Selbsteinstellender bedarfsgesteuerter Heizungsregler

Autor(en): **Krauss, Jens / Bauer, Manuel**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **93 (2002)**

Heft 3

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-855379

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Selbsteinstellender bedarfsgesteuerter Heizungsregler

Heute auf dem Markt erhältliche regeltechnische Produkte für HLK-Anlagen[1] verfügen über adaptive Regelstrukturen, moderne Algorithmen für die Start/Stop-Prozedur und benutzerorientierte Bedienungsoberflächen. Allen Produkten gemeinsam ist das Konzept der vordefinierten Heizkurven. Dieses Regelkonzept berücksichtigt jedoch nicht die Energiebilanz des Gebäudes und resultiert zudem in einem erhöhten Aufwand betreffend der Inbetriebnahme und des Unterhaltes der HLK-Anlage. Im vorliegenden Beitrag werden die neusten Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt des auf neuronalen Netzwerken basierenden Heizungsregelsystems Neurobat vorgestellt.

Heute eingesetzte Heizungsregler steuern die Vorlauftemperatur des Heizkreises auf Grund der gemessenen Aussentemperatur[2] oder einer Rückführung der Raumtemperatur[3]. 95% von ihnen basieren auf dem Konzept der Heizkurven. Die Popularität dieser angewandten Regelmethoden beruht auf ihrer Einfach-

Jens Krauss, Manuel Bauer

heit. Steigendes Umweltbewusstsein betreffend Produktion und Verwendung der Energieressourcen ist einer der entscheidenden Motivationsfaktoren für die Entwicklung von robusten und optimalen Regelmethoden im Bereich der Heizungs- und Klimatechnik [1, 2].

Moderne Heizungsregler wenden eine Kombination beider Methoden an und korrigieren die vordefinierten Heizkurven in Abhängigkeit der gemessenen Raumtemperatur und/oder der gemessenen Sonneneinstrahlung [3]. Die verwendeten Regleralgorithmen verfügen zudem über optimierende Funktionen für das Aufstarten und Herunterfahren der Heizung. Trotzdem funktionieren modernste, heute eingesetzte kommerzielle Heizungsregler nicht optimal in Bezug auf das intermittierende Heizen und das Management der vorhanden Freiwärme[4], da die Regelstrategie auf einem thermisch stationären und unvollständigen Modell beruht. Modernste kommerzielle Heizungsregler erfordern zudem einen beträchtlichen Aufwand bei der Inbetriebnahme und während des Betriebs.

Das vom Schweizerischen Elektronik- und Mikrotechnikzentrum (CSEM[5]) im Auftrage des Bundesamts für Energie (BFE) entwickelte prädiktive und auf neuronalen Netzwerken basierende Heizungsregelsystem Neurobat wurde als Pilotinstallation auf dem Hauptgebäude des CSEM installiert und ausgemessen. Die Messungen bestätigen das Energiesparpotenzial sowie die Reduktion der Betriebskosten von regeltechnischen HLK-Produkten unter Anwendung von intelligenten Regelkonzepten.

Basis eines optimalen Regelkonzeptes ist eine repräsentative mathematische Beschreibung des physikalischen Systems, in diesem Fall des thermischen Verhaltens des Gebäudes. Systemgleichungen von thermischen Systemen tendieren jedoch höchst nicht-linear zu sein und weisen bilineare[6] Terme auf, die durch künstliche neuronale Netzwerke (KNN) beschrieben werden können. KNN funktionieren im Sinne von «Black Box»-Modellen und benötigen keine a-priori-Kenntnisse des thermischen Verhaltens des Gebäudes oder der gebäudetechnischen Teilsysteme. Sie vermögen jedoch Schlüsselinformationen und nicht-lineare Charakteristiken innerhalb eines multidimensionalen Informationsraum zu extrahieren. Ein weiterer Vorteil ist ihre Fähigkeit, auf überparametrisierte Systeme angewendet werden zu können, wobei Daten von untergeordneter Bedeutung vernachlässigt und die Eingänge mit wichtigen Systemeigenschaften gewichtet werden [4].

Eine weitere bedeutende Eigenschaft eines optimalen Regelkonzeptes ist seine zu mini- oder maximisierende Kostenfunktion (oder Leistungsindex). Optimale Regelkonzepte, die dynamische Prozesse berücksichtigen, bestehen meist aus einer

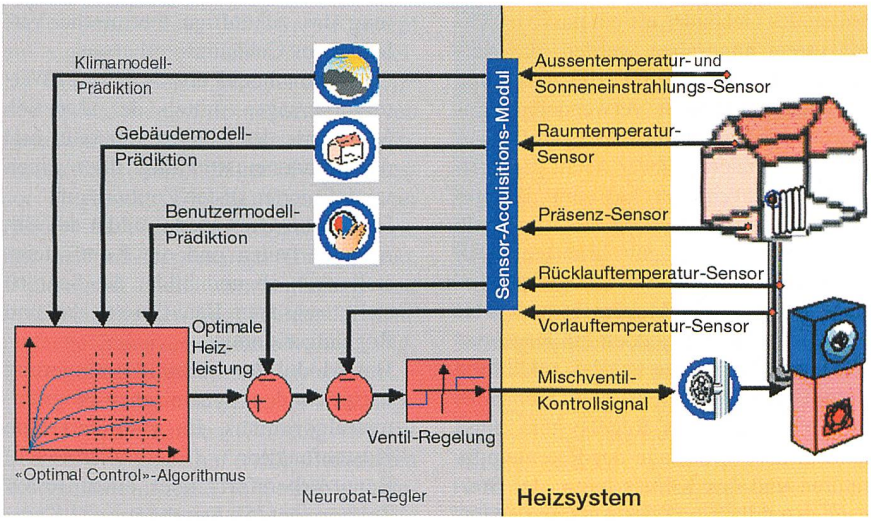

Bild 1 Regelkonzept des Neurobat-Heizungsreglers
Aussentemperatur, Sonneneinstrahlung, Raumtemperatur, Vorlauf- und Rücklauftemperatur stehen als Sensorsignale zur Verfügung

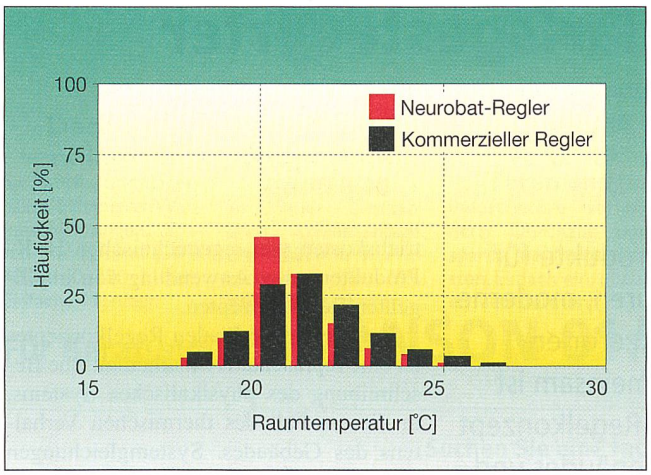

Bild 2 Komfortquantifizierung für eine Heizsaison im Vergleich

Zeitraum: September 1998 bis Mai 1999. Gemessene Raumtemperaturen während der Benutzerpräsenz; Sollwert: 20 °C

integrierenden Kostenfunktion, da der Leistungsindex über ein Zeitintervall optimiert werden muss[7]. Normalerweise bestehen Kostenfunktionen aus zwei Termen, wobei der erste Term die Leistungskomponenten innerhalb des Systems repräsentiert und der zweite dazu verwendet wird, die Systembedingungen zu beschreiben, bzw. die Systemvariablen möglichst nahe am Sollwert zu halten.

Die für den Neurobat-Heizungsregler verwendete Kostenfunktion berücksichtigt sowohl die Energiekosten, die dem Energieverbrauch entsprechen, als auch die sogenannten «Komfortkosten», falls die Raumtemperatur nicht dem Sollwert entspricht. Das Ziel des optimalen Regelkonzeptes ist es, die optimale Leistungskurve zu bestimmen, so dass mit einem minimalen Energieverbrauch ein optimaler thermischer Benutzerkomfort resultiert [5].

Damit ein optimales Management der vorhandenen Freiwärme gewährleistet werden kann, muss das thermische Verhalten des Gebäudes als ein passives Klimasystem angesehen werden, das versucht, mittels der für die Regelung der Raumtemperatur verwendeten Freiwärme den Energieverbrauch des Gebäudes zu reduzieren. Zwar reicht die Freiwärme nicht immer aus, um den gewünschten Benutzerkomfort innerhalb eines Gebäudes zu gewährleisten, doch kann sie vorteilhaft zur Energiespeicherung innerhalb der Mauern benutzt werden. Dies erfordert jedoch ein Regelsystem, das in der Lage ist, das zukünftige thermische Verhalten des Gebäudes vorherzusagen. Das Regelsystem muss anhand der Vorhersage der Raumtemperaturen und des Klimas – v.a. der Sonneneinstrahlung und der Aussentemperatur [6] – die Steuerparameter antizipieren.

Der nachfolgend vorgestellte Heizungsregler basiert auf der Optimierung einer Kostenfunktion über einen vordefinierten Zeithorizont unter Verwendung von KNN.

Das Regelkonzept

Bild 1 zeigt das Blockdiagramm der prädiktiven Optimierung der Kostenfunktion des Neurobat-Reglers. Wie bei fortgeschrittenen herkömmlichen Zentralheizungs-Regelsystemen stehen dem Neurobat-Regler Aussen-, Raum-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur sowie Sonneneinstrahlung als Sensorsignale zur Verfügung.

Nachfolgend werden die Regelmodule des aus einem untergeordneten Hilfsregelkreis und einem übergeordneten Hauptregelkreis bestehenden Neurobat-Heizungsreglers erläutert [1, 7].

- Das Gebäudemodul bildet das Gebäudeverhalten ab, welches auf Grund der Prädiktion der Klimadaten, der aktuellen Raumtemperatur und der Heizleistung das zukünftige thermische Verhalten des Gebäudes vorhersagt.
- Das Klimamodul errechnet die «Wettervorhersage» mittels der aktuellen Messwerte der Aussentemperatur und der Sonneneinstrahlung über einen vordefinierten festen Zeithorizont.
- Ein zusätzliches Modul bildet das Benutzerverhalten und die Komforteinstellungen ab und bildet die Schnittstelle zwischen Benutzereingabe und Regelalgorithmus.
- Das Modul der Leistungsoptimierung entspricht dem dynamischen Programmieralgorithmus. Es minimiert eine Kostenfunktion (Energieverbrauch, Benutzerkomfort) über einen festen Zeithorizont [5]. Der thermische Komfort wird durch den PMV-Faktor[8] quantifiziert[9] [8]. Die mathematische Gleichung der Kostenfunktion J zur Berechnung der optimalen Heizleistung lautet dabei

$$J(P_{heat}, T_{in}, T_{setpoint}) = C_{Pheat} \cdot P_{heat} + C_{comf} \cdot \left(e^{PMV(T_{in}, T_{setpoint})^2} - 1 \right)$$

mit

P_{heat} = Heizleistung [W]
$PMV(T_{in}, T_{setpoint})$ = Predicted Mean Vote [–]
T_{in} = Raumtemperatur [°C]
$T_{setpoint}$ = Sollwert-Temperatur [°C]
C_{Pheat} = Heizleistungskoeffizient
C_{comf} = Komfortkoeffizient

- Das Modul der Ventilsteuerung gewährleistet die Schnittstelle mit herkömmlichen HLK-Anlagen. Die vom Neurobat-Regler errechnete, optimale und zu liefernde Heizleistung wird mittels der aktuellen Rücklauftemperatur in eine nominale Vorlauftemperatur umgerechnet.

Die Innovation des Neurobat-Regelkonzeptes beruht nicht nur in der Reduktion des Energieverbrauches unter Anwendung von Neuro-Fuzzy-Technologien (neuronale Klima- und Gebäudemodelle) und der Optimierung einer Kostenfunktion unter Verwendung von KNN, sondern zeichnet sich durch eine markante Vereinfachung der Inbetriebnahmeprozedur aus. Diese umfasst neben der Initialisierung von lediglich vier Serviceparametern die Einstellung bloss zweier Benutzerparameter (Komfortempfinden, Zeitprogramm).

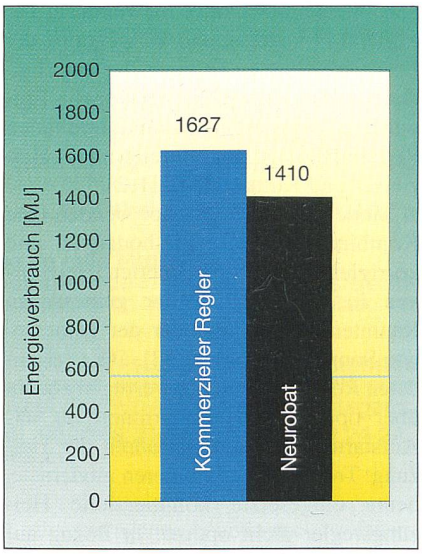

Bild 3 Energieverbrauch [MJ] für eine Heizsaison im Vergleich

Zeitraum: September 1998 bis Mai 1999. Mittels Einsatz des Neurobat-Heizungsreglers resultiert eine globale Energieeinsparung von 13%.

Während oder nach der Inbetriebnahme der HLK-Anlage seitens des Service-Personals oder der Benutzer sind keine weiteren Parameter-Einstellungsoptimierungen erforderlich. Die ausgeführten Tests und Simulationen ergeben, dass sich der Neurobat-Regler nach einer Betriebsdauer von drei Wochen optimal an die Regelstrecke adaptiert, wobei er während dieser Adaptionsphase eine Betriebseffizienz erzielt, die mit herkömmlichen Heizungsregelsystemen vergleichbar ist.

Analyse des Betriebsverhaltens

In einer ersten Projektphase wurde das Neurobat-Regelkonzept während zweier Heizperioden (1996–1998) in Büroräumlichkeiten des Leso-PB/EPFL[10] getestet und mit den Betriebsdaten eines kommerziellen, adaptiven, mit dem Start/Stop-Algorithmus und einer Raumtemperaturaufschaltung ausgerüsteten Heizungsreglers verglichen[11]. Zwei thermisch unabhängige Büroräumlichkeiten von gleicher Dimension und Orientierung wurden mit zwei unabhängigen Heizkreisen ausgerüstet, um damit die Betriebseffizienz der Heizungsregler zu analysieren. Die Kommutierung der Heizungsregelsysteme mittels eines eingebauten Schalters ermöglicht den fairen Vergleich der Betriebsdaten der beiden Heizungsregelsystemen[12]. Damit konnte das für den Betrieb eines Heizungsregelsystemes entscheidende Verhalten der Benutzer teilweise kompensiert werden.

Bild 2 illustriert die Quantifizierung des Komforts während der Heizperioden (1996–1998) im Vergleich. Das Diagramm zeigt die während der Heizsaison gemessene durchschnittlichen Raumtemperaturen (Sollwert: 20 °C) während der Komfortperiode, wobei das Zeitprogramm des Heizungsreglers einer Anwesenheit von 8 bis 18 Uhr an Wochentagen und einer Abwesenheit an Wochenenden (Bürozeiten-Zeitprogramm) entspricht. Der Neurobat-Heizungsregler zeigt eine Kumulierung der Raumtemperaturen um den Sollwert und – verglichen mit dem kommerziellen Heizungsregler – eine Reduktion der Überheizwerte.

Der Vergleich der Komfortdaten in Bild 2 bestätigt ein verbessertes Management der passiven Energie (Sonnenenergie, Abwärme) des Neurobat-Reglers. Mittels der neuronalen Prädiktionsmodule ist der Regler in der Lage, den geforderten Komfort zu antizipieren und diesen mittels der Freiwärme energiesparend zu erhalten. Dies führt zu einer markanten Reduktion der Überheizwerte (ersichtlich in Bild 2 mit einer Häufung der gemessenen Raumtemperaturen um den Sollwert für den Neurobat-Heizungsregler) einerseits und des Energieverbrauches andererseits. Die im vorliegenden Fall erreichte Energieeinsparung ist in Bild 3 wiedergegeben und betrug 13%.

Bild 4 Der Neurobat-Prototyp basiert auf einem herkömmlichen Kompakt-Heizungsregler

Ein leistungsfähiger 16-bit-Prozessor wurde eingesetzt, um den Anforderungen des rechenintensiven Algorithmus zu genügen.

In der Zwischensaison (Herbst und Frühling) konnten – auf Grund des sich stark ändernden Klimas – sogar Energieeinsparungen von bis zu 40% im Vergleich zu einem modernen, kommerziellen Heizungsregler erreicht werden [9].

Prototypen-Entwicklung und -Test

Auf Grund der Erfolg versprechenden Resultate der Konzeptphase wurde während einer zweiten Projektphase die industrielle Machbarkeit des Regelkonzeptes mit der Entwicklung und den Tests eines Prototypen unter Beweis gestellt. Bild 4 zeigt den industriellen Neurobat-Prototypen, dessen Hardware-Konzept auf einem herkömmlichen, kommerziellen Kompakt-Heizungsregler beruht. Um den Anforderungen des rechenintensiven Neurobat-Regelalgorithmus zu genügen, wurde ein leistungsfähiger 16-bit-Prozessor eingesetzt. Die Benutzerparameter (Raumsollwert, Komfortperiode) sowie die vier Serviceparameter (Längengrad, Breitengrad, Gebäudeorientierung und maximale Heizleistung) können über eine einfache Benutzerschnittstelle mit LCD-Anzeige und Tastatur definiert werden.

Der Prototyp des Neurobat-Heizungsreglers wurde Anfang Oktober 1999 zur Betriebsevaluation auf einem 3-stöckigen Testgebäude in Basel in Betrieb genommen. Das Wohngebäude besitzt eine energetische Referenzfläche von 100 m², ist ostwestlich ausgerichtet und besitzt vernachlässigbare Gewinne aus passiver Sonnenwärme[13]. Die Isolation der Mauern und Fenstern ist für den schweizerischen Immobilienpark repräsentativ, und die thermische Verbrauchsenergie beträgt 770 MJ/m² im Jahr. Die Verteilung der Wärme der ölgefeuerten Zentralheizung[14] basiert auf einem Warmwasser-Heizkreis pro Etage. Jeder Radiator wird zusätzlich durch ein Thermostatenventil geregelt.

Um die Betriebsdaten des Neurobat-Heizungsreglers zu referenzieren, wurde während der Heizsaison 1998/1999 ein moderner, kommerzieller Zentralheizungsregler auf dem Testgebäude installiert und evaluiert[11]. Von der Regelung unabhängige Sensoren wurden eingesetzt, um ein kontinuierliches «Monitoring» der Leistungsdaten der Heizungsregler zu ermöglichen. Die Vergleiche der Betriebsdaten des kommerziellen Heizungsreglers (Heizsaison 1998/1999) und des Neurobat-Prototypen (Heizsaison 1999/2000) haben zum Ziel, die Adaptation der Regelparameter und das Betriebsverhalten zu analysieren. Dabei wurden während der Heizsaison 1998/1999 die Regelparameter des kommerziellen Heizungsreglers kontinuierlich

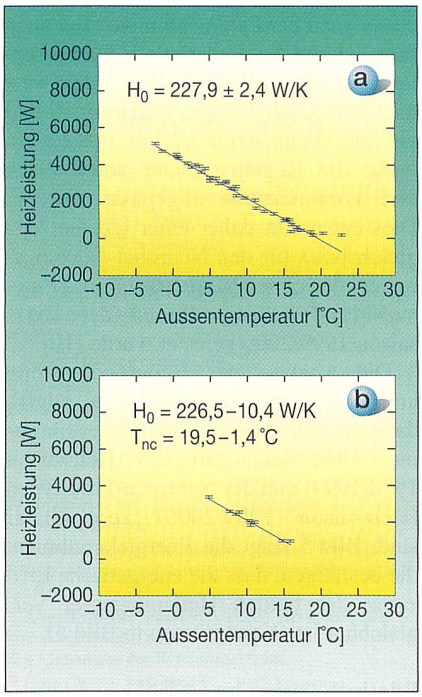

Bild 5 Energiekennlinien im Vergleich

Die Energiekennlinien charakterisieren die energetische Effizienz. Die Heizleistung wird über einen Zeitraum von vier Tagen in Abhängigkeit der Aussentemperatur gesetzt. a: kommerzieller QRK 201-Regler, Heizsaison 1998/1999; b: Neurobat-Prototyp, Heizsaison 1999/2000

Für den kommerziellen Heizungsregler ist der thermische Gebäudetransferkoeffizient H_0 = 227,9 ± 3 W/K und der Wert der Grenzheizwert T_{nh} = 19,2 ± 0,4 °C. Die entsprechenden Grössen für den Neurobat-Prototypen sind H_0 = 226 ± 10 W/K und T_{nh} = 19,5 ± 1,4 °C.

Bild 6 Testgebäude CSEM in Neuchâtel
Einsatz des Neurobat-Prototypen in der Heizzone Nord-Ost

durch einen Experten geändert, der die Funktionalitäten des Reglers und das thermische Verhalten des Gebäudes kennt. In der Praxis wird ein entsprechendes Niveau der Parameteranpassung auch für moderne, kommerzielle Heizungsregler nicht erreicht, jedoch sind nicht vernachlässigbare Energieeinsparungen und ein optimaler Komfort nur erreichbar, wenn die Regelparameter automatisch und kontinuierlich angepasst würden. Dies entspricht daher einer idealen Vergleichsbasis für den Neurobat-Heizungsregler, der ohne Parametrisierung (Plug-and-Play-Prinzip) während der Heizsaison 1999/2000 getestet wurde [10].

Die Analyse des Benutzerkomforts und der energetischen Effizienz zeigt[15], dass die Betriebseffizienz des kommerziellen Heizungsreglers (Heizsaison 1998/1999) und des Neurobat-Prototypen (Heizsaison 1999/2000) vergleichbar sind. Bild 5 zeigt die Energiekennlinien, die bestätigen, dass die energetische Effizienz der beiden Heizungsregler vergleichbar ist (Kenngrössen in Bild 5).

Pilotinstallation im CSEM

Im Rahmen eines weiterführenden Pilotprojekts wird der entwickelte industrielle Prototyp des Neurobat-Heizungsreglers zurzeit in einer Heizzone (Nord-Ost) des CSEM-Hauptgebäudes (Bild 6) eingesetzt. Dabei soll seine Betriebseffizienz bezüglich Inbetriebnahme und Energieeinsparung während der Heizsaison 2001/2002 mit den Daten eines kommerziellen Gebäudeleitsystems verglichen werden.

Für die Analyse der Messdaten wurde ein Datenerfassungssystem mit Sensoren installiert[16], die unabhängig zur Heizungsregelung auf das Datenerfassungssystem aufgeschaltet werden. Referenzmessungen einer vergleichbaren Heizzone (Nord-West) mit kommerziellem Gebäudeleitsystem wurden ebenfalls auf das Datenerfassungssystem aufgeschaltet. Die Evaluation soll sowohl die Einfachheit der Inbetriebnahme und des Unterhalts des Neurobat-Heizungsreglers zeigen als auch die während den Entwicklungsphasen des Neurobat-Projektes ausgewiesene Energieeinsparung von 10% demonstrieren[17].

Resultate

In Bild 7a sind Raum-, Aussen- und Sollwert-Temperatur dargestellt. Bild 7b zeigt die gemessenen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sowie die berechnete Vorlauftemperatur als Referenz (Vorlauf Soll in Bild 7b). Die Komfortperiode (6 Uhr bis 22 Uhr) ist durch die graue Schattierung markiert. Das Verhalten der Vorlauftemperatur unterstreicht den prädiktiven Charakter des Neurobat-Regelalgorithmus. Mittels eines antizipierenden und stetig steigenden Heizleistungsschubs vor Beginn der Benutzerpräsenzzeit kann der thermische Komfort gewährleistet werden, und mit dem Herunterfahren der Heizleistung zur Mittagszeit können Überheizwerte in der Nachmittagszeit vermieden werden, da die vorhandene Freiwärme für das Beheizen der Büros ohne Komfortverlust ausreicht.

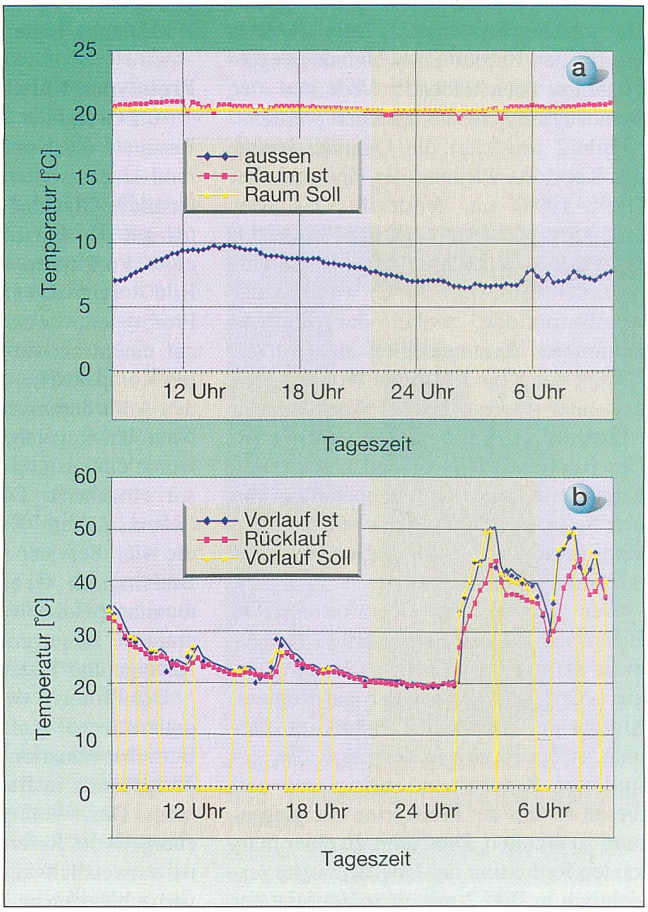

Bild 7 Testdaten Pilotinstallation CSEM in Neuchâtel
a: Gemessene mittlere Raumtemperatur mit Sollwert-Referenztemperatur und gemessener Aussentemperatur; b: gemessene Vorlauftemperatur mit berechnetem Vorlauf-Referenztemperatur und gemessener Rücklauftemperatur

Das für Warmwasser-Heizkreise einsetzbare Heizungsreglerkonzept Neurobat wurde vom CSEM in Zusammenarbeit mit der Ingenieurfirme Estia GmbH und dem Leso-PB/EPFL im Auftrage des Bundesamts für Energie (BFE) entwickelt.

Eine erste Analyse der Messdaten der Pilotinstallation bestätigt die Resultate der Entwicklungsphasen des Neurobat-Projektes: Mittels den neuronalen Prädiktionsmodulen ist der Neurobat-Heizungsregler in der Lage, den geforderten Komfort zu antizipieren und diesen mittels der Freiwärme energiesparend zu erhalten. Die auf Grund der heute vorhandenen Messdaten geschätzte Energieeinsparung liegt bei rund 12%, wobei die einfache Installation und der günstige Unterhalt des Neurobat-Heizungsreglers die Betriebskosten der Heizung zusätzlich senken.

Ausblick

Der Neurobat-Heizungsregler verwendet für die Adaptation der Klimamodelle, der Gebäudecharakteristik und des Benutzerverhaltens künstliche neuronale Netzwerke (KNN). Der entwickelte Heizungsregler minimiert den Energieverbrauch unter Anwendung einer prädiktiven Regelstrategie, kombiniert mit einer nicht linearen Modellierung der Gebäudethermik, des Benutzerverhaltens und der Wettervorhersage unter Garantie eines optimalen thermischen Benutzerkomforts. Die Anwendung selbstlernender neuronaler Algorithmen ermöglicht eine beachtliche Reduktion der Betriebskosten für die Inbetriebnahme und den Unterhalt des Heizungsregler. Mit einem noch zu bestimmenden industriellen Partner soll der bereits patentierte Neurobat-Heizungsregler kommerzialisiert werden, wobei ein Energieeffizienz-Label die Vermarktung unterstützen soll.

Referenzen

[1] *M. Bauer:* Gestion biomimétique de l'énergie dans le bâtiment. PhD Thesis No. 1792, EPFL, Lausanne, 1998.

[2] *A. M. Nygard:* Predictive Thermal Control of Building Systems. PhD Thesis No. 876, EPFL, Lausanne, 1990.

[3] *Sauter AG:* Heating Control QRK 201. Technical Manual, Basel, 1996.

[4] *M. T. Hagan, M. B. Manhaj:* Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm. IEEE Transactions on Neural Networks, p. 5, 1994.

[5] *D. Bertzekas:* Dynamic Programming and Stochastic Control. Academic Press, New York, USA, 1976.

[6] *N. Morel, M. Bauer, J. Krauss, M. El-Khoury:* Neurobat – a predictive and adaptive heating control system using artificial neural networks. International Journal of Solar Energy, Special Edition «Intelligent Buildings», OPA, N.V., USA, Mai 2001.

[7] *J. Krauss, M. Bauer, J. Bichsel, N. Morel:* Neurobat – a self-commissioned heating control system. Volume: Sensors in Intelligent Buildings. Wiley-VCH, Weinheim, Deutschland, Mai 2001.

[8] *P. O. Fanger:* Thermal Comfort. Krieger, R. E. Malabor, USA, 1981.

[9] *J. Krauss, M. Bauer, N. Morel, M. El-Khoury:* Neurobat – Predictive Neuro-Fuzzy Building Control System. Final Report, BFE «Energy Conservation in Buildings», Bern, Mai 1998.

[10] *J. Krauss, J. Bichsel, M. Bauer, N. Morel:* Neurobat II. Final Report, BFE «Energy Conservation in Buildings», Bern, September 2000.

Adressen der Autoren

Jens Krauss, Dipl. El.-Ing. ETH/SIA, Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique CSEM, 2007 Neuchâtel, www.csem.ch, jens.krauss@csem.ch

Manuel Bauer, Dr. Ing. EPFL, ESTIA GmbH, PSE-B/EPFL, 1015 Lausanne, www.estia.ch, bauer@estia.ch

[1] HLK: Heizung-Lüftung-Klima

[2] «open loop control» im Sinne eines Zentralheizungsreglers

[3] «closed loop control» im Sinne eines Raumheizungsreglers

[4] Beispiel: Sonneneinstrahlung und Wärme von Mensch und Maschine

[5] CSEM: Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA, Rue Jaquet-Droz 1, 2007 Neuchâtel

[6] Bilineare Terme bestehen aus Produkten von System- und Regelvariablen

[7] Im Falle des Neurobat-Heizungsreglers entspricht der Zeithorizont sechs Stunden.

[8] PMV = Predicted Mean Vote

[9] Entspricht dem europäischen Standard EN ISO 27730.

[10] Leso = Laboratoire d'Energie Solaire et du Physique de Bâtiment, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

[11] Sauter Heizungsregler QRK 201

[12] Es wurde nach einem Zeitraum von drei Wochen regelmässig umgeschaltet.

[13] Heizgrenzwert bei einer Aussentemperatur von 19 °C

[14] Leistung: 17–23 kW

[15] Energiekennlinie: die Heizleistung wird für einen Zeitraum von vier Tagen in Abhängigkeit der Aussentemperatur gesetzt.

[16] Verwendet werden Aussen-, Raum-, Vorlauf- und Rücklauftemperaturfühler sowie Wärmezähler und Sonnenfühler.

[17] Angesichts der unterschiedlichen Heizzonen und der unterschiedlichen Benutzer: indikativ im Vergleich zu den Messungen der Referenzheizzone

[18] Estia GmbH, PSE-B/EPFL, 1015 Lausanne

Une nouvelle génération de régulation de chauffage auto-adaptative

De nos jours, la régulation la plus courante pour le chauffage central consiste à contrôler la température de départ du circuit de chauffage, en fonction de courbes de chauffage prédéfinies, basées sur la température extérieure mesurée. Même le plus performant des régulateurs disponibles aujourd'hui ne peut gérer de façon optimale les intermittences et les apports gratuits (internes et solaires) et nécessitent un effort important pour la mise en service et la maintenance. Sous mandat de l'Office fédéral de l'énergie (Ofen), un système de régulation du chauffage central à caractère prédictif a été développé par le Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM). Cette régulation est basée sur les technologies des réseaux de neurones artificiels et de la logique floue. Des tests sur différents sites (bâtiments résidentiels, bâtiments d'offices) confirment un abaissement des coûts de fonctionnement et une amélioration du confort thermique des occupants, en comparaison avec une régulation commerciale avancée. Un prototype de régulation de chauffage est actuellement en fonction dans le bâtiment administratif du CSEM à Neuchâtel comme installation pilote.

Der SEV auf dem Internet / L'ASE sur l'Internet:
http://www.sev.ch