

## Untersuchungen zu einer netzgeführten Taktstrategie für die Betonkerntemperierung einer Bürozone

J. Schäuble<sup>1</sup> und D. Bohne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Hannover, Deutschland

### KURZFASSUNG

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung einer netzgeführten Taktstrategie zur gezielten Betonkerntemperierung (BKT) für eine Bürozone, aufbauend auf dem Unknown-but-bounded-Verfahren (UBB). Für die Netzführung wurde ein Netzsignal, basierend auf dem momentanen Anteil von Wind- und PV-Strom im Netzgebiet, verwendet. Mit Hilfe einer gekoppelten Gebäude- und Anlagensimulation konnten die Auswirkungen der Betriebsstrategie auf Komfort, Energieverbrauch und Netzdienlichkeit analysiert werden. Das Modell wurde mit den Auslegungsdaten eines im Bau befindlichen Nichtwohngebäudes parametrisiert. Im Ergebnis zeigt sich, dass sich das elektrische Verbrauchsprofil von Erzeugung (reversible Wärmepumpe) und Verteilung im Hinblick auf das Netzverhalten mit der Taktbetriebsstrategie deutlich verbessern lässt. Diese Verbesserung wird "erkauft" durch einen leicht erhöhten Jahresendenergieverbrauch für die Wärme- und Kältebereitstellung. Der thermische Komfort kann mit der Taktstrategie in den Grenzen nach DIN EN 15251 (Klasse II) gehalten werden.

### EINFÜHRUNG

Im Zuge der Energiewende und der damit verbundenen Integration fluktuierender, erneuerbarer Stromerzeugung kommt Gebäuden verstärkt eine Rolle als aktiver Verbraucher und Erzeuger von elektrischer Energie zu. Die Gebäudehülle kann dabei Flexibilität in Form von thermischer Speicherkapazität für das Energiesystem bereitstellen (Hausladen (2014)). In Verbindung mit einer (reversiblen) Wärmepumpe (WP) kann somit eine Betonkerntemperierung als Speicher zum netzgeführten Lastmanagement genutzt werden. Die Fähigkeit zur Anpassung der elektrischen Verbrauchs- und Erzeugungsprofile an die Netzanforderung kann mit dem Grid Support Coefficient (GSC) nach Klein et al. (2014) quantifiziert werden.

Das Unknown-But-Bounded-Verfahren (Gwerder et al. (2008)) ist ein Verfahren zur Auslegung und Dimensionierung von BKT-Systemen. Für das Verfahren wird in der Planung keine dynamische Simulation des Gebäudes benötigt, lediglich die Parameter des thermoaktiven Bauteilsystems (TABS) sowie maximale und minimale Schranken für interne

*Tabelle 1: Parameter Architektur der modellierten Zone*

U-Wert, Außenwände [W/m <sup>2</sup> K]	0,13
U-Wert Dach [W/m <sup>2</sup> K]	-
U-Wert Fenster [W/m <sup>2</sup> K]	0,61
G-Wert Fenster [%]	50
Anteil verglaste Außenfläche [%]	27,1
Gesamtenergiedurchlassgrad Fenster inkl. Sonnenschutz [%]	20
Eff. spez. Wärmekap. <sup>1</sup> [W h/m <sup>2</sup> K]	63,64
Infiltrationsrate [1/h]	0,16
Wetterdaten Stuttgart,	2017 <sup>2</sup>
Interne Lasten und Nutzungsprofile	Einzelbüro <sup>3</sup>

thermische Wärmegewinne müssen angegeben werden. Das in Tödtli et al. (2009) vorgestellte Taktverfahren wurde in dieser Arbeit in Verbindung mit einem Netzsignal für den netzgeführten Taktbetrieb der Betonkerntemperierung verwendet. Ausgehend von der Basisauslegung wurde für diese Betriebsstrategie dann schrittweise der spezifische Auslegungsmassenstrom der Betonkerntemperierung in einer Parameterstudie erhöht. Als Grundlage für das Netzsignal wurden viertelstündliche Daten für den lokalen Anteil von Wind & PV des Netzgebiets TransnetBW aus dem Jahre 2017 verwendet. Hierfür liegen sowohl Prognosedaten als auch historische Daten beim Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E(2020)) vor.

Das Simulationsmodell für Gebäudezone und Anlagentechnik wurde mit Hilfe von TRNSYS 18 (Beckmann et al. (2009)) aufgebaut, basierend auf den Planungsdaten (Architektur und TGA) eines in 2020 in Betrieb zu nehmenden Nichtwohngebäudes. Das Nutzerverhalten wurde mit stündlichen Lastprofilen basierend auf SIA 2024:2015 (2015) für den Zonentyp Einzel-/Gruppenbüro angenommen. Die Auswirkungen der entwickelten Betriebsstrategie sowie der Variation des BKT-Verteilmassenstroms auf Komfort, Netzeinfluss und Energieverbrauch der Bürozone werden schließlich untersucht und diskutiert.

### MODELLIERUNG

Die Architektur der untersuchten Zone, in der sich im geplanten Gebäude drei Einzelbüros befinden, ist in

<sup>1</sup>berechnet nach DIN EN ISO 13786:2018-04 (2018)

<sup>2</sup>DWD (2020)

<sup>3</sup>Belegung, el. Geräte, Lüftung nach SIA 2024:2015 (2015)

Tabelle 2: Parameter Anlagentechnik nach Planung (Leistungen und Volumenströme bezogen auf Zonen-Nettogrundfläche)

Heizleistung rev. Wärmepumpe [W/m <sup>2</sup> ]	30
Kälteleistung rev. Wärmepumpe [W/m <sup>2</sup> ]	39
Wasservolumen Speicher H [m <sup>3</sup> ]	0,25
Wasservolumen Speicher C [m <sup>3</sup> ]	0,25
RLT Zu-/Abluftvolumenstrom [m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup> ]	7
RLT Zulufttemperatur Heizbetrieb [°C]	18
Temperaturänderungsgrad WRG [%]	73
Zusatzheizsystem (Radiatoren) [W/m <sup>2</sup> ]	20
Strahlungsanteil Zusatzheizung [%]	40

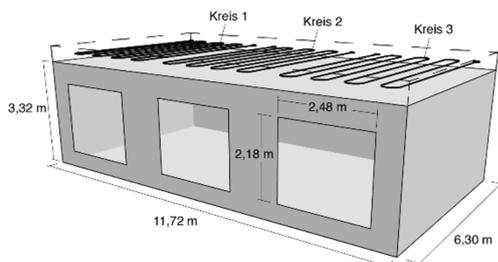


Abbildung 1: Isometrie der modellierten Zone inkl. Lage der Bauteilaktivierung, Südwest-Ausrichtung

Abbildung 1 sowie die zugehörigen Eckdaten in Tabelle 1 dargestellt. Die Geometrie der Zone wurde dreidimensional modelliert und über das Tool Trnsys3d importiert. Die Beleuchtung wurde als sich kontinuierlich anpassend hinsichtlich der Anforderungen für Bürozone modelliert. Der außenliegende Sonnenschutz wird in Abhängigkeit der am Fenstern anliegenden Strahlungsleistung mit festem Schaltpunkt und Hysterese (180W/m<sup>2</sup>, Hysterese = 20W/m<sup>2</sup>) gesteuert. An die Untersuchungszone angrenzende Zonen werden als isotherm betrachtet. Die Rohre der Betonkerntemperierung sind in Mittellage eingebracht, der Aufbau der thermisch aktiven Zwischendecke ist in Tabelle 3 beschrieben. Die Anlagentechnik zur Beheizung und Grundkühlung ist nach dem Prinzipschema aus Abbildung 2 ebenfalls in TRNSYS modelliert. Es wurden dabei die Auslegungswerte nach Tabelle 2 zur Parametrierung verwendet. Die reversible Wärmepumpe dient im Simulationsmodell ausschließlich zur Versorgung der Betonkerntemperierung, es wurden die Leistungskennlinien aus der Planung sowie die spezifischen Dimensionierungsparameter nach Tabelle 2 angesetzt. Das Temperaturniveau des Erdreichs wurde vereinfacht mit festen Austrittstemperaturen für Heiz- und Kühlfall angenommen. Als thermisch flinkes Zusatzheizsystem kommt eine Radiatorenheizung mit Fernwärme als Wärmequelle zum Einsatz. Diese wird im Simulationsmodell als ideale Heizung mit festem Strahlungsanteil dargestellt. Eine detaillierte hydraulische Simulation des BKT-Rohrnetzes erfolgt nicht. Es werden lediglich die Parameter aus Tabelle 4 in Verbindung mit einem festen Gesamtwirkungsgrad der Umwälzpumpe BKT zur Ermittlung der elektrischen Leistung verwendet. Bei Änderung des Mas-

Tabelle 3: Schichtaufbau der modellierten BKT-Decke

<b>Bodenbelag</b>	
Widerstand [m <sup>2</sup> Kh/kJ]	0,028
<b>Zementestrich</b>	
Dicke [m]	0,05
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2000
Leitfähigkeit [kJ/hmK]	5,04
Spez. Wärmekap. [kJ/kgK]	1
<b>Luftschicht</b>	
Widerstand [m <sup>2</sup> Kh/kJ]	0,047
<b>Stahlbeton 1 %</b>	
Dicke [m]	0,125
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2400
Leitfähigkeit [kJ/hmK]	5,83
Spez. Wärmekap. [kJ/kgK]	1
<b>Active layer</b>	
Verlegeabstand [m]	0,15
Außendurchmesser Rohr [m]	0,02
Dicke Rohrwand [m]	0,002
Leitfähigkeit Rohrwand [kJ/hmK]	1,26
<b>Stahlbeton 1 %</b>	
Dicke [m]	0,125
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2400
Leitfähigkeit [kJ/hmK]	5,83
Spez. Wärmekap. [kJ/kgK]	1

Tabelle 4: Parameter Rohrnetz bei  $\dot{m} = 9 \frac{kg}{hm^2}$  für die drei parallelen hydraulischen Kreise

	Kreis 1	Kreis 2	Kreis 3
Rohrlänge [m]	140	133	126
Druckverlust je Kreis [Pa]	11218	9860	8556
Druckverlust gesamt [Pa]	←	14239	→
Massenstrom [kg/h]	180	172	163
Aktive Fläche [m <sup>2</sup> ]	20,9	20	19
Widerstandsbeiwert [Pa/m <sup>2</sup> h]	62294	57425	52513

senstroms wird die resultierende Leistungsänderung nach den Ähnlichkeitsgesetzen

$$\frac{P_{1,hyd}}{P_{2,hyd}} = \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2}\right)^3$$

ermittelt. Es findet eine zentrale Lufterwärmung mit Wärmerückgewinnung und Nacherhitzung im Heizfall statt, außerhalb der Betriebszeiten der Bürozone werden die Luftvolumenströme auf 10 % des Auslegungsvolumenstroms reduziert. Eine aktive Kühlung der Zuluft wird nicht modelliert. Das Pre- und Postprocessing der TRNSYS-Simulationen wurde mit Hilfe der freien Programmiersprache Python (Python Software Foundation(2020)) und sowie zugehörigen Bibliotheken aus demScipy-Universum (Virtanen et al. (2020)) durchgeführt.

## NETZSIGNAL & BETRIEBSSTRATEGIEN

### Basis- und Taktbetriebsstrategie nach UBB-Verfahren

Als Basisstrategie und damit als Referenz für die untersuchten netzgeführten Taktstrategien wurde die außentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung nach dem UBB-Verfahren verwendet. Für dieses

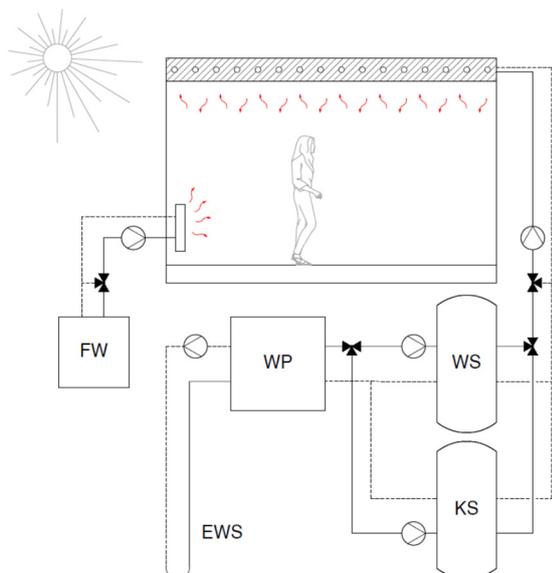


Abbildung 2: Anlagenschema der modellierten Betonkerntemperierung und statischen Heizung

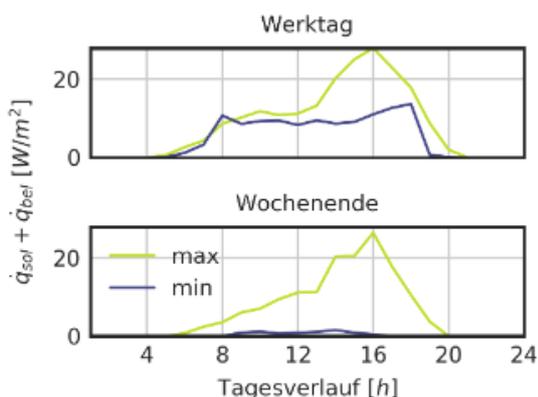


Abbildung 3: Simulierte spezifische Wärmegewinnschranken für Beleuchtung und solare Einstrahlung

Verfahren muss keine dynamische Anlagensimulation durchgeführt werden. Lediglich die üblichen, bekannten Planungsparameter für Raum sowie thermisch aktives Bauteil sowie die oberen und unteren Grenzen der Wärmegewinne durch interne und solare Lasten müssen als Eingangsgrößen für das zugrundeliegende stationäre Modell bekannt sein.

Für die Ermittlung der Heiz-/Kühlkurven in der Basisstrategie wurden die simulierten Lastprofile für solare Wärmegewinne und interne Lasten durch Beleuchtung nach Abbildung 3 verwendet. Auch die Gewinn-/Verlustschranken zur Berücksichtigung der Belüftung würden in der Simulation ermittelt. Weiterhin wurden die Lastprofile für Geräte und Beleuchtung nach SIA 2024 angenommen (50% / 100% als unter bzw. obere Gewinnschranke). In der Basisvariante wird die Vorlauftemperatur in die Betondecke nach dem UBB-Verfahren in Abhängigkeit der (in der Praxis zu prognostizierenden) mittleren Außentemperatur des laufenden Tages bestimmt. Die BKT-Ladepumpe wird in dieser Basisvariante 24 h pro Tag betrieben. Darauf aufbauend werden drei

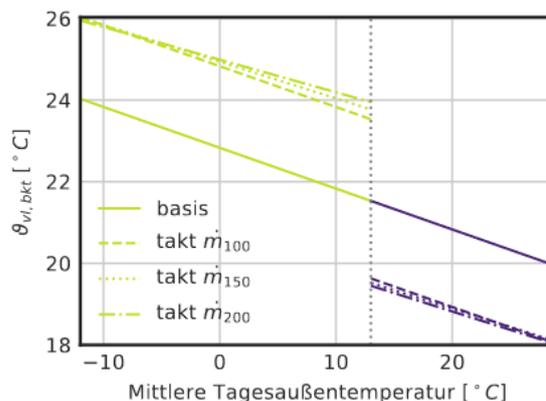


Abbildung 4: Ermittelte Heiz-/Kühlkurven nach dem UBB-Verfahren für Basis- und Taktvarianten

Taktvarianten mit unterschiedlichen spezifischen BKT-Massenströmen untersucht. Es ergeben sich folgende Strategien in der Übersicht:

**basis** Dauerbetrieb mit außentemperaturgeführter Vorlauftemperaturregelung nach UBB-Verfahren und  $\dot{m} = 9 \frac{kg}{hm^2}$ ,

**takt m<sub>100</sub>** netzgeführter Taktbetrieb mit  $\dot{m} = 9 \frac{kg}{hm^2}$ ,

**takt m<sub>150</sub>** netzgeführter Taktbetrieb mit  $\dot{m} = 13.5 \frac{kg}{hm^2}$ ,

**takt m<sub>200</sub>** netzgeführter Taktbetrieb mit  $\dot{m} = 18 \frac{kg}{hm^2}$ ,

Durch die Erhöhung des Massenstroms in den Taktvarianten werden kürzere Einschaltzeiten und damit eine gezieltere Beladung des Betonkerns in im Hinblick auf die Netzdienlichkeit günstigen Zeiten möglich. Der spezifische Massenstrom bewegt sich dabei mit flächenbezogenen Massenströmen zwischen 9 und 18 kg/hm<sup>2</sup> (bezogen auf die Netto-Grundfläche) im praxisüblichen Auslegungsbereich. Für jede der Taktvarianten ergibt sich, ausgehend von der Basisvariante, jeweils eine tägliche Einschaltdauer für den Heiz- sowie Kühlbetrieb nach den Gleichungen 1 und 2. Die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erfolgt tageweise, ebenfalls basierend auf der mittleren prognostizierten Tagesaußentemperatur (Heizgrenze 13°C). Nach Festlegung der maximalen/minimalen Vorlauftemperaturen im Heiz- bzw. Kühlbetrieb kann die Taktbetriebszeit  $\Delta t_1$  pro Tag anhand folgender Gleichungen ermittelt werden (Tödtli et al. (2009)):

$$\Delta t_{1,H} = \frac{\Delta t}{1 + \frac{R_t}{R_t + \bar{R}} (\vartheta_{vl,H,takt} - \vartheta_{vl,H})} \quad (1)$$

$$\Delta t_{1,C} = \frac{\Delta t}{1 + \frac{R_t}{R_t + \bar{R}} (\vartheta_{vl,C} - \vartheta_{vl,C,takt})} \quad (2)$$

Hierbei sind:

$\Delta t$  Dauer der Taktperiode (24 h),

- $\vartheta_{vl,H,takt}$  maximale Vorlauftemperatur im Heizbetrieb (festgelegt auf 26°C),
- $\vartheta_{vl,C,takt}$  minimale Vorlauftemperatur im Kühltaktbetrieb (festgelegt auf 18°C),
- $R_t$  Gesamtwiderstand des thermisch aktiven Bauteils sowie
- $\tilde{R}$  Gesamtwiderstand des untersuchten Raums, ermittelt mit TABSDesign (Siemens Schweiz AG (2009)) nach Planungsparametern.

Die maximalen / minimalen Vorlauftemperaturen  $\vartheta_{vl,H,takt}$  bzw.  $\vartheta_{vl,C,takt}$  wurden mit 26°C / 18°C nah an der Sollraumtemperatur gewählt, um die Robustheit durch Ausnutzung des Selbstregelleffektes zu erhöhen. In Tabelle 5 sind die sich ergebenden

Tabelle 5: Betriebszeiten Heiz-/kühlfall nach UBB-Verfahren für die untersuchten Betriebsvarianten

	basis	takt	takt $\dot{m}_{150}$	takt $\dot{m}_{200}$
		$\dot{m}_{100}$		
$\Delta t_{1,H}$ [h/d]	24,0	8,5	7,5	7,0
$\Delta t_{1,C}$ [h/d]	24,0	13,5	11,0	10,0

Einschaltzeiten der Varianten, jeweils in Heiz- und Kühlbetrieb, aufgeführt. Es wird deutlich, dass zur Gewährleistung des Raumkomforts eine längere Beladungszeit im Kühlbetrieb nötig ist. Die nötige tägliche Beladungszeit in den Taktvarianten reduziert sich mit Erhöhung des Massenstroms um 1,5 h / 18 % (Heizbetrieb) bzw. 3,5 h / 26 % (Kühlbetrieb).

**Grid Support Coefficient (GSC)**

Die Netzdienlichkeitskennzahl GSC nach Klein et al. (2014, 2016) stellt eine dimensionslose Kennzahl zur Bewertung des Netzeinflusses eines Gebäudes oder einzelner Anlagenteile dar. Sie berechnet sich nach Klein (2017) für wie folgt:

$$GSC_{abs}(G) = \frac{\sum_{i=1}^n W_{el}^i \cdot G^i}{W_{el} \cdot \bar{G}} [-] \quad (3)$$

mit

- $G^i$  Wert der Netzreferenzgröße für Zeitschritt  $i$
- $W_{el}^i$  elektrischer Energieverbrauch je Zwitschritt,
- $\bar{G}$  arithm. Mittelwert der Netzreferenzgröße im betrachteten Zeitraum

Als Netzreferenzgröße  $G$  können beispielsweise

- der Anteil von Wind- und PV-Strom im Netz,
- die Residuallast oder
- der EEX-Preis

für den jeweiligen Zeitschritt verwendet werden. Ein höherer Wert für GSC (>1) eines elektrischen Verbrauchers zeigt somit beispielsweise für die Referenzgröße Wind- & PV-Anteil an, dass das Lastprofil dem erneuerbaren Erzeugungsprofil ähnlicher ist und daher als günstig ("netzdienlich") zu bewerten ist. Die elektrische Energie wird in diesem Fall mehrheitlich

zu Zeiten mit hohem Anteil von Wind- und PV-Strom im Netz bezogen. Zeitschrittweite, Betrachtungsobjekt, untersuchter Zeitraum sowie die Netzreferenzgröße sind flexibel wählbar.

In der Arbeit wurde der relative Anteil von Wind-& PV-Strom am gesamten Erzeugungsaufkommen des lokalen Netzbetreibers TransnetBW als Referenzgröße verwendet, da diese Größe der Zielsetzung einer Anpassung des Verbrauchs an die erneuerbare Erzeugungsleistung entgegen kommt. Zudem sind für die Anwendung der Betriebsstrategie wichtige Prognosedaten für diese Größe verfügbar (viertelstündlich als Day-ahead-Werte, ENTSO-E (2020)). Theoretisch ist, je nach Entwicklung der wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen, jedoch auch eine Anwendung bspw. des EEX-Preises als Referenzgröße problemlos möglich.

Zur Bewertung der Betriebsstrategien werden im weiteren Verlauf die täglichen, monatlichen und jährlichen GSC-Werte für

$P_{erz+vert}$  Lastprofil aus der Summe der an der Wärme-/Kälteerzeugung sowie -verteilung beteiligten Komponenten aus Abbildung 2: Primär-/Sekundärpumpen WP, Verdichter WP, Ladepumpe BKT

sowie

$P_{ges}$  Lastprofil aus der Summe aller elektrischen Verbraucher im Simulationsmodell: Elektrische Geräte im Raum, Ventilatoren, Beleuchtung in-klusive  $P_{erz+vert}$

nach Gleichung 3 ermittelt und dargestellt.

**Entwickeltes Netzsignal**

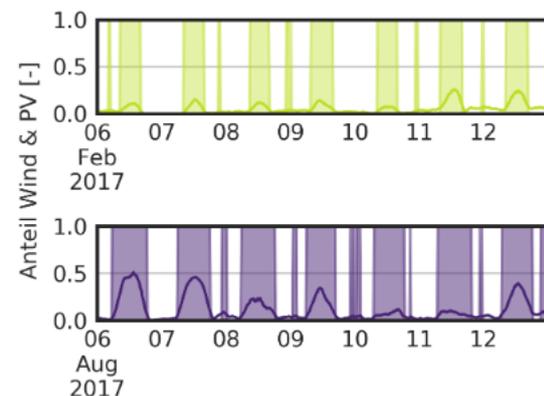


Abbildung 5: Beispiel für die Generierung des Netzsignals der BKT-Pumpe in Taktvariante  $\dot{m}_{100}$  (Oben: Heizbetrieb, Unten: Kühlbetrieb)

Mit dem entwickelten Netzsignal soll die tägliche Betriebszeit der BKT-Ladepumpe nach Tabelle 5, dienach dem UBB-Verfahren zur Erhaltung des Komforts ermittelt wurde, im Sinne der Netzdienlichkeit auf den jeweiligen Tag verteilt werden. Das Ergebnis dieser Maximierungsaufgabe ist beispielhaft in Abbildung 5 für die Taktvariante  $\dot{m}_{100}$  dargestellt (Betriebszeiten der Ladepumpe farbig hinterlegt). Erkennbar sind weiterhin die kürzeren täglichen Be-

Tabelle 6: Jahressummen der Unterschreitung bzw. Überschreitung des Komfortbereichs nach DIN EN15251 für die untersuchten Varianten

	basis	takt $\dot{m}_{100}$	takt $\dot{m}_{150}$	takt $\dot{m}_{200}$
Komfortunterschreitung [Kh]	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4
Komfortüberschreitung [Kh]	0	8,6	14,2	19,5

Tabelle 7: Jahresmittelwerte GSC Erzeugung + Verteilung sowie Gesamtstromverbrauch (nur Werkzeuge berücksichtigt)

	basis	takt $\dot{m}_{100}$	takt $\dot{m}_{150}$	takt $\dot{m}_{200}$
$GSC_{\text{erz+vert}}$	0,97	1,70	1,85	1,92
$GSC_{\text{ges}}$	1,46	1,56	1,59	1,61

triebszeiten im Heizbetrieb (oben) sowie die ausgeprägte Mittagsspitze des Anteils von Wind&PV im Sommer. Der Signalverlauf für die Ansteuerung der BKT-Ladepumpe für den jeweiligen Tag kann somit mit Hilfe der Prognosedaten für die mittlere Außentemperatur sowie mit der Prognose des Verlaufs der Netzreferenzgröße bestimmt werden.

## ERGEBNISANALYSE & DISKUSSION

### Thermischer Komfort

In Abbildung 6 sowie anhand der Daten in Tabelle 6 wird deutlich, dass die operative Raumtemperatur im Großteil des Jahres zwischen den Komfortgrenzen nach DIN EN 15251:2012-12 (2012) gehalten werden kann. In der Basisvariante wird das Komfortband nach unten (im Heizfall) sowie nach oben (im Kühlfall) am besten ausgenutzt. Ausreißer der Raumtemperatur in der Übergangszeit bei mittleren Außentemperaturen werden durch den hohen Selbstregeleffekt aufgrund geringerer Übertemperaturen nahezu vollständig vermieden. In den Taktvarianten treten hier leichte Überhitzungen auf, die sich jedoch mit einer maximalen jährlichen Abweichung von knapp 20 K h deutlich innerhalb des in DIN EN 15251 gegebenen Toleranzbereichs befinden.

### Netzdienlichkeit

In Abbildung 7 wird deutlich, dass die Monatsmittelwerte für  $GSC_{\text{erz+vert}}$  in der Basisvariante ganzjährig im netzneutralen Bereich ( $GSC \approx 1$ ) liegen. Bei den Taktvarianten ist eine deutliche Verbesserung der Netzdienlichkeitskennzahl  $GSC_{\text{erz+vert}}$  für das Lastprofil von  $P_{\text{erz+vert}}$  ablesbar. Die Erhöhung des Massenstroms zwischen den Taktvarianten wirkt sich insbesondere im Kühlfall in den Sommermonaten positiv auf die Netzdienlichkeit aus. In Tabelle 7 werden die Auswirkungen der Taktbetriebsstrategie

auf den jährlichen GSC deutlich: Die Optimierung der elektrischen Lastprofile für Erzeugung und Verteilung bewirkt eine deutliche Erhöhung der jährlichen Netzdienlichkeitskennzahl  $GSC_{\text{erz+vert}}$ . Auch beim Wert für  $GSC_{\text{ges}}$  und damit der Betrachtung des Lastprofils aller elektrischer Verbraucher im Modell, wird eine Erhöhung um circa 7 % bzw. 10 % (Taktvarianten  $\dot{m}_{100}$  bzw.  $\dot{m}_{200}$ ) erreicht.

In Abbildung 8 wird das Speicherpotenzial der Betonkerntemperierung im untersuchten Fall der Büronutzung aufgezeigt. Durch die Verwendung erhöhter Temperaturdifferenzen bzw. Massenströme kann die pro Tag eingespeicherte Energie in den Taktvarianten nahezu aufrecht erhalten werden. Die Energiemengen innerhalb der Taktvarianten unterscheiden sich noch einmal geringer. Die hohe Übereinstimmung zwischen den einzelnen Punkten für die jeweilige Tagesenergie (und damit der Regressionsgeraden) zwischen Takt- und Basisvarianten bestätigen dabei die Robustheit des UBB-Verfahrens.

### Energieverbrauch

In Abbildung 9 sind die Auswirkungen der Betriebsstrategien auf den Endenergieverbrauch elektrisch für BKT-Ladepumpe ("vert"), Erzeugung "erz h/c", sowie den Nutzenergieverbrauch zur Lufterhitzung durch die Zusatzheizsysteme (RLT-Nacherhitzer & Radiatoren, "ideal h") dargestellt. Die Taktbetriebsvariante  $\dot{m}_{100}$  weist demnach gegenüber der Basisvariante einen höheren Wärmebedarf für das Zusatzheizsystem sowie höhere Endenergieaufwände für die reversible Wärmepumpe auf. Diese Erhöhung des Nutzenergiebedarfes ist bei der zusätzlichen Einspeicherung in kürzeren Zeitfenstern erwartbar. Ursache ist die in Abbildung 6 sichtbare breitere Streuung der operativen Raumtemperaturen bei den Taktvarianten. Zusätzlich wird der Selbstregeleffekt durch die erhöhten Temperaturdifferenzen zwischen Wasserseite und Raum verringert. Diese negativen Effekte verstärken sich bei den Taktvarianten  $\dot{m}_{150}$  und  $\dot{m}_{200}$ .

Die den Endenergiemengen für die Erzeugung zugrundeliegenden Jahresarbeitszahlen (JAZ) der Wärmepumpe blieben nahezu unverändert ( $JAZ_H \approx 4$ ,  $JAZ_C \approx 7$ ) bei Veränderung der Betriebsstrategie. Die Einsparungen bei der Pumpenenergie der Verteilpumpe bei Taktbetriebsvariante  $\dot{m}_{100}$  fallen (gegenüber der Basisstrategie) vergleichsweise gering aus und werden bei Erhöhung des Auslegungsmassenstroms bei den weiteren Taktvarianten wieder aufgezehrt.

## ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Mit Hilfe einer gekoppelten Gebäude- und Anlagensimulation wurde eine Betriebsstrategie zur netzgeführten Beladung der Betonkerntemperierung mit reversibler Wärmepumpe als Wärme-/ Kälteerzeuger untersucht. Grundlage für das Modell waren die Planungsdaten eines im Bau befindlichen Nichtwohn-

gebäudes. Für die Betriebsstrategie wurde der im UBB-Verfahren beschriebene Taktbetrieb mit einem auf Basis des momentanen Anteils von Wind- & PV-

Strom generierten Netzsignal kombiniert. Innerhalb

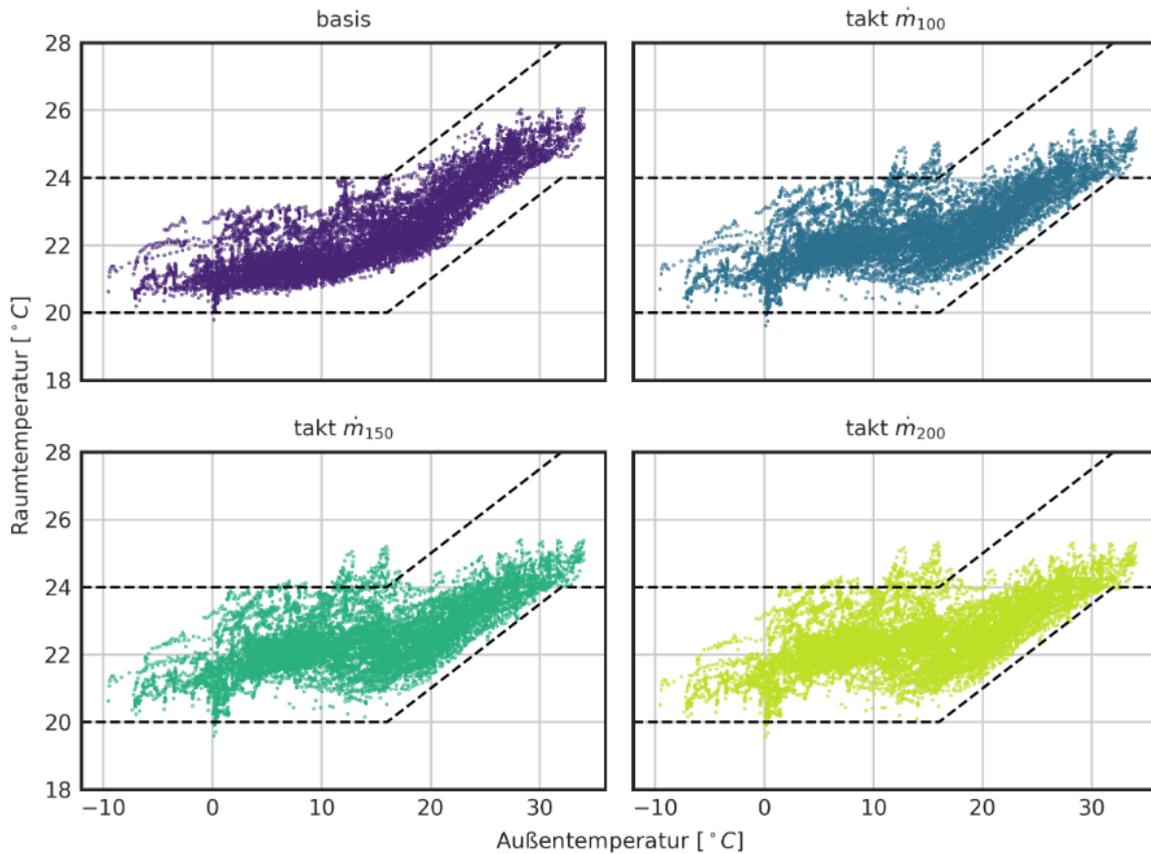


Abbildung 6: Simulierte operative Raumtemperatur über Außentemperatur innerhalb der Bürobetriebszeiten sowie Komfortbereich nach DIN EN 15251 (gestrichelte Linien)

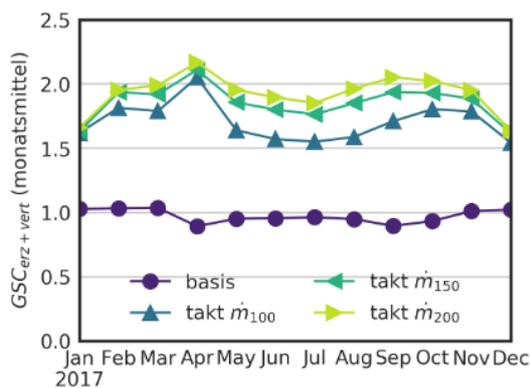


Abbildung 7: Monatlicher Netzdienstlichkeitskoeffizient der Varianten für Verteilung und Erzeugung (nur Werktage)

dieser Taktstrategie wurden daraufhin die Auswirkungen einer Erhöhung des Auslegungsmassenstroms im BKT-Kreis untersucht. Im Resultat konnte durch die Anwendung der Taktstrategie die Netzdienstlichkeit auch bei gleichbleibendem BKT-Massenstrom deutlich erhöht werden. So konnte der jährliche Netzdienstlichkeitskoeffizient für die Wärme- und Kältebereitstellung (von ca. 1 auf 1,7) erhöht werden.

Die netzdienliche Beladung, ausschließlich in Zeiten mit hohem Anteil von Wind- und Solarstrom, verursachte einen leicht erhöhten jährlichen

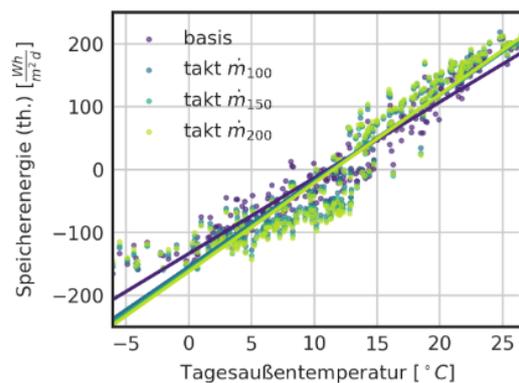


Abbildung 8: Tageswerte der eingespeicherten Nutzenergie über mittlerer Tagesaußentemperatur je Variante mit Regressionsgeraden (nur Werktage)

Endenergieverbrauch für die Bereitstellung von Wärme und Kälte (16 auf 19,5 kWh/m<sup>2</sup>a). Die thermische Komfortklasse der Untersuchungszone konnte konstant gehalten werden. In Verbindung mit

gut verfügbaren Prognoseelementen, wie der mittleren Außenlufttemperatur des aktuellen Tages sowie dem prognostizierten Anteil von Wind- und PV-Strom im Netzgebiet, konnte eine einfache und effektive Strategie für die netzgeführte Beladung einer Betondecke für eine Bürozone aufgezeigt werden. Eine dynamische Simulation in der Planungsphase ist

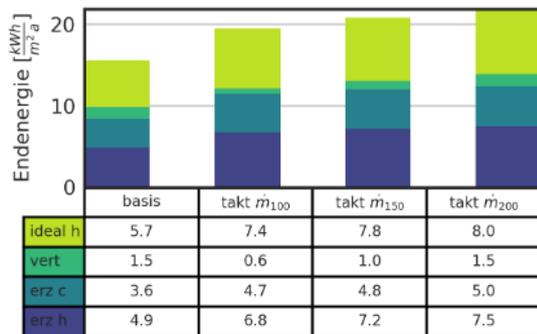


Abbildung 9: Ermittelte Endenergiemengen für die einzelnen Varianten

hierfür durch die Verwendung des robusten, stationären UBB-Verfahrens nicht unbedingt nötig, was den potenziellen Einsatzbereich vergrößert.

## DANKSAGUNG

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Forschungsprojekt "EnOB: EltStore – Einfluss der technischen Planung für Nichtwohngebäude auf die Nutzung von volatilen Strom aus regenerativer Erzeugung unter Verwendung elektrochemischer Speichersysteme" wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET1500A gefördert. Die Autoren danken dem Mittelgeber für die Unterstützung und dem Projektträger Jülich (PTJ) für die Betreuung des Vorhabens.

## LITERATUR

- Beckmann, W., J. Duffie, und S. Klein (2009). TRN-SYS – a transient system simulation program.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2012). Eingangparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2018). Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen-Berechnungsverfahren (ISO13786:2017); Deutsche Fassung EN ISO 13786:2017.

DWD (2020). Deutscher Wetterdienst: CDC (Climate Data Center).

ENTSO-E (2020). Entso-e transparency platform.

Gwerder, M., B. Lehmann, J. Tödtli, V. Dorer, und F. Renggli (2008, 07). Control of thermally-activated building systems (tabs). Applied Energy 85, 565–581.

Hausladen, G. (2014). Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme Speicher- und Last-managementpotenziale in Gebäuden.

Klein, K. (2017). Quantifying the grid support of building energy systems - Evaluation of grid-supportive concepts for space heating and cooling in non-residential buildings. Ph. D. thesis, Karlsruher Institut für Technologie.

Klein, K., M. Hermann, und S. Herkel (2016). Gebäude als netzdienliche Wärmespeicher: Anforderungen an die Gebäude der Zukunft. Bautechnik 93(1), 1–7.

Klein, K., D. Kalz, und S. Herkel (2014). Netzdienlicher Betrieb von Gebäuden: Analyse und Vergleich netzbasierter Referenzgrößen und Definition einer Bewertungskennzahl. Bauphysik 36(2), 49–58.

Python Software Foundation (2020). Python language reference, version 3.7.

SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2015). SIA 2024: Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik (SNR 592024:2015).

Siemens Schweiz AG (2009). Tabsdesign [www.faktor.ch/tabs-tool.html](http://www.faktor.ch/tabs-tool.html).

Tödtli, J., V. Dorer, M. Gwerder, B. Lehmann, und F. Renggli (2009). TABS Control. Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen. Faktor Verlag.

Virtanen, P., R. Gommers, T. E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burovski, P. Peterson, W. Weckesser, J. Bright, S. J. van der Walt, M. Brett, J. Wilson, K. Jarrod Millman, N. Mayorov, A. R. J. Nelson, E. Jones, R. Kern, E. Larson, C. Carey, I. Polat, Y. Feng, E. W. Moore, J. VanderPlas, D. Laxalde, J. Perktold, R. Cimrman, I. Henriksen, E. A. Quintero, C. R. Harris, A. M. Archibald, A. H. Ribeiro, F. Pedregosa, P. van Mulbregt, und S... Contributors (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python.