

## VERGLEICH EINES DETERMINISTISCHEN MIT EINEM STOCHASTISCHEN ANSATZ FÜR DIE PERSONENBELEGUNG IN NICHTWOHNGEBÄUDEN

Johannes Maderspacher<sup>1</sup>, Gerhard Zweifel<sup>1</sup>, Sven Moosberger<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zentrum für Integrale Gebäudetechnik, Hochschule Luzern, Horw, Schweiz

<sup>2</sup>EQUA Solutions AG, Knonau, Schweiz

Email: johannes.maderspacher@hslu.ch

### KURZFASSUNG

Dieser Beitrag untersucht den Einfluss von unterschiedlichen Ansätzen (deterministisch und stochastisch) der Simulation von Personenbelegung in Nichtwohngebäuden. Für die Gegenüberstellung der beiden Methoden wurden die Simulationsergebnisse der Kühllast und Kühlenergie eines Kleinraumbüros verglichen. Mit Hilfe einer Monte-Carlo Studie wurde die Verteilung der Resultate untersucht. Es zeigte sich dass die „zufällige“ (stochastische) Darstellung, im analysierten Fallbeispiel, der Anwesenheit keinen grossen Einfluss auf den Verbrauch der Kühlenergie hat. Die Wirkung auf die Kühlleistung ist mit einer verursachten Streuung von bis zu 200 Watt, 15 % des maximalen Tageswertes, jedoch nicht vernachlässigbar. In weiteren Untersuchungen ist eine Kopplung der stochastischen Belegung mit der Interaktion Person – Gebäude zu fokussieren.

This paper examines the influence of different attempts (deterministic and stochastic) in the simulation of personal presence in non-residential buildings. For the comparison of both methods the simulation results of the cooling load and cooling energy of a small space office were compared. The distribution of the results was examined with a Monte-Carlo-Simulation. In the analysed case-study the influence of the randomised presence has no big impact on the cooling energy. The effect on the cooling load is not neglectable with a caused diffusion from up to 200 watts, 15% of the maximum daily value. In other investigations a coupling of the stochastic presence modelling with the behaviour of the occupants has to be focused.

### EINLEITUNG

Für das Erreichen belastbarer Resultate bei thermischen Gebäudesimulationen ist es notwendig, nicht nur das Gebäude und dessen Beschaffenheit, sondern auch den Nutzer zu berücksichtigen (Hoes et al. 2009). Eine Person kann direkt oder indirekt auf ein Gebäude einwirken. Der direkte Einfluss ist als interne Wärmequelle sowie CO<sub>2</sub>-Produzent. Der indirekte Einfluss ist die Interaktion des Nutzers mit dem Gebäude, z.B. Steuerung der Beleuchtung, Betriebsein-

richtungen, Sonnenschutz, Fensteröffnung und Regelung der Heizung-, Lüftung- und Kältetechnik (Haldi, 2010).

Die Anwesenheit von Personen in der Gebäudesimulation, wird standardmäßig durch ein deterministisches Profil repräsentiert. Beispiele dafür sind in Deutschland die DIN 18599-10:2007 oder in der Schweiz das Merkblatt 2024 der SIA. Das Verhalten einer Person ist jedoch ein äußerst situativ variabler und individueller Prozess, welcher nur sehr vereinfacht mit einem festgelegten Profil abgebildet werden kann. Aufgrund dieses Sachverhaltes gibt es Untersuchungen die versuchen, mit Hilfe von stochastischen Modellen, eine realere Darstellung des Nutzers zu ermöglichen.

In den letzten Jahren wurden mehrerer Modelle für die Implementierung in Gebäudesimulationssoftware entwickelt (Rijal et al. 2007), (Mahdavi et al. 2007), (Nicol, 2001), (Reinhart, 2004). Ziel war eine realistischere Wiedergabe der Interaktionen (Fensteröffnung, Beleuchtung und Verschattung) und Anwesenheit von Personen in Bürogebäuden. Eine Weiterentwicklung von (Nicol, 2001) und (Reinhart, 2004) ist das in ESP-r integrierte Sub-Hourly Occupancy Control (SHOCC) von (Bourgeois, 2005). (Page et al. 2007) versuchte mit Verwendung von Markow-Ketten ein stochastisches Modell für die Anwesenheit von Personen zu erzeugen.

Die bereits genannten Modelle basieren meist auf Messungen im Feld. Weitere Ansätze sind mit Daten aus soziologischen Studien („Time Use Survey“), in denen Informationen über Personen sowie aktuelle Tätigkeit, Ort und Dauer enthalten sind (Wilke et al. 2011), (Widen et al. 2011). Eine weitere Entwicklung für die Darstellung des Nutzers ist eine „Multiagent Simulation“. Die Basis bilden „Agenten“ welche mit Attributen wie Alter, Geschlecht, Beruf etc. ausgestattet sind. Die Agenten verhalten sich nach stochastisch beeinflussten Verhaltensprofilen, welches z.B. auf Grundlage von Time Use Survey Daten ermittelt wurden (Robinson et al. 2011).

Die folgenden Untersuchungen beschränken sich auf die reine (ohne Interaktion) Anwesenheit des Nutzers im Bereich der Nichtwohngebäude. Ein Simulationsmodell eines Kleinraumbüros (vier

Personen) bildet deren Basis. Ziel ist es unter Verwendung der beiden Modelltypen (deterministisch, stochastisch), für die Anwesenheit von Personen, Unterschiede in den Resultaten der Gebäudesimulation zu erkennen.

## VORGEHEN

### Definition Bürozone

Für die Untersuchung wurde ein fiktives Büro erstellt. Der Standort des Gebäudes ist in Zürich. Die analysierte Zone liegt an der Südfassade in der Mitte des Gebäudes, d.h. sie wird von anderen Büros umschlossen. Die Größe der Bürozone entstand aus den Vorgaben des SIA 2024 Merkblattes mit dem Standardwert für die Grundfläche von 14 m<sup>2</sup> pro Person.

Tabelle 1: Eckdaten der Bürozone

Grundfläche	56 m <sup>2</sup>	4 Personen a 14 m <sup>2</sup>
Volumen	168 m <sup>3</sup>	
Aussenwand	17 m <sup>2</sup>	U-Wert 2.0 W/m <sup>2</sup> K
Fensterfläche	11 m <sup>2</sup>	U-Wert 1.3 W/m <sup>2</sup> K
Verschattung	11 m <sup>2</sup>	g-Wert 0.14

Die Kennwerte der Bauteile basieren auf den Grenzwerten der SIA 380/1. Die Daten für die Beleuchtung, Lüftung, Betriebseinrichtungen wurden aus den Standard- Nutzungsprofilen für Energie und Gebäudetechnik für Einzel-, und Gruppenbüros der SIA 2024 übernommen. Für die Klimatisierung der Zone dient eine Lüftungsanlage.

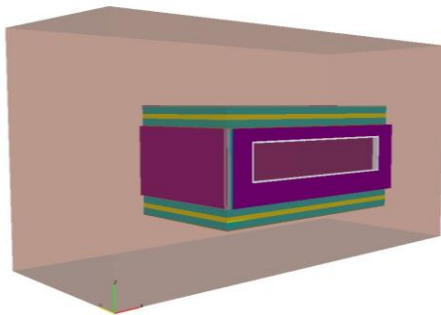


Abbildung 1: Bürozone IDA-ICE

### Anwesenheit in der Zone

In einem weiteren Schritt wurden die beiden folgenden Ansätze für die Personenbelegung in die Simulationsumgebung integriert. Für die deterministische Belegung wurde exemplarisch das Anwesenheitsprofil des SIA 2024 Merkblattes verwendet. Die zufällige (stochastische) Darstellung der Anwesenheit erfolgte mit dem Modell von (Page, et al. 2007). Das Modell verwendet die Methode der Markov-Kette um die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit in jedem Zeitschritt zu bestimmen. Diese Methode ermöglicht

die „aktuelle“ Anwesenheit mit Hilfe einer Übergangswahrscheinlichkeit und dem Wert des vorhergehenden Zeitschrittes zu ermitteln. Abbildung 2 zeigt den schematischen Ablauf, wobei die Ziffer 0 dem Status „abwesend“ und die Ziffer 1 dem Status „anwesend“ entspricht. Die Übergangswahrscheinlichkeiten sind definiert durch:

- $t_{0,0}$ : Wahrscheinlichkeit das niemand anwesend ist.
- $t_{0,1}$ : Wahrscheinlichkeit das jemand kommt.
- $t_{1,1}$ : Wahrscheinlichkeit das jemand anwesend ist.
- $t_{1,0}$ : Wahrscheinlichkeit das jemand geht.

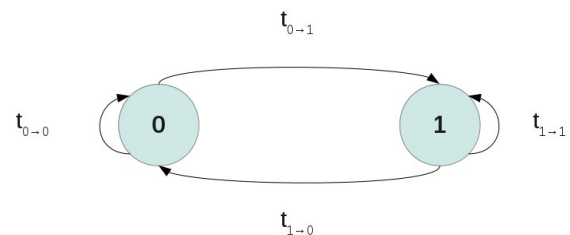


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Übergangswahrscheinlichkeiten

Das Modell von (Page, et al. 2007) benötigt als Eingangsgrößen die Anwesenheitswahrscheinlichkeit einer „typischen“ Woche, sowie einen „Mobilitätsparameter“. Dieser Parameter beschreibt die Häufigkeit der Ereignisse „eintreffen“ und „verlassen“ von Personen in der Zone. Die Zufälligkeit im Modell wird durch die Inversionsmethode erzeugt. Dies ist ein Simulationsverfahren um aus gleichverteilten Zufallszahlen andere Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu erzeugen. (Für detailliertere Informationen (Page, et al. 2007)).

Für die weitere Untersuchung wurde der Mobilitätsparameter als konstant angenommen. Als „typische“ Woche wurde ebenfalls, wie im deterministischen Fall, die Belegung nach SIA 2024 verwendet. Dies hat zum Ziel, dem Profil eine zufällige Variabilität zu verleihen und deren Auswirkungen zu analysieren.

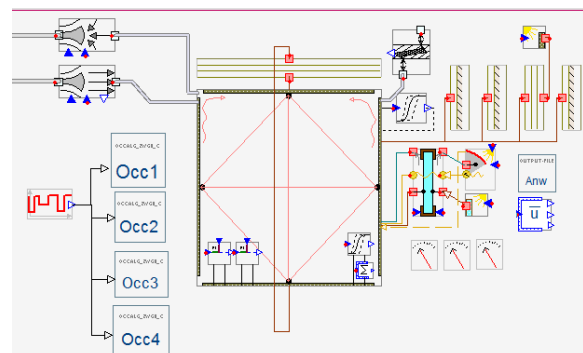


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Bürozone

## Monte Carlo Studie

In einem ersten Schritt wurden die Ergebnisse, der beiden Ansätze (deterministisch, stochastisch), einer Jahressimulation verglichen. Dabei konnten Variablen mit unterschiedlichen Resultaten ermittelt werden. Im weiteren Verlauf beschränkt sich die Analyse auf die beiden Variablen Kühlleistung und Kühlenergie. Da dort die deutlichsten Differenzen erfasst wurden. Mit Hilfe einer Monte-Carlo Simulation wurde versucht die Variabilität und Verteilung der beiden Größen zu bestimmen.

Damit die im stochastischen Modell erzeugten „Pseudozufallszahlen“ nicht immer den selben Anwesenheitsverlauf reproduzieren, müssen die Anfangsbedingungen der Simulation geändert werden. Dies wird erreicht in dem sich z.B. die Dauer der Einschwingphase pro Simulationsrun verändert. Aus diesem Grund wurde auch die Variable „Einschwingdauer“ mit einem Zufallsgenerator erzeugt. Dadurch kann für jeden Run der Simulation ein unterschiedlicher Anfangszustand erreicht werden.

Nach (Macdonald 2009) ist eine Wiederholung von 100 Runs bei Verwendung des „simple random sampling“ im Bereich der Gebäudesimulation ausreichend, um eine aussagekräftige Verteilung der untersuchten Größen zu erhalten. So wurde der Monat Juni, unter dem Aspekt des Kühlbedarfes, 100 mal simuliert.

## ANALYSE DER ERGEBNISSE

Die Abbildung 4 zeigt, exemplarisch an einem Tag, die unterschiedlichen Anwesenheiten der beiden Methoden. Für die Simulation der Personenbelegung im deterministischen Fall, wird das „Profil-2024“ multipliziert mit der Anzahl der jeweiligen Personen. Dies bedeutet dass die Personen immer zur gleichen Zeit im Büro anwesend sind. Während die Simulationsergebnisse, des stochastischen Modells, unterschiedliche Anwesenheiten der vier implementierten Personen zeigen.

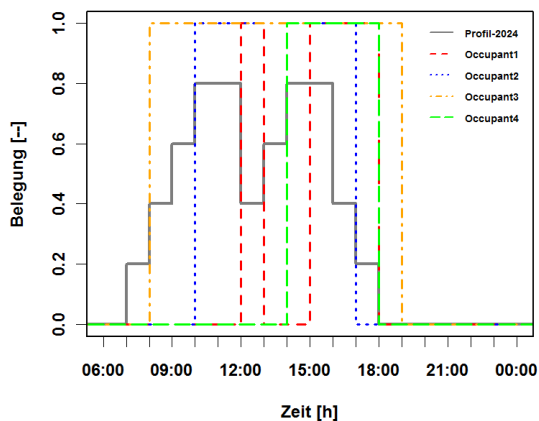


Abbildung 4: Simulierte Anwesenheiten der beiden Methoden

Diese Unterschiede in der Belegung des Büros haben, wie in Abbildung 5 zu sehen, Auswirkungen auf die benötigte Kühlleistung. So können Unterschiede im Maximalwert als auch im zeitlichen Verlauf erkannt werden.

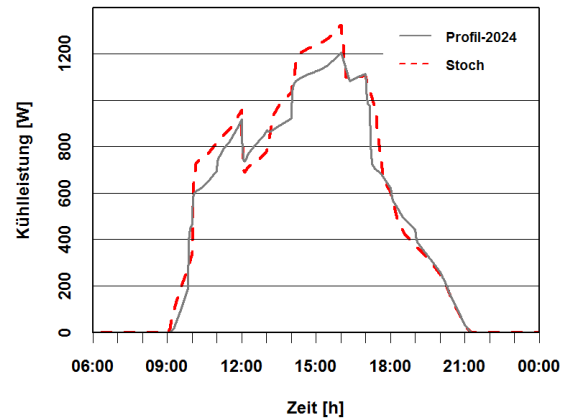


Abbildung 5: Kühllastverlauf am 5 Juni

In Abbildung 6 ist die kumulierte Anwesenheit der beiden Methoden (deterministisch, stochastisch) über ein Jahr aufgetragen. In der Summe zeigen sich keine größeren Unterschiede. Dies ist dadurch zu erklären, dass für das stochastische Modell auch das Profil-2024 als Eingangsgröße verwendet wird. Es entstehen zwar kurzfristige „Variationen“ des Profils, wie in Abbildung 4, über längere Zeiträume ist die summierte Anwesenheit jedoch mit dem Profil-2024 identisch.

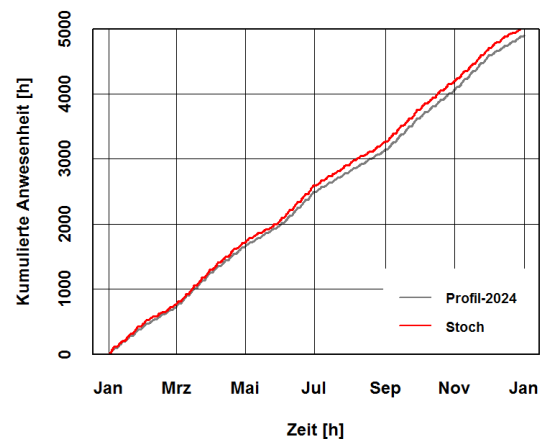


Abbildung 6: Kumulierte Anwesenheit der beiden Methoden

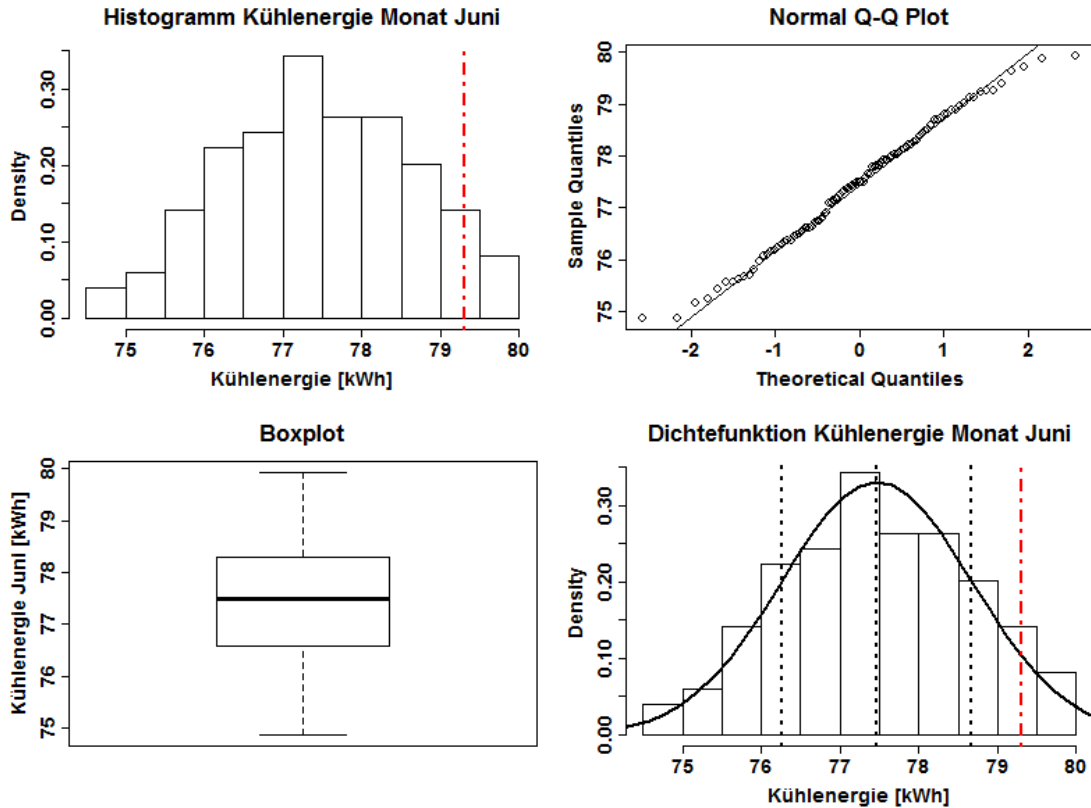


Abbildung 7: Resultate der benötigten Kühlenergie im Monat Juni nach 100 Simulationen

Die Grafiken in Abbildung 7 zeigen eine Verteilung der benötigten Kühlenergie, im Monat Juni, nach 100 Simulationen. Die Resultate haben eine Streuung von 75 kWh bis 80 kWh und sind normalverteilt. Der Mittelwert liegt bei 77,5 kWh mit einer Standardabweichung von +/- 1,2 kWh. Dies bedeutet eine Schwankung von ca. 1,5 %. Die Strichpunktlinie in den beiden Histogrammen ist der simulierte Kühlenergiebedarf mit dem deterministischen Belegungsprofil. Der unterschied zum Mittelwert des stochastischen Modelles beträgt 1,8 kWh.

Abbildung 8 präsentiert die Variation der Kühlleistung nach 100 Simulationen mit dem stochastischen Modell. Die schwarze Linie ist das Ergebnis der Berechnungen mit dem deterministischen Ansatz. Die Schwankungen der Kühlleistung können, z.B. um ca. 16:00 Uhr, bis zu 200 Watt betragen. Das sind ca. 15 % der maximalen Tagesleistung.

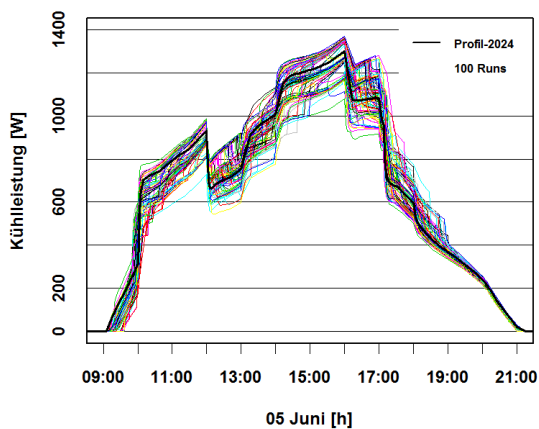


Abbildung 8: Resultate der benötigten Kühlleistung am 5 Juni nach 100 Simulationen

Die beiden Grafiken in Abbildung 9 stellen die Verteilung der Kühllast am 5 Juni um 12:00 Uhr dar. Man erkennt dass die Werte nicht normalverteilt sind. Der Bereich im Boxplot von der grössten „normalen“ Beobachtung zur kleinsten „normalen“ Beobachtung geht von 800 Watt bis 980 Watt. Der Streubereich zwischen den unteren und oberen Quartil liegt zwischen 880 Watt und 980 Watt. Dies bedeutet dass 50% der Werte um ca. 100 Watt streuen. Der Median der Beobachtung liegt bei ca. 890 Watt im unteren Teil des Streubereiches. Dies weist darauf hin, dass die größere Anzahl der Werte im oberen Gebiet der Verteilung liegen. Die Verteilungsfunktion weist einen stufenförmigen Verlauf auf. Der durch die sprunghaften Änderungen von „anwesend“ zu „abwesend“ verursacht wird. Die beiden Strichpunktlinien oben und unten in der Grafik markieren ein Vertrauensintervall von 0,05 – 0,95. Die Schnittpunkte mit der Verteilungsfunktion zeigen das 90 % der Werte im Bereich von 810 Watt bis 980 Watt liegen. Der Schnittpunkt bei  $F_n(x)$  0,65 und 940 Watt spiegelt das Ergebnis der deterministischen Berechnung wieder.

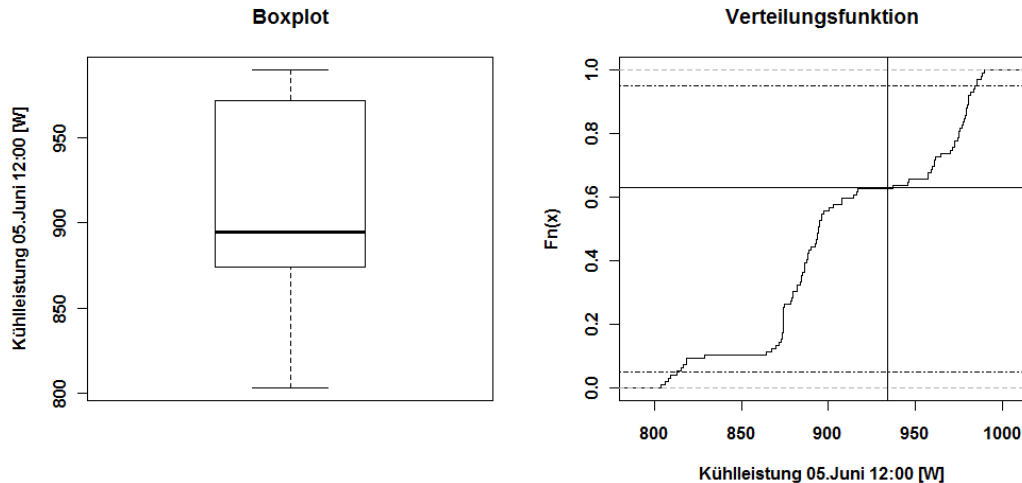


Abbildung 9: Verteilung der Kühlleistung am 5. Juni um 12:00 nach 100 Simulationen.

## ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde der Einfluss von unterschiedlichen Ansätzen (deterministisch und stochastisch) der Personenbelegung in Nichtwohngebäuden untersucht. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Änderung der Simulationsergebnisse der beiden Variablen Kühllast und Kühlenergie gelegt.

Generell konnte gezeigt werden dass mit Hilfe eines stochastischen Modelles eine variabelere Darstellung der Belegung möglich ist. Der Einfluss der „zufälligen“ Anwesenheit, im untersuchten Fallbeispiel, auf den Kühlenergieverbrauch ist gering. So variiert der Verbrauch im Monat Juni mit ca. 1,5 %. Auch der unterschied zur deterministischen Lösung ist mit weniger als 2 kWh als marginal anzusehen. Die Ursache für die geringen Abweichungen liegt in der Wahl des verwendeten Wahrscheinlichkeitsprofils, als Eingabegrösse für das stochastische Modell. Hier wurde, wie in der deterministischen Simulation, das Profil des SIA 2024 Merkblattes verwendet. Wenn aber zwei unterschiedliche Anwesenheitsprofile verwendet werden, sind die kumulierten Anwesenheiten nicht mehr identisch und somit auch der Einfluss auf die Kühlenergie grösser.

Der Einfluss auf die Kühlleistung ist mit einer verursachten Streuung von bis zu 200 Watt, 15 % des maximalen Wertes, nicht vernachlässigbar. Jedoch sollte hierbei projektspezifisch entschieden werden wie detailliert diese Schwankungen in der Planung berücksichtigt werden müssen.

### Weiteres Vorgehen

Im gezeigten Fallbeispiel hat die Untersuchung der „reinen“ Anwesenheit nur einen Kleinen Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation. Für die Wirkung in Räumen mit größerer Anzahl von Personen, z.B. Großraumbüro und Klassenzimmer, müssten aber weitere Analysen durchgeführt werden. Ein weiterer

Schritt wäre die Kopplung der stochastischen Belegung mit der Interaktion Person – Gebäude. In diesem Fall wäre eine verstärkte Wirkung auf die Simulationsergebnisse zu erwarten.

## DANKSAGUNG

Der Beitrag wurde im Rahmen eines Vertiefungsprojektes des Master of Science in Engineering der Hochschule Luzern erstellt. Ein besonderer Dank geht an die Firma EQUA Solutions AG für ihre Unterstützung.

## LITERATUR

- 18599-10:2007, D. E. (2007). DIN EN 18599:2007 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Deutschland: Beuth.
- Bourgeois, D. (2005). Detailed occupancy Prediction, occupancy-sensing control and advanced behavioural modelling within whole-building energy simulation. Quebec, Kanada: Universität Laval.
- Haldi, F. (2010). Towards a unified model of occupants behaviour and comfort for building energy simulation. Lausanne, Schweiz: Ecole Polytechnique Federal de Lausanne.
- Hoes, P., Hensen, J., Loomans, M., & Bourgeois, D. (2009). User behavior in whole building simulation. Energy and Buildings , 295 - 302.
- Rijal, H., Tuohy, P., Humphreys, M., Nicol, J., Samuel, A., & Clarke, J. (2007). Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. Energy and Buildings , 39 (7), 823-836.



- Reinhart, C. (2004). Lightswitch - 2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy* 77 , 15 - 28.
- Mahdavi, A., Lambeva, L., Mohammadi, A., Kabir, E., & Pröglhöf, C. (2007). Two case studies on user interactions with buildings' environmental systems. *Bauphysik* , 29 (1), 72 – 75.
- Nicol, J. (2001). Characterising occupant behaviour in buildings, towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans. *Solar Energy* , 36 - 48.
- Page, J., Robinson, D., Morel, N., & Scartezzini, J.-L. (2007). A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence. *Energy and Buildings* , 84 - 98.
- SIA Merkblatt 2024 (2006). SIA 2024:2006 Standard-Nutzungsbedingungen für Energie- und Gebäudetechnik. Zürich, Schweiz: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- Widen, J., Molin, & Ellegard, K. (2011). Models of domestic occupancy, activities and energy use based on time use data. *Journal of Building Performance Simulation* , 1 - 18.
- Wilke, U. (2011). A Model of occupants activities based on Time use survey. *Journal of Building Performance Simulation* , 19 - 25.
- Robinson, D., Wilke, U., & Haldi, F. (2011). Multi-agent simulation of occupants presence and behaviour. *Building Simulation 2011 Sydney*. Sydney, Australien.