

Modellgestütztes Mess- und Automatisierungssystem zur bedarfsgerechten Heizung und Lüftung

Model-based Automation System for Demand-based Heating and Ventilation

K. Spasokukotskiy, M. Horn und H.-R. Tränkler, Universität der Bundeswehr München

Manuskripteingang: 06. Januar 2003; zur Veröffentlichung angenommen: 07. Februar 2003.

Durch Verbesserung der Heizungs- und Lüftungsstrategien im privaten Lebensbereich kann sowohl Heizenergie eingespart und damit die CO₂-Emission verringert, als auch die Raumbehaglichkeit verbessert werden. Der Beitrag behandelt ein modellgestütztes Mess- und Automatisierungssystem, mit dem die Realisierung der verbesserten Strategien unter gegebenen technischen Randbedingungen praktisch erst möglich wird.

Better quality of thermal comfort as well as reduced heat energy demand and accordingly CO₂ emission can be achieved by better heating and ventilation strategies in private buildings. The paper deals with a novel model-based measurement and automation system. It describes the implementation of better strategies under given technical circumstances.

Schlagwörter: Parameteridentifikation, bedarfsgerechte Heizung und Lüftung, thermische Behaglichkeit, Energieeinsparung

Keywords: Parameter identification, demand-adjusted HVAC, thermal comfort, energy saving

1 Einleitung

Eine wesentliche Rolle bei der Realisierung besserer Heizungs- und Lüftungsstrategien im privaten Lebensbereich spielen Verbesserungen der bauphysikalischen Gegebenheiten, der verfahrenstechnischen sowie mess- und automatisierungstechnischen Komponenten der technischen Gebäudeausrüstungen (TGA).

Mit einem modellgestützten Mess- und Automatisierungssystem werden die bauphysikalischen und thermodynamischen Gegebenheiten durch ein Modell erfasst. Dieses Modell wird als Beobachter verwendet, um die für die Berechnung der Regelgröße Behaglichkeit erforderlichen Größen aus wenigen, leicht zu ermittelnden Messwerten zu schätzen und die Reglerparameter ständig an das nicht-lineare Systemverhalten anzupassen. Eine bessere Anpassung des Raumzustandes an die tatsächlichen Bedürfnisse ist eine wichtige Voraussetzung für die Minderung der

Netto-Heizenergie. Da etwa 13% der in Deutschland benötigten Primärenergie auf die Heizung entfallen [3], bieten private Haushalte im Vergleich zu den anderen großen Energieverbrauchern (Industrie, Verkehr, usw.) mit relativ einfachen Mitteln ein großes Potential für Energieeinsparungen.

2 Möglichkeiten der Energieeinsparung in Gebäuden

Eine Analyse der Energieeinsparungsmöglichkeiten im Gebäude ergibt folgende Unterteilung der möglichen Methoden zur Reduktion der Heizenergie:

- Baumaßnahmen (passive Maßnahmen),
- Technische Maßnahmen (aktive Maßnahmen).

In unserer Aufgabenstellung beschränken wir uns auf technische Maßnahmen unter Nutzung der im Vorfeld ergriffenen passiven Maßnahmen.

Unter technischen Maßnahmen werden Techniken verstanden, welche zur Reduktion des Energieverbrauchs im reinen Sinne ihren Beitrag leisten. Dies betrifft in erster Linie verfahrenstechnische Einrichtungen, Maschinen und Apparate der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) sowie Mess-, Regel- und Steuerungsgeräte für den Betrieb der Heizungs- und Lüftungsanlagen. Aktive Maßnahmen ändern regulativ den „natürlichen“ Ablauf aller thermodynamischen Prozesse im Haus. Dies bedeutet, dass Einsparungen maßgeblich durch Regelungs- und/oder Steuerungseingriffe im gesamten System des Hauses erreicht werden. Der Betrieb des Gebäudes allein (ohne dynamische Einwirkung der Technik) würde dabei energetisch oder auch hygienisch nicht effektiv sein (z. B. subjektiv zu kalt oder warm). Besondere Anforderungen an die technischen Maßnahmen zur Energieeinsparung sind die Notwendigkeit der relativ einfachen Verwendbarkeit in Gebäuden aller Art und eine weitgehend unauffällige Betriebsweise. Die natürlichen Grenzen der passiven energiesparenden Maßnahmen sollen somit durch den Einsatz technischer Gebäudeausrüstungen überwunden werden [4; 5].

In Gebäuden existieren mehrere Wärmesenken. Die Transmissionswärme und Lüftungswärme sind dabei von besonderem Interesse. Die Reduktion dieser Wärmeverluste wird

unter dem Oberbegriff Reduktion der Heizenergie (Raumenergie) beschrieben. Im Unterschied zu passiven Maßnahmen werden durch aktive Maßnahmen tatsächliche Energieeinsparungen bei beiden Arten der Wärmesenken möglich. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten zur Reduktion der Wärmeverluste (d. h. der Einsparung der notwendigerweise von außen in den Raum zugeführten Heizenergie) durch die TGA:

- Reduktion der Wärmeströme nach außen,
- Reduktion der dem Raum unnötig zugeführten Wärmemenge.

Eine Reduktion der zuzuführenden Wärmemenge kann nur von der TGA erreicht werden. Hier muss erwähnt werden, dass die spezifische TGA auch zur Reduktion von Wärmeströmen durch angrenzende Einrichtungen beitragen kann (z. B. durch steuerbare Wärmedämmsysteme). Bedeutende Einsparungen werden aber an anderen Stellen erwartet.

Grundsätzlich basieren Methoden zur Reduktion der für die Heizung in den Raum zugeführten Wärmemenge auf dem Prinzip der Lokalisierung und Vermeidung unnötig erwärmter Regionen. Je kleiner und genauer diese Regionen definiert und abgegrenzt werden, desto weniger Energie wird für Heizungszwecke notwendig. Diese Lokalisierung

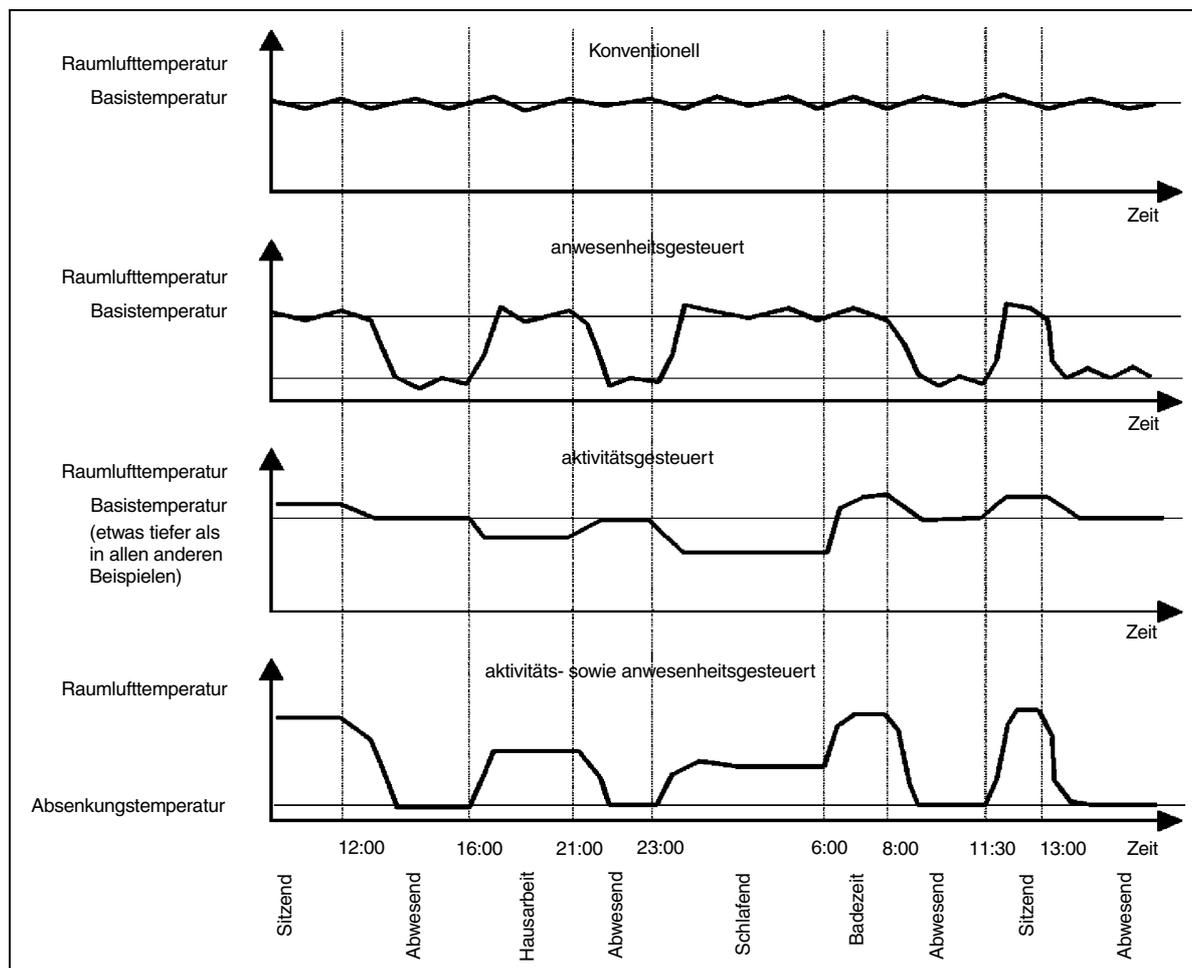


Bild 1: Beispielhafte Temperaturverläufe im Raum bei verschiedenen Betriebsweisen eines Heizungs- und Lüftungssystems.


Tabelle 1: Bewertungstabelle für optimierte und optimale Regelung.

Energiesparende Maßnahmen	Energetische Effektivität	Technischer Aufwand	Kosten	Bemerkungen
Aktivitätsgesteuerte Betriebsweise	+ ¹⁾	++	++	Nicht geeignet für Räume mit regelmäßigem Nutzerverhalten (Büros usw.)
Anwesenheitsgesteuerte Betriebsweise	++	+	++	Nicht geeignet für Räume mit großer relativer Anwesenheit
Optimale Regelung (anwesenheits- und aktivitätsbeeinflusst)	+++	+++	+++	Großer technischer Aufwand. Beliebig komplexe Strategien der Prozessführung sind möglich.

¹⁾ +++ – viel, ++ – mäßig, + – wenig

kann sowohl zeitlichen also auch räumlichen Charakter tragen.

Das Einsparpotential (im Sinne der Lokalisierung der Heizungsmaßnahmen) kann dabei durch eine bedarfsgerechte Regelung des Raumzustandes genutzt werden (z. B. durch eine bedarfsgerechte Einzelraumregelung). Dies bedeutet, dass im Unterschied zu konventionellen Verfahren, welche ggf. zeitgesteuert einen vorgegebenen energetischen Zustand in der Wohneinheit gewährleisten, die Sollwerte für den Raumzustand nach dem tatsächlichen Bedarf zeitlich und eventuell auch räumlich geändert werden.

Diese Änderungen erfolgen im Regelfall in der Richtung energetisch günstigerer Raumzustände (z. B. Temperaturabsenkung oder verringerte Lüftungsrate). Der Heizenergieverbrauch als eine integrale Funktion des thermischen Raumzustandes wird somit kleiner.

Abstrahierend von der räumlichen Differenzierung lässt sich die bedarfsgerechte Betriebsweise des Raumzustandes (oder des Zustandes einer räumlichen Einheit) wie folgt unterteilen (Zur Erläuterung sind in Bild 1 beispielhaft verschiedene Temperaturverläufe dargestellt):

- Optimierte Betriebsweise,
 - anwesenheitsgesteuerte Betriebsweise (zeitliche Differenzierung),
 - aktivitätsgesteuerte Betriebsweise (Differenzierung nach Erfordernis),
- Optimale Betriebsweise (Kombination der beiden oben genannten Strategien).

Die anwesenheitsgesteuerte Betriebsweise berücksichtigt im Raum anwesende Personen. Bei Abwesenheit sind in den entsprechenden Gebäudeeinheiten (Raum, Wohnung, Stockwerk, usw.) normale (behagliche) Raumzustände nicht notwendig und können energetisch günstigere Zustände eingestellt werden (z. B. niedrigere Raumlufttemperaturen: eine Minderung der Raumlufttemperatur um 1 K führt zu einem reduzierten Verbrauch an Energie um ca. 6% [6]).

Die aktivitätsgesteuerte Betriebsweise berücksichtigt den Fakt, dass es die Hauptaufgabe der TGA ist, einen behaglichen Zustand für die Bewohner zu gewährleisten. Einsparungen entstehen dabei dadurch, dass bei entsprechen-

der körperlicher Aktivität für die thermische Behaglichkeit meist (im Vergleich zum konventionellen Fall) etwas niedrigere Raumtemperaturen benötigt werden und somit auch eingestellt werden können. Die Temperaturänderung wird automatisch nach den aktuellen Bedürfnissen der Anwesenden geführt; bedarfsgerecht wird nicht mehr nur primär zeitlich, sondern auch im Amplitudenbereich geregelt.

Die Einsparungen durch aktivitätsbeeinflusste Betriebsweise werden um so größer, je öfter verschiedene Aktivitäten im Raum ausgeübt werden und je größer das Verhältnis zwischen der Zeit intensiver Tätigkeit zur Gesamtzeit ist, in der sich die im Raum Anwesenden im passiven und/oder leicht bekleideten Zustand befinden. Solche Aktivitätswechsel erfolgen in privaten Haushalten relativ häufig. Im Gegensatz dazu wird eine aktivitätsbeeinflusste Betriebsweise in Büroräumen nur geringere Energieeinsparungen ermöglichen (s. Tabelle 1).

3 Raumbehaglichkeit

Es wurde schon erwähnt, dass es eine besondere Aufgabe der Technik ist, behagliche Bedingungen im Raum zu gewährleisten. Vor anderen Größen (wie z. B. einer bestimmten Raumlufttemperatur) sollte immer die Behaglichkeit gewährleistet sein. Bei bedarfsgerechter Prozessführung und schnellen Änderungen des Raumzustandes ändern sich ständig zahlreiche Parameter, welche auf die Behaglichkeit Einfluss nehmen. Berücksichtigt man bei der Regelung nur einzelne Parameter, bekommt man nicht-optimale Raumzustände hinsichtlich der Behaglichkeit für anwesende Personen sowie hinsichtlich der energetischen Effektivität des Systems. Berücksichtigt werden müssen sowohl die thermische als auch die chemische Behaglichkeit, da die thermischen Bedingungen für die Heizung und die chemischen Bedingungen für die Lüftung besonders wichtig sind. Es existieren äußere und innere Einflüsse auf die Behaglichkeit, welche durch geeignete Messtechnik erfasst werden sollen. Generell müssen alle wesentlichen Einflussarten vom Mess- und Automatisierungssystem zur Regelung der Behaglichkeit erfasst werden.

Die Behaglichkeit ist jedoch keine direkt messbare Größe. Die thermische Behaglichkeit lässt sich formal durch zwei Ansätze beschreiben:

- Stationäre (statische) Bilanzierung der Wärmeflüsse um den menschlichen Körper (für sich sehr langsam ändernde thermische Bedingungen),
- Dynamische Bilanzierung (für sich schnell ändernde thermische Bedingungen).

Grundlegende Arbeiten zur statischen thermischen Bilanzierung wurden von Fanger in den 60er-Jahren geleistet [7]. Sein formaler Vorschlag ist eine subjektive Wertung PMV (engl. predicted mean vote) und die daraus abgeleitete „Komfortgleichung“. Die Variablen dieser Gleichung sind die Lufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur, der Luftdruck, die Feuchte, die Kleidungstemperatur, die Oberfläche oder DuBois-Fläche des menschlichen Körpers, die Verhältnisrate zwischen bekleideter und nackter Oberfläche des menschlichen Körpers, der thermische Widerstand der Kleidung, der konvektive Wärmeübertragungskoeffizient, die metabolische Rate und das Wärmeäquivalent der mechanischen menschlichen Arbeit. Die Kleidungstemperatur wird unmittelbar aus den anderen Parametern bestimmt [8]. Die restlichen Einflussparameter kann man in objektive physikalische Umgebungsgrößen und personenspezifische Parameter einteilen. Die personenspezifischen Parameter sind statische und dynamische Parameter. Diese Parameter werden in einem Klimasystem angenommen und deshalb nicht gemessen, sondern als durch die jeweilige Person gegeben betrachtet (DuBois-Fläche, Verhältnisrate des bekleideten Körpers für eine begrenzte Anzahl bestimmter Kleidungsarten). Die dynamischen Parameter werden indirekt über die Anwesenheit feststellenden und den Aktivitätsgrad messenden Sensoren bestimmt, die Art und der thermische Widerstand der im Moment getragenen Kleidung abhängig von Raumart oder Jahreszeit geschätzt. Zu den messbaren objektiven physikalischen Umgebungsgrößen gehören die Lufttemperatur, der Luftdruck, die Strahlungstemperatur und der konvektive Wärmeübertragungskoeffizient.

Die Erkenntnisse über die thermische Behaglichkeit wurden zusätzlich erweitert und ergänzt durch Phänomene wie Luftzugerscheinungen, asymmetrische thermische Abstrahlung, Temperaturprofile etc. [9]. Bei der Modellierung der thermischen Bilanzen, die gewöhnlich durch Modelle mit konzentrierten Parametern beschrieben werden, ist die räumliche Ausdehnung des menschlichen Körpers entsprechend zu berücksichtigen.

4 Anwesenheitsbeeinflusste Heizungs- und Lüftungsregelung

Zur Realisierung einer bedarfsgerechten Betriebsweise wurde ein Regelkreis für die bedarfsgerechte Heizung und Lüftung aufgebaut und die Effektivität des Gesamtsystems erprobt. Da die anwesenheitsbeeinflusste Regelung energetisch gesehen mit geringem technischen Aufwand größere

Einsparungen als andere bedarfsgerechte Regelungsarten verspricht, wurde zunächst diese Regelungsart gewählt. Im Unterschied zu fest eingestellten Führungsregelungen (zeitprogrammierbare Geräte) erkennt das System die einzustellenden Betriebszustände unmittelbar aus dem Zustand des Objektes (des Raumes). Deshalb können Anwesenheitsfunktionen beliebiger Komplexität fehlerlos abgearbeitet werden.

Ein Problem bei der Regelung ist, dass die große Anzahl der Systemparameter, welche für den neuen Ansatz ermittelt werden müssen, schwierig zu bestimmen ist. Viele Daten müssten unmittelbar am Ort der anwesenden Personen ermittelt werden, wo Messungen kaum möglich sind. Ein anderes Problem ist die praktische Implementierung des Reglers. Bei stark dynamischen Vorgängen im Raum, welche für die neue Prozessführung typisch sind, werden die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen physikalischen Größen merklich nichtlinear. Unter Nutzung des relativ komplizierten Streckenmodells muss der Regler am jeweiligen Arbeitspunkt adaptiv parametrisiert werden. Hier sollen mindestens PI- sowie PID-Regler eingesetzt werden.

Zur Lösung dieser Probleme wird ein komplexes bauphysikalisches und thermodynamisches Beobachter-Modell verwendet. Über dieses Beobachter-Modell werden die für die Bestimmung der Behaglichkeit notwendigen, aber nicht direkt messbaren physikalischen Größen ermittelt. Außerdem können mit diesem Beobachter die funktionalen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Ein- und Ausgangsgrößen bestimmt und durch die im nächsten Kapitel beschriebenen Algorithmen am jeweiligen Arbeitspunkt die Übertragungsfunktionen berechnet werden. Somit können einfache Regler verwendet und trotzdem gleichzeitig die Nichtlinearität und Komplexität der thermischen Vorgänge berücksichtigt werden.

5 Ermittlung der Raumparameter

Das hier entwickelte und verwendete bauphysikalische und thermodynamische Modell basiert auf einem modifizierten Glück-Modell [10].

Die Modellstruktur besteht aus dem geometrischen Raummodell mit mehrzonalem Luftvolumen und aufgeteilten Wandoberflächen. In das Modell einbezogen sind die konvektive und die durch Strahlung verursachte Wärmekopplung sowie die Wärmeleitung durch die Raumhüllen. Eventuell vorhandene Möbel und Geräte können ebenfalls durch das Modell berücksichtigt werden. Die Wärmegewinne von Geräten, Personen, Radiatoren usw. sowie der Sonne gehen gleichfalls in das Modell ein. Die Lösung des so entstehenden Gleichungssystems erfolgt durch die Finite-Differenz-Methode (FDM) in Kombination mit empirischen Gleichungen. Dies verschafft dem Modell die Genauigkeit einer FEM (Finite-Elemente-Methode) bei gleichzeitig kurzen Rechenzeiten, welche typisch für bestimmte physikalische Abhängigkeiten sind. Dieses Modell zeigt im Vergleich zu anderen, in der Literatur beschriebenen Modellen

das beste Verhältnis von Rechenzeit zu notwendigen Eigenschaften [11]. Das Modell kann die bauphysikalischen und thermodynamischen Zustände des Raumes schätzen und somit Schätzwerte der benötigten thermodynamischen Größen für jeden gewünschten Raumpunkt liefern. Die Notwendigkeit der einfachen Konfigurierbarkeit der Regler auf der einen und die Komplexität der thermodynamischen Prozesse im Raum auf der anderen Seite sind wichtige Probleme für den neuen Ansatz. Die Anforderungen an Einfachheit werden in der Regelungstechnik normalerweise durch klassische lineare Verfahren mit P-, PI- und PID-Algorithmen erfüllt. Damit die gegebenen Regelsysteme mit linearen Streckenmodellen realisiert werden können, müssen die funktionalen dynamischen Abhängigkeiten zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen an den jeweiligen Arbeitspunkten ermittelt werden. Im Bild 2 ist ein Beispiel für ein Many Input Many Output Linear Time Invariant System (MIMO LTI) dargestellt.

Das Ermitteln der funktionalen Abhängigkeiten auf der Basis von Experimenten ist jedoch nur bedingt möglich. Große Systemzeiten (einige 10h) führen zu großen Inbe-

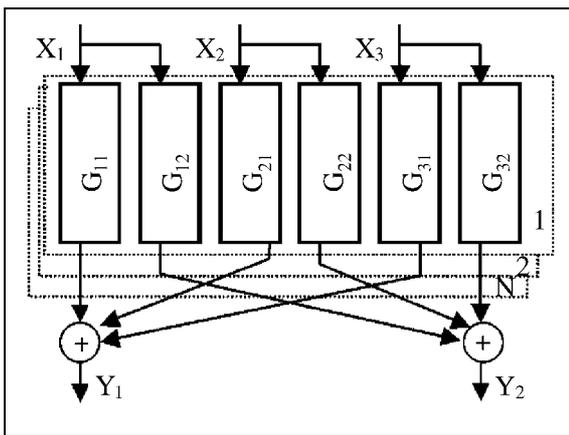


Bild 2: Allgemeine Struktur der linearen Modelle für Regelungszwecke: $X_i \dots$ Eingänge; $Y_j \dots$ Ausgänge; $G_{ij} \dots$ lineare Übertragungsfunktionen; $k = 1, 2, N \dots$ Parametersätze für verschiedene Arbeitspunkte.

triebnahmezeiten, was sehr hohe Kosten verursachen kann. Aufgrund der typischen ständigen Änderungen der klimatischen Randbedingungen ist es kaum möglich, ein ungestörtes Experiment am realen Objekt durchzuführen.

Die vorgeschlagene Technik zur Parameterbestimmung besteht daher aus zwei Teilen:

- dem komplexen nichtlinearen Modell, das alle notwendigen physikalischen Phänomene und Variablen beinhaltet,
- dem automatisch abzuarbeitenden Algorithmus für die Ermittlung der Koeffizienten der LTI-Funktionen für den jeweils aktuellen Arbeitspunkt (Bild 3).

Es existieren drei Möglichkeiten der Parameteridentifikation bei Anwendung der oben genannten dualen Modellstruktur (Bild 4).

- Offline: Alle notwendigen Daten werden am Anfang gemessen. Diese werden für die Validierung der Benutzereingaben und für die Ermittlung der Anfangswerte der Parameter im Modell benutzt. Danach werden typische Arbeitspunkte simuliert und Parametersätze berechnet.
- Online: Gleichzeitige Berechnung der Eingangs-Ausgangs-Beziehungen und Bestimmung der Koeffizienten der Übertragungsfunktionen am aktuellen Arbeitspunkt.
- Hybrid: Beim Starten des Systems werden die Berechnungen zur Ermittlung der Parametersätze einmalig für den aktuellen Arbeitspunkt durchgeführt. Die Parameter werden nach Bedarf erneut berechnet und dem Regler übergeben.

6 Experimente zur Energieeinsparung

Zur Bestimmung der realen Energieeinsparung in Gebäuden wurden beispielhaft Experimente auf der Basis der anwesenheitsbeeinflussten Steuerung durchgeführt. Als Testplattform wurde ein Einfamilienhaus auf dem Gelände der Universität der Bundeswehr München genutzt.

Dieses Forschungsgebäude „leichter Bauweise“ hat eine Gesamtfläche von 235 m², aufgeteilt in das Untergeschoss

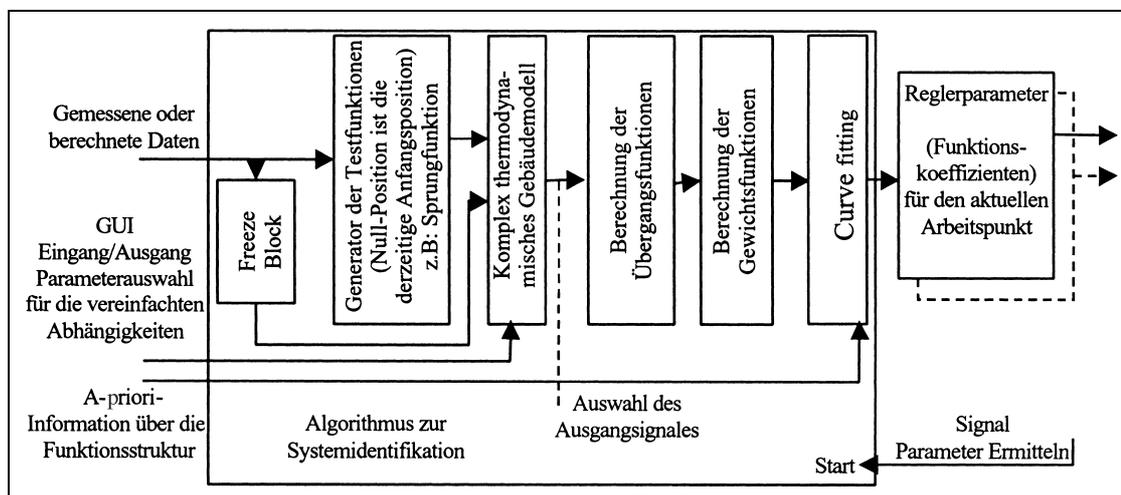


Bild 3: Algorithmus zur Systemidentifikation (Subdomain-Identifikation).

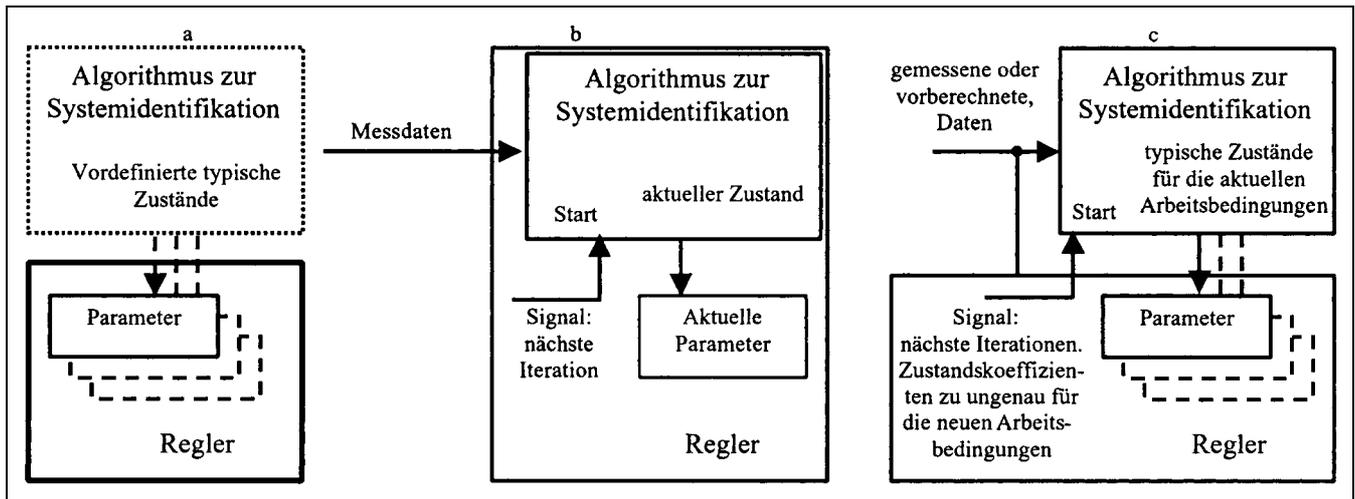


Bild 4: Systemidentifikation mit einer dualen Modellstruktur. a) Offline- b) Online-Identifikation und c) Hybrid-Typ-Identifikation.

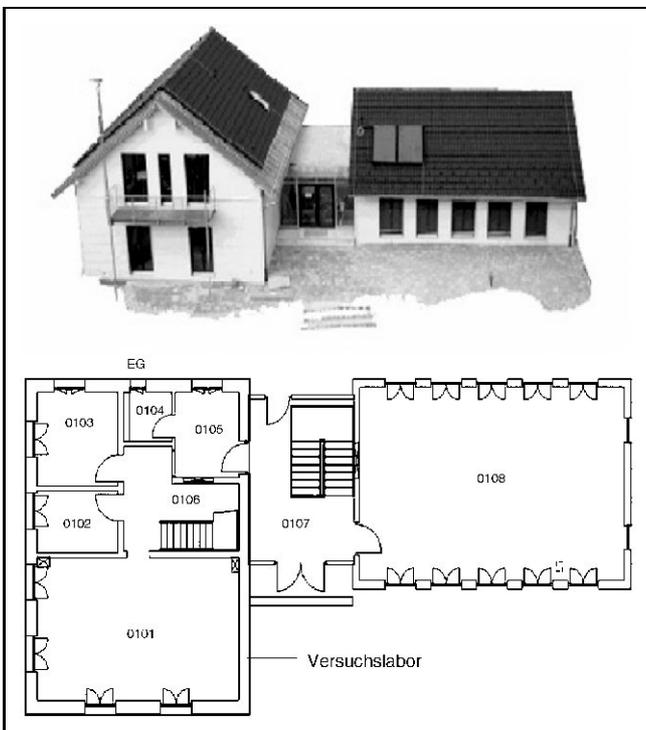


Bild 5: Forschungshaus Smart HOME mit Versuchsräumen [14].

von 80 m², Erdgeschoss von 77 m² und Obergeschoss von 78 m². Speziell das Erdgeschoss und das Obergeschoss sind in hochwärmegedämmter Bauweise ausgeführt. Im Bild 5 ist der Grundriss des Hauses dargestellt. In den Versuchs- räumen Zimmer 0101 („Wohnzimmer“) und 0103 („Büro“)

wurden zusätzliche Mess- und Steuerungseinrichtungen in- stalliert.

Die Antwortfunktionen beim Heizen wurden einheitlich als Funktionen dritter Ordnung abgebildet. Die Koeffizienten für diese Funktionen wurden offline automatisch mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus bestimmt. Beispielhafte Daten sind in Tabelle 2 dargestellt.

Zur Simulation der Anwesenheit von Personen wurden Wärmelastsimulatoren nach [12] mit gleichzeitiger CO₂- Zufuhr verwendet. Somit können automatisch verschiedene Anwesenheits-Szenarien abgearbeitet werden. Diese wur- den für zwei typische Fälle untersucht, für eine Single- und eine Familienwohnung [13]. Die Gültigkeit der Messrei- hen wurde nach der mittleren Außenlufttemperatur während der Messperiode bewertet. Dabei wurden nur die Messrei- hen mit einer mittleren Außenlufttemperatur unter 4 °C und mit einem Maximum der Außenlufttemperatur unter 14 °C betrachtet. Während der Langzeit-Versuche wurden viele zufällige Einflussfaktoren sowie Fehler der Technik ausge- lichen, um zu repräsentativen Ergebnissen zu gelangen.

Zusammenfassend wurde durch die anwesenheitsbeein- flusste Heizung in der beispielhaft untersuchten Single- Wohnung 21% Heizenergieeinsparung erreicht; in der Fam- ilienwohnung waren es im Mittel 10%. Die Umrechnung der für den Betrieb der TGA verwendeten Elektroener- gie in äquivalente Heizenergie mit dem Faktor 2,5 kW Heizenergie/kW Elektroenergie ergab eine mittlere Energie- einsparung in der Familien-Wohnung von 2,9 kWh/Tag, in der Single-Wohnung von ca. 5,7 kWh/Tag.

Nr.	Abhängigkeiten	Verstärkung	Zeitkonstanten		
		K	T ₁ in s	T ₂ in s	T ₃ in s
1	Wärmestrom-Lufttemperatur	0,07 W/K	797	1045	994
2	Wärmestrom-PMV	0,0061 W	1497,9	1495,2	1495,8

Tabelle 2: Beispiele der ermittelten Koeffizienten für das „Büro“ (R. 0103).


Tabelle 3: Daten zur experimentellen Überprüfung der anwesenheitsgesteuerten Strategien.

	Familien-Wohnung (Dauer 7 d)		Single-Wohnung (Dauer 7 d)	
	Heizenergieverbrauch	Elektroenergie	Heizenergieverbrauch	Elektroenergie
Energieverbrauch bei konventioneller Betriebweise Q_{HK}	428 kWh	0	253 kWh	0
Energieverbrauch bei anwesenheits- beeinflusster Betriebweise Q_{Ha}	385 kWh	9,52 kWh	200 kWh	5,04 kWh
Energieeinsparung (gewichtet)	44 kWh	-9,52 kWh	53 kWh	-5,04 kWh
	9,8%		21,3%	
	Gewichteter Mittelwert 16,9%			
Äquivalenter Verbrauch		-24,01 kWh		-12,74 kWh
Gesamteinsparung	2,8 kWh/d - 0,13 t/a CO ₂		5,7 kWh/d - 0,46 t/a CO ₂	
Mittlere Außentemperatur	-2,4 °C		-3,2 °C	
Abschätzung der Heizenergie- Einsparung umgerechnet auf 4 °C	10,2%		21,5%	
	Gewichteter Mittelwert 17,2%			

Die Umrechnung der erzielten Einsparungen in Minderung der CO₂-Emission erfolgt getrennt für die Heizenergie mit dem Umrechnungsfaktor (Standard-Heizkessel für Heizöl) 0,46 kg CO₂/kWh [15] und für Elektroenergie, entsprechend dem deutschen Energiemix mit dem Umrechnungsfaktor von 0,65 kg CO₂/kWh [15; 16]. Dieses ergibt bei 200 Heiztagen pro Jahr eine Minderung des CO₂-Ausstoßes von ca. 0,133 t/a für eine Familien-Wohnung und 0,459 t/a für eine Single-Wohnung (Tabelle 3).

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit befasst sich mit der Untersuchung der grundlegenden Möglichkeiten zur Energieeinsparung durch technische Gebäudeausrüstungen in Gebäuden für den privaten Lebensbereich. Dabei wurden vor allem die Energieeinsparungen durch anwesenheitsbeeinflusste Heizung und Lüftung detailliert theoretisch und teilweise auch praktisch untersucht. Der Arbeitsschwerpunkt wurde auf Fragen der Realisierung und Implementierung eines robusten und effektiven Heizungs- und Lüftungssystems für die oben genannten Zwecke gelegt. Es wurde eine Methode zum Aufbau eines modellgestützten Mess- und Automatisierungssystems zur bedarfsgerechten Heizung und Lüftung beschrieben und diskutiert.

Die Analyse der Einsparungsmöglichkeiten für die untersuchte anwesenheitsbeeinflusste Betriebsart des Heizungs- und Lüftungssystems zeigte, dass im Bereich bedarfsgerechter Heizungs- und Lüftungstechnik bedeutende Potentiale liegen. Durch den Einsatz einer intelligenten Hausinstrumentierung für die anwesenheitsbeeinflusste Regelung mit Wärmerückgewinnung konnten in privaten Wohnungen zum heutigen Entwicklungsstand eine Heizenergie-Einsparung von ca. 10%–20% in einer Single-Wohnung

und ca. 7%–10% in einer Familienwohnung nachgewiesen werden. Betrachtet man die Differenz zur dafür aufgewendeten Elektroenergie, ergibt sich für eine Single-Wohnung eine äquivalente Energieeinsparung von 2,9 kWh/d bzw. 2,5 kWh/d für eine Familien-Wohnung. Dies entspricht einer Reduzierung der CO₂-Emission von 0,46 t/a bzw. 0,31 t/a.

Die Analyse der physikalischen Gegebenheiten im Gebäude zeigte, dass für eine weitere Ausschöpfung des Energieeinsparpotentials durch Reduzierung der Wärmeverluste eine vollständige systemtechnische Betrachtung notwendig ist.

Die Minderung der Wärmeverluste durch bautechnische Maßnahmen spielt eine wichtige Rolle, aber verursacht zur Regelung des Raumklimas gleichzeitig zusätzliche Anforderungen an die TGA. Für die Realisierung von PMV-Werten im Bereich der Behaglichkeit müssen bei hochgradig wärmedämmten und hochdichten Häusern die Wärmelasten und -gewinne rechtzeitig erkannt und berücksichtigt werden. Die Regler müssen so ausgelegt werden, dass laufende Änderungen der Arbeitspunkte in einem großen dynamischen Bereich berücksichtigt werden können. Dazu müssen mindestens PI-Algorithmen realisiert werden. Mit Hilfe der theoretischen Prozessanalyse kann sowohl die Anzahl der Messstellen verringert als auch deren Positionierung optimiert werden.

Ein weiteres Potential besteht in der Verbesserung der Wärmerückgewinnung und des elektrischen und mechanischen Wirkungsgrades bei der bedarfsgerechten Lüftung in Verbindung mit dafür zugeschnittenen Mess- und Steuerungsanlagen.

Kombinierte Systeme zur anwesenheits- sowie aktivitätsbeeinflussten Regelung können mit einem nur geringen Zusatzaufwand gegenüber Systemen zur anwesenheitsbeeinflussten Regelung realisiert werden. Daher ist der Einsatz

kombinierter Systeme in verstärktem Maße zu erwarten. Zusammen mit zusätzlichen Funktionalitäten des Systems kann das dann sicher erreichbare größere Einsparpotential bei einer Massenproduktion und der daraus resultierenden Kostendegression zu guten Marktchancen führen.

Danksagung

Diese Forschungsarbeiten konnten mit Unterstützung der Bayerischen Forschungsstiftung (Projekt 283/98, Intelligente Hausinstrumentierung – IWO-BAY) durchgeführt werden.

Literatur

- [1] CO₂ – Alle müssen handeln!, Hrsg. vom Verband kommunaler Unternehmen e. V. Vaterstetten, Synektis Verlag GmbH, 1995.
- [2] Bach, W., Georgii, H.-W., Steubing, L.: Schadstoffbelastung und Schutz der Erdatmosphäre, Bonn: Economica Verlag, 1995.
- [3] Endenergieverbrauch in Deutschland 1999/Verband der Elektrizitätswirtschaft – VDEW – e. V. – Frankfurt am Main, 2000.
- [4] Schneider, A.: Solararchitektur für Europa. Birkhäuser, Berlin, 1996.
- [5] Keller, B.: Klimagerechtes Bauen: Grundlagen – Dimensionierung – Beispiele. Teubner, Stuttgart, 1997.
- [6] Hinweise zum Energieeinsparen/Raumklima und Behaglichkeit. Hrsg. vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie. Max Schick GmbH, München, 1996.
- [7] Fanger, O.: Thermal Comfort / Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill Book Company, New York, 1972.
- [8] DIN ISO 7730 Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. Ausg. 1994.
- [9] ASHRAE Handbook: Chapter 8: Thermal nonuniform conditions for local discomfort. Ausg. 1998.
- [10] Glück, B.: Wärmetechnisches Raummodell: Gekoppelte Berechnungen und wärmephysiologische Untersuchungen. Müller, Heidelberg, 1997.
- [11] Building Energy Software Tools.
URL: http://www.eren.doe.gov/buildings/tools_directory/database/page.cfm?Menu=7&Desc=Alphabetical+List.
- [12] DIN 7415-1: Raumkühlflächen. Leistungsmessung bei freier Strömung. Ausg. 1994.
- [13] Spasokukotskiy, K., Grassnick, R., Horn, M.: Parameter identification for the control of thermal comfort. Analysis Division Symposium AD2002, Denver, Co, 2002.
- [14] Forschungshaus SmartHOME.
URL: <http://smarthome.et.unibw-muenchen.de>.
- [15] Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik, Universität Karlsruhe.
URL: <http://ttk-net.ciw.uni-karlsruhe.de/kaelte/tewi.htm>.
- [16] Windkraft ökologisch ein Unglück, ökonomisch eine Mogelpackung. Bürgerinitiative Rheinhausen.
URL: <http://huegelland.tripod.com/norff02.htm>.

Dipl.-Ing. K. Spasokukotskiy ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Sensorik und Messsysteme der Fakultät Elektro- und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München. Hauptarbeitsgebiete: Physikalische Analyse, Bauphysikalische Simulation, Intelligente Sensor-Systeme mit Signalverarbeitung. Adresse: Universität der Bundeswehr München, Institut für Mess- und Automatisierungstechnik, Werner-Heisenberg-Weg 39, D-85577 Neubiberg bei München, Tel.: ++49-89-6004-3930, Fax: ++49-89-6004-2557, E-Mail: spasokukotskiy@yahoo.com

Apl.-Prof. Dr.-Ing. M. Horn ist Wissenschaftlicher Laborleiter am Lehrstuhl für Sensorik und Messsysteme der Fakultät Elektro- und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München. Hauptarbeitsgebiete: Modellierung und Zuverlässigkeit von Sensoren und Sensor-Aktor-Systemen. Adresse: Universität der Bundeswehr München, Institut für Mess- und Automatisierungstechnik, Werner-Heisenberg-Weg 39, D-85577 Neubiberg bei München, Tel.: ++49-89-6004-3955, Fax: ++49-89-6004-2557, E-Mail: Michael.Horn@UniBw-Muenchen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-R. Tränkler ist Ordinarius des Lehrstuhls für Sensorik und Messsysteme der Fakultät Elektro- und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München. Hauptarbeitsgebiete: Intelligente Sensor-Systeme mit Signalverarbeitung, Sensor-Aktor-Systeme für den privaten Lebensbereich, Untersuchung und Modellierung von Sensoren für physikalische und chemische Messgrößen. Adresse: Universität der Bundeswehr München, Institut für Mess- und Automatisierungstechnik, Werner-Heisenberg-Weg 39, D-85577 Neubiberg bei München, Tel.: ++49-89-6004-3740/-3741, Fax: ++49-89-6004-2557, E-Mail: Hans-Rolf.Traenkler@UniBw-Muenchen.de