

## POTENTIALE PROGNOSEBASIERTER EINSATZPLANUNG VON LUFTWÄRMEPUMPEN

S. Muschik<sup>1</sup>, M. Ehrenwirth<sup>1</sup> und T. Schrag<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für neue Energie-Systeme, Technische Hochschule Ingolstadt, Ingolstadt, Deutschland

<https://www.thi.de/go/energie>

### ABSTRACT

A prognosis-based deployment planning with short-term prognosis for an air-source heat pump system with thermally activated building structures as storage is simulated. The overall objective is to evaluate the effects of a higher operational flexibility that can be achieved by this approach. The theoretical and technical potential is determined by analysis of ambient temperature timeseries and building simulation. The annual coefficient of performance is improved by planning the operation at high outdoor temperatures, the electrical energy demand for the heat pump operation can be reduced accordingly. Overall, the efficiency and also the effectivity of the heating supply is improved.

### KURZFASSUNG

Diese Arbeit beschreibt die Simulation eines Gebäudes unter Berücksichtigung einer prognosebasierten Einsatzplanung mit kurzfristiger Prognose für eine verbaute Luft-Wärmepumpe unter Nutzung der Speicherkapazitäten aktivierter Bauteile. Das theoretische Potential wird durch Analyse von Temperaturzeitreihen ermittelt. Anschließend wird durch eine Simulation ein technisch nutzbares Potential ermittelt. Dieses fällt vorerst deutlich geringer aus und soll später durch Optimierungsmaßnahmen erhöht werden. Die Simulation wird für ein Gebäude mit zwei Dämmstandards und unterschiedlichen Leistungsgrößen der Wärmepumpe durchgeführt. Die übergeordnete Zielsetzung ist es die Auswirkungen einer somit erreichbaren höheren Einsatzflexibilität zu bewerten.

Durch die Einsatzplanung bei hoher Quellentemperatur wird die Jahresarbeitszahl verbessert. Insgesamt wird die Effizienz und auch die Effektivität der Heizwärmeversorgung verbessert: Der elektrische Energiebedarf für den Wärmepumpenbetrieb wird reduziert.

### Einleitung

Mit der steigenden Verbreitung von Wärmepumpen im Bereich der Gebäudebeheizung und Warmwasserbereitung steigt die installierte elektrische Leistung. Ein Szenario für Deutschland im Jahr 2050, mit starker Verbreitung von Wärmepumpen und bedarfsgeführtem Betrieb, weist eine maximale elektrische Last durch die installierten Wärmepumpen oberhalb von 60 GW auf (Atabay et al. 2017). Im Vergleich dazu lag die Jahreshöchstlast im deutschen Stromnetz 2019 bei 76,5 GW (ENTSO-E 2020) und damit in einer ähnlichen Größenordnung wie die bereits heutige gesamte Jahreshöchstlast. Vor diesem Hintergrund bestehen bereits Untersuchungen, die darauf abzielen, thermisch aktivierte Bauteile für die Entlastung des Stromnetzes zu nutzen und bei hohem Dargebot Erneuerbarer Energien elektrische Energie in Form von Wärme zu speichern (Bauer et al. 2013 & Le et al. 2020).

Weitere Untersuchungen befassen sich mit dem strompreisoptimierten Einsatz von Wärmepumpen. Die Planung der Einsatzzeiten anhand der mittleren, stundenscharfen Außentemperaturen ist auch bereits in die Ausgestaltung von Kontrollstrategien eingeflossen (Le et al. 2020).

Die Schwankungsbreite der Außentemperatur ist sowohl im Jahresverlauf als auch im Verlauf weniger Tage hoch. Dies bietet die Möglichkeit mit einer dahingehend optimierten Betriebsstrategie eine erhöhte Effizienz des Betriebs zu erreichen.

Grundsätzlich eignen sich thermisch aktivierte Bauteile gut für die Speicherung von Wärme, da mit einem geringem Temperaturhub große Wärmemengen in ein Bauteil eingebracht werden können. Dabei ist zu beachten, dass durch resultierende, höhere Raumtemperaturen ebenfalls die thermischen Verluste ansteigen. Die Simulation von einer Photovoltaik-eigenverbrauchsoptimierten Wärmepumpensteuerung mit Speicherung in aktivierten Bauteilen ergab bis zu 10 % zusätzliche Verluste, wenn in der Regelung eine maximale Raumtemperaturerhöhung um 4,5 K zugelassen wurde (Thür et al. 2018).

Luft-Wärmepumpen weisen eine von der Lufttemperatur abhängige Arbeitszahl auf. In Kombination mit thermischen Speichern bietet dies eine Option zur Optimierung.

Für einen numerisch untersuchten Fall ergibt sich ein theoretisches Potential von 20 % Einsparung elektrischer Energie (Pospíšil et al., 2018). In der genannten Untersuchung sind zusätzliche Verluste durch die Speicherung thermischer Energie noch nicht berücksichtigt.

Das zur Verfügung stehende, hohe theoretische Effizienzpotential der Wärmepumpe, in Kombination mit einer hohen Wärmekapazität von aktivierten Bauteilen führt zur Fragestellung, ob diese theoretischen Potentiale auch zu einer erhöhten Gesamteffektivität führen. Die Reduktion des elektrischen Energiebedarfs dient hierbei als Kennzahl.

Für die Gesamtsystemoptimierung sind jedoch die zusätzlichen Verluste durch thermische Speicherung und das Potential zu erhöhter Effizienz zu berücksichtigen. Daher wurde diese Untersuchung unter der Anwendung eines Gebäudemodells durchgeführt, das auch die erhöhten Transmissionsverluste und den Wärmeübergang aus dem aktivierten Bauteil abbildet.

Es ist festzuhalten, dass eine prädiktive Wärmepumpenregelung in Kombination mit thermischen Speichern sowohl eine netzdienliche, preisoptimierte und effizienzoptimierte Betriebsweise ermöglichen kann. Hier sind Zielkonflikte zu erwarten, da Netzengpässe oder niedrige Erzeugungspreise auch bei niedrigen Temperaturen und somit geringerer Arbeitszahl auftreten. Diese Zielkonflikte können durch situationsabhängige Regeln und eine Priorisierung durch den Nutzer adressiert werden. Netzdienliches Verhalten kann beispielsweise durch den Netzbetreiber bei prognostizierten Engpässen angefordert werden. Hier könnte für Deutschland das bestehende Netzampelkonzept des BDEW umgesetzt werden (BDEW 2017).

Die übergeordnete Forschungsfrage lautet: In welchem Maße führen die beschriebenen, theoretischen Einsparpotentiale durch eine prognosebasierte Regelung von Luft-Wärmepumpen zu einer Einsparung elektrischer Energie. Untersucht wird dies anhand einer regelbasierten Speicherbeladung, welche auf die erwarteten Temperaturen reagiert.

Als erstes wird ein Referenzgebäude ausgewählt und die Wärmeeinbringung auch mit aktivierten Bauteilen bedarfsgeführt simuliert. Diese Ergebnisse werden dann als Referenzwert für die aktive Beladung der thermischen Speicher genutzt. Diese Referenz wird für den Vergleich herangezogen, um die möglichen Einsparungen elektrischer Energie und die Verbesserung der Arbeitszahl zu quantifizieren.

## POTENTIALÜBERBLICK

Für die folgende Potentialabschätzung wird vereinfacht davon ausgegangen, dass eine bedarfsgeführte Betriebsstrategie die Mitteltemperatur des betrachteten Zeitraums in einer

Heizperiode trifft. Der Temperaturindikator für die Monate September bis einschließlich April ist in Abbildung 1 mit weißem Hintergrund dargestellt. Der zugrunde liegende Wetterdatensatz ist im entsprechenden Abschnitt beschrieben. Graphisch erkennbar ist eine Tendenz, dass die Länge der Zeitperiode mit der Temperaturdifferenz korreliert.

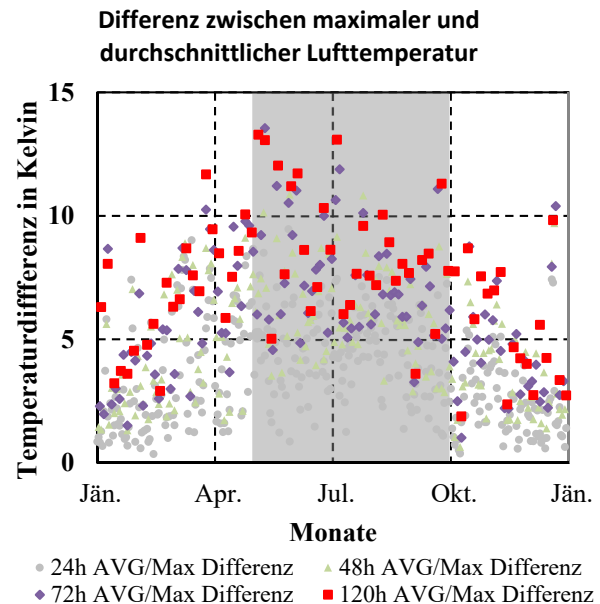


Abbildung 1: Temperaturdifferenz zwischen dem Maximalwert und dem Durchschnitt einer Zeitperiode, grau hinterlegt: Sommerperiode, nicht betrachtet

Eine Auswertung der Häufigkeit von Temperaturdifferenzen unterschiedlicher Ausprägung ist in den Abbildungen 2 & 3 dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der einzelnen Zeiträume wurde eine relative Betrachtung gewählt. Die Anzahl der Stunden mit höheren Differenztemperaturen steigt mit der Dauer der betrachteten Zeitperiode an.

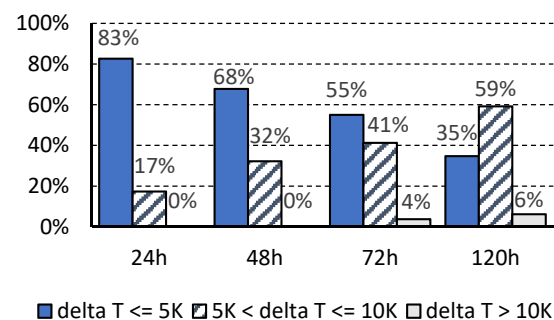


Abbildung 2: Anteil der Zeiträume einer Heizperiode mit hohen Temperaturdifferenzen zwischen  $T_{max}$  und  $T_{mittel}$  von Region 10

In 17 % aller 24 Stunden Zeitperioden und in 65 % aller 120 Stunden Zeitperioden liegen die Maximaltemperaturen um mindestens fünf Kelvin oberhalb der Mitteltemperaturen. In Abbildung 3 ist die

Auswertung für den Vergleich von Maximal- und Minimaltemperaturen dargestellt.

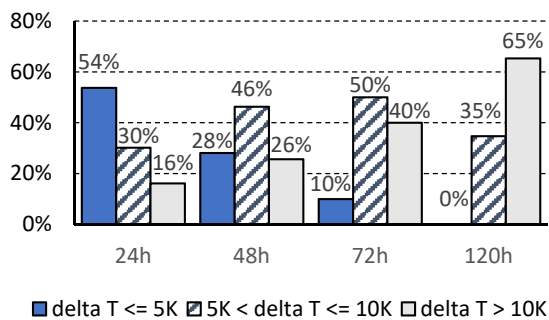


Abbildung 3: Anteil der Zeiträume einer Heizperiode mit hohen Temperaturdifferenzen zwischen  $T_{max}$  und  $T_{min}$  von Region 10

Für eine Speicherung ist auch die Erhöhung der Vorlauftemperatur notwendig. Die möglichen Effizienzeinflüsse für angehobene Quellentemperaturen sind beispielhaft in Tabelle 1 aufgelistet. Sie basieren auf einem, nach Datenblatt linearisierten, Kennfeld einer Luft-Wärmepumpe. Dieses Kennfeld zeigt das Potential auf, dass bei einer Erhöhung von Quellentemperatur trotz ebenfalls erhöhter Senkentemperatur eine Verbesserung der Arbeitszahl möglich ist.

Die Arbeitszahl steigt bei einem Betrieb mit um 5 K erhöhter Vorlauftemperatur und einer auf 10 °C erhöhten Quellentemperatur um 14 % im Vergleich zu einem Betrieb bei 0 °C.

Tabelle 1:  
Kennfeldbasierte Auswertung der möglichen Einsparungen abhängig von Quellen- und Senkentemperatur

Quellentemperatur	+5 K	+10 K	+10 K	+15 K
Senke: 30 °C	+5 K	+5 K	+10 K	+15 K
-15 °C	2.62			
-10 °C	3.22	11 %		
-5 °C	3.82	7 %	31 %	16 %
0 °C	4.42	4 %	23 %	9 %
5 °C	5.01	2 %	18 %	4 %
10 °C	5.61	0 %	14 %	0 %

Bei geringeren Ausgangstemperaturen steigt die Arbeitszahl in Relation stärker an, wie der Tabelle 1 zu entnehmen ist.

### Potentialabschätzung

Da das Potential zur Energieeinsparung, von der Speichergröße, der Leistungsgröße der Wärmepumpe im Verhältnis zum Bedarf und vom Temperaturverlauf abhängt, wurde im Rahmen einer Voruntersuchung eine Potentialabschätzung für den optimierten Einsatz mittels Optimierungsalgorithmus durchgeführt. Hierzu wurde die maximale

Speicherbeladung auf 100 kWh festgesetzt. Dies ist mit einer Temperaturerhöhung von Beton und Estrich um 5 Kelvin bei einer Geschossfläche von 140m<sup>2</sup> und Annahme eines idealen Speichers erreichbar. Der Wärmebedarf wurde mittels Simulation des SFH 15 Gebäudes ohne eine Bauteilaktivierung ermittelt, der maximale Bedarf innerhalb einer Zeitperiode von 24 h beträgt 49,1 kWh, innerhalb von 48 h beträgt der maximale Bedarf 93 kWh. Nähere Erläuterungen zum verwendeten Modell sind im Kapitel Simulation zu finden.

Die abgeschätzte Arbeitszahl (AZ) der Wärmepumpe für die Voruntersuchung wird mit einer konstanten Vorlauftemperatur ( $T_{VL}$ ) von 35 °C und einem konstanten Gütegrad ( $\eta_{WP}$ ) der Wärmepumpe von 0,4 ermittelt. Die Quellentemperatur ( $T_a$ ) entspricht dem Temperaturverlauf des zuvor beschriebenen Wetterdatensatz.

$$AZ = \frac{T_{VL}}{T_{VL} - T_a} \cdot \eta_{WP}$$

Die Wärmepumpe wurde als ideal modulierend ohne Mindestleistung angenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2:  
Ergebnisse der Voruntersuchung zur möglichen Einsparung durch eine optimierte Beladung

PROGNOSE HORIZONT	WÄRMEPUMPENAUSLEGUNG			
	100 %	200 %	300 %	400 %
24 h	-3,8 %	-5,2 %	-5,6 %	-5,9 %
48 h	-5 %	-6,4 %	-6,9 %	-7,1 %
72 h	-6,1 %	-7,9 %	-8,4 %	-8,7 %

Die optimierte Betriebsweise kann unter den beschriebenen Voraussetzungen bei dem verwendeten Wetterdatensatz, einem Prognosehorizont von 24h und einer Auslegung auf die vierfache Mindestleistung eine Einsparung von 5,9 %, bis hin zur 8,7 % erzielen, bei einem Prognosehorizont von 72 h.

### SIMULATION

Für die Simulation wurde die CARNOT Toolbox für Matlab/Simulink des Solar-Institut Jülich verwendet (Solar-Institut Jülich). Diese bietet eine umfangreiche Bibliothek von validierten Modellen hydraulischer Komponenten und Gebäudemodellen.

### Wetterdatensatz

Als Wetterdatensatz wurde das Testreferenzjahr 2010 des Deutschen Wetterdienstes genutzt, in der Form, wie es in der Toolbox zur Verfügung gestellt wird (Solar-Institut Jülich). Hier wurde auf den Datensatz eines mittleren Jahres zurückgegriffen, um das Wettergeschehen eines typischen Jahres in der Region 10 (in Süddeutschland) abzubilden.

## Gebäude

Da der Fokus des Gebäudesystems auf der Wärmespeicherung in aktivierten Geschossdecken liegt und diese im Neubau mit vergleichsweise geringem Aufwand hergestellt werden können, wurden zwei exemplarische Gebäudetypen möglicher Neubaustandards ausgewählt. Es wurde auf die im Rahmen der IEA Solar Heating and Cooling Programme Task 44 definierten Typen SFH 15 & SFH 45 zurückgegriffen (Dott et al. 2013). Die in genannter Arbeit mit TRNSYS ermittelten Werte wurden zur Validation der Simulationsergebnisse mit den gleichen Wetterdaten verwendet. Die ermittelte Abweichung beträgt 10,8 % (SFH 15) bzw. 1,1 % (SFH 45) (Peter et al. 2014).

Der SFH 45 Bauteilaufbau liegt in etwa im Bereich der deutschen Mindeststandards für Neubauten. Die Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster sind 15 % höher, die der Bodenplatte um 49 % geringer und die Koeffizienten für Wand sowie Dach sind ähnlich (Bundesregierung Deutschland 2015) und (Dott et al. 2013).

Das Gebäude wird als Ein-Knoten Gebäudemodell ohne Zonierung in der Simulation abgebildet. In Tabelle 3 sind die Wärmebedarfswerte für Region 10 aufgelistet.

Tabelle 3:  
Gebäudedaten

PHYSIKALISCHE GRÖÖE	WERT
Beheizte Wohnfläche	140 m <sup>2</sup>
Raumhöhe	2,6 m
Abmessungen	7 m × 10 m
Thermische Kapazität	19,44 $\frac{\text{kWh}}{\text{K}}$
SFH 15 Referenzsystem	31,9 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$
Wärmebedarf TRY2010 Region 10	
SFH 45 Referenzsystem	75,1 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$
Wärmebedarf TRY2010 Region 10	

## Wärmeübergabesystem & aktivierte Bauteile

Zusätzlich zum ursprünglichen Referenzsystem mit einem Wärmeübergabesystem wird ein Modell eines aktivierten Bauteils dem Gebäudemodell hinzugefügt. Das vorhandene Wärmeübergabesystem wird hydraulisch parallel zu den thermisch aktivierten Bauteilen angebunden und der konstante Massenstrom gleich auf die beiden Systeme aufgeteilt. Während der Beladung sorgt die verwendete Steuerung dafür, dass 80 % des Massenstroms durch die aktivierten Bauteile geleitet wird. Bei gleicher Verteilung steigt die Vorlauftemperatur während der Beladung stärker an und die mögliche Arbeitszahlverbesserung wird in der genutzten Konfiguration nicht erreicht, daher wurde die Massenstromaufteilung für die Konfiguration angepasst.

Das Modell der aktivierten Bauteile basiert auf einem vorhandenen Modell (Koschütz & Lehmann 2000).

## Wärmepumpe

Die Auswahl der Luftwärmepumpe fiel auf ein marktverfügbares Modell, welches eine annähernd konstante Wärmeleistung über den zulässigen Temperaturbereich der Außenluft bereitstellt.

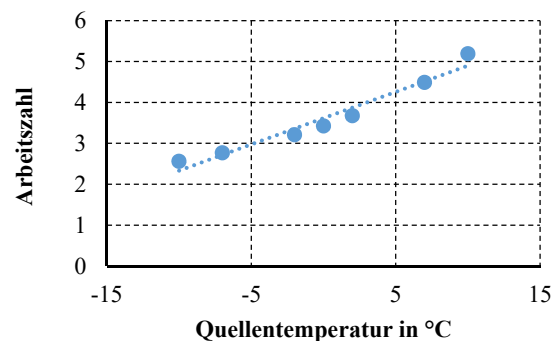


Abbildung 2: Arbeitszahl der simulierten Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Quelltemperatur

In Abbildung 2 ist der Verlauf der Arbeitszahl für eine konstante Vorlauftemperatur von 35 °C und einer Spreizung von 6 K dargestellt, die sich bei dem verwendeten und parametrisierten Modell der Wärmepumpe in der Simulation ergibt.

Weitere Vorlauftemperaturen wurden getestet und ergaben ein typisches Kennfeld.

Die Verdampfervereisung wird im verwendeten Simulationsmodell nicht abgebildet, jedoch ist die resultierende Verringerung der Arbeitszahl implizit durch die auf Prüfstandswerten basierenden Datenblattwerte enthalten. Die minimale Arbeitszahl wird auf 2,28, die maximale auf 5,78 festgelegt. Dies entspricht den Quelltemperaturen -15 °C und 12 °C. Die Wärmeverluste der Wärmepumpe werden für einen der Außenlufttemperatur ausgesetzten Monoblock simuliert.

Um gleichartige Betriebsbedingungen für die Speicherbeladung und den wärmebedarfsgeführten Betrieb zu ermöglichen, wurde die Mindestlaufzeit auf eine Stunde gesetzt. Da die Wärmepumpe mit einer thermischen Kapazität modelliert ist, werden somit sehr kurze Betriebszeiten verhindert, die sich negativ auf die Gesamteffizienz auswirken können.

## Prognose und Speicherbeladung

Es wird von einer idealen Prognosegüte für die folgenden 24 Stunden ausgegangen, etwaige Prognosefehler bleiben unberücksichtigt. Der rollierende Mittelwert der Temperaturprognose der folgenden 24 Stunden wird gebildet, um nur bei Unterschreitung der festgelegten Grenztemperatur die Speicherbeladung auszulösen. Somit sollen nicht notwendige Beladungen vermieden werden, die den Strombedarf gegenüber einem rein bedarfsgeführten System erhöhen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird ebenfalls auf Basis der Betriebszeiten in der Referenzsimulation die Beladung erst ab einem definierten Zeitfenster erlaubt.

Dies entspricht einer manuellen oder kalendarischen Aktivierung der Speicherbeladung, ähnlich einem Sommer/Wintermodus des Wärmepumpensystems.

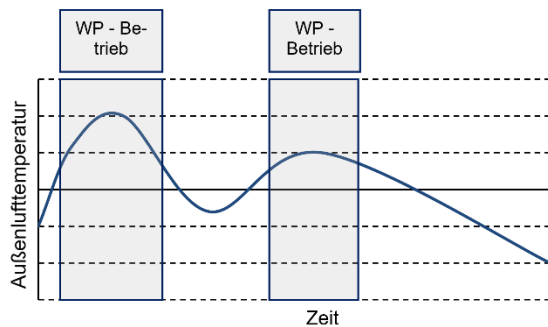


Abbildung 3: Arbeitszahl der Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Quelltemperatur

Die prognosebasierte Steuerung ist so ausgestaltet, dass fallende Temperaturen in den folgenden neun Stunden erkannt werden. Die direkt folgende Stunde ( $t+1$ ) wird bei der Betrachtung ignoriert, somit beginnt die Speicherbeladung bereits vor Erreichen des Temperaturhöhepunkts. Somit kann im Idealfall der Zeitraum mit maximaler Temperatur zur Speicherbeladung genutzt werden, dies ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Sofern die Temperaturen  $T_{(t+2)}$  bis  $T_{(t+9)}$  geringer als die aktuelle Temperatur sind und die zuvor beschriebenen Bedingungen eingehalten werden, wird die Speicherbeladung gestartet.

#### Parameterstudie

Im Rahmen der Simulationen wurde eine Parameterstudie durchgeführt, variiert wurde hierbei die Nennleistung der Wärmepumpe und der Gebäudetyp.

Die als 100 % definierte Nennleistung orientiert sich an der tatsächlich notwendigen Leistung an den kältesten Tagen des Jahres. Je größer die Wärmepumpe dimensioniert ist, desto mehr Lastverschiebungspotential steht auch an sehr kalten Tagen bereit, da die Wärmepumpe nicht in allen Stunden laufen muss, um den thermischen Bedarf zu decken und den Speicher bei günstigen Bedingungen beladen kann.

Die Wärmepumpenleistung und -effizienz wird im Modell linear skaliert. Die nichtlinearen Einflussfaktoren bei einer realen Leistungsskalierung durch Veränderung von wesentlichen Komponenten werden vernachlässigt. Der maximale Skalierungsfaktor beträgt 2,5. Die Autoren erachten die Abweichungen für das Ziel der Potentialabschätzung als hinreichend gering. Die Leistungsskalierung muss bei der, in diesem Rahmen nicht betrachteten, Auslegung der TWW-Bereitung berücksichtigt werden. Dies kann beispielsweise durch eine größere Wärmeübertragerfläche bei Verwendung eines Frischwasserspeichers geschehen.

## ERGEBNISSE

Tabelle 4:  
Simulationsergebnisse bei einer  
Wärmepumpenauslegung von 100 % und  
bedarfsgeführter Betriebsweise

PHYSIKALISCHE GRÖßE	WERT
SFH 15 Bedarfsgeführte Betriebsstrategie mit aktivierten Bauteilen	29,9 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$
SFH 45 Bedarfsgeführte Betriebsstrategie mit aktivierten Bauteilen	73,7 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$

In Tabelle 4 sind die an das Gebäude gelieferte Energiemengen dargestellt, es ergibt sich eine Abweichung zu den Werten des Referenzbetriebs ohne Verwendung von aktivierten Bauteilen von -6,4 % für das SFH 15 und -1,9 % für das SFH 45.

In den Tabellen 5 und 6 ist die genutzte elektrische Energie, die an die jeweiligen Wärmeübergabesysteme gelieferte thermische Energie sowie die resultierende Arbeitszahl dargestellt. Der Abschnitt *Abweichung* stellt jeweils die relative Abweichung der Werte mit der gleichen Wärmepumpenauslegung dar.

Bei den simulierten Systemkonfigurationen steigt der elektrische Energiebedarf des Gesamtsystems mit der Erhöhung der jeweiligen Wärmepumpenleistung, gleichzeitig sinkt die Arbeitszahl. Dies gilt im Vergleich verschiedener Systemgrößen mit gleicher Betriebsstrategie.

Im direkten Vergleich der beiden Betriebsstrategien fällt auf, dass die Jahresarbeitszahl bei aktiver Speicherladung steigt. Eine Ausnahme hierzu stellt die maximale Wärmepumpenauslegung des SFH 45 Hauses dar, bei dem die zusätzlich an das Gebäude abgegebene Wärme durch den überproportional gestiegenen Strombedarf in einer schlechteren Jahresarbeitszahl resultiert.

Weiterhin erhöht sich die gelieferte Wärmemenge in allen Fällen der Speicherbeladung. Unter der Voraussetzung von nutzerangepassten Abschalttemperaturen kann sich der thermische Komfort durch eine höhere Temperatur im Wohnbereich erhöhen.

## DISKUSSION VON EINFLUSSPARAMETERN

Der Wetterdatensatz beeinflusst sowohl das theoretische als auch das nutzbare Potential zur Arbeitszahlverbesserung. Verwendet wurde ein Datensatz, der ein typisches Jahr abbildet. Ein Jahresdatensatz mit signifikant geringerer Anzahl und/oder Amplitude der Temperaturschwankungen in der Heizperiode würde ein geringeres Potential zur Einsatzoptimierung aufweisen. Die Simulation wurde vereinfacht in Annahme einer idealen Wetterprognose durchgeführt. Reale Prognosen weisen jedoch eine geringere Prognosegenauigkeit auf.

Tabelle 5:  
SFH 45 Parameterstudie: Energiemengen und  
Arbeitszahl

WÄRME- PUMPEN- AUSLE- GUNG	BEDARF ELE- KTRISCH IN kWh	THERM- ISCHE ENERGIE IN kWh	ARBEITS- ZAHL
<b>SFH 45 bedarfsgeführt</b>			
80 %	2416	10237	4.24
100 %	2513	10314	4.10
120 %	2579	10358	4.02
140 %	2673	10443	3.91
180 %	2769	10467	3.78
250 %	3019	10575	3.50
<b>SFH 45 mit Speicherladung</b>			
80 %	2407	10333	4.29
100 %	2500	10497	4.20
120 %	2589	10623	4.10
140 %	2670	10729	4.03
180 %	2864	10963	3.83
250 %	3268	11301	3.46
<b>SFH 45 Abweichung</b>			
80 %	-0.35 %	0.94 %	1.30 %
100 %	-0.51 %	1.77 %	2.29 %
120 %	0.36 %	2.56 %	2.18 %
140 %	-0.51 %	2.74 %	3.27 %
180 %	3.43 %	4.74 %	1.26 %
250 %	8.25 %	6.87 %	-1.28 %

Tabelle 6:  
SFH 15 Parameterstudie: Energiemengen und  
Arbeitszahl

WÄRME- PUMPEN- AUSLE- GUNG	BEDARF ELE- KTRISCH IN kWh	THERM- ISCHE ENERGIE IN kWh	ARBEITS- ZAHL
<b>SFH 15 bedarfsgeführt</b>			
80 %	9278	4038	4.35
100 %	989	4180	4.23
120 %	1022	4246	4.15
140 %	1045	4285	4.10
180 %	1066	4306	4.04
250 %	1113	4358	3.91
<b>SFH 15 mit Speicherladung</b>			
80 %	922	4127	4.48
100 %	988	4325	4.38
120 %	1011	4388	4.34
140 %	1029	4451	4.33
180 %	1069	4569	4.27
250 %	1138	4734	4.16
<b>SFH 15 Abweichung</b>			
80 %	-0.64 %	2.24 %	2.90 %
100 %	-0.06 %	3.48 %	3.54 %
120 %	-1.08 %	3.35 %	4.48 %
140 %	-1.54 %	3.88 %	5.50 %
180 %	0.29 %	6.12 %	5.82 %
250 %	2.24 %	8.62 %	6.24 %

Die Prognosefehler verringern sowohl das theoretische als auch das nutzbare Potential.

Die Vorlauftemperaturen beeinflussen die Arbeitszahl der Wärmepumpe. Aufgrund von konstanten Wärmeübertrager-eigenschaften, thermischer Kapazität und Massenstrom im hydraulischen System stellt sich mit größerer Wärmepumpenleistung eine höhere Systemtemperatur im eingeschwungenen Zustand ein. Es ist davon auszugehen, dass dies der treibende Einfluss für die bei zunehmender Nennleistung der

Wärmepumpe abfallenden Jahresarbeitszahl ist. Dieser Effekt kann bei beiden Betriebsstrategien beobachtet werden.

In Kombination mit einer angepassten Regelungsstrategie der Wärmepumpenleistung kann dieser Effekt ggf. verringert werden.

Durch die nicht explizit abgebildete Vereisung des Verdampfers sind Unsicherheiten vorhanden. Durch den Betrieb bei höheren Temperaturen, mittels prognosebasierter Speicherbeladung, können Abtauzyklen unter Verwendung elektrischer Energie vermieden werden. Idealerweise kann der gesamte elektrischen Energiebedarf zur Abtauung eingespart werden, dieser bewegt sich in einer Größenordnung von ca. 3 % an elektrischem Mehrbedarf (Tegethoff et al.). Dieser Wert wurde für ein

Niedrigstenergiehaus ermittelt. Durch die verwendete, prognosegeführte Speicherbeladung kann der Effekt von häufigeren Wärmepumpenstarts auftreten. Die damit verbundenen Effizienzeinbußen sind im Modell vereinfacht nur über die thermische Kapazität des Wärmepumpenmodells abgebildet. Unter der Voraussetzung einer passend parametrisierten Raumtemperaturregelung kommt bei thermisch trägen Wärmeübergabesystemen weder durch angepasste Mindestlaufzeiten noch durch reduzierte Leistungen während der Startphase zu Einbußen des Nutzerkomfort. Die Auswirkungen der vereinfachten Abbildung der Startverluste im Modell wurde durch die festgelegte Mindestlaufzeit (1 h) reduziert.

## ZUSAMMENFASSUNG & AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine regelbasierte Prognosesteuerung unter Berücksichtigung eines Zeithorizonts von wenigen Stunden in Kombination mit der Einspeicherung thermischer Energie in aktivierten Bauteilen simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung eines entsprechenden Algorithmus der elektrische Energiebedarf um bis zu 1,5 % gesenkt werden kann. Es wurde gezeigt, dass die gegenläufigen Effekte resultierend aus der für die Aktivierung der thermischen Bauteilmassen

benötigten höhere Vorlauftemperatur durch den Betrieb in günstigen Zeitfenstern überkompensiert werden können. Hierbei zeichnet sich ab, dass bei einem Gebäude mit besserem Dämmstandard auch höhere relative Einsparungen (1,5% gegenüber 0,5%) und Verbesserungen bei der Jahresarbeitszahl erreicht werden können. Ein Vergleich mit dem Betrieb an einem Pufferspeicher ist vorgesehen.

Das theoretische Potential hängt vom Temperaturverlauf ab, die Abweichungen sind signifikant, wie der Vergleich der hier vorgestellten Potentialanalyse und einer weiteren (Pospíšil et. al., 2018) aufzeigt. Eine weitergehende Analyse für zusätzliche Regionen wird angestrebt.

Diese Ergebnisse wurden ohne den Einsatz eines Algorithmus zur optimierten Einsatzplanung erzielt, entsprechend kann mit diesem Ansatz nur ein Teil (1,5 Prozentpunkte) des theoretisch erreichbaren (5,2 Prozentpunkte bei 200% Auslegung und 24h Prognosehorizont) Einsparungspotentials ausgeschöpft werden. Es ist zu erwarten, dass mit einer Erhöhung des Prognosehorizonts und in Verbindung mit einer Optimierung der Einsatzzeiten ein deutlich höherer Anteil des theoretisch möglichen Potentials erschlossen werden kann. Dazu müssen weitere Einflussfaktoren wie beispielsweise die erforderliche Vorlauftemperatur hinreichend mit einbezogen werden.

## DANKSAGUNG

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Projekt *Kompetenzzentrum Wärme&Wohnen* wurde gefördert durch den *Europäischen Fonds für regionale Entwicklung* (Förderkennzeichen: EU-1605-0003).

## LITERATUR

Atabay, Dipl.-Ing. (Univ.) Dennis; de-Borja-Torrejón, Dipl.-Ing. (Univ.) Manuel; Dornmair, Dipl.-Ing. (Univ.) Rita; Kuhn, Dr.-Ing. Philipp; Maderspacher, Dipl.-Ing. (FH) Johannes; Sänger, Dipl.-Ing. (Univ.) Florian (2017): Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem. Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland. Hg. v. Technische Universität München. München, zuletzt geprüft am 18.03.2020.

Bauer, M., Lorz, C., Sedlmeier, M., Schwanitz, M., Fries, E., Hochhuber, J.: Beitrag zur thermischen Speicherung von Netzüberlasten infolge regenerativer Energien in Gebäuden. *Bauphysik*, Vol. 35 No. 1, S. 16–20, 2013.

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (2017): Konkretisierung des Ampelkonzepts im Verteilungsnetz. Diskussionspapier. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bdew.de/media/documents/20170210\\_Konkretisierung-Ampelkonzept-Smart-Grids.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/20170210_Konkretisierung-Ampelkonzept-Smart-Grids.pdf), zuletzt geprüft am 08.04.2020.

Bundesregierung Deutschland (24.10.2015): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. EnEV. In: *Bundesgesetzblatt* 2013 (Teil I Nr. 67), S. 3951–3990. Online verfügbar unter [https://www.gesetze-im-internet.de/enev\\_2007/EnEV.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/EnEV.pdf), zuletzt geprüft am 12.04.2020.

Dott, Ralf; Haller, Michel Y.; Ruschenburg, Jörn; Ochs, Fabian; Bony, Jacques (2013): The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 Part B: Buildings and Space Heat Load. A technical report of subtask C Report C1 Part B. IEA Solar Heating and Cooling Programme.

ENTSO-E: Total Load - Day Ahead / Actual. ENTSO-E. Online verfügbar unter <https://transparency.entsoe.eu>, zuletzt geprüft am 19.04.2020.

Koschenz, Markus; Lehman, Beat (2000): Thermoaktive Bauteilsysteme tabs. 1. Aufl. Dübendorf: EMPA Energiesysteme/Haustechnik.

Le, Khoa Xuan; Huang, Ming Jun; Wilson, Christopher; Shah, Nikhilkumar N.; Hewitt, Neil J. (2020): Tariff-based load shifting for domestic cascade heat pump with enhanced system energy efficiency and reduced wind power curtailment. In: *Applied Energy* 257, S. 113976. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113976.

Peter, Andreas; Winteler, Christian; Dott, Ralf (2014): Implementation of the IEA SHC & HPP T44/A38 Boundary Conditions in Matlab/Simulink with CARNOT-blockset. A Platform Independence Check for the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 – Subtask C. IEA Solar Heating and Cooling Programme, zuletzt geprüft am 12.04.2020.

Pospíšil, J., Špiláček, M., Kudela, L.: Potential of predictive control for improvement of seasonal coefficient of performance of air source heat pump in Central European climate zone. *Energy*, Vol. 154, S. 415–423, 2018.

Solar-Institut Juelich: CARNOT Toolbox Ver. 7.0, 2019 for Matlab/Simulink R2018b, © Solar Institut Juelich

Tegethoff, Wilhelm; Kosowski, Kai; Kühl, Lars: CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe für Passivhäuser. Effizienzsteigerung von CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen durch innovative Abtauungsverfahren. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Braunschweig, zuletzt geprüft am 06.08.2019.

Thür, Alexander; Calabrese, Toni; Streicher, Wolfgang (2018): Smart grid and PV driven ground heat pump as thermal battery in small buildings for optimized electricity consumption. In: *Solar Energy* 174, S. 273–285. DOI: 10.1016/j.solener.2018.08.087.