

REGELUNG VON GEBÄUDEHEIZSYSTEMEN MIT FREI PROGRAMMIERBAREN STROMKREISEN

J. KANCSÁR

Department of Electrotechnics, Technical University, H-1521 Budapest

Eingegangen am 12 September 1984

Vorgelegt von Prof. Dr. I. Nagy

Summary

The study intends to bring up to date analogous heating control systems. On the basis on the literature the first chapter deals with the changes in building structure. The second one deals with analogous heating control systems used in wide-range. The following part describes a new heating control system based on digital computer regulation. In conclusion the paper indicates some further development possibilities.

Einleitung

In diesem Beitrag wird die kurze Zusammenfassung der theoretischen Ausarbeitung eines neues Heizreglersystems angegeben. Im System werden die modernsten Mittel der digitalen Regelungstechnik verwendet. Der Beitrag gliedert sich in 4 Kapitel.

Kapitel 1 beinhaltet auf Grund der zur Verfügung stehenden Literaturquellen die Änderungen des Wärmeumlaufes von Räumen, die infolge der Modernisierung von Baumaterialien und der angewendeten Technologien aufgetreten sind.

Im Kapitel 2 wird die Funktionsweise eines in Ungarn zur Zeit verbreiteten Heizreglertyps zusammen mit seinen Unzulänglichkeiten behandelt.

Kapitel 3 behandelt die theoretische Funktionsweise des neuen Reglersystems, und ausgehend von dem vereinfachten wärmetechnischen Modell des geregelten Raumes bzw. der geregelten Raumgruppe erfolgt die Angabe der Funktionsalgorithmen.

Kapitel 4 zieht Konklusionen über die Vorteile und die Erweiterungsmöglichkeiten des Reglersystems. Das Kapitel wird mit der Darstellung der jetzigen Arbeitsphase abgeschlossen.

Wärmeenergieumlauf in einem Raum

Der Wärmeenergieumlauf in einem Raum setzt sich aus der Gesamtheit von zeitlich und räumlich sich ständig verändernden Wärmestromkomponenten zusammen, weshalb die Behandlung des Vorganges eine Vereinfachung der

tatsächlichen Wärmestromvorgänge erfordert. Einer solchen Vereinfachung entsprechen die Annahmen, wonach das Mauerwerk aus einer einzigen homogenen oder aus homogenen Schichten besteht, die Strömungsrichtung des Wärmestromes im Mauerwerk senkrecht zur Oberfläche liegt, die Fenster- und Türkonstruktionen getrennt im Mauerwerk untersucht werden können, im untersuchten Raum die Lufttemperatur überall den gleichen Wert hat; usw.

Mit der Vereinfachung der tatsächlichen Wärmestromvorgänge ergeben sich die folgenden Hauptkomponenten des Energieumlaufes von Räumen (aber nicht in der Reihenfolge ihrer Bedeutung)

a) Der durch die Umfassungskonstruktionen, Türen und Fenster strömende Transmissionswärmestrom (äußere Transmission);

b) Der durch die inneren Rauntrennkonstruktionen, Türen und Fenster strömende Transmissionswärmestrom (innere Transmission);

c) Der aus Sonnenstrahlung entstehende Wärmestrom, der durch die (strahlungsdurchlässigen) verglasten Konstruktionen strömt (Wärmegewinn aus Strahlung);

d) Konvektive Wärmeströme, die infolge des Filtrationsluftumlaufes (infolge des unvollkommenen Schließens von Türen und Fenstern) entstehen (Filtrationswärmebedarf);

e) Wärmeströme aus „spontanen“ Wärmequellen: sie entstehen aus den mit der Bestimmung des Raumes zusammenhängenden Tätigkeiten und aus dem Betrieb von keinen Heizzwecken dienenden Einrichtungen (innere Wärmequellen);

f) Die Änderung der inneren gespeicherten Wärmemenge nach der Zeit (die Änderung der im Raum gespeicherten Wärmeenergie);

g) Wärmeströme aus Heizungs- und/oder lufttechnischen Systemen.

Das Verhältnis der einzelnen Wärmestromkomponenten ist unter anderem eine Funktion der jeweiligen bautechnischen Lösungen, der verwendeten Materialien und der Technologie. Im Bauwesen unserer Zeit haben sich im Vergleich zu dem als konventionell bezeichnbaren Bauwesen der 1960-er Jahre grundlegende Veränderungen vollzogen. Damit hat sich aber auch der Anteil der einzelnen Wärmestromkomponenten geändert. Die Literatur behandelt diese Änderungen ausführlich. In diesem Kapitel werden diese Änderungen nur im Hinblick auf ihre regelungstechnischen Folgerungen behandelt.

1.a. Da im Bauwesen unserer Zeit sich der thermische Widerstand der verwendeten Umfassungskonstruktionen bedeutend erhöht hat, hat sich die Bedeutung der äußeren Transmission in dem resultierenden Wärmeenergieumlauf nicht nur relativ, sondern auch im absoluten Sinne verringert. Im konventionellen Bauwesen war dies der entscheidende Anteil des resultierenden Wärmeenergieumlaufes. Da die äußere Transmission eine lineare Funktion der Differenz zwischen der Außen- und der Innentemperatur ist, hat

sich auch die resultierende Wärmestromfunktion nahe linear mit der Außentemperatur geändert. Deshalb mußten die Heizregler diese annähernd lineare Funktion berücksichtigen. Die bautechnischen Veränderungen haben aber die resultierende Wärmestrom-Temperaturdifferenzfunktion in eine nichtlineare Funktion modifiziert. Die Folge davon ist, daß die Heizregler den an sie gestellten Anforderungen nicht mehr entsprechen.

1.b. Der Anteil der inneren Transmission hat sich im resultierenden Wärmestrom praktisch nicht geändert.

1.c. Da im Bauwesen unserer Zeit die verglaste und strahlungsdurchlässige Oberfläche der Konstruktionen größer ist und die äußere Transmission infolge der schon genannten Gründe abnimmt, vergrößert sich der Anteil des sich aus der Sonnenstrahlung ergebenden Strahlungs-Wärmegewinns in dem resultierenden Wärmestrom bedeutend. Die Größe des Strahlungswärmegewinns kann nach der bekannten Formel

$$q_s = N \cdot A_{\bar{u}} \cdot I_{\text{SRG}}$$

berechnet werden, wobei

q_s — den Strahlungswärmegewinn,

N — den Sonnenfaktor, der von dem Bestrahlungswinkel, der beschatteten Oberfläche und dem Material der strahlungsdurchlässigen Konstruktion abhängt;

$A_{\bar{u}}$ — die Oberfläche der strahlungsdurchlässigen Konstruktion,

I_{SRG} — die Intensität der Sonnenstrahlung, die auf die an der untersuchten Oberfläche untergebrachte Etalonkonstruktion einfällt,

bedeuten.

c/1. Die Berücksichtigung des Wärmegewinnes aus Strahlung während der Heizperiode wird nach [2] auch durch die nachstehenden Gründe gerechtfertigt: Das Verhältnis von dem auf eine vollständige Heizperiode bezogenen Mittelwert des von der Sonnenstrahlung herrührenden Wärmestromes zu dem ähnlich gebildeten Mittelwert, bezogen aber auf die Bedingungen im Sommer, ergibt sich folgendermaßen:

- bei einer Orientierung nach Norden hat die Verhältniszahl einen niedrigen Wert, aber der Absolutwert ist auch nicht bedeutend;
- bei einer Orientierung nach Osten und Westen ist das Verhältnis ca. 1 : 3;
- bei einer Orientierung nach Süden ist das Verhältnis ca. 1 : 1.

c/2. Der Einfluß des Wärmegewinnes infolge der Strahlung ändert sich mit der Außentemperatur, bei höherer Außentemperatur kann er eine dominierende Rolle spielen.

1.d. Die Bestimmung des Wertes des Filtrationswärmebedarfes bildet die komplizierteste Aufgabe, da der Filtrationswärmebedarf nicht die Funktion einer Konstruktion ist. Er ist abhängig von den Maßen des Gebäudes, von der Anzahl der Etagen, von der Gestaltung der Türen und Fenstern sowie der

Lüftungskanäle, von den Innen- und Außentemperaturen und von der Windrichtung bzw. Windgeschwindigkeit. Sein Wert kann auch bei konstanten äußeren Bedingungen in den einzelnen Räumen unterschiedlich sein.

Im Bauwesen unserer Zeit hat der Anteil des Filtrationswärmebedarfes im resultierenden Wärmestrom in außergewöhnlichem Maße zugenommen. Seinem relativen Gewicht nach ist er im überwiegendem Teil der Heizperiode nach der Außenemission die bedeutendste Wärmestromkomponente.

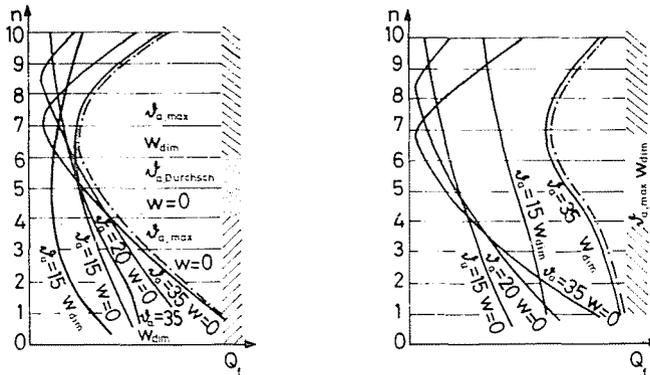


Abb. 1. Der Verlauf des Filtrationswärmebedarfes in Abhängigkeit von der Außentemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Geschoßanzahl; W_{mer} — Bemessungswindgeschwindigkeit, n — Geschoßanzahl.

a) Mittelgroßes Wohnhaus, Zimmer Q_f , zusammenfassende Abbildung, windgeschützte Seite (windempfindliches Gebäude), mittelgroßes Wohnhaus, Zimmer Q_f , zusammenfassende Abbildung, Windseite (windempfindliches Gebäude); b) dasselbe, Windseite, c) dasselbe, windunempfindliches Gebäude, Windseite, d) dasselbe, windgeschützte Seite, e) dasselbe, Sackraum, Windseite, f) dasselbe, windgeschützte Seite

Der nach Geschoßen und Räumen sehr abweichende Verlauf des Filtrationswärmebedarfes wird mit Hilfe einer zweiparametrischen Kurvenschar dargestellt. Abb. 1. [2] beinhaltet die durch Rechnungen an Hand von Messungen aufgenommene Kurvenschar. Das Studieren der Abb. 1 wird dem Leser überlassen.

Da die in der Abb. 1 gezeigte Änderung des Filtrations-Wärmebedarfes eine nichtlineare Funktion der Differenz der Außen- und der Innentemperatur ist, und da die untersuchten analogen Heizregler nicht auf den geregelten Kennwert regeln, können diese den Einfluß des Filtrationswärmestromes auf das Resultat überhaupt nicht berücksichtigen. (Abb. 2) In unseren Tagen wird in solchen — eigentlich unregelmäßigen — Systemen der Einfluß der Filtration mit dem sog. „Windzusatz“ berücksichtigt. Das bedeutet, daß der in den Raum eingeführte Wärmestrom um einen von der Windgeschwindigkeit abhängigen

Zuwachs erhöht wird. Die ungarischen Industrienormen beinhalten auch diesbezügliche Vorschriften.

Aus Abb. 1 ist auch zu erkennen, daß eine in Hinblick auf alle Räume einheitliche Kompensation des Filtrationswärmebedarfes nicht zum Ziele führen kann.

1.e. Die Größe der Wärmeströme der inneren Wärmequellen kann exakt nicht ermittelt werden, da diese von menschlicher Wärmeabgabe, Kochen, Betrieb der Haushaltsgeräte, Nutzwarmwasserverbrauch, Beleuchtung usw. stammen.

Da die auf die einzelnen Räume bezogene exakte Bestimmung der einzelnen Komponenten in der Praxis nicht durchgeführt werden kann, stellt die statistische Analyse eine zu ihrer Bestimmung verwendbare Methode dar, die nichts anderes ist als das Wärmestromabgabe-Zeit-Diagramm jeder einzelnen inneren Wärmequelle.

Da sich der resultierende Wärmestrom der auf dieser Weise ermittelten inneren Wärmequellen zeitlich ändert, berücksichtigt die überwiegende Mehrheit der heutigen Heizregler diese Wärmestromkomponente überhaupt nicht, wie dieses aus der zur Abb. 2 gehörenden Erklärung auch verständlich wird.

Obwohl im Bauwesen unserer Zeit der Anteil der von den inneren Wärmequellen herrührenden Wärmeströme in dem resultierenden Wärmestrom im größten Teil der Heizperiode keinen bedeutenden Wert hat, wird jedoch seine Berücksichtigung durch den Umstand begründet, wonach sein Einfluß während der sog. Übergangsperiode (am Anfang und am Ende der Heizperiode) bedeutend sein kann, da der Wert der äußeren Transmission und des Filtrationswärmebedarfes einen kleinen absoluten Wert hat.

1.f. Der sich aus der zeitlichen Änderung der inneren gespeicherten Wärmeenergie herrührende Wärmestrom spielt im Bauwesen unserer Zeit eine bedeutende Rolle, da sich im resultierenden Wärmestrom der Anteil der schon erwähnten Wärmestromkomponente vergrößert hat. Ein hoher Wert der Wärmespeicherfähigkeit bedeutet, daß die Rauminnentemperatur mit einer großen Zeitkonstante auf die Schwankungen der Außentemperatur reagiert. Diese Behauptung trifft natürlich nur auf die durch Wärmeleitung übertragenen sog. Transmissionswärmeströme zu, da die Zeitkonstante der konvektiven (durch Luftströmung übertragenen) Wärmeströme in erster Linie eine Funktion des Raumvolumens ist.

1.g. Die letzte Komponente des resultierenden Wärmestromes, die von den Heizungs- und/oder den lufttechnischen Einrichtungen herrührende Wärmestromkomponente ist aus regelungstechnischem Gesichtspunkt gesehen die Stellgröße des Heizregelsystems.

2. Die sich aus den Änderungen der Wärmeumlaufkomponenten ergebenden Probleme sind:

— Im Energieumlauf der Gebäude und Räume spielt der durch die Umfassungskonstruktionen strömende Transmissionswärmestrom nicht mehr jene hervorgehobene und bestimmende Rolle, wie bei den konventionellen Gebäuden. Als Folge der Verbesserung der Wärmeisolierung der äußeren Mauerwerk- und Deckenkonstruktionen hat sich besonders die in der Gesamtheit des Prozesses gespielte Rolle des durch die äußeren Mauerwerks- und Deckenkonstruktionen durchströmenden Transmissionswärmestromes verringert.

Die Rolle des aus der auf die verglasten Oberflächen einfallenden Sonnenstrahlung herrührenden Wärmestromes hat sich im Gesamtprozeß stark erhöht.

Nach seiner Größe, Art und Anteil hat sich der Filtrationsluftumsatz in äußerst bedeutendem Maße erhöht, und damit nahm die Rolle der damit zusammenhängenden konvektiven Wärmeströme im Gesamtprozeß bedeutend zu.

Mit der Energieeinsparungstendenz unserer Zeit rückte auch die aus der zeitlichen Änderung der im Raum gespeicherten inneren Wärmeenergie herrührende Wärmestromkomponente in den Vordergrund, da ihr Anteil am Gesamtprozeß zugenommen hat.

Infolge der besseren Wärmeisolierung von Umfassungskonstruktionen, Türen und Fenstern hat sich die Bedeutung der Wärmestromkomponente der inneren Wärmequellen unter besonderer Berücksichtigung der Übergangsperiode erhöht.

Da sich diese Komponenten der Wärmeenergieprozesse räumlich und zeitlich voneinander sehr abweichend ändern, hat sich die energetische Anpassung der Heizungssysteme an die von den einzelnen Räumen gestellten Anforderungen sehr kompliziert gestaltet. Wie das schon vorher erwähnt worden ist, kann diese Aufgabe, abgesehen von einigen einfachen Fällen, mit den in unseren Tagen verwendeten analogen Heizsystemreglern in befriedigender Weise nicht erfüllt werden.

Für die Verbesserung der Qualität der Regelung werden die in Zonen aufgeteilten Heizsysteme, für die Kompensierung der durch die Regler nicht berücksichtigten und in den verschiedenen Räumen abweichend wirkenden Wärmestromkomponenten die mit Thermostat versehenen Radiatorenventile verwendet. Dadurch werden aber die Eigenschaften der analogen Regler nicht geändert und so die Probleme des Reglerprinzips nicht behoben.

Die Untersuchung der in Ungarn zur Zeit weit verbreiteten Heizregler

Das Funktionsschema und die Funktionsweise der Heizregler

Im folgenden wird einer der am weitesten verbreiteten analogen Heizregler, als TERMOREG-3. bekannt, behandelt. Die im Zusammenhang damit getroffenen Behauptungen treffen mit kleiner Abweichung auf alle analogen Regler zu.

Das Funktionsschema des Heizreglers Typ TERMOREG-3. zeigt Abb. 2 Die verwendeten Bezeichnungen sind:

- ϑ_o — Außentemperatur (°C)
- ϑ_i — Innentemperatur, Raumtemperatur (°C)
- w — Windgeschwindigkeit (m/s)
- T/R- — Temperatur-Widerstand-Meßwertumsetzer,
- W/R- — Windgeschwindigkeit-Widerstand-Meßwertumsetzer;
- ϑ_f — Temperatur des vorwärtsströmenden, das Heizsystem verlassenden Wassers.

Anhand des Funktionsschemas läßt sich die Funktionsweise des Reglers folgenderweise erklären.

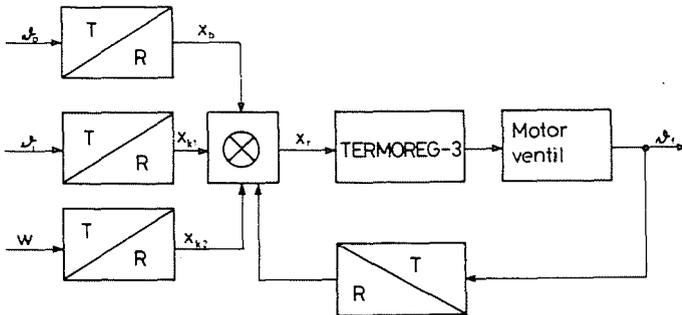


Abb. 2. Funktionsschema des Heizreglers Typ TERMOREG—3

Das Reglereingangssignal (X_r) wird mit Hilfe einer Widerstandsbrückenschaltung erzeugt, wobei der Sollwert (X_b) aus dem Wert der Außentemperatur (ϑ_o) gebildet wird. Dieser Sollwert kann durch eine Messung der Innentemperatur (ϑ_i) und der Windgeschwindigkeit (W) korrigiert werden. Der Einfluß dieser letzten Korrekturen kann zwischen Null und ein Maximum eingestellt werden. Das Reglerausgangssignal ist die Temperatur des sog. vorwärtsströmenden Heizmediums. Das System stellt dessen Wert aus den von den Kesseln

beheizten und den rücklaufenden, abgekühlten Medien mit Hilfe eines durch einen Motor angetriebenen Mischventils ein.

Die Funktionsweise des Reglers basiert auf der Annahme, daß bei einem Gebäude die Temperatur des in die Heizkörper einströmenden Wassers in Abhängigkeit von dem Wert der Außentemperatur mit Hilfe der sog. Heizungskurve bestimmt werden kann. Diese Heizungskurve wird vom Regler durch eine, in der Abb. 3 dargestellten linearen Kennlinie mit veränderbarer Steilheit angenähert.

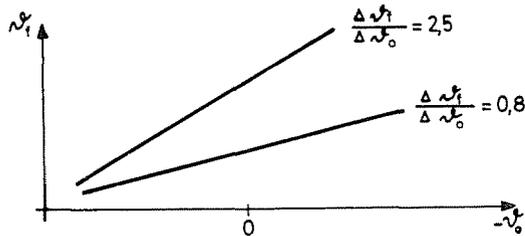


Abb. 3

Der Regler verwirklicht eine solche PI-Regelung, bei der sowohl die Proportionalitäts- als auch die Integrationsparameter geändert werden können.

An den Meßanfang der Raumtemperatur können max. 8 Widerstandsthermometer in Reihenschaltung derart angeschlossen werden, daß der Gesamtwiderstand 200 Ohm nicht überschreitet. Mit dieser Lösung wird das vom Außentemperaturfühler erzeugte Grundsignal durch die Durchschnittstemperatur von max. 8 Räumen korrigiert.

Die Fehler des Reglers

Der Grundfehler des Reglers liegt darin, daß nicht die Raumtemperatur der Ortswert der Regelung ist, obwohl das Ziel der Regelung im Konstanthalten der Rauminnentemperaturen auf einem vorgeschriebenen Wert liegt.

Da ein Gebäude aus verschiedenen Räumen besteht, kann dafür keine einzelne Heizkennlinie, sondern nur eine Kennlinienschar aussagefähig sein.

Die die Heizungskennlinie beeinflussende Einwirkung des Windes darf nicht einheitlich berücksichtigt werden. Wie es schon in Kapitel I. behandelt wurde, ändert sich der Windeinfluß, d. h. der Verlauf des Filtrationswärmebedarfes je nach den Räumen sehr unterschiedlich.

Es wird eine zentrale Regelung durchgeführt, obwohl das wärmetechnische System verteilt ist (oder die Zonen sind nicht genug detailliert).

Anstelle der Messung der Wärmestromes wird die Temperatur des vorwärtsströmenden Heizmediums unter Annahme eines konstanten Massenstromes gemessen.

Wie zu sehen, ist bei dem beschriebenen Reglersystem schon die Funktionstheorie falsch. Dieser Fehler wird durch die im Kapitel I. aufgeführten Änderungen noch hervorgehoben. Das Ergebnis ist die häufige Beschwerde, daß es in den einzelnen Räumen zu kalt, oder zu warm ist.

Das Prinzip, wonach das Grundsignal durch den aus den Temperaturen mehrerer Räume gebildeten Mittelwert modifiziert wird, birgt Fehlermöglichkeiten in sich, da im Falle von Räumen mit unterschiedlichen Innentemperaturen es vorkommen kann, daß der Mittelwert in keinem dieser Räume vorkommt. Mit großer Wahrscheinlichkeit ist dieser Fall am häufigsten. Im allgemeinen kann dies so formuliert werden, daß die regelungstechnische Verwendung des Mittelwertes beim Außerachtlassen der Streuungen zu wesentlichen Funktionsfehlern führen kann. In der Praxis können diese Fehler dann beobachtet werden, wenn innerhalb eines nach der sog. mittleren Heizkennlinie geregelten Gebäudes (oder innerhalb einer Zone) unter- und überheizte Räume gefunden werden können. In diesem Fall wird eine solche Einstellung gewählt, die sich nach dem kältesten Raum richtet. Als Ergebnis wird die Mehrzahl der Räume im Gebäude überheizt. Diese Betriebsweise verursacht darüber hinaus, daß sie den Erfordernissen der energiesparenden Heizung nicht entspricht, für die sich im Raum aufhaltenden Personen ein unangenehmes Behaglichkeitsgefühl.

Um diese Nachteile vermeiden zu können, wurde das Prinzip für ein rechnergestütztes Heizreglersystem ausgearbeitet, wobei die modernsten Mittel und Grundsätze der rechnergestützten Prozeßregelung angewendet wurden.

Mikrokomputerisierter Regler des Heizsystems

Um ein Gebäude energiesparend heizen zu können ist eine Trennung der Räume mit abweichendem Wärmebedarf erforderlich, und notwendig die wärmetechnisch unabhängigen Gruppen zu gruppieren. Die auf diese Weise entstandenen selbständigen Heizsysteme, die sog. Zonen sollen vom Regler nach den jeweiligen Bedingungen beeinflußt werden. Wenn keine Zonenbildung möglich ist, so kann ein optimaler Regleralgorithmus z.B. darin bestehen, daß er so eine Heizleistung einstellt, bei der in 90% der Räume die Innentemperatur mit großer Wahrscheinlichkeit innerhalb vorgeschriebenen Grenzen bleibt [2].

Im weiteren wird das Vorhandensein eines in Zonen eingeteilten Heizsystemes angenommen. Wir setzen auch voraus, daß das Reglersystem in jeder Zone mindestens in einem Raum den geregelten Wert messen kann. Die

Auswahl der zu den einzelnen Zonen gehörenden Räume kann nach drei Gesichtspunkten erfolgen:

- beim Projektieren des Gebäudes mit Hilfe von Berechnungen;
- bei fertigen Gebäuden bei Kenntnis der Schichtpläne mit Hilfe von Berechnungen;
- bei fertigen Gebäuden durch Messung.

Dadurch ist der Nachteil des Zentralreglers schon beseitigt, da innerhalb einer Zone die einzelnen Räume in gleicher Weise auf die Änderungen der Umgebungsbedingungen reagieren.

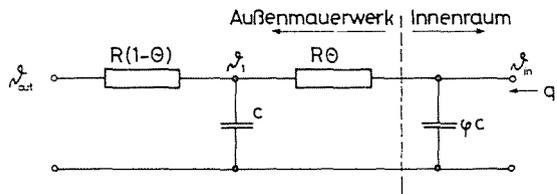


Abb. 4. Das den von der äußeren Transmission auf die Rauminnentemperatur ausgeübten Einfluß angebende analoge elektrische Modell

Bei einem Gebäude werden zwei Räume dann wärmetechnisch ähnlich bezeichnet, wenn bei jeder beliebigen äußeren Umgebungsbedingung des Gebäudes die zur Sicherung der im Raum vorgeschriebenen inneren Lufttemperatur notwendigen Wärmeströme gleich oder miteinander proportional sind.

1. Im weiteren wird die wärmetechnische Verhaltensweise eines Raumes hinsichtlich den einzelnen Wärmestromkomponenten untersucht, und es wird das vereinfachte wärmetechnische Modell des Raumes erstellt:

a) Die äußere Transmission ist eine lineare Funktion der Differenz der Außen- und Innentemperatur. Der auf die Rauminnentemperatur ausgeübte Einfluß des durch das äußere Mauerwerk strömenden Wärmestromes kann mit einem über zwei Zeitkonstanten verfügenden mathematischen Modell angenähert werden, dessen analoges Ersatzschaltbild in Abb. 4 gegeben ist.

Die verwendeten Bezeichnungen der Abb. 4 sind:

- ϑ_{OUT} — Außenlufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$); Modelleingangsveränderliche;
- ϑ_{IN} — der vom Modell geschätzte Wert der Rauminnentemperatur ($^{\circ}\text{C}$), Modellausgangsveränderliche;
- q_k — die Resultierende der konvektiven, durch Luftströmung transportierten Wärmeströme (J/s); Modelleingangsveränderliche;

- Θ — transienter Parameter, sein Wert ändert sich zwischen 0 und 1;
 φ — transienter Parameter, sein Wert entspricht dem Verhältnis der Wärmekapazitäten des Innen- und Außenmauerwerkes;
 ϑ_1 — Temperatur eines fiktiven Mauerwerkpunktes, eine innere Modellveränderliche ($^{\circ}\text{C}$)
 R — resultierender Mauerwerkswärmeleiterwiderstand ($^{\circ}\text{C s/J}$)
 C — resultierende Mauerwerkswärmekapazität ($\text{J}/^{\circ}\text{C}$):

Einiges über die transienten Parameter:

Mit Hilfe des Veränderns des Parameters Θ — das, wie es aus der Abb. 4 ersichtlich ist, als eine Teilung des resultierenden Wärmeleiterwiderstandes des Außenmauerwerkes auf das Modell einwirkt — kann die mathematische Gleichung des Modells verfeinert bzw. der wirklich wahrnehmbaren Funktion angepaßt werden.

Mit einer Änderung des Parameters φ — welches dem Verhältnis der Wärmekapazität des Innenraumes und des Mauerwerkes entspricht — kann die Gleichung des Modells so modifiziert werden, daß sie der Wirklichkeit am besten entspricht.

Wichtig ist es zu bemerken, daß die resultierende Raumwärmekapazität $C_e = (1 + \varphi) \cdot C$ für einen Raum kennzeichnend ist und einen konstanten Wert besitzt.

Der Ausdruck „annehmbar annähernd“ soll bedeuten, daß das Modell der Wirklichkeit mit einem zulässigen Fehler, und gleichzeitig unter Verwendung von Parametern kleiner Anzahl doch der physikalischen Struktur nach richtig annähert, wodurch die Rechenzeiten der späteren Regelungsalgorithmen verringert werden.

Das ist deshalb nötig, weil der Rechenaufwand für die Gleichungen, die das wärmetechnische Verhalten eines Raumes beschreiben groß ist, und deshalb ihre Lösung eine zu lange Rechnerzeit an einem Prozeßrechner in Anspruch nehmen würde.

Die andere Komponente der Außentransmission ist der durch die Umfassungskonstruktionen durch Wärmeleitung übertragene Transmissionswärmestrom. Die wichtigste Eigenschaft dieser Wärmestromkomponente ist, daß diese im Gegensatz zu der vorigen die Konstruktion praktisch ohne Zeitverzögerung durchströmt. Diese durch „ohne Zeitverzögerung“ gekennzeichnete Verhaltensweise bezieht sich natürlich nur auf den Wärmestrom. Diese Annahme entspricht also in dem analogen elektrischen Modell einem solchen Parallelzweig, der die Änderungen der Außentemperatur unmittelbar, jedoch gedämpft in das Rauminnere überträgt. Dadurch wird das Modell der Abb. 4 erweitert, wie in Abb. 5 zu sehen.

Gegenüber dem Modell der Abb. 4 wurden in der Abb. 5 zwei Änderungen getroffen:

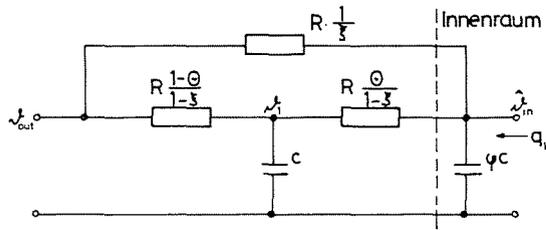


Abb. 5

die Deutung des Wärmeleitwiderstandes R wurde verändert;

R — Wärmeleitwiderstand, entspricht dem resultierenden Wärmeleitwiderstand der Umfassungskonstruktionen;

es wurde ein neuer Parameter eingeführt, und zwar

ξ — dimensionsloser Parameter, entspricht dem Verhältnis des vorher angegebenen resultierenden Wärmeleitwiderstandes und des resultierenden Wärmeleitwiderstandes der Umfassungskonstruktionen.

b) Dieses vereinfachte Modell berücksichtigt die zwischen den Räumen vorhandene Innentransmission nicht. Der Grund dafür liegt darin, daß wenn die Temperatur in jedem Raum geregelt wird, zwischen deren Innentemperaturen überhaupt keine, oder nur eine sehr kleine Temperaturdifferenz auftritt. Der Wärmeleitwiderstand der inneren Umgrenzungskonstruktionen ist genügend groß, so, daß die Vernachlässigung der inneren Transmission keinen allzu hohen Fehler verursacht.

Werden diese Bedingungen nicht erfüllt, so soll der innere Transmissionswärmestrom — ähnlich zu dem äußeren Transmissionswärmestrom — mit Durchführungszweigen zwischen einem oder mehreren Raummodellen berücksichtigt werden. Die Anzahl der Durchführungszweige hängt davon ab über wieviele solche Nachbarschaftsbeziehungen der Raum verfügt.

Das vorhergesagte wird in Bezug auf eine einzige solche Beziehung durch Abb. 6 veranschaulicht.

Die verwendeten Bezeichnungen der Abb. 6 sind:

- Das Teilmodell mit der Markierung* und das Teilmodell ohne Markierung entspricht einem Modell zweier miteinander in Beziehung stehenden Räume (Raumgruppen).
- Der Durchführungszweig mit der Markierung ' entspricht dem wärmetechnischen Modell der die Verbindung realisierenden inneren Abgrenzungskonstruktionen.

Aus dem hervorgegangenem und aus Abb. 6 ergibt sich, daß zwei benachbarte Räume nicht in der gleichen Regelungszone sein können, wenn man die innere Transmission mit so einer Veränderung des Raummodells in Betracht nehmen muß.

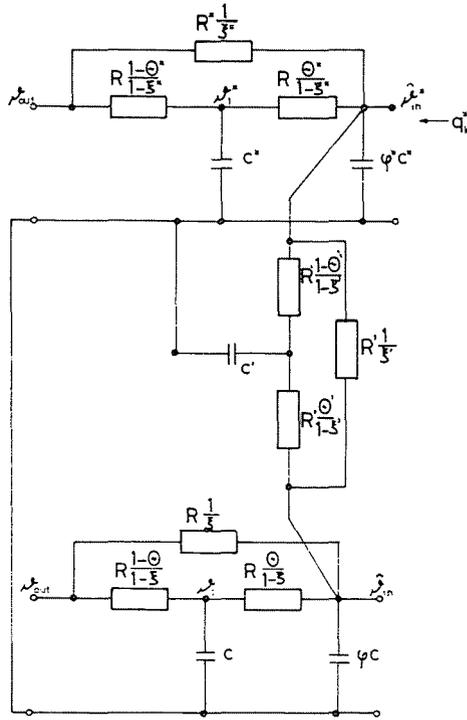


Abb. 6

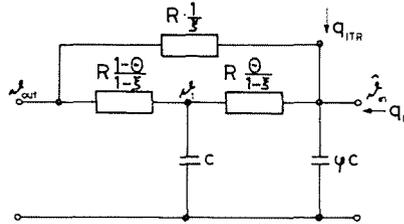


Abb. 7

Die Nachbarschaftsbeziehung kann durch einen konstanten Wärmestrom modelliert werden, wenn die Differenz der beiden Innenraumtemperaturen konstant ist und beide Temperaturen geregelt sind. In diesem Fall braucht das Modell nicht mit weiteren Gliedern erweitert werden, nur die durch den konstanten Wärmestrom modellierte innere Transmission muß in Betracht gezogen werden. Für diesen Fall zeigt Abb. 7 ein Beispiel, in der neben den schon verwendeten Bezeichnungen

q_{ITR} — den die innere Transmission konstanter Größe modellierenden Wärmestrom (J/s) bedeutet.

c) Das Modell berücksichtigt den Strahlungsgewinn als ein additives Glied in der Resultierenden der konvektiven Wärmeströme, (q_k). Die für q_k gültige Gleichung (5) wird nachfolgend gegeben.

Die in den Raum einfallende Sonnenstrahlung erwärmt nicht unmittelbar die Luft, sondern jene Oberfläche auf welche sie strahlt. Diese erwärmte Oberfläche erwärmt teilweise die Luft durch Wärmeübergabe, teilweise strahlt sie eine Langwellenstrahlung aus. Diese Sekundärstrahlung gelangt nicht durch die Fenster, da diese für die Strahlung undurchlässig sind. Somit wird auch diese Strahlung von der Mauerwerkkonstruktion und den Einrichtungsgegenständen absorbiert. Dadurch wird deren Oberfläche erwärmt, wodurch indirekt die Luft auch erwärmt wird.

Der unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung entstehende Sekundärwärmestrom (q_{k_s}) ist proportional der Intensität der Sonnenstrahlung, der Größe der strahlungsdurchlassenden Oberfläche und hängt von den Stoff- und Oberflächenqualitäten der Konstruktionen ab. Seine Bestimmung kann durch Messung, oder durch das sich aus der statistischen Auswertung von meteorologischen Daten ergebenden Sonnenstrahlungsintensität—Zeit-Diagram erfolgen.

d) Das Modell berücksichtigt den Filtrationswärmebedarf ebenfalls als ein additives Glied der Resultierenden der konvektiven Wärmeströme, siehe dazu Gl. (5).

Die Bestimmung des Filtrationswärmebedarfes (q_F) ist infolge der vielen beeinflussenden Parameter eine schwierige und komplizierte Aufgabe. Sie kann entweder auf Grund der Lösungsergebnisse der sämtlichen Türen, Fenster und Lüftungsschächte des Gebäudes berücksichtigenden Strömungsmodells oder unter Verwendung eines Diagrammes durchgeführt werden, das den Zusammenhang zwischen dem Filtrationswärmebedarf und der Windgeschwindigkeit(srichtung) in Abhängigkeit von der Differenz der Außen- und Innentemperatur darstellt und aus der statistischen Auswertung von Meßergebnissen erhalten wird.

e) Das Modell berücksichtigt den Wärmestrom der inneren Wärmequellen ebenfalls in dem Resultat der konvektiven Wärmeströme (q_k).

Die Bestimmung des resultierenden Wärmestromes der inneren Wärmequellen (q_b) kann unter Verwendung des resultierenden Wärmestrom—Zeit-Diagrammes erfolgen, wobei letzteres auf Grund der statistischen Auswertung der Wärmestrom—Zeit-Diagramme der einzelnen Wärmequellen erfolgt.

f) Im Modell wird der sich aus der zeitlichen Änderung der gespeicherten inneren Wärmeenergie ergebende Wärmestrom mit der Wärmekapazität der Mauerwerkkonstruktionen (C) und des Innenraumes (φC) berücksichtigt.

g) Die Leistung der Heizungs- und/oder der lufttechnischen Systeme wird durch das Modell ebenfalls mit der Resultierenden der konvektiven Wärmeströme (q_k) berücksichtigt. Bei der Bestimmung dieser Wärmestromkomponente (q_f) wird vom Modell eine konvektive Wärmeabgabe vorausgesetzt. Bei Verwendung von Strahlungsheizkörpern sollte dieser Modellteil erweitert werden, wovon aber in diesem Beitrag abgesehen wird.

Soll die Übertragungsfunktion des Heizsystems in einer Form von

$$W_{fH}(s) = \frac{qf(s)}{b(s)} = \frac{A}{1+sT} \cdot e^{-sT_H} H = W_f(s) \cdot e^{-sT_H}$$

angenähert werden, wo

$qf(s)$ — die Laplace-Transformierte des Heizsystem-Ausgangssignales;

$b(s)$ — die Laplace-Transformierte des Heizsystemeingangssignales,

T — die Zeitkonstante des mit einer Zeitkonstante angenäherten Heizsystems und

T_H — die Totzeit des Heizsystems bezeichnet.

Das Regelungsprinzip des neuen Heizreglersystemes und das Flußdiagramm des Regelkreises

Es soll das dynamische Verhalten des Heizsystemes von einem Raum näher untersucht werden worauf eine entsprechende Regelungsstrategie ausgearbeitet wird.

Als Ausgangspunkt soll ein in der Wirklichkeit nie auftretender Fall angenommen werden, nämlich daß sich das System im eingeschwungenen Zustand befindet. Dieser Fall kann in der Wirklichkeit schon deshalb nicht auftreten, da der Raum auf äußere Umgebungseinflüsse mit einer bedeutend höheren Zeitkonstante — ihr Wert liegt in einem Bereich von einigen Stunden — reagiert. Im Vergleich dazu ändern sich die Umgebungsverhältnisse sehr schnell. Deshalb kann das System den eingeschwungenen Zustand nie erreichen. (Unter anderen ist das einer der Hauptgründe der nicht entsprechenden Funktion der heutigen analogen Heizregler, da sie auf die statischen Kennlinie regeln, d. h. es wird das schnelle Entstehen stationärer Zustände kurzer Dauer angenommen.)

Aus diesem angenommenen Zustand wird das System durch die Änderung der Umgebungsbedingungen hinausbewegt. Das wird vom Regler erfaßt, wonach das entsprechende Kommandosignal abgegeben wird. Infolge der physikalischen Funktion und der geometrischen Eigenschaften des Heizungssystems kommt die entsprechende Heizleistung erst nach Verlauf der das System kennzeichnenden Totzeit zur Geltung. Diese Totzeit wird mit T_H bezeichnet. Der Raum reagiert auf die Änderungen gemäß der Dynamik des

vorher aufgebauten Modells. Dieses Modell beinhaltet keine Totzeit. Aus dem Gesichtspunkt des Reglers wird jedoch das geregelte System durch das Heizsystem und den Raum (Zone) gebildet, somit beinhaltet ihre resultierende Übertragungsfunktion die Totzeit. Es gilt also:

$$W_f(s) \cdot W_M(s) \cdot e^{-sT} H = W(s) \cdot e^{-sT} H$$

wobei $W_f(s)$ die Übertragungsfunktion des vorher behandelten Heizsystemes und $W_M(s)$ die Übertragungsfunktion des Raum/Zonen — Modells bezeichnet. Die Modelleingangsgröße ist die Resultierende der Außentemperatur ϑ_{OUT} und der konvektiven Wärmeströme (q_k), die Ausgangsgröße ist die Rauminnenlufttemperatur ϑ_{IN} .

Der Regler soll eine Strecke mit Totzeit regeln. Der Wert dieser Totzeit ändert sich je nach Zonen, ihre Größe hängt von der Größe des Heizsystemes ab, seine Größenordnung fällt in einen Bereich von 10—60 Minuten.

Das Regelprinzip muß dieser Regelstrecke mit Totzeit und den Bedingungen der Regelung mit Probe, entsprechend gewählt werden. Wir wählen die Regelstruktur „Schmid-Prediktor“. Das Wesen dieser Struktur besteht in der inneren Rückkupplung des Reglers mit Hilfe eines so gewählten Gliedes, daß die Totzeit aus der charakteristischen Gleichung des Gesamtsystems eliminiert werde. Die diesem Prinzip entsprechende analoge Regelstruktur zeigt Abb. 8.

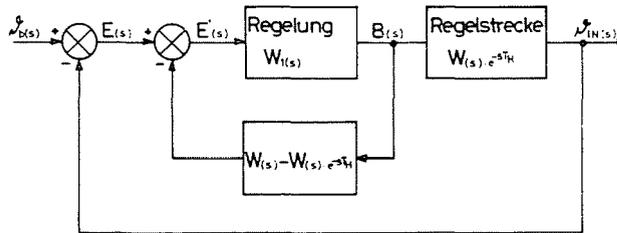


Abb. 8

Die Literatur [9] behandelt ausführlich das Prinzip und die Eigenschaften des Schmid-Prediktors. An dieser Stelle wird ohne Herleitung nur die resultierende Übertragungsfunktion des Regelkreises gegeben, die sich aus der Abb. auch einfach sehen läßt:

$$W_L(s) = \frac{W_1(s) \cdot W(s)}{1 + W_1(s) \cdot W(s)} \cdot e^{-sT} H$$

Wie zu sehen, ist aus der charakteristischen Gleichung des Systems $1 + W_1(s) \cdot W(s)$ das Totglied ausgefallen.

Die verwendeten Bezeichnungen sind folgende:

- $W_1(s)$ — Übertragungsfunktion des Reglers;
- $W(s)$ — Übertragungsfunktion der Regelstrecke ohne Totzeit;
- $\mathcal{Y}(s)$ — Laplace-Transformierte des Sollwertes;
- $E(s)$ — Laplace-Transformierte des Fehlersignales;
- $E'(s)$ — Laplace-Transformierte des korrigierten Fehlersignales;
- $B(s)$ — Laplace-Transformierte der vom Regler abgegebenen Kommandosignals

Mit Hilfe dieser Struktur können solche PI, PID Regleralgorithmen verwendet werden, die sich nur nach den dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke ohne Totzeit richten.

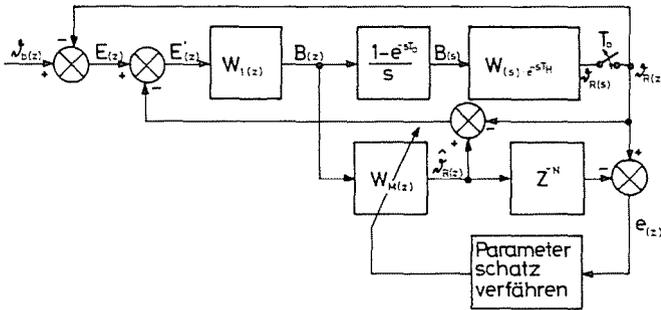


Abb. 9

Die nächste Aufgabe ist die Ausarbeitung eines der vorher gezeigten Regelstruktur entsprechenden rechnergestützten Flußdiagrammes, wobei die Regelung nach dem Auswahlprinzip durchgeführt werden soll.

Da das Modell einen Näherungscharakter besitzt und die physikalischen Raumparameter sich in Abhängigkeit von der Zeit ändern (Altern, usw.) wurde das Prozeßmodell mit einem adaptiven Kreis ergänzt, der beim Überschreiten einer entsprechend gewählten Fehlerschranke die Parameter des Prozeßmodelles so ändert, daß dieser Fehler verschwindet. Dadurch wurde zwar das Flußdiagramm der Regelung teilweise modifiziert, doch können wir noch die vorher skizzierte Struktur am Flußdiagramm mit Auswahlregelung der Abb. 9 erkennen.

Die neuen Bezeichnungen der Abb. 9 sind

- $W_1(z)$ — Auswahlregelübertragungsfunktion des Reglers;
- $\mathcal{Y}_b(z) \dots \mathcal{Y}_R(z)$ — z — Transformierte der entsprechenden Signale;
- $\hat{\mathcal{Y}}_R(z)$ — z — Transformierte der vom Modell geschätzten Referenztemperaturfunktion;
- $z = e^{sT_0}$ — T_0 — Auswahlzeit
- $N = T_H/T_0$ — ganze Zahl

- $W_M(z)$ — z — Transformierte der Übertragungsfunktion vom Raum (Zonen)modell,
 $e_{(z)}$ — z — Transformierte der auf das Parameterschätzverfahren einwirkenden Fehlerfunktion.

Die vom Rechner realisierenden Übertragungsfunktionen werden im Flußdiagramm mit ihren entsprechenden z -Transformierten bezeichnet. Der Begriff der Referenztemperatur wird auf Grund der Literatur [6] im folgenden Abschnitt ausführlich behandelt.

Das Gleichungssystem der Regelung

1. Das Aufstellen des Gleichungssystems der Regelung wird mit den Modellgleichungen begonnen. Nach der in der Abb. 5 gezeigten elektrischen (analogen) Ersatzschaltung lauten die Gleichungen (ohne ihre Ableitung):

$$\dot{\vartheta}_1(t) = -\frac{1-\xi}{RC\Theta(1-\Theta)} \cdot \vartheta_1(t) + \frac{1-\xi}{R \cdot C \Theta} \vartheta_{IN}(t) + \frac{1-\xi}{R \cdot C \cdot (1-\Theta)} \cdot \vartheta_{OUT}^*(t) \quad (1)$$

$$\hat{\vartheta}_{IN}(t) = \frac{1-\xi}{\varphi \cdot R \cdot C \cdot \Theta} \cdot \vartheta_1(t) - \frac{1-\xi+\xi\Theta}{\varphi RC\Theta} \cdot \hat{\vartheta}_{IN}(t) + \frac{\xi}{\varphi R \cdot C} \cdot \vartheta_{OUT}^*(t) + \frac{1}{\varphi C} q_k(t) \quad (2)$$

wobei $\vartheta_1(t)$ und $\hat{\vartheta}_{IN}(t)$ die Ableitungen der entsprechenden Funktionen nach der Zeit sind. In der Gleichung wird anstelle der Funktion $\vartheta_{OUT}(t)$ die sog. modifizierte Außentemperatur $\vartheta_{OUT}^*(t)$ verwendet, welche Modifikation den von der Sonnenstrahlung auf den äußeren Transmissionswärmestrom ausgeübten Einfluß berücksichtigt. Erfahrungsgemäß gilt nach (1):

$$\vartheta_{OUT}^*(t) = \vartheta_{OUT}(t) + \frac{a \cdot I_{SRG}}{\alpha_a(W)} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3)$$

wobei

- a — den Absorptionskoeffizienten der Außenoberfläche des äußeren Mauerwerkes
 $\alpha_{a(W)}$ — die Oberflächenleitzahl bezeichnet ($\text{J}/\text{m}^2\text{C} \cdot \text{S}$) wobei letztere von der Windgeschwindigkeit abhängig ist.

Die Oberflächenleitzahl ist eine Funktion der Luftströmung entlang der Oberfläche und somit die der Windgeschwindigkeit. Erfahrungsgemäß gilt nach (2) für diese Funktion der Ausdruck:

$$\alpha_a(W) = 5,57 + 4W(t) \quad (\text{J/m}^2\text{s}^\circ\text{C}) \quad (4)$$

bei $W < 5$ m/s.

Gemäß Auswertung von meteorologischen Daten trifft dieser Windgeschwindigkeitsbereich auf einen großen Teil der Heizperiode zu.

Die Resultierende der konvektiven Wärmeenergieströme wird laut der Gleichung errechnet:

$$q_k(t) = q_f(t) + q_s(t) + q_b(t) + q_F(t) \quad (5)$$

wo

$$q_F(t) = \int_0^t \omega_f(t - \tau) \cdot b(\tau) \cdot d\tau \quad (6)$$

den Wärmestrom des Heizsystems *ohne Totzeit* berechnet angibt, $W_f(t)$ bedeutet also die Funktion des Heizsystems *ohne Totzeit*.

Die übrigen Bezeichnungen sind:

- $q_s(t)$ — Zeitfunktion des Strahlungswärmegewinnes (J/s)
- $q_b(t)$ — Zeitfunktion des resultierenden Wärmestromes der inneren Wärmequellen (J/s)
- $q_F(t)$ — Filtrationswärmebedarf (J/s).

Das in einem Zimmer, in einem geschlossenen Raum fühlbare Behaglichkeitsgefühl ist nicht nur von der dort herrschenden Lufttemperatur, sondern auch von der Temperatur der inneren Oberflächen der Umgrenzungskonstruktionen abhängig, die in direktem Wärmestrahlungsaustausch mit den Personen im Raum stehen. Dieser Einfluß wurde nach (6) mit der nachstehenden einfachen Komfortgleichung berücksichtigt:

$$\hat{\vartheta}_R(t) = 0,55 \cdot \vartheta_{\text{INSF}}(t) + 0,45 \hat{\vartheta}_{\text{IN}}(t). \quad [^\circ\text{C}] \quad (7)$$

wobei

- $\hat{\vartheta}_R(t)$ — die die thermische Behaglichkeit kennzeichnende sog. Referenztemperatur, den Ausgang des mathematischen Modells,
- $\vartheta_{\text{INSF}}(t)$ — die Temperatur der Innenoberflächen der äußeren Umgrenzungskonstruktionen und
- $\hat{\vartheta}_{\text{IN}}(t)$ — die vom Raummodell berechnete Lufttemperatur bezeichnen.

Die Temperatur der inneren Oberflächen von äußeren Umgrenzungskonstruktionen wird in diesem Modell als Meßdate behandelt, es wird also angenommen, daß das Regelsystem über einen solchen Aufbau verfügt, der diesen Temperaturwert mindestens je Zone an einer Stelle messen kann.

Sollte das nicht zutreffen, so kann auch für das äußere Mauerwerk ein Modell ausgearbeitet werden, in dem $\vartheta_{\text{INSF}}(t)$ geschätzt wird.

Da eine Proberegulierung verwendet wird, werden die Differentialgleichungen nach der Euler'schen Methode in Differenzen-Gleichungen umgeformt:

$$X[n \cdot T_0] = \frac{X[(n+1)T_0] - X(n \cdot T_0)}{R_0}$$

wobei T_0 — das Probezeitintervall, n die Anzahl der Probeschritte ($n \geq 0$) bezeichnen. Mit der Bezeichnung $n \cdot T_0 = n$ lauten die Ausdrücke für die Gleichungen (1)—... (7):

$$\begin{aligned} \vartheta_1(n+1) = & \left[1 - \frac{T_0(1-\xi)}{RC\Theta(1-\Theta)} \right] \cdot \vartheta_1(n) + \frac{T_0(1-\xi)}{RC\Theta} \cdot \vartheta_{\text{IN}}(n) + \\ & + \frac{T_0(1-\xi)}{RC(1-\Theta)} \cdot \vartheta_{\text{OUT}}^*(n) \quad [^\circ\text{C}] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \hat{\vartheta}_{\text{IN}}(n+1) = & \frac{T_0(1-\xi)}{\varphi RC\Theta} \cdot \vartheta_1(n) + \left[1 - \frac{T_0(1-\xi(1-\Theta))}{\varphi RC\Theta} \right] \cdot \vartheta_{\text{IN}}(n) + \\ & + \frac{T_0 \cdot \xi}{\varphi RC} \cdot \vartheta_{\text{OUT}}^*(n) + \frac{T_0}{\varphi C} q_k(n) \quad [^\circ\text{C}] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\vartheta_{\text{OUT}}^*(n) = \vartheta_{\text{OUT}}(n) + \frac{a \cdot I_{\text{SRG}}(n)}{\alpha_a(n)} \quad [^\circ\text{C}] \quad (10)$$

$$\alpha_a(n) = 5,57 + 4 \cdot W(n) \quad [\text{J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}] \quad (11)$$

$$q_k(n) = q_f(n) + q_s(n) + q_b(n) + q_F(n) \quad [\text{J/s}] \quad (12)$$

$$q_f(n) = \frac{T}{T+T_0} \cdot q_f(n-1) + \frac{A \cdot T_0}{T+T_0} \cdot B(n) \quad (13)$$

$$\hat{\vartheta}_R(n+1) = 0,55 \hat{\vartheta}_{\text{INSF}}(n+1) + 0,45 \cdot \hat{\vartheta}_{\text{IN}}(n+1) \quad (14)$$

In Gl. (14) ist der Wert von $\vartheta_{\text{INSF}}(n+1)$ unbekannt, da dieser ein Meßwert ist. Als letzter Meßwert ist nur der Wert von $\vartheta_{\text{INSF}}(n)$ bekannt. Da die Regelung mit der nur einen Schritt vorwärts geschätzten Regelgröße arbeitet, wird die Schätzung des Wertes von $\vartheta_{\text{INSF}}(n+1)$ erforderlich. Als einfachste Form ergibt sich der Ausdruck von

$$\hat{\vartheta}_{\text{INSF}}(n+1) = 2 \cdot \vartheta_{\text{INSF}}(n) - \vartheta_{\text{INSF}}(n-1) \quad (15)$$

wobei

$\hat{\vartheta}_{\text{INSF}}(n+1)$ — das Ausgangssignal des mathematischen Modelles,
 $\vartheta_{\text{INSF}}(n)$ — die Temperatur der inneren Oberflächen der äußeren

$\vartheta_{\text{INSF}}(n-1)$ — Umgrenzungskonstruktionen in Zeitpunkt $n \cdot T_0$,
 — den vorher definierten Wert im Zeitpunkt $(n-1)T_0$ bezeichnet.

Wird der vom Heizsystem abgegebene Wärmestrom gemessen, so ist die Anwendung von der Gl. (13) überflüssig. Das DGL-System kann auch mit Hilfe von komplizierteren Methoden gelöst werden, aber die Einfachheit des verwendeten Modelles und die auftretende große Ungenauigkeit bei der Parameterbestimmung begründet keine solche Behandlung. Der infolge der Einfachheit sich ergebende Fehler kann mit der entsprechenden Wahl der Probezeit in bestimmten Schranken gehalten werden, da wenn die Größenordnungen der Zeitkonstanten berücksichtigt werden, die Probehäufigkeit von einem Prozeßrechner gesichert werden kann. Um eine Reduktion der in den Gleichungen (8) und (9) sich anhäufenden Fehler zu erreichen, wird beim Modell anstelle des Wertes von $\hat{\vartheta}_{\text{IN}}(n)$ der von $\vartheta_{\text{IN}}(n)$ berücksichtigt.

Die Modellerweiterung mit mehreren Zeitkonstanten wäre möglich, aber auf Grund der mit Hilfe des Rechners durchgeführten Proberechnungen hat sich ergeben, daß zur genaueren Annäherung der tatsächlichen Prozesse die genaue Kenntnis der einzelnen Parameter zweckmäßig wäre.

Die Bestimmung der einzelnen Parameter kann in der schon angegebenen Weise auf dreierlei Art erfolgen:

- beim Entwurf des Gebäudes mit Hilfe von Berechnungen,
- bei vorhandenen Gebäuden mit bekannten Schichtprojekten durch Berechnung
- bei vorhandenen Gebäuden durch Messung.

Die Werte der berechneten Parameter können sogar um 50—100% von den Meßergebnissen abweichen.

2. Als Grundlage des Parameterschätzverfahrens dient eine entsprechend gewählte Zielfunktion, deren Wert mit Hilfe des Parameterschätzverfahrens auf ein Extremum gehalten werden soll. In unserem Fall lautet die gewählte Fehlerfunktion:

$$Q(e) = \frac{1}{2} e^2(t, \bar{m}), \text{ wobei } e(t, \bar{m}) = \vartheta_R^*(t) - \hat{\vartheta}_R(t, \bar{m}) \quad (16)$$

$$\bar{m} = \begin{bmatrix} R \\ C \\ \xi \\ \Theta \\ \varphi \end{bmatrix} \text{ ist der Parametervektor.}$$

Das Ziel der Parameterschätzung liegt darin, daß die Zielfunktion $Q(e)$ ein Minimum annehmen soll, da in diesem Fall auch die Fehlerfunktion $e(t, \bar{m})$ ein Minimum annimmt.

Die Funktion $Q(e)$ erreicht in Abhängigkeit von den Parametern dann ein Minimum, wenn $\frac{dQ(e)}{d\bar{m}} = 0$ gilt, wobei die Differenzierung nach dem Vektor eine Differenzierung nach den einzelnen Komponenten bedeutet.

Aus der Gl. (16) folgt:

$$\frac{dQ(e)}{d\bar{m}} = \frac{dQ(e)}{de} \cdot \frac{de(t, \bar{m})}{d\bar{m}}$$

Aus (8) ergibt sich die Grundgleichung des Parameterschätzverfahrens zu

$$\frac{d\bar{m}}{dt} = -\Gamma \cdot \frac{dQ(e)}{d\bar{m}} = -\Gamma \cdot \frac{dQ(e)}{de} \cdot \frac{de(t, \bar{m})}{d\bar{m}}. \quad (17)$$

Aus (16) und (17) erhält man den Ausdruck:

$$\frac{d\bar{m}}{dt} = -\Gamma \cdot e(t, \bar{m}) \cdot \frac{de(t, \bar{m})}{d\bar{m}}. \quad (18)$$

da

$$\frac{de(t, \bar{m})}{d\bar{m}} = -\frac{d\hat{\vartheta}_R(t, \bar{m})}{d\bar{m}}, \quad (19)$$

$$\frac{d\bar{m}}{dt} = \Gamma \cdot e(t, \bar{m}) \cdot \frac{d\hat{\vartheta}_R(t, \bar{m})}{d\bar{m}}, \quad (20)$$

gilt, wobei die Matrix Γ eine konstante Diagonalmatrix ist. Ihre Werte sollen so gewählt werden, daß die Gleichungen entsprechend gegen einen Parameterwert konvergieren.

Nach Übergang auf die Differenzenform und nach Durchführung der Differentiaten nach den Parametern, erhält man die Gleichungen des Parameterschätzverfahrens zu:

$$R(n+1) = R(n) + k_1 \frac{T_0^2 \cdot e(n)}{\varphi(n) \cdot C(n) \cdot \Theta(n) \cdot R^2(n)} \cdot [(1 - \zeta(n)) (\vartheta_{IN}(n) - \vartheta_1(n)) + \zeta(n) \cdot \Theta(n) \cdot (\vartheta_{IN}(n) - \vartheta_{OUT}^*(n))] \quad (21)$$

$$C(n+1) = c(n) + k_2 \cdot \frac{T_0^2 \cdot e(n)}{\varphi(n) \cdot R(n) \cdot \Theta(n) \cdot C^2(n)} \cdot [(1 - \zeta(n)) \cdot (\vartheta_{IN}(n) - \vartheta_1(n)) + \zeta(n) \cdot \Theta(n) \cdot (\vartheta_{IN}(n) - \vartheta_{OUT}^*(n)) - R(n) \cdot \Theta(n) \cdot q_k(n)] \quad (22)$$

$$\zeta(n+1) = \zeta(n) + k_3 \cdot \frac{T_0^2 \cdot e(n)}{\varphi(n) \cdot R(n) \cdot C(n) \cdot \Theta(n)}$$

$$\cdot [(\vartheta_{\text{IN}}(n) - \vartheta_1(n)) - \Theta(n) \cdot (\vartheta_{\text{IN}}(n) - \vartheta_{\text{OUT}}^*(n))] \quad (23)$$

$$\Theta(n+1) = \Theta(n) + k_4 \cdot \frac{T_0^2 \cdot e(n)}{\varphi(n) \cdot R(n) \cdot C(n) \cdot \Theta^2(n)} \cdot [\vartheta_{\text{IN}}(n) - \vartheta_1(n)] \quad (24)$$

$$\varphi(n+1) = \varphi(n) + k_5 \cdot \frac{T_0^2 \cdot e(n)}{R(n) \cdot C(n) \cdot \Theta(n) \cdot \varphi^2(n)} \cdot [(1 - \xi(n))(\vartheta_{\text{IN}}(n) - \vartheta_1(n)) + \xi(n) \cdot \Theta(n) \cdot (\vartheta_{\text{IN}}(n) - \vartheta_{\text{OUT}}^*(n)) - R(n) \cdot \Theta(n) \cdot q_k(n)] \quad (25)$$

Die Werte die im Verlauf der Parameterschätzung erhalten wurden müssen natürlich in dem für sie gültigen physikalischen Wertbereich liegen.

3. Die Gleichung des Reglers ergibt sich zu einer PI-Algorithmengleichung, wobei die Integrationszeitkonstante und der Übertragungsfaktor des P-Gliedes entsprechend dem Stabilitätskriterium des gesamten (geschlossenen) Regelkreises zur charakteristischen Gleichung des Systems gewählt werden soll. Davon sehen wir aber jetzt ab, da diese Wahlprozedur nur in Bezug auf einen konkreten Fall sinnvoll wäre.

Der zwischen dem Ein- und Ausgangssignal eines analogen PI-Reglers bestehende Zusammenhang ergibt sich im operativen Bereich zu:

$$B(s) = A \cdot E'(s) + \frac{1}{s \cdot T_I} \cdot E'(s)$$

wobei

$E'(s)$ — die Laplace Transformierte des modifizierten Regelfehlersignales

A — den Verstärkungsfaktor des P-Gliedes,

T_I — die Integrationszeit

$B(s)$ — die Laplace-Transformierte der Durchführungszeitfunktion bezeichnen.

Nach dem Übergang auf die Differenzform ergibt sich die Differentialgleichung des PI-Reglers zu

$$B(n) = B(n-1) + \left(A + \frac{T_0}{T_I} \right) \cdot E'(n) - A \cdot E'(n-1) \quad (26)$$

wo:

$B(n)$ — den Wert des Durchführungssignales im untersuchten Zeitpunkt;

$B(n-1)$ — den zu dem vorangehenden Probepunkt gehörenden Wert des Durchführungssignales;

- $E'(n)$ — den Wert der modifizierten geregelten Abweichung im untersuchten Zeitpunkt;
- $E'(n-1)$ — den zu dem vorangehenden Probepunkt gehörenden modifizierten Wert der geregelten Abweichung bezeichnen.

Für Spezialfälle, wie z. B. für zeitweilig benutzte Räume kann die Reglergleichung (26) mit anderen Optimierungsprogrammen erweitert werden. Als solche kommen z. B. die Regelung des Aufheizvorganges, die Bestimmung des Ausschaltzeitpunktes usw. in Frage.

Damit steht nur das vollständige Gleichungssystem der Regelung zur Verfügung, deren Realisation, da es sich um eine rechnergestützte Prozeßregelung handelt, durch entsprechende Programme erfolgt. Beim Start der Regelung bedeutet die Angabe der Anfangswerte der einzelnen Veränderlichen ein gewisses Problem. Am zweckmäßigsten sollen diese durch Meßwerte ersetzt werden. Die Bestimmung des Wertes von $\vartheta_1(0)$ ist schon umständlicher, da dieser Wert von den vorigen Werten der Größen $\vartheta_{OUT}(t)$ und $\vartheta_{IN}(t)$ abhängt. Aus diesem Grund kann dieser Wert nur als Ergebnis eines längeren Meßvorganges durch Schätzung ermittelt werden.

Besprechung der bisher durchgeführten Arbeiten, weitere Entwicklungsmöglichkeiten

Besprechung

Nach dem bisher Gesagten dürfen wir behaupten, daß das neue Heizreglersystem die Nachteile der heutigen Reglersysteme beseitigt, in dem

- zwischen dem resultierenden Wärmestrom und der Außentemperatur kein linearer Zusammenhang vorausgesetzt wird;
- durch Einreihen der wärmetechnisch unterschiedlichen Räume eines Gebäudes in Gruppen ähnlicher Räume werden Heizuntersysteme (Zonen) gebildet, die voneinander unabhängig geregelt werden;
- die effektive Innenlufttemperatur und die Temperatur der Innenoberfläche der Umfassungskonstruktionen je Zone gemessen wird;
- mit entsprechenden Optimierungsprogrammen optimale Heizung verwirklicht werden kann.

Das vorgetragene System ist in seiner Struktur und Funktionsweise in Ungarn ganz neu, da abgesehen von einigen speziellen Anlagen Mikrorechner für solche Zwecke noch nicht verwendet werden. Das verwendete Regelprinzip, das Probe-Modellreferenz-Prinzip, die Anwendung einer adaptiven Regelung mit einer Schätzung um einen Schritt vorwärts bedeutet international gesehen auch eine Neuigkeit, und wurde nach dem Wissen des Verfassers für solche Zwecke noch nicht verwendet.

In der heutigen Phase der Arbeit werden einige in BASIC-Programmierungssprache geschriebene Programteile an einem Rechner vom Typ TPA aufgearbeitet. Ein Vergleich der Meß- und der Berechnungsergebnisse und das erforderliche Präzisieren bedeutet die nächste Aufgabe. Danach kann der geschlossene Kreis untersucht werden, wonach der Vergleich mit den in einem konkreten Raum gewonnenen Messungen erfolgen kann.

Weitere Entwicklungsmöglichkeiten

Die Verwendung eines Mikrorechners im System ermöglicht die Durchführung weiterer Funktionen. Während der Zeit, in der der Rechner über freie Rechenkapazität verfügt, können die nachstehenden Aufgaben — nach entsprechender Modifikation — durchgeführt werden:

Belichtungssteuerung, Energiesystemüberwachung, Einbruch- und Brandschutz, Anschluß an das Kreisregelungssystem, Protokollierung, usw.

Diese neue Funktionen erfordern nur die Montage entsprechender Initiatoren. Das übrige kann an der vorhandenen Hardware mit entsprechender Anpassungen und dem Erstellen des nötigen Programmes durchgeführt werden. Eventuell müssen weitere Peripheriegeräte angeschlossen werden.

Weitere Möglichkeiten bestehen darin, daß das vorhandene System zum Sammeln von Meßergebnissen und zum Studieren von wärmeenergetischen Vorgängen ohne Anlegen von zusätzlichen Meßinstrumenten verwendet werden kann.

Zusammenfassung

Das Entstehen dieser Studie ist durch zwei Hauptgründe motiviert. Der erste liegt in der enormen Energiepreissteigerung. Als zweiter Grund kann die Tatsache genannt werden, wonach infolge der Modernisierung der verwendeten Baukonstruktionen die konventionellen analogen Heizsystemregler den an sie gestellten Anforderungen nicht mehr entsprechen können.

Die bei den Baukonstruktionen eingetretene Modernisierung, die Verbesserung der Wärmeisolierungen haben die Bedeutung der Auswirkung von den bisher in dem Wärmeenergieumlauf von Räumen vernachlässigten Wärmestromkomponenten, bezogen auf die Resultierende, erhöht. Diese Veränderung hat aber die Fehler der konventionellen analogen Heizsystemregler hervorgehoben.

Um diese Fehler beseitigen zu können, scheint die Ausarbeitung eines nach Struktur und Funktion neuen energiesparenden Heizsystemreglers vorteilhaft zu sein.

Diese Studie ist die erste Entwurfsphase eines solchen Reglers, und sie bietet einen kurzen Überblick über den theoretischen Strukturentwurf und der Funktionsweise des Reglersystems.

Literatur

1. GÁBOR L.—ZÖLD A.: Energiagazdálkodás az építészetben. Akadémiai Kiadó, Budapest 1971.
2. ZÖLD A.: Építészeti, épületszerkezeti és épületgépészeti eszközök együttes alkalmazása az energiafogyasztás ésszerűsítése érdekében. Akadémiai Doktori Értekezés, 1980.
3. BLAHOV, N. SZ.: A gépi matematika numerikus módszerei. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
4. LINDORFF, DAVID P.: Theory of Sampled-Data Systems, John Wiley and Sons Inc. New York, 1965.
5. D. LANDAU D.: A Survey of Model Reference Adaptive Techniques—Theory and Applications. Automatika, 353 (1974).
6. BÁNHIDI L.: Zárt terek hőérzeti méretezése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976.
7. EDGAR B.: Stability Analysis of Discrete-Time Adaptive Control Schemes. IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. AC-25. 1980. aug. p. 710—717.
8. MAGYAR P.—LAKATOS L.: Áramirányítós rendszerek szabályozása, BME Mérnök-továbbképző Intézet, 1978.
9. WATANABE K.—ITO M.: A process-Model Control for linear systems with delay. IEEE Transaction on Automatic Control. 1981. Dec. Vol. AC-26. Num. 6. p. 1261—1269.

János KANCSÁR H-1139 Budapest Teve u. 8—10