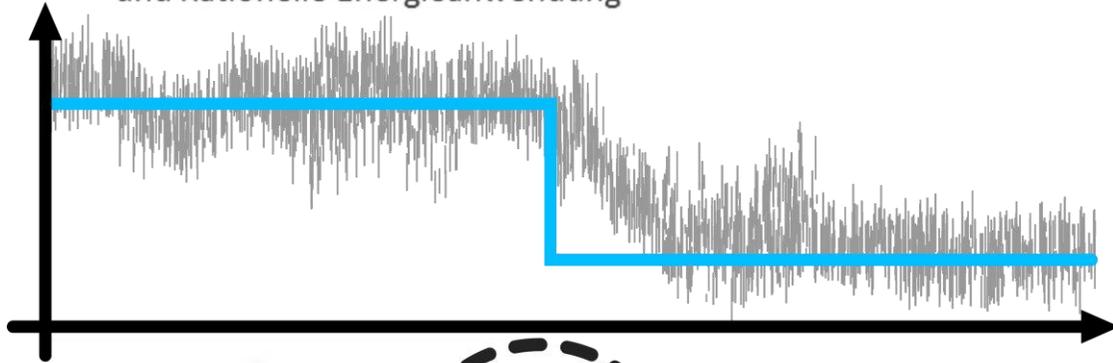




**Universität Stuttgart**

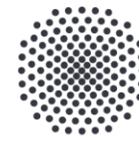
**IER** Institut für Energiewirtschaft  
und Rationelle Energieanwendung



**Ein Modularer Ansatz zur  
Bestimmung von DSM-  
Potentialen für Raumwärme  
und Trinkwarmwasser von  
Wohngebäuden auf der  
Basis von  
Gebäudetypologien**

**Frank WENDEL  
MARKUS BLESL  
GEORG HURST**

# Vorstellung



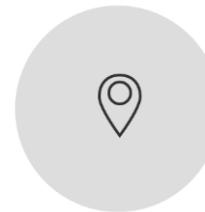
**Universität Stuttgart**  
**IER** Institut für Energiewirtschaft  
und Rationelle Energieanwendung

## Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER):

- › Professoren:
  - › Energiewirtschaft und Energiesysteme (Direktor): Prof. Dr.-Ing. Kai Hufendiek
  - › Effiziente Energienutzung: Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen
  - › Innovationsmanagement in Energiesystemen: Prof. Dr.rer.pol. Frithjof Staiß
  - › Privatdozent Energiesystem- und Technikanalyse: PD Dr.-Ing. Markus Blesl
- › Graduierten- und Forschungsschule „Effiziente Energienutzung“ Stuttgart (GREES)
- › Rund 48 Mitarbeiter und Doktoranden



„Das IER befasst sich mit Lösungswegen für Energie- und Umweltfragen an der Schnittstelle von Energietechnik, Energiewirtschaft, Umwelt und Gesellschaft“



Institut für Energiewirtschaft und Rationelle  
Energieanwendung  
Heißbrühlstraße 49a, 70565 Stuttgart

Email: sekretariat@ier.uni-stuttgart.de  
Telefon.: +49 711 685-87800  
Website: www.ier.uni-stuttgart.de

# Agenda



Einführung | Motivation | Zielstellung



Grundlagen | Methodik



DSM-Potentiale des Wohngebäudebestands



Beispielhafter Anwendungsfall



Fazit | Ausblick



# Einführung | Motivation | Zielstellung

## Einführung:

- › etwa 53% der Endenergienachfrage Deutschlands entfällt auf **Wärmeanwendungen** [1, 2]
- › Wärmewende führt zu kontinuierlich zunehmenden **Ausbau Erneuerbarer Energien und steigender Elektrifizierung** [3]
- › **Lastvergleichmäßigung** ist ein zentrales Ziel der Energiewende, da Versorgungssicherheit durch volatile Erzeugung in Kombination mit Lastspitzen reduziert wird [4]

## Zielstellung:

- › Erarbeitung einer Methodik zur effektiven Quantifizierung von **DSM-Potentialen für Raumwärme und Trinkwarmwasser auf Basis von Gebäudetypologien**
- › **Ableiten von lastverschobenen Zeitreihen** für nachgelagerte Energiesystemanalysen

## Motivation:

- › Verbraucherseitige Lastmodulation mittels **Demand-Side Management (DSM)** zur Reduktion von Lastspitzen in Strom-, Wärme und Gasnetzen
- › Effektiver Einsatz von DSM erfordert detaillierte Kenntnisse über die **verschiebbaren Lastpotentiale**
- › **Problem: Erschwerte Quantifizierung infolge**
  - › inhomogenen Gebäudebestands,
  - › abweichender Sanierungszustände
  - › unterschiedlicher Nutzungsprofile→ bisweilen relativ unbearbeitetes Forschungsfeld

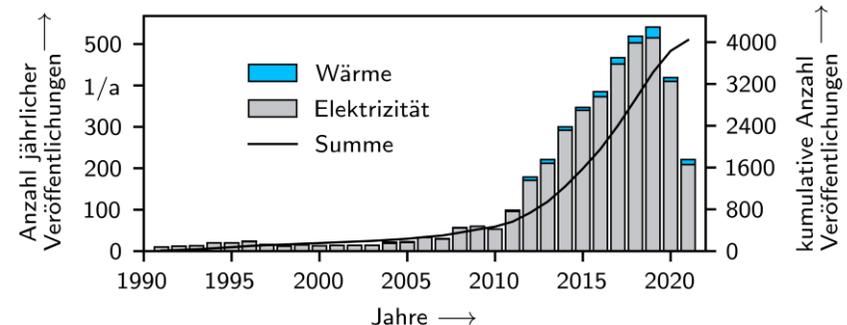


Abb.1: Quantitative Metaanalyse der zwischen den Jahren 1990 und 2021 durchgeführten Studien zu DSM, differenziert nach den Anwendungsfeldern Elektrizität und Wärme. 09.09.2021

# Agenda



Einführung | Motivation | Zielstellung



Grundlagen | Methodik



DSM-Potentiale des Wohngebäudebestands



Beispielhafter Anwendungsfall



Fazit | Ausblick

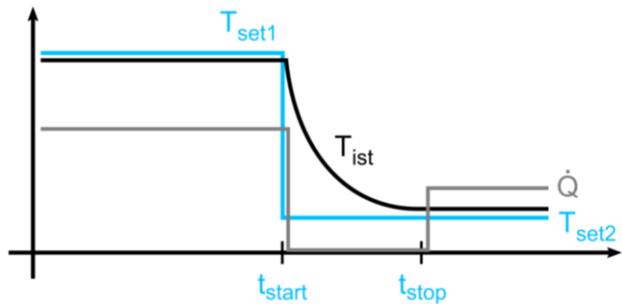


# Grundlagen | Methodik

## Grundlagen Demand-Side Management

### › Grundlagen DSM:

- › **Raumwärme:** Ausnutzen der thermischen Trägheit von Wänden, Decken, Böden mittels Anhebung und Absenkung der Raumsolltemperaturen



- › **Trinkwarmwasser:** intelligentes, zentral gesteuertes Beladen von Pufferspeichern z. B. während Schwachlastzeiten

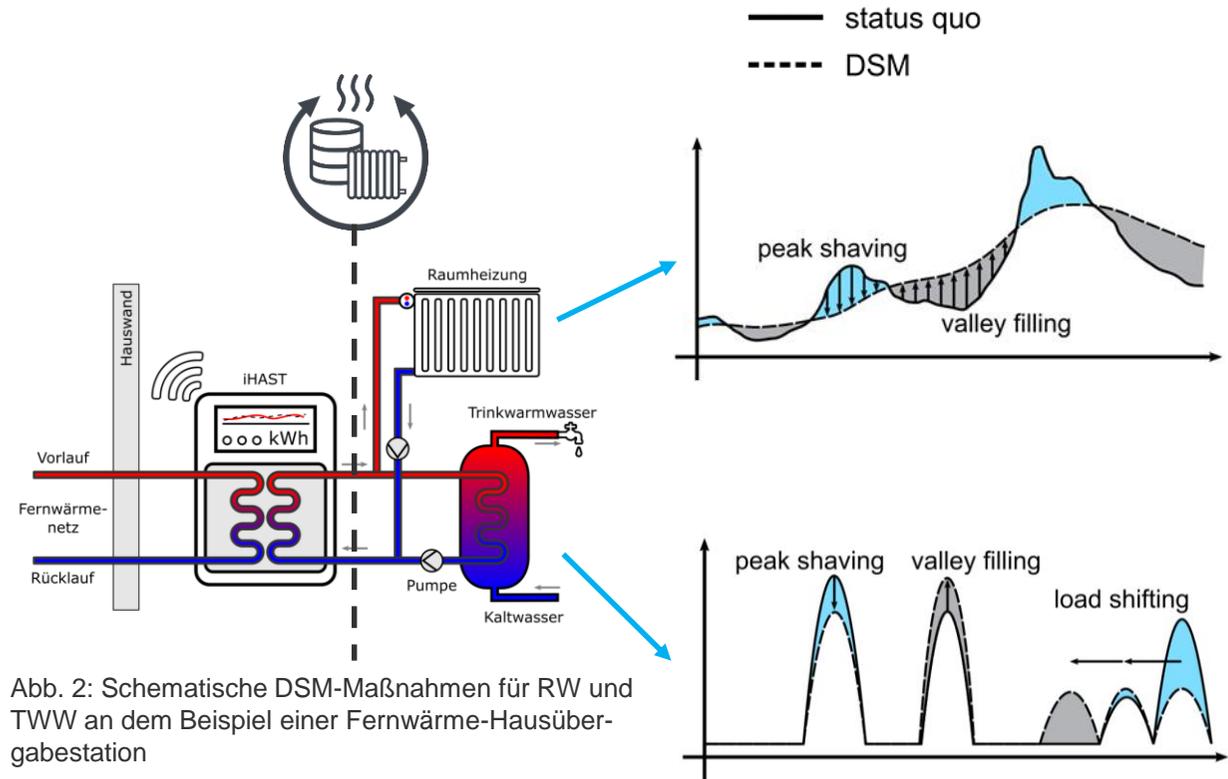


Abb. 2: Schematische DSM-Maßnahmen für RW und TWW an dem Beispiel einer Fernwärme-Hausübergabestation



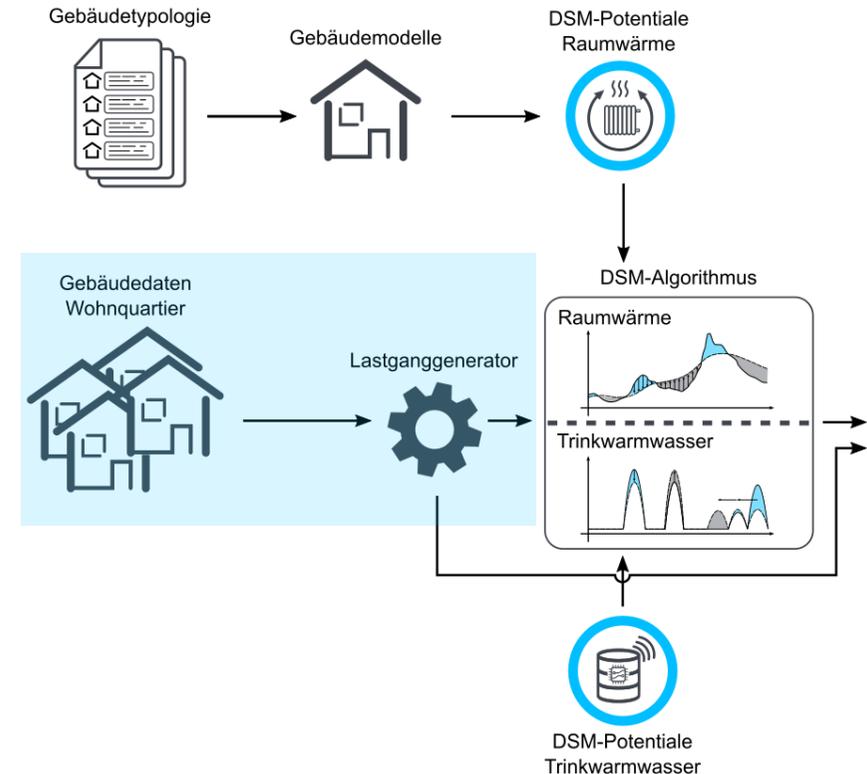
# Grundlagen | Methodik

## Ausgangsbasis: Ableiten von Wärmebedarfsprofilen

### › 1. Teil: Lastganggenerator

- › UrbanHeatPro: granularer, bottom-up Lastgenerator zur stochastischen Simulation von Raumwärme- und Trinkwarmwasserszeitreihen einzelner Gebäude oder gesamter Städte [8] // <https://github.com/tum-ens/UrbanHeatPro>
- › Python 3.6 // GNU General Public License
- › Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzungsarten (Wohnen, Industrie, Gewerbe, öffentliche Gebäude) sowie Baualters-, Größenklassen und Sanierungszustände

- 
- › **Eingangsgrößen:** Bestandscharakterisierung gemäß Wohngebäudetypologie nach [5]
  - › **Ergebnisse:** stündlich aufgelöste Lastprofile der Raumwärme- und Trinkwarmwassernachfrage





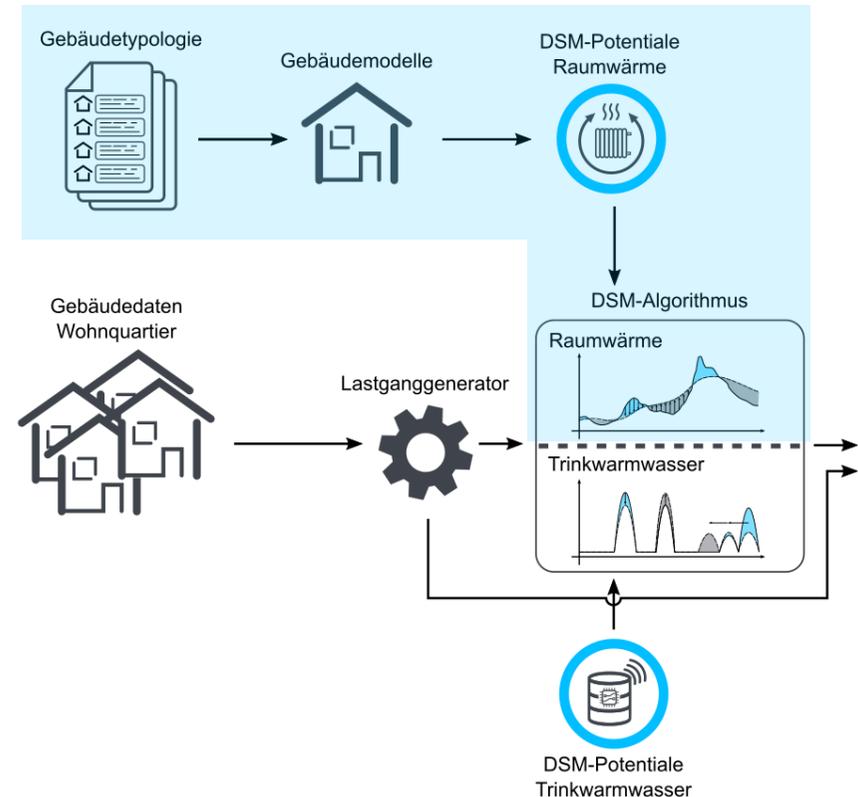
# Grundlagen | Methodik

## DSM-Potentiale Raumwärme

### › 2. Teil: Gebäudetypologie und Gebäudemodelle

- › **Modellierung typischer Gebäude** gemäß Wohngebäudetypologie nach [5] in Modelica / Dymola 202x + BuildingSystems-Library
- › **Simulation des Auskühlverhaltens** der Wohngebäude für diskrete Umgebungstemperaturen (von -10 bis +15°C in Intervallen von 5K)
- › Wahrung von raumspezifischen **Komforttemperaturen** (Temperatur-band mit min. und max. Solltemperaturen)
- › **DSM-Potential** für Raumwärme als Produkt aus **abschaltbarer Leistung** und **Abkühldauer** von  $T_{max}$  bis  $T_{min}$

- 
- › **Eingangsgrößen:** Modelle typischer Wohngebäude
  - › **Zwischenergebnisse:** gebäude- und umgebungstemperaturabhängige DSM-Potentiale für Raumwärme in kWh



# Grundlagen | Methodik

## Berücksichtigte Typgebäude

› **2. Teil: Deutsche Wohngebäudetypologie „TABULA“** des IWU (Institut Wohnen und Umwelt) [5]:

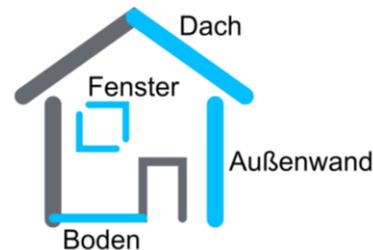
› Charakterisierung typischer Wohngebäude anhand:

- › Baualtersklassen (**Kubatur, Baumaterialien**),
- › Größenklassen (EFH, MFH, ...) sowie
- › Sanierungsklassen (**1 bis 3**)

› Berücksichtigte Parameter bei Gebäudemodellierung:

- › Luftwechselrate
- › Anzahl Stockwerke und Räume/Wohnungen
- › bauteilspezifische U-Werte
- › Beheizte Wohnfläche
- › Fensterfläche
- › Geometrie und Nutzungsart des Daches
- › nutzungsartabhängige Raumsolltemperaturen
- › ...

**bauteilspezifische U-Werte**



Baualtersklasse		EFH	RH	MFH	GMH	HH
		Basis-Typen				
A	... 1859	EFH A		MFH A		
B	1860 ... 1918	EFH B	RH B	MFH B	GMH B	
C	1919 ... 1948	EFH C		MFH C	GMH C	
D	1949 ... 1967	EFH D	RH D	MFH D	GMH D	
E	1968 ... 1968	EFH E	RH E	MFH E	GMH E	HH E
F	1969 ... 1978	EFH F	RH F	MFH F	GMH F	HH F
G	1979 ... 1983	EFH G	RH G	MFH G		
H	1984 ... 1994	EFH H	RH H	MFH H		
I	1995 ... 2001	EFH I	RH I	MFH I		
J	2002 ... 2009	EFH J	RH J	MFH J		
K	2010 ... 2015	EFH K	RH K	MFH K		
L	2016 ...	EFH L	RH L	MFH L		
F/F	1969 ... 1978	Fertighaus				
Sonderfälle	NBL_D	1948 ... 1960		NBL_D		
	NBL_E	1961 ... 1969		NBL_E		
	NBL_F	1970 ... 1980			NBL_F	
	NBL_G	1981 ... 1985			NBL_G	
	NBL_H	1986 ... 1990			NBL_H	

*Neue Bundesländer industrieller Wohnungsbau*

Erläuterung der Kürzel: EFH = Einfamilienhaus; RH = Reihenhäuser; MFH = Mehrfamilienhaus; GMH = großes Mehrfamilienhaus; HH = Hochhaus

Abb. 3: Wohngebäudetypologie nach [5] und die bei der Gebäudesimulation berücksichtigten Typgebäude



# Grundlagen | Methodik

## Anwendung der DSM-Potentiale

### › 2. Teil: DSM-Algorithmus für RW:

- › Berechnung der **tagesmittleren Umgebungstemperatur**
- › Bestimmung der **temperaturabhängigen DSM-Potentiale  $E_{DSM,d}$**  in kWh je Gebäude (Gebäudesimulation)
- › **tagesweise iterativ rollierende Mittelwertbildung** mit sukzessive zunehmender Fensterweite:

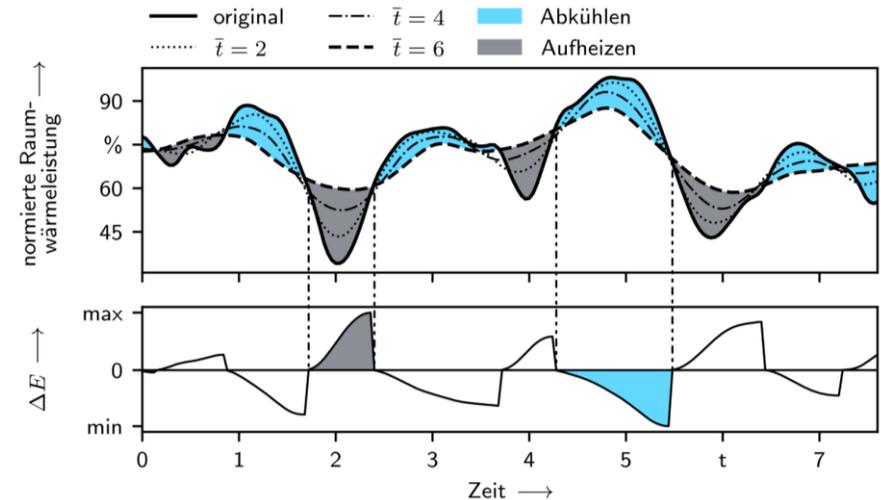
→ Wenn:

$$\Delta E_{min} \leq E_{DSM,d}$$

Dann:

fertig und gehe zum nächsten Tag

- 
- › **Eingangsgrößen:** ursprüngliches, stündlich aufgelöstes Lastprofil eines jeden Wohngebäudes
  - › **Ergebnisse:** mit um die gebäude- und umgebungstemperatur-abhängigen DSM-Potentiale geglättetes Lastprofil





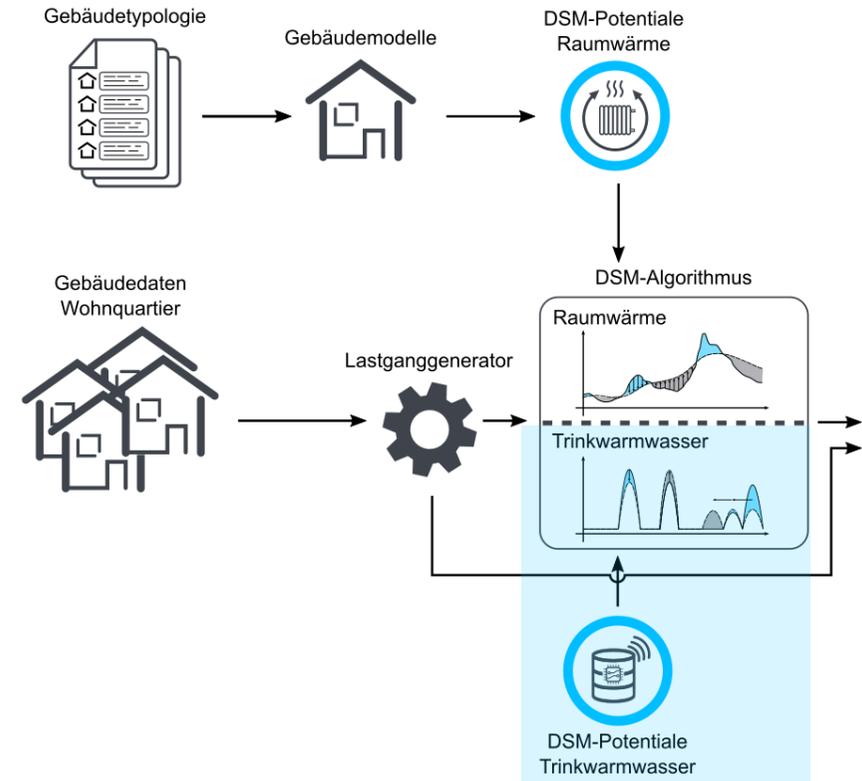
# Grundlagen | Methodik

## DSM-Potentiale Trinkwarmwasser

### › 3. Teil: DSM-Potentiale Trinkwarmwasser

- › Gemischt ganzzahlige Optimierung der Beladung von TWW-Speicher
  - › Minimierung der Bezugskosten für TWW // variable Preise (Basispreis + lastabhängige Spitzenpreise in €/kWh)
  - › Einzelgebäudeoptimierung unter Berücksichtigung des Gesamtwärmebedarfs des Quartiers
- 
- › Rahmenbedingungen für Optimierung:
    - › Mindestfüllstand 15 Vol.-%
    - › Maximalkapazität 90 % des Tagesbedarfs an TWW
    - › Vor- und Rücklauftemperaturen von 10 bzw. 60 °C
    - › max. Beladeleistung bei gegebenen Temperaturen von 15 l/min
    - › Be- und Entladeverluste pauschal 5 %

- 
- › **Eingangsgrößen:** ursprüngliches, stündlich aufgelöstes Lastprofil eines jeden Wohngebäudes
  - › **Ergebnisse:** neues Lastprofil in stündlicher Auflösung



# Agenda



Einführung | Motivation | Zielstellung



Grundlagen | Methodik



DSM-Potentiale des Wohngebäudebestands



Beispielhafter Anwendungsfall



Fazit | Ausblick

# DSM-Potentiale des Wohngebäudebestands

## Tages- und Jahresverlauf von DSM

### › Einfamilienhäuser – E:

- › insgesamt **39 Gebäudemodelle** (13 Gebäudetypen)
- › DSM-Potential für RW steigt mit **neueren Baualtersklassen** und **höheren Sanierungsstufen** an
- › Ebenso erfolgt eine „**Linksverschiebung**“ der DSM-Potentiale in Richtung von Umgebungstemperaturen  $\leq 0^\circ\text{C}$
- › hohe Sanierungsstandards bzw. zusätzliche Isolation führt zu **hoher thermischer Trägheit** und somit zu größeren DSM-Potentiale

### › Mehrfamilienhäuser – M:

- › insgesamt **27 Gebäudemodelle** (9 Gebäudetypen)
- › hohe Sanierungsstandards bzw. zusätzliche Isolation führt hingegen zu **geringeren DSM-Potentiale**
- › **Unterschiedliche Gebäudegrößen** erschweren Trendvergleich mit EFH (vier Wohnungen in M B1 und 17 Wohnungen in M L1)
- › Insgesamt **weniger Außenwände** je Wohnung, daher weniger sensitives Verhalten auf unterschiedliche Umgebungstemperaturen

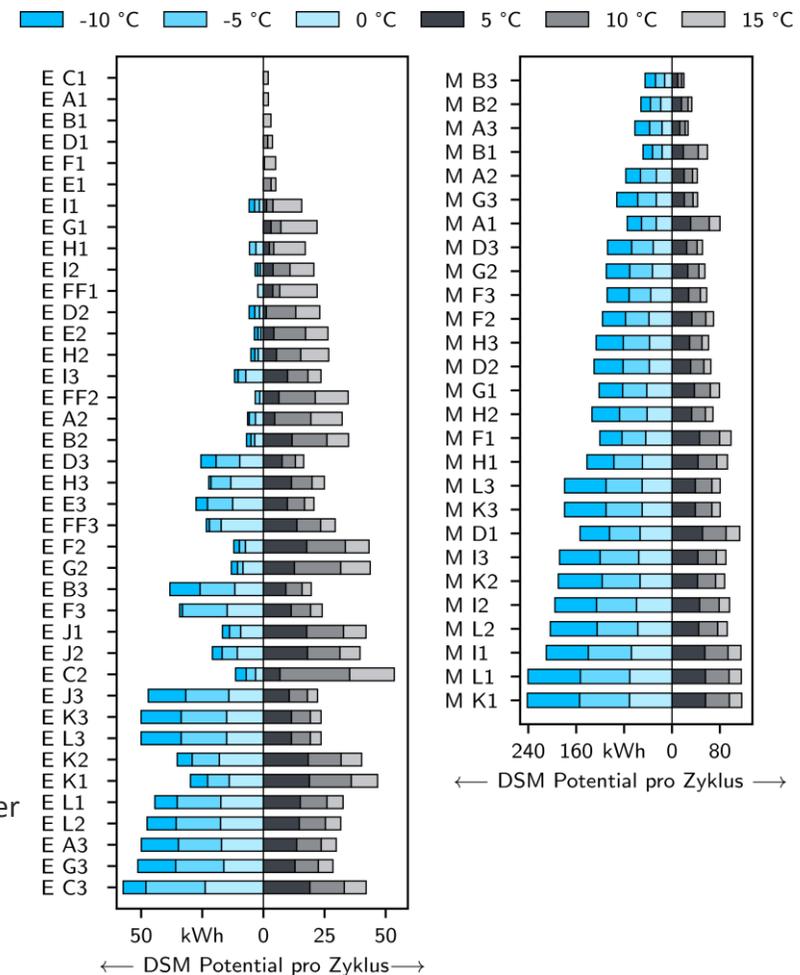


Abb. 4: Absolutes DSM-Potential für ausgewählte Gebäude der Wohngebäudetypologie nach [5] unter Berücksichtigung unterschiedlicher Größenklassen (EFH=E und MFH=M), Baualtersklassen (A–L) und Sanierungsstufen (1–3) in Abhängigkeit diskreter Außentemperaturstufen von -10 bis 15 °C. Eigene Darstellung auf Basis der Zusammenarbeit von [6, 7]

# Agenda



Einführung | Motivation | Zielstellung



Grundlagen | Methodik



DSM-Potentiale des Wohngebäudebestands



Beispielhafter Anwendungsfall



Fazit | Ausblick



# Beispielhafter Anwendungsfall

## 1. Charakterisierung des Bilanzraums

### › Gebäudekennwerte:

- › **195 Wohngebäude:** 45 EFH und 150 MFH
- › 121.000m<sup>2</sup> beheizte Wohnfläche für ca. 3.000 Bewohner (~40,3 m<sup>2</sup>/per)

### › Verbrauchskennwerte:

- › 9,9 GWh/a RW-Bedarf (~80 kWh/m<sup>2</sup>a)
- › 1,5 GWh/a TWW-Bedarf (~13,3 % von Gesamtwärmenachfrage)
- › Maximallast **5,3MW**
- › **9 %** der Gebäude sind für 25 %, **28 %** der Gebäude für 50 % der Gesamtwärmenachfrage verantwortlich

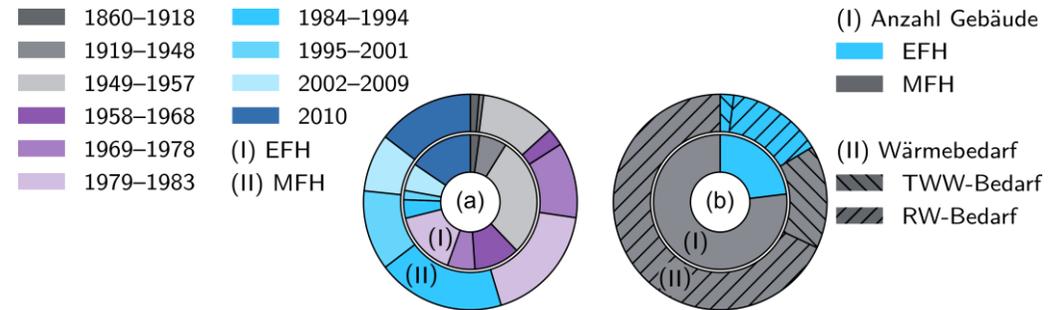


Abb.5: Verteilung der Baualters- (a) und Größenklassen (b) des fiktiven Bilanzraums.

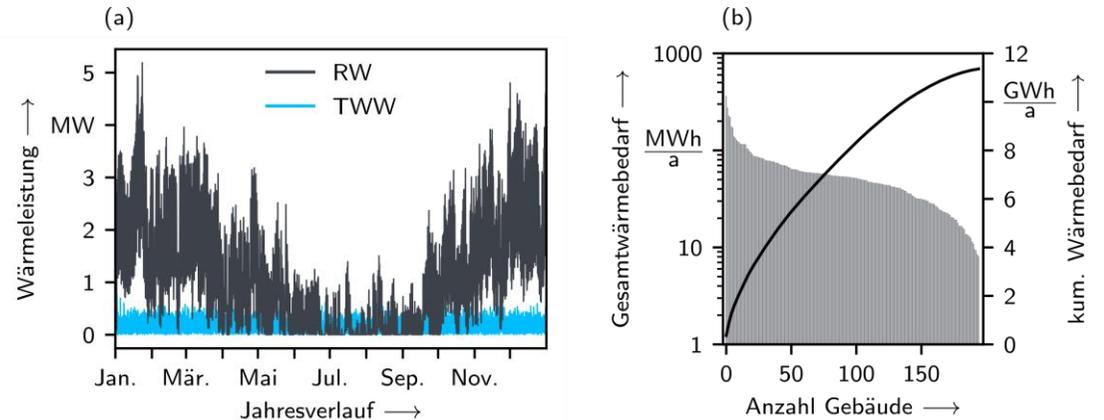


Abb.6: Simulierte RW- und TWW-Nachfrage sowohl in zeitlicher Auflösung für das gesamte Wohnquartier (a) als auch in auf gebäudeebene aggregierter Gesamtwärmenachfrage in geordneter Reihung (b)



# Beispielhafter Anwendungsfall

## 2. Jahresverlauf DSM

### › RW:

- › maximale Lastreduktion von 5,2 MW um etwa **7,6 %** auf 4,8 MW
- › trotz DSM wird **thermischer Komfort** eines jeden Gebäudes gewährleistet!
- › **keine** direkte Berücksichtigung von zusätzlichen **Transmissionswärmeverlusten** „aufgeladener“ Gebäude, allerdings Limitation des DSM-Zeitfensters auf **maximal 2h** je Gebäude.

### › TWW:

- › maximale Lastreduktion von 0,8 MW um etwa **-110,6 %** auf 1,7 MW
- › trotz Verdopplung der TWW-Spitzenlast erfolgt eine allgemeine Vergleichmäßigung der Gesamtwärmelast (**Verschiebung der Lastspitzen zur TWW-Bereitung**)

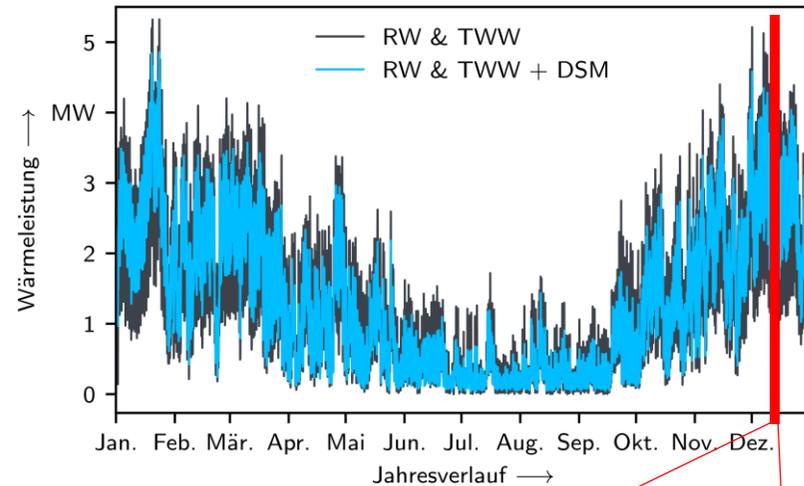
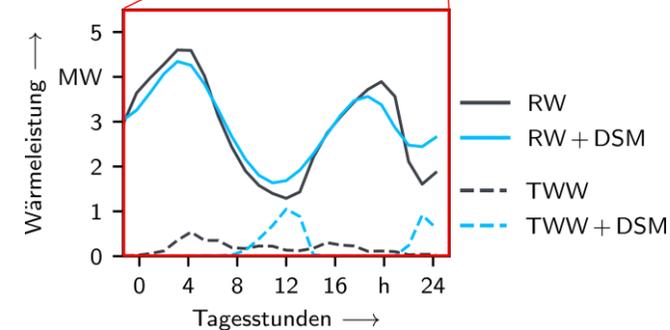


Abb. 7: Jahresverlauf der simulierten Gesamtwärmenachfrage sowohl mit als auch ohne DSM





# Beispielhafter Anwendungsfall

## 3. Jahresdauerlinien

- › Reduktion der Spitzenlast von 5,3 MW um 8,8 % auf 4,8 MW
- › für etwa 2.200 Betriebsstunden erfolgt eine Reduktion der Gesamtwärmelast
- › für etwa 4.200 Betriebsstunden erfolgt eine Anhebung der Gesamtwärmelast
- › für die restlichen 2360 Betriebsstunden erfolgt faktisch keine Modulation der Gesamtwärmelast

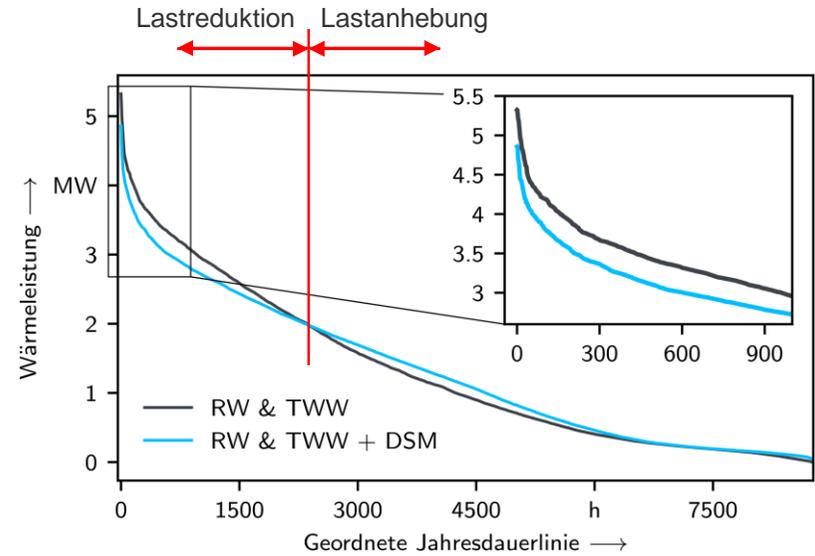


Abb. 8: Jahresdauerlinien der Gesamtwärme-nachfrage des Wohnquartiers sowohl mit als auch ohne DSM.



# Beispielhafter Anwendungsfall

## 4. Tages- und Jahresverlauf der verschiebbaren RW- und TWW-Nachfragen

### › TWW (a):

- › vorrangiges Beladen der TWW-Speicher in den Nachtstunden zwischen 23:00 und 04:00 Uhr. → Ausnutzung der Schwachlastfenster infolge der Nachtabsenkung
- › Zwei ausgeprägte Beladezyklen im Winterbetrieb infolge limitierender Raumwärmelast  $\leftrightarrow$  geringe Raumwärmelast führt im Sommer zu höheren Freiheitsgrade und somit zu schwächer ausgeprägten Beladezyklen
- › DSM für TWW-Nachfrage effektiv (obwohl nur 13,3 % der Gesamtwärmenachfrage; Potentiale für TWW in ähnlicher Größenordnung wie RW)

### › RW (b):

- › DSM für RW beschränkt sich hauptsächlich auf Heizperiode
- › zwei deutlich ausgeprägte Zyklen mit wechselseitigen Aufheizen und abkühlen pro Tag
- › Höhere Solltemperaturen während Nachtabsenkung ermöglichen gedrosselte Heizleistungen zwischen 04:00 und 07:00 Uhr.
- › Während genereller Abwesenheit von 08:00 bis 18:00 Uhr kontinuierliches Aufheizen der Gebäude zur Lastreduktion in den Abendstunden

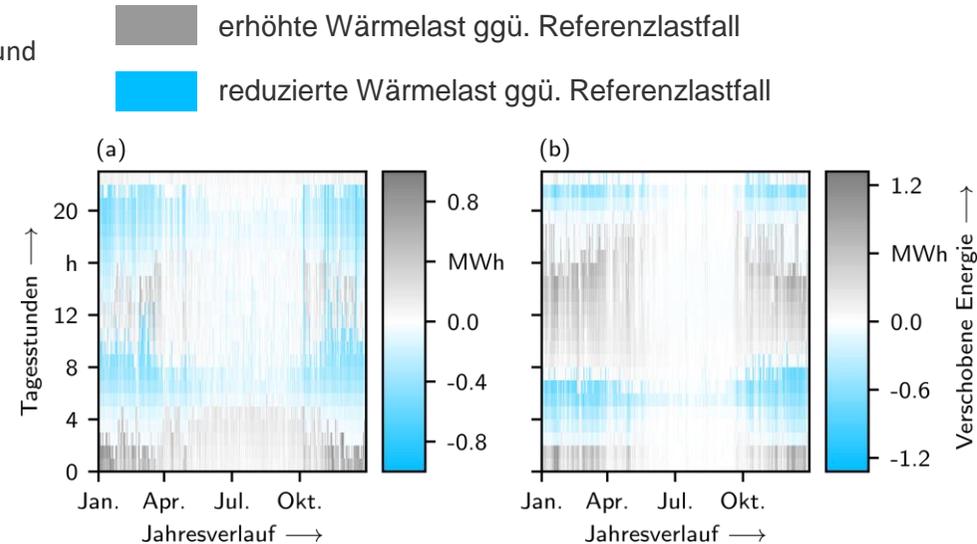


Abb. 9: Tages- und Jahresverlauf der verschobenen TWW- (a) und RW-Nachfrage (b)

# Agenda



Einführung | Motivation | Zielstellung



Grundlagen | Methodik



DSM-Potentiale des Wohngebäudebestands



Beispielhafter Anwendungsfall



Fazit | Ausblick



## Fazit | Ausblick

- › Fazit Gebäudesimulation:
  - › erzielbare DSM-Potentiale bei EFH stark **abhängig von Sanierungszustand** der Gebäude; Abhängigkeit bei MFH weniger deutlich ausgeprägt
- › Fazit Lastganganalyse:
  - › **Reduktion** der Lastspitzen um etwa **8,8 %** bei Wahrung des thermischen Komforts,
  - › **Vergleichmäßigung der Wärmelast** (über 2.200 h Reduktion der Wärmelast, über 4.200 h Anhebung der Wärmelast)
  - › Unterschiedliche **Beladestrategien** der TWW-Speicher im Winter- und Sommerbetrieb
  - › trotz geringerer Anteile an Gesamtwärme ist DSM für **TWW ähnlich effektiv** wie DSM für **RW**
- › Ausblick:
  - › Erweiterung des Gebäudemodellbestands um Größenklasse GMH (große Mehrfamiliengebäude)
  - › Untersuchung des Einflusses von DSM auf den Betrieb von Wärmenetzen (techno-ökonomische Bewertung) || Forschungsprojekt Fernwärme-Digital (FW-Digital) (Förderkennzeichen: 03EN3021D, Laufzeit: 01.05.2020-30.04.2023).



**Frank WENDEL, M.Sc.**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Systemanalytische Methoden und  
Wärmemarkt | SAM

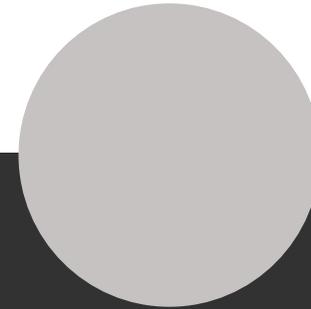
frank.wendel@ier.uni-stuttgart.de  
Tel: +49 711 685-87851  
Fax: +49 711 685-87873



**PD Dr.-Ing. Markus BLES�**

Abteilungsleiter  
Systemanalytische Methoden und  
Wärmemarkt | SAM

markus.blesl@ier.uni-stuttgart.de  
Tel: +49 711 685-87865



**Georg HURST, M.Sc.**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Systemanalytische Methoden und  
Wärmemarkt | SAM

georg.hurst@ier.uni-stuttgart.de  
Tel: +49 711 685-87833

# Quellenverzeichnis und Bildnachweis

## Quellenverzeichnis:

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi): Energiedaten Gesamtausgabe, 2018
- [2] AGEB: Energieverbrauch für Wärmezwecke in Deutschland nach Sektoren im Jahr 2018, 2021
- [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) (Letztabruf: 29.08.2021)
- [5] Loga T, Diefenbach Nikolaus, Born R. Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden – zweite erweiterte Auflage --, Darmstadt: IWU; 2011
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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.

## Bildnachweis:

- [Titelbild] Eigene Bildbearbeitung basierend auf der Thermographiebildaufnahme von <https://balmoreuav.co.uk/media/thermal-imaging-drone-inspection.jpg> (Letztabruf am 08.09.2021)