

## VERGLEICH VON ALGORITHMEN ZUR ADAPTIVEN EINZELRAUMREGELUNG

Michael Adolph, Bruno Lupulescu, Nina Kopmann und Dirk Müller  
RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient  
Buildings and Indoor Climate, Aachen, Deutschland  
madolph@eonerc.rwth-aachen.de

### KURZFASSUNG

Zwei unterschiedliche Algorithmen zur Erstellung von Temperaturprofilen zur adaptiven Steuerung der Raumbeheizung werden in diesem Paper verglichen. Neben einem selbstentwickelten Verfahren wird ein Verfahren in Anlehnung an das sogenannte „Simulated Annealing“ genutzt.

Es kann gezeigt werden, dass beide Verfahren geeignet sind, zwischen An- und Abwesenheit der Nutzer zu unterscheiden und ein geeignetes Sollwertprofil zu erstellen.

Hierbei war das Ziel, den thermischen Komfort des Nutzers aufrecht zu erhalten und gleichzeitig Energieeinsparungen zu ermöglichen.

Die Simulationen wurden mit Hilfe von Modelica umgesetzt, der adaptive Algorithmus selber wurde in Python implementiert.

### ABSTRACT

This paper compares two different algorithms to create temperature setpoint profiles for an adaptive heating system for single rooms. One algorithm was developed on our own; the other one utilizes the method of the so called “simulated annealing”.

It will be shown that both algorithms are capable to differentiate between the user’s presence and absence and create a useful setpoint profile.

Our main intention was to keep the user’s thermal comfort while reducing energy demand.

The simulations were conducted using Modelica, the adaptive algorithms were implemented in Python.

### EINLEITUNG

In Deutschland sind die meisten Systeme zur Raumbeheizung wasserbasiert und werden über Thermostatventile gesteuert. Diese Thermostatventile stellen eine kontinuierliche Beheizung sicher und vermeiden ungewolltes Auskühlen oder Überhitzen des Raums. Der Nutzer kann (meist auf einer Skala

von 1 bis 5) seine Komforttemperatur einstellen, welche dann durch das Thermostat eingeregelt wird.

Diese Komforttemperatur bereitzustellen ist aus energetischen Gründen nicht sinnvoll, wenn der Nutzer abwesend ist. Eine Absenkung der Temperatur unterhalb der Komforttemperatur ist mit den klassischen Thermostatventilen nur durch eine manuelle Absenkung des Sollwerts durch den Nutzer möglich. Dies hat jedoch den Nachteil, dass die Wohnung bei der Rückkehr noch kalt ist und erst durch erneutes Erhöhen des Sollwerts wieder aufgeheizt wird.

Programmierbare Thermostatventile bieten hier Abhilfe, da der Nutzer die Temperatur nicht mehr manuell absenken muss. Es kann ein Solltemperaturprofil meist für jeden Wochentag einzeln programmiert werden. Diese Programmierung wird aber von den Nutzern häufig als zu aufwändig angesehen und es wird auch nicht regelmäßig überprüft, ob der programmierte Zeitplan noch angemessen ist [Meier 2010, Peffer 2011].

Am Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate des E.ON Energy Research Centers der RWTH Aachen (EBC) wird ein System zur adaptiven Regelung entwickelt, welches die Vorteile des programmierbaren Thermostatventils mit der einfachen Bedienung des klassischen Thermostatventils verbindet. Der Nutzer gibt ausschließlich Rückmeldungen der Form „zu warm“ oder „zu kalt“ an das System. Die Erstellung von Zeitprofilen erfolgt darauf automatisch und diese werden kontinuierlich an den Bedarf des Nutzers angepasst.

### EINGESETZTE SOFTWARE

Die Erstellung der Sollwertprofile und die Simulation des Nutzerverhaltens wurden in Python umgesetzt und greifen auf frei verfügbare Bibliotheken zurück, insbesondere SciPy. Folgende Funktionen sind in Python integriert worden:

- Berechnung der thermischen Behaglichkeit anhand der simulierten Daten.

- Ableitung eines Nutzerfeedbacks. Hierfür sind Profile für Anwesenheit, Bekleidungs-faktor und körperliche Aktivität hinterlegt.
- Erstellen der Nutzerprofile anhand des Nutzerfeedbacks.
- Ansteuern der Simulation und Daten-austausch mit selbiger.

Das thermo-hydraulische Verhalten des Gebäudes wird mit Modelica abgebildet, unter Einsatz der am EBC vorhandenen Modelle zur Modellierung von Gebäudebestandteilen und hydraulischen Netzen. Als Entwicklungsumgebung wird Dymola eingesetzt. Die simulierte Wohnung verfügt über 5 beheizte Zimmer und einen unbeheizten Flur und ist einer realen Mietwohnung nachempfunden.

Der Dämmstandard entspricht einem Haus gebaut nach der Wärmeschutzverordnung 1984. Die Rohrleitungen werden mittels DynamicPipes aus der Modelica-Standardbibliothek abgebildet, sind aber um eine Dämmung erweitert, und dann mit dem Luftknoten des Raums verbunden.

Jeder Raum verfügt über einen Raumluftknoten und eine Außenwand. Die einzelnen Räume der Wohnung sind über die Innenwände thermisch miteinander gekoppelt, die Wände zu angrenzenden Wohnungen sind adiabatisch modelliert. Der Luftwechsel in den Raum wird gemäß DIN 12831 modelliert. Das Modell der Wohnung ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

Für die Wärmeübergabe an den Raum wird ein mehrschichtiges Heizkörpermodell verwendet. Die Aufteilung in radiativen und konvektiven Anteil erfolgt nach den Herstellerangaben für die entsprechenden Modelle. Eine genauere Beschreibung des Modells findet sich in Schulz von Thun [2011].

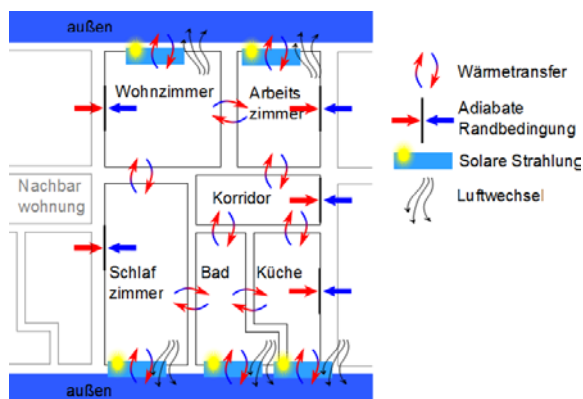


Abbildung 1 Interaktion der einzelnen Räume und der Umgebung

Um die Kopplung zwischen Python und Modelica zu realisieren wird die Wohnung für einen Zeitschritt von 10 Minuten simuliert. Anschließend werden die

Ergebnisse der Simulation von Python ausgelesen und verarbeitet. Änderungen am Sollwert für die Temperatur werden dann in die neue Initialisierungsdatei für Modelica geschrieben. Der Ablauf ist in Abbildung 2 gezeigt.

Eine umfassendere Beschreibung des verwendeten Modells und der einzelnen Python-Funktionen findet sich in Lupulescu [2012].

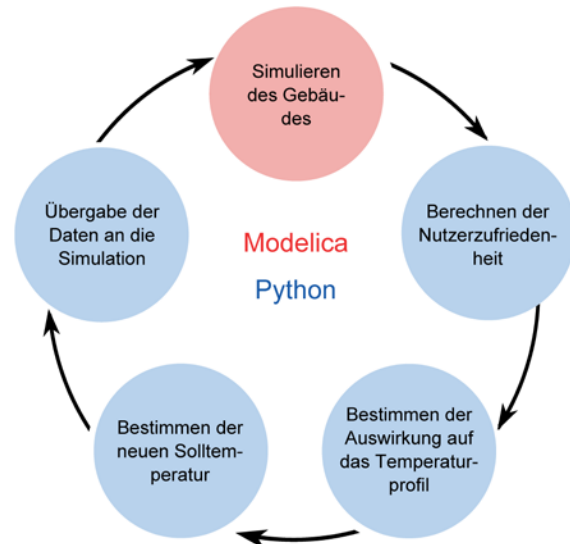


Abbildung 2 Kopplung zwischen Python und Modelica

## FUNKTIONSWEISE DER ALGORITHMEN

In diesem Abschnitt werden die beiden unterschiedlichen Algorithmen beschrieben, mit denen die einzelnen Sollwertprofile ermittelt werden. Zum einen der auf Zufallszahlen basierende Algorithmus (im weiteren „Zufallsalgorithmus“), zum anderen ein Algorithmus, der auf der Optimierungsmethode Simulated Annealing basiert (im weiteren „Annealing-Algorithmus“). Beide sind in Lupulescu [2012] detaillierter beschrieben.

Beide Algorithmen verlassen sich primär auf eine Rückmeldung durch den Nutzer, um die Sollwertprofile an die Bedürfnisse des Nutzers anzupassen. Sollte keine Rückmeldung durch den Nutzer erfolgen, besteht bei beiden Algorithmen eine Wahrscheinlichkeit, dass die Solltemperatur abgesenkt wird. Diesem Vorgehen liegt die Idee zugrunde, dass die Rückmeldung entweder ausbleibt, weil der Nutzer zufrieden ist. Dann wird er mit einer Rückmeldung auf die abgesenkte Temperatur reagieren und der vorher genutzte Sollwert wird wiederhergestellt. Die zweite Möglichkeit ist, dass der Nutzer abwesend ist. Dann wird durch die abgesenkte Raumtemperatur Energie eingespart.

## Zufallsalgorithmus

Bei diesem Algorithmus wird für jeden Zeitschritt eine Absenkwahrscheinlichkeit definiert, welche abhängig davon ist, wie häufig in diesem Zeitschritt in den vergangenen Tagen keine Rückmeldung mehr durch den Nutzer gegeben wurde. Je länger keine Rückmeldung mehr gegeben wurde, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Sollwert der Temperatur um 0,5 K abgesenkt wird.

Gibt der Nutzer ein Feedback, dass es zu kalt oder zu warm ist, wird zuerst überprüft, ob die gemessene Temperatur nicht mehr als 1 K unter- bzw. oberhalb des Sollwerts liegt. Ist dies der Fall, wird das Feedback verworfen, da es sich voraussichtlich um thermisches Unbehagen aufgrund nicht ausreichender Einregelung auf den Sollwert handelt und nicht um ein Problem der Sollwertprofile. Ist dies nicht der Fall, wird der Sollwert im Profil entsprechend erhöht oder abgesenkt. Zusätzlich wird diese Veränderung auf nachfolgende Zeitschritte ausgedehnt.

Insgesamt führt also eine Nutzerrückmeldung zu einer Anpassung des Sollwertprofils in die entsprechende Richtung. Bei Ausbleiben einer Rückmeldung kann die Solltemperatur abgesenkt werden. Die Wahrscheinlichkeit hierfür hängt direkt mit der Anzahl an Tagen ohne Rückmeldung zusammen.

## Annealing-Algorithmus

Bei diesem Algorithmus wird das Optimierungsverfahren „Simulated Annealing“ eingesetzt, welches „analog zu dem (kontrollierten) Auskühlen von Stoffen“ abläuft [Epple 2010].

Während bei dem namensgebenden Auskühlen von Stoffen die Temperatur entsprechend verändert wird, wird hier eine Mischung unterschiedlicher Werte genutzt: zum einen die Höhe der Solltemperaturveränderung und die Anzahl der Zeitschritte, für die die Veränderung der Solltemperatur stattfindet, zum anderen die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Solltemperatursprung eintritt. Zusammengefasst wird diese Metrik als „Aggressivität“ bezeichnet. Um diese vergleichen zu können, wird das Produkt aus diesen drei Faktoren gebildet. Kennzeichnend für „Simulated Annealing“ ist nun zum einen, dass diese Stufen mit jeweils niedrigerer Aggressivität sukzessive durchlaufen werden, bis eine dieser Stufen genutzt wird. Zum anderen ist kennzeichnend, dass je länger der Algorithmus läuft, bei einer immer niedrigeren Aggressivität begonnen wird. Das Konzept ist in Abbildung 3 dargestellt.

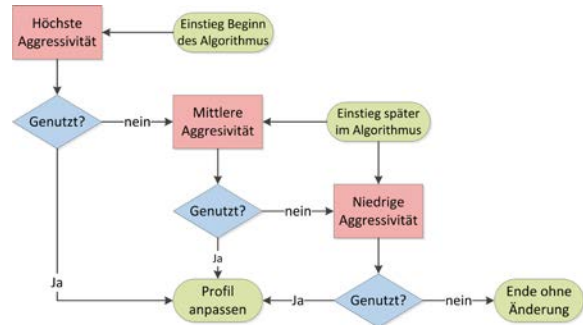


Abbildung 3 Funktionsweise des Annealing Algorithmus

## MODELLIERUNG DES NUTZERS

Da sich der Algorithmus zur Erstellung der Temperaturprofile ausschließlich auf die Rückmeldung durch den Nutzer verlässt, muss auch für die Simulation ein Nutzerverhalten berechnet werden.

### Rückmeldung durch den Nutzer

Um das Nutzerverhalten zu prognostizieren, wird das Predicted Mean Vote (PMV) und die Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) genutzt, wie in DIN EN ISO 7730 [2006] beschrieben. Bei dem PMV handelt es sich um einen Wert zwischen -3 und 3, wobei negative Werte ein zu kaltes thermisches Empfinden repräsentieren und positive Werte ein zu Warmes. Beträgt der Wert null, befindet sich der Nutzer in einem optimalen thermischen Zustand. Bei dem PMV handelt es sich um ein statistisches Mittel, individuelle Abweichungen sind also immer zu erwarten. Deswegen verbindet man mit dem PMV auch noch eine Voraussage, wie viel Prozent der Nutzer voraussichtlich unzufrieden sind bei diesem

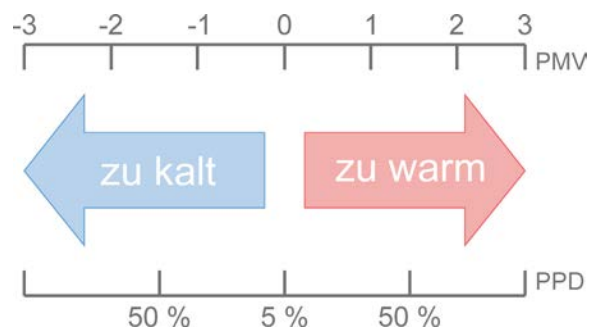


Abbildung 4 Zusammenhang zwischen PMV und PPD

PMV. Die ist die PPD. Bei null beträgt ihr Wert 5 %, es ist also grundsätzlich nicht möglich, alle Nutzer zufriedenzustellen. Bei  $\pm 1,5$  sind 50 % und bei  $\pm 3$  sind 100 % der Nutzer unzufrieden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4 dargestellt.

*Tabelle 1*  
*Bekleidungsfaktor und metabolische Rate des Nutzers*

UHRZEIT	BEKLEIDUNGS-FAKTOR [clo]	METABOLISCHE RATE [met]
00:00-07:00	3,1	0,8
07:00-07:30	1,0	0,8
07:30-11:00	1,0	1,0
11:00-18:00	Nutzer abwesend	
18:00-19:00	1,0	1,6
19:00-22:30	1,0	1,0
22:30-23:00	1,0	0,8
23:00-00:00	3,1	0,8

Um das PMV bestimmen zu können, sind neben der Luft- und der Strahlungstemperatur, die beide aus der Simulation gewonnen werden können, auch noch eine körperliche Aktivitätsrate und der Bekleidungsfaktor notwendig. Für beide Faktoren ist ein statisches Profil genutzt worden, die verwendeten Daten sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Da ein solch konstantes Verhalten, insbesondere für die körperliche Aktivität, kaum realistisch ist, wird nach der Berechnung des PMVs ein zufälliger Wert zwischen -1 und 1 auf das PMV addiert und dann aus diesem Wert das PPD berechnet. Dadurch steigt der Anspruch an die Adaptionsalgorithmen. Der PPD-Wert wird dann mit einer Zufallszahl verglichen und daraufhin entschieden, ob der Nutzer eine Rückmeldung an den Algorithmus gibt oder nicht.

#### **Anwesenheit des Nutzers**

Für die Simulation wurde ein statisches Anwesenheitsprofil genutzt. Bei diesem ist der Nutzer zwischen 11:00 h und 18:00 h abwesend. Zwischen 23:00 h und 07:00 h schläft er. Wenn der Nutzer schläft, ist die Wahrscheinlichkeit, dass er eine Rückmeldung an das System gibt deutlich geringer.

### METHODIK

#### **Referenzfall**

Um mögliche Einsparungen durch die adaptiven Algorithmen spezifizieren zu können, muss ein Referenzfall definiert werden. In dem von uns gewählten Referenzfall wird eine Raumtemperatur von 21 °C tagsüber vorgesehen und eine von 18 °C, wenn der Nutzer schläft. Ist der Nutzer tagsüber abwesend, senkt er die Solltemperatur nicht ab.

#### **Bewertungskriterien**

Der Adaptionsalgorithmus soll mehrere unterschiedliche Ziele erreichen. Hauptziel ist immer

der thermische Komfort des Nutzers. Ist dieser geringer als bei den etablierten Thermostatventilen, wird sich ein neues System nicht durchsetzen können. Erst als untergeordnetes Ziel besteht daher die Energieeinsparung. Die Ziele werden an diesen Kriterien gemessen:

- *Mittelwert des absoluten PMVs:* Der Mittelwert des Betrags des PMVs wird genutzt, um den durchschnittlichen Komfort zu bewerten. Es wird der Betrag verwendet, damit sich positive und negative Werte nicht gegenseitig aufheben
- *Standardabweichung des PMVs:* Ist diese Standardabweichung klein, wird das mittlere PMV in den meisten Zeiten erreicht. Ist sie jedoch groß, kann davon ausgegangen werden, dass der thermische Komfort zeitweilig eingeschränkt ist
- *Relativer Energiebedarf:* Wir messen den Energiebedarf, den ein idealer Wärmeerzeuger benötigt. Verteilverluste werden nicht mit einbezogen. Der Energiebedarf wird immer bezogen auf den Energiebedarf des Referenzfalls angegeben.

### ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zusammengefasst, die mit beiden Algorithmen erreicht werden, wenn statische Anwesenheitsprofile zu Grunde gelegt werden.

Die Entwicklung der Temperaturprofile über den Zeitraum der Adaption sind für die beiden Algorithmen in Abbildung 5 dargestellt. Es wird exemplarisch das Ergebnis für das Wohnzimmer gezeigt. Die anderen Räume verhalten sich in der Regel ähnlich, mit Ausnahme des Badezimmers in dem die Anwesenheit so kurz ist, dass beide Algorithmen Probleme hatten, dies zufriedenstellend zu erkennen. Für das Wohnzimmer kann man feststellen, dass beide Algorithmen die Anwesenheit im Wohnzimmer ohne Probleme erkennen. Bereits nach 10 Tagen haben beide Algorithmen schon die Anwesenheit am Abend erkannt und die Temperatur über den Vormittag und in der Nacht abgesenkt, wobei hier der Zufallsalgorithmus deutlich langsamer ist. Beim Annealing-Algorithmus verändert sich das Profil über die Zeit deutlich weniger und es werden auch höhere Sollwerttemperaturen ermittelt, wenn der Nutzer anwesend ist.

In beiden Fällen kann man erkennen, dass der Algorithmus den Räumen eine Aufheizzeit einräumt, um die Komforttemperatur bereits beim Eintreffen des Nutzers bereitstellen zu können. Dies ist insbesondere notwendig, da sonst die Oberflächentemperaturen der Wand nicht ausreichend hoch sind.

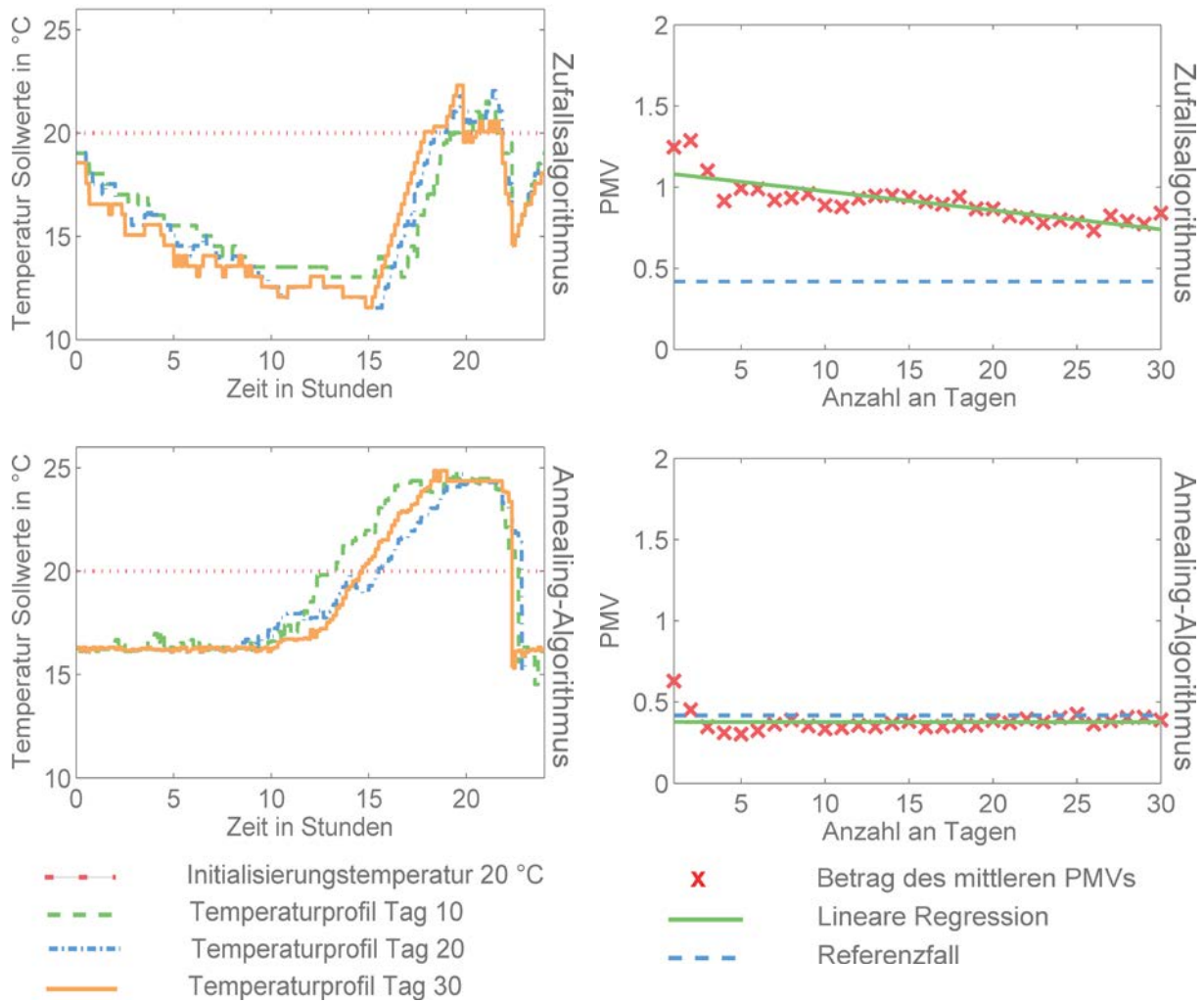


Abbildung 5 Entwicklung der Raum-Solltemperaturen

Abbildung 6 Entwicklung des mittleren PMVs für die unterschiedlichen Algorithmen

Betrachtet man die Beträge des mittleren PMVs, die in Abbildung 6 dargestellt sind, kann man sehen, dass der mittlere PMV des Annealing-Algorithmus dem des Zufallsalgorithmus deutlich überlegen ist. Bereits nach wenigen Tagen gibt es dort keine nennenswerten Veränderungen mehr. Bei dem Zufallsalgorithmus gibt es zwar eine stetige Verbesserung des mittleren PMVs, er ist aber immer schlechter als der Referenzwert. In beiden Fällen sind die Standardabweichungen nicht aufgetragen, da sie sehr groß sind; dies gilt jedoch auch für den Referenzfall.

Insofern kann für den thermischen Komfort festgehalten werden, dass er im Falle des Zufallsalgorithmus etwas geringer ist und im Annealing-Algorithmus gleich mit Bezug auf den Referenzfall. In allen drei Fällen legt die recht große Standardabweichung jedoch nahe, dass zu einigen Zeitpunkten die thermische Behaglichkeit nicht sichergestellt werden kann. Da nur Beträge des PMV gezeigt werden, ist aus der Grafik nicht ersichtlich, ob eher ein Kälte- oder Wärmeempfinden vorliegt, es ist jedoch für alle Fälle ein Kälteempfinden.

Abbildung 7 zeigt den relativen, mittleren Energiebedarf der beiden Algorithmen. Der Zufallsalgorithmus spart insgesamt etwa 31 % Energie ein, allerdings kann man an der Entwicklung des PMV-Werts erkennen, dass dies zu Lasten des thermischen Komforts geht. Der Annealing-Algorithmus ermöglicht Energieeinsparungen von 12 % und dies bei einem etwa gleichen thermischen Empfinden wie im Referenzfall. Im Fall des Annealing-Algorithmus wird bei Anwesenheit des Nutzers etwa 20 % mehr Energie benötigt als im Referenzfall, bei dem Zufallsalgorithmus ist der Verbrauch etwa gleich.

In beiden Fällen ist ersichtlich, dass die Energieeinsparung in Zeiten der Nichtnutzung realisiert wird. Dort verbraucht der Zufallsalgorithmus nur 24 % und der Annealing-Algorithmus 43 % der Energiemenge des Referenzfalls. Dass bei Anwendung des Annealing-Algorithmus in dieser Phase mehr Energie verbraucht wird als bei dem Zufallsalgorithmus, obwohl er die Abwesenheit besser erkennt, ist vor allem der

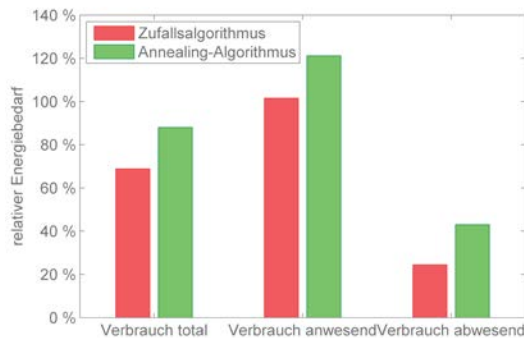


Abbildung 7 Relativer Energiebedarf

längeren Vorheizzeit geschuldet, die dieser Algorithmus verwendet, um eine angemessene Strahlungstemperatur der Wände sicherzustellen.

## ZUSAMMENFASSUNG

Wir haben ein System vorgestellt, bei dem ausschließlich anhand von Nutzerrückmeldungen der Form „zu kalt“ oder „zu warm“ ein Temperatur-Sollwertprofil für einzelne Räume abgeleitet werden kann. Dafür wurden zwei unterschiedliche Algorithmen verwendet, von denen sich jener, der auf dem Konzept des „Simulated Annealing“ basiert, als besonders geeignet erwiesen hat.

Bei diesem ist es möglich, bei gleichbleibendem thermischem Komfort etwa 12 % Energie einzusparen. Dies wird kombiniert mit einer Bedienfreundlichkeit, die etwa auf dem Niveau der bekannten Thermostatventile ist. Daher kann auch in der Realität grundsätzlich von einer hohen Nutzerakzeptanz ausgegangen werden.

Die erreichten Energieeinsparungen wurden bei einem Gebäude mit mittlerem Effizienzstandard erreicht. Damit ist das Konzept grundsätzlich geeignet, um im Bestand als geringinvestive Maßnahme großflächig eingesetzt zu werden.

## AUSBLICK

Im weiteren Verlauf des Projekts wird das statische Anwesenheitsprofil durch ein dynamisches Anwesenheitsprofil ersetzt, so dass der Nutzer zu unterschiedlichen Zeiten das Haus verlässt, früher oder später nach Hause kommt, eventuell über Mittag anwesend ist oder auch abends noch einmal das Haus verlässt. Dies wird den Anspruch an die Algorithmen steigern. Diese Profile werden mit Hilfe von Markov-Ketten erzeugt, genauere Informationen über das Verfahren finden sich in Page [2007].

Weiterhin werden die Konzepte sowohl im Labormaßstab experimentell untersucht also auch in einem Feldversuch getestet. Insbesondere der Feldversuch wird es uns ermöglichen, das System auf seine Nutzerakzeptanz zu testen.

## DANKSAGUNG

Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technik), Fördernummer: 0327387D

## LITERATUR

- Epple, U. 2010., Optimierung, Vorlesungsskript, *RWTH Aachen*
- Lupulescu, B., 2012. Erweiterung eines Systems zur adaptiven Raumtemperaturregelung. Masterarbeit, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimotechnik, RWTH-Aachen, Aachen. Bezug über den Korrespondenzautor möglich
- Meier A. et. al. 2010. How people actually use thermostats. In: ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, ACEEE, 193-206.
- Page J., 2007. Simulation Occupant presence and behaviour in Buildings, Doktorarbeit, École Polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne
- Peffer T. 2011. How people use thermostats in homes: A review, *Building and Environment*, Vol. 46, pp. 2529-2541
- Schulz von Thun, F. 2010. Validierung eines Heizkörpermodells anhand von experimentellen Messungen, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimotechnik, RWTH-Aachen, Aachen. Bezug über den Korrespondenzautor möglich