

UNTERSUCHUNGEN ZUM NETZGEFÜHRTEN
TAKTBETRIEB EINER
BETONKERNTEMPERIERUNG

Von der Fakultät für Architektur und Landschaft
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von

Jakob Emanuel Schäuble, M. Eng.

2022

REFERENT:

Prof. Dr.-Ing. Dirk Bohne

KORREFERENT:

Prof. Dr.-Ing. Ralph-Andreas Henne

TAG DER PROMOTION:

22. Juni 2022

KURZFASSUNG

Die verstärkte Einspeisung von Strom aus fluktuierender Erneuerbarer Energieerzeugung stellt unser Energiesystem vor große Herausforderungen. Gebäuden kommt vor diesem Hintergrund eine wichtige Rolle als flexible Verbraucher und Erzeuger zu. Neben dem Nutzerkomfort und der Energieeffizienz von Gebäuden wird zukünftig auch ihr Einfluss auf das Stromnetz zur Optimierungsgröße. In Verbindung mit einer Betonkerntemperierung (BKT) birgt die Gebäudemasse ein erhebliches Lastmanagement-Potenzial. Die in dieser Arbeit entwickelte netzgeführte Taktbetriebsstrategie soll helfen, dieses Potenzial im praktischen Gebäudebetrieb wirkungsvoll und effizient zu nutzen.

Grundlage für die Untersuchungen sind die Planungsdaten eines in 2020 fertiggestellten Nichtwohngebäudes. Anhand dieser wurde in der Simulationsumgebung TRNSYS ein komplexes Gebäude- und Anlagenmodell zur Versorgung einer Bürozone aufgebaut. Im Modell erfolgt die Grundbeheizung sowie die Kühlung der Zone im Sommer über eine mittig in der Betondecke angeordnete BKT. Die Wärme- und Kältebereitstellung für die BKT erfolgt über eine erdreichgekoppelte reversible Wärmepumpe. Die Beladung der BKT in der Referenzvariante erfolgt im Dauerbetrieb über außentemperaturabhängige Heiz-/Kühlkurven nach dem *Unknown-But-Bounded-Verfahren* (UBB). Darauf aufbauend wird eine netzgeführte Taktstrategie auf Basis des UBB-Taktverfahrens entwickelt. Ziel der Netzführung auf Grundlage eines entwickelten Netzsignals ist die Verschiebung der Beladungszeiten der Betondecke in Zeiten, die im Hinblick auf das elektrische Energiesystem als günstig zu bewerten sind. Die in Frage kommenden Netzreferenzgrößen werden auf Basis von Netzdaten der Jahre 2017 bis 2020 bewertet.

Es werden die Auswirkungen der Betriebsstrategie im Hinblick auf thermischen Raumkomfort, Energieeffizienz und -verbrauch sowie den Netzeinfluss der Wärme- und Kälteversorgung der Bürozone untersucht. Im Ergebnis zeigt sich, dass die „Netzdienlichkeit“ des Gesamtsystems durch Anwendung der Netzführung der BKT signifikant erhöht werden kann. Die definierten Komfortanforderungen werden eingehalten, im Hinblick auf Energieeffizienz und -verbrauch sind nur leichte Einbußen zu beobachten.

Schlagnworte: Betonkerntemperierung, Taktbetrieb, Netzdienlichkeit

ABSTRACT

The increased feed-in of electricity from fluctuating renewable energy generation poses major challenges to our energy system. Buildings play an important role as flexible consumers and producers in this context. In addition to user comfort and the energy efficiency of buildings, their influence on the electricity grid will also become a target value in the future. In combination with a concrete core conditioning system (CCC), the building mass holds considerable load management potential. The grid-driven, intermittent operation strategy developed in this work is intended to help utilize this potential effectively and efficiently in practical building operation.

In order to carry out the research, a complex building energy system model was set up in the simulation environment TRNSYS. It is based on the planning data of a non-residential building from 2020. In the model, heating and cooling of the zone is provided by a CCC centrally located in the concrete ceiling. Heat and Cold generation is based on a ground-coupled reversible heat pump. The CCC in the reference case is operated continuously according to the "Unknown-But-Bounded" (UBB) method. Based on this, a grid-driven and intermittent operation strategy is developed on the basis of the UBB intermittent operation method. The aim is to shift the operation times of the CCC to times that can be considered favorable with regard to the electric energy system. Therefore, possible grid-based reference quantities are assessed on the basis of data of the German electricity grid from 2017 to 2020.

As part of this model-based analysis, the effects of the operating strategy are examined with regard to thermal room comfort, energy efficiency and consumption as well as the "grid support" of the thermal supply system of the office zone. As a result, the grid support of the overall system can be significantly increased by applying the grid-driven operation strategy. The defined comfort requirements are met, and there are only slight losses in terms of energy efficiency and consumption.

Keywords: concrete core conditioning, intermittent operation strategy, grid support

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	13
1.1	Hintergrund	13
1.1.1	Klimaziele	13
1.1.2	Integration erneuerbarer Stromerzeugung	14
1.1.3	Rolle von Gebäuden im Energiesystem	17
1.2	Zielsetzung	17
1.3	Aufbau und Methodik	19
2	STAND DER FORSCHUNG	21
2.1	Netzdienlichkeit	21
2.1.1	Definition	21
2.1.2	Quantifizierung	22
2.2	Flexibilität	25
2.2.1	Definition	25
2.2.2	Quantifizierung	27
2.2.3	Aktuelle Marktsituation zur Nutzung von Flexibilitäten	29
2.3	Lastmanagement von Gebäuden	30
2.4	BKT-Betriebsstrategien	32
2.4.1	Normen und Richtlinien Betonkerntemperierung	32
2.4.2	Betriebsstrategien Außentemperaturführung	33
2.4.3	Unknown-but-bounded-Verfahren	34
3	SIMULATIONSAUFBAU	39
3.1	Zonen- und Anlagenmodellierung	39
3.1.1	Modellierung Anlagentechnik	39
3.1.2	Modellierung Bürozone	44
3.1.3	Modellierung Bauteilaktivierung	54
3.2	BKT-Regelung nach UBB-Verfahren	60
4	NETZGEFÜHRTER TAKTBETRIEB	65
4.1	Taktbetrieb nach UBB-Verfahren	65
4.1.1	Energiebetrachtung	65
4.1.2	Betriebskurven bei festgelegter Einschaltzeit	68
4.1.3	Einschaltzeiten bei festgelegten Betriebskurven	70
4.2	Netzgeführter Taktbetrieb	72

4.2.1	Netzsignalgenerierung	72
4.2.2	Leerlaufbetrieb	74
4.2.3	Netzreferenzgrößen	75
4.2.4	Referenzaußentemperatur	77
4.2.5	Begrenzung der Vorlauftemperaturen	78
5	SIMULATION & ANALYSE	81
5.1	Plausibilisierung und Vergleich mit „Bedarfsszenario“	81
5.2	Untersuchungsvarianten netzgeführter Taktbetrieb	86
5.2.1	Thermischer Raumkomfort	88
5.2.2	Energiebedarf und -effizienz	91
5.2.3	Netzdienlichkeit	93
6	FAZIT & AUSBLICK	97
A	ANHANG	99
A.1	Abbildungen	99
A.2	Tabellen	99
	LITERATUR	101

ABBILDUNGEN

Abbildung 1.1	Links: Entwicklung des prozentualen Anteils der EE in den Bereichen Strom, Wärme/Kälte und Verkehr. Rechts: Entwicklung der Bruttostromerzeugung durch EE, aufgeteilt in steuerbaren und fluktuierenden Anteil für die Jahre 2000 bis 2020 (Daten aus [3]).	14
Abbildung 1.2	Entwicklung des Endenergieverbrauchs für die Bereiche Verkehr und Wärm-/Kälteversorgung sowie jährliche Bruttostromerzeugung von 2000 bis 2020 (Daten aus [3]).	15
Abbildung 1.3	Entwicklung der Residuallast in Deutschland 2017-2020. Mittelwert des jeweiligen Jahres als weiße vertikale Linie (Daten aus [8]).	16
Abbildung 1.4	Residuallast und Leistung der fluktuierenden Erneuerbaren (oben) sowie EPEX-Börsenstrompreise (unten) für eine beispielhafte Aprilwoche in 2020 (Daten aus [8]). . .	16
Abbildung 1.5	Historischer und prognostizierte Stromlastgänge eines netzoptimalen Verbrauchers beziehungsweise Gebäude .	18
Abbildung 2.1	Bilanzebenen el. Energiesystem/Stromnetz	22
Abbildung 2.2	Flexibilitätsfunktion und kennzeichnende Größen (Juncker u. a. [27]).	28
Abbildung 2.3	BKT als Systemtyp E nach EN 11855-2 [36] mit charakteristischen Maßen.	32
Abbildung 2.4	Iterative, vereinfachte Vorgehensweise des UBB-Verfahrens nach Tödtli u. a. [43].	34
Abbildung 2.5	Gewinnprofile und Gewinnschranken sowie resultierende Raumtemperaturverläufe nach UBB-Verfahren	35
Abbildung 2.6	Schema des stationären, eindimensionalen Raummodells aus Tödtli u. a. [15].	36
Abbildung 3.1	Multivalente Wärme-, Kälte- und Luftversorgung der Bürozone.	40

Abbildung 3.2	Messdaten aus [54] sowie anhand dieser ermittelte Näherungsfunktionen für den exergetischen Wirkungsgrad ζ bei $\vartheta_{\text{kond}} = 25$ beziehungsweise 35°C über dem Temperaturhub der reversiblen Wärmepumpe.	42
Abbildung 3.3	Beispielhafter Verlauf der thermischen und elektrischen Leistungen an Wärmepumpe sowie der Ein- und Austrittstemperaturen aus der Erdwärmesonde (Heizfall). . .	43
Abbildung 3.4	Perspektivische, bemaßte Ansicht der modellierten Bürozone	46
Abbildung 3.5	Stündliche Auslastung und Tagesenergie f. Personen und Geräte (SIA 2024)	47
Abbildung 3.6	Beispielverläufe interne Lasten Februar/August	48
Abbildung 3.7	Vergleich Wetterdaten TRY und 2020 für Mannheim: Temperaturen	50
Abbildung 3.8	Vergleich Wetterdaten TRY und 2020 für Mannheim: Strahlung	50
Abbildung 3.9	Adaptive Komfortraumtemperatur nach DIN EN 16798-1//NA	51
Abbildung 3.10	Simulierte Verläufe von RLT-Kenngrößen an drei beispielhaften Februartagen (Heizfall)	53
Abbildung 3.11	BKT-Verlegeplan für die Untersuchungszone	56
Abbildung 3.12	Schematische Darstellung der Modellierung der drei hydraulischen BKT-Kreise in der Untersuchungszone . . .	56
Abbildung 3.13	Eindimensionales Widerstandsnetzwerk des thermisch aktiven Bauteils	57
Abbildung 3.14	Widerstandsmodell UBB-Verfahren	58
Abbildung 3.15	Temperaturverläufe und Diskretisierung in z-Richtung nach [37].	59
Abbildung 3.16	Schematische Heiz-/Kühlkurven nach UBB-Verfahren . .	61
Abbildung 3.17	Einzellasten für solare Einstrahlung und künstliche Beleuchtung für die Zone mit Südwest-Ausrichtung	64
Abbildung 4.1	Schematische Heiz-/Kühlkurven nach UBB-Taktbetrieb .	65
Abbildung 4.2	R-C-Modell Taktbetrieb	66
Abbildung 4.3	Approximationsfehler der Energieeinspeisung bei unterschiedlichen maximalen Vorlauftemperaturen	68
Abbildung 4.4	Vorlauftemperatur im Taktbetrieb (Heizen/Kühlen) über relativer Einschaltzeit	69

Abbildung 4.5	Pumpensignal bei Taktbetrieb kontinuierlich/diskontinuierlich	72
Abbildung 4.6	Maximale Ausschaltzeiten Taktbetrieb	74
Abbildung 4.7	Ermittlung Massenstrom BKT	74
Abbildung 4.8	Korrelation Netzreferenzgrößen 2020	76
Abbildung 4.9	Teppichdiagramm fEE für 2020 (deutschlandweit)	76
Abbildung 4.10	Teppichdiagramm EPEX-Day-Ahead für 2020	77
Abbildung 4.11	Referenzaußentemperaturen Basis- und netzgeführter Taktbetrieb	78
Abbildung 4.12	Taupunkttemperatur über Raumlufttemperatur	79
Abbildung 5.1	Kerntemperatur über Tagesaußentemperatur (Bedarf/-Basis)	82
Abbildung 5.2	Streudiagramm Raumtemperatur über Tagesaußentemperatur (Bedarf/Basis)	84
Abbildung 5.3	Tägliche Wärmeenergie an Zone (Bedarf/Basis)	85
Abbildung 5.4	Monatlicher Nutzenergieverbrauch Heizen beziehungsweise Kühlen (Bedarf/Basis)	86
Abbildung 5.5	Kerntemperatur über Außentemperatur Basis/Takt a,b,c	88
Abbildung 5.6	Betriebszustände und resultierende BKT-Massenströme, (Basis/Takt a,b,c)	89
Abbildung 5.7	Beispielhafte Beladungscharakteristik BKT, Takt b	90
Abbildung 5.8	Stündliche Raumtemperaturen über mittlerer Tagesaußentemperatur, (Basis/Takt a,b,c)	91
Abbildung 5.9	Tägliche Wärmeenergie in TAB, Basis/Takt a,b,c	92
Abbildung 5.10	Monatlich eingespeicherte Wärmeenergie (H/K) der BKT, Basis/Takt a,b,c	93
Abbildung 5.11	Jahresverbrauch Endenergie, Basis/Takt abc	94
Abbildung 5.12	Monatliche Energieeffizienz (H/K), Basis/Takt a,b,c	94
Abbildung 5.13	Monatlicher GSC_{bkt} , Basis/Takt a,b,c	95
Abbildung a.1	Teppichdiagramm Residuallast für 2020	99

TABELLEN

Tabelle 1.1	Klimaschutzziele Deutschland nach Klimaschutzgesetz .	14
Tabelle 2.1	Untersuchte Gebäudevarianten in Hausladen u. a. [12] .	30
Tabelle 3.1	Verwendete Parameter zur Modellierung der Erdwärmesonde	40
Tabelle 3.2	Wichtigste für die Modellierung verwendete Parameter für Wärmepumpe, Speicher sowie RLT-Anlage und Radiatoren (Leistungen bezogen auf Zonen-Nettogrundfläche)	42
Tabelle 3.3	Parameter Architektur der modellierten Zone nach Planung	45
Tabelle 3.4	Angesetzte Lastaufteilung der internen Wärmequellen nach [37, 63–65]	48
Tabelle 3.5	Schichtaufbau und Parameter der Zwischendecke (Fußboden und Decke), von oben nach unten	55
Tabelle 3.6	Modellierungsparameter für einen der insgesamt drei identischen BKT-Kreise	60
Tabelle 5.1	Eingangsgrößen und mit TABSDesign [78] berechnete Ausgangsgrößen des TAB für die durchgeführten Simulationsstudien	83
Tabelle 5.2	Komfortabweichungen (Bedarf/Basis)	85
Tabelle 5.3	Eingabeparameter der Simulation für die untersuchte Basis- sowie die netzgeführten Taktvarianten	87
Tabelle 5.4	Netzdienlichkeitskoeffizienten (Basis/Takt a,b,c)	95
Tabelle a.1	Zu Kapitel 3: Vereinfachter Wandaufbau der Außen- sowie Innenwände des modellierten Gebäudemodells . .	100
Tabelle a.2	Zu Kapitel 3: Für die Modellierung verwendete Parameter für Wärmepumpe, Speicher sowie RLT-Anlage und Radiatoren (absolute Werte)	100

GLOSSAR

ABKÜRZUNGEN

TRY	Test Reference Year, Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes	WS	Wärmespeicher
TGA	Technische Gebäudeausrüstung	fEE	Fluktuierende Erneuerbare Energien
TAB	Thermisch aktiviertes Bauteil	PV	Fotovoltaik
BKT	Betonkerntemperierung	BHKW	Blockheizkraftwerk
RLT	Raumluftechnik	KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
WP	Wärmepumpe	EPEX	European Power Exchange, europ. Strombörse
FW	Fernwärme	GLT	Gebäudeleittechnik
KS	Kältespeicher	WRG	Wärmerückgewinnung

FORMELZEICHEN

η_t	Temperaturänderungsgrad	R	Flächenspezifischer thermischer Widerstand in $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
ϑ	Temperatur in °C	\dot{Q}	Wärmeleistung in W
t	Zeit in h	P	Elektrische Leistung in W
d	Durchmesser in m	τ	Zeitkonstante in h
λ	Wärmeleitfähigkeit in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	\dot{V}	Volumenstrom in $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
\dot{m}	Massenstrom in $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	GSC	Grid Support Coefficient
ρ	Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	ζ	Exergetischer Wirkungsgrad
c_p	Spezifische Wärmekapazität in $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	SFP	Specific Fan Power, spezifische Ventilatorleistung in $\frac{\text{Ws}}{\text{m}^3}$
U	Wärmedurchgangszahl in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	SPP	Specific Pump Power, spezifische Pumpenleistung in $\frac{\text{Wh}}{\text{m}^3}$
α	Wärmeübergangszahl in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$		

INDIZES

aul	Außenluft	verd	Verdampferseite der Wärmepumpe
zul	Zuluft	bui	Gebäude(seitig)
abl	Abluft	bel	Beleuchtung
vl	Vorlauf	ger	Geräte
rl	Rücklauf	pers	Personen
h	Heizen bzw. Heizfall	sol	Solare Einstrahlung
k	Kühlen bzw. Kühlfall	r	Raum
des	Design, Auslegung	ra	Raum-Außen, z. B. beim Widerstand R_{ra}
takt	Taktbetrieb	d	Tag bzw. Täglich
fl	Fluidseitig	konv	Konvektiv(er Wärmeübergang)
l	Luftseitig	str	Strahlung
ub	Upper Boundary	abs	Absolut
lb	Lower Boundary	rel	Relativ
pump	Pumpe	eff	Effektiv
vent	Ventilator		
pr	Primärseitig		
sek	Sekundärseitig		
kond	Kondensatorseite der Wärmepumpe		

EINLEITUNG

1.1 HINTERGRUND

1.1.1 Klimaziele

Bei der UN-Klimakonferenz im Jahr 2015 konnten sich 197 Staaten auf ein globales Klimaschutzabkommen einigen. Zur Umsetzung des Übereinkommens wurde in 2016 der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung verabschiedet. In 2019 schließlich trat das Klimaschutzgesetz in Kraft, in dem verbindliche Klimaziele und Emissionsmengen, aufgeschlüsselt für die einzelnen Sektoren¹, festgeschrieben sind. Mit diesen Klimazielen (vgl. Tab. 1.1) ist ein Umbau des deutschen Energiesystems im Strom- und Wärmebereich verbunden. Die Emissionen sollen in den einzelnen Sektoren durch Erhöhung der Energieeffizienz sowie die vermehrte Integration Erneuerbarer Energien reduziert werden. Bisher ist dabei die Geschwindigkeit des Umbaus noch nicht ausreichend [1, Tab. 1]. Im Gebäudesektor sollen Emissions-Einsparungen bei Neubauten und Modernisierungen durch das Gebäudeenergiegesetz (GEG)² erreicht werden. Die Klimaziele im Gebäudebereich können mit folgenden Ansätzen erreicht werden:

1. Reduzierung des (End-)Energieverbrauchs von Gebäuden durch weitere Verbesserung des Baustandards und Optimierung der Gebäudetechnik
2. Erhöhung des Anteils der Erneuerbaren Energie (EE) an der Erzeugung von Wärme und Kälte im Gebäude
3. Eigenerzeugung von Strom aus EE in den Gebäuden

1 Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft

2 bis 10/2020 geregelt durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Tabelle 1.1: Klimaschutzvorgaben im Vergleich zum Referenzjahr 1990 zur Reduktion der Emission von Treibhausgasen nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz [2]

Jahr	2020	2030	2040	2045
CO ₂ -Ausstoß	-40 %	-65 %	-88 %	-100 %

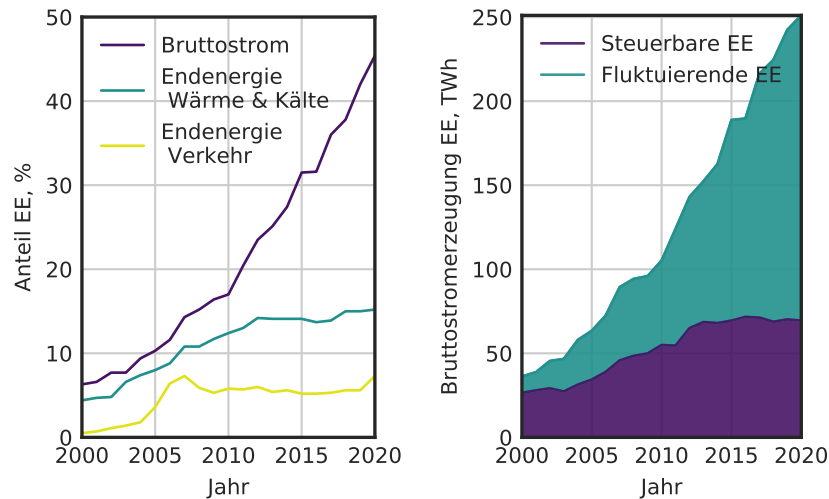


Abbildung 1.1: Links: Entwicklung des prozentualen Anteils der EE in den Bereichen Strom, Wärme/Kälte und Verkehr. Rechts: Entwicklung der Bruttostromerzeugung durch EE, aufgeteilt in steuerbaren und fluktuierenden Anteil für die Jahre 2000 bis 2020 (Daten aus [3]).

1.1.2 Integration erneuerbarer Stromerzeugung

In Abbildung 1.1 wird zum einen der steigende Anteil der EE in den Bereichen Wärme/Kälte, Verkehr und insbesondere im elektrischen Energiesystem deutlich. So konnte der Anteil der Erneuerbaren bei der Bruttostromerzeugung von circa 8 % auf über 40 % erhöht werden. Zum anderen ist in Abbildung 1.1 rechts zu erkennen, dass diese Erhöhung der EE insbesondere durch fluktuierende, das heißt nicht steuerbare Energieerzeuger wie Windkraftanlagen und Fotovoltaikanlagen erfolgt. Der Anteil des Stroms aus Windkraft und Fotovoltaik an der Gesamtstromerzeugung wird als Anteil fluktuierender Erneuerbarer Stromerzeugung (fEE) bezeichnet. Abbildung 1.2 zeigt, dass die Bedeutung des elektrischen Energiesystems durch eine steigende Bruttostromerzeugung bei stagnierenden Endenergieverbräuchen für Wärme/Kälte und Verkehr, steigt. Durch den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung ist das Energiesystem der Bundesrepublik schon heute vor große Herausforderungen im Hinblick auf die

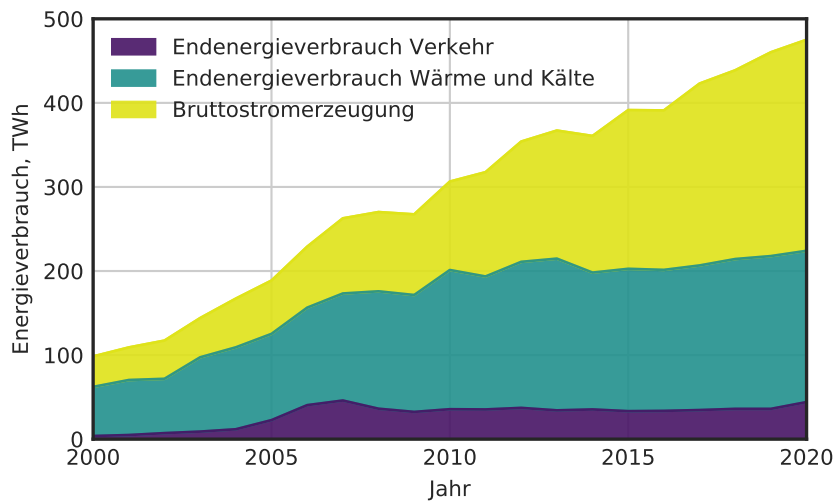


Abbildung 1.2: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für die Bereiche Verkehr und Wärm-/Kälteversorgung sowie jährliche Bruttostromerzeugung von 2000 bis 2020 (Daten aus [3]).

Netzstabilität gestellt [4]. In Abbildung 1.3 ist die Entwicklung der Residuallast³ von 2017 bis 2020 in stündlicher Auflösung als jährliche Häufigkeitsverteilung dargestellt. Es wird deutlich, dass die Maximal- und Mittelwerte der durch konventionelle Kraftwerke zu deckenden Residuallast über die Jahre kontinuierlich sinken. Während die Residuallast in 2017 und 2018 ausschließlich positive Werte aufwies, traten in 2019 und 2020 stundenweise negative Werte der Residuallast auf (circa 17 beziehungsweise 39 h/a). Diese negative Residuallast muss zum Beispiel durch intelligente Verbraucher wie Wärmepumpen, direkt-elektrische Heizung, Batterien oder Power-to-X-Technologien ausgeglichen werden. Abbildung 1.4 zeigt beispielhaft die Auswirkungen der verstärkten Leistung der fEE im zeitlichen Verlauf einer Aprilwoche des Jahres 2020. Bei Spitzen der Leistung durch fEE treten negative Residuallasten und als weitere Auswirkung geringe beziehungsweise teilweise negative EPEX-Börsenstrompreise auf. Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den letzten vier Kalenderjahren decken sich somit mit den Prognosen anderer Quellen [6]. In Zukunft wird sich demnach das Phänomen negativer Residuallasten und Börsenstrompreise aufgrund hoher Leistung der fEE durch den nötigen weiteren Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung weiter verschärfen [7].

³ Die Residuallast beschreibt den Strombedarf im Netz abzüglich Leistung durch fluktuierende erneuerbare Stromerzeugung auf Basis von Wind- und Sonnenenergie [5, S. 51]

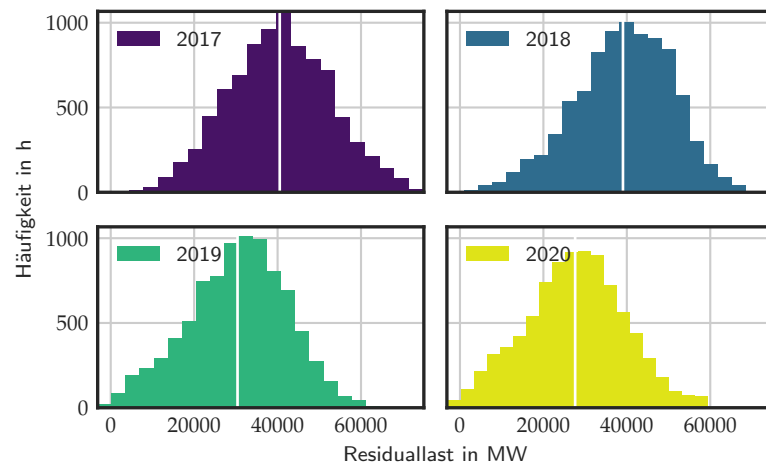


Abbildung 1.3: Entwicklung der Residuallast in Deutschland 2017-2020. Mittelwert des jeweiligen Jahres als weiße vertikale Linie (Daten aus [8]).

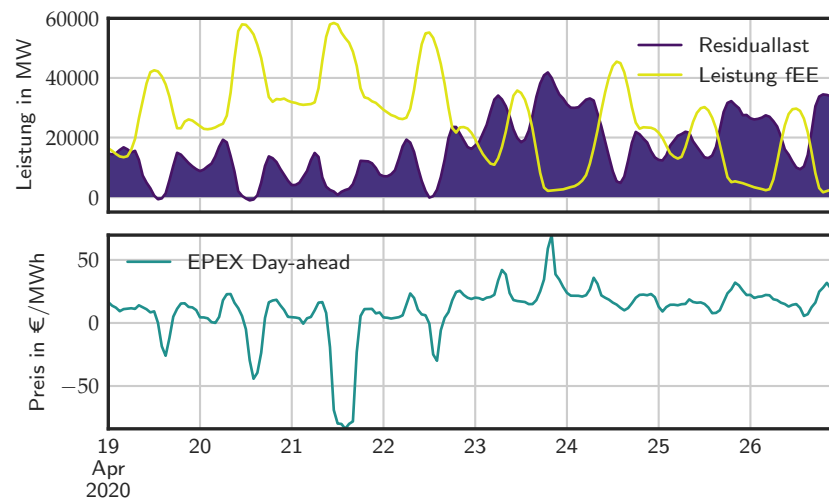


Abbildung 1.4: Residuallast und Leistung der fluktuierenden Erneuerbaren (oben) sowie EPEX-Börsenstrompreise (unten) für eine beispielhafte Aprilwoche in 2020 (Daten aus [8]).

1.1.3 Rolle von Gebäuden im Energiesystem

Klassisch treten Gebäude im Stromnetz hauptsächlich als Bezieher elektrischer Energie aus dem Nieder- oder Mittelspannungsnetz auf. Durch den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung im Gebäude sowie der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) kam in den letzten Jahren die Rolle als Stromerzeuger hinzu. Neben dem Eigenverbrauch oder der Zwischenspeicherung im Gebäude kommt es zu einer Einspeisung von Strom in das Verteilnetz. In der zukünftigen Energieversorgung werden Gebäude weitere Anforderungen erfüllen müssen, zum Beispiel die Bereitstellung von Flexibilitäten für das Stromnetz. In [Abbildung 1.5](#) ist der Lastgang eines *netzoptimalen* Verbrauchers unter Berücksichtigung typischer (prognostizierter) Residuallastverläufe aufgetragen. Es wird deutlich, dass „netzdienliche“ Gebäude in Zukunft auf weitaus stärkere Schwankungen von Residuallast oder Strompreis reagieren müssen.

Es ergeben sich zwei Ansatzpunkte zur Verbesserung des Netzeinflusses von Gebäuden:

1. Gebäude als aktive, „intelligente“ Stromverbraucher → Demand Side Management
2. Gebäude verstärkt als aktive, „intelligente“ Erzeuger von erneuerbarem Strom → PV, KWK

Voraussetzung für beide Ansätze ist die intelligente Be- und Entladung im Gebäude vorhandener, elektrochemischer oder thermischer Speicher. Die erstgenannte Bedeutung von Gebäuden als intelligente Verbraucher wird sich noch verstärken. Studien sagen zukünftig einen erhöhten Anteil von Wärmepumpen bei einer Verringerung von brennstoffbasierten Wärmeerzeugern in Gebäuden voraus [10, 11]. Die Wichtigkeit von Lastmanagement bei der strombasierten Wärmebereitstellung wird sich somit auch durch diesen Umstand weiter erhöhen.

1.2 ZIELSETZUNG

Die verstärkte Einspeisung von Strom aus fEE stellt unser elektrisches Energiesystem vor große Herausforderungen. Gebäuden kommt vor diesem Hintergrund eine wichtige Rolle als flexible Verbraucher und Erzeuger zu. Neben dem Nutzerkomfort und der Energieeffizienz von Gebäuden wird zukünftig auch ihr Einfluss auf das Stromnetz zur Optimierungsgröße. In Verbindung mit

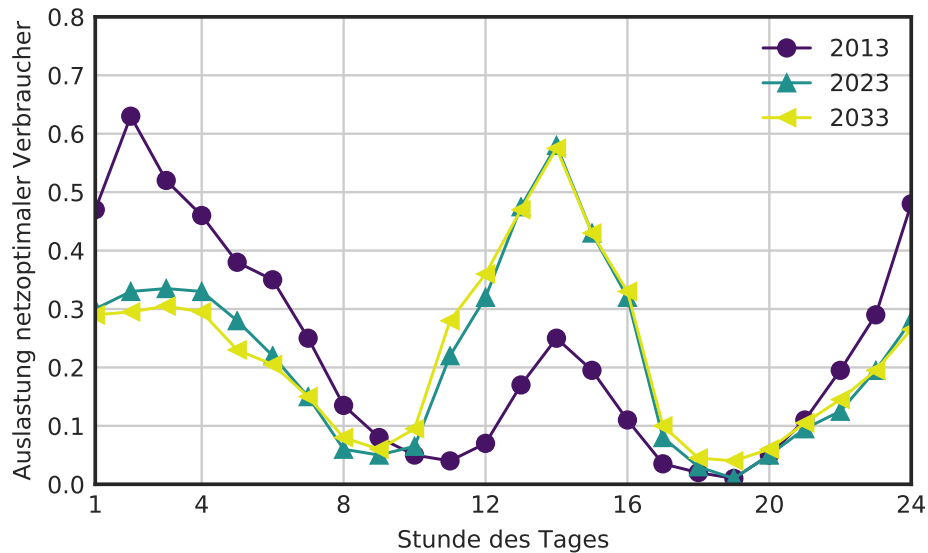


Abbildung 1.5: Historischer und prognostizierte Stromlastgänge eines netzoptimalen Verbrauchers beziehungsweise Gebäudes (bezogen auf Residuallast, Daten aus [9]).

einer thermischen Aktivierung, zum Beispiel durch eine Betonkerntemperatur birgt die Gebäudemasse ein erhebliches Lastmanagement-Potenzial. Das Potenzial zur Erhöhung der Netzdienlichkeit von Gebäuden durch Lastmanagement mittels Nutzung der thermischen Speicherfähigkeit wurden bereits in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht und bestätigt [12–14]. Die in dieser Arbeit untersuchte netzgeführte Taktbetriebsstrategie soll helfen, dieses Potenzial im praktischen Gebäudebetrieb effektiv zu nutzen. Durch die Verwendung des Unknown-but-bounded-Verfahrens (UBB) [15, 16] soll die Implementierung auch in Bestandsgebäude mit BKT und Gebäude, für die keine detaillierte dynamische Simulation vorliegt, ermöglicht werden. Somit können die Ladezeiten der BKT auf Grundlage von Prognosen der zu wählenden Netzreferenzgröße (zum Beispiel variabler Strompreis oder der zeitvariable Anteil von fEE-Strom im Netzgebiet) auf günstige Zeitfenster im Tagesverlauf gelegt werden. In Verbindung mit einer strombasierten Erzeugung von Wärme und Kälte im Gebäude (zum Beispiel durch eine reversible Wärmepumpe) wird somit eine Nutzung von Flexibilität zur Verbesserung des Netzeinflusses des Gebäudes ermöglicht. Die Auswirkungen dieses Lastmanagements sollen im weiteren Verlauf quantifiziert werden. Die gesamte Prozesskette der Wärme- und Kälteerzeugung im Gebäude soll dabei Teil der Untersuchung sein, inklusive der Auswirkungen auf die NutzerInnen in Form des thermischen Raumkomforts.

1.3 AUFBAU UND METHODIK

In der Arbeit wird ein gekoppeltes Gebäude- und Anlagenmodell zur Versorgung einer generischen Bürozone in der Simulationsumgebung TRNSYS [17] erstellt. An diesem wird eine netzgeführte Taktbetriebsstrategie zur intermittierenden Beladung der thermisch aktivierten Betondecken untersucht. Im Vergleich mit der Referenzbetriebsstrategie, dem außentemperaturgeführten Dauerbetrieb nach UBB-Verfahren, wird die netzdienliche Betriebsstrategie bewertet. In Kapitel 3 werden das erstellte Simulationsmodell von Gebäude und Anlage und die Annahmen und Parameter der verwendeten Basisregelung für die Betonkerntemperierung vorgestellt. Grundlage sind dabei die realen Planungsdaten für Architektur und Anlagentechnik eines in 2020 fertiggestellten Nichtwohngebäudes sowie Randbedingungen auf Grundlage des Stands der Technik.

In Kapitel 4 wird in einem ersten Schritt das Taktbetriebsverfahren nach Gwerder u. a. [18] sowie dessen Implementierung in das Simulationsmodell vorgestellt. Die Verbindung dieses Verfahrens mit einem aus einer wählbaren Netzreferenzgröße gebildeten Netzsignal wird erläutert. Die Netzreferenzgrößen werden auf Grundlage historischer Daten aus den Jahren 2017 bis 2020 analysiert.

Die entwickelte Netzführung der Taktstrategie wird in Kapitel 5 im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf Behaglichkeit und Energieeffizienz einerseits sowie ihren Effekt auf den Netzeinfluss der Wärme- und Kältebereitstellung andererseits untersucht. Als wichtigster Parameter wird dabei das Einschaltzeitverhältnis, das heißt die Größe des Zeitfensters zur Beladung des thermisch aktivierten Bauteils, variiert. Die Verbesserung des Netzeinflusses der Anlage wird schließlich mit Hilfe der Netzdienlichkeitskennzahl GSC für Wärmepumpe und Gesamtsystem quantifiziert.

STAND DER FORSCHUNG

2.1 NETZDIENLICHKEIT

2.1.1 *Definition*

Der Begriff der Netzdienlichkeit im Kontext von Gebäuden wurde in Klein, Hermann und Herkel [9] und Klein, Kalz und Herkel [19] erstmals eingeführt. Netzdienlichkeit beschreibt demnach ein Verbrauchs- oder Erzeugungsverhalten, das dazu beiträgt, „dass die Nachfrage nach elektrischer Energie zu volkswirtschaftlich minimalen Kosten zu jedem Zeitpunkt gedeckt wird“ [14, S. 105]. Dieser Nutzen kann durch mehrere, einander nicht ausschließende Ziele erreicht werden:

1. Maximierung der Deckung zwischen lokaler Erzeugung und lokaler Last
2. Maximierung der volkswirtschaftlichen Effizienz der Stromversorgung, das heißt zum Beispiel zeitliche Verschiebung des Stromverbrauchs in Zeiten mit minimalen Grenzkosten
3. Minimierung von Netzengpässen
4. Bereitstellung von Regelenergie oder –leistung

Jedes dieser Ziele muss zur Erreichung ausdrücklich in die Betriebsstrategie der gebäudetechnischen Anlagen aufgenommen werden.

Weiterhin kann nach Kalz und Klein [14] danach unterschieden werden, auf welchen Bilanzrahmen des elektrischen Energiesystems sich die Zielstellungen beziehen. Für Maßnahmen zur Verbesserung der Netzdienlichkeit sind die Bilanzrahmen sowie Spannungsebenen nach Abbildung 2.1 zu unterscheiden. Je nachdem, welche Ebene des Energiesystems betrachtet wird, unterscheiden sich die möglichen Maßnahmen und Zielstellungen. In dieser Arbeit werden für den Begriff der Netzdienlichkeit die Bilanzgrenzen (1) und (3) beziehungsweise (1)

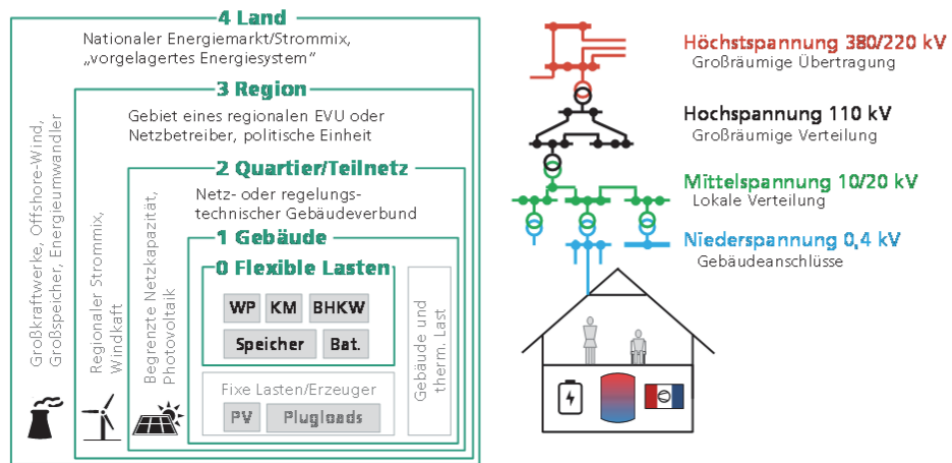


Abbildung 2.1: Bilanzebenen des elektrischen Energiesystems (links) sowie des Stromnetzes (rechts), Abbildung aus [14].

und (4) nach Abbildung 2.1 verwendet. Netzdienlichkeit wird weiterhin unter der Zielstellung „2. Maximierung der (volkswirtschaftlichen) Effizienz der Stromversorgung“ bewertet. Im Sinne der Netzdienlichkeit müssen somit, in einem „netzdienlicheren“ Gebäude, die flexiblen Lasten und Erzeugungsmöglichkeiten intelligent gesteuert werden. Dies bewirkt nach Ziel 2 schließlich eine volkswirtschaftlich effizientere elektrische Energieversorgung.

In Sterner u. a. [20] wird davon abweichend der Begriff der ‚Netzdienlichkeit‘ als „...Verhalten im Stromnetz, das aktiv zur Stabilisierung und zum reibungslosen Betrieb beiträgt.“ [20, S. 11] beschrieben. Davon unterschieden wird der Begriff der ‚Systemdienlichkeit‘ für ein Speichersystem oder eine Erzeugungsanlage. Demnach kann beispielsweise ein Speichersystem als „systemdienlich“ bezeichnet werden, wenn es die Flexibilisierung des gesamten Energiesystems befördert. Dies beinhaltet eine Anpassung an den fluktuierenden Strombedarf im Energiesystem und damit eine Minimierung der Schwankung der Residuallast [20, S. 11]. Der Begriff der ‚Systemdienlichkeit‘ nach STERNER ist somit gleichbedeutend zum Begriff der Netzdienlichkeit nach KALZ. Da in dieser Arbeit jedoch die Gebäude- beziehungsweise Quartiersperspektive nach KALZ mit den entsprechenden Bilanzgrenzen eingenommen wird, wird auch diese Definition des Begriffs verwendet.

2.1.2 Quantifizierung

Um die Netzdienlichkeit bestehender Gebäude und einzelner Anlagen bewerten zu können, wurde die Netzdienlichkeitskennzahl GSC entwickelt [21]. Sie stellt

eine dimensionslose Kennzahl zur Bewertung der Netzdienlichkeit auf Basis einer zu wählenden Netzreferenzgröße dar. Sie berechnet sich für Energieverbraucher wie folgt [21, S. 19]:

$$GSC_{\text{abs}}(G) := \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{el}}^i \cdot G^i}{W_{\text{el}} \cdot \bar{G}} \quad (2.1)$$

mit

W_{el}^i elektrischer Energieverbrauch je Zeitschritt,

\bar{G} arithmetischer Mittelwert der Netzreferenzgröße im betrachteten Zeitraum.

Als Netzreferenzgröße G können beispielsweise

- der Anteil der fEE im Netz,
- die Residuallast oder
- der EPEX-Börsenstrompreis

für den jeweiligen Zeitschritt verwendet werden. Die Wahl der Netzreferenzgröße ist somit entscheidend für den Soll-Lastverlauf eines netzoptimalen Verbrauchers oder Erzeugers. Ein Verbrauchsprofil ist demnach, bei Nutzung des Anteils fEE als Referenzgröße, als netzdienlich zu bewerten wenn die Lastspitzen auf Zeiten mit hohen Werten für den Anteil fEE fallen und umgekehrt. Die resultierende absolute Netzdienlichkeitskennzahl GSC_{abs} wird in diesem Fall einen Wert

$$GSC_{\text{abs}} > 1$$

aufweisen. Bei der Nutzung von Residuallast oder dem stündlichen EPEX-Spotmarktpreis als Referenzgröße gilt umgekehrt, dass die Zeiten hohen Verbrauchs auf Zeiten mit niedriger Residuallast respektive Börsenstrompreis fallen sollten. Ein netzdienliches Verbrauchsprofil weist hier einen Wert

$$GSC_{\text{abs}} < 1$$

auf. Für alle genannten Netzreferenzgrößen liegen sowohl historische, als auch aktuelle und zukünftige Werte auf einer Plattform des Verbands europäischer Übertragungsnetzbetreiber ENTSO-E vor [8]. Für den Anteil fEE sowie die Residuallast liegen Daten viertelstündlich und für die europäischen Übertragungsnetzgebiete separat vor, der EPEX-Preis wird deutschlandweit in stündlicher zeitlicher Auflösung ausgegeben.

Bei der Verwendung der Netzdienlichkeitskennzahl sind Zeitschritt, Betrachtungszeitraum sowie Betrachtungsobjekt flexibel wählbar. Bei Gebäude- und

Anlagensimulationen mit den Bilanzgrenzen (1) nach Abbildung 2.1 sind die Betrachtungszeiträume Tag, Woche, Monat und Jahr sowie unter Umständen auch Heiz- oder Kühlperiode denkbar und sinnvoll. Die Verwendung des Börsenstrompreises erscheint nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll, da sich so mit Hilfe von variablen Strompreisen direkt ein Vermarktungsmodell für eine netzdienliche Betriebsweise erschließt. Die Integration von erneuerbarer Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie in das Energiesystem wird jedoch nur indirekt berücksichtigt. Wenn sie das primäre Ziel der Betriebsstrategie ist, wird die Nutzung des momentanen Anteils von Wind- und PV im Netzgebiet als Referenzgröße sinnvoll. Untersuchungen in Klein, Hermann und Herkel [9] zeigen, dass sich die Verläufe für den Anteil fEE sowie den Börsenstrompreis mit zunehmendem Anteil der fEE im Gesamtsystem immer weiter angleichen.

Unter gewissen Umständen kann es sinnvoll sein, die Netzdienstlichkeitskennzahlen verschiedener Gebäude mit unterschiedlicher Nutzung und Anlagenkonfiguration, oder auch mit Bezug auf unterschiedliche Netzreferenzgrößen, zu vergleichen. Hierzu wurde in Klein [21] die relative Netzdienstlichkeitskennzahl GSC_{rel} eingeführt. Sie beschreibt den Netzeinfluss eines Gebäudes auf einer festen Skala über -100 (maximal netzadvers), ± 0 (netzneutral) bis $+100$ (maximal netzdienlich). Hierzu muss unter Kenntnis der elektrischen Verbraucher und Erzeuger im System sowie der zur Verfügung stehenden Flexibilitäten das Lastprofil mit dem schlechtestmöglichen GSC_{abs} als „lowerPB“ (untere Potenzienschranke) sowie dem bestmöglichen GSC_{abs} als „upperPB“ (obere Potenzienschranke) ermittelt werden. Drei Vereinfachungen werden dabei zu Grunde gelegt [21, S. 26]:

- Lasten können nur innerhalb eines Tages verschoben werden,
- die maximale Leistung aller Komponenten bleibt unverändert,
- die tägliche Energiesumme der Einzelverbraucher / -erzeuger bleibt unverändert.

Die relative Netzdienstlichkeitskennzahl GSC_{rel} ermittelt sich dann nach [21, S. 22] wie folgt:

$$GSC_{rel} := 200 \cdot \frac{GSC_{abs}(lowerPB) - GSC_{abs}(achieved)}{GSC_{abs}(lowerPB) - GSC_{abs}(upperPB)} \quad (2.2)$$

Somit bietet die relative Kennzahl den Vorteil, dass mit ihr eine bessere Vergleichbarkeit über verschiedene Gebäude, Netzreferenzgrößen und Zeiträume

ermöglicht wird. Nachteilig sind jedoch die nötige Kenntnis über das System sowie die Einschränkung durch die getroffenen Annahmen.

Im aktuellen Kriterienkatalog der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) wird die Netzdienlichkeit eines zu planenden Gebäudes aufgegriffen [22, S. 504]. So erhält ein Gebäude den „Circular Economy Bonus – Netzdienliches Energiesystem“, wenn Speicherkapazitäten in Höhe von 10% des Endenergiebedarfs bereitgestellt werden oder aber ein „integriertes Energie- und Lastmanagement“ genutzt wird. Darüber hinaus fehlt jedoch momentan noch ein Wirtschaftlichkeitsmodell für den netzdienlichen Betrieb von einzelnen Gebäuden oder Quartieren nach der obigen Definition. Hierzu müsste der regulatorische Rahmen durch den Gesetzgeber gestellt werden [23].

2.2 FLEXIBILITÄT

2.2.1 Definition

Flexibilität ist nach Petersen u. a. [24] eine zustands- und zeitabhängige und dem System inhärente Größe. Sie lässt sich gemäß der in Petersen u. a. [24, S. 1150] vorgestellten Systematik mit „der Fähigkeit, vom Plan abzuweichen“ („...*flexibility is the ability to deviate from the plan.*“) beschreiben. Flexibilität wird demnach charakterisiert durch vier maßgebliche Einschränkungen [24, S. 1150]:

- Leistung(-skapazität) (zum Beispiel maximale Leistung eines elektrischen Heizstabs)
- Energie(-kapazität) (zum Beispiel maximaler thermischer Energieinhalt eines Wasserspeichers)
- Ladezustand des Speichers (zum Beispiel von thermisch aktiviertem Bauteil oder Wasserspeicher)
- Mindestlaufzeit (zur Vermeidung von erhöhtem Verschleiß, beispielsweise bei Blockheizkraftwerken (BHKW) oder Wärmepumpen)

Die Bedeutung der Flexibilität als zukünftiges Leistungsmerkmal eines Gebäudes, um damit die Integration dezentraler erneuerbarer Stromerzeugung in großem Ausmaß zu ermöglichen, wurde in dem von 2016 bis 2019 durchgeführten Forschungscluster Annex 67 [25] des „Energy in Buildings and Communities Programme“ (EBC) deutlich. Flexibilität im Gebäudekontext wird dort wie folgt

beschrieben:

„The energy flexibility of a building is the ability to manage its demand and generation according to local climate conditions, user needs and grid requirements. Energy flexibility of buildings will thus allow for demand side management/load control and thereby demand response based on the requirements of the surrounding grids.“[26, S. 7].

Basierend auf Klein [21] werden dort folgende Quellen für die Flexibilität von Gebäuden genannt:

GEBÄUDEMASSE Die Gebäudemasse birgt das im Bezug auf die Energiemengen größte Potenzial in Bestands- und Neubauten. Voraussetzung für die Nutzung der den Gebäuden inhärenten thermischen Speicherpotentiale sind bauteilaktivierende Übergabesysteme wie Betonkerntemperierung oder auch Fußbodenheizung.

THERMISCHE SPEICHER Sensible oder latente Wärme- oder Kältespeicher werden gezielt Be- und Entladen. Auch Trinkwarmwasserspeicher können Flexibilität in dieser Form bereitstellen.

FUEL SWITCH Bei Vorhandensein mehrerer thermischer Erzeugungseinheiten mit unterschiedlichen Energieträgern (engl. *Fuel*) kann Flexibilität durch die gezielte Umschaltung zwischen den Erzeugungseinheiten (zum Beispiel Wärmepumpe und Fernwärme zur Wärmeversorgung) bereitgestellt werden.

STROMSPEICHER Elektrische Energie kann direkt ein- und ausgespeichert werden, in Verbindung mit einer Erzeugungseinheit ist auch eine Steigerung des Eigenverbrauchs und der Autarkie möglich.

ENERGIEERZEUGUNGSKAPAZITÄTEN Gezielte Bereitstellung von (elektrischer) Energie, beispielsweise mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), PV-Anlage oder Windturbinen.

NETZWERKE Die Einbindung in ein Energienetz (Stromnetz, Erdgasnetz, Wärmenetz) ist notwendige Voraussetzung für die Bereitstellung von Flexibilität.

2.2.2 Quantifizierung

Zur Quantifizierung der Flexibilität, die Gebäude bereitstellen können, wurde im Zuge von Annex 67 eine Methodik entwickelt [27]. Mit dieser kann die Flexibilität unter Verwendung eines Netzsignals charakterisiert werden. Unter der Annahme, dass die Reaktion des Gebäudesystems auf das Netzsignal linear und zeitinvariant erfolgt, kann die Last Y_t zum Zeitpunkt t mit

$$Y_t = \sum_{k=0}^{\infty} h_k \lambda_{t-k} + R_t \quad (2.3)$$

ermittelt werden [27, S. 177]. Dabei sind

λ_{t-k} Wert des Netzsignal („penalty“) zum Zeitpunkt $t - k$,

h_k theoretische Impulsantwortfunktion der variablen Last als Antwort auf das Netzsignal,

R_t nicht durch das Netzsignal veränderter Lastanteil zum Beispiel des Gebäudes.

Die Flexibilitätsfunktion (FF , „Flexibility Function“) wird darauf aufbauend als Sprungantwort des veränderbaren Lastanteils geschrieben:

$$FF(t) = \sum_{k=0}^t h_k \quad \text{wenn } \lambda_k = 0 \text{ für } k < 0 \quad (2.4)$$

und $\lambda_k = 1$ für $k \geq 0$.

In Abbildung 2.2 ist die Flexibilitätsfunktion eines Gebäudes als Reaktion auf den Signalsprung beispielhaft dargestellt. Die die Funktion kennzeichnenden Flexibilitätscharakteristiken sind:

τ Totzeit nach Änderung des Netzsignals,

Δ maximale Laständerung in Folge der Änderung des Netzsignals,

α Zeit von Beginn der Laständerung bis zum Erreichen des Minimums,

β Zeit, in der die Last zum Beispiel des Gebäudes durch den Eingriff reduziert wurde,

A eingesparte Energie während der Zeit β sowie

B zusätzlich benötigte Energie nach Ablauf der Lastreduzierung.

Das genutzte Netzsignal kann auf frei wählbaren Größen wie beispielsweise einem variablen Strompreis basieren. Randbedingungen, die nach [27] einen Einfluss auf die von einem Gebäude lieferbare Flexibilität haben wie

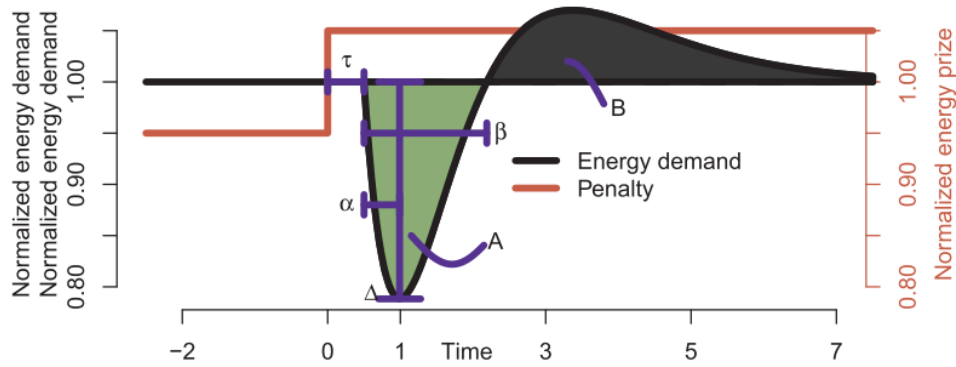


Abbildung 2.2: Flexibilitätsfunktion und kennzeichnende Größen (Junker u. a. [27]).

- Bautechnik (thermische Masse, Dämmstandard, Architektur),
- Technische Gebäudeausrüstung (Raumluftechnische (RLT) Anlage, Wärme-/Kältebereitstellung und -übergabe, Speicheroptionen),
- Steuer- und Regelungseinrichtungen, die eine Nutzung der Flexibilität ermöglichen sowie
- Nutzerverhalten und Komfortbedingungen

sind in der Flexibilitätsfunktion, die aus Simulations- oder Monitoringdaten gebildet werden kann, implizit berücksichtigt. Voraussetzung für eine valide Voraussage der Flexibilität bei Verwendung einer Simulation ist dabei eine ausreichend genaue Abbildung des Gebäudes.

Aufbauend auf der Flexibilitätsfunktion werden in Junker u. a. [27] zwei Flexibilitätsindizes zur Quantifizierung der Flexibilität von Gebäuden vorgestellt. Mit ihnen lässt sich die erzielbare Flexibilität unter vorgegebenen Randbedingungen (Gebäude, Nutzung, Netzsignal) bemessen. Die Methode eignet sich insbesondere für die Anwendung in Simulationen, da die Indizes als Referenz immer die konventionelle Regelstrategie ohne aktive Nutzung von Flexibilitäten verwendet. Bei direkter Verwendung einer Netzreferenzgröße wie Anteil fEE oder EPEX-Strompreis lässt sich nach [27] der *EFSI* („*Expected Flexibility Savings Index*“) zur Quantifizierung der Flexibilität eines Lastverlaufs bilden. Mit dem *EFSI* werden die konkreten Einsparungen, die durch die Nutzung der Flexibilität und der damit verbundenen Änderung des Lastprofils erzielt werden, quantifiziert. Eine Reduktion der Kosten über den Betrachtungszeitraum von 30 % entspricht einem *EFSI* von 0,3. In einem ersten Schritt werden dazu die „Kosten“ C^0 beziehungsweise C^1 der Vergleichsvarianten ermittelt:

$$C^0 = \sum_{i=0}^N \lambda_t u_t^0 \quad (2.5a)$$

$$C^1 = \sum_{i=0}^N \lambda_t u_t^1 \quad (2.5b)$$

mit

u_t^0 Simuliertes Lastprofil Referenzvariante 0 (meist Variante ohne Berücksichtigung der Flexibilität)

u_t^1 Simuliertes Lastprofil Flexibilitätsvariante 1 (meist Variante mit Berücksichtigung der Flexibilität)

Der *EFSI* wird dann auf Grundlage von C^0 und C^1 nach

$$EFSI = 1 - \frac{C^1}{C^0} \quad (2.6)$$

berechnet. Der zweite vorgestellte Index *FI* („Flexibility Index“) berechnet sich analog zum *EFSI*. Jedoch nimmt hier λ_t als künstlich gebildetes Strafsignal lediglich die Werte 0 oder 1 an. Ein optimiertes Lastprofil wies somit einen Wert von $FI = 1$ auf.

2.2.3 Aktuelle Marktsituation zur Nutzung von Flexibilitäten

Obwohl die Nutzung von Flexibilitäten sektorenübergreifend als Schlüssel zur Integration von fEE gesehen wird [28, S. 10][29, S. 7], fehlen derzeit wirkungsvolle Marktanreize hierfür [30, 31]. Insbesondere durch den hohen nicht-variablen Anteil der Strompreiszusammensetzung (Netzentgelte, Umlagen, Steuern und Abgaben) ist eine netzdienliche Verlagerung der Lasten durch Flexibilitäten und damit eine aktive Teilnahme am Spotmarkt für Stromverbraucher oft noch nicht wirtschaftlich. Darüber hinaus wird eine Partizipation am Regelleistungsmarkt, die ein weiteres Modell für die wirtschaftliche Nutzung von Flexibilitäten wäre, durch regulatorische Hürden wie vorgegebene Produktlängen und Angebotszeiträume [30, S. 23] erschwert. Die Möglichkeit zur zeitgenauen Lasterfassung und Abrechnung ist eine technische Voraussetzung für die Nutzung der in Gebäuden vorhandenen Flexibilitäten durch den Gebäudebetreiber. Bei Gebäuden mit einem Jahresstromverbrauch unter 100 MW h findet diese zeitgenaue Messung derzeit nicht statt. Zudem besteht bei Verbrauchern mit einer elektrischen Leistungsaufnahme < 30 kW keine Möglichkeit für Netzbetreiber oder Dritte, diese anzusteuern. Dies soll sich jedoch mittelfristig mit dem Smart-Meter-Rollout ändern [32, S. 71].

Tabelle 2.1: Untersuchte Gebäudevarianten in Hausladen u. a. [12]

Typologie	Baustandard	Heizen	Kühlen
Wohnen EFH	Bestand	Radiatoren	-
	Neubau	FBH	-
Wohnen MFH	Bestand	Radiatoren	-
	Neubau	Radiatoren	-
Büro & Verwaltung	Bestand	Radiatoren	ULK
	Neubau	Radiatoren	ULK
	Neubau	BKT	BKT
Einzelhandel	Neubau	ULK	ULK

2.3 LASTMANAGEMENT VON GEBÄUDEN

Bereits in Hausladen u. a. [12] wurde das (thermische) Lastmanagement-Potenzial (LM) von Gebäuden untersucht. Dabei wurden idealisierte Modellräume der Typologien Wohnen Einfamilienhaus (EFH), Wohnen Mehrfamilienhaus (MFH), Büro & Verwaltung sowie Einzelhandel erstellt. Für diese wiederum wurden die Heiz- und Kühlsysteme sowie Baustandards nach Tabelle 2.1 mit Randbedingungen nach DIN V 18599-10 [33] im Hinblick auf ihr Aus- und Einschaltverhalten in Simulationsstudien untersucht. Die Wetterbedingungen wurden dabei in Form von sieben unterschiedlichen Typtagen („sehr heiß“ bis „sehr kalt“) variiert. Insgesamt wurden somit acht Gebäudevarianten verglichen. Das Lastmanagement-Potenzial wurde in der Studie durch die Größen

- Zu- beziehungsweise Abschaltdauer (in h) und
- mittlere Zu-/Abschaltleistung des Übergabesystems (in $\frac{W}{m^2}$)

beschrieben. Durch die Variation der Gebäudeparameter Übergabesystem, Gebäudeschwere und Dämmstandard wurden große Unterschiede beim sich ergebenden Lastmanagement-Potenzial deutlich. Bei einem trägen thermischen Übergabesystem, hohen interner Speichermassen sowie einem hohen Dämmstandard konnte das höchste Potenzial ermittelt werden. In Winter, Übergangszeit und Sommer wurde somit für das Bürogebäude mit Bauteilaktivierung als Übergabesystem durchgehend ein hohes LM-Potenzial festgestellt [12, S. 79]. In den durchgeführten dynamischen Simulationen wurde zudem die Bedeutung

des Zeitprofils der internen thermischen Lasten für das LM-Potenzial aufgezeigt, insbesondere bei Nichtwohngebäuden. Nicht betrachtet wurden in den mit dem Simulationstool IDA-ICE durchgeführten Studien die Erzeugung von Wärme- und Kälte wie auch die Verteilung im Gebäude.

Im Forschungsprojekt von Auer u. a. [13] wurde das LM-Potenzial des Gebäudebestands über die Ermittlung von Gesamtlastprofilen untersucht. Dabei wurde jedoch nur das Potenzial durch strombasierte Wärmeerzeugung betrachtet. Darüber hinaus wurde bei den LM-Strategien die Raumbehaglichkeit nicht berücksichtigt [13, S. 58]. Das thermische LM in Gebäuden wirkt sich nach Aussage der Studie auf das Stromsystem positiv in Form geringerer benötigter Speicherinvestitionen, einer verbesserten Integration erneuerbarer Energien und verringerter CO₂-Emissionen aus. Weiterer Forschungsbedarf wird in Regelstrategien zum LM unter Berücksichtigung von Raumbehaglichkeit und Stromnetz gesehen [13, S. 59].

In Jungwirth [34] wurde über Simulationsstudien das LM-Potenzial eines Bürogebäudes mit BKT anhand eines Beispielraumes detailliert untersucht. Die Wärme- beziehungsweise Kältebereitstellung erfolgt über eine (reversible) Wärmepumpe, wobei diese lediglich über einen ganzjährig unveränderten *Coefficient Of Performance (COP)* abgebildet wurde. Als Referenzszenario für den Betrieb wurde eine einfache 2-Punkt-Regelung für die Ansteuerung der BKT-Beladung gewählt. In einer ersten Variante wurde eine modellprädikative Regelung, basierend auf einem genetischen Optimierungsalgorithmus, für einen optimierten Heiz- und Kühlbetrieb implementiert. Elemente der Zielfunktion dieser Optimierung waren die thermische Behaglichkeit sowie die verursachten Energiekosten bei variablen Strompreisen. Für die zugrunde liegenden Strompreise wurden theoretische Verläufe ohne festen Kostenanteil (Abgaben, Umlagen, Steuern) für die Jahre 2010, 2030 und 2050 verwendet. In einem weiteren Schritt wurde in der letzten Variante das konventionelle Gebäudemodell durch ein Modell auf Basis neuronaler Netze ersetzt. Durch die Verwendung des neuronalen Gebäudemodells sollte der Modellierungsaufwand reduziert wie auch die Robustheit der Optimierung erhöht werden. Im Ergebnis wurden bei konstanten wie auch variablen Strompreisen durch die Optimierungsvarianten deutliche Energiekosteneinsparungen erreicht. Problematisch ist dabei das verwendete Stromkostenmodell, durch das die Volatilität des Strompreises sehr hoch war [34, S. 17 ff.]. Die Auswirkung der Strategien auf den thermischen Komfort wurde nicht detailliert untersucht.

2.4 BKT-BETRIEBSSTRATEGIEN

2.4.1 Normen und Richtlinien Betonkerntemperierung

Nach DIN EN 11855-1 [35, S. 15] sind thermisch aktive Bauteilsysteme allgemein als „Heizungs- und Kühlsystem mit Wasserdurchströmung, in dem die Rohre in den inneren Betonkern einer Gebäudekonstruktion eingelassen sind“ definiert. In Teil 2 der Norm wird der Begriff der „flächenintegrierten Strahlungsheizung- und Kühlung“ weiter spezifiziert und es werden verschiedene Systemtypen definiert [36]:

TYP A/C Wasserführende Rohre in Estrich- oder Betonschicht, thermische Entkopplung zur darunter liegenden, tragenden Betondecke über Dämmung oder Luftraum. Übliche Bauweise bei nass verlegter Fußbodenheizung

TYP B Wasserführende Rohre in unter dem Estrich liegender Dämmschicht verlegt, thermische Kopplung an Estrichschicht über horizontale Wärmeleitbleche

TYP D Wasserführende Rohre in Flächenelementen zwischen Estrich und Dämmschicht

TYP E Rohre meist mittig in der zentralen Betonschicht verlegt

TYP F Wasserführende Kapillarrohrmatten direkt zum Raum aufgebracht, zum Beispiel in der Putzschicht

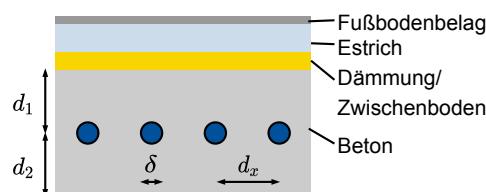


Abbildung 2.3: BKT als Systemtyp E nach EN 11855-2 [36] mit charakteristischen Maßen.

Es handelt sich somit lediglich bei Typ E (Abbildung 2.3), mit meist mittig in der Betonschicht angeordneten Rohren, um ein thermoaktives Bauteilsystem (TABS) nach DIN 11855-1. In DIN EN 11855-2 [36] werden Ansätze zu Planung, Auslegung und Berechnung von Flächentemperierungssystemen genannt. Für TABS wird als vereinfachte Berechnungsmethode zur Ermittlung der statio-

nären Heiz- beziehungsweise Kühlleistung das eindimensionale Widerstandsverfahren nach Koschütz und Lehmann [37] angegeben.

Auch in VDI 6034 [38] wird lediglich das System mit wasserführenden Röhren in der Betondecke als TABS bezeichnet, hier wird zusätzlich der Begriff Betonkerntemperierung synonym genannt. In Bezug auf die Planung und Auslegung von TABS wird in dieser Richtlinie zum einen auf stationäre Verfahren nach DIN 11855 zur Leistungsabschätzung und Dimensionierung der Hydraulik verwiesen. Zum anderen werden dynamische Simulationsuntersuchungen empfohlen, um Aussagen über das instationäre Verhalten der TABS sowie zur Konzeptionierung des gesamten TGA-Systems treffen zu können.

2.4.2 Betriebsstrategien Außentemperaturführung

In Olesen und Dossi [39] wurden unterschiedliche Betriebsstrategien für eine mittig angeordnete Betonkerntemperierung für ein Bürogebäude anhand von Parameterstudien in TRNSYS-Simulationen untersucht. Die Pumpenlaufzeit wurde auf die Zeit zwischen 18 und 6 Uhr begrenzt. In zwei Varianten wurde die BKT-Vorlauftemperatur entweder als lineare Funktion von Außen- und operativer Raumtemperatur

$$\vartheta_{vl,bkt}(t) = f\left(\vartheta_{aul}(t), \vartheta_{op}(t)\right)$$

oder lediglich auf Grundlage der Außentemperatur, mit der Unterscheidung zwischen Heiz- und Kühlfall

$$\vartheta_{vl,bkt}(t) = f\left(\vartheta_{aul}(t)\right)$$

ermittelt. Weiterhin wurden zwei Varianten untersucht, in denen der Sollwert der mittleren BKT-Temperatur $\bar{t}_{bkt} = 0,5(\vartheta_{vl,bkt} - \vartheta_{rl,bkt})$ entweder als Funktion der Außentemperatur oder als konstanter Wert in Abhängigkeit der Jahreszeit berechnet wird. Bei allen Varianten wurden weiterhin Totbänder der operativen Raumtemperatur verwendet, in denen die Ladepumpen der BKT ausgeschaltet sind. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass im Hinblick auf Energieverbrauch und Raumkomfort eine Ermittlung von $\vartheta_{vl,bkt}$ auf Grundlage der Außentemperatur die besten Ergebnisse liefert. Dies gilt sowohl für den Heiz- als auch den Kühlfall. Im Hinblick auf die resultierenden Raumtemperaturen war es dabei nicht von Bedeutung, ob die aktuelle Außentemperatur, ein gleitender Mittelwert der vergangenen 24 beziehungsweise 72 Stunden oder ein Prognose-

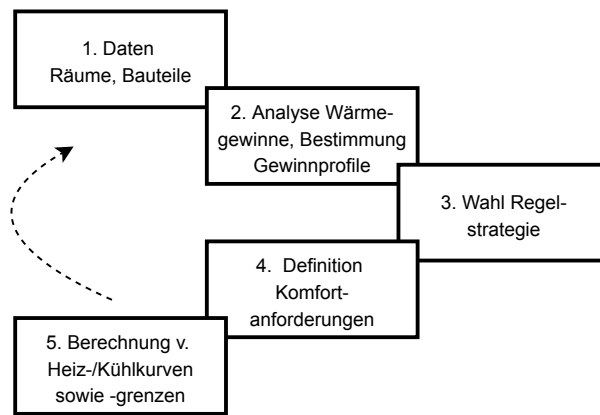


Abbildung 2.4: Iterative, vereinfachte Vorgehensweise des UBB-Verfahrens nach Tödtli u. a. [43].

wert (24 Stunden) verwendet wurde. Zur Reduzierung des Energieverbrauchs wird ein Totbandbereich von

$$21\text{ °C} < \vartheta_{\text{op}} < 23\text{ °C},$$

empfohlen, maximal jedoch 2 K.

2.4.3 *Unknown-but-bounded-Verfahren*

Das UBB-Verfahren wurde in einem vierjährigen Kooperationsprojekt von Siemens, der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) sowie der Hochschule Luzern entwickelt und in mehreren Veröffentlichungen [16, 18, 40–43] sowie einer Monografie [15] ausgearbeitet. Das UBB-Verfahren ermöglicht eine integrierte, das heißt gewerkeübergreifende Planung und Auslegung thermisch aktiver Bauteilsysteme inklusive deren Steuerung. Darin liegt ein wesentlicher Unterschied zur herkömmlichen zweistufigen Vorgehensweise bei Planung und Dimensionierung. Das Verfahren stellt, im Bezug auf den Detaillierungsgrad der thermischen Modellierung wie auch den nötigen Arbeitsaufwand, eine Zwischenform zwischen stationäre Berechnungsmethoden (zum Beispiel nach DIN 11855-2 [36]) und komplexen dynamischen Simulationen mit Berechnungsverfahren nach DIN EN 52017 [44] dar.

Zur Berücksichtigung der im genauen Verlauf unbekanntem dynamischen Wärmegewinnprofile aus

- solarer Einstrahlung & künstliche Beleuchtung,
- Personen und Geräten sowie

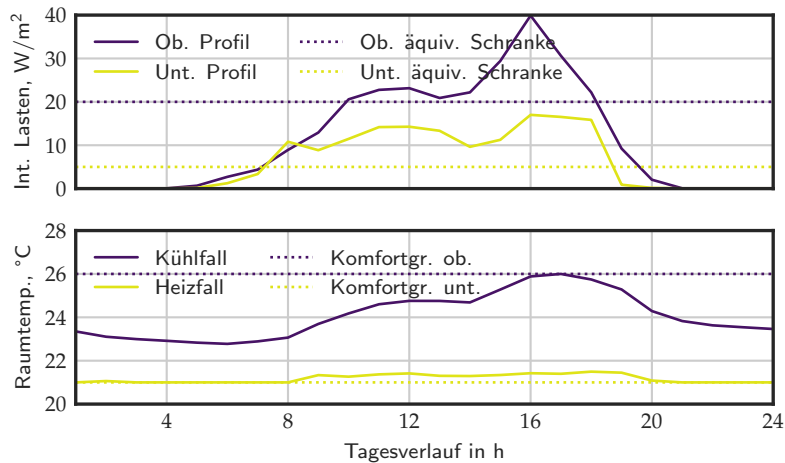


Abbildung 2.5: Beispielhafte obere- und untere Gewinnprofile sowie berechnete obere und untere äquivalente Gewinnschranken nach dem UBB-Verfahren (oben).

Berechnete Raumtemperaturverläufe mit Komfortgrenzen (unten).

- Lüftung und Infiltration

ist von der Planerin oder dem Planer ein oberes, maximales und auch ein unteres, minimales Profil anzugeben. Anhand des Differentialgleichungssystems nach Tödtli u. a. [15, S. 153 ff.] kann somit eine stationäre obere sowie eine untere „äquivalente Wärmegewinnschranke“ gebildet werden (vgl. Abbildung 2.5). Für das dynamische Verhalten maßgebliche Daten zu TABS-Aufbau, Innen- und Außenwänden der Zone, Komfortanforderungen wie auch Klimadaten sind im thermischen Modell berücksichtigt. Die internen Gewinne können somit im genauen Verlauf unbekannt sein, werden jedoch innerhalb gewisser Grenzen angenommen („unknown, but bounded“). Vereinfachend wird die Schwankung der Außentemperatur aufgrund der Trägheit des Raumes vernachlässigt, deshalb wird für die weiteren Berechnungen lediglich ein stationäres Raummodell nach Abbildung 2.6 verwendet. Dieses stationäre Modell ist als 1-Kapazitäten-Modell aufgebaut und unterliegt unter anderem folgenden Einschränkungen beziehungsweise Vereinfachungen:

- Keine separate Berechnung von Luft- und Strahlungstemperatur der Zone, wie für Berechnungsverfahren nach VDI 6007 [45, S. 7] gefordert
- Annahme konstanter Wärmeübergangswiderstände zwischen Lufttemperaturknoten ϑ_r und Oberflächen
- Außentemperatur lediglich als gleitende Außenlufttemperatur (24 h) berücksichtigt

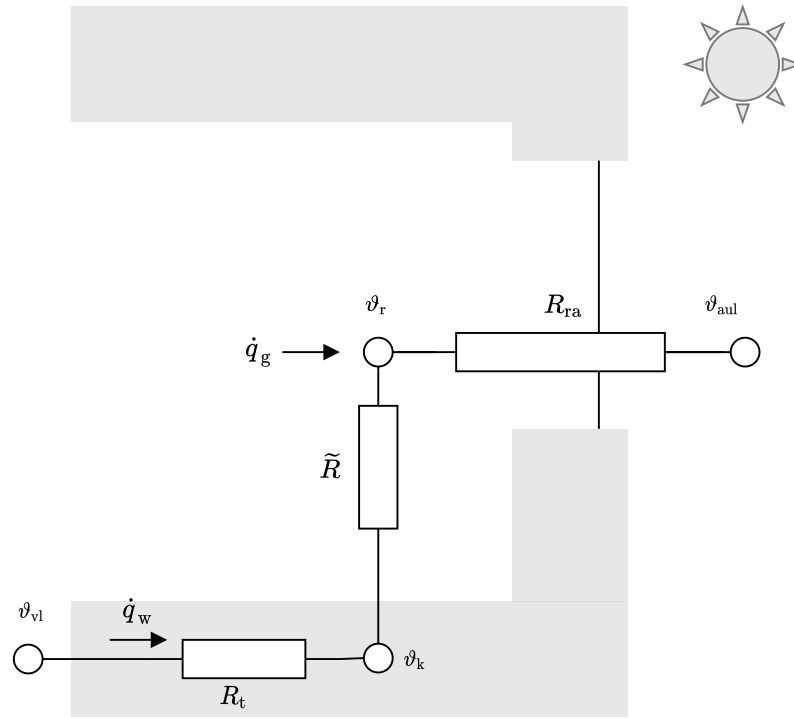


Abbildung 2.6: Schema des stationären, eindimensionalen Raummodells aus Tödtli u. a. [15].

Unter Anwendung der oberen und unteren äquivalenten Wärmegewinnschranken ($\dot{q}_{g,elb}$ und $\dot{q}_{g,eub}$) können die linearen Heiz- und Kühlkurven nach dem UBB-Verfahren wie folgt ermittelt werden:

$$\vartheta_{vi,h} = \vartheta_{r,soll,h} \frac{\tilde{R} + R_t}{R_{ra}} \cdot (\vartheta_{r,soll,h} - \vartheta_{aul}) - (\tilde{R} + R_t) \cdot \dot{q}_{g,elb} \quad (2.7a)$$

$$\vartheta_{vi,k} = \vartheta_{r,soll,k} + \frac{\tilde{R} + R_t}{R_{ra}} \cdot (\vartheta_{r,soll,k} - \vartheta_{aul}) - (\tilde{R} + R_t) \cdot \dot{q}_{g,eub}. \quad (2.7b)$$

Das Verfahren kann, aufbauend auf den außentemperaturgeführten Heiz- und Kühlkurven, erweitert werden um eine Raumtemperaturaufschaltung oder einen intermittierenden Betrieb der BKT-Ladepumpen. Dieser kontinuierliche Taktbetrieb nach UBB-Verfahren wird in Kapitel 4 eingehend vorgestellt.

Die gute Anwendbarkeit des UBB-Verfahrens wurde im Laufe der Entwicklung durch Simulationsstudien und Messungen bestätigt [46]. Im Forschungsprojekt LowEx:monitor [47] wurde das Verfahren bei Nutzung einer Betonkerntemperatur mittels Simulationsstudien untersucht. Die Praktikabilität in einem großen Bereich verschiedener Niedrigenergiegebäude mit unterschiedlichen Nutzungen wurde darin belegt. Das vorgegebene Komfortband wurde jeweils eingehalten, jedoch wurde der Komforttemperaturbereich im Kühlbetrieb nach oben

nicht vollständig ausgenutzt [48, S. 112]. Diese ist eine Folge der im Verfahren beziehungsweise im Raummodell enthaltenen Sicherheitszuschläge. In weiteren Arbeiten zum Thema Bauteilaktivierung wurde das Verfahren als Best-Practice-Verfahren empfohlen [49][50, S. 93]. Im Planungsprozess wird für das TABS zuerst eine Basisstrategie gewählt. Es kann zwischen „außentemperaturgeführter Vorlauftemperaturregelung“ und „außentemperaturgeführter Rücklauftemperaturregelung“ gewählt werden. Als zusätzliche Option kann die Basisstrategie um die Module „Taktbetrieb“ und „Raumtemperaturregelung“ erweitert werden. Auch Zusatzheiz- oder Kühlsysteme können im Verfahren berücksichtigt werden.

SIMULATIONSAUFBAU

3.1 ZONEN- UND ANLAGENMODELLIERUNG

Für die durchgeführten Simulationsstudien wurden Pläne und Berechnungsunterlagen aus der Ausführungsplanung sowie das Energiekonzept eines in 2020 in Betrieb genommenen Nichtwohngebäudes als Vorlage verwendet [51]. Das Gebäude und die geplante Versorgungsstruktur entsprechen dem derzeitigen Stand der Technik. Abbildung 3.1 zeigt schematisch die multivalente Wärme-/Kälte- und Raumlufthversorgung für das Gebäude mit der untersuchten Bürozone. Die reversible Sole-Wasser-Wärmepumpe versorgt die Wärme- und Kältespeicher unter Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle beziehungsweise -senke. Die Radiatoren wie auch der Nacherhitzer der zentralen RLT-Anlage werden thermisch über Fernwärme versorgt.

3.1.1 Modellierung Anlagentechnik

ERDWÄRMESONDE In Mercker u. a. [52] wurde eine Kombination von Type 557 [53] (Erdwärmesonde) und Type 604 (Rohr mit Kapazitätsberücksichtigung) zur Modellierung des transienten Verhaltens auch bei Ladungszeiträumen < 3 h erfolgreich validiert. Diese Methode wurde anhand der Daten der geothermischen Untersuchung aus der Planung des Nichtwohngebäudes zur Modellierung der Erdwärmesonden angewendet. Es wurden dabei, auf Grundlage der Planungsdaten und in Übereinstimmung mit den Empfehlungen aus [50], die Parameter nach Tabelle 3.1 verwendet. Im Gegensatz zur tatsächlich umgesetzten Planung wurde die Erdreichkopplung nicht als Energiepfahlanlage sondern als konventionelle Erdwärmesonde mit weniger, aber tieferen Bohrungen modelliert. Die einstufige Umwälzpumpe im Solekreis wurde nach den

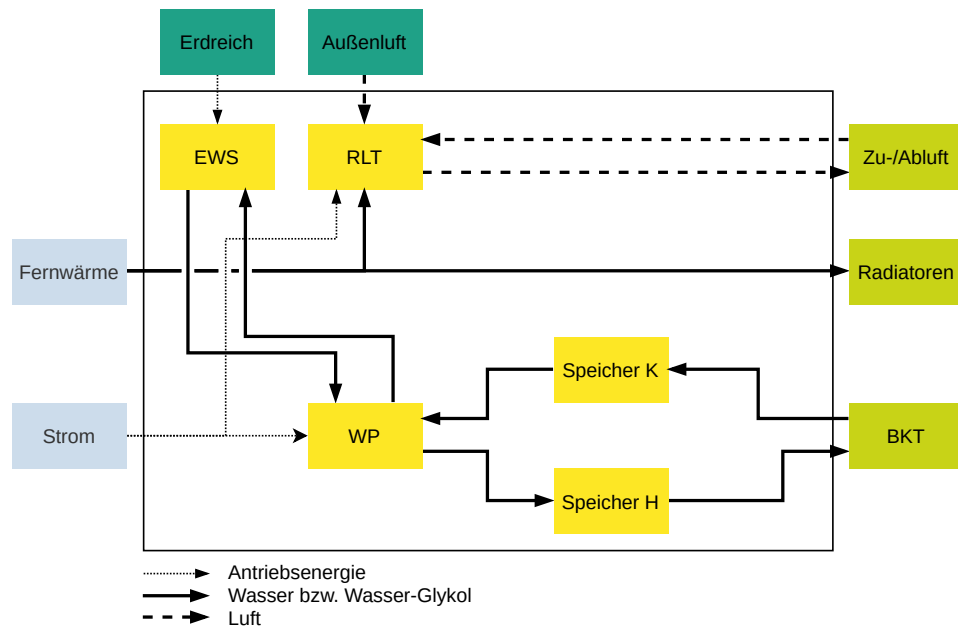


Abbildung 3.1: Multivalente Wärme-, Kälte- und Luftversorgung der Bürozone.

Tabelle 3.1: Verwendete Parameter zur Modellierung der Erdwärmesonde

Anzahl Sonden	2
Länge je Sonde, m	100
Auslegungsmassenstrom je Sonde, $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	370
Spez. Wärmekapazität Fluid, $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}}$	3,93*
Dichte Fluid, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	1024*
Rohrinnen- / Bohrlochdurchmesser, m	0,008/0,2
Leitfähigkeit Erdreich, W/(mK)	2,23
Dichte Erdreich, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	2000
Initialtemperatur Erdreich, °C	13,7
Spez. Wärmekapazität Erdreich, $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}}$	2000

* Werte für Antifrogen L 25 % bei 10 °C

in Wystrcil [50, S. 73] gegebenen Zielwerten mit einer spezifischen elektrischen Pumpenleistung von $SPP = 30 \frac{W}{m^3/h}$ ausgelegt.

REVERSIBLE WÄRMEPUMPE Die reversible Wärmepumpe zur Wärme- und Kältebereitstellung für die Betonkerntemperierung wurde vereinfacht über den Carnot-Wirkungsgrad bei variablem exergetischen Wirkungsgrad abgebildet. Der COP eines idealen Carnot-Prozesses berechnet sich wie folgt:

$$COP_{\text{carnot}} = \frac{T_{\text{kond}}}{T_{\text{kond}} - T_{\text{verd}}}. \quad (3.1)$$

Mit Hilfe der Parameter a und b , ermittelt aus Messdaten aus [54], lässt sich der exergetische Wirkungsgrad ζ für die in Pärish u. a. [54] verwendeten Kondensationstemperaturen, die das Spektrum für den Einsatzzweck gut abdecken, berechnen:

$$\zeta_{25} = a_1(T_{\text{kond}} - T_{\text{verd}})^2 + b_1(T_{\text{kond}} - T_{\text{verd}}) \quad \text{bei } T_{\text{kond}} = 25^\circ\text{C} \quad (3.2a)$$

$$\zeta_{35} = a_2(T_{\text{kond}} - T_{\text{verd}})^2 + b_2(T_{\text{kond}} - T_{\text{verd}}) \quad \text{bei } T_{\text{kond}} = 35^\circ\text{C}. \quad (3.2b)$$

Es ergeben sich Werte für ζ im Bereich von 10 % bis maximal 50 % in Abhängigkeit vom Temperaturhub (vgl. Abbildung 3.2). Mit Hilfe von

$$\zeta = \zeta_{25} + \frac{T_{\text{kond}} - 25}{35 - 25} \cdot (\zeta_{35} - \zeta_{25}) \quad (3.3)$$

und

$$COP = COP_{\text{carnot}} \cdot \zeta \quad (3.4a)$$

$$\dot{Q}_{\text{wp,kond}} = P_{\text{wp,des}} \cdot COP \quad (3.4b)$$

nach [55, S. 463] lässt sich die Heizleistung $\dot{Q}_{\text{wp,kond}}$ der Wärmepumpe in jedem Zeitschritt für den Heizmodus ermitteln.

Im Kühlmodus werden T_{kond} und T_{verd} getauscht. Die (positiv definierte) Kühlleistung $\dot{Q}_{\text{wp,verd}}$ am Verdampfer ist dann die in jedem Zeitschritt nach Gleichung 3.4b zu ermittelnde Ausgangsgröße des Wärmepumpenmodells.

Die einstufige Wärmepumpe wurde in Anlehnung an die Planung auf eine elektrische Leistung des Verdichters nach Tabelle 3.2¹ in Heiz- beziehungsweise Kühlmodus ausgelegt. Die Auslegung beruht auf einer für den stationären Fall

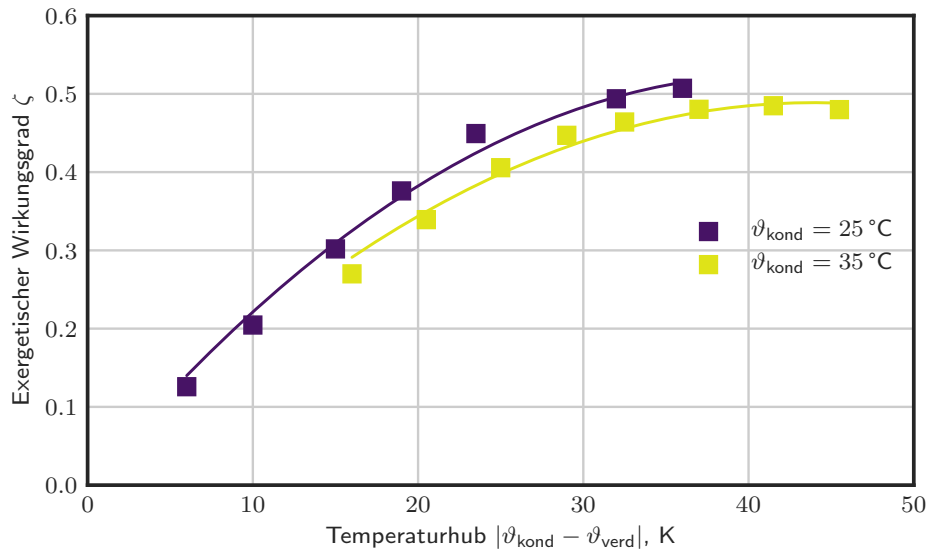


Abbildung 3.2: Messdaten aus [54] sowie anhand dieser ermittelte Näherungsfunktionen für den exergetischen Wirkungsgrad ζ bei $\vartheta_{\text{kond}} = 25$ beziehungsweise 35°C über dem Temperaturhub der reversiblen Wärmepumpe.

Tabelle 3.2: Wichtigste für die Modellierung verwendete Parameter für Wärmepumpe, Speicher sowie RLT-Anlage und Radiatoren (Leistungen bezogen auf Zonen-Nettogrundfläche)

Verdichterleistung WP, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	6,5
Heizleistung WP (Auslegung), $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	30
Kälteleistung WP (Auslegung), $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	39
Wasservolumen Speicher H, m^3	0,24
Wasservolumen Speicher K, m^3	0,31
RLT Zu-/Abluftvolumenstrom, $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2\text{h}}$	7,6
Zulufttemperatur H, $^\circ\text{C}$	19
Zulufttemperatur K (minimal), $^\circ\text{C}$	19
Temperaturänderungsgrad WRG, %	73
Spez. Ventilatorleistung (Zuluft/Abluft), $\frac{\text{W}_s}{\text{m}^3}$	1250
Heizleistung Radiatoren (Auslegung), $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	20
Strahlungsanteil Zusatzheizung, %	40
Nacht- und Wochenendabsenkung Radiatoren, K	5

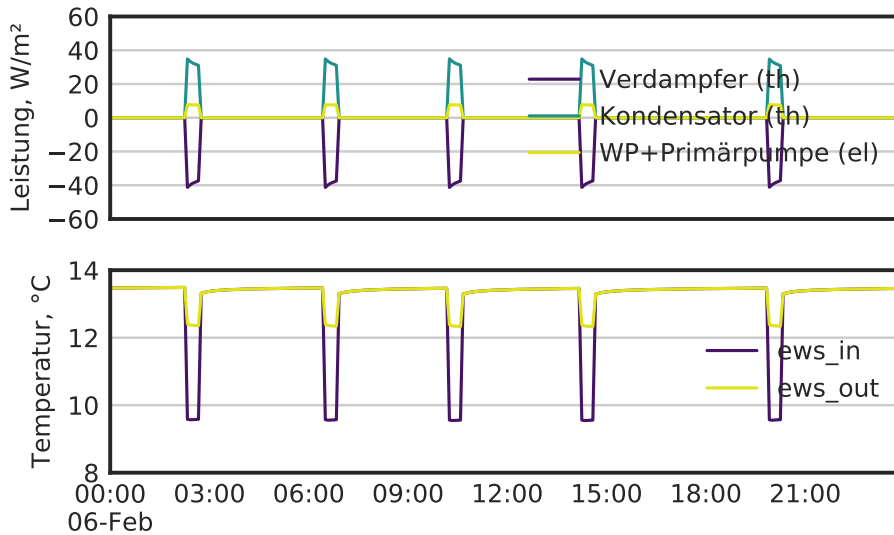


Abbildung 3.3: Beispielhafter Verlauf der thermischen und elektrischen Leistungen an Wärmepumpe sowie der Ein- und Austrittstemperaturen aus der Erdwärmesonde (Heizfall).

angenommenen Spreizung im BKT-Kreis von circa 3,3 K (Kühlfall) sowie 2,5 K (Heizfall) und bewegt sich damit im in der Praxis üblichen Bereich [56].

Abbildung 3.3 zeigt beispielhaft die sich ergebenden Leistungsverläufe der Wärmepumpe sowie die auftretenden Temperaturen an der EWS im Heizfall.

WÄRME- UND KÄLTESPEICHER Die Wasserspeicher für Wärme und Kälte wurden mit Type 158 [57, S. 606 ff.] mit einer Detaillierung von fünf isothermen, horizontalen Schichten dargestellt. Als Speichervolumen wurde ein spezifischer Wert von $0,11 \frac{1}{\text{W}}$ bezogen auf die thermische Auslegungsleistung der Wärmepumpe angesetzt. Die Speicher dienen zum einen der Verringerung der Einschaltzyklen der reversiblen Wärmepumpe. Darüber hinaus können auch kurzzeitig erhöhte Entnahmelastungen, verursacht durch erhöhte Temperaturdifferenzen auf der Gebäudeseite, abgefangen werden. Die Speicher werden durch die Wärmepumpe auf die Sollwerte $\vartheta_{\text{sp},\text{k},\text{soll}} = 14^{\circ}\text{C}$ beziehungsweise $\vartheta_{\text{sp},\text{h},\text{soll}} = 30^{\circ}\text{C}$ mittels einer 2-Punkt-Regelung mit Hysterese temperiert. Ob Wärme beziehungsweise Kälte im jeweiligen Speicher für die BKT vorgehalten werden muss, wird anhand des Wertes der Referenzaußentemperatur $\vartheta_{\text{aul},\text{bkt}}$ für jeden Zeitschritt sowie der definierten Grenztemperatur für Heiz- und Kühlbe-

1 Eine erweiterte Version der Tabelle mit absoluten Leistungswerten findet sich im Anhang.

trieb $\vartheta_{\text{aul,grenz,h/k}}$ entschieden. Der Wärmespeicher wird in Bereitschaft gehalten, wenn

$$\vartheta_{\text{aul,bkt}} < \vartheta_{\text{aul,grenz,h}}$$

gilt. Der Kältespeicher wiederum ist in Bereitschaft bei Erfüllung der Bedingung

$$\vartheta_{\text{aul,bkt}} > \vartheta_{\text{aul,grenz,k}}$$

Da typischerweise

$$\vartheta_{\text{aul,grenz,h}} > \vartheta_{\text{aul,grenz,k}}$$

ist, entsteht ein Außentemperaturbereich, in dem beide Speicher im Bereitschaftsmodus sind.

3.1.2 Modellierung Bürozone

THERMISCHE MODELLIERUNG DER ZONE Bei der für die Untersuchungen modellierten Zone handelt es sich um drei Einzelbüros, die nach den Planungsdaten angelegt und zu einer Nutzungszone zusammengefasst wurden. Als Vereinfachung wurde dazu für die drei Zonen eine identische Nutzung angenommen, die Leichtbau-Zwischenwände wurden nicht modelliert. Die Geometrie der Zone wurde dreidimensional in der Software Sketchup [58] erfasst und über das Addon TRNSYS-3D in das Simulationsmodell über Type 56 (*Multizone Building*) [59] importiert. Die grafische Eingabe der Parameter erfolgt über das TRNSYS-Modul TRNBuild. Das resultierende Modell ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die wichtigsten Parameter zu Architektur und Nutzung sind in Tabelle 3.3 aufgeführt. Die Zone ist in Massivbauweise errichtet, für die vereinfachte Berechnung der effektiven Wärmekapazität nach EN 13786 [60, S. 28] ergibt sich ein Wert von

$$c_{\text{eff}} \approx 190 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Die Zone ist damit als thermisch „schwer“ in der Skala nach DIN V 18599-2 [61, S. 89] einzuordnen. Die zum Simulationsaufbau verwendeten vereinfachten Schichtaufbauten von Innen- und Außenwänden sind in Tabelle a.1 dokumentiert. Die Verteilung der über die Fensterflächen eintreffenden direkten und diffusen Strahlung erfolgt im detaillierten Modus von Type 56, in dem die tatsächliche Geometrie der Zone berücksichtigt wird. Der Austausch langwelliger Strahlung

Tabelle 3.3: Parameter Architektur der modellierten Zone nach Planung

Grundfläche der Zone, m ²	73,8
Lichte Raumhöhe, m	3,32
U-Wert Außenwand, $\frac{W}{m^2 K}$	0,28
Fläche Außenwand, m ²	38,9
U-Wert Fenster, $\frac{W}{m^2 K}$	1,07
G-Wert Fenster	62 %
Gesamtenergiedurchlass- grad Fenster inkl. Sonnenschutz	20 %
Fensterflächenanteil Fassade	42 %
Infiltrationsrate, $\frac{1}{h}$	0,16
Betriebszeiten nach DIN V 18599 (wochentags)	7 – 18 Uhr

innerhalb der Zone wird vereinfacht flächengewichtet und unter Annahme identischer Emissionsgrade aller Flächen berechnet [59, S. 171 ff.]. Die Modellierung der Wärmebilanz in der Zone erfolgt als Zwei-Kapazitäten-Modell und erfüllt damit die Bedingungen nach VDI 6007, die eine separate Berücksichtigung von Strahlung und Konvektion verlangt. Die spezifische Wärmeübertragungsleistung auf Grundlage von Strahlung \dot{q}_{str} zwischen einer Bauteiloberfläche und der Zone wird berechnet nach

$$\dot{q}_{\text{str}} = \sigma \epsilon (T_{\text{surf}}^4 - T_{\text{str}}^4) \quad (3.5)$$

mit

T_{surf} mittlere Strahlungstemperatur der Bauteiloberfläche,

T_{str} mittlere flächengewichtete Strahlungstemperatur der Zone,

σ Stephan-Boltzmann Konstante, $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K}$ sowie

ϵ Emissionsgrad der Oberfläche (standardmäßig ist $\epsilon = 0,9$ für alle Oberflächen).

Der konvektive Wärmeübergang \dot{q}_{konv} zwischen einer Bauteiloberfläche mit der Temperatur T_{surf} und der Raumluft mit der mittleren Raumlufttemperatur T_{luft} wird im Simulationsmodell nach

$$\dot{q}_{\text{konv}} = \alpha_{\text{konv}} (T_{\text{surf}} - T_{\text{luft}}) \quad (3.6)$$

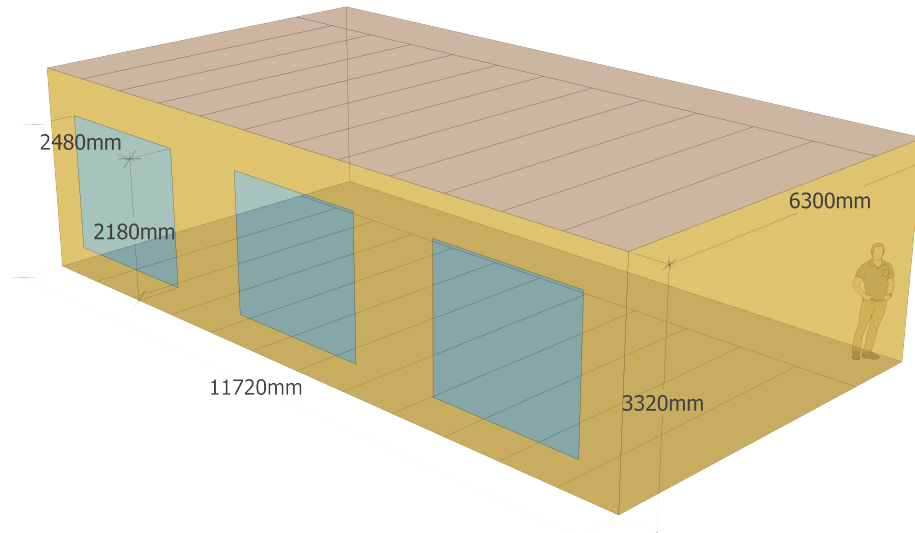


Abbildung 3.4: Perspektivische, bemaßte Ansicht der modellierten Bürozone aus Sketchup/TRNSYS-3D mit Außenwand in Südwest-Ausrichtung. An Decke und Boden sind die modellierten BKT-Segmente dargestellt.

berechnet. Die variablen konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten werden in TRNSYS Type56, in Abhängigkeit von Temperaturdifferenz und Richtung des Wärmestroms, nach folgenden empirisch ermittelten Gleichungen bestimmt:

$$\alpha_{\text{konv}} = \begin{cases} 2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^2} |T_{\text{surf}} - T_{\text{luft}}|^{0,31} \text{K} & \text{Wärmestrom nach unten,} \\ 1,08 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^2} |T_{\text{surf}} - T_{\text{luft}}|^{0,31} \text{K} & \text{Wärmestrom nach oben,} \\ 1,60 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^2} |T_{\text{surf}} - T_{\text{luft}}|^{0,30} \text{K} & \text{Wärmestrom horizontal.} \end{cases}$$

Die numerische Lösung der (eindimensionalen) Wärmeleitung in den Wänden des Simulationsmodells erfolgt in TRNBuild auf Basis der Gewichtsfaktorenmethode [62, S. 23 ff.]. Als sogenannte „Timebase“, das heißt als Zeitschrittweite der Gewichtsfunktion, wurde in den Untersuchungen in Abhängigkeit von der maximalen Bauteilschwere ein Wert von 0,25 h angesetzt.

INTERNE LASTEN UND WÄRMELAST DURCH SONNENEINSTRALUNG Interne thermische Lasten treten in der Bürozone durch

1. elektrische Geräte,
2. Personen sowie
3. künstliche Beleuchtung

auf. Für die Modellierung der Lasten aus 1. und 2. wurden die spezifischen Tagessummen der Wärmezufuhr aus DIN V 18599-10 [33, S. 26] für die Nut-

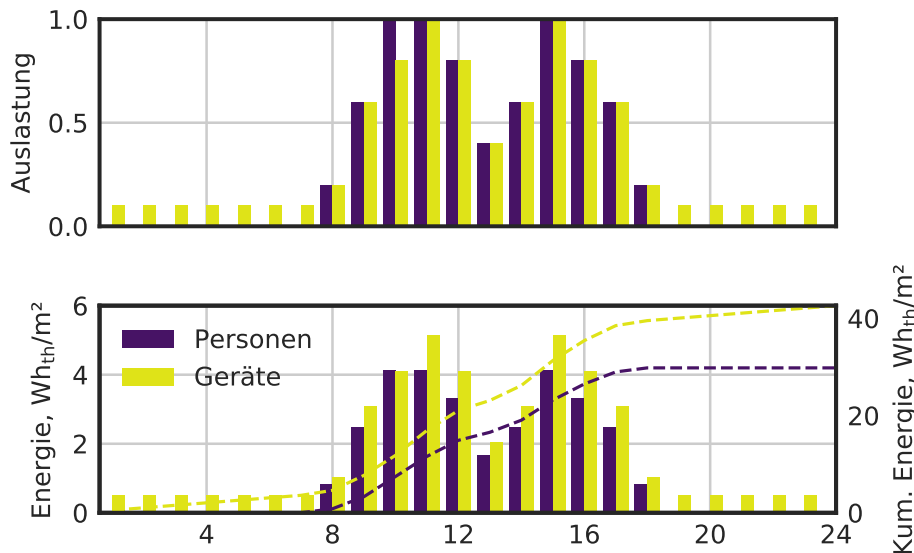


Abbildung 3.5: Oben: Stündliche Auslastungsfaktoren für Personen und Geräte nach [63] für Werktage.

Unten: Sich ergebende stündliche Energiemengen (Balken, linke y-Achse) sowie kumulierte thermische Tagesenergiemengen (gestr. Linien, rechte y-Achse) mit Werten aus [33].

zungsart „Einzelbüro“ verwendet. Da hier jedoch keine stündliche Auslastung sondern lediglich Tagessummen vorgegeben sind, wird auf die Schweizerische SIA 2024 zurückgegriffen. Um den zeitlichen Verlauf der Lasten von Personen und Geräten darstellen zu können, wurden die Tagessummen mit den stündlichen Auslastungsfaktoren nach SIA 2024 [63, S. 36] für Einzel-/Gruppenbüros verrechnet. Auslastungsfaktoren, tägliche Energiesummen und sich ergebende stündliche Profile sind in Abbildung 3.5 dargestellt.

Die elektrische Auslegungsleistung der Beleuchtung wurde für die Nutzungsart „Einzelbüro“ nach DIN V 18599-10 [33, S. 35] ermittelt. Auf Grundlage der Tageslichtsimulation in TRNBuild wird die Beleuchtungsleistung als stufenlos regelnd zwischen 0 und 100 % modelliert. Nach den Vorgaben aus [33] wird ein Wertungswert der Beleuchtungsstärke von 500 lx angesetzt. Es resultiert eine Auslegungsleistung der Beleuchtung von $p_{\text{bel,des}} = 14,25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Die Aufteilung der Wärmelast in einen Strahlungs- sowie Konvektionsanteil wurde mit den Werten aus Tabelle 3.4 vorgenommen.

Der außenliegende Sonnenschutz ist mit einem Gesamtdurchlassgrad des Fensters von 20 % bei geschlossenem Sonnenschutz angenommen. Der außenliegende Sonnenschutz schließt bei einer am Fenster anliegenden Strahlungsleistung von $180 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ und öffnet wieder, wenn die Strahlungsleistung $160 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ unterschreitet.

Tabelle 3.4: Angesezte Lastaufteilung der internen Wärmequellen nach [37, 63–65]

	Geräte	Personen	Beleuchtung
Strahlungsanteil	20 %	50 %	70 %
Konvektionsanteil	80 %	50 %	30 %

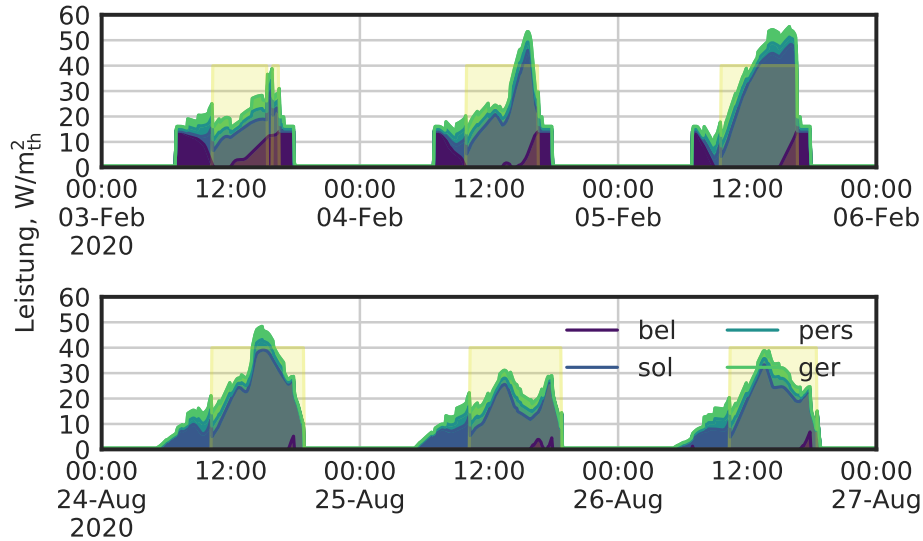


Abbildung 3.6: Beispielhafter Verlauf der thermischen Lasten durch Beleuchtung, Geräte, Personen sowie Sonneneinstrahlung für drei Tage im Februar (oben) sowie im August (unten). Gelb hinterlegte Flächen stellen Zeiten mit aktiviertem äußerem Sonnenschutz dar.

tet.

Ein beispielhafter Verlauf der spezifischen thermischen Lasten in der Zone ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Es wird deutlich, dass durch den effektiven Sonnenschutz die internen Lasten auch im Sommerfall mit Spitzen von knapp $60 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ relativ gering gehalten werden können. Die geringeren solaren Einstrahlungen im Winter werden durch erhöhte benötigte Beleuchtungsleistungen nahezu kompensiert. Auch die idealisierte, als stufenlos definierte Regelung der Beleuchtung im Simulationsmodell ist gut erkennbar.

WETTERDATEN UND REFERENZAUSSENTEMPERATUR Da im weiteren Verlauf Untersuchungen zum Netzeinfluss auf Grundlage der Stromnetzdaten für das Jahr 2020 durchgeführt werden, mussten auch Wetterdaten für dieses spezifische Jahr, mit einem Standort aus dem untersuchten Netzgebiet, verwendet werden. Durch Vergleich der Wetterdaten aus 2020 mit dem Testreferenzjahr-Datensatz

für den selben Standort können die Daten validiert und eingeordnet werden. Die für die thermische Simulation wichtigen Größen ‚Außentemperatur‘ und ‚Globalstrahlung‘ wurden dazu untersucht. Die Testreferenzjahr-Datensätze repräsentieren den Witterungsverlauf eines typischen Jahres, auf Grundlage der Jahre 1995 bis 2012, in stündlicher Auflösung. Sie liegen für Deutschland in einer räumlichen Auflösung von 1 km^2 vor [66]. Für die Untersuchungen zum spezifischen Jahr 2020 wurden DWD-Messdaten des Standorts Mannheim [67, Station 05206] verwendet. Es wurden die physikalischen Größen

- Außentemperatur (in 2 m Höhe) sowie die
- diffuse und direkte Strahlung (jeweils auf eine horizontale Fläche)

in stündlicher Auflösung genutzt. Die Daten wurden als Textdatei über Type 15 [57, S. 89 ff.] in die Simulation eingebunden.

Die Analyse des Wetterdatensatzes aus dem Jahr 2020 wie auch die des Testreferenzjahr-Datensatzes (*Test Reference Year*, TRY) [66] für den Standort Mannheim zeigt, dass die mittlere Jahresaußentemperatur mit $12,5^\circ\text{C}$ im Vergleich zu $11,2^\circ\text{C}$ leicht höher liegt (vgl. Abbildung 3.7). Der Vergleich der Globalstrahlung auf die Horizontale in Abbildung 3.8 macht deutlich, dass die Einstrahlung in 2020 mit $1253 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ a}}$ um circa 9 % erhöht ist. Für energetische Untersuchungen müsste eine Witterungsbereinigung durchgeführt werden. Da jedoch zum einen die Abweichungen moderat ausfallen und zum anderen insbesondere das dynamische Verhalten im Zusammenhang mit den Netzdaten aus 2020 untersucht werden soll, wird auf diesen Schritt verzichtet.

Als Referenzaußentemperatur für die Umschaltung von Heiz- und Kühlbetrieb der „flinken“ Systeme RLT-Anlage sowie Radiatoren wird der gleitende Mittelwert der vergangenen 24 Stunden $\bar{\vartheta}_{\text{aul},24\text{h}}$ verwendet. Dies entspricht dem Stand der Technik und den Empfehlungen aus [15, S. 47 ff.]. Als Umschaltpunkt zwischen Heiz- und Kühlbetrieb wird dabei die Kühlgrenztemperatur aus dem UBB-Verfahren verwendet. Als Anpassungsmaßnahme an das träge dynamische Verhalten der BKT wird als Referenzaußentemperatur für die Steuerung der BKT $\vartheta_{\text{aul},\text{bkt}}$ der gleitende (prognostizierte) Mittelwert der Außentemperatur über einen Zeitraum von 24 Stunden $\bar{\vartheta}_{\text{aul},24\text{h},\text{prog}}$ verwendet. Es werden somit in jedem Zeitschritt 12 Stunden Prognosewerte und die 12 vorhergehenden Stundenwerte der Außentemperatur verwendet. Die stündliche Prognose der Außentemperatur ist über den genannten Prognosehorizont in guter Qualität zum Beispiel unter [68] frei verfügbar. Da in der Simulation historische Werte aus

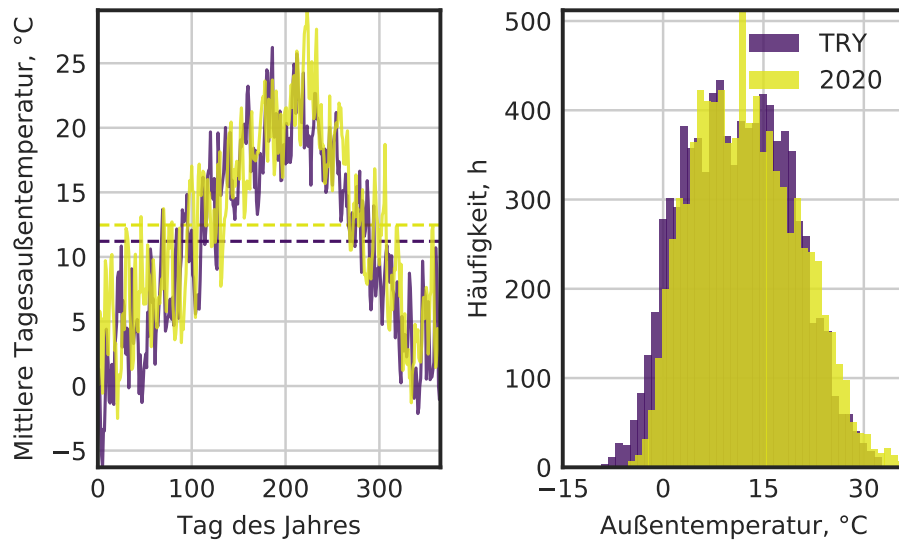


Abbildung 3.7: Testreferenzjahr und spezifisches Jahr 2020 für Standort Mannheim im Vergleich. Verlauf der Tagesaußentemperaturen und jährliche Mittelwerte (links) und Häufigkeitsverteilung der stündlichen Temperaturen (rechts).

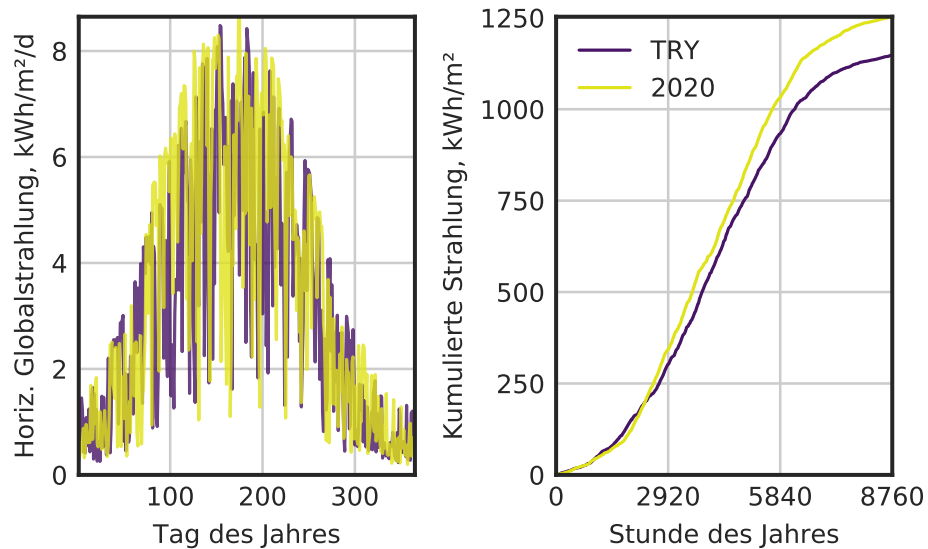


Abbildung 3.8: Testreferenzjahr und spezifisches Jahr 2020 für Standort Mannheim im Vergleich. Verlauf der täglichen Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche (links) und kumulierte Strahlungsenergie auf horizontale Fläche (rechts).

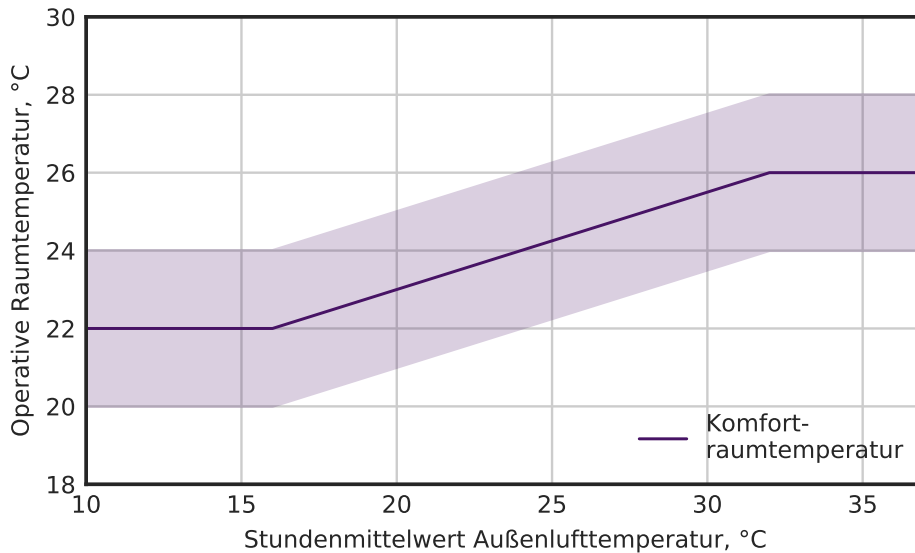


Abbildung 3.9: Adaptive Komfortraumtemperatur nach DIN EN 16798 1/NA als Funktion der stündlichen Außenlufttemperatur, farblich hinterlegt der Toleranzbereich für Kategorie II von ± 2 K.

dem Jahr 2020 verwendet werden, entspricht dies einer idealen Prognosegüte von 100 %.

THERMISCHER RAUMKOMFORT Als maßgebliche Größe für den thermischen Raumkomfort bei Verwendung der unterschiedlichen Betriebsstrategien wird die operative Raumtemperatur der modellierten Zone in jedem Zeitschritt während der Nutzungszeit analysiert. Weitere Parameter für den Raumkomfort, die in DIN EN 16798-1 [69] beziehungsweise ISO 7730 [70] festgelegt sind, wie Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Turbulenzgrad sowie Luftqualität, werden nicht betrachtet und sind nicht Teil des Simulationsmodells. Für die Ermittlung der empfohlenen Raumtemperatur für jede Stunde der Simulation wird das adaptive Modell des nationalen Anhangs, DIN EN 16798-1 [71, S. 11] genutzt². In diesem ist die empfohlene operative Komfortraumtemperatur $\vartheta_{r,\text{komf}}$ als Funktion der gleitenden Außentemperatur ϑ_{aul} mit der linearen Gleichung

$$\vartheta_{r,\text{komf}} = 18 \text{ °C} + 0,25 \vartheta_{\text{aul}} \quad (3.7)$$

und den Ober- und Untergrenzen für $\vartheta_{r,\text{komf}}$ von 26 °C sowie 22 °C beschrieben (vgl. Abbildung 3.9). Als Toleranzbereich zur Einhaltung von Kategorie II nach DIN 16798-1/NA ist eine Abweichung von $\vartheta_{r,c}$ von ± 2 K festgelegt. Klasse II wird

² DIN EN 16798-1 ersetzt die zurückgezogene DIN EN 15251 seit April 2021. Der nationale Anhang liegt aktuell lediglich als Entwurf vor, er entspricht in den behandelten Punkten dem früheren nationalen Anhang der DIN EN 15251 [72].

im nationalen Anhang als Komfortklasse für Neubau und sanierte Bestandsgebäude mit und ohne maschinelle Lüftung empfohlen. Die Komfortklasse gilt als eingehalten, wenn eine Abweichung vom Toleranzbereich von 2 K in weniger als 1 % der Nutzungszeit auftritt [71, S. 12]. Für die untersuchte Bürozone mit einer angenommenen Nutzungszeit von 11 h an fünf Nutzungstagen pro Woche ergibt sich damit eine maximale Abweichung von

$$11 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 5 \cdot 52 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot 2 \text{ K}/100 = 57 \frac{\text{K h}}{\text{a}}.$$

Die Abweichungen über- und unterhalb des Toleranzbereiches sind dabei getrennt auszuweisen.

RAUMLUFTTECHNISCHE ANLAGE UND ZUSATZHEIZUNG Die RLT-Anlage wurde mit ihren Komponenten Wärmerückgewinnungseinheit (WRG, Type 667 [73, S. 61 ff]), Zu- und Abluftventilator (Type 662 [74, S. 45 ff.]) sowie Nacherhitzer (NE) in TRNSYS abgebildet. Zur Wahrung der Behaglichkeit soll eine Zulufttemperatur in der Nutzungszeit 19 °C nicht unterschritten werden. Außerhalb der Nutzungszeit des Büros ist der Sollwert der Zulufttemperatur zudem um 5 K reduziert. Im Kühlfall entfällt die untere Begrenzung der Zulufttemperatur in den Nachtstunden. Der Wechsel zwischen Heiz- und Kühlfall erfolgt bei der ermittelten Kühlgrenztemperatur nach UBB-Verfahren. Die WRG-Einheit ist dauerhaft in Betrieb und kann nicht separat deaktiviert werden. In der Praxis entspricht dies einer gängigen Umsetzung als Plattenwärmeübertrager ohne Bypass. Der Temperaturänderungsgrad der WRG wird als konstant mit einem Wert von

$$\eta_{t, \text{wrg}} = 73 \%,$$

angenommen, was dem Standardwert nach [75, Tab. 9] entspricht.

Der Nacherhitzer für den Heizfall nach der WRG ist vereinfacht, das heißt ohne Berücksichtigung des Hilfsenergieaufwands für Pumpen oder Wärmeverlusten der Leitungen über die Bilanzgleichung

$$\dot{Q}_{\text{ne}} = \dot{m}_{\text{zul}} \cdot c_{p,1} \cdot (\vartheta_{\text{zul,soll}} - \vartheta_{\text{wrg,out}})$$

dargestellt. Eine anfallende Temperaturerhöhung des Luftstroms durch die Zu- und Abluftventilatoren wurde vernachlässigt. Die elektrische Auslegungsleistung von Zu- und Abluftventilator wurde über die Annahme einer spezifischen Ventilatorleistung (*SFP*, *Specific Fan Power*) von

$$SFP = 1250 \text{ W}/(\text{m}^3 \text{ s}) \quad (\text{entspricht SFP-Klasse 3 nach [76]})$$

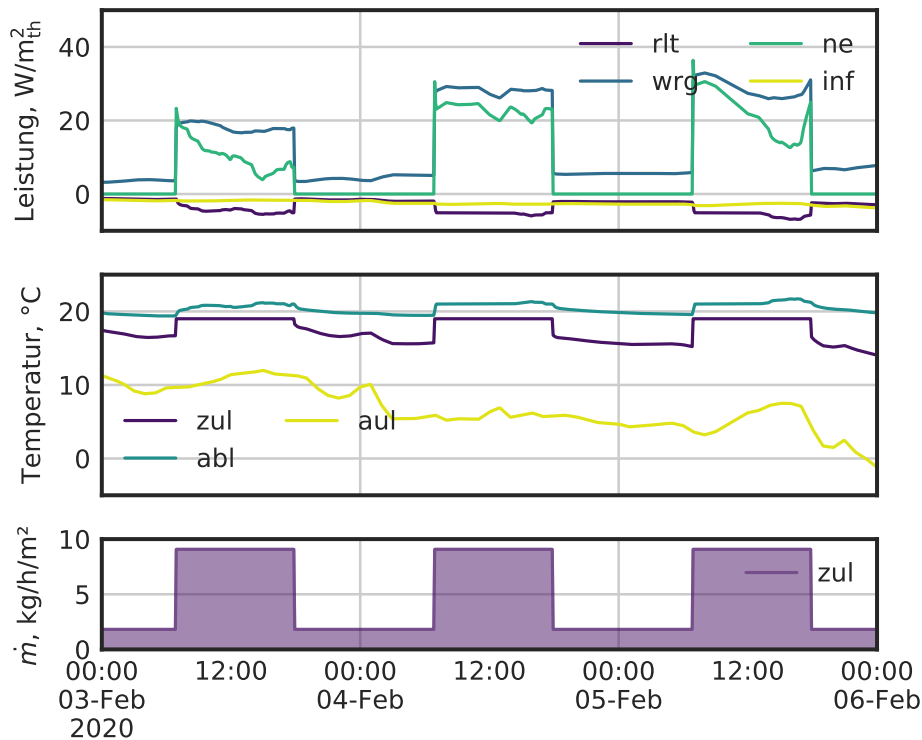


Abbildung 3.10: RLT-Kenngrößen-Verläufe an drei beispielhaften Februartagen (Heizfall). Oben: Simulierter Verlauf der thermischen Leistungen durch die Luftversorgung des Wärmerückgewinners, durch Infiltration sowie benötigte Nacherhitzerleistung (bez. auf Zonengrundfläche). Mitte: Verlauf der Lufttemperaturen. Unten: Zuluftmassenstrom bezogen auf Zonengrundfläche.

bei einem Auslegungsvolumenstrom von

$$\dot{V}_{zul/abl,des} = 2,1 \frac{1}{m^2 s} \quad (\text{entspricht Kategorie I nach [71, Tab. NA.8]})$$

modelliert. Außerhalb der Belegungszeit wird der Volumenstrom auf 20 % des Auslegungswertes reduziert. Die entsprechend verringerte Leistungsaufnahme der Ventilatoren berechnet sich nach den Proportionalitätsgesetzen [77, S. 845], unter Annahme von konstantem hydraulischem sowie elektrischem Wirkungsgrad, mit

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \right)^3. \quad (3.8)$$

Am Wochenende werden die Ventilatoren vollständig deaktiviert.

Ein beispielhafter Verlauf der wichtigsten RLT-Größen für drei Februarwerk-tage ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Leistungsstufen nach Zeitplan der

Ventilatoren und die sich daraus sowie in Abhängigkeit von der Außentemperatur ergebenden thermischen Leistungsprofile sind dort gut zu erkennen. Es wird darüber hinaus deutlich, dass ein Großteil der Heizarbeit über die Wärmerückgewinnung erbracht wird und die durch die Luftzufuhr in den Raum zu erbringende Heizlast (Index „rlt“) gering ausfällt. Die Zuluft wird in der Nutzungszeit durch die idealisierte Modellierung des Nacherhitzers konstant auf dem Sollwert von $\vartheta_{zul} = 19\text{ °C}$ gehalten.

Die Zusatzheizung über installierte Heizkörper wurde nach den Planungsunterlagen mit einer Leistung von $\dot{q}_{hk} = 20\text{ W/m}^2$ ausgelegt und als ideale Heizung, das heißt ohne Berücksichtigung von Trägheitseffekten und mit idealer Regelung, modelliert. Der Strahlungsanteil der Wärmeleistung der idealen Heizung wurde mit einem Wert von 40 % angesetzt. Um eine Heizaktion bei gleichzeitiger Kühlung durch die BKT zu vermeiden, sind die Radiatoren erst bei Erfüllung der Bedingung

$$\vartheta_{aul,bkt} < \vartheta_{aul,grenz,h}$$

freigegeben. Es sind dabei

$\vartheta_{aul,bkt}$ für den Betrieb der BKT maßgebliche zeitabhängige Außentemperaturgröße (vgl. Abschnitt 3.2) und

$\vartheta_{aul,grenz,h}$ Heizgrenze nach UBB-Verfahren, das heißt diejenige Außentemperatur, über der nur noch eine Kühlaktion möglich ist.

3.1.3 Modellierung Bauteilaktivierung

Decke und Boden der Untersuchungszone wurden mit einem Schichtaufbau nach Tabelle 3.5 modelliert. Der Bauteilaufbau entspricht, abgesehen von der vernachlässigten Tragkonstruktion unter dem Estrich, der Ausführung im Beispielgebäude. In der Planung ist für jedes der drei Einzelbüros ein BKT-Kreis mit einer aktiven Fläche von circa 20 m^2 nach Abbildung 3.11 geplant. Die Kreise sind hydraulisch jeweils an den gemeinsamen Etagenverteiler angebunden. Mit den gewählten Parametern für Rohrlänge, Massenstrom je Kreis sowie dem Rohrinne Durchmesser ist die hydraulische Auslegung insgesamt im Vergleich zu den von WYSTRCIL ausgewerteten Anlagen als günstig zu bewerten [50, S. 41 ff.]. Die BKT wurde in TRNBuild als „Active Layer“ mit den Werten der Parameter Verlegeabstand, Rohrdurchmesser und Rohrwandstärke nach Tabelle 3.5 modelliert. Die hydraulischen Parameter sind in Tabelle 3.6 aufgeführt.

Tabelle 3.5: Schichtaufbau und Parameter der Zwischendecke (Fußboden und Decke), von oben nach unten

1. BODENBELAG		5. ROHREBENE	
Widerstand, $\frac{\text{m}^2\text{Kh}}{\text{kJ}}$	0,028	Verlegeabstand, m	0,15
2. ZEMENTESTRICH		Außendurchmesser Rohr, m	
Dicke, m	0,05	Dicke Rohrwand, m	0,002
Dichte, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	2000	Leitfähigkeit Rohr, $\frac{\text{kJ}}{\text{hmK}}$	1,26
Leitfähigkeit, $\frac{\text{kJ}}{\text{hmK}}$	5,04	6. STAHLBETON 1 %	
Wärmekap., $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	1	Dicke, m	0,125
3. LUFTSCHICHT		Dichte, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	2400
Widerstand, $\frac{\text{m}^2\text{Kh}}{\text{kJ}}$	0,047	Leitfähigkeit, $\frac{\text{kJ}}{\text{hmK}}$	5,83
4. STAHLBETON 1 %		Wärmekap., $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	1
Dicke, m	0,125	7. AKUSTIKPANEELE, 50 %-BELEGUNG	
Dichte, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	2400	Widerstand, $\frac{\text{m}^2\text{Kh}}{\text{kJ}}$	0,017
Leitfähigkeit, $\frac{\text{kJ}}{\text{hmK}}$	5,83		
Wärmekap., $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	1		

Bei der BKT handelt es sich, aufgrund der hohen Speicherkapazitäten und Wärmeübergangswiderstände sowie der relativ geringen Leistungen wasserseitig, um ein träges Wärmeübergabesystem. Zur späteren Validierung wurde die Modellierung der BKT auf ihr Zeitverhalten hin untersucht. Dabei wurden, über eine sprunghafte Erhöhung der Vorlauftemperatur, die Zeitkonstanten von

$$\tau_{\text{bkt,kern}} \approx 13 \text{ h} \quad \text{Zeitkonstante der Kerntemperaturerhöhung der BKT-Decke bei Vorlauftemperatursprung}$$

$$\tau_{\text{bkt,zone}} \approx 44 \text{ h} \quad \text{Zeitkonstante der Zonentemperaturerhöhung (operativ) bei Vorlauftemperatursprung}$$

ermittelt. Die Hydraulik des Verteilkreises der BKT wurde im Modell nicht detailliert abgebildet, daher wird anhand der Angaben aus [50, S. 52 ff.] mit einem Wert für die spezifische Pumpenleistung (*SPP*, *Specific Pump Power*) von

$$SPP = 20 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$$

als Auslegungsleistung simuliert. Im Teillastbereich der Pumpe wird die elektrische Leistung $P_{\text{pump,bkt}}$ je Zeitschritt analog zu Gleichung 3.8 ermittelt. Im UBB-Verfahren wird der Raum im vereinfachten Raummodell zur Ermittlung der

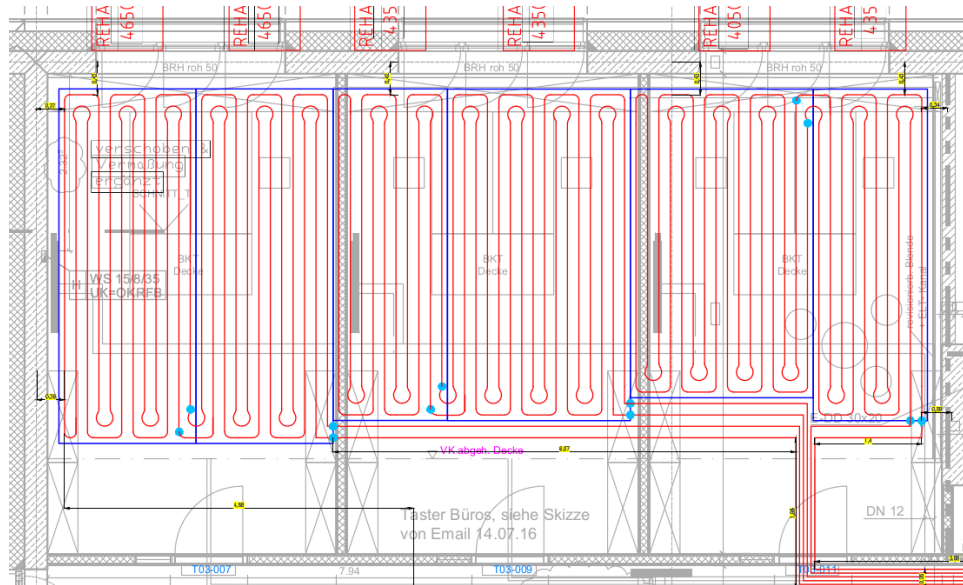


Abbildung 3.11: BKT-Verlegeplan für die Untersuchungszone als Ausschnitt aus der Ausführungsplanung [51].

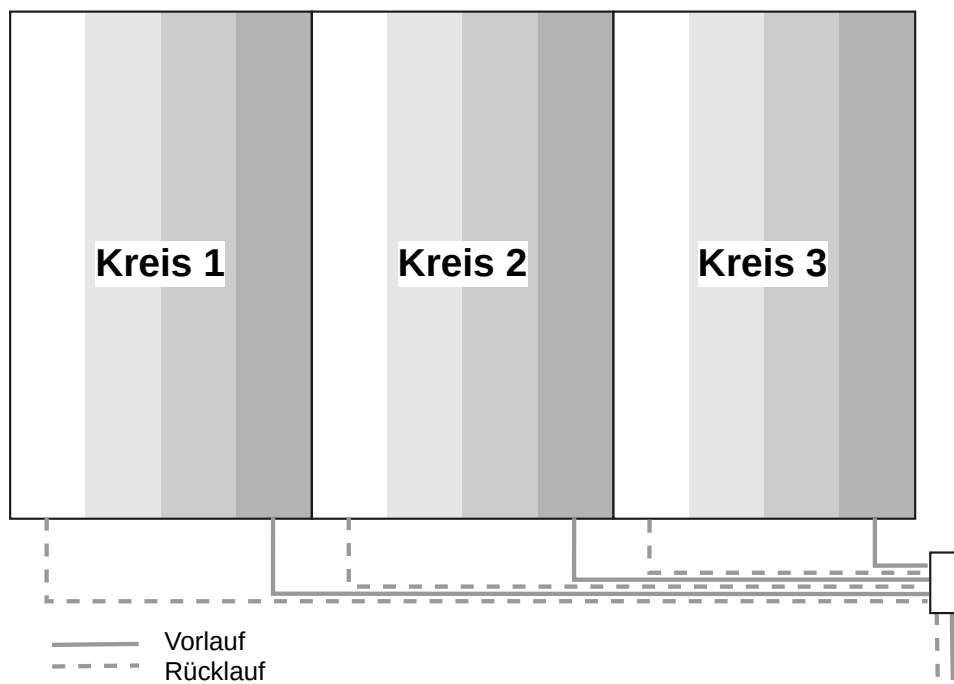


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung der Modellierung der drei hydraulischen BKT-Kreise in der Untersuchungszone, jeweils mit vier in Reihe geschalteten Segmenten und Anbindung über einen Verteilerkasten.

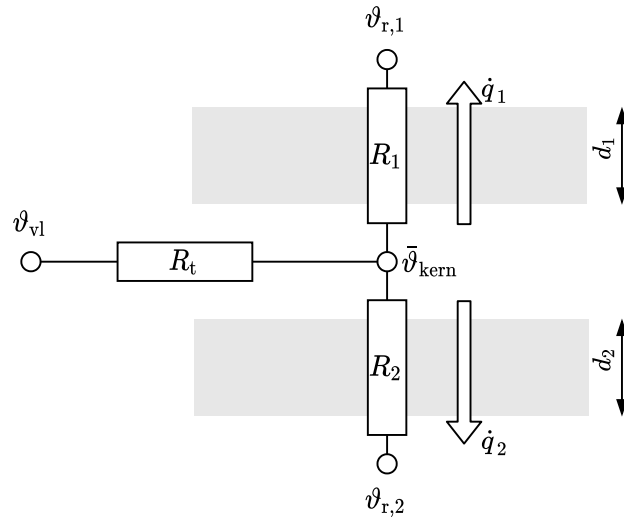


Abbildung 3.13: Eindimensionales Widerstandsnetzwerk des thermisch aktiven Bauteils nach [37] mit den sich ergebenden Wärmeströmen \dot{q}_1 und \dot{q}_2 .

Heiz- und Kühlkurven erfasst. Die Erfassung mit Hilfe des Programms TABS-Design [78] sieht auch eine Berücksichtigung der Trägheit durch die thermische Masse der Innenwände vor. Dazu wurde eine Ersatzinnenwand berechnet, mit volumengewichteten Stoffwerten der tatsächlichen Innenwände (Trockenbau sowie Kalksandstein gemauert). Nur die ersten maximal 10 cm der einzelnen Wände wurden dabei als „wirksame Dicke“ nach EN 13786 [60, S. 27] berücksichtigt. Die Fläche der Ersatzinnenwand wurde im Auslegungsprogramm zusätzlich mit dem Faktor 10 multipliziert. Somit wurde der in [49] identifizierte Implementierungsfehler, der immer noch besteht, kompensiert. Die Kapazität der Außenwand bleibt unberücksichtigt, wie im UBB-Verfahren vorgesehen.

Das Prinzip des „Active Layer“ in TRNSYS zur Modellierung des TAB stellt die Implementierung des in [37] beschriebenen Modellierungsverfahrens dar. In dem Verfahren wird die dreidimensionale, instationäre Wärmeleitung im Bauteil unter geringfügigen Einschränkungen eindimensional approximiert. Von der mittleren Kerntemperatur in der Rohrebene $\bar{\vartheta}_{\text{kern}}$ ausgehend wird der Wärmeübergang in zwei übereinander angeordnete Zonen 1 und 2 (mit den Raumtemperaturen $\vartheta_{r,1}$ und $\vartheta_{r,2}$) durch die Widerstände R_1 und R_2 charakterisiert (vgl. Abbildung 3.13). Es gilt im stationären Fall

$$\dot{q}_i = \frac{1}{R_i} (\bar{\vartheta}_{\text{kern}} - \vartheta_{r,i}) \quad \text{mit } i = 1, 2 \quad (3.9)$$

für den eindimensionalen Wärmestrom in die jeweiligen Zonen. R_1 und R_2 fassen die Widerstände für die Wärmeübertragung durch Konduktion, Konvektion

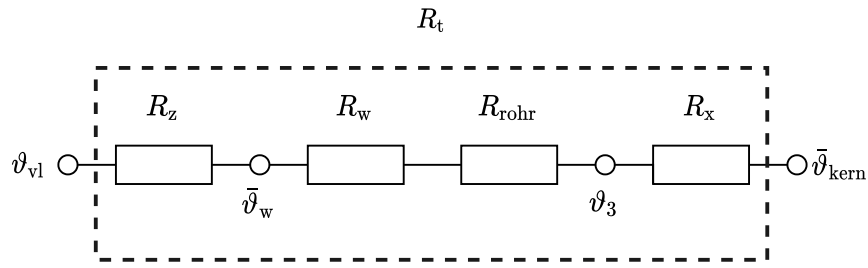


Abbildung 3.14: Thermische Einzelwiderstände zwischen Vorlauf-temperatur ϑ_{vl} und mittlerer Kerntemperatur $\bar{\vartheta}_{\text{kern}}$ und fiktiver Gesamtwiderstand R_t nach [37, S. 24].

sowie Strahlung je nach Aufbau der Decke zusammen. Die Einschränkungen, die für die Anwendung des Verfahrens nach [37, S. 25] gelten, lauten wie folgt:

$$\frac{d_i}{d_x} > 0,3 \quad i = 1, 2 \quad (3.10)$$

$$\frac{\delta}{d_x} < 0,2 \quad (3.11)$$

mit

d_x Verlegeabstand,

d_i Dicke der thermisch aktiven Bauteilschicht von Rohrebene in Zonenrichtung und

δ Rohraußendurchmesser.

Der Aufbau des thermisch aktiven Bauteils in der Rohrebene mit Rohrdimension, Massenstrom sowie Verlegeabstand wird im äquivalenten thermischen Widerstand R_t nach Abbildung 3.14 zusammengefasst. Dieser setzt sich aus folgenden Einzelwiderständen zusammen:

R_z Widerstand zur Berücksichtigung des Temperaturgefälles des Fluids in Flussrichtung (vgl. Abbildung 3.15).

R_w Durch Konvektion hervorgerufener Widerstand beim Wärmeübergang Fluid/Rohrinnenoberfläche bei turbulenter Strömung.

R_{rohr} Thermischer Widerstand des Wärmedurchgangs durch den Rohrmantel.

R_x Thermischer Widerstand zwischen Rohraußentemperatur ϑ_3 und Kerntemperatur $\bar{\vartheta}_{\text{kern}}$ zur Berücksichtigung des Temperaturprofils in der Rohrebene.

Die Widerstände lassen sich nach Koschencz und Lehmann [37] mit

$$R_z = \frac{1}{2 \dot{m}_{\text{sp}} c_{p,w}} \quad (3.12a)$$

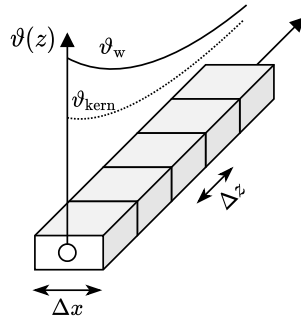


Abbildung 3.15: Temperaturverläufe und Diskretisierung in z-Richtung nach [37].

$$R_w = \frac{d_x^{0,13}}{8 \pi} \left(\frac{\delta - 2 d_{\text{rohr}}}{\dot{m}_{\text{sp}} l} \right)^{0,87} \quad (3.12b)$$

$$R_{\text{rohr}} = \frac{d_x \ln\left(\frac{\delta}{\delta - 2 d_{\text{rohr}}}\right)}{2 \lambda_{\text{rohr}} \pi} \quad (3.12c)$$

$$R_x \approx \frac{d_x \ln\left(\frac{d_x}{\pi \delta}\right)}{2 \pi \lambda_b} \quad (3.12d)$$

berechnen. Dabei sind

\dot{m}_{sp} spezifischer Massenstrom je Registerfläche.

l Rohrlänge des hydraulischen Kreises,

λ_{rohr} Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand sowie

λ_b Wärmeleitfähigkeit des Bauteils.

Die Anwendbarkeit des Verfahrens für dynamische Untersuchungen fußt nach [37, S. 26] auf der Randbedingung

$$\dot{m}_{\text{sp}} \cdot c_{p,w} \cdot (R_w + R_{\text{rohr}} + R_x) \geq \frac{1}{2}. \quad (3.13)$$

Ursächlich hierfür ist die Linearisierung, die für den logarithmischen Temperaturverlauf in z-Richtung im Berechnungsverfahren vorgenommen wird. Bei zu geringem Massenstrom kann diese Bedingung nicht eingehalten werden. Abhilfe schafft hier eine Aufteilung eines hydraulischen Kreises in n Untersegmente. Diese wurde im Simulationsmodell nach Abbildung 3.11 vorgenommen. Durch die Reihenschaltung der Segmente erhöht sich die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens und ermöglicht eine Reduzierung des Massenstroms im Teillastbereich im Simulationsmodell. Durch die Aufteilung der Kreise in $n = 4$

Tabelle 3.6: Modellierungsparameter für einen der insgesamt drei identischen BKT-Kreise

Registerfläche, m ²	20
Belegungsgrad	81,3 %
Rohrlänge, m	133
Massenstrom, $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$	250
Verlegeart	Einfachmäander
Spezifische Pumpenleistung BKT-Heizkreis, $\frac{\text{Wh}}{\text{m}^3}$	20

Untersegmente ergibt sich bei dem Aufbau des Bauteils mit Parametern nach Tabelle 3.5 ein Wert für den linken Term der Grenzbedingung von

$$\begin{aligned}
 & n \cdot \dot{m}_{\text{sp}} \cdot c_{p,w} \cdot (R_w + R_{\text{rohr}} + R_x) = \\
 & = 4 \cdot 12,5 \frac{\text{kg}}{\text{h m}^2} \cdot 1,167 \frac{\text{Wh}}{\text{kg K}} (0,003 + 0,019 + 0,016) \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \approx \\
 & \approx 2,2.
 \end{aligned}$$

Die Forderung aus Gleichung 3.13 ist demnach mit

$$2,2 \geq \frac{1}{2}$$

gut eingehalten. Die Modellierung nach dem UBB-Verfahren wurde zeitabhängig im Vergleich mit Berechnungen nach der Finite-Elemente-Methode sowie bei messtechnischen Untersuchungen in [37, S. 27ff.] erfolgreich validiert. Die Implementierung in TRNSYS über Type56 [59, S. 59 ff.] wurde einer Validierung nach dem in IEA Task 22 entwickelten Verfahren „Radtest“ [79], unter anderem in [80], unterzogen.

3.2 BKT-REGELUNG NACH UBB-VERFAHREN

AUSSENTEMPERATURGEFÜHRTE VORLAUFTEMPERATURREGELUNG Die in Tödli u. a. [15] beschriebene „außentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung“ wird als Basisbetriebsstrategie verwendet. Gemäß der grafischen Darstellung in Abbildung 3.16 herrscht ‚Heizbetrieb (H)‘, wenn

$$\vartheta_{\text{aul,bkt}} \leq \vartheta_{\text{aul,grenz,k}}$$

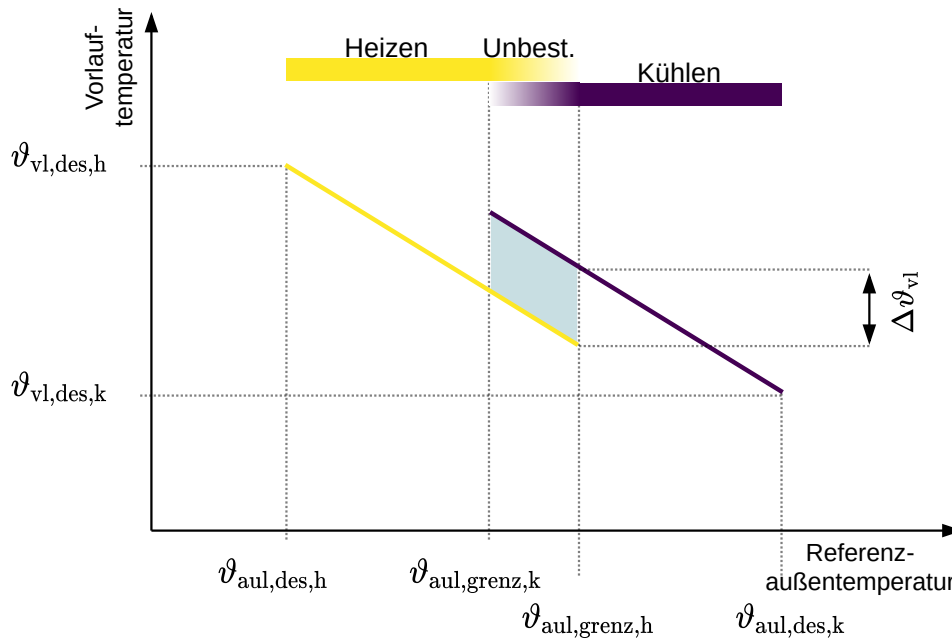


Abbildung 3.16: Schematische Heiz- und Kühlkurven für die außentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung nach UBB-Verfahren mit maßgeblichen Temperaturpaaren [15] und Betriebsartbereichen nach Referenz-Außentemperatur.

gilt. Die Vorlauftemperatur wird durch den 3-Wege-Mischer der Beimischschaltung auf dem Sollwert der Vorlauftemperatur $\vartheta_{vl,h}$ nach Heizkurve (Abbildung 3.16) gehalten.

Weiterhin herrscht ‚Kühlbetrieb (K)‘, wenn

$$\vartheta_{aul,bkt} \geq \vartheta_{aul,grenz,h}$$

gilt. Die Vorlauftemperatur $\vartheta_{vl,k}$ wird durch Beimischung von Kaltwasser aus dem Kältespeicher auf dem Sollwert nach Kühlkurve gehalten. Die Solltemperaturen im Heiz- und Kühlbetrieb berechnen sich nach Gleichung 2.7 in Abhängigkeit der Referenzaußentemperatur.

Darüber hinaus ist ein ‚unbestimmter Betrieb (U)‘ mit der Bedingung

$$\vartheta_{aul,grenz,k} > \vartheta_{aul,bkt} > \vartheta_{aul,grenz,h}$$

definiert. Nach dem UBB-Verfahren kann in diesem Außentemperaturbereich sowohl eine Heiz- als auch eine Kühlaktion nötig werden, je nach Abhängigkeit von den internen Lasten. Die Vorlauftemperatur soll im unbestimmten Betrieb im Vorlauftemperatursollwertband zwischen Heiz- und Kühlkurve (eingefärbte Fläche in Abb. 3.16) „gleiten“. So lange die Rücklauftemperatur innerhalb

des Sollwertbands liegt, wird keine zusätzliche Wärme zu- oder abgeführt, der Übergabekreis befindet sich im „Leerlauf“. Es gilt

$$\vartheta_{vl} = \vartheta_{rl}.$$

Sinkt oder steigt die Rücklaufemperatur auf Werte außerhalb des Solltemperaturbandes, ist eine Heiz- oder Kühllaktion nötig. Die Vorlaufemperatur wird dann durch Zu- oder Abführen von Wärmeenergie $\dot{Q}_{sp,bui}$ im Sollwertband gehalten.

Die folgenden Lastfälle können im Heiz-, Kühl- sowie im unbestimmten Betrieb auftreten:

$$\dot{Q}_{sp,bui} = \begin{cases} \dot{m}_{bkt} c_{p,w} (\vartheta_{vl,h,soll} - \vartheta_{rl}) & \text{wenn } \vartheta_{rl} < \vartheta_{vl,h,soll} \quad (\text{Heizbetrieb}) \\ 0 & \text{wenn } \vartheta_{vl,h,soll} \leq \vartheta_{rl} \leq \vartheta_{vl,k,soll} \quad (\text{Leerlauf}) \\ \dot{m}_{bkt} c_{p,w} (\vartheta_{vl,k,soll} - \vartheta_{rl}) & \text{wenn } \vartheta_{rl} > \vartheta_{vl,k,soll} \quad (\text{Kühlbetrieb}) \end{cases} \quad (3.14)$$

Bei negativer Speicherleistung $\dot{Q}_{sp,bui}$ wird der Kältespeicher beladen. Weist $\dot{Q}_{sp,bui}$ einen positiven Wert auf, wird der Wärmespeicher gebäudeseitig entladen. Im Modus ‚Kühlbetrieb‘ ist keine Abgabe von Heizleistung möglich da keine Wärmeenergie im Speicher vorgehalten wird, im Modus ‚Heizbetrieb‘ ist wiederum keine Kühllleistungsaufnahme wasserseitig möglich.

In Erweiterung zum Basisbetrieb nach UBB-Verfahren wird im ‚unbestimmten Betrieb (U)‘ der BKT-Massenstrom auf

$$\dot{m}_{bkt,LL} = 0,5 \cdot \dot{m}_{bkt,des}$$

reduziert, solange sich die Rücklaufemperatur im Sollwertband befindet und $\dot{Q}_{sp,bui} = 0$ ist. Dadurch lässt sich der Hilfsenergiebedarf im Leerlauf nach Gleichung 3.8 nach

$$P_{pump,bkt,LL} \approx \left(\frac{0,5}{1}\right)^3 \cdot P_{pump,bkt,des} \approx 0,125 \cdot P_{pump,bkt,des}$$

deutlich reduzieren. Trotzdem wird die Information über die Raumtemperatur, die die Rücklaufemperatur indirekt enthält, nach wie vor (mit einer verdoppelten Totzeit von dann circa 16 min) übertragen.

EINGANGSDATEN FÜR INTERNE LASTEN Das UBB-Verfahren ist ein vereinfachtes Verfahren bei dem keine dynamischen Simulationen im Vorfeld benötigt werden. Zur Ermittlung der Heiz- und Kühllkurven sowie der Heiz- und

Kühlgrenzen werden deshalb die internen Lasten für Personen und Geräte nach Abschnitt 3.1.2 aus SIA 2024 sowie DIN V 18599 als obere Schranke dieser Lasten angenommen. Als untere Schranke wird von einer Belegungsdichte von 50 % nach den Empfehlungen aus [15, S. 48] und dementsprechend reduzierten Geräte- und Personenlasten ausgegangen.

Zur Ermittlung der Schranken für die Summe aus solarer Einstrahlung und künstlicher Beleuchtung wurden die frei zugänglichen Strahlungsdaten des TRY-Datensatzes für den Standort Mannheim verwendet. Für die untersuchten Ausrichtungen der Fensterfront (Südost, Südwest) wurde dazu die auf die Fenster auftretende Strahlung I_{sol} ausgewertet. Um ein stündliches Profil der solaren Strahlung zu erhalten, wurde jeweils das Profil des Testreferenzjahr-Datensatzes für den Tag mit der höchsten Strahlungssumme des Jahres als Auslegungstag herangezogen. Die in der Zone als solare Last ankommende, mittlere spezifische Leistung \dot{q}_{sol} für jeden Zeitschritt wird dann, in Anlehnung an DIN V 18599-2 [61], über

$$\dot{q}_{\text{sol}} = \frac{I_{\text{sol}} \cdot A_{\text{fenster}} \cdot g_{\text{tot}} \cdot F_V \cdot F_F}{A_{\text{zone}}} \quad (3.15)$$

berechnet. Es sind dabei:

I_{sol} mittlere stundenweise Strahlungsleistung auf 90° geneigte Fläche, bezogen auf Fensterfläche

A_{fenster} Bruttofensterfläche nach Tabelle 3.3

g_{tot} Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster bei aktiviertem Sonnenschutz nach Tabelle 3.3

F_V Abminderungsfaktor für Verschmutzung nach [33], $F_V = 0,9$

F_F Abminderungsfaktor für Rahmenanteil für verwendeten Fenstertyp, $F_F = 0,85$

A_{zone} Zonengrundfläche nach Tabelle 3.3

Die Lasteinträge von solarer Einstrahlung \dot{q}_{sol} und künstlicher Beleuchtung \dot{q}_{bel} sind, je nach Art der Beleuchtungssteuerung, voneinander abhängig. Die als UBB-Eingangsgröße benötigte kombinierte obere (ub) beziehungsweise untere Schranke (lb) der stündlichen Last $\dot{q}_{\text{sol+bel}}$ wird vereinfachend nach folgendem Ansatz ermittelt:

$$\dot{q}_{\text{sol+bel,ub}} = \max(\dot{q}_{\text{sol}}, \dot{q}_{\text{bel,des}}) \quad (3.16a)$$

$$\dot{q}_{\text{sol+bel,lb}} = \max\left(\dot{q}_{\text{sol}}, \frac{\dot{q}_{\text{bel,des}}}{2}\right) \quad (3.16b)$$

In Gleichung 3.16b wird von einer 50-prozentigen Belegung und dementspre-

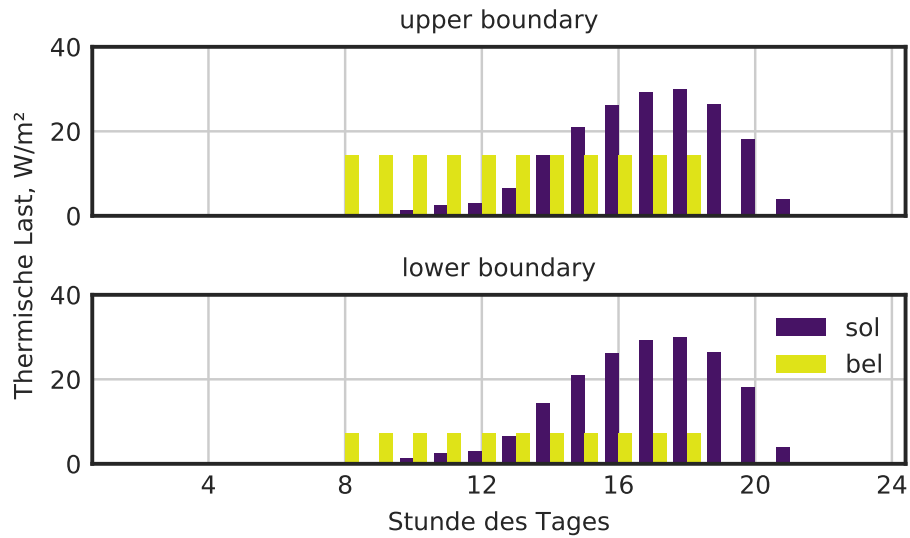


Abbildung 3.17: Einzellasten für solare Einstrahlung und künstliche Beleuchtung für die Zone mit Südwest-Ausrichtung. Strahlungsdaten nach TRY-Datensatz Mannheim [66] für den 22. März, den Tag mit der höchsten Einstrahlungssumme bei dieser Ausrichtung.

chender Beleuchtung ausgegangen, die solare Eintragsleistung ist unverändert. In Abbildung 3.17 sind die stündlichen Lasten zur Ermittlung der Schranken grafisch dargestellt. Maßgeblich für das UBB-Verfahren ist in der Berechnung lediglich die tägliche Summe des Wärmeeintrags durch Einstrahlung und Beleuchtung, nicht der exakte Verlauf. Da diese Einstrahlungssumme für beide Ausrichtungen typischerweise identisch ist, können die Werte aus Abbildung 3.17 auch bei Südost-Ausrichtung verwendet werden.

NETZGEFÜHRTER TAKTBETRIEB

4.1 TAKTBETRIEB NACH UBB-VERFAHREN

4.1.1 Energiebetrachtung

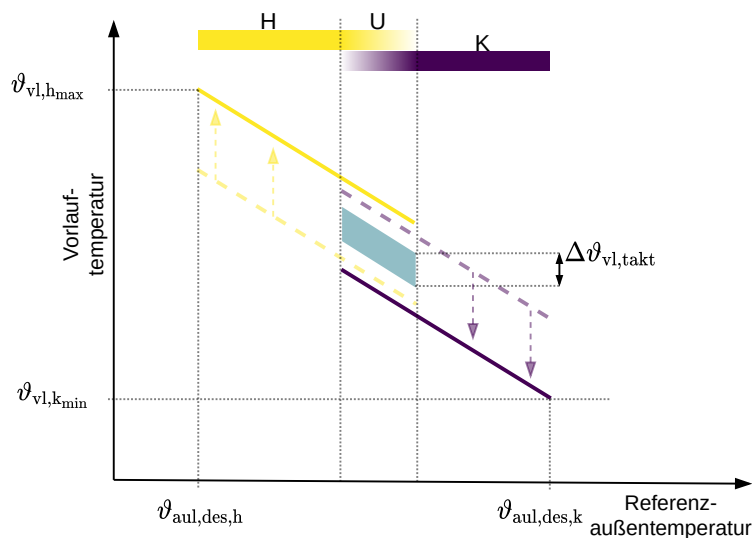


Abbildung 4.1: Schematische Heiz- und Kühlkurven für die außentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung im Taktbetrieb nach UBB-Verfahren mit wichtigen Temperaturpaaren [15] und Betriebsarten.

Der Taktbetrieb ist im UBB-Verfahren ein optionaler Baustein, der auf den für den Dauerbetrieb berechneten Werten für Heiz- und Kühlgrenzen sowie Heiz- und Kühlkurven aufbaut. Die Grundidee des Taktbetriebs besteht darin, innerhalb kürzerer Einschaltzeiten der BKT-Ladepumpe Δt_1 die annähernd gleiche Energiemenge wie im Dauerbetrieb über eine Taktperiode Δt einzuspeichern. Umgesetzt wird dies durch eine erhöhte beziehungsweise verringerte Vorlauftemperatur $\vartheta_{\text{vl,takt}}$ im Heiz- respektive Kühlbetrieb (vgl. Abbildung 4.1). Ur-

sprünglich lag die Motivation zu diesem intermittierenden Betrieb der Ladepumpe in der Einsparung von Pumpenenergie durch Verringerung der Laufzeiten. Einen weiteren Einsatzfall sahen Tödtli u. a. in der Rückkühlung über Nacht bei einer Nutzung der Außenluft als Wärmesenke [15, S. 87 ff.]. Die Ladezeit sollte in Zeiten geringerer Außenlufttemperaturen verschoben werden, wodurch sich die Jahresarbeitszahl der Kälteerzeugung verbessert. Nachfolgend werden die wichtigsten Berechnungsgleichungen aus [15] sowie [18] auf Basis der dort verwendeten Energiebetrachtung vorgestellt.

Der Energieeintrag im Dauerbetrieb q_{dauer} in das thermisch aktive Bauteil wäh-

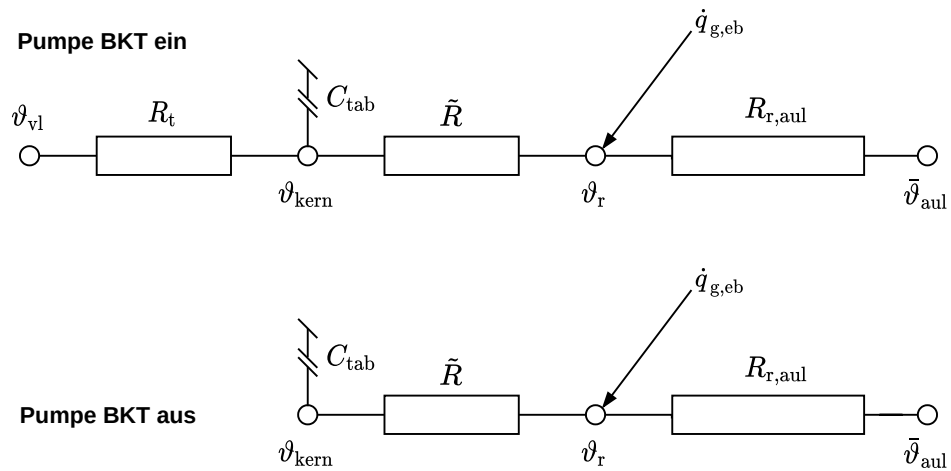


Abbildung 4.2: Eindimensionales Widerstands-Kapazitäten-Modell für die Wärmeübertragung und Speicherung zwischen TAB, Raum und Außenluft im Taktbetrieb nach [18]. Jeweils für die Betriebszustände „BKT Pumpe an“ (oben) und „BKT Pumpe aus“ (unten).

rend der Einschaltperiode Δt , bezogen auf die aktive Fläche des TABS, lässt sich nach [18] für den Heizfall mit

$$\begin{aligned}
 q_{\text{dauer}} &= \frac{1}{R_t} \int_0^{\Delta t} (\vartheta_{vl,h} - \vartheta_{kern,min}) dt = \\
 &= \frac{\Delta t}{R_t} (\vartheta_{vl,h} - \vartheta_{kern,min}) = \\
 &= \frac{\Delta t}{R_t + \tilde{R}} (\vartheta_{vl,h} - \vartheta_{r,soll,h})
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

berechnen. Für die taktende Beladung des Bauteils lässt sich der flächenspezifische Energieeintrag q_{takt} während der Einschaltzeit $\Delta t_{1,h}$ mit

$$\begin{aligned} q_{\text{takt}} &= \frac{1}{R_t} \int_0^{\Delta t_{1,h}} (\vartheta_{\text{vl,takt,h}} - \vartheta_{\text{kern}}(t)) dt = \\ &= \frac{1}{R_t} \int_0^{\Delta t_{1,h}} \left(\vartheta_{\text{vl,takt,h}} - \left[\vartheta_{\text{kern1}} + (\vartheta_{\text{kern,min}} - \vartheta_{\text{kern1}}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right] \right) dt = \quad (4.2) \\ &= \frac{\Delta t_{1,h}}{R_t} (\vartheta_{\text{vl,takt,h}} - \vartheta_{\text{kern1}}) - \frac{\tau_1}{R_t} (\vartheta_{\text{kern1}} - \vartheta_{\text{kern,min}}) \cdot \left(e^{-\frac{\Delta t_{1,h}}{\tau_1}} \right) \end{aligned}$$

ermitteln. Unter der Annahme, dass

$$\frac{\Delta t_{1,h}}{\tau_1} \ll 1$$

ist, kann Gleichung 4.2 wie folgt approximiert werden:

$$q_{\text{takt}} = \frac{\Delta t_1}{R_t} (\vartheta_{\text{vl,takt,h}} - \vartheta_{\text{kern,min}}). \quad (4.3)$$

Die benötigte minimale Kerntemperatur $\vartheta_{\text{kern,min}}$ für den Heizfall ermittelt sich dabei nach dem UBB-Verfahren mit

$$\vartheta_{\text{kern,min}} = \vartheta_{\text{vl,h}} - \frac{R_t}{R_t + \tilde{R}} (\vartheta_{\text{vl,h}} - \vartheta_{\text{r,soll,h}}). \quad (4.4)$$

Gleichung 4.3 gilt nur für Einschaltzeiten der Ladepumpe, die deutlich kleiner als die Zeitkonstante des thermisch aktiven Bauteils sind [15, S. 178]. Bei längeren Einschaltzeiten und damit einem größeren Wert für den Quotienten $\frac{\Delta t_1}{\tau_1}$ liefert die Approximation etwas größere Werte für die betragsmäßig eingespeicherte Wärmeenergie in Heiz- sowie Kühlfall und damit etwas kürzere Einschaltzeiten. In [18, S. 1612] wird die Verwendung für typische Bauteilaufbauten und Nutzungen für Taktperioden bis 24 Stunden und dementsprechende Einschaltzeiten empfohlen. Grundlage für die Verwendung der Gleichungen ist die Annahme stationärer Werte für Außentemperatur, Vorlauftemperatur und die Leistung der Wärmegewinne in der Zone.

In Abbildung 4.3 ist die Auswirkung der Vereinfachung in Abhängigkeit von der Einschaltzeit, die sich bei Variation der Vorlauftemperatur im Heiztaktbetrieb ergibt, dargestellt. Es wird deutlich, dass der relative Fehler im Bereich zwischen $0,3 \dots 0,5 \frac{\Delta t_1}{\tau_1}$ seine maximalen Werte aufweist. Die maximale relative Abweichung in Bezug auf die berechnete eingespeiste Energie, die sich durch die Anwendung der Approximation aus Gleichung 4.3 ergibt, ist mit circa 11 % jedoch gering und kann angesichts der Sicherheiten im UBB-Verfahren in Kauf genommen werden.

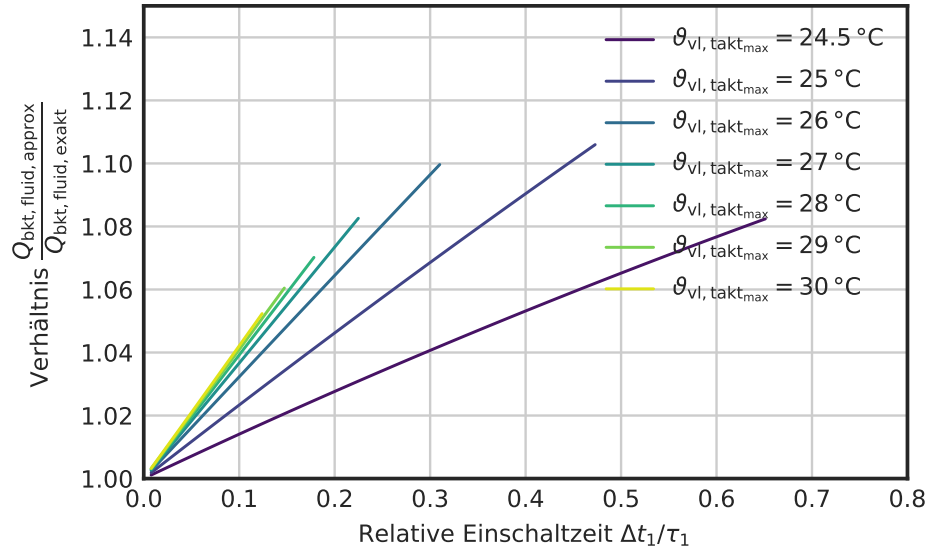


Abbildung 4.3: Approximationsfehler für die eingespeiste Energie im Auslegungsfall (Heizen) bei Variation der maximalen Vorlauftemperatur und entsprechenden relativen Einschaltzeiten. Parameter nach Auslegung mit $\tau_1 = 12,9$ h und Taktperiode $\Delta t = 12$ h.

4.1.2 Betriebskurven bei festgelegter Einschaltzeit

Da im Taktbetrieb über eine Taktperiode die gleiche Energiemenge wie im Dauerbetrieb an das TAB abgegeben werden soll, gilt nach [15, S. 178]

$$q_{\text{dauer}} := q_{\text{takt}}.$$

Durch Gleichsetzung von 4.1 und 4.3 ergibt sich

$$\frac{\Delta t_{1,h}}{\Delta t} = \frac{\vartheta_{vl,h} - \vartheta_{\text{kern,min}}}{\vartheta_{vl,\text{takt},h} - \vartheta_{\text{kern,min}}}, \quad (4.5a)$$

im Kühlbetrieb ist

$$\frac{\Delta t_{1,k}}{\Delta t} = \frac{\vartheta_{\text{kern,max}} - \vartheta_{vl,k}}{\vartheta_{\text{kern,max}} - \vartheta_{vl,\text{takt},k}}. \quad (4.5b)$$

Dabei berechnet sich die minimale Kerntemperatur $\vartheta_{\text{kern,min}}$, die zur Einhaltung der minimalen Sollraumtemperatur im Heizfall auftreten darf, nach dem UBB-Verfahren wie folgt [78, S. 178]:

$$\vartheta_{\text{kern,min}} = \vartheta_{vl,h} - \frac{R_t}{R_t + \tilde{R}} (\vartheta_{vl,h} - \vartheta_{r,\text{soll},h}). \quad (4.6)$$

Analog dazu lässt sich die maximal erlaubte Kerntemperatur im Kühlfall wie folgt schreiben:

$$\vartheta_{\text{kern,max}} = \vartheta_{vl,k} + \frac{R_t}{R_t + \tilde{R}} (\vartheta_{r,\text{soll},k} - \vartheta_{vl,k}). \quad (4.7)$$

Bei Vorgabe einer relativen Einschaltzeit $\Delta t_1/\Delta t$ lässt sich dann mit den Gleichungen 4.5a und 4.5b die sich ergebende Vorlauftemperatur bei der Auslegungsaußentemperatur ermitteln:

$$\vartheta_{v1,takt,h} = \left[\left(\frac{\Delta t_{1,h}}{\Delta t} \right)^{-1} - 1 \right] \frac{R_t}{R_t + \tilde{R}} \left(\vartheta_{v1,h} - \vartheta_{r,soll,h} \right) + \vartheta_{v1,h} \quad (4.8a)$$

$$\vartheta_{v1,takt,k} = \left[1 - \left(\frac{\Delta t_{1,k}}{\Delta t} \right)^{-1} \right] \frac{R_t}{R_t + \tilde{R}} \left(\vartheta_{r,soll,k} - \vartheta_{v1,k} \right) + \vartheta_{v1,k} \quad (4.8b)$$

Abbildung 4.4 zeigt den Zusammenhang zwischen der festgelegten relativen Einschaltzeit $\Delta t_1/\Delta t$ und der sich ergebenden maximalen/minimalen Vorlauftemperatur. Es wird deutlich, dass die relative Einschaltzeit im Kühltaktbetrieb nach unten hin durch den Schutz vor Taupunktunterschreitung auf circa $0,3 \Delta t$ begrenzt wird. Für den Heiztaktbetrieb sind bei den verwendeten Parametern theoretisch kürzere Einschaltzeiten möglich. So wird durch eine Wahl von $\vartheta_{v1,h,max} = \vartheta_{v1,takt,h,des} = 28^\circ\text{C}$ eine Einschaltzeit von $0,15 \Delta t$ ermöglicht.

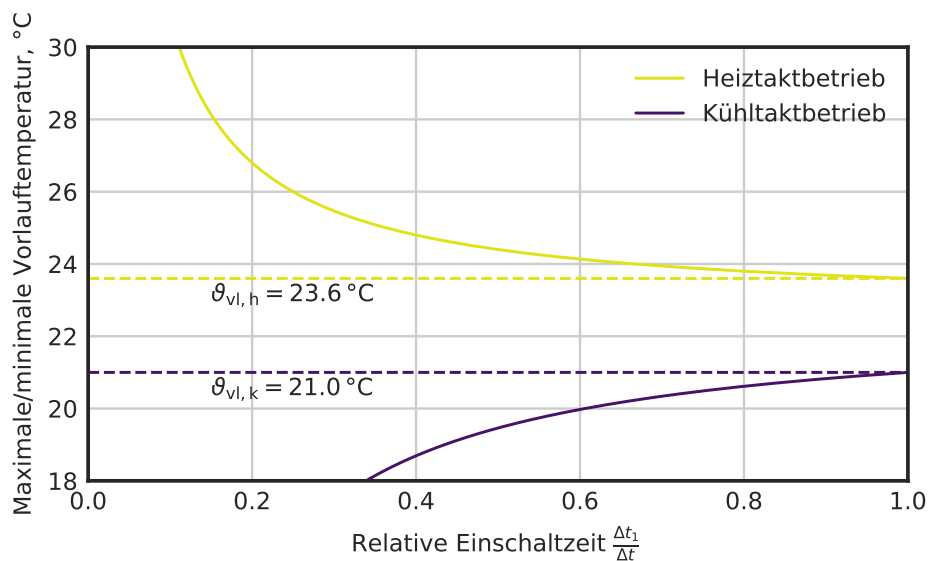


Abbildung 4.4: Vorlauftemperaturen im Auslegungsfall $\vartheta_{v1,takt,h,max}$ beziehungsweise $\vartheta_{v1,takt,k,min}$ bei Variation der relativen Einschaltzeit im Heiz- und Kühltaktbetrieb.

4.1.3 Einschaltzeiten bei festgelegten Betriebskurven

Die Heiz- und Kühllkurven im Taktbetrieb werden durch Parallelverschiebung der Kurven aus dem Dauerbetrieb ermittelt. Hierzu kann, alternativ zu Vorgabe eines gewünschten Einschaltzeitverhältnisses auch eine maximale Vorlauf-temperatur im Heizbetrieb $\vartheta_{vl,h,max}$ sowie eine minimale Vorlauf-temperatur im Kühlbetrieb $\vartheta_{vl,k,min}$ definiert werden. Durch diese Festlegung der Vorlauf-temperaturen bei den Auslegungs-Referenztemperaturen für Heiz- und Kühlfall ergibt sich die Lage der Kurven.

Die Einschaltzeiten berechnen sich dann nach den nachfolgend aufgeführten Gleichungen 4.9, 4.10 und 4.11.

EINSCHALTZEIT HEIZTAKTEN In Zeiten, in denen lediglich eine Heizaktion möglich ist, ermittelt sich die Einschaltzeit $\Delta t_{1,h}$ während der Taktperiodenlänge Δt bei gegebenen Heizkurven für Dauer- und Taktbetrieb nach [15, S. 121]

$$\Delta t_{1,h} = \frac{\Delta t}{1 + \frac{\vartheta_{vl,takt,h} - \vartheta_{vl,h}}{\frac{R_t}{R_t + \bar{R}} \cdot (\vartheta_{vl,h} - \vartheta_{r,soll,h})}}. \quad (4.9)$$

EINSCHALTZEIT KÜHLTAKTEN In Zeiten, in denen lediglich eine Kühllaktion möglich ist, ermittelt sich die Einschaltzeit $\Delta t_{1,k}$ während der Taktperiodenlänge Δt bei gegebenen Kühllkurven für Dauer- und Taktbetrieb nach [15, S. 121]

$$\Delta t_{1,k} = \frac{\Delta t}{1 + \frac{\vartheta_{vl,k} - \vartheta_{vl,takt,k}}{\frac{R_t}{R_t + \bar{R}} \cdot (\vartheta_{vl,k} - \vartheta_{r,soll,k})}}. \quad (4.10)$$

EINSCHALTZEIT UNBESTIMMTES TAKTEN Diese Betriebsart ermöglicht eine taktende Beladung auch im Bereich von Außentemperaturen zwischen Heiz- und Kühlgrenze, in denen sowohl eine Kühl- als auch eine Heizaktion nötig sein kann. Das zu definierende Vorlauf-temperatursollwertband $\Delta \vartheta_{vl,takt}$, welches sich im Bereich zwischen Kühl- und Heizkurve befindet, wird dabei im Vergleich zum Sollwertband bei Dauerbetrieb $\Delta \vartheta_{vl}$ reduziert (vgl. Abbildung 4.1). Die Breite des Vorlauf-temperatursollwertbandes muss per Definition bestimmt werden. Ein breiteres Vorlauf-temperatursollwertband bewirkt größere Zeiten im Leerlaufbetrieb mit $\vartheta_{vl} = \vartheta_{rl}$ und damit geringere Energieverbräuche. Nachteilig ist die größere erlaubte Temperaturschwankung des Bauteils und damit verbundene verminderte Reaktionsfähigkeit auf Lastschwankungen durch den Selbstregelleffekt des TAB.

Die Einschaltzeit in der Betriebsart unbestimmtes Takten berechnet sich, je nach gewähltem Wert für $\Delta\vartheta_{vl,takt}$, wie folgt [15, S. 123,]:

$$\Delta t_{1,u} = \frac{\Delta t}{1 + \frac{\Delta\vartheta_{vl} - \Delta\vartheta_{vl,takt}}{\frac{R_t}{R_t + \bar{R}} \cdot (\Delta\vartheta_{r,soll} - \Delta\vartheta_{vl})}}. \quad (4.11)$$

Gleichung 4.11 kann auch verwendet werden, wenn eine identische Einschaltzeit für alle drei Betriebsarten erzielt werden soll. Diese wird durch Iteration des Wertes für das Vorlauftemperatursollwertband im Taktbetrieb $\Delta\vartheta_{vl,takt}$ erreicht.

4.2 NETZGEFÜHRTER TAKTBETRIEB

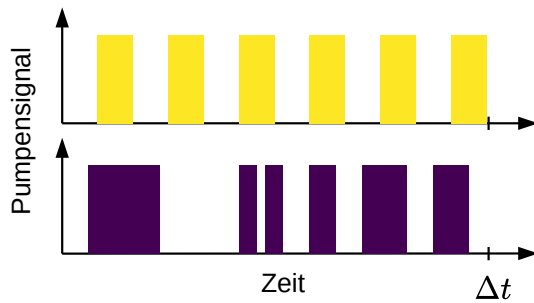


Abbildung 4.5: Beispielhaftes Pumpensignal bei Taktbetrieb kontinuierlich (oben) sowie diskontinuierlich (unten).

Der netzgeführte Taktbetrieb stellt eine Modifikation des in [15][18] vorgestellten Taktbetriebs dar. Wichtiger Unterschied ist dabei, dass es sich um einen diskontinuierlichen Taktbetrieb mit variabler Aufteilung der Ein- und Ausschaltzeiten innerhalb einer Taktperiode Δt handelt. Den Auslöser für das Einschaltsignal in einem Zeitschritt stellt das Netzsignal auf Grundlage einer zu wählenden Netz-

referenzgröße dar. Das Ergebnis des netzgeführten Taktbetriebs ist ein Fahrplan der BKT-Pumpe für die jeweils aktuelle Taktperiode. Die Wärme- und Kältebereitstellung wird somit, leicht verzögert durch den Wärme- beziehungsweise Kältespeicher, ebenfalls in die gewünschten Zeiten des Tages verschoben. Durch Anwendung der Betriebsstrategie kann damit beispielsweise ein geringerer spezifischer CO_2 -Ausstoß durch Strombezug bei hohem fEE-Anteil oder auch geringere Strombezugskosten durch Nutzung variabler Strompreise erreicht werden.

4.2.1 Netzsignalgenerierung

Für den netzgeführten Taktbetrieb muss die Länge einer Taktperiode Δt in Stunden vorgegeben werden. Nachdem die Einschaltzeit Δt_1 für die jeweiligen Betriebsarten mit den Gleichungen 4.9 bis 4.11 berechnet wurde, wird sie, je nach gewählter Netzreferenzgröße, auf die günstigsten Zeiträume innerhalb der Taktperiode verteilt. Als kleinste Einheit für die Aufteilung der Einschaltzeiten werden 15 Minuten gewählt. Dies entspricht der kleinsten zeitlichen Auflösung, in der mögliche Referenzgrößen wie beispielsweise der Anteil fEE vorliegen. Die tägliche Einschaltzeit wird dann auf 0,25 h genau gerundet.

Für die Generierung des Netzsignals wird, je nach Art der Netzreferenzgröße, eine Maximierung oder Minimierung durchgeführt. Über den Zeithorizont Δt mit n Zeitschritten soll dabei das Netzsignal für jeden Zeitschritt einen Wert mit 0 oder 1 annehmen, dass die Summe

$$\sum_{i=1}^n G_i \cdot \text{Sig}_{\text{netz},i} \quad \text{mit } \text{Sig}_{\text{netz},i} \in \{0,1\} \quad (4.12)$$

minimal beziehungsweise maximal ist. Dabei sind

G_i Wert der Netzreferenzgröße im Zeitschritt i ,

$Sig_{netz,i}$ Zu wählendes Netzsignal im Zeitschritt i ,

n Ganzzahlige Anzahl der 15 min-Zeitschritte in der Taktperiode beziehungsweise im Zeithorizont des Fahrplans, $n \approx \Delta t_1 / 0,25 \text{ h}$.

Für eine günstige Beladung während einer Taktperiode ist für die Netzreferenzgröße Anteil fEE der Netzsignalverlauf zu bestimmen, für den die Summe aus Gleichung 4.12 maximal ist. Für die Referenzgrößen Residuallast und EPEX-Day-Ahead-Preis hingegen ist der Signalverlauf, bei dem die Summe aus 4.12 minimal ist, als günstig im Hinblick auf das elektrische Energiesystem zu bewerten.

Bei der Anwendung des netzgeführten Taktbetriebs kommt der Taktperiodenlänge Δt eine wichtige Bedeutung zu, da durch sie auch indirekt die maximal mögliche Ausschaltzeit über zwei aufeinanderfolgende Taktperioden

$$\Delta t_{0,\max} = 2(\Delta t - \Delta t_1) \quad (4.13)$$

festgelegt wird. Die Ausschaltzeit ist damit, im diskontinuierlichen netzgeführten Taktbetrieb, im ungünstigsten Fall doppelt so lang wie diejenige im kontinuierlichen Taktbetrieb nach UBB-Verfahren. Die Folge wären Unter beziehungsweise Überschreitungen der im UBB-Modell festgelegten minimalen beziehungsweise maximalen Kerntemperaturen und damit Komfortabweichungen in Heiz beziehungsweise Kühlbetrieb. Vor diesem Hintergrund wird die Länge einer Taktperiode in den Simulationsstudien auf 12 Stunden festgelegt. Eine weitere Möglichkeit, die maximale Ausschaltzeit zu begrenzen, ist eine Beschränkung der relativen Einschaltzeit $\Delta t_1 / \Delta t$ in einer Taktperiode nach unten. Diese Beschränkung kann durch die Vorgabe der maximalen/minimalen Heiz oder Kühlkurventemperatur, das heißt durch Parallelverschiebung der Kurven erreicht werden (vgl. Abbildung 4.4). Durch Erweiterung von Gleichung 4.13 mit dem frei wählbaren Einschaltzeitverhältnis lässt sich die maximal mögliche Ausschaltzeit in Abhängigkeit von $\Delta t_1 / \Delta t$ im netzgeführten Taktbetrieb wie folgt darstellen:

$$\Delta t_{0,\max} = 2 \Delta t \left(1 - \frac{\Delta t_1}{\Delta t}\right). \quad (4.14)$$

Der Wert, den Sig_{netz} für jeden Zeitschritt annimmt, ist die Eingangsgröße für den Algorithmus, mit dem für jeden Zeitschritt der Betriebszustand der BKT-

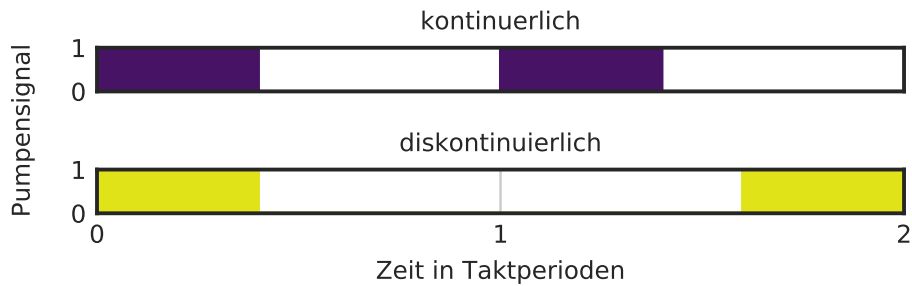


Abbildung 4.6: Maximal mögliche Ausschaltzeiten bei kontinuierlichem Taktbetrieb (oben) sowie im ungünstigsten Fall im diskontinuierlichen Taktbetrieb (unten).

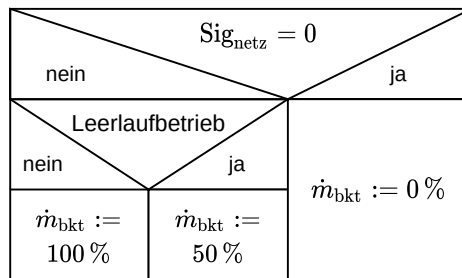


Abbildung 4.7: Algorithmus zur Ermittlung des BKT-Massenstroms im netzgeführten Taktbetrieb als Nassi-Shneiderman-Diagramm.

Ladepumpe bestimmt wird. Dieser ist in Abbildung 4.7 als Nassi-Shneiderman-Diagramm dargestellt. Bei $\text{Sig}_{\text{netz}} = 0$ ist die Ladepumpe deaktiviert, es findet keine Be- oder Entladung der Betondecke wasserseitig statt. Bei $\text{Sig}_{\text{netz}} = 1$ wird unterschieden, ob die Bedingungen für einen Leerlaufbetrieb vorliegen, das heißt die Rücklauftemperatur $\vartheta_{\text{rl,takt}}$ innerhalb des reduzierten Vorlauftemperatursollwertbandes $\Delta\vartheta_{\text{vl,takt}}$ liegt. In diesem Fall ist der 3-Wege-Mischer geschlossen und der Massenstrom der BKT-Ladepumpe ist auf $0,5 \dot{m}_{\text{bkt,des}}$ reduziert. Liegt die Rücklauftemperatur außerhalb des definierten Vorlauftemperatursollwertbandes, liegt kein Leerlaufbetrieb vor. Der Sollmassenstrom im BKT-Kreis beträgt $\dot{m}_{\text{bkt,des}}$. Zudem wird über den 3-Wege-Mischer Wärme zu oder abgeführt, sodass die Vorlauftemperatur der Solltemperatur je nach Betriebszustand und jeweiliger Temperaturkurve entspricht.

4.2.2 Leerlaufbetrieb

In [15] wird für den Taktbetrieb zu Beginn jeder Einschaltphase ein 30-minütiger Spülbetrieb (bei $\dot{m}_{\text{bkt}} = 100\%$) empfohlen. Dabei wird wie im Leerlaufbetrieb keine Wärme zu- oder abgeführt, es gilt $\vartheta_{\text{vl}} = \vartheta_{\text{rl}}$. Voraussetzung für die An-

wendbarkeit dieser Maßnahme ist eine Zonierung der BKT-Verteilung nach ähnlichen Lastprofilen und eine jeweils separate Messung der Zonenrücklauftemperaturen.

Im netzgeführten Taktbetrieb wird auf diesen Spülbetrieb verzichtet, stattdessen wird die Rücklauftemperatur dauerhaft gemessen und es findet eine automatische Umschaltung in den Leerlaufbetrieb statt, wenn sich die Rücklauftemperatur innerhalb des reduzierten Vorlauftemperatursollwertbandes befindet. Dann wird, wie im unbestimmten Betrieb (vgl. Abschnitt 3.2) der Basisstrategie, der Massenstrom auf 50 % reduziert und es findet keine Wärmeübergabe an den Wasserkreis statt ($\dot{Q}_{sp,bui} = 0$).

4.2.3 Netzreferenzgrößen

Als Netzreferenzgröße für den netzgeführten Taktbetrieb eignen sich Prognosen für Netz- oder Marktgrößen wie

- EPEX-Day-Ahead Börsenstrompreis,
- der Anteil der Stromerzeugung durch fEE an der Gesamtstromerzeugung oder
- die Residuallast.

Diese Größen liegen für den Zeithorizont von mindestens 24 Stunden in stündlicher beziehungsweise viertelstündlicher Auflösung vor. Auf ihrer Basis kann somit, mit dem in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Algorithmus, ein Netzsignalverlauf als Fahrplan für die jeweils folgende Taktperiode generiert werden. Die genannten Netzreferenzgrößen weisen dabei eine unterschiedlich hohe Korrelation zueinander auf. Die Ähnlichkeit kann über den Korrelationskoeffizienten nach τ_K KENDALL [81][82] quantifiziert werden. Dieser ist auch für nicht normalverteilte Datensätze anwendbar. In Abbildung 4.8 wird deutlich, dass die Verläufe von Strombörsenpreis und Anteil fEE die dem Betrag nach geringste Korrelation zueinander mit $|\tau_K| = 0.44$ aufweisen. Hier sind demnach auch die größten Unterschiede in Bezug auf die sich nach dem Algorithmus ergebenden Fahrpläne zu erwarten. In Abbildung 4.9 ist der Jahresverlauf der Netzreferenzgröße Anteil fEE als Teppichdiagramm dargestellt. In Sommer- und Übergangszeiten ist der regelmäßige Tagesgang mit, auf Grund der dominanten solaren Stromerzeugung, hohen Anteilen fEE um die Tagesmitte herum zu erkennen. Im Winter ist die tägliche Periodizität, aufgrund der vorherrschenden Windkraftherzeugung, weniger stark ausgeprägt. Gleiches gilt für die sich

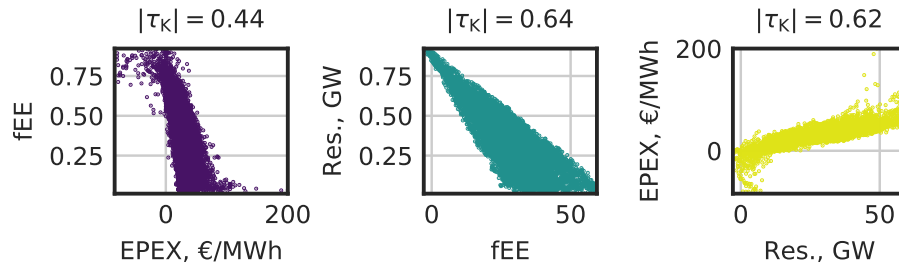


Abbildung 4.8: Korrelation der drei untersuchten Netzreferenzgrößen für das Untersuchungsjahr 2020, deutschlandweit (Daten aus [3, 8]).

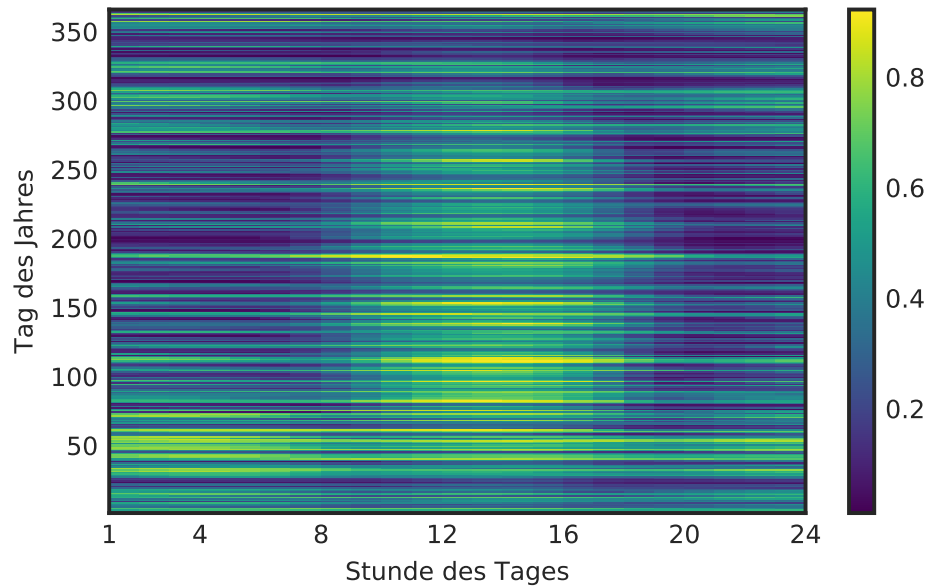


Abbildung 4.9: Teppichdiagramm für die Netzreferenzgröße Anteil fEE (deutschlandweit) für das Untersuchungsjahr 2020 (Daten aus [3, 8]).

ergebenden Netzsignalverläufe. In Abbildung 4.10 ist der Jahresverlauf für den EPEX-Börsenstrompreis aufgetragen. Für diese Netzreferenzgröße würden sich die Einschaltzeiten vorzugsweise in Zeiten mit niedrigem Day-Ahead-Preis befinden. Es wird ersichtlich, dass die optimalen Einschaltzeiten sich, insbesondere in den Sommermonaten, weniger stark um die Mittagszeit gruppieren. Ursächlich hierfür ist, dass auch in den Nachtstunden typischerweise Zeiten mit niedrigen Börsenstrompreisen auftreten. Diese Charakteristik ist vorteilhaft in Bezug auf die sich ergebende zusammenhängende Ausschaltzeit an typischen Tagen, da die Einschaltzeit gleichmäßiger verteilt ist über die Taktperiode. Die Charakteristik der Netzreferenzgröße Residuallast (vgl. Abbildung a.1) stellt eine Zwischenstufe der beiden erstgenannten Größen dar, die Gruppierung der günstigsten Werte um die Mittagszeit in den Sommermonaten ist weniger aus-

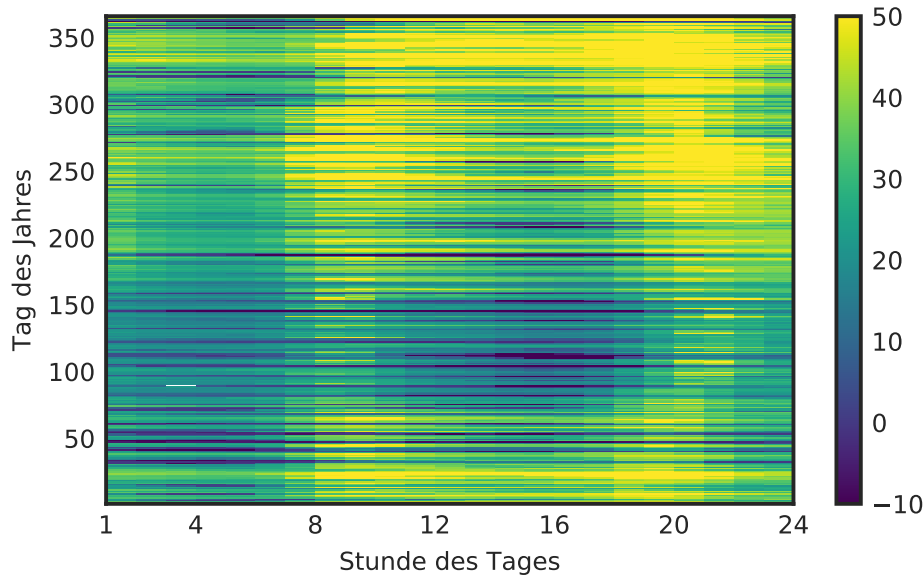


Abbildung 4.10: Teppichdiagramm für die Netzreferenzgröße EPEX-Day-Ahead Börsenstrompreis (in EUR/MWh) für das Untersuchungsjahr 2020 (Daten aus [8]).

geprägt als beim Anteil fEE.

4.2.4 Referenzaußentemperatur

Die Referenzaußentemperatur für den netzgeführten Taktbetrieb $\vartheta_{\text{aul,bkt,takt}}$ wird anhand der (prognostizierten) Außentemperatur des aktuellen Tages festgelegt. Der Tageswechsel wird zudem um sechs Stunden nach vorn verschoben, die Umschaltung anhand der mittleren Außentemperatur des Folgetages erfolgt somit bereits um 18 Uhr am Vortag. Durch die Verwendung einer über 24 h konstanten Referenzaußentemperatur wird eine zu häufige Änderung der Betriebsart mit den damit verbundenen Temperaturkurven und Einschaltzeiten vermieden. Da die Ladepumpe im Taktbetrieb nicht durchgehend, sondern nur in vordefinierten Zeitfenstern arbeiten kann, treten Lastwechsel bei der täglichen Umschaltung um 18 Uhr deutlich seltener auf, als dies im Dauerbetrieb der Fall wäre. Die sich ergebenden Referenzaußentemperaturen für Basisbetrieb $\vartheta_{\text{aul,bkt}}$ (vgl. Abschnitt 3.1.2) und netzgeführten Taktbetrieb, sowie die zugrunde liegende Außenlufttemperatur ϑ_{aul} , sind für vier Beispieltage aus 2020 in Abbildung 4.11 exemplarisch dargestellt.

Der sechsstündige Zeitversatz bei der Referenzaußentemperatur kommt dem

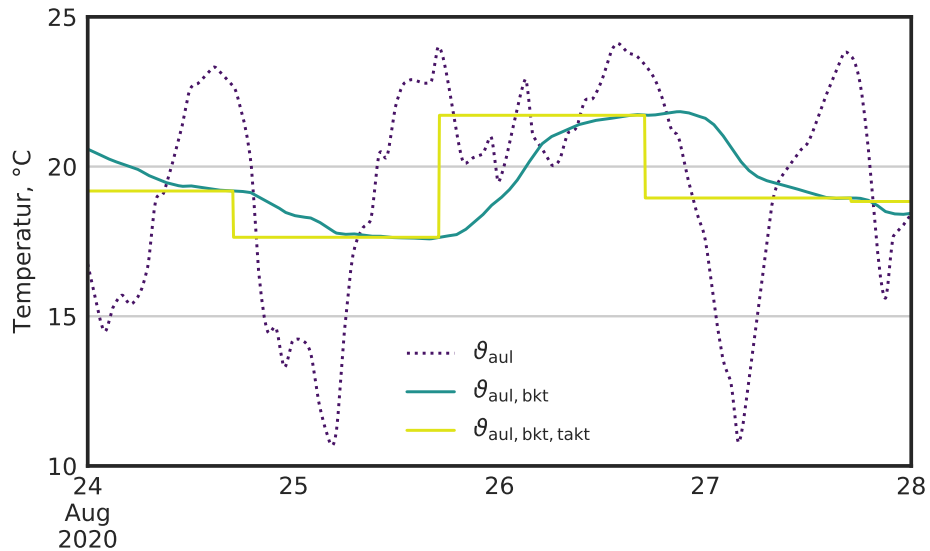


Abbildung 4.11: Verlauf der Außenlufttemperatur für vier Beispieltage im August 2020 sowie daraus gebildete Referenzaußentemperaturen für Dauerbetrieb ($\vartheta_{\text{aul,bkt}}$) sowie netzgeführten Taktbetrieb ($\vartheta_{\text{aul,bkt,takt}}$).

dynamischen Verhalten des Systems TABS-Raum-Fassade entgegen, da der verzögerten Wärmeabgabe der Betonkerntemperierung Rechnung getragen wird [15, S. 47]. Die zur Berechnung der Referenzaußentemperatur des folgenden Tages in der Praxis benötigte Vorhersage der Außentemperatur über einen maximalen Prognosehorizont von 24 Stunden ist, in guter Prognosequalität und zugänglich, zum Beispiel über den Deutschen Wetterdienst [68]. Die Wahl des Prognosehorizonts stellt dabei immer einen Kompromiss zwischen Anpassung an die Außentemperaturdynamik und mit steigendem Vorhersagezeitraum sinkender Prognosequalität dar.

4.2.5 Begrenzung der Vorlauftemperaturen

Im Kühlfall wird die Vorlauftemperatur aufgrund der Gefahr der Taupunktunterschreitung an Rohren und Bauteilen auf einen Minimalwert von circa 18 °C in Anlehnung an [83, S. 12] begrenzt. In Abbildung 4.12 ist die Taupunkttemperatur bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten aufgetragen. Es wird deutlich, dass ein Taupunkt von 18 °C im Kühlfall, bei einer Lufttemperatur von 26 °C lediglich bei Luftfeuchten $\varphi \geq 60\%$ erreicht wird. Hinzu kommt, dass die minimale Temperatur der Bauteiloberfläche im Kühlfall immer um einige Kelvin näher an der Raumtemperatur liegt, als die minimale Wassertemperatur im Rohr.

Für den Heizbetrieb dagegen könnte die maximal vom Versorgungssystem

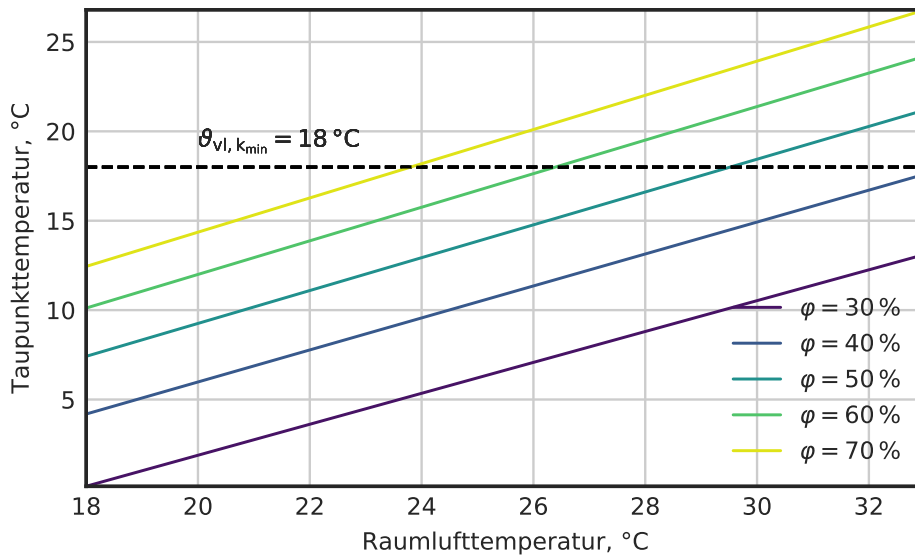


Abbildung 4.12: Taupunkttemperatur nach [84] über Raumlufttemperatur mit üblichen Werten für die relative Luftfeuchte φ als Parameter. Gewählte minimale Vorlauftemperatur als gestrichelte schwarze Linie.

erreichbare Temperatur gewählt werden. Höhere Temperaturen gehen dabei jedoch mit erhöhten Verteilungsverlusten und einem verringerten Gesamtwirkungsgrad des Wärmesystems einher. Um darüber hinaus den Charakter der BKT als passives, den Selbstregelleffekt ausnutzendes System zu bewahren, ist eine Begrenzung der Parallelverschiebung auch im Falle der Heizkurve sinnvoll. Somit können auch im Taktbetrieb die Temperaturdifferenzen zwischen Bauteiloberfläche und Raum gering gehalten werden. Die maximalen Oberflächentemperaturen von Decke/Fußboden von 35 beziehungsweise 39 °C im Heizfall sowie die minimalen Temperaturen 16 beziehungsweise 19 °C im Kühlfall nach VDI 3804 [85, S. 13] werden bei Vorlauftemperaturen zwischen 18 . . . 30 °C eingehalten. Somit können Komforteinbußen durch eine Asymmetrie der Strahlungstemperatur in den Räumen ausgeschlossen werden.

SIMULATION & ANALYSE

5.1 PLAUSIBILISIERUNG UND VERGLEICH MIT „BEDARFSSZENARIO“

In einem ersten Schritt wurde das Simulationsmodell im Hinblick auf seine Heizlast bei stationären Bedingungen untersucht. Dazu wurden für das Modell die Außentemperatur auf die Auslegungsaußentemperatur nach DIN EN 12831 [86] (-9 °C) und die Sonneneinstrahlung auf 0 gesetzt. Die Solltemperatur der Raumluft nimmt den konstanten Wert 21 °C ein. Um die sich ergebende Heizlast mit der Berechnung aus der Planung vergleichen zu können, wurden die internen thermischen Lasten durch Personen, Geräte und Beleuchtung ebenfalls deaktiviert. Bei einer angenommenen Zulufttemperatur von 19 °C und Zu- sowie Abluftvolumenströmen nach Tabelle 3.2 ergibt sich für den stationären Zustand eine Heizlast von $19,6\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Die in der Planung nach DIN EN 12831 ermittelte spezifische Heizlast weist einen Wert von $17,2\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ aus. Die Differenz von $2,4\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ erklärt sich dadurch, dass die mit geringer Untertemperatur in den Raum eingebrachte Zuluft zum Stand der vorliegenden Planungsberechnung nicht berücksichtigt wurde. Im Ergebnis ist das erstellte Raummodell, in Bezug auf die Transmissionsheizlast, stationär thermisch validiert. Eine Kontrolle des Zeitverhaltens von Raummodell und BKT wurde über die Ermittlung der Zeitkonstanten in einem Simulationsversuch durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.1.2). Das Ergebnis von $\tau_{\text{bkt,kern}} = 12,7\text{ h}$ liegt nah am mit Hilfe des UBB-Widerstandsmodells [15, S. 176] ermittelten Wert von $\tau_1 = 11,6\text{ h}$. Hierdurch wird das Modell auch dynamisch plausibilisiert.

Die netzgeführte Taktstrategie baut auf einem passend parametrisierten UBB-Basisbetrieb der Betonkerntemperierung auf. Um diese Parametrierung der Basisstrategie zu überprüfen, wurde sie in einer Jahressimulation mit einer idealisierten Beheizung und Kühlung der Untersuchungszone verglichen, dem „Bedarfsszenario“. Bei diesem wird die Raumlufttemperatur als zu regelnde Größe durch idealisierte, das heißt trägheitslose und unbegrenzte Beheizung

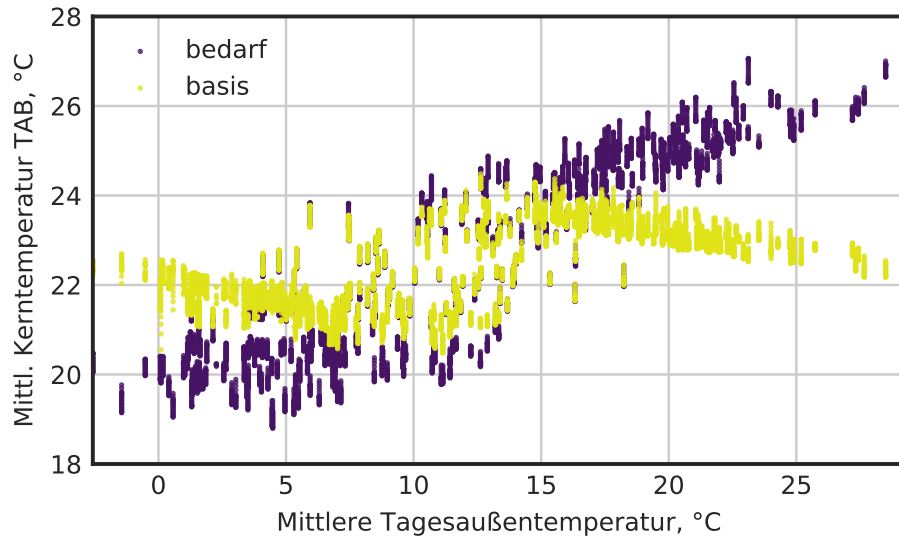


Abbildung 5.1: Mittlere, stündliche Kerntemperatur (während der Nutzungszeit des Raums) des TAB über Außentemperatur für Bedarfsszenario und Basisbetrieb.

oder Kühlung innerhalb des Toleranzbereichs nach DIN EN 16798-1/NA, Kategorie II (vgl. Abbildung 3.9) gehalten. Um die Differenz zwischen Luft- und Raumtemperatur zu berücksichtigen, wurden die Sollwerte der Lufttemperatur für Heiz- und Kühlobetrieb im Vergleich zum Toleranzbereich um jeweils 1 K angehoben respektive abgesenkt. Außerhalb der Betriebszeiten ist die Kühlung deaktiviert und die Heizsolltemperatur abgesenkt. Die Betonkerntemperierung ist in diesem Vergleichsszenario deaktiviert.

Das Basisbetriebsszenario wurde nach den Vorgaben aus Kapitel 3 und mit der erläuterten UBB-Basisstrategie zur Steuerung der BKT simuliert. Die Eingangsgrößen aus der modellierten Zone sowie die mit dem Programm TABSDesign berechneten Ausgangsgrößen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Über das Wochenende findet eine Absenkung der BKT statt. Dazu wird die Heizkurve um 0,5 K abgesenkt, die Kühllkurve um eben diesen Wert angehoben. Dadurch weitet sich das Vorlauftemperatursollwertband $\Delta\vartheta_{v1}$ um 1 K. Der Schwankungsbereich der Raumtemperatur und die Wahrscheinlichkeit eines Leerlaufbetriebs nach Gleichung 3.14 wird dadurch im Wochenendbetrieb erhöht.

In der Auswertung der beiden Betriebsstrategien zeigt sich in Abbildung 5.1 die Charakteristik der Beladung des thermisch aktiven Bauteils. In den Außentemperaturbereichen unter 5 °C ist die außentemperaturabhängige Beladung nach Heizkurve deutlich an der Kerntemperatur ablesbar. Im Übergangsbereich der Außentemperatur, bei mittleren Außentemperaturen zwischen circa 5 °C und

Tabelle 5.1: Eingangsgrößen und mit TABSDesign [78] berechnete Ausgangsgrößen des TAB für die durchgeführten Simulationsstudien

Auslegungsaußentemperatur Heizen $\vartheta_{\text{aul,des,h}}$, °C	-12
Auslegungsaußentemperatur Kühlen $\vartheta_{\text{aul,des,k}}$, °C	30
Solltemperatur Raum Heizen $\vartheta_{\text{r,soll,h}}$, °C	21
Solltemperatur Raum Kühlen $\vartheta_{\text{r,soll,k}}$, °C	26
Grenztemperatur Heizen $\vartheta_{\text{grenz,h}}$, °C	11,2
Grenztemperatur Kühlen $\vartheta_{\text{grenz,k}}$, °C	-1,4
Widerstand in x-Richtung R_x , $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	0,011
Widerstand Rohrwand R_{rohr} , $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	0,019
Widerstand wasserseitig R_w , $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	0,002
Widerstand in z-Richtung R_z , $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	0,043
Gesamtwiderstand TABS R_t , $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	0,075
Gesamtwiderstand Raum \tilde{R} , $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	0,2
Gesamtwiderstand Raumluf-Außenluft R_{ra} , $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	1,972
Steigung Heiz-/Kühlkurve	-0,139
Gesamtwärmedurchgang TABS, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	13,26
Thermische Kapazität TABS, $\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2\text{K}}$	160
Zeitkonstante τ_1 , h	11,6
Zeitkonstante τ_0 , h	347

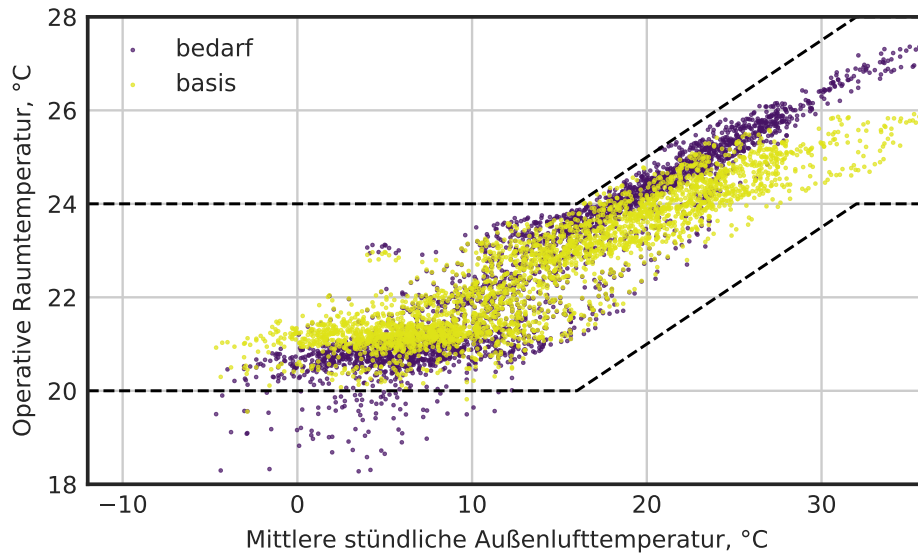


Abbildung 5.2: Stündliche Raumtemperaturen über mittlerer Tagesaußentemperatur während der Nutzungszeit für Bedarfsszenario und BKT im Basisbetrieb. Komfortgrenzen nach DIN 16798 – 1/NA, Kategorie II als gestrichelte Linien.

15 °C, befindet sich die BKT häufig im Leerlaufbetrieb, die Kerntemperatur weist daher eine weniger ausgeprägte Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur beziehungsweise der Außentemperatur auf. Im Bedarfsszenario mit deaktivierter BKT gleitet die Kerntemperatur frei zwischen 19 °C und 27 °C. Bei niedrigen Außentemperaturen liegt die Kerntemperatur von Decke und Fußboden dabei tendenziell unter der Raumsolltemperatur und umgekehrt.

Die Auswirkung der unterschiedlichen Regelstrategien und Wärmeübergabearten auf den thermischen Raumkomfort ist in Abbildung 5.2 erkennbar. Der Komfortbereich nach DIN 16798 – 1/NA Kategorie II in der Bedarfsvariante wird weitestgehend eingehalten. Trotz der Anpassung an die operative Temperatur ist eine geringfügige jährliche Komfortabweichung im Heizfall von 8 K h zu beobachten, die jedoch deutlich unterhalb des Grenzwerts nach Komfortkategorie II liegt (vgl. Berechnung Abschnitt 3.1.2). Im Vergleich zur Basisvariante mit BKT wird das Toleranzband nach DIN 16798 im Heiz- und Kühlfall besser ausgenutzt, da eine Temperierung nahe am Sollwert möglich ist.

Da beim UBB-Verfahren lediglich ein 5 K breites Sollwertband der Raumtemperatur (vgl. Tabelle 5.1) vorgegeben wird, tritt eine dementsprechend größere Schwankung auf. Die erlaubte Schwankungsbreite ließe sich nur mit einem erhöhten Energieverbrauch durch geringeren Leerlaufbetriebsanteil und ein häufigeres Umschalten zwischen Heizen und Kühlen (reduziertes Vorlauf-

Tabelle 5.2: Jahressummen der Unter-/Überschreitung des Komfortbereiches während der Nutzungszeit nach DIN EN 16798-1/NA für Bedarfsszenario und Basisbetrieb

	bedarf	basis
Unterschreitung, Kh	8	0
Überschreitung, Kh	0	0

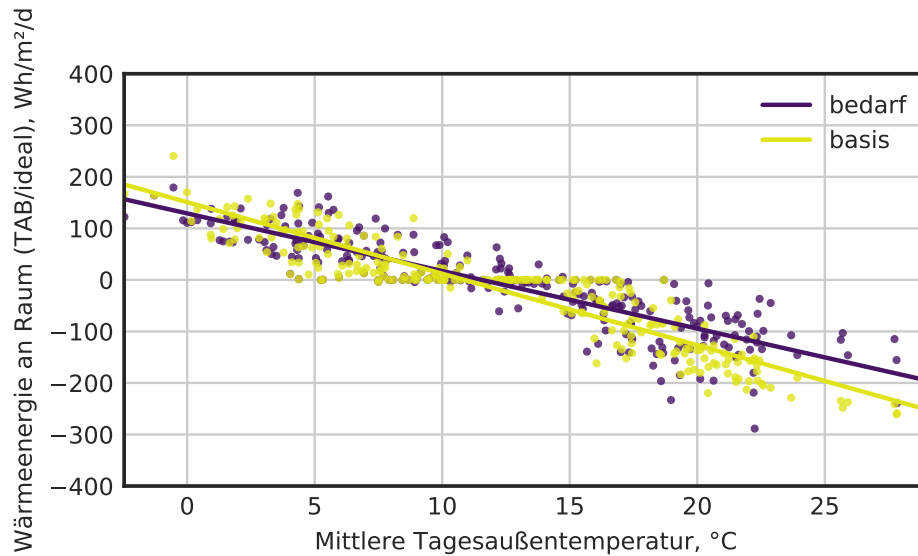


Abbildung 5.3: Tägliche in die Zone beziehungsweise in das TAB eingebrachte Wärmeenergie (durch BKT oder ideale Heizung/Kühlung) über mittlerer Tagesaußentemperatur mit jeweiliger Regressionsgerade für Bedarfs- und Basisbetrieb (nur Werktage).

temperatursollwertband) reduzieren. Durch die im vereinfachten Modell des UBB-Verfahrens enthaltenen Sicherheiten ist die Raumtemperatur im Kühlfall bei hohen Außentemperaturen tendenziell etwas zu niedrig. Dieses Verhalten wurde bereits beschrieben und ist erwartbar [49, S. 635]. Im Heizfall bei kalten Außentemperaturen liegt die Temperatur im BKT-Basisbetrieb näher am unteren Sollwert, hier wird eine Unterschwingung durch das Zusatzheizsystem der Radiatoren verhindert. In Abbildung 5.3 ist für die beiden Untersuchungsvarianten die täglich über das Heiz- und Kühlsystem eingebrachte beziehungsweise abgeführte Wärmeenergie über der jeweiligen Tagesaußentemperatur aufgetragen. Der erwartbare Zusammenhang zwischen Außenlufttemperatur und Wärmeenergie, mit Abweichungen aufgrund der Dynamik und unterschiedlicher solarer Einstrahlungssummen an den Tagen, wird deutlich. Hervorzuheben ist

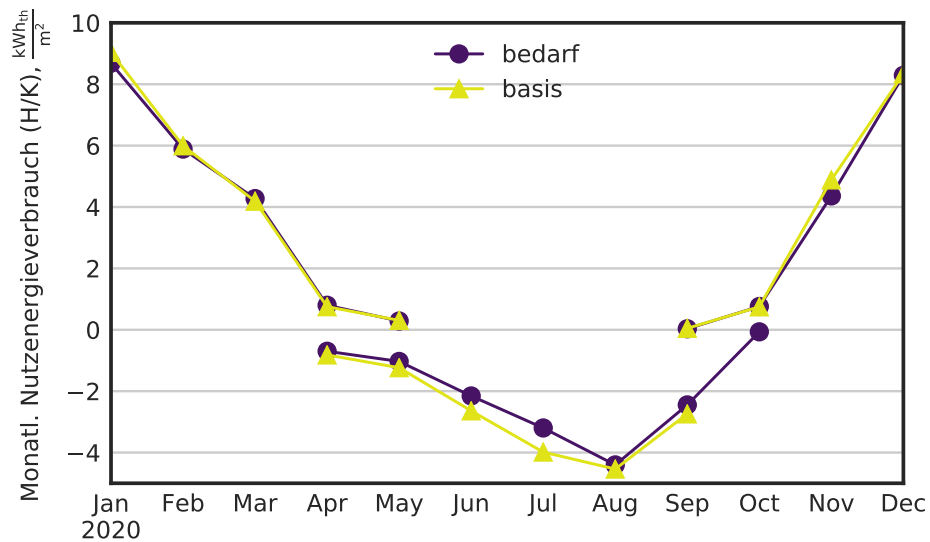


Abbildung 5.4: Monatlicher spezifischer Nutzenergieverbrauch (Heizen positiv, Kühlen negativ) für Bedarfs- und Basisbetrieb. Enthalten ist die Nutzenergie für BKT (nur Basisvariante, Radiatoren und RLT-Nacherhitzer).

die große Anzahl an Tagen, an denen keine Wärmeübergabe im Basisbetrieb durch die BKT stattfindet. Hier gleitet die Raumtemperatur im durch das UBB-Verfahren erlaubten Sollwertband und die BKT befindet sich im Leerlaufbetrieb. Dieser häufige Leerlaufbetrieb ist ursächlich für den nur leicht erhöhten monatlichen Nutzenergiebedarf beim BKT-Basisbetrieb im Vergleich zur Bedarfssimulation aus [Abbildung 5.4](#).

Im Vergleich der Wärmeübergabeszenarien zeigen sich die typischen Unterschiede zwischen aktiver und passiver Beheizung und Kühlung. Die größeren Temperaturschwankungen und der damit verbundene erhöhte Nutzenergiebedarf fallen jedoch im BKT-Basisbetrieb nur moderat aus. Die Eignung der UBB-Basissteuerung und die korrekte Parametrierung in der Simulation ist somit bestätigt.

5.2 UNTERSUCHUNGSVARIANTEN NETZGEFÜHRTER TAKTBETRIEB

Die Charakteristik des netzgeführten Taktbetriebs wird durch das Einschaltzeitverhältnis $\Delta t_1/\Delta t$ wesentlich bestimmt. Durch dessen Festlegung wird indirekt die Lage der Heiz- und Kühlkurven sowie die Breite des Vorlauftemperatursollwertbandes $\Delta \vartheta_{vl,takt}$ definiert (vgl. [Abschnitt 4.1.2](#)). Bei den unterschiedlichen Varianten des netzgeführten Taktbetriebs wurde das Einschaltzeitverhältnis zwi-

Tabelle 5.3: Eingabeparameter der Simulation für die untersuchte Basis- sowie die netzgeführten Taktvarianten

	basis	takt a	takt b	takt c
Einschaltzeitverhältnis $\frac{\Delta t_1}{\Delta t}$	1	0,5	0,3	0,7
Einschaltzeit Δt_1^* , h	12	6	3,5	8,5
Auslegungstemperatur Heizen $\vartheta_{vl,h,des}$, °C	24,4	25,3	26,6	24,8
Auslegungstemperatur Kühlen $\vartheta_{vl,k,des}$, °C	21,1	19,8	18,0	20,5
Vorlauf- und Auslegungstemperatur-Sollwertbandbreite $\Delta\vartheta_{vl}$ bzw. $\Delta\vartheta_{vl,takt}$, K	2,8	2,2	1,4	2,5

*gerundet auf 0,25 h

schen den Werten 0,3, 0,5 und 0,7 variiert (vgl. Tabelle 5.3). Bei einer vorgegebenen Taktperiodenlänge von

$$\Delta t = 12 \text{ h}$$

ergeben sich Einschaltzeiten zwischen 3,5 und 8,5 Stunden je Taktperiode. Als tägliche Startzeitpunkte für die 12-stündigen Taktperioden wurde 0 Uhr beziehungsweise 12 Uhr festgesetzt. Durch diese Festlegung ist für jede Taktperiode des Tages ein ähnlich großer Anteil an Sonnenenergie (tagsüber) und Windenergie (insbesondere nachts) verfügbar. Die Vorlauf- und Auslegungstemperaturpaare für die Heiz- und Kühlkurven, die sich nach dem UBB-Verfahren ergeben, sind ebenfalls in Tabelle 5.3 aufgeführt. Variante b ist die „stärkste“ Taktvariante: Beim kleinsten Einschaltzeitverhältnis findet die Beladung in der kürzesten Zeit statt. Die maximale beziehungsweise minimale Vorlauf- und Auslegungstemperatur betragen hier 26,6 °C respektive 18,0 °C im Heiz- und Kühlbetrieb bei gegebenem $\frac{\Delta t_1}{\Delta t}$. Die Vorlauf- und Auslegungstemperatur-Sollwertbandbreite $\Delta\vartheta_{vl}$ im Basisbetrieb ist durch das UBB-Verfahren über den Abstand zwischen Heiz- und Kühlkurve vorgegeben. Im Taktbetrieb ist dieses Verhältnis kennzeichnend für den unbestimmten Betrieb bei Außentemperaturen zwischen Heiz- und Kühlgrenze. Die Breite des Sollwertbandes bestimmt hier die nötige Laufzeit im unbestimmten Betrieb. In den Varianten wurde $\Delta\vartheta_{vl,takt}$ deshalb so gewählt, dass sich nach Gleichung 4.11 für den unbestimmten Taktbetrieb das zu Heiz- und Kühlbetrieb passende Einschaltzeitverhältnis ergibt.

In Abbildung 5.5 ist die mittlere stündliche Kerntemperatur des TAB über der jeweiligen Tagesaußentemperatur für Basis- sowie netzgeführten Taktbetrieb

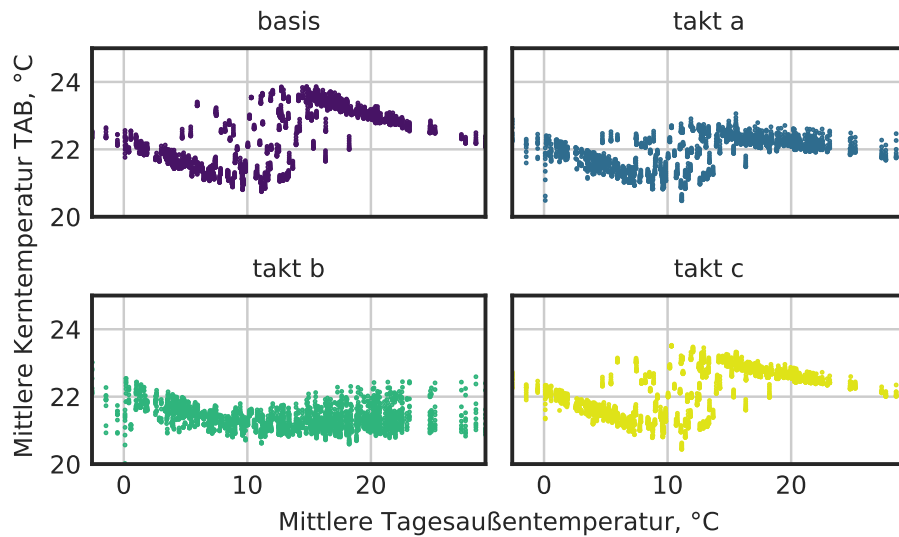


Abbildung 5.5: Mittlere stündliche Kerntemperatur (während der Nutzungszeit des Raums) des TAB über Tagesaußentemperatur für Basisbetrieb sowie netzgeführten Taktbetrieb in Variante a,b,c.

aufgetragen. In der Basisvariante wird der Effekt des breiten Vorlauftemperatur-sollwertbandes, in dem die Kerntemperatur bei moderaten Außentemperaturen ohne Wärmezufuhr frei „gleitet“, besonders deutlich. Mit abnehmendem Einschaltzeitverhältnis verringert sich auch das Sollwertband im unbestimmten Taktbetrieb. In Taktvariante b ist daher der Anteil der Zeiten im Leerlaufbetrieb erkennbar am geringsten. Bei den Taktvarianten zeigt sich insbesondere in den Bereichen niedriger und hoher Außentemperaturen die Charakteristik der intermittierenden Beladung und Entladung, mit einer damit verbundene Überschwungung der Kerntemperatur. Diese Schwankungsbreite steigt, durch die höheren Übertemperaturen und die geringere Beladungszeit, mit sinkendem Einschaltzeitverhältnis.

5.2.1 Thermischer Raumkomfort

In Abbildung 5.6 ist der stündliche mittlere Massenstrom der BKT-Kreise in kg/h als Teppichdiagramm dargestellt. Indirekt werden dadurch bei den Taktvarianten die Betriebszustände des BKT-Kreises im netzgeführten Betrieb nach Abbildung 4.7 visualisiert.

- Gelb: Beladung des BKT-Kreises im Heiz-/Kühl- oder unbestimmten Betrieb, $\dot{m}_{\text{bkt}} = \dot{m}_{\text{bkt,des}}$ und $\text{Sig}_{\text{netz}} = 1$

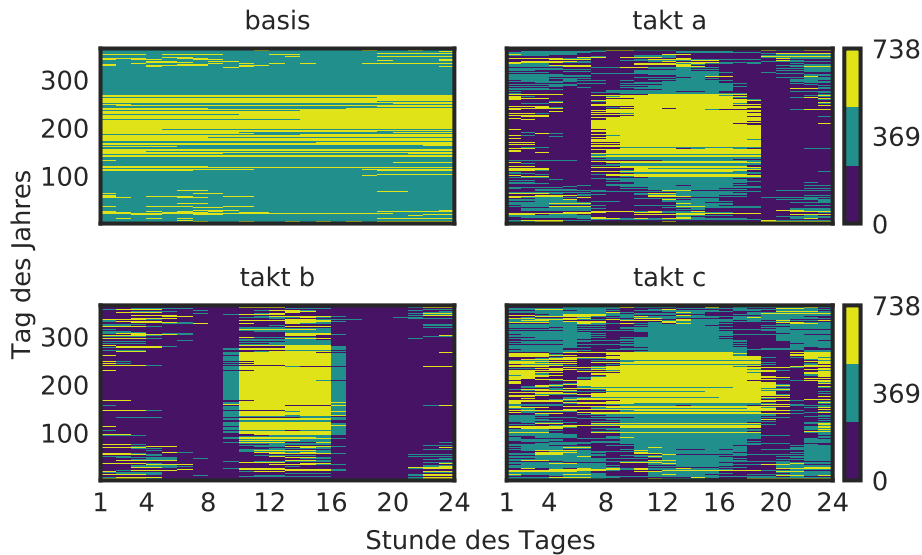


Abbildung 5.6: Betriebszustände und resultierende BKT-Massenströme (0/50/100% $\dot{m}_{\text{bkt,des}}$). Netzsignal nach Referenzgröße fEE, Basis- und Taktbetrieb Var. a,b,c.

- Türkis: Leerlaufbetrieb im Heiz-/Kühl- oder unbestimmten Betrieb, $\dot{m}_{\text{bkt}} = 0,5 \dot{m}_{\text{bkt,des}}$ und $\text{Sig}_{\text{netz}} = 1$
- Violett: Heizkreispumpe ausgeschaltet, $\dot{m}_{\text{bkt}} = 0$ und $\text{Sig}_{\text{netz}} = 0$

Es wird deutlich, dass bei der Taktvariante b die Einschaltzeit, bei der eine Beladung beziehungsweise ein Leerlaufbetrieb vorliegt, in Sommer und Übergangszeit fast ausschließlich um die Mittagsstunden auftritt. In der wind-dominierten Winterzeit sind die Phasen von BKT-Beladung oder Leerlaufbetrieb gleichmäßiger über die Taktperioden verteilt. Mit zunehmendem Einschaltzeitverhältnis ist die Gruppierung um die Mittagsstunden weniger stark ausgeprägt. Bei Taktvariante c schließlich ist auch im Sommer eine häufige Beladung in den Nachtstunden zu beobachten. Der thermische Raumkomfort ist beim Einsatz der netzgeführten Taktstrategie durch die möglichen langen Ausschaltzeiten bei $\text{Sig}_{\text{netz}} = 0$ potenziell gefährdet. Die stark ausgeprägte Periodizität der Netzreferenzgröße fEE über einen Betrachtungszeitraum von 24 Stunden bewirkt regelmäßig auftretende lange Ausschaltphasen. Bei Netzreferenzgrößen mit einer gleichmäßigeren Verteilung der „netzünstigen Zeiten“, wie beispielsweise dem EPEX-Day-Ahead-Preis, wären auch die Ausschaltzeiten tendenziell gleichmäßiger über die Taktperiode verteilt.

Das aus der Beladungscharakteristik folgende Zusammenspiel von TAB, Raum und Außenluft ist in Abbildung 5.7 für Taktvariante b im Kühlbetrieb beispiel-

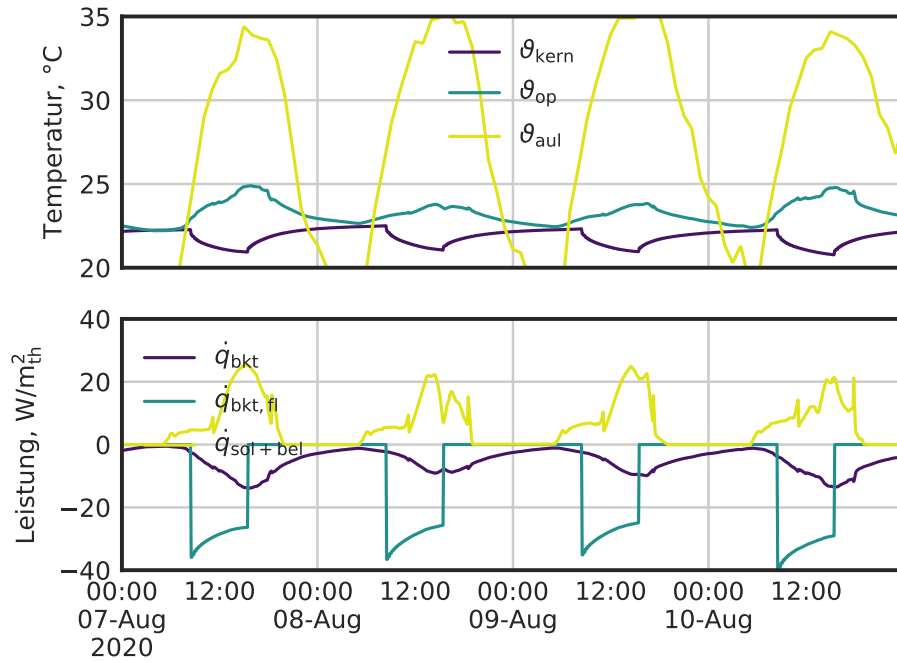


Abbildung 5.7: Beispielhafte Beladungscharakteristik für netzgeführten Taktbetrieb, Taktvariante b. Verlauf der Temperaturen und Leistungen wasserseitig ($\dot{q}_{\text{bkt,fluid}}$) sowie von Fußboden und Decke an die Zone (\dot{q}_{bkt}) für vier Augusttage.

haft visualisiert. Die 3,5-stündige Einschaltzeit je Taktperiode gruppiert sich an diesen Tagen ausschließlich um die Mittagszeit. Stellvertretend für die internen Lasten ist die Last durch Beleuchtung und solare Einstrahlung aufgetragen. Trotz der maximal großen Ausschaltzeitfenster bleibt die mittlere Kerntemperatur von Decke und Fußboden $\bar{\vartheta}_{\text{kern}}$ dauerhaft unter 23 °C . Das TAB ist deshalb in der Lage, die tagsüber auftretenden Lasten im Selbstregelleffekt abzuführen. Die Raumtemperatur bleibt über den gesamten Zeitraum moderat und innerhalb des adaptiven Komfortbereichs nach DIN EN 16798 – 1/NA Kategorie II. Im Hinblick auf die Anpassungsfähigkeit an den variablen Anteil fEE im Tagesverlauf ist die Festlegung auf die Startzeitpunkte 0 Uhr beziehungsweise 12 Uhr für die 12-stündigen Taktperioden vorteilhaft. Durch die Möglichkeit einer Gruppierung der täglichen Einschaltzeiten in die Zeiten mit der höchsten Sonneneinstrahlung kann das BKT-System der Periodizität der fEE insbesondere im Sommer besser folgen.

In Abbildung 5.8 sind die stündlichen Raumtemperaturen über das Jahr während der Nutzung für die jeweiligen Regelstrategien aufgetragen. Der geforderte Komfortbereich wird in keiner der Taktvarianten verlassen.

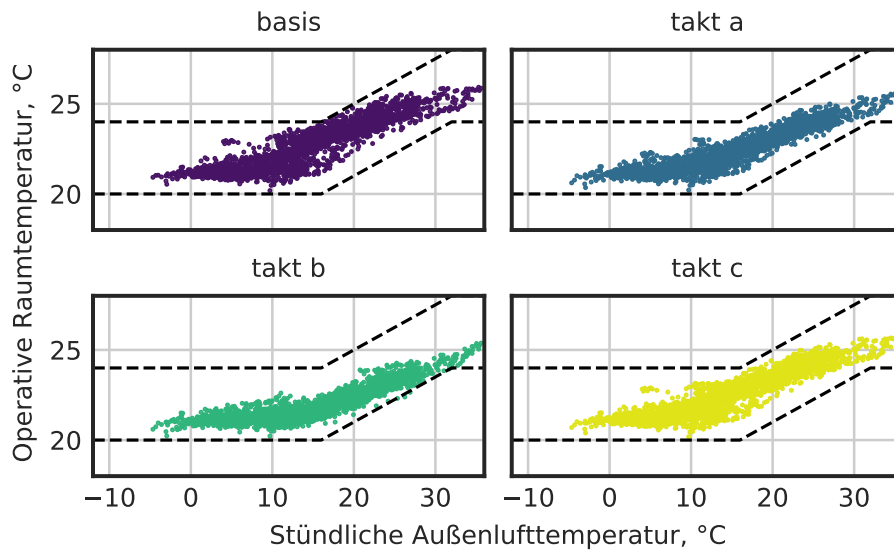


Abbildung 5.8: Stündliche Raumtemperaturen über mittlerer Tagesaußentemperatur für Basis- und Taktbetrieb Var. a,b,c. Komfortgrenzen nach DIN 16798 – 1/NA, Kat. II als gestrichelte Linien.

5.2.2 Energiebedarf und -effizienz

Die veränderte Charakteristik der netzgeführten Taktstrategien hat Auswirkungen insbesondere auf Verteilung und Übergabe von Wärme und Kälte über die BKT. Die Erzeugung von Wärme und Kälte indes verläuft relativ unabhängig, da Wärme- und Kältespeicher bei allen Strategien auf der gleichen Solltemperatur gehalten werden, wenn die Bedingungen dazu nach Abschnitt 3.1.1 erfüllt sind. Bestätigt wird das durch die Tatsache, dass die Jahresarbeitszahlen (JAZ) der reversiblen Wärmepumpe nahezu unverändert ($JAZ_H \approx 5,3$, $JAZ_K \approx 6,3$) bleiben bei Veränderung der Betriebsstrategie. Bei der Bewertung der Wärme- und Kälteverteilung ist die hydraulische Arbeit der BKT-Ladepumpe entscheidend. Bei den Taktstrategien findet eine kürzere Beladung mit höherer thermischer Leistung wasserseitig statt, wodurch die Effizienz der Verteilung systematisch höher liegt. Zusätzlich liegen, im Gegensatz zur Basisstrategie, Phasen mit komplett ausgeschalteter BKT-Ladepumpe vor (vgl. Abbildung 5.6). Die jährlichen Ausschaltzeiten steigen mit sinkendem Einschaltzeitverhältnis bei den Taktvarianten, der Anteil der Stunden im Leerlaufbetrieb sinkt. Im Hinblick auf den Nutzenergieverbrauch durch die BKT können durch die Art der Wärmeübergabe mit höheren Temperaturdifferenzen jedoch höhere Verbrauchswerte durch zu hohe beziehungsweise zu niedrige Raumtemperaturen bei den Taktstrategien auftreten. Insbesondere im Kühlbetrieb in Sommer und Übergangszeit

ist dies angesichts der Temperaturverteilungen in Abbildung 5.8 zu erwarten. Abbildung 5.9 zeigt die Tagessummen der in das TAB eingespeisten beziehungs-

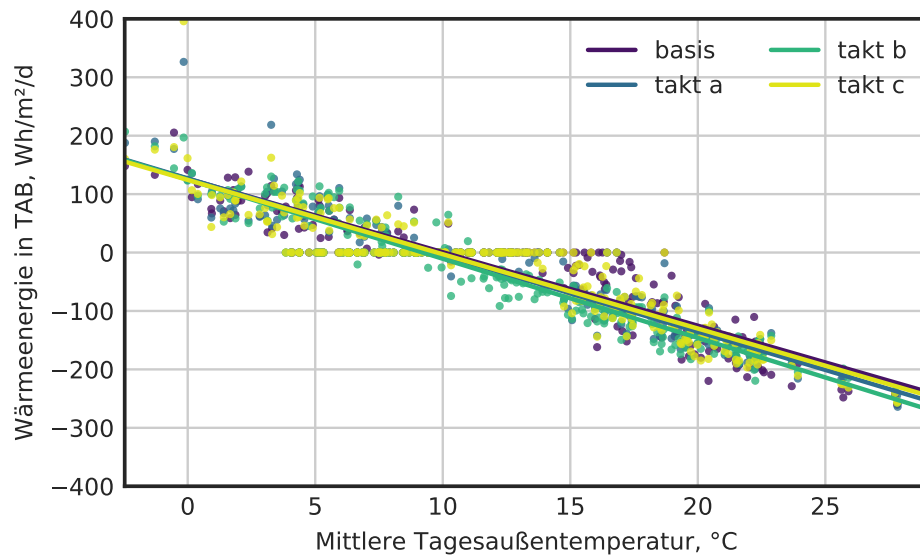


Abbildung 5.9: Tägliche in TAB eingebrachte Wärmeenergie über mittlerer Tagesaußentemperatur mit jeweiliger Regressionsgerade für Basisbetrieb und Taktvarianten a,b,c.

weise entzogenen Wärmeenergie, die zeitverzögert auch an den Raum abgegeben wird. In der Auswertung wurden nur Werkzeuge berücksichtigt. An Tagen mit signifikantem Heizbedarf unterscheiden sich die drei Varianten sowie der Basisbetrieb nur unwesentlich in der Höhe der täglich eingespeisten Wärmeenergie. Im Übergangsbereich wird deutlich, dass sich die Basisvariante sowie die Taktvarianten mit längeren Einschaltzeiten häufiger im Leerlaufbetrieb ohne Heiz- oder Kühlaktion befinden. Im Kühlbetrieb, bei Temperaturen über 10 °C, steigt die entzogene Wärmemenge mit dem Taktbetrieb und dort wiederum mit sinkendem Einschaltzeitverhältnis. Trotzdem liegen die entzogenen Wärmemengen aller untersuchten Varianten nah beieinander, die geringen Differenzen werden anhand der Regressionsgeraden deutlich. Diese geringen Unterschiede sprechen für die Eignung des Taktbetriebs auch bei niedrigen Einschaltzeiten und im diskontinuierlichen Betrieb. In den Verläufen der monatlichen über das TAB wasserseitig aufgenommenen beziehungsweise abgegebenen Nutzenergie in Abbildung 5.10 bestätigt sich die tageweise Auswertung. Auch hier wird im Kühlfall in den Sommermonaten in den Taktvarianten geringfügig mehr Wärme entzogen. Der Effekt verstärkt sich mit sinkendem Einschaltzeitverhältnis und

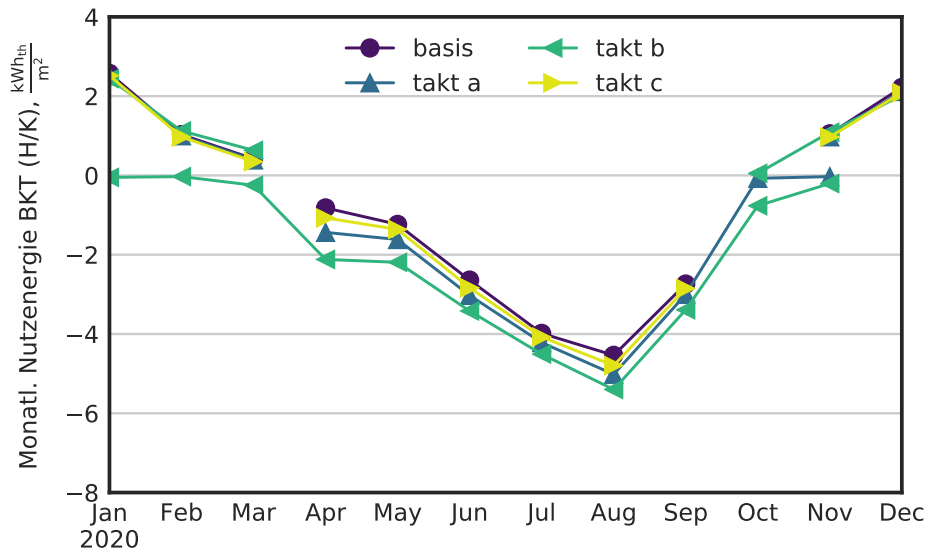


Abbildung 5.10: Monatlich eingespeicherte Wärmeenergie (H/K) der BKT für Basisbetrieb und netzgeführte Taktvarianten a,b,c.

wird am deutlichsten bei Variante b. Nach der Auswertung der Nutzenergie sind in Abbildung 5.11 die Auswirkungen der Betriebsstrategien auf den elektrischen Energieverbrauch für BKT-Ladepumpe („vert“), Erzeugung über die reversible Wärmepumpe („erz h/k“) sowie den Energieverbrauch zur Luffterhitzung durch die Zusatzheizsysteme (Nacherhitzer der RLT-Einheit und Radiatoren, „ideal h“) dargestellt. Der erhöhte Nutzenergieverbrauch schlägt sich in einem höheren Endenergieverbrauch für die Erzeugung im Kühlfall nieder. In Verbindung mit dem gleichzeitig moderat reduzierten Stromverbrauch für die Verteilung erklärt sich dadurch die leicht erhöhte Effizienz der Wärme- und Kälteversorgung für die Taktvarianten (vgl. Abbildung 5.12). Die Wärmemenge, die der Zone durch die Zusatzheizsysteme Radiatoren und den Nacherhitzer zugeführt werden muss, steigt bei den Taktstrategien und dort wiederum mit abnehmendem Einschaltverhältnis. Durch die Radiatoren wird in den Ausschaltzeiten ein Unterschwingen der Solltemperatur, wie es sonst bei der taktenden Beladung auftreten würde, verhindert.

5.2.3 Netzdienlichkeit

Für die Daten aus Tabelle 5.4 wurde die absolute Netzdienlichkeitskennzahl GSC auf Basis der Netzreferenzgröße fEE nach Gleichung 2.1 mit einem Zeitschritt von einem Jahr berechnet. Der Wert wird zum einen für den Strombezug zur Erzeugung und Verteilung von Wärme beziehungsweise Kälte über die BKT

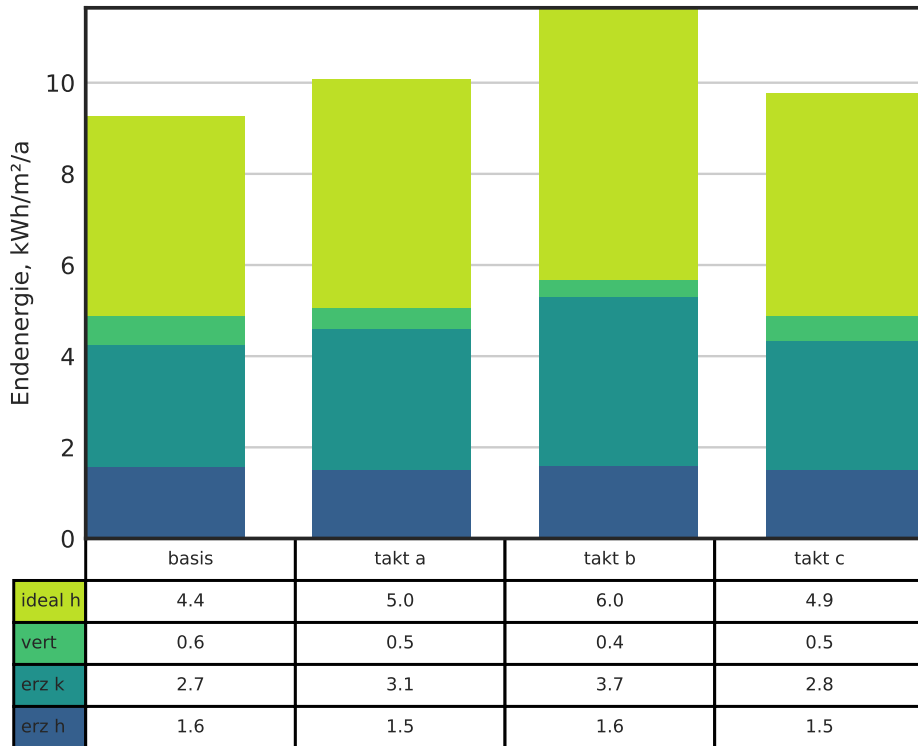


Abbildung 5.11: Flächenbezogener Jahresendenergieverbrauch für Erzeugung und Verteilung von Wärme und Kälte, Basisbetrieb und Taktvarianten a,b,c.

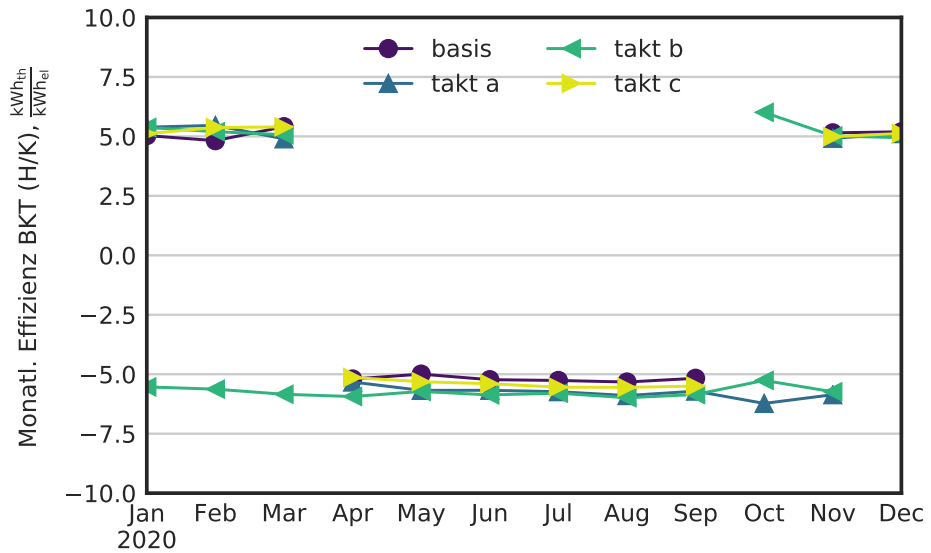


Abbildung 5.12: Monatliche Energieeffizienz für Erzeugung und Verteilung von Wärme und Kälte über die BKT, Basisbetrieb und Taktvarianten a,b,c.

Tabelle 5.4: Jährliche Netzdienlichkeitskoeffizienten GSC_{bkt} und $GSC_{\text{bkt,direkt}}$ bei Netzreferenzgröße fEE (nur Werktage berücksichtigt)

	basis	takt a	takt b	takt c
GSC_{bkt}	0,94	1,22	1,4	1,0
$GSC_{\text{bkt,direkt}}$	0,97	1,28	1,45	1,09

als GSC_{bkt} ermittelt. Zum anderen stellt $GSC_{\text{bkt,direkt}}$ den theoretischen Wert

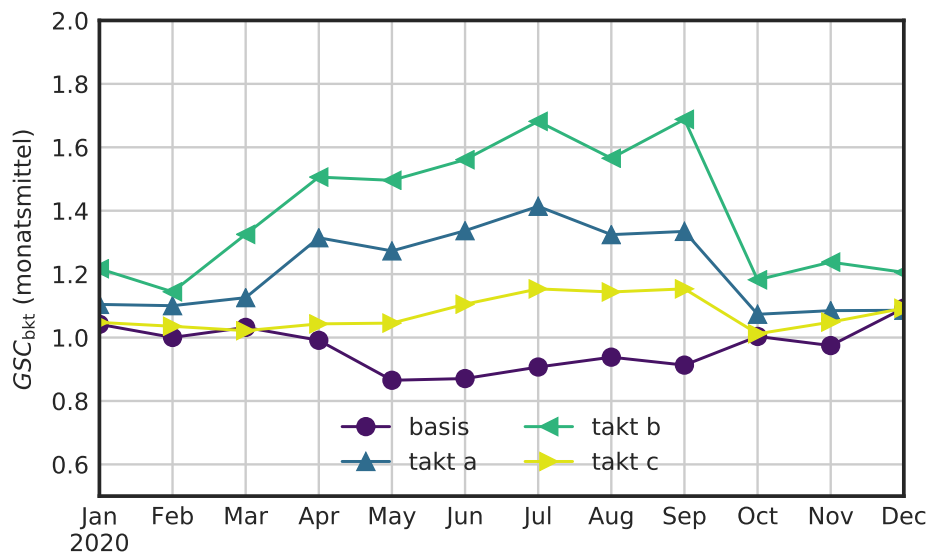


Abbildung 5.13: Monatliche Netzdienlichkeitskennzahl der BKT in Heiz- und Kühlbetrieb für die elektrischen Leistungen für Erzeugung und Verteilung, Basis- und Taktvarianten a,b,c (Netzreferenzgröße Anteil fEE)

der Netzdienlichkeitskennzahl bei direkter, das heißt ohne zeitlichen Versatz bereitgestellter Wärme und Kälte dar. Die elektrische Arbeit für Erzeugung und Verteilung wird dazu für die Berechnung nach Gleichung 2.1 durch die in die Betondecke eingespeiste thermische Energie $Q_{\text{bkt,fluid}}$ ersetzt. Durch den Vergleich der beiden Netzdienlichkeitskennzahlen lässt sich der Effekt der zwischengeschalteten Wasserspeicher quantifizieren.

In Tabelle 5.4 zeigt sich, dass das Ziel der Netzführung der BKT, nämlich eine deutliche Erhöhung des Anteils fEE beim Strombezug, erreicht wird. Über die unterschiedlichen Einschaltzeitverhältnisse erhöht sich GSC_{bkt} bei den Varianten a, b und c um 29 %, 49 % beziehungsweise 15 %. Die Werte für GSC_{bkt} liegen

um 4 bis 9 % unter den idealisierten Werten für $GSC_{\text{bkt,direkt}}$. Die Auswirkung der typisch ausgelegten Speicher als „Verzögerungsglied“ kann somit als gering bezeichnet werden.

Bei monatsweiser Ermittlung der Netzdienlichkeitskennzahl werden die Unterschiede zwischen Heiz- und Kühlbetrieb deutlich. Im Basisbetrieb ist die BKT in Winter und Übergangszeit mit Werten um 1 als netzneutral zu bezeichnen. Der Netzeinfluss verschlechtert sich im Kühlbetrieb der Basisvariante leicht auf Werte um 0,9. Für den netzgeführten Taktbetrieb sind die Verbesserung des jährlichen GSC_{bkt} insbesondere auf den Kühlbetrieb in Sommer und Übergangszeit zurückzuführen. Im Winter lässt sich die Netzdienlichkeit weniger deutlich verbessern. Dies ist auf die weniger stark ausgeprägte Periodizität aufgrund eines geringeren PV- und eines höheren Windanteils im Strommix in diesen Zeiten zurückzuführen (vgl. Abbildung 4.9). Ein oder mehrere Tage mit relativ konstantem Anteil von fEE kommen somit häufiger vor. Die Einschaltzeiten lassen sich bei einer vorgegebenen Periodenlänge von 12 Stunden dann weniger effektiv verschieben.

Durch die in diesem Kapitel untersuchte Variation des Einschaltzeitverhältnisses wurde die Auswirkung dieses maßgeblichen Parameters auf die Betriebscharakteristik der BKT deutlich: Im Hinblick auf die Einschaltzeiten erlaubt die Wahl eines niedrigen Wertes für $\frac{\Delta t_1}{\Delta t}$ eine besonders netzdienliche Gruppierung der Einschaltzeiten. Beim thermischen Raumkomfort werden die Anforderungen nach DIN EN 16798-1/NA in allen Varianten eingehalten. Tendenziell niedrigere Raumtemperaturen sind jedoch bei sinkendem Einschaltzeitverhältnis besonders im Kühlfall zu beobachten. In Folge zeigt sich, besonders in Variante b, ein erhöhter Endenergiebedarf für Zusatzheizung und Kälteerzeugung. Die ausgeprägte Periodizität der Netzreferenzgröße ‚Anteil fEE‘ im Tagesrhythmus wirkt sich positiv auf das Ziel einer Erhöhung der Netzdienlichkeit aus. Ähnliche Ergebnisse sind aufgrund der hohen Korrelation bei der Netzreferenzgröße ‚Residuallast‘ zu erwarten. Für die ebenfalls in Frage kommenden Referenzgröße ‚EPEX-Day-Ahead-Börsenstrompreis‘ ist aufgrund der Auswertungen aus Kapitel 4 eine weniger ausgeprägte Gruppierung der Einschaltzeiten vorhersagbar. Somit ist einerseits eine geringere Steigerung der Netzdienlichkeit zu erwarten, andererseits kommt es an typischen Tagen nicht zu einer derartig starken Gruppierung der Ein- respektive Ausschaltzeiten.

FAZIT & AUSBLICK

In der Arbeit wurde eine netzgeführte Taktstrategie auf Basis des UBB-Verfahrens für eine Bürozone entwickelt und untersucht. Die gebäudetechnische Ausrüstung zur Erzeugung, Verteilung und Übergabe der Wärme und Kälte wurde in einem gekoppelten Gebäude-Anlagen-Modell modelliert. Basis der Simulationsstudien waren die Planungsunterlagen eines im Jahr 2020 fertig gestellten Nichtwohngebäudes. Die Architektur der Zone eignet sich aufgrund des guten Wärmeschutzes, der verhältnismäßig schweren Bauweise und des effektiven außenliegenden Sonnenschutzes gut für die Temperierung über eine Bauteilaktivierung. Die Nutzung von Umweltenergie und die Verbindung der Wärme- und Kälteerzeugung zum elektrischen Energiesystem erfolgt über die modellierte reversible Sole-Wasser-Wärmepumpe. Aufbauend auf dem im UBB-Verfahren beschriebenen Taktbetrieb wurde die Möglichkeit zur Netzführung dieses Taktbetriebs erarbeitet. Dabei wurde auf Grundlage einer stromnetzbezogenen Referenzgröße eine Netzführung implementiert, womit ein diskontinuierlicher Taktbetrieb nach Vorgabe eines 12-stündigen Fahrplans ermöglicht wird. Der netzgeführte Taktbetrieb lässt dabei offen, welche Netzreferenzgröße für die Netzführung verwendet wird. Die Charakteristik der Netzreferenzgrößen Anteil fEE, EPEX-Börsenstrompreis und Residuallast wurde anhand deutschlandweiter historischer Daten der Jahre 2017 bis 2020 untersucht. Es zeigte sich eine höhere Korrelation zwischen Residuallast und Anteil fEE. Aufgrund der ausgeprägten Periodizität im Tagesrhythmus eignen sich diese besonders gut zur Erhöhung der Netzdienlichkeit durch einen netzgeführten Betrieb der BKT. In den durchgeführten Simulationsstudien wurde der netzgeführte Taktbetrieb mit unterschiedlichen Einschaltzeitverhältnissen (30, 50 und 70 %) untersucht. Die erforderliche Wärmeenergie wurde damit in mehr oder weniger verkürzten Zeitfenstern der Betondecke und damit dem Raum zu- beziehungsweise abgeführt. Inwieweit die nötige Einschaltzeit der BKT reduziert werden kann, ist technisch durch die möglichen Vorlauftemperaturen in Heiz- und Kühlbe-

trieb vorbestimmt. Abhängig von der Art der Wärme- beziehungsweise Kälteerzeugung wird hierüber auch die Energieeffizienz des Systems wesentlich beeinflusst. Auf der Raumseite sind geringere Übertemperaturen der BKT im Hinblick auf das Regelverhalten als günstig zu bewerten.

Im Ergebnis zeigte sich, dass bei allen Varianten des netzgeführten Taktbetriebs der thermische Raumkomfort bei nahezu konstant hoher Energieeffizienz des Gesamtsystems eingehalten werden kann. Die Zielstellung einer Erhöhung der Netzdienlichkeit des BKT-Systems wird erreicht. Je nach Variante kann der Anteil an Strom aus fEE in der Betrachtung für das Jahr 2020 um 6 bis 67 % erhöht werden. Große Verbesserungen der Netzdienlichkeit werden insbesondere im Kühlfall in den Monaten April bis September erreicht, da hier eine gute Anpassung des netzgeführten Taktbetriebs an die ausgeprägte Periodizität der Netzreferenzgröße Anteil fEE möglich ist. Die aufgeführten Ergebnisse wurden bei der zum Stand der Technik üblichen Auslegung der einzelnen Anlagenteile erzielt. Dies verdeutlicht, dass das netzgeführte Taktverfahren insbesondere für Bestandsgebäude hohes Potenzial aufweist.

In der Arbeit wurde das gesamte System der thermischen Versorgung der Untersuchungszone von Erzeugung bis Übergabe untersucht. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der erarbeiteten BKT-Betriebsstrategie ist eine Ermittlung der Heiz- und Kühlkurven nach dem UBB-Verfahren. Dies bedeutet für die Planung einen erhöhten Aufwand im Vergleich zu einfachen Betriebsstrategien mit konstanten Vorlauftemperaturen ohne Berücksichtigung der internen Lastschränken. In weiteren Untersuchungen sowie in der praktischen Umsetzung muss das Verfahren an die spezifischen Anlagenkonzepte, insbesondere im Bezug auf die Hydraulik und die Charakteristik der Erzeugungsseite angepasst werden. Auch das Zusammenspiel mit weiteren strombasierten Wärme- und Kälteerzeugern im Gebäude sollte dann analysiert werden. Ideal wäre die Untersuchung des Verfahrens in der Praxis in Form einer Feldstudie.

Mit steigendem Anteil von Stromerzeugung aus fEE gewinnen steuerbare Verbraucher zukünftig weiter an Bedeutung. Durch intelligentes Lastmanagement dieser Verbraucher in Gebäuden wird der nötige, beschleunigte Ausbau der EE ermöglicht. Die thermische Kapazität der Betonstruktur eines Gebäudes kann hier sowohl bei Bestands- als auch Neubauten zu einer Erhöhung der Netzdienlichkeit im Sinne des Energiesystems beitragen.

ANHANG

A.1 ABBILDUNGEN

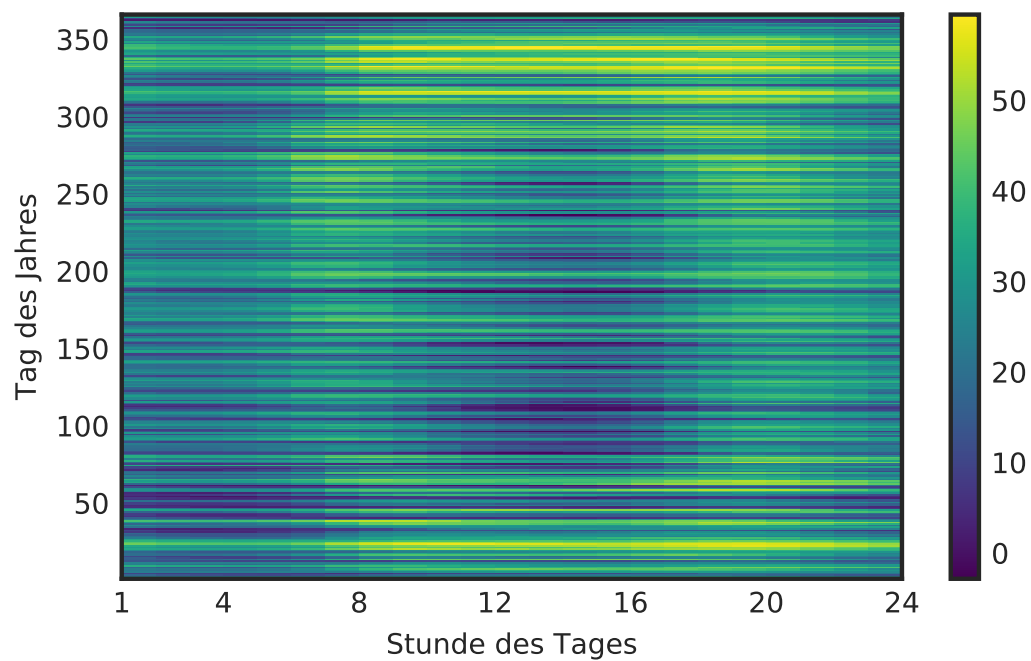


Abbildung a.1: Zu Kapitel 4: Teppichdiagramm für die Netzreferenzgröße Residuallast in GW für das Untersuchungsjahr 2020 (deutschlandweit, Daten aus [8]).

A.2 TABELLEN

Tabelle a.1: Zu Kapitel 3: Vereinfachter Wandaufbau der Außen- sowie Innenwände des modellierten Gebäudemodells

Bezeichnung	Schicht	Dicke m	Dichte $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Wärmekap. $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	Leitfähigkeit $\frac{\text{kJ}}{\text{hmK}}$	Thermischer Widerstand $\frac{\text{hm}^2\text{K}}{\text{kJ}}$
AW	Mineralwolle	0,115	20	1	0,126	–
	Stahlbeton	0,18	2400	1	5,83	–
	Kalkzementputz	0,01	1800	1	3,13	–
IW1	Gips	0,03	900	1	0,9	–
	Luftschicht vertikal	–	–	–	–	0,036
	Gips	0,03	900	1	0,9	–
IW2	Mauerwerk Kalksandstein	0,15	1800	1	3,96	–

Tabelle a.2: Zu Kapitel 3: Für die Modellierung verwendete Parameter für Wärmepumpe, Speicher sowie RLT-Anlage und Radiatoren (absolute Werte)

Verdichterleistung WP, W	480
Heizleistung WP (Auslegung), W	2214
Kälteleistung WP (Auslegung), W	2878
COP_h WP (Auslegung)	4,6
COP_k WP (Auslegung)	6,0
Wasservolumen Speicher H, m^3	0,24
Wasservolumen Speicher K, m^3	0,31
A/V- Verhältnis Speicher (H), $\frac{1}{\text{m}}$	9,4
A/V- Verhältnis Speicher (K), $\frac{1}{\text{m}}$	8,5
Wärmeverlustkoeffizient Speicher (H/K), $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	0,92
RLT Zu-/ Abluftvolumenstrom (Auslegung), $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	561
Zulufttemperatur H, °C	19
Zulufttemperatur K (minimal), °C	19
Temperaturänderungsgrad WRG, %	73
Spez. Ventilatorleistung (Zuluft/Abluft), $\frac{\text{W}_s}{\text{m}^3}$	1250
Heizleistung Radiatoren (Auslegung), W	1476
Strahlungsanteil Zusatzheizung, %	40
Nacht- und Wochenendabsenkung Radiatoren, K	5

LITERATUR

- [1] R. Harthan u. a. *Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung*. de. Techn. Ber. Umweltbundesamt, 2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abschaetzung-der-treibhausgasminderungswirkung-des>.
- [2] Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz. *Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist*. Dez. 2019. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/ksg/index.html>.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). *Informationsportal Erneuerbare Energien - Erneuerbare Energien in Zahlen*. URL: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html (besucht am 11. 11. 2021).
- [4] Fraunhofer ISE. *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Download von www.pv-fakten.de, Fassung vom 19.12.2020. 2020.
- [5] Ingo Stadler und Michael Sterner. *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Energiespeicher. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. DOI: [10.1007/978-3-662-48893-5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-48893-5).
- [6] Mario Götz u. a. "Economic Potential of the "Power-to-Heat" Technology in the 50Hertz Control Area". In: *Enerday 0* (2013), S. 1–19.
- [7] Hans-Martin Henning und Andreas Palzer. *Energiesystem Deutschland 2050*. 2013. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE_Energiesystem-Deutschland-2050.pdf (besucht am 06. 11. 2021).
- [8] *ENTSO-E Transparency Platform*. URL: <https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show> (besucht am 06. 01. 2021).
- [9] Konstantin Klein, Michael Hermann und Sebastian Herkel. "Gebäude als netzdienliche Wärmespeicher: Anforderungen an die Gebäude der Zukunft". In: *Bautechnik* 93.1 (2016), S. 1–7. ISSN: 14370999.

- [10] Hans-Martin Henning und Andreas Palzer. *Was kostet die Energiewende?* Techn. Ber. Freiburg i. Br.: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2015.
- [11] Agora Energiewende, Fraunhofer IWES und Fraunhofer IBP. *Wärmewende 2030*. Techn. Ber. Agora Energiewende, Fraunhofer IWES und Fraunhofer IBP, 2017. URL: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Sektoruebergreifende%7B%5C_%7DEW/Waermewende-2030%7B%5C_%7DWEB.pdf?utm%7B%5C_%7Dsource=baulinks%7B%5C%7Dutm%7B%5C_%7Dcampaign=baulinks.
- [12] Gerhard Hausladen u. a. *Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme - Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden (Projektbericht)*. Techn. Ber. Stuttgart: Technische Universität München, 2014.
- [13] Thomas Auer u. a. *Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem. Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland*. Techn. Ber. Technische Universität München, 2017. DOI: [10.14459/2017md1378336](https://doi.org/10.14459/2017md1378336).
- [14] Doreen Kalz und Konstantin Klein. *NETZREAKTIVE GEBÄUDE - GANZHEITLICHE BEWERTUNG VON BAUPHYSIK UND GEBÄUDEENERGIESYSTEMEN EIN-SCHLIESSLICH IHRER ROLLE IN DER ENERGIE-WIRTSCHAFT: ENERGIE, EXERGIE, LEISTUNGS- BEZUG UND -ABGABE - Abschlussbericht 2017*. Techn. Ber. Freiburg Kassel: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Fraunhofer-Institut für Windenergie- und Energiesystemtechnik (IWES), 2017.
- [15] Jürg Tödli u. a. *TABS Control. Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen*. 1. Auflage. Faktor Verlag, 2009. ISBN: 978-3-905711-05-9.
- [16] M. Gwerder u. a. "Control of thermally-activated building systems (TABS)". In: *Applied Energy* 85.7 (2008), S. 565–581. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.08.001>.
- [17] W.A. Beckmann, J.A. Duffie und S.A. Klein. *TRNSYS – A Transient System Simulation Program*. 2009.
- [18] M. Gwerder u. a. "Control of thermally activated building systems (TABS) in intermittent operation with pulse width modulation". In: *Applied Energy* 86.9 (2009), S. 1606–1616. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.008>.

- [19] Konstantin Klein, Doreen Kalz und Sebastian Herkel. "Netzdienlicher Betrieb von Gebäuden: Analyse und Vergleich netzbasierter Referenzgrößen und Definition einer Bewertungskennzahl". In: *Bauphysik* 36.2 (2014), S. 49–58. ISSN: 14370980.
- [20] Michael Sterner u. a. *Der positive Beitrag dezentraler Batteriespeicher für die stabile Stromversorgung*. 2015. URL: <https://www.fenes.net/blog-post/der-positive-beitrag-dezentraler-batteriespeicher-fuer-eine-stabile-stromversorgung/> (besucht am 17. 12. 2020).
- [21] Konstantin Klein. "Quantifying the grid support of building energy systems - Evaluation of grid-supportive concepts for space heating and cooling in non-residential buildings". Diss. Karlsruher Institut für Technologie, 2017.
- [22] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. *DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau: TEC1.4 Einsatz und Integration von Gebäudetechnik*. 2018. URL: https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/de/gebaeude/neubau/kriterien/05_TEC1.4_Einsatz-und-Integration-von-Gebaedetechnik.pdf (besucht am 08. 07. 2021).
- [23] Stefan Mischinger u. a. *Netzdienlicher Einsatz von Flexibilitäten*. Techn. Ber. 2019.
- [24] M. K. Petersen u. a. "A taxonomy for modeling flexibility and a computationally efficient algorithm for dispatch in Smart Grids". In: *2013 American Control Conference*. 2013, S. 1150–1156.
- [25] International Energy Agency. *Annex 67: Energy Flexible Buildings*. URL: <https://www.annex67.org> (besucht am 20. 07. 2020).
- [26] International Energy Agency. *Summary report - Energy in Buildings and Communities Programme Annex 67 Energy Flexible Buildings*. Techn. Ber. International Energy Agency, 2019.
- [27] Rune Grønberg Junker u. a. "Characterizing the energy flexibility of buildings and districts". In: *Applied Energy* 225. February (2018), S. 175–182. ISSN: 03062619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2018.05.037](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.037).
- [28] Thorsten Beckers u. a. *Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen : integriertes Energiekonzept 2050, Strom, Wärme, Verkehr, Industrie : Abschlussbericht (Kurzfassung)*. Berlin, 2018.

- [29] Philip Sterchele u. a. *Wege Zu Einem Klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen*. Freiburg/Brsg., 2020.
- [30] Malte Jansen u. a. *Strommarkt-Flexibilisierung Hemmnisse und Lösungskonzepte Eine Studie im Auftrag des BEE e.V.* 2015.
- [31] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). *Ergebnispapier Strom 2030*. 2017. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/strom-2030-ergebnispapier.pdf?__blob=publicationFile&v=26.
- [32] Ecofys und Fraunhofer IWES. *Smart-Market-Design in deutschen Verteilnetzen*. 2017. DOI: [10.1080/17503175.2014.905050](https://doi.org/10.1080/17503175.2014.905050). URL: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Smart_Markets/Agora_Smart-Market-Design_WEB.pdf (besucht am 03. 02. 2021).
- [33] *DIN V 18599-10:2018-09 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Berlin, 2018.
- [34] Johannes Jungwirth. "Lastmanagement in Gebäuden. Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung mit einem adaptiven Gebäudemodell zur Flexibilisierung der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden." Diss. Technische Universität München, 2014.
- [35] *DIN EN ISO 11855-1:2016-11 Umweltgerechte Gebäudeplanung - Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme - Teil 1: Begriffe, Symbole und Komfortkriterien (ISO 11855-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 11855-1:2015*. Berlin, DE, 2016.
- [36] *DIN EN ISO 11855-2:2016-11 Umweltgerechte Gebäudeplanung - Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme - Teil 2: Bestimmung der Auslegungs-Heiz- bzw. Kühlleistung (ISO 11855-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 11855-2:2015*. Berlin, 2016.
- [37] Markus Koschenz und Beat Lehmann. *Thermoaktive Bauteilsysteme tabs*. Dübendorf: EMPA Energiesysteme/Haustechnik; 2000. ISBN: 3905594196.
- [38] *VDI 6034:2017-08 Raumkühlflächen - Planung, Bau und Betrieb*. Berlin, 2017.
- [39] Bjarne W Olesen und Francesco Currò Dossi. "Operation and control of activated slab heating and cooling systems". In: *CIB world building congress*. 2004.

- [40] B. Lehmann u. a. "Thermally activated building systems (TABS): Energy efficiency as a function of control strategy, hydronic circuit topology and (cold) generation system". In: *Applied Energy* 88.1 (2011), S. 180–191. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.08.010>.
- [41] Jürg Tödli u. a. "Integrated design of thermally activated building systems and of their control". In: *Proceedings of the 9th REHVA World Congress for Building Technologies, Helsinki, Finland*. 2007, S. 10–14.
- [42] Beat Lehmann u. a. "Control of concrete core conditioning systems". In: *8th REHVA World Congress for Building Technologies–CLIMA 2005*. 2005.
- [43] Jürg Tödli u. a. "Regelung und Steuerung von thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS)". In: *Bauphysik* 31.5 (2009), S. 319–325. DOI: <https://doi.org/10.1002/bapi.200910042>.
- [44] *DIN EN ISO 52017-1:2018-04, Energieeffizienz von Gebäuden – Fühlbare und latente Wärmelasten und Innentemperaturen – Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren (ISO_52017-1:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_52017-1:2017*. Berlin, 2018.
- [45] *VDI 6007 Blatt 1:2015-06 Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Raummodell*. Berlin, 2015.
- [46] Werner Güntensperger u. a. "Control of concrete core conditioning systems". In: *8th REHVA World Congress for Building Technologies–CLIMA 2005*. 2005.
- [47] D. Kalz, M. Sonntag und R. Koenigsdorff. *LowEx:Monitor: Exergetisches Monitoring für Gebäude mit Erdwärmennutzung. Abschlussbericht*. FKZ 0327466A-F. 2012.
- [48] Jens Pfafferott, Doreen Kalz und Roland Koenigsdorff. *Bauteilaktivierung - Einsatz - Praxiserfahrungen - Anforderungen*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2015. ISBN: 978-3-816-79357-1.
- [49] R. Koenigsdorff und M. Bachseitz. "VEREINFACHTE SIMULATIONSGESTÜTZTE AUSLEGUNG VON THERMOAKTIVEN BAUTEILSYSTEMEN ALS ERWEITERUNG DES UBB-VERFAHRENS". In: *BauSIM 2014 Fifth German-Austrian IBPSA Conference*. 2014, S. 633–640.
- [50] Dominik Wystrcil. "Ein Beitrag zur thermo-hydraulischen Optimierung niedrigexergetischer Wärme- und Kälteversorgungssysteme". Diss. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, 2016.

- [51] Prof. Dr.-Ing. Dirk Bohne Ingenieure GmbH. *Planungs- und Berechnungsunterlagen Nichtwohngebäude*. unveröffentlicht. 2017.
- [52] Oliver Mercker u. a. "Short-term experiments with borehole heat exchangers and model validation in TRNSYS, Renewable Energy: An International Journal". In: *Renewable Energy: An International Journal*. Renewable Energy: An International Journal 74 (2015), S. 471–477. ISSN: 0960-1481. DOI: [10.1016/j.renene.2014.07.052](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.052).
- [53] D. Pahud, G. Hellstrom und L. Mazzarella. *Duct Ground Heat Storage Model for Trnsys (Trnvdst) - User manual for the October 1996 version*. 1996.
- [54] Peter Pärish u. a. "Investigations and model validation of a ground-coupled heat pump for the combination with solar collectors, Applied Thermal Engineering". In: *Applied Thermal Engineering*. Applied Thermal Engineering 62.2 (2013), S. 375–381. ISSN: 1359-4311. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2013.09.016](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.016).
- [55] Viktor Wesselak u. a. *Handbuch Regenerative Energietechnik*. Berlin: Springer Vieweg; 2017. DOI: [10.1007/978-3-662-53073-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53073-3).
- [56] *Uponor Contec Bauteilaktivierung - Technische Informationen*. Haßfurt: Uponor GmbH. URL: <https://brandportal.uponor.com/m/5c07fb15471f8730/original/TI-Contec-DE-1092316.pdf> (besucht am 26. 11. 2021).
- [57] *TRNSYS 18 - Volume 4 Mathematical Reference*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison and Thermal Energy System Specialists, LLC. 2018-05.
- [58] *Sketchup Make*. <https://sketchup.com/>. Version 17.2.2555. 2016.
- [59] *TRNSYS 18 - Volume 5 Multizone Building modeling with Type56 and TRN-Build*. TRANSOLAR Energietechnik GmbH. 2017-02.
- [60] *DIN EN ISO 13786:2018-04 Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren (ISO 13786:2017); Deutsche Fassung EN ISO 13786:2017*. Berlin, 2018.
- [61] *DIN V 18599-2:2018-09 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*. Berlin, 2018.
- [62] *VDI 6020 Blatt 1:2001-05 Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation - Gebäudesimulation*. Berlin, 2001.

- [63] *SIA 2024: Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*. Standard. Zürich, CH: SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2015.
- [64] *VDI 2078:2015-06 Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*. Berlin, 2015.
- [65] Hermann Rietschel und Horst Esdorn. *Raumklimatechnik- Bd. 1: Grundlagen*. Bd. 1. Berlin; Heidelberg; New York; Springer, 2008. ISBN: 9783540544661, 3540544666, 9783540544666.
- [66] BBSR Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. *Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre (TRY) für Simulationsrechnungen und für den Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz*. URL: https://www.bbsr-energie%5C-ein%5C-spar%5C-ung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/TRY_node.html (besucht am 10. 02. 2020).
- [67] Deutscher Wetterdienst. *CDC (Climate Data Center)*. Version der Seite: 2.0-v1912. URL: <https://cdc.dwd.de/portal/> (besucht am 10. 02. 2021).
- [68] Deutscher Wetterdienst. *Statistisch optimierte Wettervorhersagen MOSMIX*. URL: https://www.dwd.de/DE/leistungen/met_verfahren_mosmix/met_verfahren_mosmix.html (besucht am 17. 05. 2021).
- [69] *DIN EN 16798-1 Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6; Deutsche Fassung EN 16798-1:2019*. Berlin, 2021.
- [70] *DIN EN ISO 7730:2006-05 Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005*. Berlin, DE, 2006.
- [71] *DIN EN 16798-1/NA (Entwurf) Nationaler Anhang – Nationale Ergänzungen und Hinweise zur Anwendung – Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6*. Berlin, 2021.
- [72] *DIN EN 15251:2012-12 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007*. Berlin, 2012.

- [73] *TESSLibs 17 - Volume 06 HVAC Library Mathematical Reference*. TESS – Thermal Energy System Specialists. 2012-03.
- [74] *TESSLibs 17 - Volume 07 Hydronics Library Mathematical Reference*. TESS – Thermal Energy System Specialists. 2012-03.
- [75] *DIN V 18599-7:2018-09 Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau*. Berlin, 2018.
- [76] *DIN EN 16798-3 Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4); Deutsche Fassung EN 16798-3:2017*. Berlin, 2017.
- [77] Karl-Josef Albers. *Rechnagel - Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 79. Ausgabe 2019/2020*. Augsburg: ITM InnoTech Medien, 2018.
- [78] Siemens Schweiz AG. *TABSDesign*. Version 2.0.2, April 2013. 2009. URL: www.faktor.ch/tabs-tool.html (besucht am 26. 11. 2021).
- [79] M Achermann und G Zweifel. “RADTEST–Radiant heating and cooling test cases”. In: *Subtask C. A report of IEA task 22 (2003)*.
- [80] Christoph Kempkes u. a. *Energetische Bewertung thermisch aktivierter Bauteile: Dynamisch thermische Simulation, messtechnische Validation, vereinfachte Bewertungsansätze*. 2009.
- [81] Hervé Abdi. “The Kendall Rank Correlation Coefficient”. In: *Encyclopedia of Measurement and Statistics*. Neil Salkind (Ed.), 2007.
- [82] Pauli Virtanen u. a. “SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python”. In: *Nature Methods* 17 (2020), S. 261–272. DOI: [10.1038/s41592-019-0686-2](https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2).
- [83] *DIN EN 1264-3:2009-11 Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 3: Auslegung; Deutsche Fassung EN 1264-3:2009*. Berlin, 2009.
- [84] D. Sonntag. “Advancements in the field of hygrometry”. In: *Meteorologische Zeitschrift* 3.2 (Mai 1994), S. 51–66. DOI: [10.1127/metz/3/1994/51](https://doi.org/10.1127/metz/3/1994/51). URL: <http://dx.doi.org/10.1127/metz/3/1994/51>.
- [85] *VDI 3804:2009-03 Raumluftechnik - Bürogebäude (VDI-Lüftungsregeln)*. Berlin, 2009.

- [86] *DIN EN 12831-1:2017-09 Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017.* Berlin, 2017.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Entwerfen und Konstruieren der Leibniz Universität Hannover.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Bohne für die stete Unterstützung, die wertvollen Diskussionen und das jederzeit sehr angenehme Betreuungsverhältnis. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralph-Andreas Henne möchte ich für die Übernahme des Korreferats und die freundliche Begleitung des Promotionsvorhabens danken.

Dem Land Niedersachsen, der Universität Hannover und allen Beteiligten danke ich für die Abschlussförderung zum Ende des Promotionsprojekts, die ihren Teil zur Verwirklichung beigetragen hat.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am IEK danke ich für die spannende Zeit und den angenehmen persönlichen und fachlichen Austausch.

Ein großer Dank gilt auch meiner Familie und besonders meinen Eltern, die mich immer auf meinem Weg bestärkt haben. Und natürlich meinen Freunden Paulwin und Roland, die beide ihren Anteil an der Geschichte haben.

Der größte Dank muss jedoch an meine Gefährtin Anna gehen: Ohne deine liebevolle Unterstützung und nicht zuletzt dein Organisationstalent wäre diese Arbeit wohl nicht möglich gewesen. Ein letzter Gruß an unsere lieben Kinder, bald habe ich wieder mehr Zeit!