszustand. Es zeigen sich zudem Unterschiede in den Zeiten, in denen DSM-Maßnahmen für RW und TWW Anwendung finden. Hierbei unterliegen die jeweiligen Anwendungen neben täglichen vor allem auch saisonalen Variation.

Die vorgestellten Ergebnisse bezüglich der erzielbaren Lastverschiebepotentiale werfen weiterführende Fragen hinsichtlich der zu erwartenden Auswirkungen auf den Betrieb von beispielsweise Strom- und Wärmenetzen auf. Das Forschungsprojekt FW-Digital setzt genau an dieser Stelle an und untersucht beispielhaft, welche Effekte durch eine flächendeckende Digitalisierung von Hausübergabestationen bzw. durch das damit erzielbare DSM auf den Wärmenetzbetrieb resultieren. Anhand transienter Wärmenetzmodelle werden die Einflüsse veränderter Last- und gebäudeseitiger Temperaturverläufe auf die Thermohydraulik des Wärmenetzes simuliert sowie mittels nachgelagerter technoökonomischer Analysen bewertet und schließlich den Kosten der Digitalisierung gegenübergestellt.

### **Danksagung**

Die vorgestellte Methodik und die präsentierten Ergebnisse entstammen den Arbeiten aus dem aktuell laufenden Forschungsprojekt Fernwärme-Digital (FW-Digital) (Förderkennzeichen: 03EN3021D, Laufzeit: 01.05.2020-30.04.2023).

Die beteiligten Autoren sprechen hiermit Ihren Dank dem BMWi für die Förderung des Forschungsprojektes aus, welches durch die Erarbeitung von Grundlagen zur Digitalisierung technischer und betriebswirtschaftlicher Prozesse in Fernwärmesystemen einen bedeutungsvollen Anteil zur Transformation von Bestandwärmenetzen schafft, und somit einen wichtigen Beitrag zur Erfüllung der Klimaschutzziele des Wärmesektors leistet.

### **Literatur**

- [1] AGEB. (24. Januar, 2020). Energieverbrauch für Wärmezwecke in Deutschland nach Sektoren im Jahr 2018. 2021.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi): Energiedaten Gesamtausgabe. 2018.
- [3] Statistisches Bundesamt. Baugenehmigungen und Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie – Lange Reihen ab 1980 - 2020. 2021.
- [4] Unnerstall T. Versorgungssicherheit [Internet]. Energiewende verstehen: Die Zukunft von Autoverkehr, Heizen und Strompreisen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018. S. 19–34. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-57787-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57787-5_2)
- [5] Loga T, Diefenbach Nikolaus, Born R. Deutsche Gebäudetypologie. Darmstadt: IWU; 2011.
- [6] Gellings CW. The concept of demand-side management for electric utilities. Proc IEEE. Oktober 1985;73(10):1468–70.
- [7] Dolinay V, Vasek L. Benefits of night temperature setback in the control strategy of the district heating system. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences; 2019. S. 01052.

- [8] Koordinierter Schlussbericht – Langfassung für das Projekt „Digitalisierung von energieeffizienten Quartierslösungen in der Stadtentwicklung mit intelligenten Fernwärme-Hausanschlussstationen – iHAST – Phasen 1 - 2“. 2020 Apr.
- [9] FW-Digital: Digitalisierung der Technik und der Geschäftsprozesse in Wärmeversorgungssystemen, FKZ.: 03EN3021A, <https://www.agfw.de/fw-digital/>.
- [10] Yu, Young Jae. Demand-Side-Management with heat pumps for single family houses. In 2013.
- [11] Schulz, Kumm, Hufendiek, Korkmaz, Blesl. Heat4SmartGrid Intelligente dezentrale erneuerbare Wärme für Smart Grids in Baden-Württemberg -Lastflexibilisierung zur Verteilnetzentlastung mit Wärmepumpen. Universität Stuttgart Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); 2020 Juni.
- [12] Arteconi A, Hewitt NJ, Polonara F. Domestic demand-side management (DSM): Role of heat pumps and thermal energy storage (TES) systems. *Appl Therm Eng.* 1. März 2013;51(1):155–65.
- [13] Arteconi A, Polonara F. Assessing the Demand Side Management Potential and the Energy Flexibility of Heat Pumps in Buildings. *Energies.* 14. Juli 2018;11(7):1846.
- [14] L. Cremer J, Pau M, Ponci F, Monti A. Optimal Scheduling of Heat Pumps for Power Peak Shaving and Customers Thermal Comfort: In: *Proceedings of the 6th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems* [Internet]. Porto, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications; 2017 [zitiert 20. August 2021]. S. 23–34. Verfügbar unter: <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006305800230034>
- [15] International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Durfee EH, Yokoo M, Huhns MN, Shehory OM, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, u. a., Herausgeber. *Proceedings of the 6th International Joint conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems 2007: Honolulu, Hawaii, May 14-18, 2007.* New York: ACM Press; 2007.
- [16] Al-Sanea SA, Zedan MF, Al-Hussain SN. Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential. *Appl Energy* [Internet]. 2012 [zitiert 18. August 2021]; Verfügbar unter: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201600001125>
- [17] Péan TQ, Ortiz J, Salom J. Impact of Demand-Side Management on Thermal Comfort and Energy Costs in a Residential nZEB. *Buildings.* Juni 2017;7(2):37.
- [18] Wernstedt F, Davidsson P, Johansson C. Demand side management in district heating systems. In: *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems.* 2007. S. 1–7.
- [19] Biga O, Lia H, Svendsena S. Demand side management for smart district heating. In: *The 7th International Conference on Applied Energy–ICAE2015.* 2015.
- [20] Weissmann C, Hong T, Graubner C-A. Analysis of heating load diversity in German residential districts and implications for the application in district heating systems. *Energy Build.* 2017;139:302–13.

- [21] Basciotti D, Schmidt RR. Demand side management in district heating networks: Simulation case study on load shifting. *Euroheat Power Engl Ed.* 2013;10:43–6.
- [22] Heisel JP. *Planungsatlas: Praxishandbuch Bauentwurf.* 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH; 2016. 587 S. (Bauwerk).
- [23] KIT – Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau Karlsruhe. Ebert, B. *LowEx-Bestand Analyse Abschlussbericht zu AP 1.1 – Systematische Analyse von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden (eng.: LowEx building stock analysis Final report on WP 1.1 – Systematic analysis of existing multi-family buildings).* Germany; 2018.
- [24] Marsh C. *Thermal environmental conditions for human occupancy: ansi/ashrae standard 55-1992 ...* Place of publication not identified: Ashrae; 1993.
- [25] Fanger PO. *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering.* New York: McGraw-Hill; 1972. 244 S.
- [26] Peeters L, de Dear R, Hensen J, D'haeseleer W. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. *Appl Energy.* 1. Mai 2009;86:772–80.
- [27] Molar-Cruz A. A GIS-based gray-box approach for the estimation of heat demand at the urban scale. In: *38th International Energy Workshop.* Paris, France: International Energy Agency; 2019.
- [28] Engesser F. *Bestimmung des Demand-Side Management-Potentials von Raumwärme anhand von Gebäudesimulationen; Masterarbeit; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); Band-Nr. 1086; 2021*
- [29] Kerschbaum A. *Assessment of the Demand-Side-Management Potential for Space Heating of typical Multi-Family Buildings using Building Simulations; Studienarbeit; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); Band-Nr. 1103; 2021*
- [30] Hausladen G, Auer T, Schneegans J, Klimke K, Riemer H, Trojer B, u. a. *Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme – Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden.* Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik; 2014.