

## \*) Optimierungsideen für den Betrieb von HLK-Anlagen

Jürg Tödtli  
 Fachgruppe für Automatik  
 ETH Zürich

Zusammenfassung

Die Verwendung der Mikroelektronik in Steuereinrichtungen von HLK-Anlagen bietet enorme Möglichkeiten zur Informationsverarbeitung. Viele Ingenieure stellen sich heute die Frage, wie dieses Potential genutzt werden kann, damit die Steuerungen einen Beitrag zur Verbindung des Energieverbrauchs leisten. Fünf Regeln, die bei der Suche nach Optimierungsideen hilfreich sein können, werden erklärt und anhand von Beispielen erläutert: 1. stationäre Betriebszustände verbessern, 2. wärmespeichernde Elemente berücksichtigen - mit dynamischen Modellen optimieren, 3. Prognosen und Statistiken über das Wetter verwenden, 4. Anpassung der Steuerung an Steuerstrecke verbessern, 5. vermehrtes Systemdenken.

## Einleitung

Wie sollen die enormen potentiellen Fähigkeiten zur Informationsverarbeitung, die die Steuereinrichtungen von HLK-Anlagen durch den Einbau von Mikroelektronik erlangen, genutzt werden, damit sie einen Beitrag zur Verminderung des Energieverbrauchs leisten? Diese Fragen stellen sich heute viele Ingenieure, die Steuer- und Regelstrategien entwerfen. Dazu gehören jene, die Apparate für einen ganz bestimmten Zweck entwickeln, wie z.B. einen Heizungsregler für zentrale Warmwasserheizungen, Apparate übrigens, denen der Benützer gar nicht ansieht, dass sie Mikroelektronik enthalten. Zweitens gehören dazu jene Ingenieure, die Programme für speicherprogrammierbare Leitsysteme schreiben.

Möchte ein solcher Ingenieur bei der Suche nach einer neuen Optimierungsidee Erfolg haben, so benötigt er gute Kenntnisse über das Verhalten der Steuerstrecke (zu steuerndes System), Phantasie, und oft auch Glück. Weiter dürften ihm dabei gewisse Regeln behilflich sein. Ein Satz von solchen Regeln stelle ich in diesem Vortrag vor, und zwar aus zwei Gründen: Erstens in der Hoffnung, dass sie dem

einen oder andern von Ihnen bei der Lösung eines bestimmten Problems mithelfen, eine Optimierungsidee zu finden. Zweitens dient mir der Satz von Regeln dazu, etwas Ordnung in den Vortrag über Optimierungsideen zu bringen, indem ich jede Idee, die ich präsentiere, als Anwendungsbeispiel einer der Regeln zuordne, ohne natürlich behaupten zu wollen, dass die Idee mit dieser Regel gefunden worden sei. Dabei sollte man nicht vergessen, dass jede Ordnung von Ideen die Gefahr in sich birgt, die Augen für grundsätzlich neue Ideen, welche nicht in den Rahmen der gewählten Ordnung passen, zu verschliessen.

Ich werde nicht nur neue, bereits realisierte Optimierungsideen, die einen Einblick in den heutigen Stand der Technik erlauben, erwähnen, sondern auch einige alte bekannte Ideen, wenn sie zum Verständnis einer Regel beitragen oder als Ausgangspunkt für weitere Ueberlegungen dienen. In der Absicht, zum Bild über mögliche zukünftige Entwicklungen beizutragen, werde ich zudem einige neue, noch nicht realisierte Optimierungsideen erwähnen, wie sie unter Theoretikern und Praktikern heute diskutiert

---

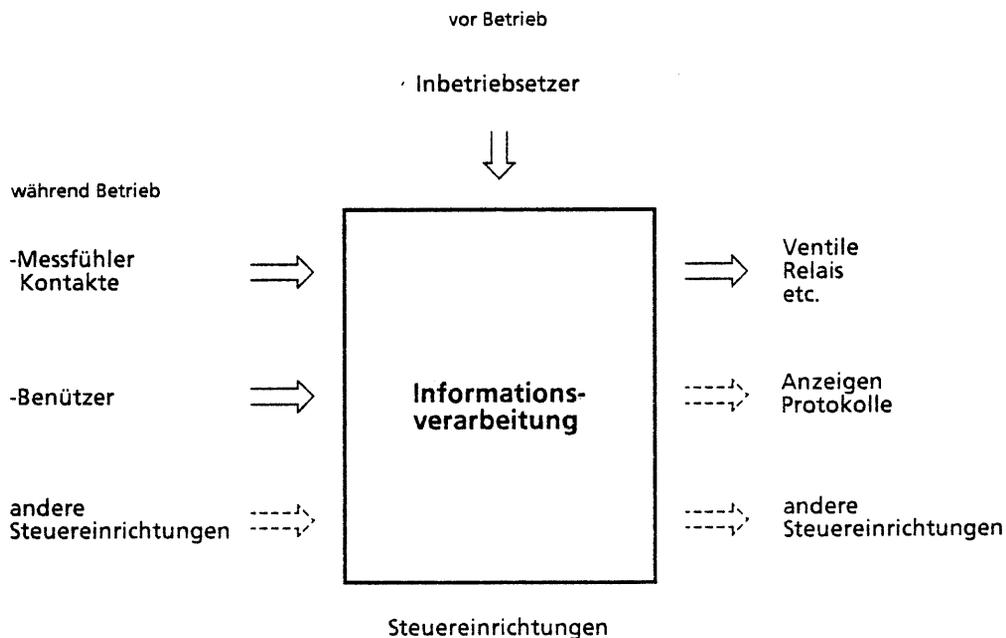
\*) Red.: Der Autor hat die vorliegende Arbeit im Frühjahr 1984 anlässlich der 55. Tagung der SGA: "Regeltechnik im Energiehaushalt von Gebäuden" präsentiert.  
 Seine neue Adresse lautet: c/o Landis & Gyr Zug AG, 6301 Zug.

werden. Sie mögen noch unausgereift sein und es kann sein, dass eine genauere Analyse einer solchen Idee zeigen wird, dass ihre Realisierung ein schlechtes Kosten/Nutzen-Verhältnis aufweist.

Die Aufzählung von Optimierungsideen ist unvollständig und wohl auch etwas einseitig. Meine Sicht ist dadurch geprägt, dass ich Automatiker bin, und mich als solcher seit einiger Zeit neben der Theorie mit Anwendungsfragen befasse. Im Vordergrund stehen dabei Arbeiten, welche die Fachgruppe für Automatik der ETHZ gemeinsam mit der Firma Landis & Gyr durchführte. Weiter möchte ich die Zusammenarbeit mit der Firma Schweizer AG in Hedingen und mit dem Oekozentrum in Langenbruck erwähnen, und einen projektorientierten Nachdiplomkurs, den die Fachgruppe für Automatik im Wintersemester 1982/83 veranstaltete, und an dem Mitarbeiter aus mehreren Geräteherstellerfirmen aktiv teilnahmen.

Als Optimierungskriterium steht der Energieverbrauch im Vordergrund. Unter Energieverbrauch soll dabei das verstanden werden, was in der Terminologie der Energiewirtschaft Endenergieverbrauch genannt wird, also der Verbrauch an Heizöl, elektrischem Strom etc.

Seit in Steuereinrichtungen Mikroprozessoren verwendet werden, ist es viel üblicher als vorher, eine Steuereinrichtung als ein informationsverarbeitendes System gemäss Figur 1 zu betrachten oder als eine Entscheidungseinheit, ein System also, das fortwährend aufgrund der ihr zugeflossenen Information Entschiede über die Wahl der auszugebenden Steuerbefehle trifft. Das Verfahren oder die Strategie, nach denen die Steuereinrichtung die Entschiede fällt, wird heute oft als Steuerverfahren oder Steuerstrategie bezeichnet. Bei Regelungen, die meist als ein Spezialfall von Steuerungen betrachtet werden, wird dann entsprechend von Regelverfahren und Regelstrategien gesprochen. Wenn in diesem Vortrag von Optimierungsideen die Rede ist, so sind Optimierungsideen für solche Steuerstrategien gemeint. Wichtige Fragen, wie jene nach geeigneten Signalen für die Informationsübertragung oder die Frage, ob für die Informationsverarbeitung ein 4- oder 16-bit Mikroprozessor oder ein Mehrprozessorsystem verwendet werden soll, werden dabei ausgeklammert.



Figur 1 Steuereinrichtung als informationsverarbeitendes System aufgefasst

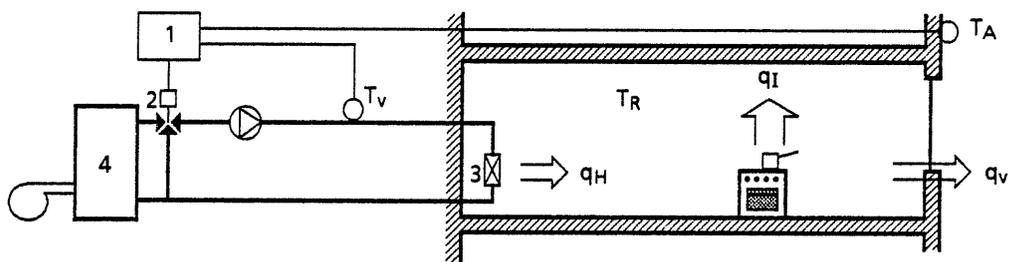
1. Regel: Stationäre Betriebszustände verbessern

Bei der Optimierung nach dieser Regel werden nur stationäre Betriebszustände betrachtet. Die Optimierung wird mit einem Modell für den stationären Betriebszustand durchgeführt, oder in anderen Worten, mit einem stationären oder statischen Modell. Dynamische Vorgänge, insbesondere solche, die mit Wärmespeicherung zu tun haben, werden nicht betrachtet.

Beispiel 1: Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung für zentrale Warmwasserheizungen.

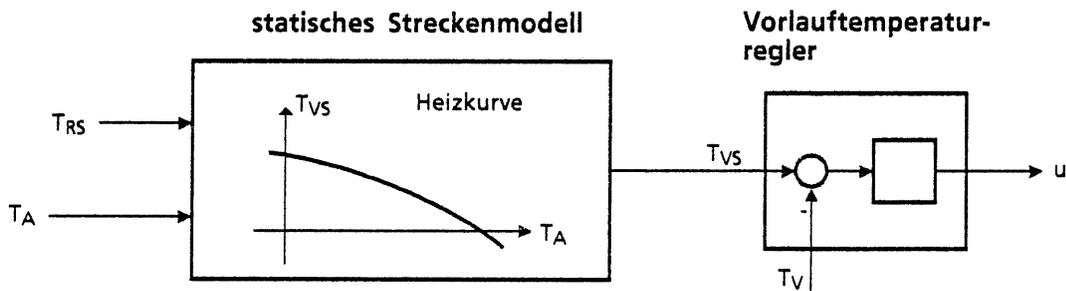
Das ist eine alte, sehr bekannte Idee, die in viele Heizungsregler Einzug gefunden hat.

Das Prinzip ist anhand von Figur 2 erklärt. Der Heizungsregler 1 wirkt auf das Mischventil 2 und als Messwerte werden dem Heizungsregler die Vorlauftemperatur  $T_V$  und die Aussentemperatur  $T_A$  zugeführt. Was macht er mit diesen Messwerten? Durch Verstellen des Mischventils 2 regelt er die Vorlauftemperatur  $T_V$  auf einen Sollwert  $T_{VS}$ . Diesen Sollwert  $T_{VS}$  soll der Heizungsregler nun aufgrund von  $T_A$  so wählen, dass gemäss dem Wunsch nach geringem Energieverbrauch der vom Heizkörper 3 in den Raum fließende Energiestrom  $q_H$  gerade ausreicht, die Raumtemperatur  $T_R$  auf einem gewünschten Wert  $T_{RS}$  zu halten. Diese Forderung gibt eine Beziehung zwischen  $T_A$  und  $T_{VS}$ , die Heizkurve genannt wird und ungefähr den in Figur 3 gezeichneten Verlauf hat. Sie berücksichtigt nur stationäre Vorgänge.



- 1 : Heizungsregler
- 2 : Mischventil
- $T_A$  = Aussentemperatur
- $T_R$  = Raumtemperatur
- $T_V$  = Vorlauftemperatur
- $q_V$  = Wärmestrom vom Raum nach aussen (= Transmissionswärmeleistung + Lüftungsverluste)
- $q_I$  = Wärmestrom von internen Wärmequellen (elektrische Apparate, Menschen, absorbierte Sonnenstrahlung, etc.)
- $q_H$  = Wärmestrom, den der Heizkörper an den Raum abgibt
- 3 : Heizkörper
- 4 : Heizkessel

Figur 2 Schematische Darstellung zur witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung.



Figur 3 Signalflussplan zur witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung

Als Vorbereitung für weitere Ueberlegungen soll noch ein Blick auf die Herleitung einer Gleichung, die die Heizkurve repräsentiert, geworfen werden. In einem stationären Zustand gelten näherungsweise folgende Beziehungen

$$q_V = k_1 (T_R - T_A)$$

$$q_H = k_2 (T_V - T_R)^\gamma, \quad \text{z.B. } \gamma = 1.3$$

$$q_H + q_I = q_V$$

$k_1$  und  $k_2$  sind Konstanten. Löst man die drei Gleichungen nach  $T_V$  auf, und setzt man für  $T_R$  den gewünschten Wert  $T_{RS}$  ein, so erhält man diejenige Vorlauftemperatur  $T_V$ , die nötig ist, damit die Raumtemperatur  $T_R$  gerade auf  $T_{RS}$  gehalten wird. Man erhält also den gewünschten Sollwert  $T_{VS}$ :

$$T_{VS} = (s \cdot (T_{RS} - T_A) + h)^{1/\gamma} + T_{RS} \quad (1)$$

wobei  $s = k_1/k_2$  = Steilheit der Heizkurve  
 $h = -(q_I/k_2)$  = Niveau der Heizkurve

Da die Grösse  $q_I$  nicht gemessen wird, wird angenommen, dass sie konstant ist. Als konstanten Wert nimmt man dabei, wieder um der Forderung  $T_R \geq T_{RS}$  zu genügen, die untere Grenze des Variationsbereiches von  $q_I(t)$ . Mit  $q_I$  werden auch die beiden Grössen  $s$  und  $h$  zu Konstanten.

(1) ist also die Gleichung, die die Heizkurve darstellt. Ihre beiden Parameter  $s$  und  $h$  sind von der Heizanlage und vom Gebäude abhängig. Sie können gewöhnlich über Knöpfe oder Schieber, die auf der Frontplatte des Heizungsreglers angebracht sind, eingestellt werden. Dieses Einstellen der Heizkurve ist eine schwierige Aufgabe. Sie wird häufig "zu hoch" eingestellt, was zwar gewährleistet, dass die Raumtemperatur  $T_R$  nicht unter den gewünschten Wert  $T_{RS}$  geht, aber Energieverschwendung zur Folge hat. (Jedes  $^{\circ}\text{C}$ , das  $T_R$  zu hoch ist, gibt einen jährlichen Energiemehrverbrauch von ungefähr 6-7%.)

(1) ist eine Beziehung, die für den stationären Betrieb des Systems gültig ist. Man kann

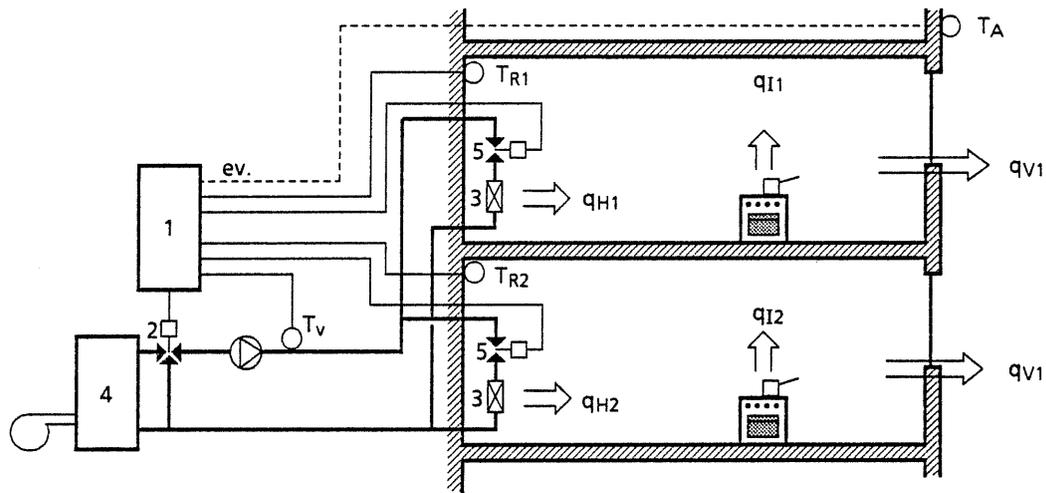
deshalb die beschriebene und in Figur 3 dargestellte Steuerung, die auf der Heizkurve beruht, als eine auf einem stationären Prozessmodell basierende Steuerung auffassen. Dass die Steuerung auf einem stationären Modell basiert, heisst nicht, dass sich keine Grösse mit der Zeit ändern darf.  $T_A$  wird sich immer ändern und  $T_{RS}$  ändert sich bei Heizungsreglern, die über eine Vorrichtung zur automatischen Nachtabenkung verfügen. Die Steuerung funktioniert trotz diesen zeitlichen Aenderungen häufig gut. Auf einige Ausnahmen wird noch eingegangen.

Zum Schluss dieses Beispiels sollen noch einige Erweiterungen der beschriebenen Steuerung erwähnt werden, die ebenfalls auf der Betrachtung stationärer Zustände beruhen: Windfühler, Sonnenfühler, Vorrichtung zur automatischen Nachtabenkung.

Beispiel 2: Zentrale Warmwasserheizungen mit Raumtemperaturregelungen für alle Räume.

Ein Nachteil der in Beispiel 1 beschriebenen Steuerung ist der, dass jedes Mal, wenn der Wärmestrom  $q_I(t)$  der internen Wärmequelle den für die Heizkurve angenommenen, minimalen Wert um einen bestimmten Betrag überschreitet, die Raumtemperatur  $T_R$  über den Sollwert  $T_{RS}$  geht und dieser zusätzliche Betrag von  $q_I$  nicht genutzt wird und somit Energie verschwendet wird. Ein Steuerungskonzept, das den genannten zusätzlichen Betrag von  $q_I(t)$  nutzt und erst noch berücksichtigt, dass er von Raum zu Raum verschieden sein kann, erhält man, wenn für alle Räume Raumtemperaturregelungen eingeführt werden. Je besser ein Gebäude isoliert ist, desto bedeutender ist der Vorteil dieses Steuerungskonzepts, da mit zunehmender Isolierung das Ausmass der Schwankungen der internen Wärmequellen im Vergleich zur Heizleistung  $q_H$  zunimmt. Es gibt verschiedene Varianten dieses Steuerungskonzepts.

Die heute verbreitetste Variante ist die Verwendung von thermostatischen Heizkörperventilen in Ergänzung zu einer witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung. Die thermostatischen Heizkörperventile schliessen automatisch, wenn sich  $q_I(t)$  vergrössert und sorgen dafür, dass sich  $q_H(t)$  entsprechend verkleinert.



- |                           |  |
|---------------------------|--|
| 1 : Heizungsregler        | 3 : Heizkörper   |
| 2 : Mischventil           | 4 : Heizkessel   |
|                           | 5 : ferngesteuertes Heizkörperventil   |
| $T_A$ = Aussentemperatur  | $q_V$ = Wärmestrom vom Raum nach aussen (= Transmissionswärmeleistung + Lüftungsverluste)                        |
| $T_R$ = Raumtemperatur    | $q_I$ = Wärmestrom von internen Wärmequellen (elektrische Apparate, Menschen, absorbierte Sonnenstrahlung, etc.) |
| $T_V$ = Vorlauftemperatur | $q_H$ = Wärmestrom, den der Heizkörper an den Raum abgibt  |

Figur 4 Schematische Darstellung zur Warmwasserheizung mit elektronischen, im zentralen Heizungsregler implementierten Einzelraumtemperaturregelungen.

Eine weitere Variante besteht in elektronischen Raumtemperaturregelungen, deren Reglerfunktionen alle im zentralen Heizungsregler implementiert sind. Diese Lösung erfordert elektrische Verbindungsleitungen von den Drosselventilen an den Heizkörpern und von den Raumtemperaturfühlern zum zentralen Steuergerät (vgl. Figur 4). Diese Variante hat gegenüber jener mit den thermostatischen Heizkörperventilen verschiedene Vorteile. Erstens erlaubt sie es, dass der Benutzer für jeden Raum ein eigenes Raumtemperatursollwertprogramm eingeben kann. Zweitens kann ein PI-Regelverhalten oder etwas Ähnliches erreicht werden, was im Gegensatz zu den thermostatischen Heizkörperventilen, die ein P-Verhalten haben, bleibende Regelabweichungen zwischen  $T_R$  und  $T_{RS}$  ausschliessen. Da das zentrale Steuergerät die Stellung der einzelnen Heizkörperventile kennt, sind Alternativen zur Heizkurve möglich. Der Heizungsregler kann z.B. durch einen übergeordneten Regelkreis den Vorlauftemperatursollwert  $T_{VS}$  jederzeit so wählen, dass die mittlere Ventilstellung auf einen vorgegebe-

nen günstigen Wert innerhalb des Verstellbereichs zu liegen kommt [1]. Ein solches Steuerungskonzept ist im Rahmen eines Forschungsvorhabens, an dem die Stadt Zürich, die EMPA und die Arbeitsgruppe Plenar beteiligt sind, in einem 70 Jahre alten Zehnfamilienhaus der Wohnkolonie "Limmatstrasse" eingesetzt. Eine andere Alternative wäre, dass der Heizungsregler den Vorlauftemperatursollwert  $T_{VS}$ , wie es ähnlich bei Lüftungsanlagen gemacht wird, so wählt, dass kein Heizkörperventil in der Sättigung ist, aber mindestens ein Ventil gerade geöffnet. Mit beiden Alternativen soll gewährleistet werden, dass einerseits die Heizkörperventileinstellungen in einem möglichst guten Arbeitsbereich liegen und die Vorlauftemperatur andererseits auch nicht zu hoch wird.

#### Beispiel 3:

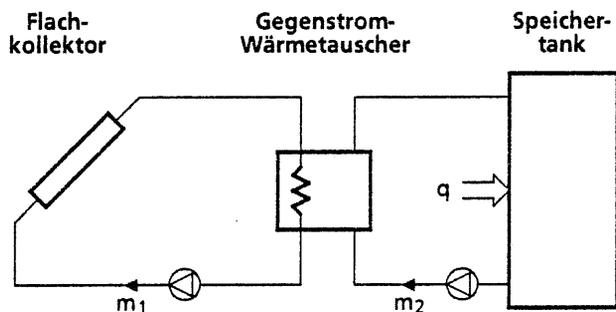
In Sonnenenergieanlagen tritt oft das in Figur 5 gezeigte Teilsystem auf, bestehend aus einem Flachkollektor mit einer Flüssigkeit als Wärmeträger, einem Gegenstromwärmetauscher

und einem Speicher. Man wird erwarten, dass der dem Speicher zugeführte Wärmefluss  $q$  bei fixem Massenfluss  $m_2$  umso grösser ist, je grösser  $m_1$  gewählt wird. In [2] wurde ausschliesslich mit stationären Modellen mathematisch gezeigt, dass  $q$  über einem bestimmten optimalen Wert  $m_{1 \text{ opt}}$  wieder abnimmt und dass dieser optimale Wert durch folgende Formel gegeben ist:

$$m_{1 \text{ opt}} = \left( 1 + \frac{(KF)_k}{(KF)_{WT}} \right) \cdot m_2 \frac{c_2}{c_1}$$

- wobei  $c_1$  = spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit im Flachkollektor  
 $c_2$  = spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit im Speicher  
 $(KF)_k$  = KF-Wert des Flachkollektors  
 $(KF)_{WT}$  = KF-Wert des Wärmetauschers

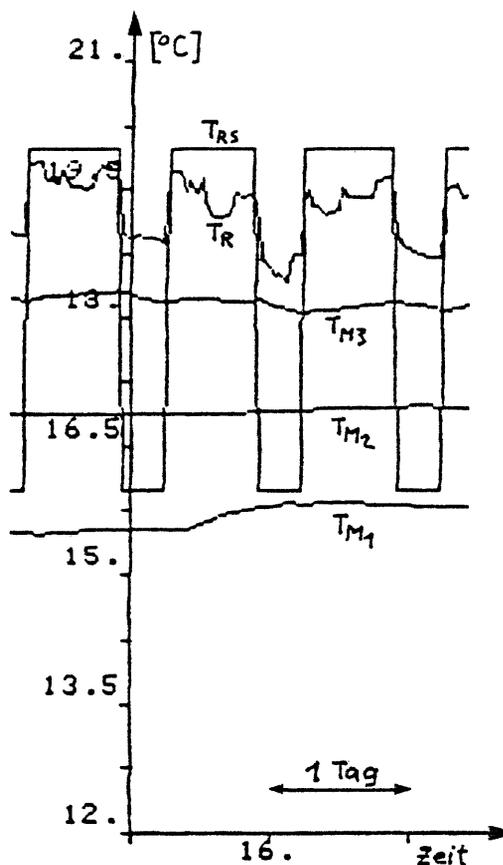
Eine plausible Erklärung für diesen Sachverhalt ist ebenfalls in [2] gegeben.



Figur 5 Teil einer Sonnenenergieanlage

Weitere Beispiele:

- Variation der Pumpendrehzahl (z.B. 3-stufig) in Warmwasserheizungen, um elektrische Energie zu sparen (realisiert).
- Variable Ventilator Drehzahlen in Lüftungsanlagen (VL-Anlagen), um elektrische Energie zu sparen (realisiert).
- Gleitenlassen der Kesseltemperaturen mit einem bestimmten Abstand über der Vorlauf-temperatur (realisiert).
- Differenziertere Behaglichkeitsbedingungen anstelle der Forderung nach einer minimalen Raumlufttemperatur  $T_{RS}$ .
- Die Wärmeproduktionseinheiten eines polyvalenten Energiesystems werden jederzeit energie-kostenoptimal eingesetzt (für einige Fälle realisiert).



- $T_R$  = Raumtemperatur  
 $T_{RS}$  = Raumtemperatursollwert  
 $T_{Mi}$  = Temperaturen in Aussenmauer

Figur 6 Simulation der witterungsgeführten Vorlauf-temperaturregelung bei einem schweren Gebäude. Quelle [3]

Alle genannten Ideen beruhen auf Betrachtungen von stationären Zuständen. Die zugehörigen Steuerstrategien können jedoch, wie schon für Beispiel 1 erwähnt wurde, auch bei zeitlich ändernden Einflüssen gut funktionieren. Wo liegen nun die Grenzen dieser "stationären Betrachtungsweise"? Man überschreitet sie überall dort, wo der Einfluss wärmespeichernder Elemente gross wird. In diesen Fällen kann es sein, dass mit Steuerungen, die auf stationären Modellen beruhen, Schwierigkeiten auftreten oder potentielle Verbesserungsmöglichkeiten ungenutzt bleiben. Diese Mängel können vermieden werden, wenn man dazu übergeht, Modelle zu benutzen, welche die durch die Wärmespeicherung hervorgerufenen dynamischen Vorgänge auch berücksichtigen. Diese Überlegungen führen auf die 2. Regel, die der Inhalt des nächsten Abschnitts ist. Zuvor noch ein

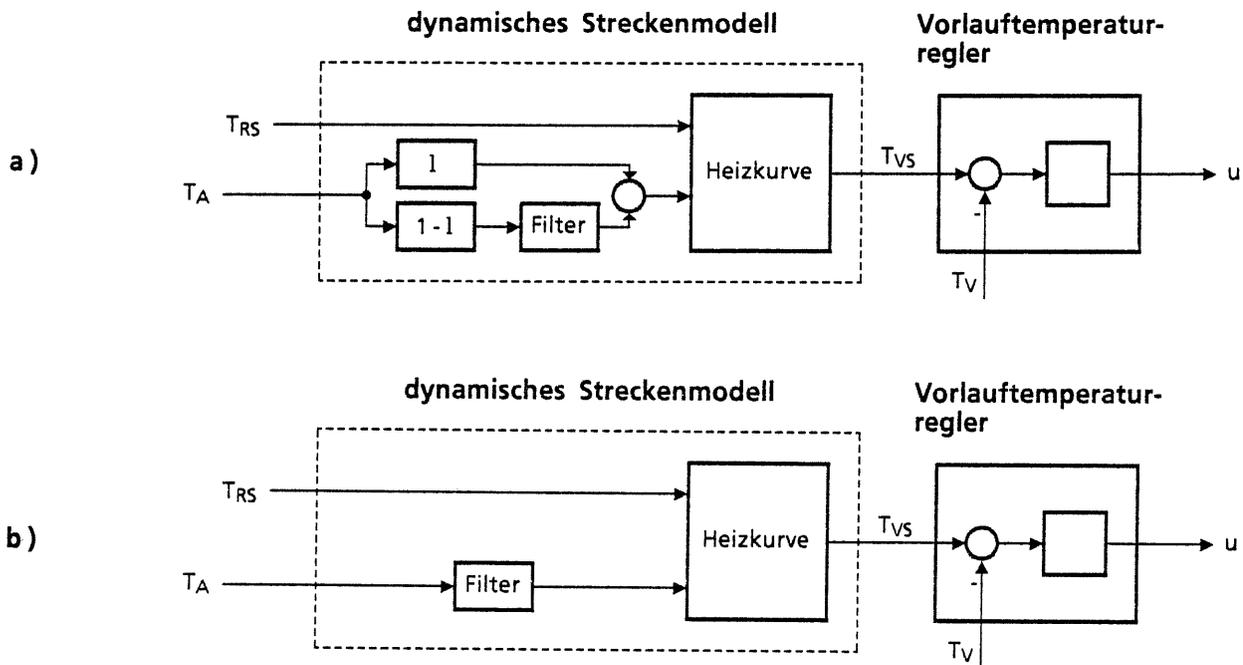
Beispiel, das die Wirkung von Wärmespeichern und die Schwäche von Steuerungen, die auf einem stationären Modell basieren, illustriert. Figur 6 zeigt den Raumtemperatursollwert und den Raumtemperaturistwert für den Fall, wo die Steuerung, die im 1. Beispiel beschrieben wurde, auf ein massiv gebautes Haus angewendet wird. Man erkennt, dass die Raumtemperatur dem Sollwert nur schlecht zu folgen vermag. Die Figur zeigt sicher auch deutlich, warum in solchen Fällen, wahrscheinlich in Analogie zur Trägheit mechanischer Systeme, von thermischer Trägheit gesprochen wird.

2. Regel: Wärmespeichernde Elemente berücksichtigen - mit einem dynamischen Modell optimieren

Modelle, welche die durch Wärmespeicher hervorgerufenen instationären Vorgänge berücksichtigen, sind, im Gegensatz zu den bisher betrachteten stationären oder statischen Modellen, dynamische Modelle, oder wie sie auch genannt werden, instationäre Modelle. Mathematische Modelle dieser Art sind meist Differentialgleichungen, in denen zeitliche Ableitungen ( $d/dt$  oder  $\partial/\partial t$ ) vorkommen.

Beispiel 1: Verzögerung und Dämpfung der Aussentemperatur in witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelungen.

Schon bei einer Aussenmauer aus Backstein, die 40 cm dick ist, folgt der zeitliche Verlauf des vom Raum in die Mauer fließenden Wärmestroms einer täglichen sinusförmigen Aussentemperaturschwankung mit einer Verzögerung von über 12 Stunden [4]. Derjenige Teil der Heizleistung  $q_H$  (s. Figur 2), der diesen Teil der Verluste deckt, sollte der Aussentemperatur mit der gleichen Verzögerung folgen und erst noch stark gedämpft sein. Eine Steuerstrategie, die dies berücksichtigt, ist in Figur 7a dargestellt. Der Filter würde das Eingangssignal im genannten Beispiel um den Betrag von mehr als 12 Stunden verzögern und stark dämpfen. Eine ähnliche Steuerstrategie ist die in Figur 7b dargestellt, die bereits realisiert wird. Sie beruht auf der Annahme, dass ein Haus für Aussentemperaturschwankungen ein Tiefpassfilter sei [5]. Die Filterzeitkonstanten betragen je nach Gebäude zwischen 1 und 5 Tagen.



Figur 7 Signalflussplan der witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung mit verzögerter Aussentemperatur.

Beispiel 2: Schaltzeitpunktoptimierung.

Wird z.B. bei dem in Figur 2 dargestellten System die Heizung während einem reduzierten Nachtbetrieb ausgeschaltet und sollte die Raumtemperatur morgens um 8 Uhr auf  $20^{\circ}\text{C}$  sein, so genügt es nicht, dass der Heizungsregler die Heizung um 8 Uhr einschaltet. Er muss sie umso früher einschalten, je grösser die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes ist. Um Energie zu sparen, soll er sie jedoch möglichst spät einschalten. Die Fähigkeit eines Heizungsreglers, die Heizung in einem solchen Fall abhängig vom thermischen Zustand des Gebäudes und von der Aussentemperatur möglichst spät einzuschalten, doch aber früh genug, dass um 8 Uhr die gewünschten  $20^{\circ}\text{C}$  erreicht sind, wird Schaltzeitpunktoptimierung genannt. Die analoge Funktion nach einer Temperaturabsenkung wird gleich genannt. Diese Idee hat in verschiedenen Formen in viele neue Heizungsregler Einzug gefunden. Oft werden solche Heizungsregelungen durch den Begriff "optimierte Heizungsregelungen" oder ähnlich gekennzeichnet, eine nach meiner Meinung unglückliche Einengung des Begriffs "optimiert". Um die beschriebene Funktion durchführen zu können, muss das Gerät die Wärmekapazität des Gebäudes kennen. Oft kann diese über einen Knopf an der Frontplatte des Gerätes eingestellt werden.

Es soll an dieser Stelle auf einen weiteren Aspekt der 1. und 2. Regel hingewiesen werden. Werden die Steuereinrichtungen als entscheidungsfällende Einheiten aufgefasst, sind die ausschliesslich nach der 1. Regel konzipierten solche, die bei ihren Entscheidungen nur die Gegenwart berücksichtigen, die Zukunft also nicht miteinbeziehen, d.h. nur kurzfristig entscheiden. Die nach der 2. Regel konzipierten Steuereinrichtungen hingegen berücksichtigen die Zukunft. Sie entscheiden langfristig. Der in Beispiel 2 beschriebene Heizungsregler mit Schaltzeitpunktoptimierung zum Beispiel "denkt" schon lange vor 8 Uhr daran, dass die Raumtemperatur um 8 Uhr auf  $20^{\circ}\text{C}$  sein sollte und berücksichtigt dies bei seinen Entscheidungen.

Was in den bisherigen zwei Beispielen gilt, dass nämlich ein dynamisches Modell wegen der wesentlichen Wirkung wärmespeichernder Gebäudeteile eingeführt wurde, gilt natürlich erst im Speichertank gesammelt werden soll? Da in

recht für Systeme, die Elemente wie Speichertanks enthalten, Elemente also, die nur die Funktion der Wärmespeicherung haben. Ein solcher Fall wird im nächsten Beispiel behandelt.

Beispiel 3: Energieoptimales Laden eines durchmischten Speichers in einer Sonnenkollektoranlage (Figur 5).

Unter der Annahme, dass der Speichertank ideal durchmischt ist, dass die Speicherwirkung der Rohrleitungen und des Wärmetauschers vernachlässigbar sind, und dass eine Steuereinrichtung die Massenflüsse  $m_1$  und  $m_2$  innerhalb vorgegebener Grenzen variieren kann, wurde für das in der Figur 5 dargestellte System das folgende Problem mathematisch untersucht [2]: Wie müssen  $m_1$  und  $m_2$  in einem vorgegebenen Zeitintervall variiert werden, wenn während diesem Intervall möglichst viel Wärmeenergie dieser Problemstellung der Speichertank ein wesentliches Element ist, muss zu ihrer Lösung ein dynamisches Modell beigezogen werden. Es konnte folgendes Resultat hergeleitet werden:  $m_1$  und  $m_2$  müssen für jeden Zeitpunkt so gewählt werden, dass der Wärmestrom  $q$  in diesem Zeitpunkt maximal wird. Dieses einfachere Problem kann mit einem stationären Modell gelöst werden. Das Resultat beweist, dass in diesem Fall nichts gewonnen wird, wenn die Steuereinrichtung langfristig entscheidet, dass also eine kurzfristig und eine langfristig entscheidende Steuereinrichtung gleich gut sind, wenn der Wärmeenergiegewinn das Gütekriterium bildet.

Wenn dieses Resultat nicht erstaunt, der ist vielleicht überrascht, dass, wie ebenfalls in [2] gezeigt wurde, ein anderes Resultat auftritt, wenn anstelle des Wärmeenergiegewinns der Nettoenergiegewinn, d.h. der Wärmeenergiegewinn, der um die für den Antrieb der Pumpen aufgewendete Energie reduziert ist, als Gütekriterium verwendet wird (dabei kann die für die Pumpen gebrauchte Energie entsprechend ihrer höheren Wertigkeit auch mehrfach gezählt werden). Dann ist die langfristig entscheidende Steuereinrichtung der kurzfristig entscheidenden überlegen. Da bei numerischen Rechnungen kein Beispiel gefunden wurde, wo diese Überlegenheit gross ist, besteht kein Anlass, in der Praxis diese bessere Steuerung einzusetzen. Das Resultat ist natürlich trotz-

dem interessant, weil es darauf hinweist, dass auch in Fällen, wo es nicht offensichtlich ist, langfristig entscheidende Steuereinrichtungen den kurzfristig entscheidenden überlegen sein können und weil diese Ueberlegenheit nicht immer so klein zu sein braucht.

Für die in der Theorie der Automatik Interessierten ist noch beigefügt: das System wurde durch ein nichtlineares Zustandsraummodell 1. Ordnung mit der Speichertemperatur als Zustandsvariable dargestellt, auf das dann das Maximum-Prinzip von Pontrjagin (z.B. [6]) angewandt wurde.

#### Weitere Beispiele:

(sind nach meinen Kenntnissen alle noch nicht in der Praxis eingesetzt).

- energieoptimales Laden eines geschichteten Wärmepumpenboilers mit einer elektrisch angetriebenen Wärmepumpe [7] (für ein in [7] betrachtetes Beispiel wurde eine Energieeinsparung von 30% gerechnet, experimentell noch nicht bestätigt);
- witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung für Gebäude, die mit einer Energiefassade oder einer anderen ähnlichen Einrichtung zur passiven Sonnenenergienutzung ausgerüstet sind (die Probleme beim Einsatz einer Energiefassade und einer konventionellen witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung der Warmwasserheizung zeigen sich im Oekozentrum Langenbruck, wo seit einem Jahr Betriebserfahrungen mit einem solchen System gesammelt werden);
- die in [8] vorgeschlagene Betriebsführung eines Fernwärmenetzes;
- Alternativen zum PI-Regler, wie zum Beispiel Zustandsregler mit Zustandsestimatoren oder Smith-Prädiktor Regler (z.B. in [9]) (in anderen Anwendungsgebieten schon eingesetzt).

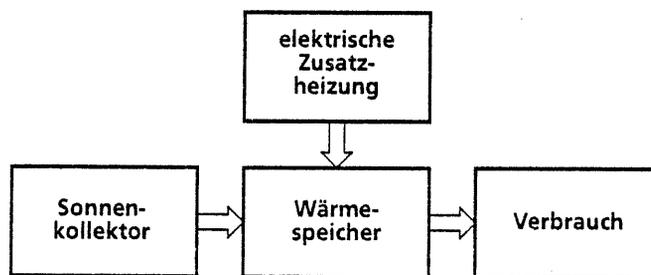
Verwendet man beim Versuch, Steuerstrategien zu verbessern, dynamische Modelle, so stösst man immer wieder auf den Fall, wo man erkennt, dass die Steuereinrichtung gewisse Kenntnisse über den künftigen Wetterverlauf haben sollte. Das hängt damit zusammen, dass eine solche Steuereinrichtung, wie bereits erwähnt, langfristig entscheidet. Für den in Beispiel 2 erwähnten Heizungsregler mit Startzeitpunkt-

optimierung wäre es z.B. nützlich, morgens um 5 Uhr zu wissen, wie sich die Aussentemperatur bis 8 Uhr morgens entwickelt. Fällt sie z.B. stark, so müsste er die Heizung früher einstellen, als wenn sie steigt. Diese und ähnliche Ueberlegungen führen auf die 3. Regel.

### 3. Regel: Prognosen und Statistiken für das Wetter verwenden

Bei Prognosen über das Wetter denkt man vielleicht zuerst an Prognosen der SMA (Schweiz. Meteorologische Anstalt), die dem Gerät automatisch oder von Hand eingegeben werden. Bei Prognosen kann es sich aber auch um solche handeln, die die Steuereinrichtung aufgrund der lokal erfassten Messwerte automatisch selbst erstellt. Selbst die Annahme, dass die Aussentemperatur so bleibt, wie sie momentan ist, ist eine solche Prognose und ist für das erwähnte Beispiel der Startzeitpunktoptimierung eine gebräuchliche Lösung.

Oft erwähnt wird die Verwendung von Wetterprognosen im Zusammenhang mit der Regelung von trägen Bodenheizungen und mit der Steuerung von Wärmepumpen- oder Sonnenkollektoranlagen, die einen Tagesspeicher besitzen. In [8] wird sie für den Betrieb einer Fernheizanlage vorgeschlagen. Da uns jedoch keine Untersuchung bekannt ist, die eine Antwort auf die Frage gibt, wieviel Energie mit Hilfe von Prognosen gespart werden kann, haben wir in der Fachgruppe für Automatik Arbeiten durchgeführt, mit denen einige erste Schritte in Richtung einer Antwort gemacht wurden.



Figur 8 Energieflussdiagramm der solaren Brauchwarmwasseranlage, die für die Studie zur 3. Regel verwendet wurde.

Dabei wurde u.a. ein einfaches Modell einer solaren Brauchwarmwasseranlage betrachtet. Die Anlage und das Modell sind so konzipiert, dass sich daran einige grundsätzliche Ideen leicht erklären lassen und dass daran ein erster Satz von Problemen relativ leicht untersucht werden kann. Die Anlage (vgl. Figur 8) besteht aus einem Sonnenkollektor, einem Wärmespeicher und einer elektrischen Zusatzheizung. Es werden täglich drei Phasen unterschieden: In der ersten, die von 6 Uhr bis 18 Uhr dauert, sammelt der Sonnenkollektor Sonnenenergie und wärmt damit einen Teil des Wassers im Speicher auf die gewünschte Warmwassertemperatur auf. Während der zweiten Phase, die von 18 Uhr bis 22 Uhr dauert, findet der Verbrauch statt. Es werde an jedem Tag genau gleich viel Warmwasser verbraucht. Reicht das Warmwasserangebot des Speichers dabei nicht aus, wird der Fehlbetrag mit Hilfe der elektrischen Zusatzheizung erwärmt. Da angenommen wird, dass diese zweite Phase in die Hochtarifzeit fällt, wird die dazu benötigte elektrische Energie  $\gamma$ -fach gezählt (wobei  $\gamma$  das Verhältnis zwischen Hoch- und Niedertarif ist). Die dritte und letzte Phase dauert von 22 Uhr bis um 6 Uhr am nächsten Tag und falle mit der Niedertarifzeit zusammen, so dass während dieser Phase ein Teil des Speichers mit billigem elektrischem Strom auf die gewünschte Warmwassertemperatur aufgeladen werden kann. Die hier interessierende Aufgabe der Steuereinrichtung besteht darin, jeweils abends um 22 Uhr zu entscheiden, wieviel des Speicherinhalts in der folgenden dritten Phase aufgeladen werden soll. Das Ziel besteht darin, die Stromkosten oder äquivalent dazu den Verbrauch an elektrischer Energie - während der Hochtarifzeit mit  $\gamma$  gewichtet - über eine längere Zeit klein zu halten.

Wüsste die Steuereinrichtung das Wetter des nächsten Tages, so bestünde, wie man leicht nachweisen kann, ein optimaler Entscheid jeweils darin, dass sie aus den Kenntnissen des Wetters den Kollektorertrag des nächsten Tages berechnet und den Speicher in der folgenden 3. Phase, also bis zum nächsten Morgen, mit billigem Strom auf eine Energiemenge auflädt, die zusammen mit dem gerechneten Kollektorertrag gerade den Verbrauch am folgenden Abend ergibt. Benützt die Steuereinrichtung eine Wetterprognose und verfährt sonst so, wie eben beschrieben, so handelt es sich um eine sogenannte Certainty-equivalence-Steuerung. Mit

diesem Begriff aus der Theorie der Automatik werden allgemein Steuerungen bezeichnet, bei denen die Steuereinrichtung jeweils für eine ihr unbekannt Grösse eine Schätzung verwendet, annimmt, dass diese Schätzung gleich (equivalent) dem sicheren (certain) Wert ist, und dann den unter dieser Annahme geltenden optimalen Entscheid trifft. Im folgenden sind drei solche Certainty-equivalence-Steuerungen skizziert. Da der Kollektorertrag eines Tages bei dieser Anlage nur vom Wetter abhängig ist, kann eine solche Steuerung auch, wie es beim 2. und 3. Beispiel der Fall ist, den Kollektorertrag anstelle des Wetters vorhersagen.

Beispiel 1: Certainty-equivalence-Steuerung mit SMA-Wetterprognose.

Beispiel 2: Certainty-equivalence-Steuerung mit der Prognose "morgen wie heute"

Die Steuereinrichtung prognostiziert jeweils um 22 Uhr für den folgenden Tag einen Kollektorertrag, der gleich dem des laufenden Tages ist (diesen Kollektorertrag kann sie um 22 Uhr natürlich kennen).

Beispiel 3: Certainty-equivalence-Steuerung mit einem bedingten Erwartungswert als Prognose.

Die Steuereinrichtung berechnet jeweils abends um 22 Uhr den bedingten Erwartungswert des Kollektorertrages des nächsten Tages, gegeben den Kollektorertrag des laufenden Tages. Sie muss dazu eine bedingte Wahrscheinlichkeitsfunktion kennen. Diese wird ihr bei Inbetriebnahme der Steuereinrichtung eingegeben.

Es sind viele Computersimulationen zu diesen drei Steuerstrategien durchgeführt worden. Tabelle 1 gibt an, wie gross der Energieverbrauch (Hochtarif  $\gamma$ -fach gezählt) während den Monaten April 1980 und Juli 1980 in Kloten gewesen wäre. Die im 3. Beispiel erwähnte bedingte Wahrscheinlichkeitsfunktion, die dem Regler bei Inbetriebnahme eingegeben werden muss, ist aus Wetterdaten des Jahres 1979 ermittelt worden. In der obersten Zeile von Tabelle 1 ist für Vergleichszwecke noch eine einfache Steuerstrategie betrachtet, bei der die Steuereinrichtung den Speicher jede Nacht

auf den gleichen Betrag auflädt. Um dabei die beste dieser einfachen Steuerungen zu haben, ist der genannte Betrag zuvor mit Wetterdaten aus dem Jahre 1979 optimiert worden. Man erkennt, dass in den beiden betrachteten Monaten des Jahres 1980 die drei Certainty-equivalence-Steuerungen der einfachen Steuerung überlegen sind. In der untersten Zeile der Tabelle 1 ist noch der Energieverbrauch angegeben, der erreicht worden wäre, wenn die Steuereinrichtung das Wetter im voraus genau gekannt hätte. Diese Werte dienen als untere Schranken, da sie auch durch die besten Steuerstrategien nicht unterboten werden können.

Certainty-equivalence-Steuerungen sind, obwohl immer wieder implizit behauptet, ausser in einigen wenigen Spezialfällen, nicht die besten. Im folgenden sind noch zwei Steuerungen angegeben, die nicht zur Klasse der Certainty-equivalence-Steuerungen gehören.

Beispiel 4: Minimierung des bedingten Erwartungswertes des Energieverbrauchs über einen Tag.

Die Steuereinrichtung berechnet abends um 22 Uhr für eine Reihe von möglichen Beträgen, auf die der Speicher in der folgenden Niedertarifzeit aufgeladen werden kann, wie gross der bedingte Erwartungswert der über die nächsten 24 Stunden auftretenden Energiekosten, gegeben den Kollektorstärkeertrag des laufenden Tages, ist. Sie liest dann aus dieser Reihe jenen Betrag aus, für den der ermittelte bedingte Erwartungswert minimal ist.

Beispiel 5: Mit Hilfe der dynamischen Programmierung optimierte Steuerstrategie.

Das Gesamtsystem bestehend aus Anlage und Umgebung ist durch ein Markov-Kettenmodell sehr vereinfacht dargestellt worden. Für dieses Markov-Kettenmodell wurde mit Hilfe der sto-

Steuerverfahren		gewichteter Energieverbrauch [kWh]	
		April 1980	Juli 1980
jeden Tag gleich (optimiert)		312	330
Certainty-Equivalence-Steuerungen mit folg. Prognose	SMA (1.Bsp.)	252	264
	morgen wie heute (2.Bsp.)	260	255
	bedingter Erwartungswert (3.Bsp.)	232	247
Minimierung des bedingten Erwartungswertes des Energieverbrauchs über einen Tag (4.Bsp.)		225	195
Mit Hilfe der dynamischen Programmierung optim. Steuerstrategie (5.Bsp.)		280	233
Untere Schranke (bei perfekter Wetterprognose)		171	142

Zahlenwerte:

Tagesverbrauch = 21.77 kWh

Speicherkapazität = 1.3 \* Tagesverbrauch

Sonnenkollektor: 10 m<sup>2</sup>, 45° Neigung, gegen S gerichtet,  $\eta = 50\%$

$\gamma = 3$

Simulationsresultate aus [10]

Wetterdaten sowie SMA-Prognosen für April 1980 und Juli 1980 aus [11]

chastischen Variante der dynamischen Programmierung (z.B. in [12]) von allen möglichen Steuerstrategien jene bestimmt, die das Markov-Kettenmodell am besten steuert. Die so ermittelte Steuerstrategie wird in der Steuereinrichtung verwendet.

Auch die in diesen zwei Beispielen erwähnten Steuerstrategien stützen sich auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die aufgrund eines Satzes von gemessenen Wetterdaten des Jahres 1979 ermittelt wurden. Resultate von Simulationen über die Monate April und Juli 1980 sind in Tabelle 1 angegeben. In [10] sind noch weitere Steuerverfahren und der Einfluss der Speichergrösse auf die Ergebnisse untersucht worden. Es soll beachtet werden, dass der Rechenaufwand für die Steuereinrichtungen relativ klein ist. Für die in Beispiel 4 erwähnte Steuerstrategie sind pro Tag zum Beispiel etwa 300 Additionen und 200 Multiplikationen nötig.

Die durchgeführten Untersuchungen sind als erste Schritte zu betrachten. Die Ergebnisse laden zum Weiterarbeiten ein. Verfeinerungen der Steuerstrategien, genauere Berechnungen der einzelnen Steuerstrategien und Erweiterung auf andere Anlagentypen sollen dabei im Vordergrund stehen. Auch wichtig ist die Frage, in welchen Fällen es vorzuziehen ist, die Anlage so zu konzipieren, dass die Kenntnis der Zukunft für die Steuereinrichtung weniger wichtig wird. Bei der bereits erwähnten trägen Bodenheizung könnte ein solches Anlagenkonzept darin liegen, dass die träge Bodenheizung nur eine leicht vorhersagbare Grundlast deckt und schnell reagierende Radiatoren den schwer vorhersagbaren Anteil der Last.

In der 3. Regel wurde die Verwendung von Prognosen und Statistiken über das Wetter vorgeschlagen. Sie kann natürlich auch auf andere Einflussgrössen erweitert werden, wie zum Beispiel die Abwärme von Apparaten.

#### 4. Regel: Anpassung der Steuerung an Steuerstrecke verbessern

Viele Steuerungen arbeiten schlecht, weil die Einstellung der Steuereinrichtungen ungenügend ist. Jene, die die Steuereinrichtungen ein-

stellen sollten, nehmen sich zu wenig Zeit oder sind überfordert. In solchen Fällen können benutzerfreundlichere Einstellverfahren, Einstellhilfen oder Vorrichtungen für eine automatische Einstellung Verbesserungen bringen.

#### Beispiel 1: Selbsteinstellende Start-Zeitpunktoptimierung bei Heizungsreglern.

Solche Geräte nehmen dem Benutzer das Einstellen jener Parameter ab, welche die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes charakterisieren (vgl. 2. Regel, Beispiel 2). In den ersten Tagen nach der Inbetriebnahme führt die Steuereinrichtung die Einschaltung der Heizung am Ende eines reduzierten Nachtbetriebs nicht optimal durch. Sie "beobachtet" dabei jedoch über einen Messfühler den Aufheizvorgang und verbessert mit der dabei gewonnenen Information ihr Verhalten laufend. Solche Geräte, von denen es auf dem Markt schon eine ganze Reihe gibt, sind nach meinem Wissen die ersten Steuereinrichtungen im HLK-Bereich mit einer Vorrichtung für eine automatische Einstellung. Sie werden meist unter den Bezeichnungen "lernend", "selbstlernend", "adaptiv" und "selbstadaptiv" angeboten.

#### Beispiel 2: Automatische Heizkurveinstellung bei Heizungsreglern.

Auch diese Idee ist schon in mehreren käuflichen Heizungsreglern realisiert. Der Benutzer wird vom Einstellen der Heizkurve befreit. An das Gerät muss jedoch zusätzlich zum Vorlauf- temperatur- und Aussentemperaturfühler ein Raumtemperaturfühler angeschlossen werden, der in einem geeignet gewählten Referenzraum untergebracht wird. Beim Entwurf von solchen automatischen Einstellverfahren kann das Problem als ein Estimationsproblem, bei dem es die Parameter  $s$  und  $h$  in (1) zu schätzen gilt, oder als ein Regelproblem, bei dem  $s$  und  $h$  die Stellgrössen sind und die Raumtemperatur der Regelgrösse entspricht, aufgefasst werden. Die Güte eines entworfenen Einstellverfahrens umfassend zu beurteilen, ist ein anspruchsvolles Problem. Es müssen dabei verschiedene Gebäudetypen und verschiedene Möglichkeiten des Benutzer- und Wetterverhaltens berücksichtigt werden.

Beispiel 3: Eine halbautomatische Heizkurven-einstellung bei Heizungsreglern.

Gegenüber der oben erwähnten automatischen Variante wird hier der Raumtemperaturfühler durch eine Eingabevorrichtung (z.B. eine Tastatur) ersetzt, über die der Benutzer Raumtemperaturwerte oder Abweichungen der Raumtemperatur von einem Sollwert eingeben kann. Eine solche Lösung hat gegenüber der vollautomatischen einerseits den Nachteil, dass der Benutzer nicht von jeglicher Arbeit befreit wird, andererseits aber die Vorteile, dass ein Temperaturfühler weniger nötig ist und dass bei der Einstellung verschiedene Räume berücksichtigt werden können. Da die an den Benutzer gestellte Aufgabe wesentlich leichter ist als das Einstellen einer Heizkurve, kann diese Lösung auch als benutzerfreundliches Einstellverfahren bezeichnet werden. Auch diese Idee ist schon realisiert.

Weitere Beispiele:

- selbsteinstellendes Vorhersageverfahren für Certainty-equivalence-Steuerungen (nicht realisiert);
- Steuereinrichtungen, welche Wahrscheinlichkeitsfunktionen verwenden (vgl. Regel 3, 3., 4. und 5. Beispiel) und diese während des Betriebs aufgrund der eingehenden Messdaten laufend verbessern (nicht realisiert);
- selbsteinstellende PI- und PID-Regler;
- Verwendung der allgemein anwendbaren Adaptivreglertypen (eine schon seit langem diskutierte und immer noch umstrittene Idee) (z.B. in [13]).

Beim Entwurf von halb- und vollautomatischen Einstellverfahren tritt ein Konflikt zwischen folgenden vier Zielen auf: Die Zahl der Messfühler soll niedrig sein, der Benutzer soll während dem Betrieb wenig oder nichts zu tun haben, die Einstellarbeit bei der Inbetriebnahme soll einfach sein oder wegfallen und die Steuereinrichtung soll auf eine grosse Klasse von Steuerstrecken einsetzbar sein. Ein Konflikt besteht zwischen diesen Zielen deshalb, weil die Steuereinrichtung für eine gute Steuerung genügend Information braucht und die Annäherung an eines dieser Ziele meist eine Informationsverminderung zur Folge hat, welche

nur durch Abrücken von einem anderen Ziel wettgemacht werden kann.

Zur Frage, ob automatische Einstellverfahren zu verbesserten Einstellungen führen, sind mir keine Untersuchungen bekannt. Ein Vergleich mit dem Fotoapparat kommt der Wahrheit jedoch vermutlich nahe. Ein kompetenter Fotograf, der sich genügend Zeit nimmt, macht mit einer Handeinstellung bessere Fotos als wenn er die Einstellautomatik benützt. Die Mehrheit der Kamerabenutzer macht jedoch mit der Einstellautomatik bessere Aufnahmen.

## 5. Regel: Vermehrtes Systemdenken

Darunter wird hier verstanden, dass ein Element nicht isoliert gesehen werden soll, sondern als Teil eines Systems und dass an die Wechselwirkungen zwischen dem Element und dem Rest des Systems gedacht werden soll. Es bestehen jeweils viele Möglichkeiten, die Grenzen dieses Systems zu ziehen. Je nach Wahl der Grenzen können verschiedene Aspekte sichtbar werden und zu verschiedenen neuen Ideen führen. Diese Art des Systemdenkens wird oft auch ganzheitliches oder vernetztes Denken genannt.

Beispiel 1 bezieht sich auf das System, bestehend aus Steuerung und Anlage. Nimmt man noch das Gebäude hinzu, erhält man ein System, wie es dem Beispiel 2 zugrunde liegt.

Beispiel 1: Gut steuerbares Anlagenkonzept.

Es werden manchmal Anlagen gebaut, die nur mit grossem Aufwand gut gesteuert werden können oder für die es gar unmöglich ist, eine gute Steuerung zu entwerfen. Deshalb wird oft vorgeschlagen, dass der Anlagenplaner und der Planer der Steuerung frühzeitig zusammenarbeiten oder es werden schriftliche Richtlinien zur Erstellung gut steuerbarer Anlagenkonzepte erarbeitet. Anlagen, bei denen es für den Planer der Steuerung oft Schwierigkeiten gibt, sind z.B. Wärmepumpenheizungen ohne Pufferspeicher zwischen der Wärmepumpe und dem Wärmeabgabeteil. Ein anderes Beispiel sind träge Bodenheizungen in offensiv konzipierten Gebäuden, die nicht nur die Grundlast, sondern den ganzen Wärmebedarf decken.

Beispiel 2: Integrale Gebäudeplanung.

In den 1982 erschienenen SIA-Empfehlungen 384/1 wird es unter dem Stichwort "integrale Gebäudeplanung" für die Gestaltung energietechnisch optimaler Bauten als nötig erachtet, dass Architekt, Bauingenieur und Installationsplaner frühzeitig zusammenarbeiten. In gewissen Fällen dürfte auch die frühzeitige Mitarbeit des Planers des Steuerungssystems Vorteile bringen.

Denkt man daran, dass die Steuereinrichtung zusammen mit dem Menschen, der sie bedient, ein System bildet, so stellt sich die Frage nach der geeigneten Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Automat. Das Ueberdenken dieser Aufgabenteilung kann auf viele neue Ideen führen. Zum Beispiel folgende:

Beispiel 3: Eingabe eines wöchentlichen Programms der Raumtemperatursollwerte für jeden Raum.

Eine Steuereinrichtung für eine zentrale Warmwasserheizung, bei der den Bewohnern einzig die Aufgabe zufällt, für jeden einzelnen Raum ein individuelles wöchentliches Programm der Raumtemperatursollwerte über eine Tastatur einzugeben, ist z.B. in der bereits erwähnten Pilotanlage in der Wohnkolonie "Limmatstrasse" realisiert [1].

Beispiel 4: Automatisches Abstellen der Heizung.

In [14] wird darauf hingewiesen, dass bei vielen zentralen Warmwasserheizungsanlagen nach dem Umbau von einer manuellen Steuerung (Vorlauftemperatur über Handmischer eingestellt) zu einer automatischen witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung keine Energiekostensparnis auftrat, weil die Anlage nach dem Umbau im Sommer nicht mehr abgestellt wurde. Dies ist ein typisches Beispiel für einen oft beobachteten Sachverhalt: Die Automatisierung gewisser Funktionen kann bei vielen Menschen bewirken, dass sie die ihnen verbleibenden Aufgaben vernachlässigen. In solchen Fällen ist es manchmal (bei weitem nicht immer!) zweckmässig, die verbleibenden Aufgaben auch noch zu automatisieren. Heizungsregler, welche die Heizung bei geeignetem Wetter automatisch abstellen können, sind bereits käuflich.

Beispiel 5: Ermittlung und Anzeige von Daten für energiebewusste Benutzer.

Wie ein "Bordcomputer" eines Automobils, der den momentanen Treibstoffverbrauch anzeigt, manchem energiebewussten oder sparsamen Automobilisten erst ermöglicht, ein energiesparendes Fahrverhalten zu erlernen, so könnte ein Heizungsregler, der geeignete Daten über den Brennstoffverbrauch anzeigt, eine ähnliche Wirkung bei energiebewussten Bewohnern haben.

In [15] wird den Betriebswarten grösserer Heizanlagen vorgeschlagen, eine Statistik zu führen, welche die Abhängigkeit des wöchentlichen Energieverbrauchs von der mittleren wöchentlichen Aussenlufttemperatur zeigt. Statistiken dieser Art, die wichtige Hinweise auf betriebliche Verbesserungsmassnahmen und wärmetechnische Sanierungen geben können, könnten von einem Heizungsregler automatisch durchgeführt werden, und wären somit auch für kleinere Gebäude ohne grossen Aufwand erstellbar.

Beispiel 6: Benutzerfreundlichere Heizkurven-einstellung.

Diese Idee wurde als Beispiel zur 4. Regel erwähnt.

Interessant und vermutlich lohnenswert wäre es, die Auswirkungen verschiedener Steuerungskonzepte - insbesondere die zugrundegelegte Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Automatik - auf das Komfortbedürfnis der Benutzer zu untersuchen und darauf aufbauend zu überlegen, ob sich daraus Optimierungsideen ergeben.

## Schlussbemerkungen

Eine bedeutende Disziplin der Automatik ist die Theorie der optimalen Steuerungen und Regelungen. Die Art, wie sie meist dargestellt wird, erweckt den Eindruck, als könnte ihre Anwendung direkt zu energieoptimalen Steuerungen von HLK-Anlagen führen. Unsere Erfahrungen zeigten jedoch, dass dies nicht zutrifft. Diese Theorie ist ein Hilfsmittel, das je nach Anwendungsfall mehr oder weniger nützlich ist und ihre Anwendung erfordert meist viel Arbeit.

Einige der skizzierten Steuer- und Regelstrategien scheinen vielleicht auf den ersten Blick der oft geäußerten Forderung zu widersprechen, dass Steuerungen von Heizanlagen nicht kompliziert sein sollen. Unter dieser Forderung sollte jedoch verstanden werden, dass der zur Steuerung der Energieflüsse zuständige Anlagenteil einfach sein soll (nicht zu viele Ventile und Pumpen, übersichtliche hydraulische Schaltung), und weiter, dass die Steuereinrichtung zuverlässig arbeitet, ihre Funktionen transparent sind und die Bedienung verständlich ist. Ich sehe jedoch keinen Grund, warum der Mikrocomputer in der Steuereinrichtung keine umfangreicheren Rechnungen durchführen soll. Wird die Forderung so verstanden, besteht kein Widerspruch.

#### Quellen- und Literaturverzeichnis

(es sind nicht alle Quellen angegeben)

- [1] H.H. Becker: "Energiesparen bei der Raumheizung durch Einzelraumregelung und komfortabhängige Heizkostenverteilung", Energie Nr. 6/80, S. 41-45.
- [2] J. Tödtli: "Anwendung der Theorie der optimalen Steuerungen auf den Betrieb von Sonnenenergieanlagen", Interner Bericht 83-06, Fachgruppe für Automatik, ETH-Zürich, 1983.
- [3] K. Biri, T. Gysin: "Automatische Einstellung der Heizkurve bei Steuergeräten für Warmwasserheizungen", Diplomarbeit 8502, Fachgruppe für Automatik, ETH-Zürich, 1983.
- [4] H.H. Hauri: "Praktische Berechnung des instationären Wärmeflusses durch ein- und mehrschichtige Wände", Institut für Hochbautechnik, Bericht Nr. 2, 1977.
- [5] Arbeitskreis der Dozenten für Regelungstechnik: "Regelungstechnik in der Versorgungstechnik", Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, 1983.
- [6] P. Falb, M. Athans: "Optimal Control", McGraw-Hill, New York, 1966.
- [7] P. Gruber-Johnson, J. Tödtli, P. Wehrli: "Optimal Loading Strategy of a Stratified Storage with Electrically Driven Heat Pump", Melecon'83 (Mediterranean Electrotechnical Conference of IEEE Region 8), Athens, 24-26 May, 1983.
- [8] E. Bitsche: "Dynamisch optimale Steuerung des Betriebs von Fernheizanlagen", Diss. ETH Nr. 6336, 1979 (Referent: P. Profos).
- [9] K.J. Åström, B. Wittenmark: "Computer Controlled Systems", Prentice-Hall, 1984.
- [10] W. Grünenfelder, M. Mock: "Entwurf und Vergleich von Steuerstrategien für eine polyvalente Heizanlage", Diplomarbeit 8506, Fachgruppe für Automatik, ETH Zürich, 1983.
- [11] P. Kass: "Meteodatenbibliothek", Interner Bericht 83-07, Fachgruppe für Automatik, ETH-Zürich, 1983.
- [12] D.P. Bertsekas: "Dynamic Programming and Stochastic Control", Academic Press, 1976.
- [13] J. Tödtli, W. Schaufelberger, P. Wehrli: "Realization of Adaptive Control Systems: Experiences and Open Problems", IFAC Symp. on Theory and Application of Digital Control, January 1982, New Delhi.
- [14] G. Hausladen: "Wirtschaftlichkeit verschiedener Regeleinrichtungen für öl- und gasgefeuerte Warmwasserheizanlagen im Wohnungsbau", HLH 28(1977)223-228.
- [15] Bundesamt für Konjunkturfragen: "Energiegerechter Betrieb haustechnischer Anlagen", Bern, 1982.