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

Autor(en): **Foster, P.**

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): **73 (1982)**

Heft 1

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904911

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

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_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_{HA} und endet mit dem Erreichen des Temperatursollwertes im Zeitpunkt t_{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).

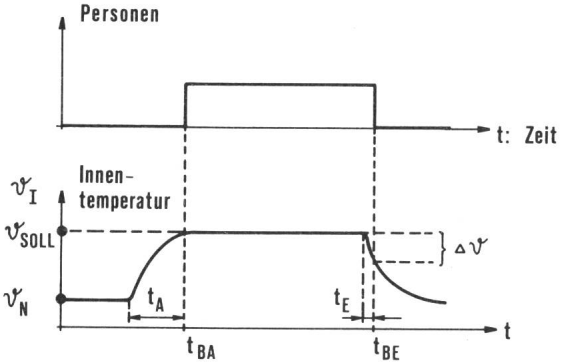

Fig. 1 Temperaturverlauf eines intermittierend belegten Gebäudes

t_A Aufheizzeit
t_E Abkühlzeit
t_{BA} Beginn Belegungszeit
t_{BE} Ende Belegungszeit
ϑ_{SOLL} Temperatursollwert während der Belegungszeit
ϑ_N Absenktemperatur ausserhalb der Belegungszeit
$\Delta\vartheta$ Zulässige Abkühlung am Ende der Belegungsdauer

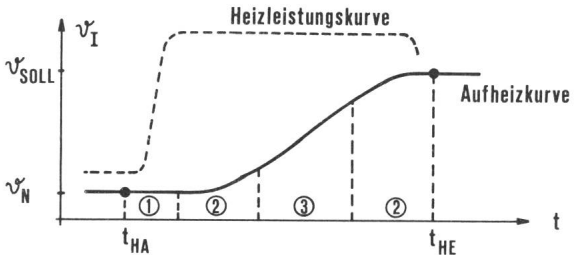

Fig. 2 Zeitlicher Verlauf eines Aufheizvorgangs (nicht maßstabgetreu)

t_{HA} Beginn des Aufheizvorganges
t_{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

$t_A = t_{HE} - t_{HA} = f$ (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_A

$$\Delta\vartheta(t) = P \cdot \int_{t_{HA}}^{t} dt; \quad t_{HA} \leqq t \leqq t_{HE}$$

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

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 weitgehend 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:

$$t_{HA} + t_A = t_{BA} \rightarrow \underline{t_{HA} = t_{BA} - t_A}$$

t_A Aufheizdauer
t_{HA} Einschaltzeitpunkt
t_{BA} Belegungsbeginn

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

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

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

Der Temperatursollwert ϑ_{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-

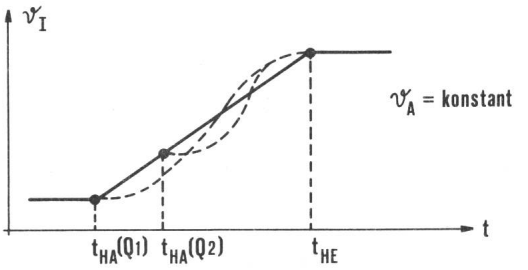

Fig. 3 Approximation der Aufheizkurven für ein bestimmtes Temperaturintervall durch eine Integratorkennlinie
Q_1, Q_2 Verschiedene Wärmeinhalte

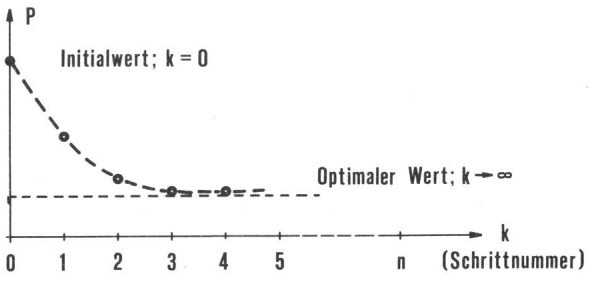

Fig. 4 Schätzverfahren für die Proportionalitätskonstante P

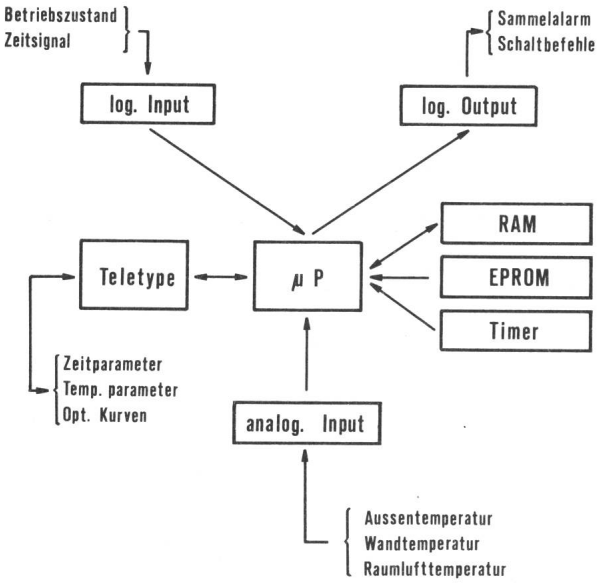

Fig. 5 Zusammenspiel der Funktionseinheiten

μP	Mikroprozessor: Rechnen und Steuern
EPROM	Speicher für das Programm (nur lesbar)
RAM	Speicher für Rechen- und Steuergrössen (schreib- und lesbar)
Timer	Dient dem internen Zeitsystem
Teletype	Eingabe der numerischen Betriebsparameter
Logischer Input	Aufbereiten der logischen Anlagesignale
Analoger Input	Aufbereiten der analogen Anlagesignale
Logischer Output	Ausgaben der logischen Zustandsgrössen und Steuerbefehle

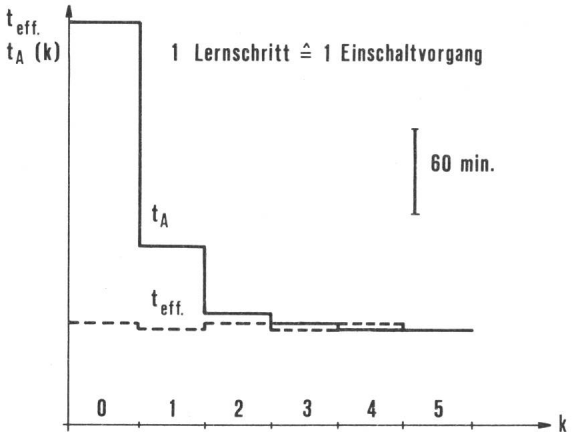

Fig. 6 Optimierung des Aufheizvorganges im Aussentemperatur-Intervall (−1, 1 °C)

Lernschrittnummer k	0	1	2	3	4	5
Aufheizzeit gerechnet t_A (k)	283	122	75	69	66	67
Aufheizzeit gemessen t_{eff}	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 ϑ_{SOLL} oder der Absenktemperatur ϑ_N zu fahren.

Das ganze Gerät ist so ausgelegt, dass mehrere Heiz- und Klimaanlagen gleichzeitig individuell bedient werden können. Dies bedingt einen modularen Hardwareaufbau 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_{eff}. Die Heizung wird also viel zu früh eingeschaltet. Schon beim dritten Einschaltvorgang ist dann aber $t_A \approx t_{eff}$ 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.