

Modellentwicklung und Validierung einer prognosebasierten Steuerung für thermisch aktivierte Bauteile im Wohnbau

DI Dr. Magdalena Wolf¹, Univ. Prof. DI Dr. Tobias Pröll¹
Univ. Prof. DI Dr. Martin Treberspurg², Mag. Arch. Christoph Treberspurg²
DI Wilhelm Hofbauer³

¹Universität für Bodenkultur Wien, Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien, 01 47654 - 89315,
magdalena.wolf@boku.ac.at, www.boku.ac.at

²Treberspurg & Partner Architekten Ziviltechniker GmbH, Penzingerstraße 58, 1140 Wien, 01 / 894 3191,
office@treberspurg.at, www.treberspurg.com

³Technisches Büro Hofbauer, Penzingerstraße 58, 1140 Wien, 01 / 894 3191 – 11,
technisches.buero.hofbauer@utanet.at

Kurzfassung: Für das Heizen und Kühlen von Gebäuden werden rund 30-40 % des Endenergieverbrauchs in Österreich benötigt. Besonders das Kühlen von Gebäuden wird in Zukunft eine Herausforderung für Gebäudeplaner sein. Ein in Passivhausbauweise errichtetes Zweifamilienhaus mit thermischer Bauteilaktivierung (TAB) wird mit einer prognosebasierten Steuerung ausgestattet, die das Heizen und Kühlen des Gebäudes unter Berücksichtigung von Wetterprognosen regelt. Das trägt zu einer Reduktion der benötigten Energie für Heizung, Kühlung und Warmwasser und zur erhöhten Behaglichkeit im Wohnraum bei. Ziel der prognosebasierten Steuerung ist die Optimierung der Komfortbedingungen in den Wohnräumen. Mit Hilfe von Wetterprognosedaten wird für die kommenden 48 Stunden der nötige Heiz/ Kühlleistungsverlauf für das Gebäude kalkuliert, um die gewünschte Solltemperatur zu erzielen. Dazu ist ein Modell des Gebäudes nötig, mit dem die Raumtemperatur prognostiziert werden kann. Als Basis für das Gebäudemodell werden die ein- bzw. austretenden Energieströme im Gebäude, unter Berücksichtigung der solaren Einstrahlung, bilanziert. Abgeleitet aus dem Gebäudemodell wird für die Optimierung als einfachste Zielfunktion die Abweichung der Fehlerquadratsumme der Solltemperatur von der prognostizierten Raumtemperatur minimiert. Der optimierte Heiz/Kühlleistungsverlauf wird an das Heizsystem, im Testobjekt eine Solewärmepumpe mit Pufferspeicher, übergeben. Derzeit läuft das Betriebsmonitoring im Gebäude. Erste Ergebnisse zeigen, dass das Optimierungsverfahren unter Berücksichtigung der solaren Einstrahlung zu einer Lösung führt.

Keywords: Prognosebasierte Steuerung, thermisch aktivierte Bauteile, Heizleistung, Kühlleistung, Optimierung

1 Einleitung und Ziel

Der Energiebedarf für Heizen, Kühlen und Warmwasserbereitung beträgt rund 40% des weltweiten Endenergiebedarfs. Der Gebäudesektor kann also einen maßgeblichen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und zur Erreichung der Klimaziele beitragen, indem dieser Anteil reduziert wird. Thermisch gut gedämmte Gebäude und eine nachhaltige Bauform setzen den Grundstein für einen energieeffizienten Betrieb des Gebäudes. Mit thermischer Bauteilaktivierung (TAB) kann zudem die Speicherfähigkeit des Gebäudes genutzt werden, um solare Einstrahlung, oder andere Erneuerbare Energiequellen wie Windener-

gie oder Energie aus Photovoltaikanlagen, zu speichern. Prognosedaten können hier einen weiteren Beitrag leisten, um den Energiebedarf eines Gebäudes zu minimieren.

In der Literatur finden sich bereits Konzepte für modellprädiktive Regelungskonzepte (MPC) [1–5], die u.a. auch Ansätze mit neuronalen Netzwerken [2, 6] und Machine-Learning [7] verfolgen.

Zentrales Element eines MPC ist das Gebäudemodell [8]. In vielen Arbeiten werden Gebäude in einzelnen Zonen in komplexen Simulationsprogrammen (z.B. TRNSYS, MatLab, EnergyPlus) dargestellt. Verschiedene Modellierungsansätze werden in der Literatur aufgelistet [9], ebenso die Kombination von MPC mit trägen Wärmeabgabesystemen [10].

Neben dem Gebäudemodell spielen Prognosedaten für MPC eine wichtige Rolle. Verschiedene Modelle für die Wettervorschau existieren in der Literatur, die ihre Vor- und Nachteile aufweisen [11].

Diese Regelungssysteme basieren meist auf hochkomplexen Algorithmen, die Rechenleistung und entsprechende Hardware für die Umsetzung dieser Systeme benötigen. In der Gebäudetechnik, speziell im Wohnbau, sind meist weder umfangreiche regelungstechnische Hardware noch die finanziellen Mittel vorhanden, um solche Konzepte, wie sie in der Industrie und Automatisierung bereits eingesetzt werden, implementieren zu können.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, den Energiebedarf von Wohngebäuden mit Hilfe von Prognosedaten zu minimieren und den Wohnkomfort sowie die Ausnutzung der thermischen Speicherfähigkeit zu maximieren. Ein prognosebasiertes Regelungskonzept verarbeitet Wetterprognosedaten mit einem möglichst einfachen thermischen Modell des Gebäudes, und erlaubt damit eine Prognose der Raumtemperatur in die Zukunft. Durch Optimierung der Prognostemperatur an eine vom Nutzer gewünschte Solltemperatur kann der nötige Heiz- bzw. Kühlleistungsverlauf errechnet werden. Die Implementierung des Regelungskonzepts erfolgt in der Programmiersprache C und ist auf einem Einplatinencomputer lauffähig. Durch die kompakte Bauform und einem Source-Code, der auf unzähligen Plattformen lauffähig ist, soll eine breite Anwendung im Wohnbau ermöglicht werden. In einer ersten Projektstufe werden Komfortbedingungen optimiert, um die grundsätzliche Funktion des Reglers zu testen. Im weiteren Projektfortschritt werden Nebenbedingungen ergänzt, mit denen eine wirtschaftliche Abschätzung der Einspeisung von erneuerbarer Energie aus Photovoltaik oder Windstrom möglich ist. Abbildung 1 zeigt den Entwurf für das Regelungskonzept. Das Projekt wird mit Mitteln aus der Niederösterreichischen Wohnbauforschung gefördert.

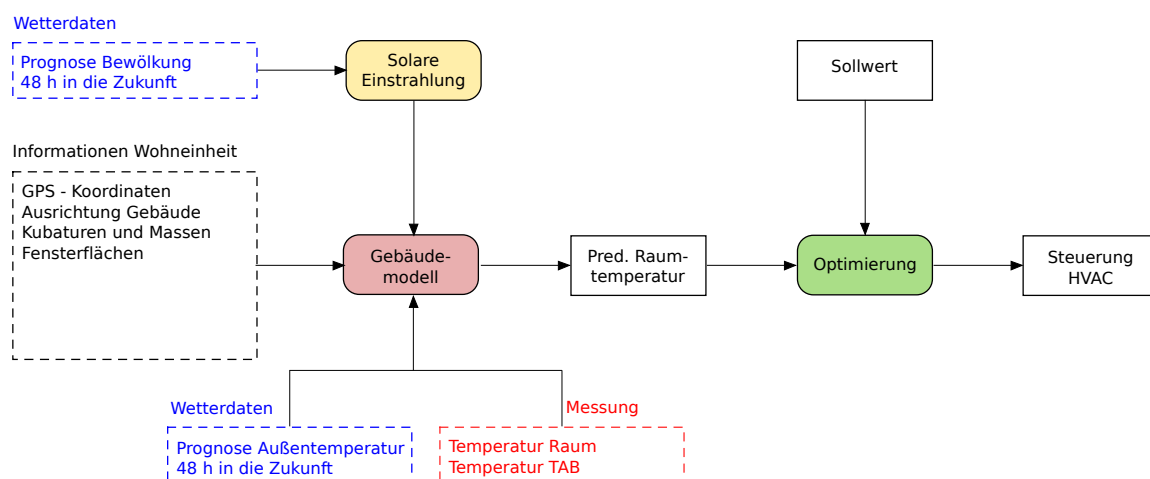


Abbildung 1: Übersicht über das geplante Regelungskonzept

Zentrales Element ist das Gebäudemodell. Dieses Gebäudemodell ermöglicht eine Kal-

kulation der Parameter im Gebäude in die Zukunft, unter Berücksichtigung der Prognosedaten. Das Gebäudemodell erlaubt eine Modellrechnung der Temperaturentwicklung im untersuchten Objekt in die Zukunft. In diesem Projekt wird eine Kalkulation für die folgenden 48 Stunden angestellt. Der errechnete Temperaturverlauf wird in einem Optimierungsverfahren mit einem gewünschten Sollwert (Wunschtemperatur des Bewohners / Nutzers) verglichen. Durch Minimierung der Fehlerquadratsumme wird die Solltemperatur der prognostizierten Temperatur angeglichen. Als Ergebnis der Optimierung wird ein Heizleistungs-/Kühlleistungsverlauf erstellt, von dem das erste Element als aktuell nötige Heiz/Kühlleistung an das Wärmeabgabesystem übergeben wird. Der Regler wird in regelmäßigen Intervallen (z.B. stündlich) aufgerufen und durchläuft folgende Kalkulationsschritte:

1. Abfrage Wetterprognosedaten
2. Kalkulation Solare Einstrahlung
3. Kalkulation prädikative Raumtemperatur mit Gebäudemodell
4. Optimierung auf gewünschte Solltemperatur
5. Ergebnis der Optimierung an Wärmeabgabesystem übergeben

In den folgenden Kapiteln wird im Detail auf das Gebäudemodell, die Kalkulation der solaren Einstrahlung sowie auf die Optimierung eingegangen.

2 Aufbau Gebäudemodell

Das Gebäudemodell ist das zentrale Element des prognosebasierten Regelungskonzepts. Es ermöglicht eine Voraussage der Temperaturen im Raum und der thermischen Bauteilaktivierung. Das zu untersuchende Wohnobjekt wird dabei als eine Einheit betrachtet. Hierbei kann es sich um ein gesamtes Gebäude, um ein Stockwerk oder eine einzelne Wohnung handeln. Für das Wohnobjekt wird eine Energiebilanz aufgestellt, die die ein- und austretenden Energieströme berücksichtigt. Der gewählte methodische Ansatz beinhaltet die thermischen Speichermassen des Gebäudes ($C_{p,R}$) sowie der aktivierten Decken ($C_{p,TAB}$), die Konvektions- und Lüftungsverluste \dot{Q}_{Conv} und die solare Einstrahlung \dot{Q}_{Solar} . Abbildung 2 zeigt das Schema des Modells. Nicht im Modell berücksichtigt sind die unvorhersehbaren Störquellen \dot{Q}_{Dist} durch Fenster öffnen, Kochen, etc.

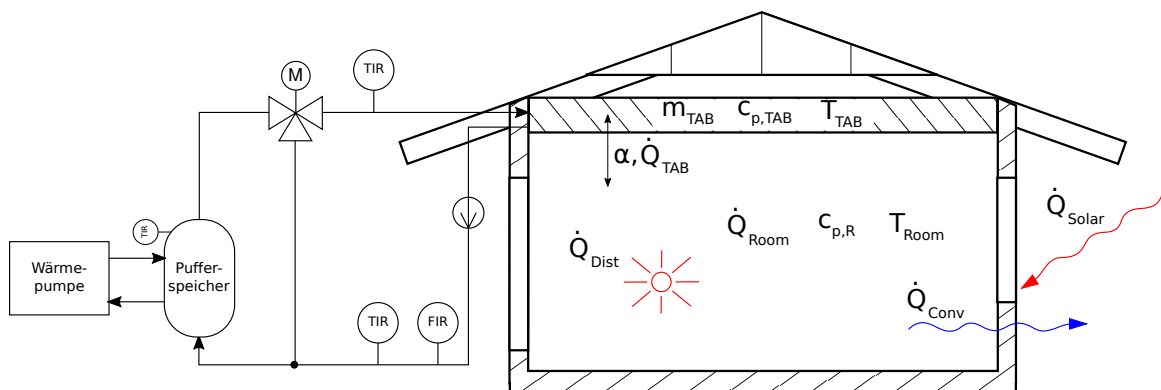


Abbildung 2: Schema des Gebäudemodells mit ein- und austretenden Energieströmen

2.1 Energiebilanz

Für das zu untersuchende Wohnobjekt wird eine Energiebilanz aufgestellt. Dabei werden die ein- und austretenden Wärmeströme gegenübergestellt. Eintretende Wärmeströme sind:

- Solare Einstrahlung \dot{Q}_{Solar}
- Wärmeeintrag durch thermisch aktivierte Decke \dot{Q}_{TAB}
- Wärmeeintrag durch unvorhersehbare Störquellen \dot{Q}_{Dist}

Der Wärmeeintrag durch solare Einstrahlung und der Wärmeeintrag durch die thermisch aktivierte Decke können mathematisch vorkalkuliert werden. Unvorhersehbare Störquellen sind sehr viel schwieriger zu berücksichtigen, weshalb sie in der ersten Projektstufe nicht im Modell berücksichtigt sind. Im Gegensatz dazu tretende folgende Wärmeströme aus:

- Konvektions- und Lüftungsverluste

Primärer Ansatz für die Energiebilanz ist, dass eine Änderung der Wärme im Raum durch die Summe der ein- und austretenden Wärmeströme verursacht wird. Gleichung (1) formuliert diesen Bilanzraum.

$$C_{p,R} * \frac{\partial \vartheta_R}{\partial t} = \dot{Q}_{TAB} + \dot{Q}_{Solar} + \dot{Q}_{Dist} - \dot{Q}_{Conv} \quad (1)$$

Als zweiten Bilanzraum wird die Wärmeübertragung der Decke auf den Raum betrachtet. In Gleichung (2) wird die Speicherfähigkeit der Decke als die Differenz zwischen dem Wärmeeintrag aus dem Heizsystem und dem Wärmestrom von der Decke an den Raum betrachtet.

$$C_{p,TAB} * \frac{\partial \vartheta_{TAB}}{\partial t} = \dot{Q}_{Heiz} - \dot{Q}_{TAB} \quad (2)$$

Der Wärmestrom, der von der thermisch aktivierte Decke in den Raum fließt wird entsprechend Gleichung (3) formuliert.

$$\dot{Q}_{TAB} = \alpha * (\vartheta_{TAB} - \vartheta_R) \quad (3)$$

Für die Kalkulation des Wärmeübergangs der thermisch aktivierten Decke auf den Raum, wird ein Wärmeübergangskoeffizient α aus der Literatur verwendet[12]. In den Sommermonaten (Kühlfall $\alpha = 10.75 W/m^2 K$) wird ein höherer Wert für den Wärmeübergang angenommen als in den Wintermonaten (Heizfall $\alpha = 6.5 W/m^2 K$).

Die Konvektions- und Lüftungsverluste \dot{Q}_{Conv} werden aus der Temperaturdifferenz von Außentemperatur (ϑ_{out}) und Innenraumtemperatur (ϑ_R) sowie dem Konvektions- und Lüftungsverlustfaktor k berechnet (siehe Gleichung (4)).

$$\dot{Q}_{Conv} = k * (\vartheta_R - \vartheta_{out}) \quad (4)$$

Durch die Berechnung der Energieströme und Integration der Gleichungen (1) und (2) über einen definierten Zeitraum können die Temperaturen im Raum T_R und in der Decke T_{TAB} bestimmt werden, wobei für $T_{TAB,i}$ und $T_{R,i}$ als Startwerte die tatsächlichen Messwerte aus der thermisch aktivierten Decke und dem Raum verwendet werden (siehe Gleichungen (5) und (6)).

$$T_{TAB,i+1} = \frac{\dot{Q}_{Heiz} - \dot{Q}_{TAB}}{C_{p,TAB}} * \Delta t + T_{TAB,i} \quad (5)$$

$$T_{R,i+1} = \frac{\dot{Q}_{TAB} + \dot{Q}_{Solar} - \dot{Q}_{Conv}}{C_{p,R}} * \Delta t + T_{R,i} \quad (6)$$

Die Heizleistung \dot{Q}_{Heiz} , die vom Wärmebereitstellungssystem an die Bauteilaktivierung übergeben wird, wird gesondert betrachtet. Dieser Wert ist das Ergebnis der Optimierung und wird in einem iterativen Prozess dem Gebäudemodell übergeben. Das Ergebnis des Gebäudemodells ist ein prädiktiver Temperaturvektor für die Raumtemperatur. Dieser Temperaturvektor wird in der Optimierung an einen, vom Bewohner / Nutzer gewünschten Solltemperaturwert, durch Änderung der Heizleistung angepasst.

2.2 Modellparameter

Im folgenden Abschnitt werden die Parameter, die das Regelungskonzept für einen valide Regelung benötigt, aufgelistet. Dabei wird zwischen statischen und dynamischen Parametern unterschieden. Statische Parameter werden einmalig bei der Installation / Implementierung des Reglers auf das jeweilige Wohnobjekt angepasst und eingestellt, während dynamische Parameter kontinuierlich während des Betriebs ermittelt und dem Regler übergeben werden.

2.2.1 Statische Modellparameter

Im folgenden werden jene statischen Parameter aufgelistet, die bei der Inbetriebnahme des Reglers einmalig konfiguriert werden müssen. Tabelle 1 fasst die verwendeten statischen Parameter für das Gebäudemodell zusammen.

Tabelle 1: Übersicht zu den statischen Eingabeparametern

Parameter	Einheit	Beschreibung
Längengrad	[°]	Längengrad, an dem das Objekt erbaut ist
Breitengrad	[°]	Breitengrad, an dem das Objekt erbaut ist
A_F	[m ²]	Fensterflächen Nord / Süd / Ost / West
$C_{p,R}$	[kJ/K]	Wärmespeicherfähigkeit des Wohnobjekts
$C_{p,TAB}$	[kJ/K]	Wärmespeicherfähigkeit der thermisch aktivierten Decke
k	[W/K]	Faktor für Konvektions- und Lüftungsverluste

Die gesamte Wärmespeicherfähigkeit des Wohnobjekts $C_{p,R}$ ist die Summe aller Massenprodukte aus Material und zugehöriger spezifischer Wärmekapazität im Wohnobjekt (siehe Gleichung (7)). Berücksichtigt werden hier Außenwände, Zwischenwände, Decke und Bodenplatte. Nicht berücksichtigt werden Möbel und Einrichtungsgegenstände.

$$C_{p,R} = \sum c_{p,Material} * m_{Material} \quad (7)$$

Die Wärmespeicherfähigkeit der thermisch aktivierten Decken $C_{p,TAB}$ ist das Produkt aus der Masse der aktivierten Decken und zugehöriger spezifischer Wärmekapazität des verwendeten Betons im Wohnobjekt (siehe Gleichung (8)).

$$C_{p,TAB} = c_{p,Beton} * m_{TAB} \quad (8)$$

Die Massen der aktivierten und nicht aktivierten Decken sowie der Faktor für den Konvektionsverluste und die Wärmeverluste durch Lüftung werden dem Energieausweis und den Einreichplänen entnommen. Die spezifischen Wärmekapazitäten der verwendeten Materialien (Beton, Ziegel, Holz, Fliesen, etc...) können in Datenblättern bzw. in verschiedenen Literaturstellen nachgelesen werden. Tabelle 2 enthält einige wichtige Baustoffe und deren spezifische Wärmekapazität.

Tabelle 2: Übersicht über typische spezifische Wärmekapazitäten von Baustoffen

Baustoff	$c_p [kJ/kgK]$
Beton	1.11
Ziegel	1.00
Estrich	1.07
Fliese	0.84
Laminat	1.16

Der Faktor k für die Transmissions- und Lüftungsverluste setzt sich aus einem Anteil für Wärmeverluste durch Konvektion nach außen sowie Wärmeverluste durch Lüften zusammen. Die Wärmeverluste durch Konvektion können als Summenfaktor durch Verluste der Außenwände, der Fenster sowie der Grundfläche und der Decke angegeben werden (Gleichung (9)).

$$k_T = A_{AW} * U_{AW} + A_F * U_F + A_{GF} * U_{GF} + A_D * U_D \quad (9)$$

Die Lüftungsverluste setzen sich aus dem Volumen der Wohneinheit, dem Luftwechsel, Dichte und spez. Wärmekapazität der Luft (Gleichung (10)) zusammen.

$$k_L = V * \tau * \rho_L * c_{p,L} \quad (10)$$

Der Faktor für die Transmission- und Lüftungsverluste ist die Summe aus dem k-Wert für die Transmissionsverluste und dem k-Wert für die Lüftungsverluste Gleichung (11).

$$k = k_T + k_L \quad (11)$$

2.2.2 Dynamische Parameter

Unter dynamischen Parameter werden jede Parameter verstanden, die bei jeder Kalkulation im Modell aktualisiert und neu geladen werden müssen. Diese Parameter werden als Startwerte für die iterative Optimierung herangezogen. Primär handelt es sich dabei um Temperaturmesswerte aus dem Wohnobjekt. Tabelle 3 fasst die derzeit nötigen dynamischen Parameter zusammen.

Tabelle 3: Übersicht über die dynamischen Eingabeparameter

Parameter	Beschreibung	Einheit
T_R	Raumtemperatur	[°C]
T_{TAB}	Temperatur der thermisch aktivierten Decke	[°C]
T_{sp}	Solltemperatur im Raum, die der Nutzer / Bewohner einstellt	[°C]

2.3 Wetterprognosedaten

Für das Modell von besonderer Bedeutung sind Wetterprognosedaten. Sie fließen in die Berechnung der solaren Einstrahlung (Bewölkungsgrad) sowie die Berechnung der Konvektions- und Lüftungsverluste (Außentemperatur) mit ein. In einer Erweiterung des Reglers wird zukünftig auch die Windgeschwindigkeit berücksichtigt, um das Potenzial für die Einspeicherung von Windstrom ökonomisch abschätzen zu können. Derzeit werden Wetterdaten für

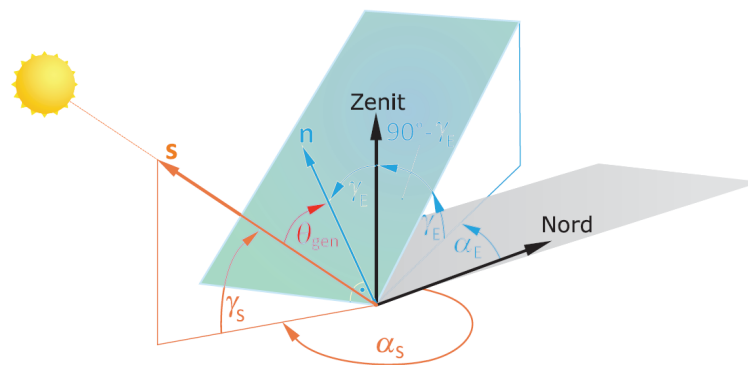


Abbildung 3: Bestimmung des Sonneneinfallswinkels auf einer geneigten Fläche [13]

48 Stunden in die Zukunft verwendet. Grundsätzlich sind folgende Parameter für den prognosebasierten Regler notwendig:

- Außentemperatur T_{out}
- Bewölkungsgrad f_{Bew}
- Windgeschwindigkeit v_{Wind}

2.4 Solare Einstrahlung

Primärer Energieeintrag in das Gebäude ist die solare Einstrahlung. Diese thermische Energie soll unterstützend zur Beheizung des Gebäudes in den Heizperioden genutzt werden. Bei der solaren Einstrahlung wird zwischen direkter und diffuser Strahlung unterschieden. Die Summe dieser beiden Einstrahlungen ergibt die Gesamtstrahlung (siehe Gleichung (12)).

$$E_{ges} = E_{dir} + E_{dif} \quad (12)$$

Der direkte Strahlungsanteil errechnet sich aus der maximal auf der Erdoberfläche eintretenden solaren Einstrahlung. Da die Strahlung nicht an einer horizontalen Oberfläche, sondern auf einer vertikalen bzw. geneigten Fensterfläche auftritt, wird diese direkte Strahlung mit einem der Sonne entsprechenden Einfallswinkel θ_{gen} zu dieser geneigten Fläche (Fensterfläche) umgerechnet. Die Berechnung des Einfallswinkels θ_{gen} erfolgt mittels Winkelfunktionen, die in der Literatur ausführlich beschrieben sind. Quaschnig [13] beschreibt die Kalkulation des Einfallswinkels mittels Sonnenhöhe γ_S , dem Sonnenazimut-Winkel α_S , dem Höhenwinkel γ_E und dem Azimutwinkel α_E , um den die geneigte Fläche gedreht ist. Gleichung (13) beschreibt den mathematischen Zusammenhang zur Bestimmung des Einfallswinkels θ_{gen} , ergänzend wird in Abbildung 3 der Zusammenhang der Sonneneinstrahlung und der geneigten Fläche graphisch dargestellt. Als Standardwert für die maximale direkte globale Einstrahlung E_0 wird ein Wert von 900 W/m^2 verwendet. Erst ab einer Sonnenhöhe von $\gamma_S \geq 10^\circ$ erfolgt die Berechnung der direkten Strahlung, bei $\gamma_S < 10^\circ$ wird $E_{dir,gen} = 0$ angenommen.

$$\cos(\theta_{gen}) = -\cos(\gamma_S) * \sin(\gamma_E) * \cos(\alpha_S - \alpha_E) + \sin(\gamma_S) * \cos(\gamma_E) \quad (13)$$

Die Kalkulation der direkten Einstrahlung $E_{dir,gen}$ auf der geneigten Fläche erfolgt mittels Gleichungen (14) und (15).

$$E_{dir,gen} = E_0 * \cos(\theta_{gen}) * g_{dir} * f_{Bew} * A_F \quad (14)$$

$$g_{dir} = 0.45 \quad (15)$$

Um die direkte Einstrahlung in das Gebäude zu erhalten, wird die Einstrahlung an der geeigneten Fläche der jeweiligen Himmelsrichtung mit der eingestrahlten Fensterfläche, die dieser Himmelsrichtung ausgerichtet ist, multipliziert. Zudem wird ein Faktor für den Gesamtdurchlass des Fensterglases (Direkte Strahlung $g_{dir} = 0.45$, diffuse Strahlung $g_{dif} = 0.35$) sowie die Beschattung bei bestehen eines Balkons berücksichtigt. Nötige Parameter wie die Größe der Fenster, deren Ausrichtung und Neigung sowie Geometrien eventueller Beschattungen (z.B. Balkon) werden dem Energieausweis entnommen. Aus dem Energieausweis bzw. aus den Einreichplänen können auch der Neigungswinkel der Fenster zur Horizontalen (γ_E , in den meisten Fällen 90°) und die Abweichung der Fensterausrichtung zur Nordachse (α_E) entnommen werden. Die Reduktion der direkten Einstrahlung durch Wolken wird durch den Bewölkungsgrad f_{Bew} berücksichtigt, der in den Wetterprognosedaten enthalten ist.

$$E_{dif} = E_{0,dif} * A_F * g_{dif} \quad (16)$$

$$g_{dif} = 0.35 \quad (17)$$

Gleichung (17) beschreibt die Kalkulation der diffusen Einstrahlung. Für die diffuse Strahlung $E_{0,dif}$ wird ein Wert von 100 W/m^2 angenommen. Die diffuse Strahlung wird ab einer Sonnenhöhe $\gamma_S \geq 5^\circ$ angenommen, bei einer Sonnenhöhe $\gamma_S < 5^\circ$ wird $E_{0,dif} = 0$ angenommen.

$$\dot{Q}_{Solar} = E_{dir,gen} + E_{dif} \quad (18)$$

Die gesamte solare Einstrahlung in das Gebäude \dot{Q}_{Solar} ist somit die Summe der einwirkenden direkten und diffusen Strahlung auf die jeweilige Fensterfläche (siehe Gleichung (18)). Das Ergebnis der Berechnung der Solaren Einstrahlung fließt in das Gebäudemodell ein.

3 Optimierung

Das Ergebnis des Gebäudemodells ist ein prädiktiver Temperaturverlauf $\vec{T}_{R,i}(\vec{x})$ für die kommenden Stunden in Abhängigkeit der vorherrschenden Parameter. Dieser Temperaturverlauf wird mit einer Solltemperatur T_{sp} verglichen. Die Optimierung hat nun die Aufgabe, jene Heizleistung zu ermitteln, die nötig ist, damit der prädiktive Temperaturverlauf mit der Solltemperatur übereinstimmt. Als Zielfunktion wird die Minimierung der Fehlerquadratsumme zwischen Raumtemperatur und Solltemperatur definiert (Gleichung (19)):

$$f(\vec{x}) = \sum_{i=0}^{48} (T_{R,i}(\vec{x}) - T_{sp})^2 \rightarrow \min \quad (19)$$

Die Ermittlung der optimalen Heiz/Kühlleistung erfolgt in zyklischen Abläufen. Abbildung 4 zeigt das Schema dieses Programmablaufs. Bei Start des Reglerprogramms werden alle wichtigen Daten (Raumtemperatur, Temperatur der TAB, Wetterprognosedaten) geladen und mittels Gebäudemodell der Wert der Zielfunktion, die Fehlerquadratsumme zwischen prognostizierter Raumtemperatur und Solltemperatur, errechnet. Dies erfolgt im 0. Schritt ohne Zu- bzw. Abfuhr von thermischer Energie. In der 1. Runde wird nun beim Heizleistungsvektor \vec{Q}_{Heiz} das nullte Element ($\dot{Q}_{Heiz}[0]$) um einen definierten Wert $\Delta \dot{Q}_{Heiz}$ positiv perturbiert. Mit diesem Heizleistungsvektor wird erneut ein prädiktiver Raumtemperaturverlauf errechnet und die Fehlerquadratsumme bestimmt. Ist die Fehlerquadratsumme nach der ersten positiven Perturbation größer als der Anfangswert, wird das nullte Element um einen definierten Wert negativ perturbiert und dieser Wert als Heizleistung im nullten Element verwendet. Ist die Fehlerquadratsumme bei positiver Perturbation jedoch kleiner als

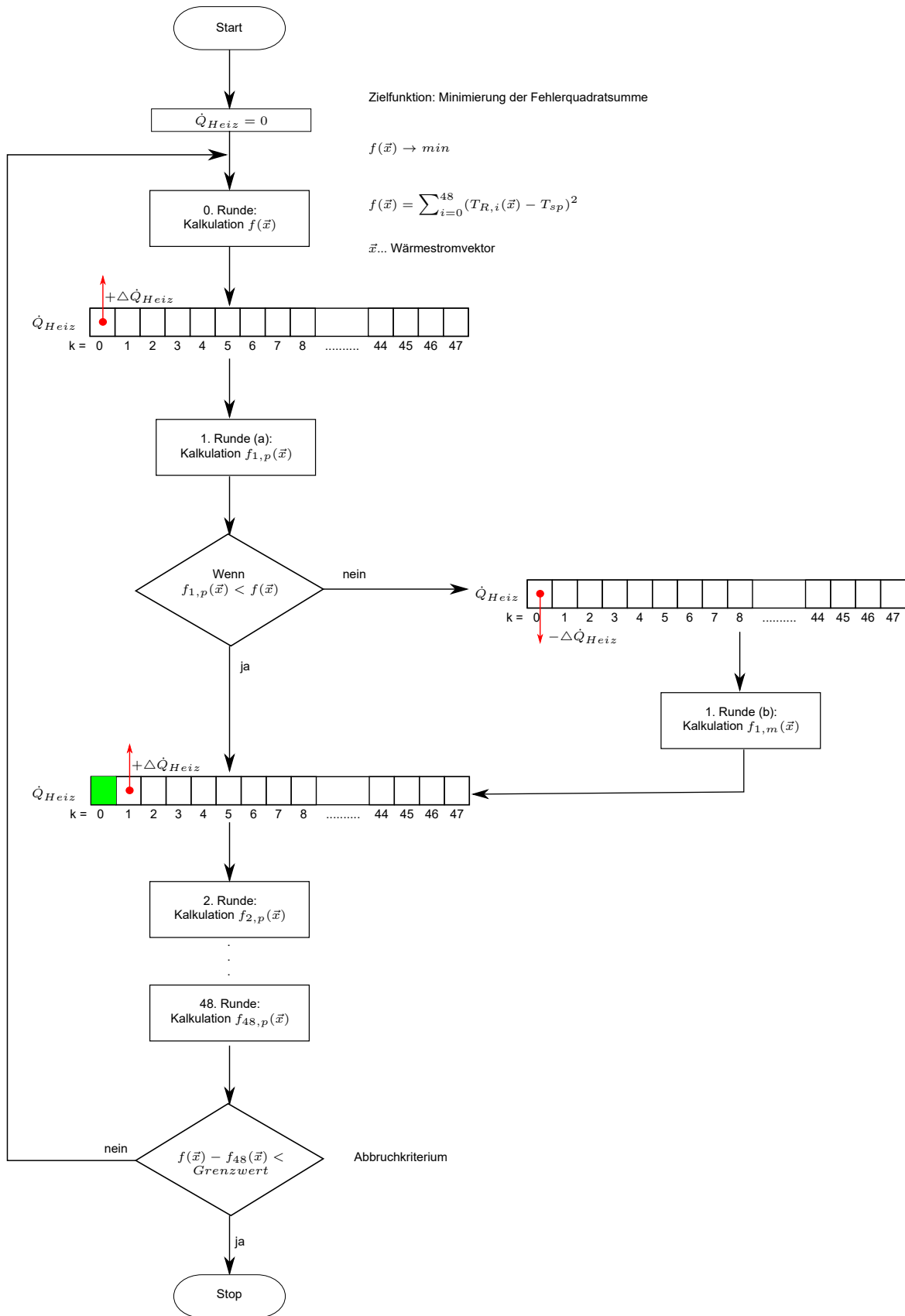


Abbildung 4: Programmablaufdiagramm der Optimierung

der Startwert geworden, wird das folgende Element $\dot{Q}_{Heiz}[1]$ positiv perturbiert, das nullte Element behält den Wert, den es nach der ersten Perturbation eingenommen hat. Mit dieser Methode werden alle 48 Elemente perturbiert, bis am Ende eine neue Fehlerquadratsumme aus diesem Heizleistungsvektor entstanden ist. Der gesamte Zyklus wird in einer Schleife so lange durchlaufen, bis ein definiertes Abbruchkriterium erreicht ist. Um auf ein Minimum schließen zu können wird in diesem Fall als Abbruchkriterium eine minimale Änderung der Fehlerquadratsumme $(f(\vec{x}) - f_{48}(\vec{x})) < 5 * 10^{-6} (Kh)^2$ verwendet.

Das Ergebnis der Optimierung ist ein Heiz/Kühlleistungsvektor, der die nötigen zu- bzw. abzuführenden Wärmeströme enthält, um das Wohnobjekt auf die gewünschte Solltemperatur zu regeln. Der aktuellste Wert $\dot{Q}_{Heiz}[0]$ wird an das Wärme/Kälteerzeugungssystem weitergeben, um den Wärmestrom in bzw. aus dem Haus zu regeln. Bei jedem Aufruf des Reglers (z.B. stündlich) werden alle wichtigen Parameter neu geladen und die Optimierung beginnt von vorne.

4 Ergebnisse

Das vorgestellte Gebäudemodell inklusive prognosebasiertem Regelungskonzept wird in einem Zweifamilienhaus in Osten Österreichs getestet. Derzeit wird das Monitoring für die Validierung des Gebäudemodells und die Evaluierung des Regelungskonzepts durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen, die prognosebasierte Steuerung das Gebäude auf typische Wohnkomfortverhältnisse ($20^{\circ}C - 24^{\circ}C$) konditionieren kann. Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen den Temperaturverlauf in den beiden untersuchten Wohneinheiten für die Zeit von 1.10.2019 bis 31.12.2019. Neben dem Raumtemperaturverlauf werden die Komfortgrenzen sowie die Mittelwertstemperatur über den dargestellten Zeitraum abgebildet. Die gemit-

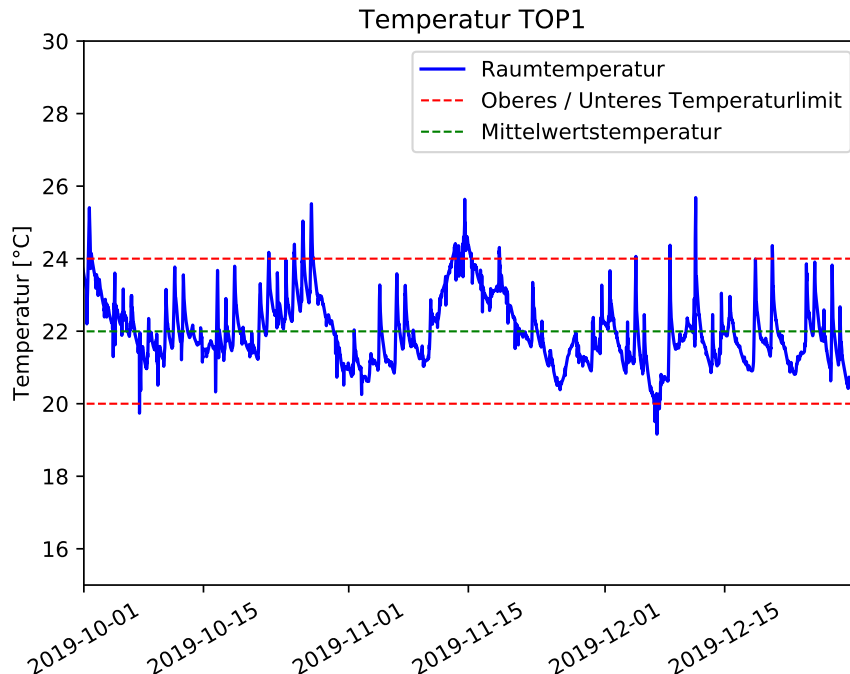


Abbildung 5: Temperaturverlauf von 1.10.2019 - 31.12.2019 für Wohneinheit 1

telten Wohnraumtemperatur für den untersuchten Zeitraum lagen bei $22.0^{\circ}C$ bzw. $23.0^{\circ}C$,

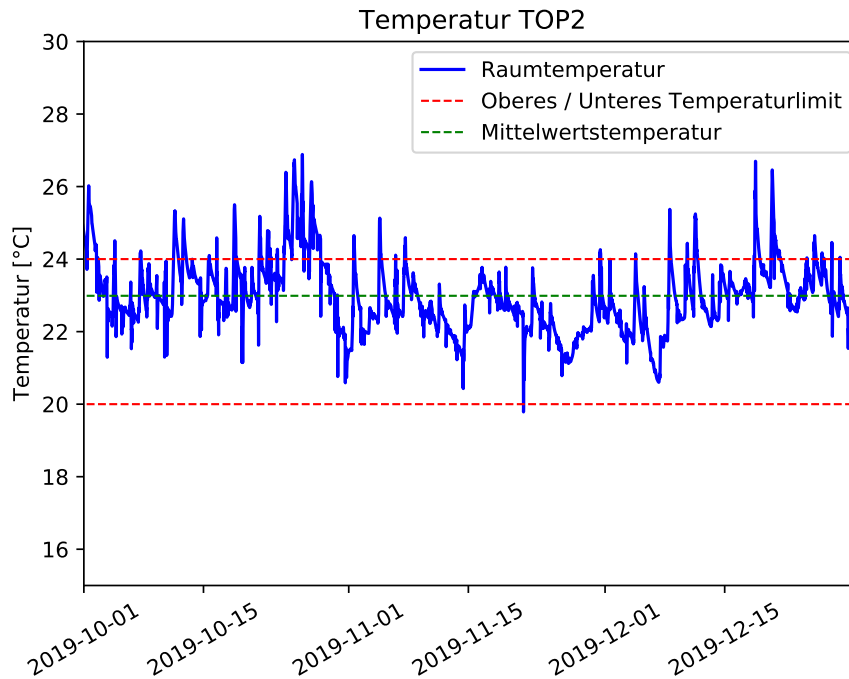


Abbildung 6: Temperaturverlauf von 1.10.2019 - 31.12.2019 für Wohneinheit 2

wobei in Wohneinheit 2 eine tendenziell höhere Temperatur als in Wohneinheit 1 zu erkennen ist. Dies ist der etwas höheren Lage der Wohnräume sowie einer geringeren Exposition durch angrenzende Wohnobjekte geschuldet. Eine detaillierte Betrachtung ist in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt. In den Diagrammen sind der Verlauf der Raumtemperatur, der eingestellte Sollwert und die aus dem Modell errechnete und optimierte, prädikative Temperaturverlauf für die Wohneinheiten 1 und 2, über eine Optimierungsperiode von 48 Stunden, abgebildet. Der Zeitraum wurde von 27.12.2019 00:00 Uhr bis 28.12.2019 23:00 Uhr gewählt. Für den Beginn der Optimierung werden als Startwerte für die Iteration die jeweiligen Temperaturen im Wohngebäude in den Regler geladen. Startpunkt für jede Optimierung ist daher immer die aktuelle Raumtemperatur. Deutlich zu erkennen ist der Einfluss der solaren Einstrahlung um die Mittagszeit, der in der Realität stärker ausgeprägt ist, als es das Modell derzeit abbildet. Das lässt daraus schließen, dass mehr solare Einstrahlung in des Gebäude eintritt, als modelliert wird. Weiters ist erkennbar, dass die Abkühlrate des Gebäudes höher ist, als im Modell abgebildet. Vor allem in Wohneinheit 1 ist dieser Effekt besonders stark ausgeprägt.

Abschließend wird festgehalten, dass sich das Projekt derzeit in der Monitoringphase befindet. Erste Ergebnisse hinsichtlich Komfort liegen bereits vor und zeigen, dass mit diesem Konzept ein behagliches Raumklima erzielt werden kann. Feinabstimmungen bei den Modellparametern werden noch angestellt, um die solaren Einstrahlungswerte sowie die Konvektionsverluste zukünftig besser abbilden können.

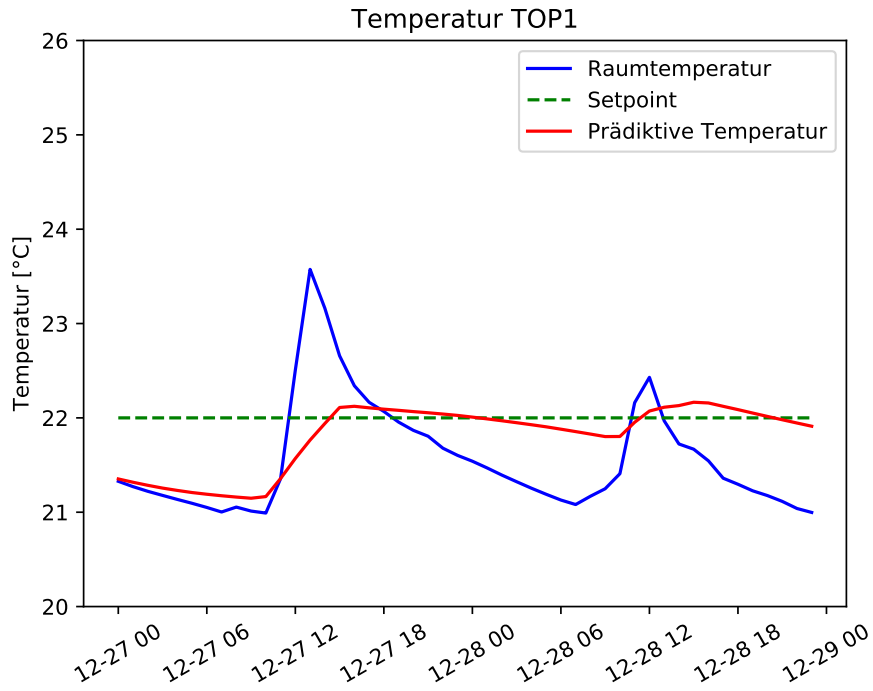


Abbildung 7: Detailbetrachtung des Temperaturverlaufs von 27.12.2019 - 29.12.2019 inkl. Modelltemperaturverlauf für Wohneinheit 1

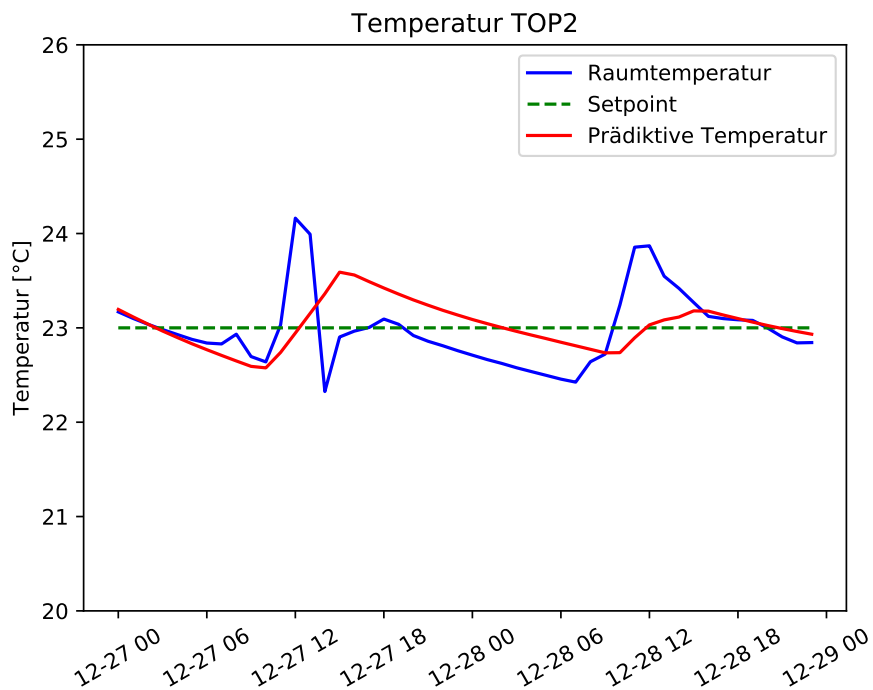


Abbildung 8: Detailbetrachtung des Temperaturverlaufs von 27.12.2019 - 29.12.2019 inkl. Modelltemperaturverlauf Wohneinheit 2

Nomenklatur

Latein

A_{AW}	Fläche Wand außenliegend	$[m^2]$
A_F	Fensterfläche	$[m^2]$
A_D	Fläche Geschossdecke	$[m^2]$
A_{GF}	Grundfläche	$[m^2]$
$C_{p,R}$	Wärmespeicherfähigkeit gesamter Raum	$[kJ/K], [kWh/K]$
$C_{p,TAB}$	Wärmespeicherfähigkeit thermisch aktivierte Decke	$[kJ/K], [kWh/K]$
$c_{p,Beton}$	spez. Wärmespeicherkapazität Beton	$[kJ/kgK]$
$c_{p,L}$	spez. Wärmespeicherkapazität Luft	$[kJ/kgK]$
$c_{p,Material}$	spez. Wärmespeicherkapazität des Baumaterials	$[kJ/kgK]$
E_0	Maximale, direkte solare Einstrahlung in Österreich	$[W/m^2]$
$E_{0,dif}$	Maximale, diffuse solare Einstrahlung	$[W/m^2]$
E_{dif}	Diffuse solare Einstrahlung	$[W/m^2]$
E_{dir}	Direkte solare Einstrahlung	$[W/m^2]$
$E_{dir,gen}$	Direkte solare Einstrahlung auf der geneigten Ebene	$[W/m^2]$
E_{ges}	Gesamte solare Einstrahlung	$[W/m^2]$
f_{Bew}	Grad der Bewölkung	$[\%]$
g_{dif}	Durchlasskoeffizient Fenster diffuse Strahlung	$[-]$
g_{dir}	Durchlasskoeffizient Fenster direkte Strahlung	$[-]$
k	Faktor Transmissions- und Lüftungsverluste	$[W/K]$
k_L	Faktor Lüftungsverluste	$[W/K]$
k_T	Faktor Transmissionsverluste	$[W/K]$
$m_{Material}$	Masse Baustoff	$[kg]$
m_{TAB}	Masse Beton thermisch aktivierter Decken	$[kg]$
\dot{Q}_{Conv}	Wärmestrom durch Konvektion und Lüftung	$[W]$
\dot{Q}_{Dist}	Wärmestrom durch Störquellen	$[W]$
\dot{Q}_{Heiz}	Heiz- bzw. Kühlleistung	$[W]$
\dot{Q}_{Room}	Änderung der Wärme im Raum	$[W]$
\dot{Q}_{Solar}	Wärmestrom durch solare Einstrahlung	$[W]$
\dot{Q}_{TAB}	Wärmestrom zwischen thermischer Bauteilaktivierung und Raum	$[W]$
t	Zeit	$[s]$
T_{out}	Außentemperatur	$[^\circ C]$
$T_{R,i}$	Raumtemperatur zum Zeitpunkt [i]	$[^\circ C]$
$T_{R,i+1}$	Raumtemperatur zum Zeitpunkt [i+1]	$[^\circ C]$
T_{sp}	Solltemperatur im Raum	$[^\circ C]$
$T_{TAB,i}$	Temperatur der thermisch aktivierten Decke zum Zeitpunkt [i]	$[^\circ C]$
$T_{TAB,i+1}$	Temperatur der thermisch aktivierten Decke zum Zeitpunkt [i+1]	$[^\circ C]$
U_{AW}	U-Wert Wand außenliegend	$[W/m^2K]$
U_F	U-Wert Fenster	$[W/m^2K]$
U_D	U-Wert Geschossdecke	$[W/m^2K]$
U_{GF}	U-Wert Bodenplatte/ Grundfläche	$[W/m^2K]$
V	Volumen Wohneinheit	$[m^3]$
v_{Wind}	Windgeschwindigkeit	$[m/s]$

Griechisch

α	Wärmeübergangskoeffizient Decke - Raum	$[W/m^2K]$
α_E	Abweichung der Ausrichtung der geneigten Fläche zur Nordachse	$[^\circ]$
α_S	Sonnenazimut-Winkel	$[^\circ]$
γ_E	Winkel der geneigten Fläche zur Horizontalen	$[^\circ]$
γ_S	Sonnenhöhe	$[^\circ]$
θ_{gen}	Sonnenwinkel zur geneigten Fläche	$[^\circ]$
ϑ_{out}	Außentemperatur	$[^\circ C]$
ϑ_R	Raumtemperatur	$[^\circ C]$
ϑ_{TAB}	Temperatur thermische Bauteilaktivierung	$[^\circ C]$
ρ_L	Dichte der Luft	$[kg/m^3]$
τ	Luftwechsel	$[1/h]$

Abkürzungen

TAB	Thermische Bauteilaktivierung
MPC	Modellprädiktive Steuerung

Literatur

- [1] J. Široký, F. Oldewurtel, J. Cigler und S. Prívvara. „Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system“. In: *Applied Energy* 88.9 (2011), S. 3079–3087. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.009>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911001668>.
- [2] J. Drgoňa, D. Picard, M. Kvasnica und L. Helsen. „Approximate model predictive building control via machine learning“. In: *Applied Energy* 218 (2018), S. 199–216. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.156>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918302903>.
- [3] A. Afram, F. Janabi-Sharifi, A. S. Fung und K. Raahemifar. „Artificial neural network (ANN) based model predictive control (MPC) and optimization of HVAC systems: A state of the art review and case study of a residential HVAC system“. In: *Energy and Buildings* 141 (2017), S. 96–113. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.012>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816310799>.
- [4] M. Wallace, R. McBride, S. Aumi, P. Mhaskar, J. House und T. Salsbury. „Energy efficient model predictive building temperature control“. In: *Chemical Engineering Science* 69.1 (2012), S. 45–58. ISSN: 0009-2509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.023>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250911004854>.
- [5] J. Wang, S. Li, H. Chen, Y. Yuan und Y. Huang. „Data-driven model predictive control for building climate control: Three case studies on different buildings“. In: *Building and Environment* 160 (2019), S. 106204. ISSN: 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106204>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319304147>.

- [6] C. Finck, R. Li und W. Zeiler. „Economic model predictive control for demand flexibility of a residential building“. In: *Energy* 176 (2019), S. 365–379. ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.171>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219305912>.
- [7] F. Smarra, A. Jain, T. de Rubeis, D. Ambrosini, A. D’Innocenzo und R. Mangharam. „Data-driven model predictive control using random forests for building energy optimization and climate control“. In: *Applied Energy* 226 (2018), S. 1252–1272. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.126>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918302575>.
- [8] I. Hazyuk, C. Ghiaus und D. Penhouet. „Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part I – Building modeling“. In: 51 (2012), S. 379–387. ISSN: 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.009>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311003933>.
- [9] S. Prívvara, J. Cigler, Z. Váňa, F. Oldewurtel, C. Sagerschnig und E. Žáčková. „Building modeling as a crucial part for building predictive control“. In: *Energy and Buildings* 56 (2013), S. 8–22. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.024>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812005336>.
- [10] H. Viot, A. Sempey, L. Mora, J. Batsale und J. Malvestio. „Model predictive control of a thermally activated building system to improve energy management of an experimental building: Part I—Modeling and measurements“. In: *Energy and Buildings* 172 (2018), S. 94–103. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.055>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818311435>.
- [11] X. Li und J. Wen. „Review of building energy modeling for control and operation“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37 (2014), S. 517–537. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.056>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114003815>.
- [12] K. Krec. „Konditionierung und Energiespeicherung im Passivhaus mittels thermischer Aktivierung von Stahlbetondecken“. In: Expertenforum Energiespeicher Beton. 8. Nov. 2017.
- [13] V. Quaschnig. *Regenerative Energiesysteme*. 7. aktualisierte Auflage. Hanser Verlag München, 2011. ISBN: 978-3-446-42732-7.

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht zu den statischen Eingabeparametern	5
2	Übersicht über typische spezifische Wärmekapazitäten von Baustoffen . . .	6
3	Übersicht über die dynamischen Eingabeparameter	6

Abbildungsverzeichnis

1	Übersicht über das geplante Regelungskonzept	2
2	Schema des Gebäudemodells mit ein- und austretenden Energieströmen . .	3
3	Bestimmung des Sonneneinfallswinkels auf einer geneigten Fläche [13] . . .	7

4	Programmablaufdiagramm der Optimierung	9
5	Temperaturverlauf von 1.10.2019 - 31.12.2019 für Wohneinheit 1	10
6	Temperaturverlauf von 1.10.2019 - 31.12.2019 für Wohneinheit 2	11
7	Detailbetrachtung des Temperaturverlaufs von 27.12.2019 - 29.12.2019 inkl. Modelltemperaturverlauf für Wohneinheit 1	12
8	Detailbetrachtung des Temperaturverlaufs von 27.12.2019 - 29.12.2019 inkl. Modelltemperaturverlauf Wohneinheit 2	12