Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 7

Artikel: Neuartige Gradientenmethode zur Berechnung der optimalen Schaltzeilen in Heizungs- und Klimaanlagen

Autor: Leimgruber, J. / Lipsky, P. / Reichlin, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903844

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 06.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Neuartige Gradientenmethode zur Berechnung der optimalen Schaltzeiten in Heizungs- und Klimaanlagen

J. Leimgruber, P. Lipsky, A. Reichlin

Zu Beginn der 70er Jahre wurden die ersten Optimierungssysteme für Heizungs- und Klimaanlagen angeboten, mit durchaus positivem Ergebnis. Alle Möglichkeiten der Energieeinsparung konsequent ausschöpfen können aber erst die heutigen mikroprozessorgesteuerten Systeme. Der vorliegende Artikel befasst sich mit dem Entwurf und dem Einsatz eines neuartigen Gradientenverfahrens zur Berechnung der optimalen Ein- und Ausschaltzeiten für Heizungs- und Klimaanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Innenwandtemperatur als Massstab für den im Gebäude gespeicherten Energieinhalt.

Les premiers systèmes d'optimalisation d'installations de chauffage et de climatisation remontent à une quinzaine d'années. Les résultats obtenus étaient réjouissants, mais ce ne sont que les systèmes actuels à microprocesseurs qui sont suffisamment performants pour exploiter entièrement les possibilités d'économie de l'énergie. L'article décrit le projet et l'emploi d'un nouveau procédé à gradients pour le calcul des temps optimaux d'enclenchement et de déclenchement de ces installations, compte tenu de la température des parois à l'intérieur du bâtiment représentant l'énergie accumulée dans celui-ci.

Adresse der Autoren

Josef Leimgruber, Dr. sc. techn., *Peter Lipsky*, dipl. El.-Ing. ETH, *Anton Reichlin*, dipl. El.-Ing. ETH, Industrielle Elektronik, Gebrüder Sulzer AG, 8401 Winterthur.

1. Problemstellung

Bei nicht durchgehend genutzten Gebäuden, wie z.B. in Schulhäusern, Verwaltungsgebäuden und Kaufhäusern, werden die Wärmeerzeugungsanlagen während der Nacht stark gedrosselt oder abgeschaltet. Ein solcher intermittierender Heizbetrieb erbringt eine Energieersparnis ohne Komfortverlust. Der Energieverlust eines Gebäudes errechnet sich nämlich über die Formel

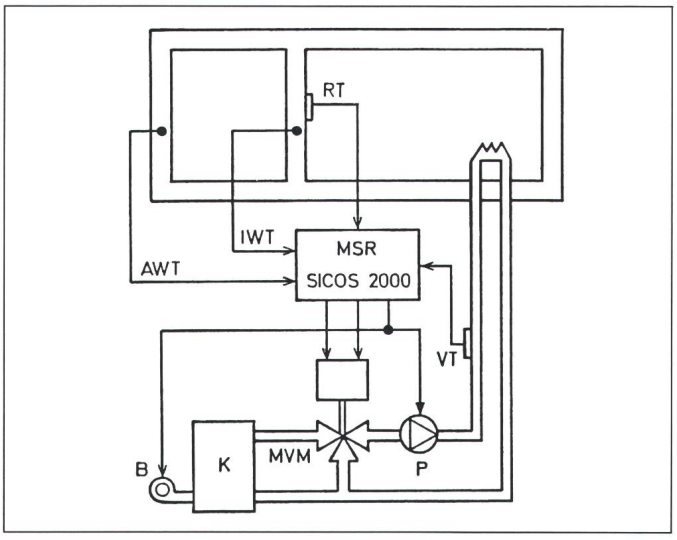
$$Q_H = F \cdot K \cdot (T_I - T_A) \qquad (1)$$

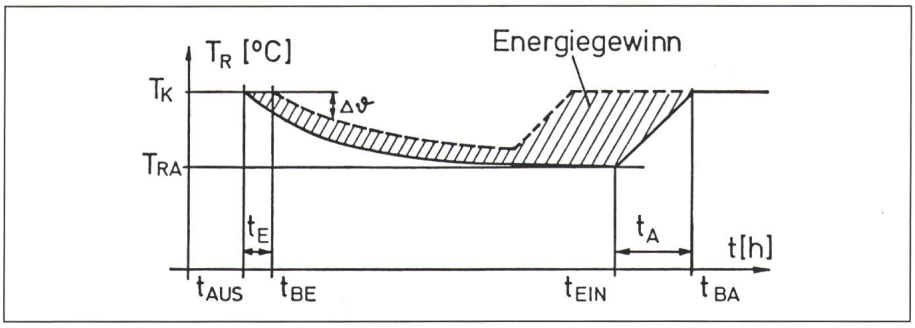
Q_H Wärmeverlust pro Zeiteinheit,
F Fläche der wärmeabgebenden Aussenwände,
K Wärmedurchgangszahl,
$T_I - T_A$ Differenz zwischen Innen- und Aussentemperatur.

Der Wärmeverlust ist also direkt proportional zur Differenz zwischen Innen- und Aussentemperatur; je kleiner diese gehalten wird, desto geringer ist der Wärmeverlust. Betrachtet man für die weiteren Überlegungen die in Figur 1 dargestellte einfache Heizanlage, so bietet sich als erste Massnahme zur Energieeinsparung an, die Raumtemperatur zur Nachtzeit so weit wie möglich abzusenken. Bei der bekannten witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung kann bis jetzt die Vorlauftemperatur während der Nacht nur um einen bestimmten Betrag abgesenkt werden. Jede darüber hinausgehende Absenkung verursacht Probleme bei der morgendlichen Aufheizung, wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt eine vorgegebene Raumtemperatur erreicht werden soll, vor allem bei längerer Dauer des Abkühlbetriebs, z.B. über das Wochenende oder über die Ferienzeiten. Der wesentliche Unterschied zwischen der witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung mit Nachtabsenkung und dem Optimierbetrieb mit abgeschalteten Wärmeerzeugern liegt darin, dass im Optimierbetrieb die Abkühlung des Gebäudes ohne zusätzliche Energiezufuhr erfolgt, während bei der klassischen Nachtabsenkung die Umwälzpumpen und die Kessel dauernd in Betrieb bleiben.

Figur 1
Einfache Heizanlage

VT Vorlauftemperaturfühler
RT Raumtemperaturfühler
IWT Innenwandtemperatur
MVM Mischventilmotor
AWT Aussenwandtemperatur
MSR Mess-Steuer-Regelsystem SICOS 2000
K Kessel
B Brenner
P Umwälzpumpe





Figur 2 Zeitlicher Verlauf der Komforttemperatur beim optimierten Auskühl- und Aufheizvorgang

t_{AUS} Ausschaltzeitpunkt der Heizanlage
t_E Abkühlzeit
t_{BE} Ende der Belegungszeit
t_{EIN} Einschaltzeitpunkt der Heizanlage
t_{BA} Belegungsanfang
$\Delta\vartheta$ Absenktemperatur
T_K Komforttemperatur
T_R Raumtemperatur
T_{RA} Raumtemperatur bei Aufheizbeginn

In Figur 2 ist der Temperaturverlauf für einen Optimierbetrieb dargestellt. Ausgehend vom bekannten Zeitpunkt t_{BE} des Belegungsendes und einer zulässigen Temperaturabsenkung $\Delta\vartheta$ im Zeitpunkt t_{BE}, berechnet ein Optimierungsalgorithmus unter Berücksichtigung der vorhandenen Gebäudeparameter den Ausschaltzeitpunkt t_{AUS} für die Wärmeerzeuger und Umwälzpumpen. Im Nachtabsenkbetrieb wird dem Gebäude erst wieder Energie zugeführt, wenn durch die Auskühlung des Gebäudes die Raumtemperatur einen minimalen gebäudetechnischen Grenzwert T_{MIN} unterschreitet (was in Fig. 2 nicht der Fall ist). Der Energiegewinn, welcher durch die Absenktemperatur $\Delta\vartheta$ am Belegungsende erzielt wird, entspricht der in Figur 2 dargestellten, schraffierten Fläche zwischen den Auskühlkurven mit und ohne Temperaturabsenkung $\Delta\vartheta$.

Das Hauptproblem der Optimierung ist die rechtzeitige Wiedereinschaltung der Energieerzeuger am nächsten Morgen: Die minimale Aufheizzeit t_A muss dazu in Abhängigkeit der jeweiligen Aussen-, Raum- und Wandtemperatur so berechnet werden, dass zu Beginn der Belegung t_{BA} die vorgegebene Komforttemperatur erreicht wird.

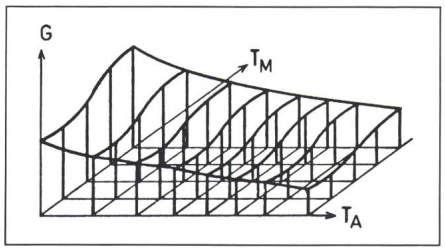
Der Begriff der optimalen Ein- und Ausschaltzeit wird so verstanden, dass
- die Solltemperatur bei Belegungsbeginn mit minimaler Einschaltdauer t_A und
- der zulässige Temperaturabfall $\Delta\vartheta$ bei Belegungsende t_{BE} erreicht wird.

Im folgenden wird ein Algorithmus beschrieben, der die klimatischen Schwankungen und thermischen Eigenschaften des Gebäudes erfasst und daraus die optimalen Ein- und Ausschaltzeiten berechnet.

2. Das Gradientenverfahren

Zur Bestimmung der optimalen Ein- und Ausschaltzeiten (Fig. 2) muss man neben T_K, $\Delta\vartheta$ und T_{MIN} die mittlere Steigung G, den Gradienten der Raumtemperaturkurve kennen. Dieser ist eine Funktion der unveränderlichen Gebäude- und Heizleistungsparameter sowie der variablen Werte Raumtemperatur T_R und Aussentemperatur T_A. Anstelle von T_R wird mit der sogenannten Mischtemperatur T_M gerechnet; welche den Einfluss der Wandtemperatur T_{WI} auf die Komforttemperatur T_K berücksichtigt. T_M ist definiert durch

$$T_M = \frac{\alpha T_R + (100-\alpha)\, T_{WI}}{100} \qquad 0 \leq \alpha \leq 100 \qquad (2)$$



Figur 3 Verteilung der Einschaltgradienten für einen Heizkanal mit 40 Stützwerten

T_A Aussentemperatur in °C
T_M Mischtemperatur in °C
G Stützgradienten in °C/min

wobei T_R die Raumtemperatur, T_{WI} die Innenwandtemperatur und α den Mischfaktor (Standardwert: 20) darstellen.

Die Strategie des Gradientverfahrens ist nun folgende: Im Prozessrechner sind eine bestimmte Anzahl Stützwerte der zweidimensionalen Funktion $G = f(T_A, T_M)$ abgespeichert, aus denen man – wie später noch eingehender gezeigt wird – durch lineare Interpolation den jeweils benötigten Gradienten berechnen kann. Die aus diesem Gradienten berechneten Ein- und Ausschaltzeiten werden durch Messungen während des Betriebes auf ihre «Richtigkeit» überprüft. Bei eventuellen Abweichungen werden die Stützwerte der Funktion G entsprechend korrigiert.

Der gespeicherte Bereich der Aussentemperatur T_A liegt zwischen –20 und +15 °C, derjenige der Mischtemperatur T_M zwischen 10 und 20 °C.

Der Aufheizgradient G_{EIN} ist definiert durch (Fig. 2):

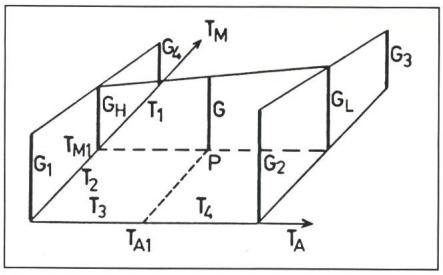
$$G_{EIN} = \frac{t_A}{T_K - T_{RA}} \qquad (3)$$

Daraus ergibt sich die optimale Aufheizzeit t_A zu

$$t_A = G_{EIN}(T_K - T_{RA}) \qquad (4)$$

Auf gleiche Weise erhält man für die Auskühlzeit

$$t_E = G_{AUS}\,\Delta\vartheta \qquad (5)$$



Figur 4 Stützgradienten im (T_A, T_M)-Feld

T_A Aussentemperatur
T_M Innentemperatur
G Ein- oder Ausschaltgradient
G_H, G_L Hilfsgradienten

Der für die Aufheizphase gültige Gradient $G = G_{EIN}$ über dem Betriebspunkt $P(T_{A1}, T_{M1})$ wird, wie Figur 4 zeigt, aus den vier umliegenden Stützgradienten berechnet. Dabei werden zuerst die Hilfsgradienten G_H und G_L und aus diesen der gesuchte Gradient G durch lineare Interpolation wie folgt bestimmt:

$$G_H = G_4 + \frac{G_1 - G_4}{T_1 + T_2} \cdot T_1 \qquad (6)$$

$$G_L = G_3 + \frac{G_2 - G_3}{T_1 + T_2} \cdot T_1 \qquad (7)$$

$$G = G_H + \frac{G_L - G_H}{T_3 + T_4} \cdot T_3 \qquad (8)$$

Mit Hilfe des so gefundenen Wertes $G = G_A$ (Initialisierungswert oder alter Wert) versucht nun die Optimiereinrichtung die Sollwerttemperatur zur gewünschten Zeit zu erreichen. Sobald dies geschehen ist, berechnet der Optimierungsalgorithmus aufgrund der gemessenen Aufheizzeit t_A sowie der zurückgelegten Raumtemperaturdifferenz ΔT den aktuellen Gradienten

$$G_R = t_A / \Delta T \qquad (9)$$

und aus diesem und dem alten Wert G_A den Fehlerfaktor

$$F = (G_R - G_A) / G_A \qquad (10)$$

Für jeden Stützwert G_i wird nun eine in Funktion zum Abstand vom Punkt $\boldsymbol{P}$ gewichtete Stützwertkorrektur durchgeführt. Der Gewichtungsfaktor K_i berechnet sich für $i = 1$ (Fig. 4) aus

$$K_1 = \frac{T_1}{T_1 + T_2} \cdot \frac{T_4}{T_3 + T_4} \qquad (11)$$

Auf gleiche Weise werden die Gewichtungsfaktoren K_2, K_3 und K_4 berechnet. Die Werte K_i sind immer $\leqq 1$. Je näher der Punkt $\boldsymbol{P}(T_A, T_M)$ bei G_i liegt, desto grösser wird K_i. Aus den Fehlerfaktoren F und den Gewichtungsfaktoren K_i ergibt sich die Korrekturformel

$$G_{iN} = FK_i G_{iA} + G_{iA} \qquad (12)$$

wobei G_{iN} der i-te neue und G_{iA} der i-te alte Stützwert ist.

Die Fläche, gebildet durch die beiden Geraden T_A und T_M wird im vorliegenden Algorithmus, wie in Figur 3 dargestellt, mit 40 Stützgradienten überzogen. Die Abstände der Stützgradienten untereinander können äquidistant oder gewichtet verteilt und bei der Parameterkonfiguration vor dem Programmstart eingegeben werden.

Bei der *Initialisierung* dieses Optimierungsalgorithmus werden aufgrund von Erfahrungswerten für die Stützwerte der Ein- und Ausschaltgradienten z. B. nachstehende Startwerte eingestellt:

Einschaltgradient: $G_{EIN} = 60$ min/°C

Ausschaltgradient: $G_{AUS} = 70$ min/°C

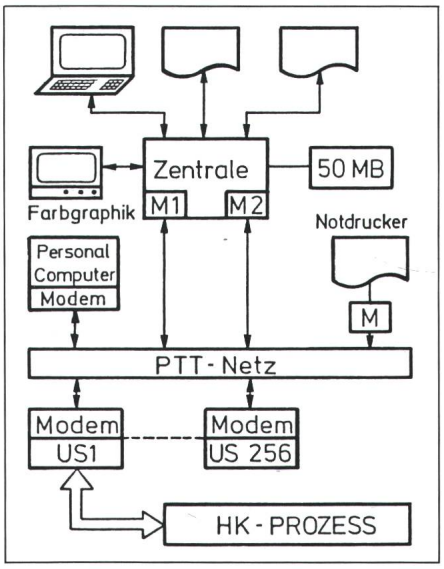
Der nach dem ersten Aufheiz- beziehungsweise Abkühlvorgang gemessene Gradient G_R wird allen 40 Stützgradienten zugeführt. Damit wird nach dem ersten Tag der Inbetriebsetzung des Gerätes eine gute Grundeinstellung der Stützwerte erreicht.

Wie die Simulationen auf einem Digitalrechner und auch die Anlagenerfahrungen gezeigt haben, erreicht der vorgeschlagene selbstadaptive Algorithmus die exakten Werte für die Stützgradienten nach wenigen Lernschritten. Ein Schritt entspricht dabei einem Aufheiz- oder Abkühlvorgang für einen Parametersatz (T_A, T_M).

3. Anlagenerfahrungen

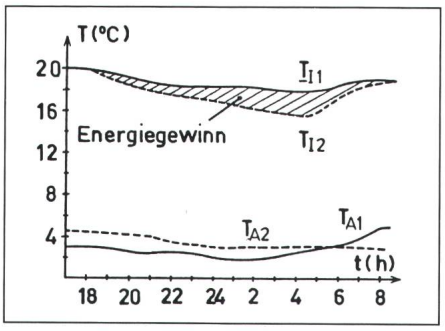
Das vorgestellte Gradientenverfahren wurde auf den Unterstationen des Gebäudeleitsystems SICOS 2000 (*S*ulzer *I*ndustrial *Co*ntrol *S*ystem) implementiert. Diese Unterstationen, realisiert auf der Basis von Intel-Mikroprozessoren mit einem adressierbaren Speicherbereich von 120 kbyte, übernehmen im System SICOS 2000 die autarke Führung von Gebäudeeinheiten mit bis zu 300 Datenpunkten pro Unterstation. In Figur 5 ist die Grundkonfiguration dieses Leitsystems dargestellt. Die Unterstationen kommunizieren dabei über automatische Wähleinrichtungen mit der übergeordneten Leitwarte. Neben den üblichen Mess-, Steuer- und Regelaufgaben übernimmt das vorgestellte Gradientenverfahren die Optimierung der Ein- und Ausschaltzeiten der Heizanlagen. Integriert in das Softwarekonzept der Unterstation ist die Anzahl der Optimierungskanäle (Heizkreise) auf 40 begrenzt. Erste Anlagenerfahrungen mit dem Einsatz des vorgestellten Gradientenverfahrens liegen aus einem grösseren Gebäudeleittechnikprojekt der Stadt Strassburg in Frankreich vor, bei welchem bis heute insgesamt 30 Verwaltungsgebäude und Schulen mit Unterstationen des Leitsystems SICOS 2000 ausgerüstet und an eine Betriebsleitwarte zur zentralen Führung und Überwachung angeschlossen wurden.

Die Auswertung und die Wirtschaftlichkeitsrechnung für den Heizbetrieb eines Schulhauses mit ursprünglich klassischer Nachtabsenkung und nachträglich realisiertem adaptivem Optimierungsbetrieb ist in Figur 6 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass mit dem adaptiven Auskühlbetrieb (Kurve T_{I2}) ein beachtlicher Energiegewinn



Figur 5 Konfiguration des Leitsystems SICOS 2000

HK Heizung-Klima-Prozess
M Automatische Wähleinrichtungen (Modem)
US Unterstation



Figur 6 Vergleich der klassischen Nachtabsenkung der Vorlauftemperatur mit dem optimierten Ein- und Ausschaltbetrieb. Zeitverlauf der Gebäudeinnentemperatur bei ähnlichen Aussentemperaturbedingungen

T_{I1} Innentemperatur bei Nachtabsenkung der Vorlauftemperatur
T_{A1} Verlauf der Aussentemperatur während der Messung von T_{I1}
T_{I2} Innentemperatur bei der optimierten Ein- und Ausschaltung der Heizanlage
T_{A2} Verlauf der Aussentemperatur während der Messung von T_{I2}

Klassische Nachtabsenkung

Beginn der Nachtabsenkung:	17.00 Uhr
Ende der Nachtabsenkung:	07.00 Uhr
Mittlere Innentemperatur:	$T_{IM1} = 19$ °C
Mittlere Aussentemperatur:	$T_{AM1} = 3$ °C

Optimierter Ein-/Ausschaltbetrieb

Beginn des Optimierbetriebes:	17.00 Uhr
Ende des Optimierbetriebes:	07.00 Uhr
Mittlere Innentemperatur:	$T_{IM2} = 17{,}5$ °C
Mittlere Aussentemperatur:	$T_{AM2} = 3{,}5$ °C

erzielt wurde. Nach Berechnung der linearen Mittelwerte der Aussen- und Innentemperaturen T_{IM} und T_{AM} über den Zeitbereich der Nachtabsenkung bzw. des Optimierbetriebes kann mit Hilfe der Beziehung für die Wärmeverluste pro Zeiteinheit

$$Q_{H1} = F \cdot K (T_{IM1} - T_{AM1})$$
$$Q_{H2} = F \cdot K (T_{IM2} - T_{AM2}) \qquad (13)$$

direkt die prozentuale Energieeinsparung der optimierten Nachtauskühlung im Vergleich zur einfachen Nachtabsenkung ermittelt werden. Im vorliegenden Beispiel wurden die in den Legenden der Figur 6 angegebenen Werte gemessen. Aus dem Verhältnis des Wärmeverlustes Q_{H2}/Q_{H1} resultiert direkt die Energieeinsparung der adaptiven Optimierung im Vergleich zur Nachtabsenkung:

$$\frac{Q_{H2}}{Q_{H1}} = \frac{T_{IM2} - T_{AM2}}{T_{IM1} - T_{AM1}} = 0{,}88 \qquad (14)$$

Diese Einsparung von 12% ist nur näherungsweise richtig, da die beiden Messungen bei leicht unterschiedlichen Aussentemperaturen durchgeführt wurden, liegt aber wegen $T_{AM2} > T_{AM1}$ auf der für die Optimierung ungünstigen Seite. Zudem sind im Optimierbetrieb während der Nachtauskühlung die Umwälzpumpen abgestellt. Die Stromeinsparung und die Unterdrückung der Abstrahlverluste des Heisswassers bringen zusätzliche Einsparungen von etwa 3%, so dass sich im vorliegenden Beispiel insgesamt mindestens 15% Energieeinsparungen ergeben.

Im allgemeinen resultieren aus dem Einsatz des vorgestellten Gradientenverfahrens zur optimalen Berechnung der Ein- und Ausschaltzeiten von Heizungs- und Kühlanlagen Energieeinsparungen zwischen 10 und 40%. Der höhere Wert bezieht sich auf ungeregelte Anlagen, während Werte von 10 bis 20% bei Anlagen mit bereits vorhandenen Regeleinrichtungen erreichbar sind.

Die entgegengesetzte Problemstellung bei intermittierend besetzten Gebäuden in Ländern mit heissem Klima, welche nach kürzester Einschaltzeit der Kühlaggregate auf Komforttemperatur bei Belegungsbeginn gebracht werden müssen, lässt sich mit dem vorgestellten Optimierungsalgorithmus analog zur Heizungsoptimierung lösen; es müssen lediglich bei der Inbetriebsetzung des Gebäudes die für die Kühlung des Gebäudes massgebenden Parameter eingegeben werden.

Literatur

[1] *J. Leimgruber, R. Hribar* und *R. Bieri:* Neue Wege in der Gebäudeleittechnik. Das Leitsystem SICOS 2000. Technische Rundschau Sulzer 66(1984)4, S. 28...30.

[2] *P. Foster, J. Leimgruber* und *R. Böni:* Mikroprozessoren optimieren Schaltzeiten von Heizungs- und Klimaanlagen. Technische Rundschau Sulzer 65(1983)4, S. 25...27.