

IMPLEMENTIERUNG EINER MODELBASIERTEN PRÄDIKTIVEN REGELUNG FÜR EIN NICHTWOHNGEBÄUDE MIT KOMPLEXEM ENERGIEKONZEPT – SIMULATIONSERGEBNISSE

Ana Constantin¹, Johannes Fütterer¹, Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller¹, Georgios D. Kontes², und
Dimitrios V. Rovas²

¹Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, RWTH Aachen, Deutschland

²Department of Production Engineering & Management, Technical University of Crete, Kreta,
Griechenland

KURZFASSUNG

Das EU-Projekt PEBBLE strebt die Erreichung der maximalen erzeugbaren Nettoenergie für Gebäude unter Einhaltung von Behaglichkeitsbedingungen mit Hilfe eines intelligenten Steuerungs- und Regelungsprozesses an. Das neue E.ON ERC Hauptgebäude an der RWTH Aachen fungiert dabei als Demonstrationsgebäude. Der Optimierung- und Regelungsprozess setzt ein detailliertes thermisches Simulationsmodell des Gebäudes voraus, das benutzt wird um die Regler zu entwickeln und zu testen. Das Modell wurde in der Modelliersprache Modelica entwickelt. Die Simulationen wurden in der Simulationsumgebung Dymola gekoppelt mit dem im MATLAB programmierten Optimierungsalgorithmus für den Regler durchgeführt. Erste Simulationsergebnisse zeigen, dass der neue Regler im Vergleich zu üblichen regelbasierten Strategien zu besseren Ergebnissen hinsichtlich Energiebedarf und Innenraumbehaglichkeit führt.

ABSTRACT

The EU-funded project PEBBLE aims to achieve maximal net energy produced for buildings under the constraint of user comfort by using an intelligent control process. The new E.ON ERC main building will be used as a demonstration building. Detailed simulation models for the demonstration building are prerequisites for the building's optimization and control process. The model was developed with the modeling language Modelica. The simulations were done in the simulation environment Dymola coupled with the controller optimizing algorithm, which was implemented in MATLAB. First simulation results show that this controller leads to better results regarding energy consumption and comfort than rule-based controllers.

EINLEITUNG

Moderne Nichtwohngebäude befinden sich in einem Spannungsfeld zwischen hohen Energieeffizienz- und Behaglichkeitsanforderungen. Oft wird die Komplexität ihrer Energiekonzepte durch die Einbindung regenerativer Energien erhöht. Ziel des PEBBLE Projektes ist die Maximierung der erzeugten Nettoenergie eines Gebäudes, indem Energieverbrauch und -Erzeugung aufeinander

abgestimmt werden. Die Hauptaufgabe des Projektes liegt darin, das Regelungssystem zu befähigen, Entscheidungen (fast) in Echtzeit zu treffen und dabei sowohl Wetterbedingungen als auch das Nutzerverhalten zu berücksichtigen. Sieben Projektpartner aus Deutschland, Frankreich, Griechenland, Österreich und der Schweiz sind im Projekt involviert.

Das neue E.ON ERC Hauptgebäude an der RWTH Aachen wird zu Demonstrationszwecken benutzt. Das Gebäude verfügt über ein komplexes Energiekonzept. Geothermische Energie sowie Wärmeverschiebung bilden in Verbindung mit einer hocheffizienten, turbokompressorgetriebenen Wärmepumpe das Kernstück dieses Energiekonzepts. Für die Demonstration des Projekts wurden die Büroräume auf der Nordseite des Gebäudes gewählt. Mittels Betonkernaktivierung werden die Grundlasten an Wärme und Kälte in den Büroräumen verteilt. Für die Deckung der Spitzenlasten ist jeder Raum mit einem Fassadenlüftungsgerät ausgestattet.

Für die Regelstrategie wird eine modellbasierte Anpassungsmethodologie, genannt CAO (*cognitive adaptive optimization* - kognitivadaptive Optimierung), die automatisch und adaptiv relevante Regelparameter anpasst (Giannakis et al., 2011), eingesetzt. Die optimale Regelstrategie wird iterativ auf Basis einer Kostenfunktion ermittelt. Dabei wird der Energiebedarf unter Einhaltung von Behaglichkeitsbedingungen minimiert. Die Methode bietet folgende Vorteile an:

- Sie konvergiert immer zu einer (lokalen) optimalen Regelstrategie
- Sie kann für jeden Gebäudetyp eingesetzt werden, unabhängig von Größe oder installierter Gebäudetechnik
- Nutzereinschränkungen können direkt einbezogen werden

Das thermische Gebäudemodell für den Entwurf des Reglers wurde in der Modelliersprache Modelica entwickelt. Die Simulationen wurden in der Simulationsumgebung Dymola gekoppelt mit dem im MATLAB programmierten Optimierungsalgorithmus für den Regler durchgeführt.

SIMULATIONSETUP

Modellaufbau

Der Optimierungs- und Regelungsprozess setzt ein detailliertes thermisches Simulationsmodell des Gebäudes voraus. Das Modell berücksichtigt Wetterdaten, bautechnische Daten, Daten über die installierten raumlufttechnischen Anlagen und Energiewandlungsmaschinen, natürliche Lüftungsowie Daten über das Benutzerverhalten (Raumbelegung, innere Lasten).

Für die Erstellung des Modells wurden Komponenten aus dem Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik der RWTH Aachen entwickelten Modelica-Bibliotheken (Müller et al., 2010) benutzt. Jeder Raum wird mit Wänden, Fenstern und Türen einzeln modelliert.

Das Modell wird an ein Wettermodell gekoppelt. Die Wetterdaten kommen aus dem TRY (*test reference year* - Testreferenzjahr) für die Zone 05 (Aachen). In der Simulation werden folgende Wetterdaten verwendet: Außentemperatur, direkte und diffuse Solarstrahlung und Windgeschwindigkeit. Das Wettermodell berechnet aus der direkten und diffusen Sonnenbestrahlungsstärke bezogen auf die horizontale Fläche die Sonnenbestrahlungsstärke auf die Gebädefassaden.

Die Betonkernaktivierung wird durch ein physikalisches Modell für eine aktive Decke implementiert. Das Modell besteht aus einer Rohrleitung, die die Eigenschaften (Länge, Innen- und Außendurchmesser, Material) des realen Rohrs hat, die zwischen zwei Wandschichten plaziert ist. Die Fassadenlüftungsgeräte werden zuerst als ideale Geräte modelliert, die die Raumlufttemperatur ohne Verluste auf eine Solltemperatur bringen und halten.

Die zu entwickelnde Regelstrategie benutzt die Temperatursollwerte für jedes Fassadenlüftungsgerät als Regelparameter. Diese Sollwerte werden im Laufe eines Tages kontinuierlich, auf Basis einer Berechnungsformel neu ermittelt. Berücksichtigt werden sowohl die Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur und Solareinstrahlung) als auch die Innenraumbedingungen (Raumlufttemperatur).

Die Büroräume im Gebäude haben weder die gleiche Ausrichtung, noch die gleiche Anzahl von Personen. Deswegen wird vermutet, dass die Anwendung einer einzelnen Formel für alle Räume suboptimale Ergebnisse liefern würde. Die relevante Frage in diesem Zusammenhang ist, welche hinreichende Anzahl an unterschiedlichen Regelstrategien ist. Abhängig davon nach welcher Formel die Regelparameter berechnet werden, können die Räume zu Zonen zusammengefasst werden, wobei jede Zone einen eigenen Regler, der eine einzige Berechnungsformel benutzt, hat.

Es wird angenommen, dass die Solareinstrahlung den größten Einfluss auf die Zonierung hat. Da die Eckbüros mit zwei Außenwänden eine Ausnahme dar-

stellen, wurden für die ersten Simulationen nur die Räume mit einer Außenwand betrachtet. Es wurden Modelle von Türmen von drei Büroräumen (aus dem zweiten, ersten und Erdgeschoss) gebaut, insgesamt vier Türme mit folgenden Ausrichtungen: Nordwest (NW), Südwest (SW), Südost (SO) und Nordost (NO). Für jeden Turm wurden die Regelparameter bestimmt und die vier Regelstrategien wurden miteinander verglichen.

Die Grundzelle für die Modelle ist der einfache Büroraum mit einer Fläche von 18,75 m², einer Höhe von 3 m und einer Fensterfläche von 8 m². Er ist als 2er Büroraum ausgelegt. Die Randbedingungen an den vertikalen Innenwänden zu benachbarten Büroräumen werden adiabatisch gesetzt, da die Räume dieselbe Nutzung haben. Als innere Lasten werden Menschen, Maschinen und Beleuchtung betrachtet. Die Wärmeabgabe der Menschen richtet sich nach den Angaben der VDI 2078 Richtlinie und ist vom Tätigkeitstyp und von der Raumtemperatur abhängig (VDI 2078, 1996). Der Anteil der konvektiven Wärmeabgabe der Menschen ist 0,5. Es wird von einer leichten Tätigkeit ausgegangen. Die Wärmeabgabe der Maschinen wird nach der DIN V 18599 ermittelt (DIN 18599-10, 2010). Hierbei ist der Anteil der konvektiven Wärmeabgabe 0,6. Für die Beleuchtung wird ein maximaler Wert von 10 W/m² und ein konvektiver Wärmeabgabeanteil von 0,5 angenommen. Die inneren Lasten sind nur während der Arbeitszeiten aktiv, d.h. von Montag bis Freitag, 7 Uhr bis 18 Uhr. Die Gleichzeitigkeit der inneren Lasten wird in Abbildung 1 dargestellt und wird aus der Schweizerischen Norm SIA 2024 abgeleitet (SIA 2024, 2006).

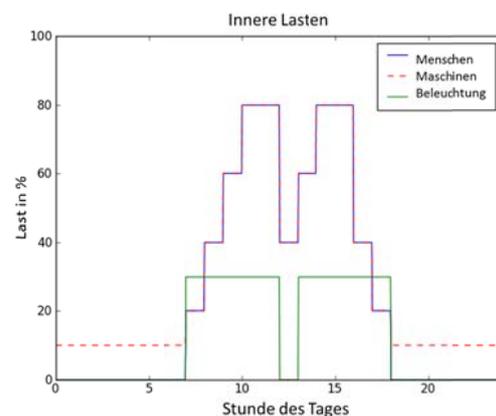


Abbildung 1 Gleichzeitigkeit der inneren Lasten in einem Büroraum

Der CAO – Regler

Die Regelparameter werden durch eine lineare Kombination von Zuständen ermittelt:

$$U = \theta X \quad (1)$$

wobei $U = [u_1, u_2, u_3]^T$ die Regelparameter, $X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T$ die Gebäudezustände und

$\theta \in R^{3 \times 7}$ die zu ermittelnden Verstärkungen sind. Für einen Turm sind die Regelparameter und Gebäudezustände exemplarisch in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1 Regelparameter für einen Turm

Regelparameter	Beschreibung	Bereich
u_1	T_{Soll} Raum EG	[22 – 26] °C
u_2	T_{Soll} Raum 1. OG	[22 – 26] °C
u_3	T_{Soll} Raum 2. OG	[22 – 26] °C

Tabelle 2 Gebäudezustände für einen Turm

Variable	Beschreibung
x_1	Außentemperatur
x_2	Solarstrahlung auf Fassade
x_3	Solarstrahlung auf Dach
x_4	Temperatur Raum EG
x_5	Temperatur Raum 1.OG
x_6	Temperatur Raum 2.OG

Die folgende Kostenfunktion wird minimiert:

$$J = w_1 \tanh(A \cdot E^2 + B) + w_2 \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \tanh(A \cdot F_i^2 + B) \quad (2)$$

wobei E der Energiebedarf, F_i der Fanger PPD Index (Fanger, 1970) für Raum i , w_1 und w_2 die Gewichte für das Trade-off zwischen Energiebedarf und Komfortbedingungen sind. Die \tanh -Funktion wurde als glättender Operator benutzt.

Gekoppelte-Simulation

Die optimale Regelungsvariante wird iterativ auf Basis der oben genannte Kostenfunktion ermittelt. Zusätzlich soll der Fanger PPD Faktor den Wert von 15% nicht überschreiten. Der Energiebedarf ist die von den idealen Fassadenlüftungsgeräten benötigte Energie zur Konditionierung der Raumluft. Der Algorithmus (CAO) zur Berechnung der optimalen Sollwerte für die Fassadenlüftungsgeräte wird in MATLAB implementiert und kann nicht auf ein Modelica-Modell übertragen werden. Deswegen werden während der Simulation die zwei Programme, MATLAB und Dymola, über die Software BCVTB (Wetter et al., 2008) verbunden.

Der CAO-Regler wird jeweils für einen Tag bestimmt und die Programme tauschen sich in der Simulation alle zehn Minuten aus. Der Optimierungsalgorithmus gibt die Regelparameter vor. Im Fall eines Turms sind es drei Solltemperaturen, jeweils eine pro Raum. Das Modelica-Modell gibt die Temperatur der Außenluft und der Raumluft in allen drei Räumen, die Solarstrahlung, den Energiebedarf und den Fanger PPD Faktor in allen drei Räumen dem Optimierungsalgorithmus zurück.

Durchgeführte Simulationen

Die Bestimmung der optimalen Reglerparameter für einen Turm für ein ausgewähltes Zeitintervall wird im Folgenden *Experiment* genannt. Die Anzahl der

Regelparameter pro Turm (drei) entspricht der realen Anzahl an Regelparametern. Für die Betonkernaktivierung werden für alle Räume derselbe Volumenstrom und dieselbe Volumenlaufzeit angenommen. Eine Energiebeziehung der Volumenlaufzeit der Betonkernaktivierung als Regelparameter wird im Rahmen einer späteren Simulation der ganzen Nordzone des Gebäudes erfolgen.

Das neue Gebäude des E.ON ER C der RWTH Aachen ist ein gut gedämmtes Gebäude mit einer hohen Speichermasse. Experimente für Wintertage sind weniger interessant, weil der Energiebedarf im Winter wegen der hohen inneren Lasten niedrig ist. Deswegen werden in diesem Paper die Experimente für eine Sommerwoche vorgestellt. Es wurde die Sommerwoche 6.07 - 12.07 ausgewählt. Die maximale Tagesaußentemperatur über die Woche liegt zwischen 18 °C und 28 °C, was eine Mischung aus kalten, warmen und heißen Sommertagen darstellt.

Die relevante Frage für iterative Verfahren ist welche die minimale Anzahl an Iterationen ist, um ein optimales Ergebnis finden zu können. Für zwei Türme (NO und SO) wurden jeweils Experimente mit 50, 75, 100 und 150 Iterationen durchgeführt. Jedes Mal wurden der Energiebedarf und die Dauer der Nichteinhaltung der Komfortbedingung ermittelt und anschließend verglichen. Eine Anzahl von 75 Iterationen wurde als hinreichend festgelegt, weil die Ergebnisse für eine höhere Anzahl an Iterationen gleich geblieben sind.

Da die Verschattung in den Räumen nur manuell erfolgen kann und deswegen nutzerabhängig und noch unbekannt ist, wurde in diesen ersten Simulationen keine Verschattung berücksichtigt. Die Weiterentwicklung des Nutzerverhaltensmodells soll eine realistische Modellierung der Verschattung ermöglichen.

ERGEBNISSE

Ermittlung des optimalen Reglers für jeden Turm

Die Experimente wurden für je den Turm durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt, wo für jeden Turm der Energiebedarf und die Dauer der Nichteinhaltung der Komfortbedingung eingetragen sind.

Tabelle 3 Ergebnisse der Experimente für eine Sommerwoche (6.07 - 12.07)

CAO - REGLER	ENERGIE-BEDARF	DAUER NICHT-EINHALTUNG KOMFORTBED.
Turm SO	30,82 kWh	1 h
Turm NO	65,0 kWh	2 h
Turm NW	32,6 kWh	3,33 h
Turm SW	40,95 kWh	8,33 h

Während die Energiebedarfe für die Türme SO und NW fast gleich sind, haben die Türme SW und NO

vergleichsweise höhere Energiebedarfe die Dauer der Nichteinhaltung der Komfortbedingung von Fanger PPD < 15% ist überall niedrig.

Der Unterschied in den Werten für den Energiebedarf ist auf die Orientierung jedes Turms zurückzuführen. Die Gewinne aus der Solareinstrahlung sind höher für die Türme NO und SW und deswegen wird mehr Energie umgewandelt, um behagliche Bedingungen sicherzustellen.

Ein Experiment für einen Tag dauert zwei Stunden, wenn das Optimierungsalgorithmus mit 75 Iterationen drei Mal läuft.

Reduzierung der Anzahl von einzelnen CAO-Reglern

Es wird untersucht ob der CAO-Regler für einen Turm auch für andere Türme eingesetzt werden kann. Dafür werden für jeden Turm drei neue Simulationen durchgeführt, mit den Reglern der anderen Türme. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in der Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt.

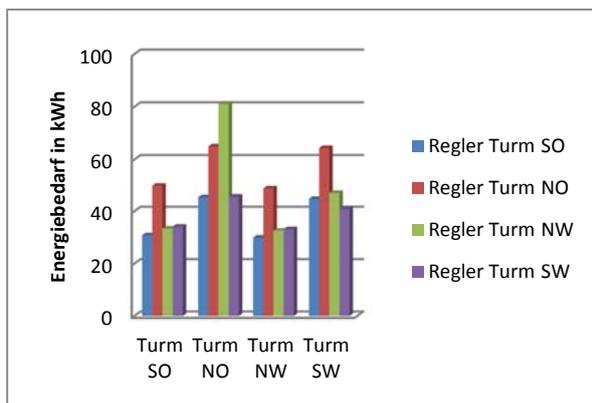


Abbildung 2 Reglervergleich - Energiebedarf

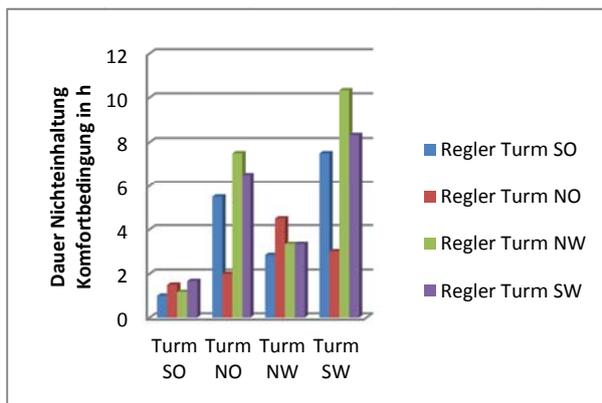


Abbildung 3 Reglervergleich - Dauer Nichteinhaltung Komfortbedingung

Bis auf Turm NW liefern die eigenen Regler immer die besten Ergebnisse, wenn der Energiebedarf und die Behaglichkeitsbedingung zusammen betrachtet werden. Für den Turm NO liefern die Regler der

Türme SO und SW zwar niedrigere Energiebedarfe, aber die entstandenen Dauer für die Nichteinhaltung der Komfortbedingung von 5,5 und 7,5 Stunden sind viel höher als die 2 Stunden, die mit dem eigenen Regler erzielt werden.

Die Ausnahme ist der Turm NW, wo bessere Ergebnisse, sowohl für den Energiebedarf als auch für die Innenraumbehaglichkeit mit dem Regler des Turms SO erzielt werden. Es wird vermutet, dass sich der Algorithmus in einem lokalen Minimum verfangen hat. Allerdings ist der Unterschied zwischen den zwei Reglern unter 2,7 kWh (ca. 8%).

Vergleich mit regelbasierten Reglern

Um eine Aussage über die Qualität der Regelung treffen zu können, werden die CAO-Regler mit einem regelbasierten Regler verglichen. Regelbasierte Regler, wie z.B. die Einhaltung einer bestimmten Solltemperatur, werden oft für Klimaanlagen eingesetzt. Die Temperatur im Gebäude soll zwischen 22°C und 26°C während der Arbeitszeit liegen. Die außentemperaturabhängige Regelung erfolgt nach der in Abbildung 4 dargestellten Kurve.

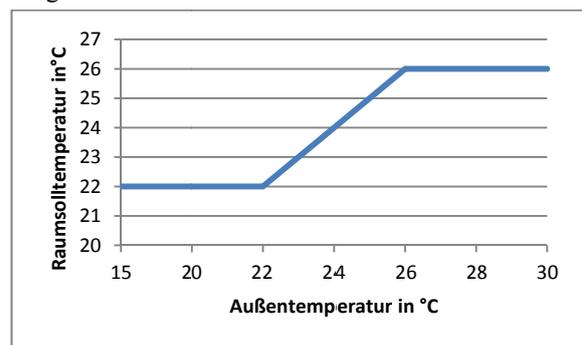


Abbildung 4 Raumsolltemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur

Abbildungen 5 und 6 zeigen die Ergebnisse des Vergleiches.

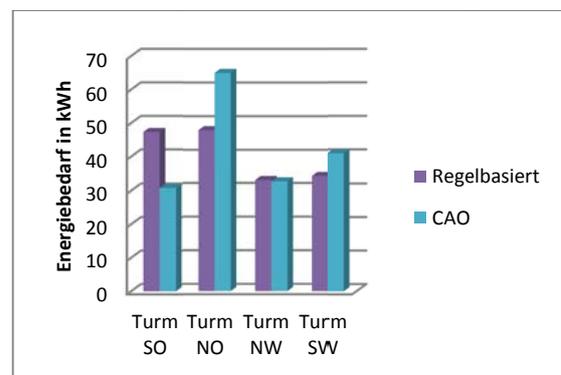


Abbildung 5 Vergleich mit dem regelbasierten Regler - Energiebedarf

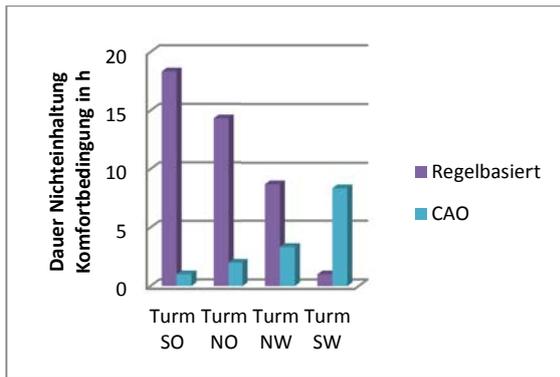


Abbildung 6 Vergleich mit dem regelbasierten Regler - Dauer Nichteinhaltung Komfortbedingung

Im Vergleich zu dem regelbasierten Algorithmus wird bei Anwendung des CAO-Reglers die Dauer der Nichteinhaltung der Komfortbedingungen für alle vier Türme reduziert. Der Gesamtenergiebedarf ist bleibt fast gleich.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Paper fasst die ersten Simulationsergebnisse im Rahmen des PEBBLE-Projektes für die modellbasierte Bestimmung von Reglerparametern für das neue Hauptgebäude des E.ON ERC der RWTH Aachen vorgestellt zusammen.

Erste Simulationsergebnisse zeigen, dass prinzipiell unterschiedliche Regler für Räume mit unterschiedlichen Ausrichtungen verwendet werden können, wobei für den Sommerfall dieselbe Regler (SO) für die Ausrichtungen SO und NW benutzt werden kann.

Ein Vergleich mit einem regelbasierten Regler hat gezeigt, dass der CAO-Regler bessere Ergebnisse liefert, wenn als Bewertungskriterium der Energiebedarf und die Innenraumbehaglichkeit für alle vier Ausrichtungen zusammengefasst betrachtet wird. Die Betrachtung der Innenraumbehaglichkeit im Zusammenhang mit der Energieeffizienz der Anlage stellt eine Besonderheit des CAO-Reglers dar.

Im nächsten Schritt werden die Einbindung des Nutzerverhaltens bezüglich Verschattung im Raum und die Einbeziehung der Vorlauftemperatur der Betonkernaktivierung als Reglerparameter erfolgen.

DANKSAGUNG

Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch das Sibte Rahmenprogramm (FP7-ICT-2007-9.6.3) der Europäischen Union unter der Vertragsnummer #248537 (PEBBLE).

LITERATUR

DIN 18599 Blatt 10: 2010, Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung - Teil 10:

Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten, Bauth Verlag, Berlin.

Fanger, P. O. 1970, Thermal Comfort, Danish Technical Press, Copenhagen.

Giannakis, G.I., Kontes, G.D., Kosmatopoulos, E.B. and Rovas, D.V. 2011, A model-assisted adaptive controller fine-tuning methodology for efficient energy use in buildings, Proceedings of the 19th Mediterranean Conference on Control and Automation, Corfu, Greece.

Müller, D., Hossaini Badakhshani, A. 2010, Gekoppelte Gebäude- und Anlagesimulation mit Modelica, BauSim Konferenz, Wien.

SIA 2024: 2006 Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik, Zürich.

VDI 2078: 1996, Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln), Düsseldorf.

Wetter, M., Haves, P. 2008, A modular Building Controls Virtual Test Bed for the integration of heterogeneous systems, Proceedings of the 3rd SimBuild Conference, Berkeley, CA USA.