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: 73 (1982)

Heft: 1

Artikel: Einsatz von Mikroprozessoren zur Optimierung der Ein- und

Ausschaltzeiten von Heizungs- und Klimaanlagen

Autor: Foster, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904911

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: 03.12.2025

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

Einsatz von Mikroprozessoren zur Optimierung der Ein- und Ausschaltzeiten von Heizungs- und Klimaanlagen

P. Foster

621.3.064:681.325-181.48:697

Dank der Mikroprozessortechnik ist es möglich, Ein- und Ausschaltzeiten von Heiz- und Klimaanlagen in Funktion von klimatischen Schwankungen, bauphysikalischen Gebäudeeigenschaften sowie der jeweiligen Nutzungsart energieoptimiert zu berechnen.

Les microprocesseurs permettent de déterminer, du point de vue de l'énergie, les temps optimaux d'enclenchement et de déclenchement d'installations de chauffage et de climatisation, en fonction des variations climatiques, des propriétés physiques de la construction des bâtiments, ainsi que du mode d'utilisation.

1. Problemstellung

Im Zeichen der Energieknappheit ist es heute üblich, die Beheizung eines Gebäudes an dessen Nutzungsart anzupassen. Speziell für die Mehrheit der Gebäude, die intermittierend belegt sind (Schulhäuser, Verwaltungsgebäude, Kaufhäuser...), bedeutet dies hohe Innentemperaturen während der Belegungszeit und tiefe Innentemperaturen ausserhalb der Belegungszeit. Allenfalls ist bei Belegungsende ein gewisser Temperaturabfall zulässig. Der Temperaturverlauf in den Räumen derartiger Gebäude ist in Figur 1 dargestellt.

Es stellt sich nun die Frage, wie der Übergang zwischen den beiden Temperaturniveaus zu steuern ist, damit einerseits die Bedürfnisse des Gebäudebenützers, andererseits aber auch energietechnische Überlegungen berücksichtigt werden.

In der geltenden Praxis löst man das Problem mehrheitlich, indem Heizungs- oder Klimaanlagen mit einer Schaltuhr zu einem fixen Zeitpunkt ein- bzw. ausgeschaltet werden. Dabei wählt man für den Einschaltzeitpunkt meistens den Fall mit den ungünstigsten Randbedingungen (tiefe Aussentemperatur, keine Sonne) und für den Ausschaltzeitpunkt das Belegungsende. Dieses Vorgehen berücksichtigt die intermittierende Nutzungsart des Gebäudes, nicht aber sein wechselndes thermisches Verhalten in Funktion der Belegungsdichte, der klimatischen Schwankungen sowie der bauphysikalischen Eigenschaften. Die erzielbaren Resultate sind unbefriedigend, da sich die Bedürfnisse des Gebäudebenützers (annehmbare Temperatur während der Belegungszeit) und des Gebäudeinhabers (niedrige Heizkosten) mit dieser statischen Methode kaum auf einen Nenner bringen lassen.

Abhilfe für diesen unbefriedigenden Umstand bringt eine «intelligente» Schaltuhr, die in der Lage ist, klimatische

Schwankungen sowie die thermische Eigendynamik von Gebäuden zu erfassen und aus diesen Informationen optimale Ein- und Ausschaltzeiten abzuleiten. Der Begriff «optimal» wird in diesem Zusammenhang so verstanden (Fig. 1), dass

- die Solltemperatur bei Belegungsbeginn mit minimaler Einschaltdauer t_A und
- der zulässige Temperaturabfall bei Belegungsende mit maximaler Ausschaltdauer $t_{\rm E}$

erreicht wird.

Das in der Folge beschriebene Gerät ist dank eingebautem Mikroprozessor und entsprechenden Programmen in der Lage, nach einer gewissen Lernphase ein Gebäude im beschriebenen Sinne optimal zu beheizen.

2. Aufheiz- und Absenkvorgang

Für das bessere Verständnis des im Kapitel 4 vorzustellenden Optimieralgorithmus sollen zunächst der zeitliche Verlauf und der physikalische Hintergrund der Temperaturübergänge genauer dargestellt werden. Wegen der Analogie zwischen Aufheiz- und Absenkvorgang kann man sich auf ersteren beschränken.

Figur 2 zeigt den Verlauf eines Aufheizvorganges. Dieser Vorgang beginnt mit dem Einschalten der Heiz- oder Klimaanlage zum berechneten Zeitpunkt $t_{\rm HA}$ und endet mit dem Erreichen des Temperatursollwertes im Zeitpunkt $t_{\rm HE}$. Die gestrichelte Kurve zeigt den qualitativen Verlauf der von der Heizanlage abgegebenen Leistung. Normalerweise dauert der quasilineare Bereich (3) wesentlich länger als der nichtlineare Bereich (2) und die noch kürzere Totzeit (1).

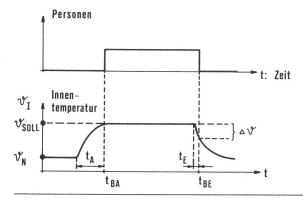


Fig. 1 Temperaturverlauf eines intermittierend belegten Gebäudes

t_A Aufheizzeit

t_E Abkühlzeit

t_{BA} Beginn Belegungszeit

t_{BE} Ende Belegungszeit

 g_{SOLL} Temperatursollwert während der Belegungszeit

9_N Absenktemperatur ausserhalb der Belegungszeit

Δ9 Zulässige Abkühlung am Ende der Belegungsdauer

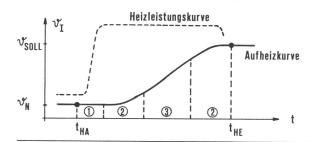


Fig. 2 Zeitlicher Verlauf eines Aufheizvorgangs (nicht maßstabgetreu)

tha Beginn des Aufheizvorganges

 $t_{\rm HE}$ Ende des Aufheizvorganges

- (1) Totzeit
- (2) Nichtlineare Bereiche
- (3) Quasilinearer Bereich

Wie der Aufheizkurve zu entnehmen ist, verhalten sich Gebäude und Heizanlage als Gesamtes wie ein Verzögerungsglied höherer Ordnung mit Totzeit. In der Totzeit kommt dabei die Trägheit der Heizanlage, im Verzögerungsglied die Gebäudedynamik zum Ausdruck. Störgrössen, die den Verlauf der Aufheizkurve und damit den optimalen Einschaltpunkt wesentlich beeinflussen, sind die aktuelle Aussentemperatur ϑ_A sowie der momentane Wärmeinhalt (Raumluft- und Wandtemperatur) des Gebäudes.

Anlagenerfahrungen zeigen, dass das Hochfahren der Heizleistung im Normalfall ein wesentlich schnellerer Vorgang ist als das Aufheizen des Gebäudes. Mit anderen Worten wirkt (bis auf die quasikonstante Totzeit) ein Heizlastwechsel auf das Gebäude regelungstechnisch wie ein Schritt.

Zusammenfassend gilt also für die Dauer t_A des Aufheizvorganges bei gegebener Gebäudecharakteristik

$$t_{\rm A} = t_{\rm HE} - t_{\rm HA} = f$$
 (Aussentemperatur, Wärmeinhalt, Heizleistung)

Dabei ist die Funktion f nicht explizit bekannt. Zudem sind sowohl Aussentemperatur wie auch Wärmeinhalt nicht qualifizierbare Funktionen der Zeit. Einzig der Einfluss der Heizleistung bleibt zeitlich konstant und kann qualitativ (Schrittantwort) erfasst werden.

3. Modellbildung

Wie erwähnt, kann die Aufheizkurve als Antwort eines Verzögerungsgliedes höherer Ordnung mit Totzeit auf einen Eingangsschritt interpretiert werden. Diese Vorstellung genügt, wenn man das Gebäudeverhalten in einem bestimmten Betriebspunkt (konstante Aussentemperatur und konstanter Wärmeinhalt) betrachtet. Versucht man jedoch den Einfluss des variablen Wärmeinhaltes auf das Temperaturverhalten des Gebäudes zu verstehen, muss diese Modellvorstellung erweitert werden

Folgende Überlegungen führen weiter: Der stationäre Endwert der Aufheizkurve wird sowohl durch die Höhe des angelegten Schrittes (Heizleistung) als auch von dessen Dauer bestimmt. Dies lässt den Schluss zu, dass das Gebäude regeltechnisch integralen Charakter aufweist. Konstante Aussentemperatur und Schritthöhe vorausgesetzt, kommt in der unterschiedlichen Aufheizdauer für das Erreichen des Temperatursollwertes offenbar der Einfluss des variablen Wärmeinhaltes zum Ausdruck.

Berücksichtigt man im weiteren die im Heizungs- und Klimasektor üblichen Toleranzen (Temperaturfehler $< 0.5\,^{\circ}$ C, Zeitfehler im Minutenbereich), so lässt sich die Aufheizkurve linearisieren und als Schrittantwort eines Integrators interpretieren, ohne dass die in Kapitel 1 postulierten Kriterien verletzt werden (Fig. 3). Während der Aufheizphase gilt dann für den Temperaturanstieg bei konstanter Aussentemperatur ϑ_{Δ}

$$\Delta \vartheta \left(t
ight) = P \cdot \int\limits_{{
m{t_{HA}}}}^{
m{t}} {
m{d}}t; \quad t_{
m{HA}} \le t \le t_{
m{HE}}$$

$$\Delta \vartheta (t_{\text{HE}}) = P \cdot (t_{\text{HA}} - t_{\text{HE}}) = P \cdot t_{\text{A}}$$

Die Proportionalitätskonstante P ist durch die Heizleistung und die Gebäudecharakteristik gegeben. Sie lässt sich nur empirisch bestimmen und ist zudem abhängig von der Aussentemperatur. Diese Temperaturabhängigkeit kann jedoch weit-

gehend unterdrückt werden, indem man den interessierenden Aussentemperaturbereich in Intervalle unterteilt und jedem Abschnitt eine eigene *P*-Konstante zuordnet.

4. Optimieralgorithmus

Die Aufgabe des Optimieralgorithmus besteht nun darin, den optimalen Schaltpunkt einer Heiz- oder Klimaanlage zu einem bestimmten Betriebspunkt zu berechnen. Für den Fall eines Aufheizvorganges soll also erfüllt sein:

$$t_{\mathrm{HA}} + t_{\mathrm{A}} = t_{\mathrm{BA}} \rightarrow t_{\mathrm{HA}} = t_{\mathrm{BA}} - t_{\mathrm{A}}$$

t_A Aufheizdauer

t_{HA} Einschaltzeitpunkt

t_{BA} Belegungsbeginn

Sind $t_{\rm BA}$ und $t_{\rm A}$ bekannt, so ist die Berechnung des Einschaltzeitpunktes $t_{\rm HA}$ einfach. Der Belegungsbeginn $t_{\rm BA}$ ist ein Betriebsparameter und muss vom Geräteanwender definiert werden (spezielles Eingabeprogramm).

Die Aufheizdauer t_A kann aus der Integratorkennlinie wie folgt berechnet werden:

$$\Delta \vartheta (t_{\mathrm{BA}}) = P \cdot t_{\mathrm{A}} \rightarrow t_{\mathrm{A}} = [\vartheta_{\mathrm{SOLL}} - \vartheta_{\mathrm{IST}} (t_{\mathrm{HA}})]/P$$

Der Temperatursollwert $\vartheta_{\rm SOLL}$ ist ebenfalls ein Betriebsparameter, der vom Geräteanwender definiert werden muss (spezielles Eingabeprogramm). Der Temperaturistwert (Mittelwert aus Luft- und Wandtemperatur) wird messtechnisch erfasst.

Die eigentliche Schwierigkeit besteht nun darin, die Proportionalitätskonstante P zu bestimmen. Wie bereits angetönt, ist dies nur auf empirischem Wege mit Hilfe eines Schätzverfahrens möglich (Fig. 4). Dieses Schätzverfahren berechnet, ausgehend von einem Initialwert, durch schrittweises Annähern und gezieltes Gewichten des vorhergehenden und des gegenwärtigen Aufheizvorganges den korrekten Wert der Proportionalitätskonstante P. Wie Simulationen auf einem Prozessrechner und Anlagenerfahrungen zeigten, findet der implemen-

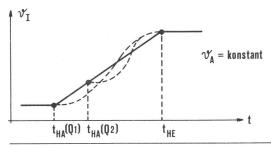


Fig. 3 Approximation der Aufheizkurven für ein bestimmtes Temperaturintervall durch eine Integratorkennlinie Q₁, Q₂ Verschiedene Wärmeinhalte

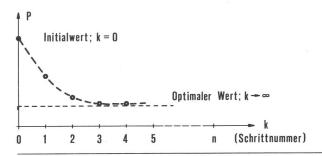


Fig. 4 Schätzverfahren für die Proportionalitätskonstante P

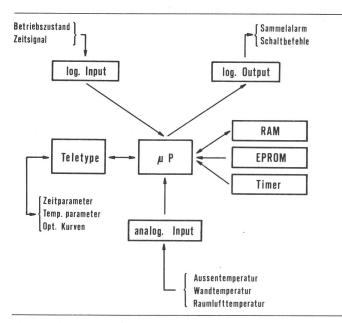


Fig. 5 Zusammenspiel der Funktionseinheiten

μΡ EPROM RAM Mikroprozessor: Rechnen und Steuern Speicher für das Programm (nur lesbar) Speicher für Rechen- und Steuergrössen

Timer Teletype Logischer Input Analoger Input

Logischer Output

(schreib- und lesbar)
Dient dem internen Zeitsystem

Eingabe der numerischen Betriebsparameter Aufbereiten der logischen Anlagesignale Aufbereiten der analogen Anlagesignale Ausgaben der logischen Zustandsgrössen und Steuerbefehle

t eff.

1 Lernschritt

1 Einschaltvorgang

60 min.

Fig. 6 Optimierung des Aufheizvorganges im Aussentemperatur-Intervall (-1, 1 °C)

Lernschrittnummer k	0	1	2	3	4	5
Aufheizzeit gerechnet $t_A(k)$	283	122	75	69	66	67
Aufheizzeit gemessen teff	70	66	67	65	68	
Fehler Δt	213	56	8	4	-2	

Werte in min

tierte selbstadaptative Algorithmus den richtigen Wert nach zwei bis drei Schritten. Ein Schritt entspricht dabei einem Aufheiz- oder Absenkvorgang.

5. Gerätetechnischer Aufbau

Im folgenden soll nicht der detaillierte gerätetechnische Aufbau, sondern das Zusammenspiel der verschiedenen Funktionseinheiten gezeigt werden.

Um die Kapazität des Mikroprozessors einigermassen auszuschöpfen, wurden neben dem eigentlichen Optimierungsvorgang weitere Aufgaben implementiert. So werden z.B. die minimal zulässigen Werte für die Raumluft- und Wandtemperatur überwacht (Zweipunktregler), um das Gebäude ausserhalb der Belegungszeit vor Kondensation und Frost zu schützen. Zwei wählbare Betriebsarten ermöglichen, das Gebäude auf dem Temperatursollwert $\theta_{\rm SOLL}$ oder der Absenktemperatur $\theta_{\rm N}$ zu fahren.

Das ganze Gerät ist so ausgelegt, dass mehrere Heiz- und Klimaanlagen gleichzeitig individuell bedient werden können. Dies bedingt einen modularen Hardwareauf bau und eine Software, die in der Lage ist, mehrere parallel ablaufende Prozesse unter Echtzeitbedingungen zu führen.

Figur 5 zeigt das prinzipielle Zusammenspiel der verschiedenen Funktionseinheiten. Die Pfeile geben dabei die Richtung des Datentransportes an. Die Arbeitsweise ist in der Legende angedeutet.

6. Anlageerfahrungen

Das vorliegende selbstadaptive Optimiergerät wurde auf die Heizperiode 80/81 in einem Einkaufszentrum in Winterthur eingebaut und ist seither dort in Betrieb. Die Betriebserfahrungen haben das einwandfreie Arbeiten sämtlicher Funktionen bewiesen. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass der implementierte Optimieralgorithmus sauber und effizient arbeitet. Der optimale Schaltzeitpunkt ist nach 2 bis 3 Schritten gefunden. Zudem erfordert das Gerät vom Anwender ausser dem Definieren der Betriebsparameter keine weiteren Aufwendungen.

Figur 6 zeigt den schrittweisen Optimierungsvorgang. Beim ersten Einschalten ist die berechnete Aufheizzeit t_A wesentlich grösser als die effektive Einschaltzeit $t_{\rm eff}$. Die Heizung wird also viel zu früh eingeschaltet. Schon beim dritten Einschaltvorgang ist dann aber $t_A \approx t_{\rm eff}$ praktisch erreicht. Bei Änderung der Aussentemperatur wird P automatisch angepasst.

Adresse des Autors

P. Foster, dipl. Ing. ETH, Gebrüder Sulzer AG, Abt. Industrielle Elektronik, Hegifeldstrasse 30, 8401 Winterthur.