

Anlagensteuer- und regelung

# Optimierung der Betriebsweise raumluftechnischer Anlagen

Clemens Felsmann,  
Gottfried Knabe, Dresden

Im Folgende wird die optimale Regelstrategie für eine DEC-Anlage mit Hilfe des Kuhn-Tucker-Optimierungsverfahrens bestimmt. Die Optimierung erfolgt mit dem Simulationsprogramm MATLAB. Die Simulation der RLTA basiert auf TRNSYS. Die numerische Lösung und Optimierung erfolgt über eine Kopplung von MATLAB und TRNSYS. Das verwendete Verfahren erlaubt auch die Bestimmung einer optimalen Steuerung. Dabei lassen sich Wärme- und Feuchtespeichervorgänge von Anlage und Gebäude berücksichtigen. Hierauf wird an anderer Stelle eingegangen.

## Autoren

Dipl.-Ing. Clemens Felsmann, Jahrgang 1970, seit 1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermodynamik und TGA der TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil. Gottfried Knabe ist am Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung der Technischen Universität Dresden tätig

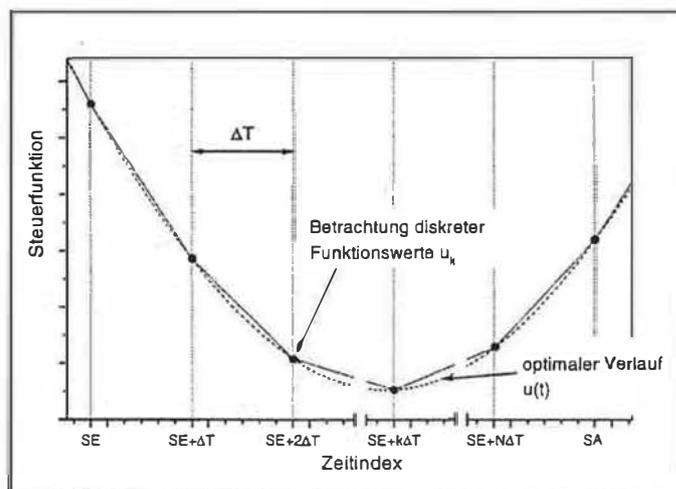


Bild 1

Optimale Steuerfunktion

In jüngster Zeit sind eine Reihe von Publikationen erschienen, die sich der Optimierung der Regelstrategien von Klimaanlage widmen [1; 2]. In [1] wird die dynamische Optimierung eingesetzt, die sich als sehr robust erweist. Dabei wird einmal das Ziel nach Minimierung des Energiebedarfs sowie zum anderen ein Kostenminimum angestrebt. In [2] werden unter Nutzung des Toleranzfeldes nach DIN 1946 in Abhängigkeit des Außenluftzustandes Zustandsänderungen vorgegeben. Die Grenzen des Verfahrens sind z.B. bei Einsatz von Enthalpieregeneratoren erreicht. In [3] wird eine Kopplung von Sequenzschaltung und Bereichsumschaltung im  $h,x$ -Diagramm vorgeschlagen. Eine Umsetzung der Sequenzschaltung in Bereiche des  $h,x$ -Diagrammes wird dabei sehr unübersichtlich. Zum Test der Arbeitsweise ist dieses Vorgehen üblich, jedoch mit hohem Aufwand und hohem Anspruch an die Sachkenntnis des Prozesses verbunden. Voraussetzung für die Optimierung ist die Bestimmung des Energiebedarfs Raumluftechnischer Anlagen mit Hilfe der Simulation [4; 5; 6]. Im folgenden Beitrag wird in einem Beispiel für eine DEC-Anlage der

Optimierungsalgorithmus getestet. Die Regelung von DEC-Anlagen mit dem Anspruch an Wirtschaftlichkeit ist sehr kompliziert. Es wird die kostenoptimale Lösung mit einem konventionellen Sequenzverfahren verglichen.

## Optimierungsproblem

Der Optimierung liegt ein Gütefunktional zugrunde. Dabei sind der Energieverbrauch oder die Kosten zu minimieren. Für die Kosten gilt

$$K_{\text{opt}} = \min(f(u(t), x_0)) \quad (1)$$

Die Kosten hängen vom Anfangszustand  $x_0$  des zu betrachtenden Systems und dem zeitlichen Verlauf der Steuergrößen  $u$  ab. Die in Gl.(1) verwendete Funktion  $f$  ist dabei eine beliebige lineare oder nichtlineare, stetige Funktion, die den jeweiligen Optimierungsproblemen entsprechend formuliert werden muss.

Bei der Bestimmung des Optimalwertes  $K_{\text{opt}}$  ist die Angabe von Nebenbedingungen der Art

$$g(u) \leq 0 \quad (2)$$

# KLASSISCH GUT!

- hoher Wirkungsgrad
- 100% drehzahlregelbar
- hochkompakte Bauweise

Unsere klassische Axialbaureihe FC, gefertigt mit 7 profilierten Flügeln als Komplettdruckguß, ist in den Durchmessern von 315 mm bis 1250 mm erhältlich. Durch die hochflexible Zuordnung unserer Außenläufermotoren lassen sich Volumenströme von 2.000 - 60.000 m<sup>3</sup>/h (freiblasend) mit hervorragendem Wirkungsgrad realisieren. Dieser Klassiker kommt weltweit in zwei Luftförderrichtungen, in zahlreichen 60 Hz Ausführungen, mit reichhaltigem Zubehör, in den Branchen Be- und Entlüftung, Kälte- und Wärmetechnik sowie Klimatisierung zum Einsatz. Nennen Sie uns Ihre Anforderungen, wir realisieren die passende Lösung.

**Ziehl-Abegg** GmbH & Co. KG, Zeppelinstraße 28, D-74653 Künzelsau, Tel. 0 79 40 / 16-0, Fax 16-300,  
<http://www.ziehl-abegg.de>, e-mail [info@ziehl-abegg.de](mailto:info@ziehl-abegg.de)

**ZIEHL-ABEGG**



möglich. Nebenbedingungen sind dabei Randbedingungen oder Beschränkungen für System- und Steuergrößen.

Optimale Steuerung

Die Funktion  $u(t)$ , die Gln.(1; 2) erfüllt, ist die optimale Steuerfunktion und stellt den Verlauf zwischen zwei vorgegebenen zeitlichen Fixpunkten dar (Bild 1). Während der Wert der Steuerfunktion am Ausgangspunkt SE als bekannt vorausgesetzt wird, ergibt sich der entsprechende Wert zum Zeitpunkt SA aus dem vorhergehenden Verlauf.

Für die Anwendung des Optimierungsverfahrens zur Bestimmung der Lösung der Gl.(1) wird der Steuervektor  $u$  definiert, der, bei Vorgabe einer Diskretisierungsweite  $\Delta T$ , die zeitdiskreten Werte der Funktion  $u(t)$  im Intervall  $[\Delta T, N\Delta T]$  enthält. Es gilt

$$u_i = u(i\Delta T) \quad i = 1 \dots N \quad (3)$$

Der Vektor  $u$  kennzeichnet somit die Werte der Steuerfunktion für  $N$  Zeitschritte in zeitlicher Folge.

$$u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ \dots \ u_N]^T \quad (4)$$

Wirken mehrere zu optimierende Steuergrößen  $u\{m\}$  auf das System, ergibt sich  $u$  aus

$$u = [u\{1\}^T \ u\{2\}^T \ \dots \ u\{m\}^T]^T \quad (5)$$

Der Steuervektor enthält  $m \cdot N$  Elemente.

Optimale Regelung

Die Lösung der allgemeinen Optimierungsaufgabe nach Gln.(1, 2) für einen einzigen festen Zeitpunkt  $t$  liefert  $u_{opt}$  im Sinne einer kostenoptimalen Regelung. Der Steuervektor  $u$  enthält nicht mehr den zeitlich diskretisierten Verlauf der Stellgrößen in einem vorgegebenen Intervall. Die Elemente  $u_i$  des Steuervektors sind in diesem Fall die Stellgrößen, die unter Beachtung der Nebenbedingungen minimale Kosten zum festen Zeitpunkt  $t$  verursachen.

$$u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ u_3(t) \ \dots \ u_m(t)]^T \quad (6)$$

Der Unterschied zu der optimalen Steuerung besteht in der Betrachtung der zeitlichen Abfolge. Während der Steuervorgang immer innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls abläuft, bezieht sich der Regelvorgang auf einen einzigen Zeitpunkt. Die einzelnen Zeitschritte werden nicht in ihrer Gesamtheit, sondern unabhängig voneinander betrachtet. Sie bilden jeder für sich ein Optimum.

Programmtechnische Realisierung der Optimierung

Die Simulation des dynamischen Verhaltens des Systems von Gebäude und HRLTA erfolgt mit Hilfe des Simulations-

programms TRNSYS [7]. Für die Optimierung mit der Kuhn-Tucker-Strategie [8] konnten die in MATLAB enthaltenen Optimierungsroutinen genutzt werden [9; 10]. In [11] wird die Optimierungsstrategie für die optimale Steuerung von Heizungssystemen angewendet. MATLAB bietet eine leistungsfähige mathematische Programmierumgebung mit einer Vielzahl anwendungsbereiter Funktionen. Das eigentliche Problem besteht in der Realisierung des Datenaustausches zwischen den beiden, vollkommen eigenständigen Programmen. MATLAB ist dabei das übergeordnete Programm, das, in der Eigenschaft als Client, die für die Berechnung der Kostenfunktion erforderlichen Daten nach dem Aufruf der Server-Anwendung TRNSYS übermittelt bekommt. Änderungen in den TRNSYS-Quelltexten machten das Programm unter der MATLAB Umgebung in einer geeigneten Weise lauffähig. TRNSYS liefert bei Vorgabe einer Steuerfunktion  $u$  durch das Optimierungsprogramm die Ausgabegrößen, die zur Berechnung der Funktion  $f$ , Gl.(1), sowie der Nebenbedingungen  $g$ , Gl.(2), erforderlich sind. Bild 2 zeigt den für die Optimierung erforderlichen Programmablauf.

Bei der Datenübergabe von MATLAB an TRNSYS ist zu beachten, dass in TRNSYS sämtliche Eingabegrößen als Mittelwerte des jeweiligen Zeitschritts definiert sind. Als Diskretisierungsvorschrift Gl.(3) gilt nun

$$u_k = \frac{u((k-1)\Delta T) + u(k\Delta T)}{2} \quad k = 1 \dots N \quad (7)$$

Der durch die Linearisierung (vgl. Bild. 1) verursachte Fehler nimmt bei kleineren Diskretisierungsschrittweiten ab. Insbesondere die Simulation von regelungstechnischen Vorgängen erfordert zur Vermeidung von instabilen Zuständen ein feineres Diskretisierungsraaster. Dieses führt bei einem vorgegebenen Optimierungsintervall zu einer größeren Anzahl von Zeitschritten. Aufgrund begrenzter Rechenzeiten und des zur Verfügung stehenden Rechnerspeicherplatzes sollte die Größe des diskreten Steuervektors aber so klein wie möglich sein. Lösen lässt sich dieser Konflikt, indem die Simulation mit der gewünschten, kleineren Schrittweite durchgeführt wird und die Optimierung Werte der Steuerfunktion an Stützstellen liefert, die einer größeren Verteilung unterliegen. Die Schrittweiten für die Optimierung  $\Delta T_{opt}$  und für die Simulation  $\Delta T$  sind somit nicht identisch, und die für die Simulation erforderlichen Eingabewerte werden durch lineare Inter-

Formelzeichen

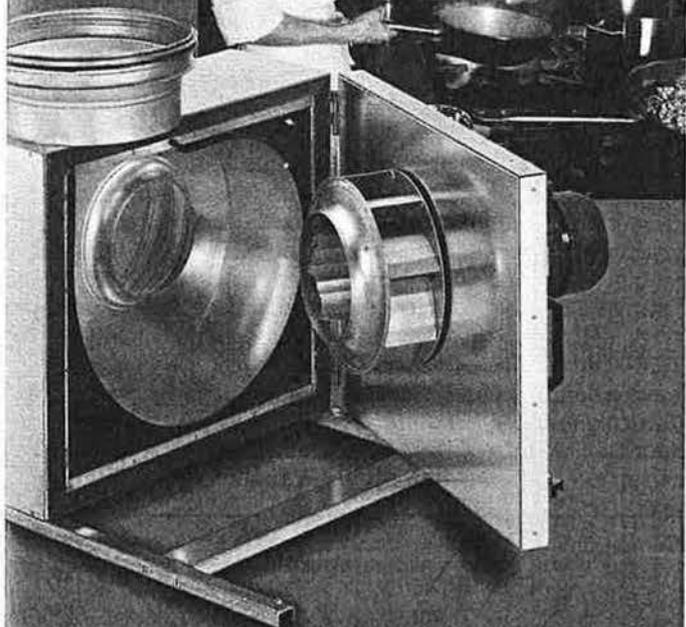
$f$	Kostenfunktion	
$g$	Nebenbedingungen	
$H$	Ventilhub	%
$K$	Kosten	
$n$	Drehzahl	min <sup>-1</sup>
$N$	Anzahl	
SA	Startzeitpunkt der Simulation	h
SE	Endzeitpunkt der Simulation	h
$t$	Zeit	h
$\Delta T$	Diskretisierungsweite	h
$u$	Steuergröße	
$u$	Steuervektor	
$x$	Wassergehalt	kg/kg
$\vartheta$	Temperatur	°C

Indizes

$a$	außen
A	Austritt
AB	Abluft
Bef	Befeuchter
E	Elektroenergie
Erh	Erhitzer
Opt	Optimum
Q	Wärmemenge
RS	Sorptionsregenerator
RW	Wärmeregenerator
W	Wasser
ZU	Zuluft

HELIOS FÜR PROFIS

Wenn's mal hart  
auf hart kommt:  
MegaBox von Helios.  
Ab Lager.



Die MegaBox von Helios gibt selbst bei anspruchsvollsten Aufgaben nicht klein bei. Ideal für das Absaugen von Kochdunst, heißen Gasen oder feuchter Luft in Industrie und Gewerbe. Standardmäßig regelbar und inklusive Motorschutz. Alle dreiphasigen Geräte mit zwei Drehzahlen. 30 Typen von 800 bis 8000 m<sup>3</sup>/h Förderleistung. Jetzt ab Lager lieferbar. Worauf warten Sie?



Helios Ventilatoren · D-78046 VS-Schwenningen · www.heliosventilatoren.de

Wir bringen Blech in die richtige Form

Blechverarbeitung und Lüftungstechnik  
Beratung Planung Ausführung

## GT Anlagenbau GmbH Zuluft- und Ablufttürme

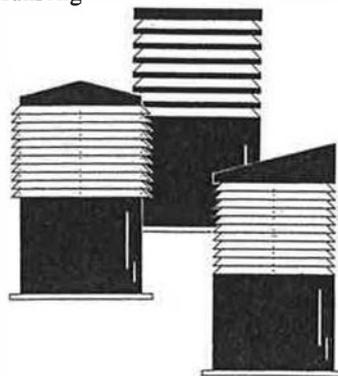
aus Standard- oder Sonderausführung  
aus jedem Metall:

- Stahl verzinkt
- Aluminium
- Kupfer
- Edelstahl  
(kugelgestrahlt  
oder geschliffen)

Schornsteine  
aus Stahl DIN 4133  
mit statischem Nachweis

Bitte fordern Sie unsere neuesten  
technischen Unterlagen an!

Am Ölwerk 16-18 49744 Geeste Fax 05937-970777



GT  
Anlagenbau  
GmbH

Die Marke für Abgleichen  
Regeln, Mischen und Entlüften

TACONOVA

## Strangabgleich-Ventil SETTER Bypass SD



Die unvergleichbaren  
Vorteile von  
SETTER Bypass SD:

- Hydraulischer Abgleich ohne Messcomputer macht das Abgleichen genau, zuverlässig und einfach!
- Neues, einmaliges Safety-Design zur erhöhten Betriebssicherheit,

- eine saubere Sache – es entsteht keinerlei Verschmutzung;
- Messglas mit beidseitiger Skala in l/min,
- Durchflußwerte können auch unter schwierigen Verhältnissen problemlos abgelesen werden;
- Vorpositionierung des Durchflusses durch Memory-Schieber;
- Sie sparen Zeit und das Geld für aufwendige Messgeräte!

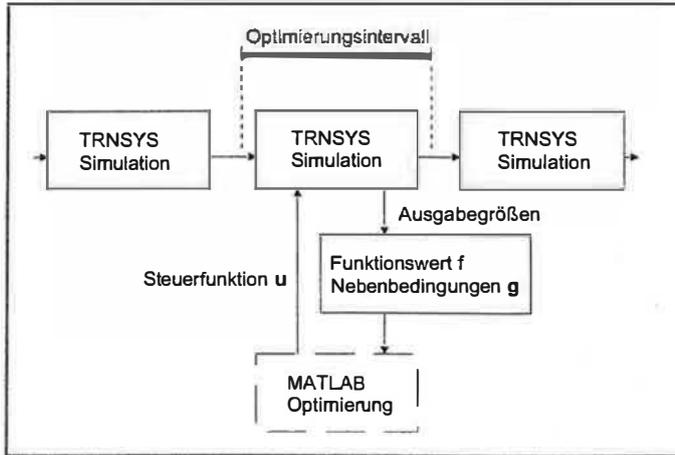
Setzen Sie doch gleich TACONOVA-Setter ein!

TACONOVA GmbH

Rudolf-Diesel-Straße 8 · D-78224 Singen

Telefon 07731 - 98 28 80 · Fax 07731 - 98 28 88

www.taconova.de

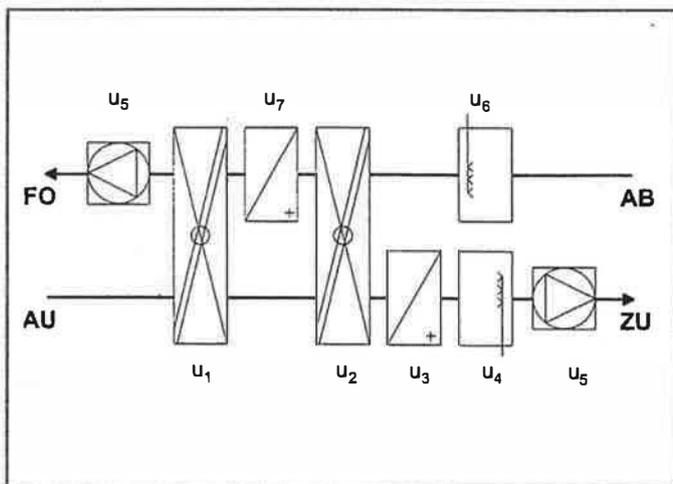


**Bild 2**  
**Programmorganisation in MATLAB**

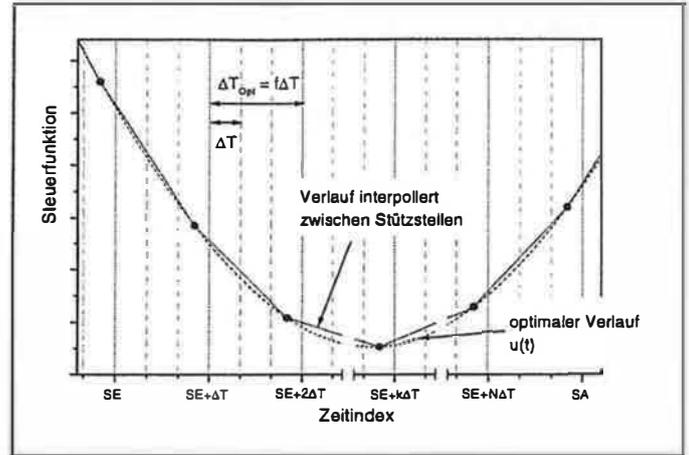
polation zwischen den bekannten optimalen Stützwerten berechnet. Zur Veranschaulichung dient **Bild 3**.

### Optimale Regelung

Das gewählte Optimierungsverfahren ist sowohl für die Bestimmung einer optimalen zeitlichen Steuerfunktion geeignet als auch zur optimalen Mehrgrößenregelung unter Berücksichtigung mehrerer Stellgrößen. Da es sich hierbei aber nicht um eine vorausschauende und in ihrer zeitlichen Gesamtheit kostenminimale Steuerung handelt, sondern um eine optimale Stellung einzelner Bauglieder zu verschiedenen, aber einzeln betrachteten Zeitpunkten, können sich im Vergleich zur optimalen Steuerfunktion höhere Gesamtkosten ergeben. Die



**Bild 4**  
**Allgemeiner Aufbau einer DEC-Klimaanlage**



**Bild 3**  
**Optimale Steuerfunktion in TRNSYS**

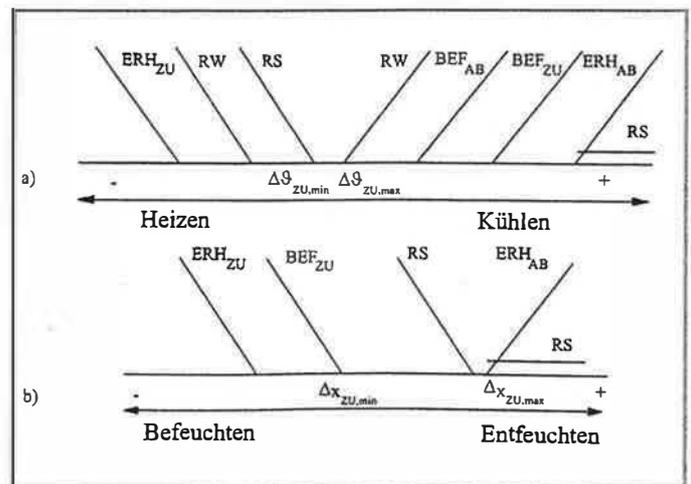
Nichteinhaltung von instationären Nebenbedingungen, z.B. bei einem Sollwertsprung, ist bei Erreichen der Leistungsgrenze der Anlage möglich. Andererseits ist für die Bestimmung einer optimalen Steuerung die Kenntnis aller relevanten Einflussgrößen auf das System während des gesamten Steuerungszeitraumes erforderlich. Das ist aber in den seltensten Fällen gegeben. Ebenso sollte dem Nutzer die Möglichkeit des manuellen Eingreifens gestattet bleiben, was nur durch bestimmte regelungstechnische Vorgänge auszugleichen ist.

### DEC

Eine Anwendung des genannten Verfahrens bietet die Regelung einer DEC (Desiccative and Evaporative Cooling)-Klimaanlage. **Bild 4** zeigt den klassischen Aufbau einer DEC-Klimaanlage [12]. Die Anlage besteht aus einem Sorptionsregenerator, Wärmeregenerator, Zuluftbeheizter, Zuluftbefeuchter, Abluftbefeuchter und Abluftbeheizter.

Während im Allgemeinen die beiden Befeuchter sowie der Abluftbeheizter im Sommer zum Einsatz kommen, wird der Zuluftbeheizter zum Nachheizen im Winter genutzt. Die Sequenzschaltung der einzelnen Bauteile einer DEC-Klimaanlage ist in [13] diskutiert. Das Sequenzschema ist in **Bild 5** dargestellt. Für die Temperatur- und Feuchterege- lung werden je zwei Sollwerte entsprechend dem Toleranzfeld nach DIN 1946 eingeführt (vgl. Bild 7). Zusätzlich sind Vorrang und Verriegelung definiert. Weiter sind der Frostschutz und die Begrenzung der Zuluftfeuchte zu beachten.

Die Optimierungsaufgabe besteht nunmehr darin, die Stellgrößen der Bauteile (Drehzahlen von Sorptionsregenerator ( $u_1$ ), Wärmeregenerator ( $u_2$ ) und



**Bild 5**  
**Sequenzschaltung DEC [13] (a-Temperaturregelung; b-Feuchte- regelung)**

Zu- und Abluftventilator ( $u_5$ ), Ventilhöhe von Zulufterhitzer ( $u_3$ ), Zuluftbefeuchter ( $u_4$ ), Abluftbefeuchter ( $u_6$ ) und Ablufterhitzer ( $u_7$ ) so zu bestimmen, dass die resultierenden Gesamtkosten des Anlagenbetriebes minimal sind und alle Bedingungen hinsichtlich des Raumluf-, Zuluft- bzw. Anlagenzustandes erfüllt werden. Somit sind die sich hieraus ergebenden optimalen Zustandsänderungen als eine Art Vergleichsprozess [1] bekannt, und es lässt sich die Qualität anderer Regelstrategien im Hinblick auf die resultierenden Kosten besser einschätzen.

Der Steuervektor  $u$  ist, unter der Annahme eines konstanten Luftmassenstromes, entsprechend Gl.(8) anzusetzen.

$$u = \begin{bmatrix} n_{RS} & n_{RW} & H_{Erh,ZU} & H_{Bef,ZU} & H_{Bef,AB} & H_{Erh,AB} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

Bei variablem Volumenstrom ist eine weitere Stellgröße für den Volumenstromregler einzuführen.

Die Leistung der Regeneratoren wird durch Vorgabe einer Drehzahl  $n$ , die der Lufterhitzer und -befeuchter durch einen Ventilhub  $H$  gesteuert. Dabei gelten die Beschränkungen

$$\begin{aligned} 0 \leq n \leq 10 \text{ min}^{-1} \\ 0 \leq H \leq 100 \% \end{aligned} \quad (9)$$

Die einzuhaltenden Nebenbedingungen, sind:

1. Toleranzbereich für Temperatur und Wassergehalt der Zuluft

$$\begin{aligned} \vartheta_{ZU} = \text{const} \\ x_{ZU, \min} \leq x_{ZU} \leq x_{ZU, \max} \end{aligned} \quad (10)$$

2. Einfrierschutz Ablufterhitzer

$$\vartheta_{RW, A} \geq \vartheta_{RW, A, \min} \quad (11)$$

3. Einfrierschutz Sorptionsregenerator

$$dh/dx \geq dh/dx|_{\text{krit, Eisnebel}} \quad (12)$$

Die geeignete Beschreibung einer DEC-Anlage erfolgt unter TRNSYS mit dem Klimaanlagenmodell Type94 [14]. Das stationäre Verhalten der in der Anlage verwendeten Bauteile wird mit Hilfe von aus Messwerten und Kennlinien approximierten Übertragungsfunktionen nachgebildet.

Die nachfolgenden Betrachtungen sollen sich, um eine vollständige Jahressimulation zu vermeiden, der Übersicht halber auf 52 ausgewählte Zustandspunkte entsprechend einer Summenhäufigkeit der Außenlufttemperatur [15] beschränken. Die Verteilung der Zustände im  $h,x$ -Diagramm ist Bild 7 zu ent-

nehmen. Der Wassergehalt der Luft ist in jedem der Punkte ein bezüglich der Außenlufttemperatur mittlerer jährlicher Wert.

Die dazugehörige Summenhäufigkeit der Außenlufttemperatur ist in Bild 6 dargestellt.

Die Simulation der Anlagenregelung bzw. -optimierung erfolgt zur Vereinfachung zunächst ohne Raummodell. Die Ablufttemperatur wird entsprechend der Vorgaben der DIN 1946 in Abhängigkeit von der Temperatur der Außenluft vorgegeben, Gl. (13). Für den Wassergehalt der Abluft wurde einfach der Zusammenhang nach Gl. (14) ange-  
setzt.

$$\vartheta_{AB} = 22 \text{ °C} + \max((\vartheta_a - 26 \text{ °C})/3,0) \quad (13)$$

$$x_{AB} = x_{ZU} \quad (14)$$

Der daraus resultierende Bereich möglicher Raumlufzustände ist in dem  $h,x$ -Diagramm in Bild 7 gekennzeichnet.

Weiterhin sind die Nebenbedingungen hinsichtlich des Zuluftzustandes

$$\begin{aligned} \vartheta_{ZU} = 18 \text{ °C} \\ 5 \text{ g/kg} \leq x_{ZU} \leq 11,4 \text{ g/kg} \end{aligned}$$

sowie aus Gründen des Frostschutzes

$$\begin{aligned} \vartheta_{RW, A} \geq 6 \text{ °C} \\ dh/dx \geq dh/dx|_{\text{krit, Eisnebel}} \end{aligned}$$

einzuhalten.

Die der Optimierung zugrunde liegende Kostenfunktion Gl. (15), anhand der auch der Vergleich mit der Sequenzschaltung vorgenommen werden soll, bilanziert die Kosten des für die Regeneratoren erforderlichen Elektroenergiebedarfs  $K_E$ , des Heizenergiebedarfs  $K_Q$  der Lufterhitzer sowie die Befeuchterkosten  $K_W$  der Luftbefeuchter für jeden Außenluftzustand.

$$K = K_E + K_Q + K_W \quad (15)$$

Aus den mit Hilfe der Optimierung berechneten Stellgrößen der Bauelemente ergeben sich für die Luft beim Durchströmen der Anlage die Zustandsänderungen, wie sie in dem  $h,x$ -Diagramm Bild 7 dargestellt sind. Zum besseren Verständnis sind die Zu- und Fortluftzustände sowie die Zustandsänderung im Raum hervorgehoben. Die Eisbildung im Sorptionsregenerator wird, infolge der vorgegebenen Nebenbedingung Gl. (12), durch Umgehung des Eisnebelgebietes vermieden.

Unter Beachtung der Summenhäufigkeiten über alle Zustandspunkte können die jährlichen Betriebskosten für Wasser, Wärme und den elektrischen Antrieb der Regeneratoren bei einer kostenoptimalen Stellung der Bauelemente im Vergleich zu der konventionellen Sequenzregelung um etwa 31 % gesenkt werden. Diese Aussage gilt nur für die der Betrachtung zugrunde liegende Temperaturverteilung und Kostenstruktur sowie unter Einhaltung der Nebenbedingungen. Die Abweichung des Energiebedarfes nach dem verkürzten Jah-

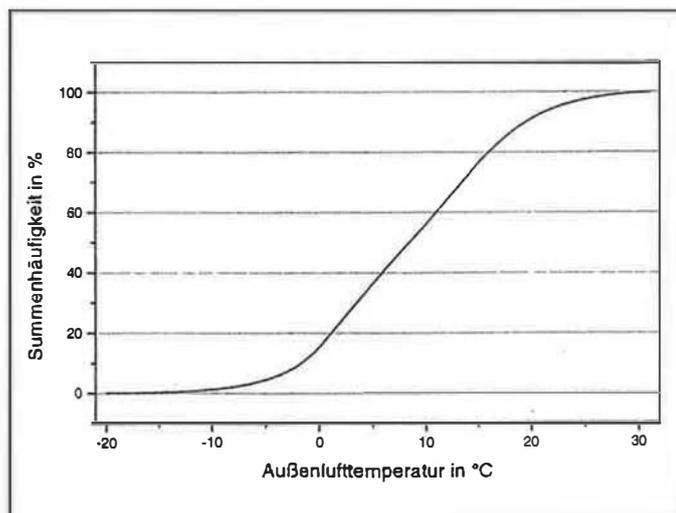


Bild 6

Summenhäufigkeit über Außenlufttemperatur

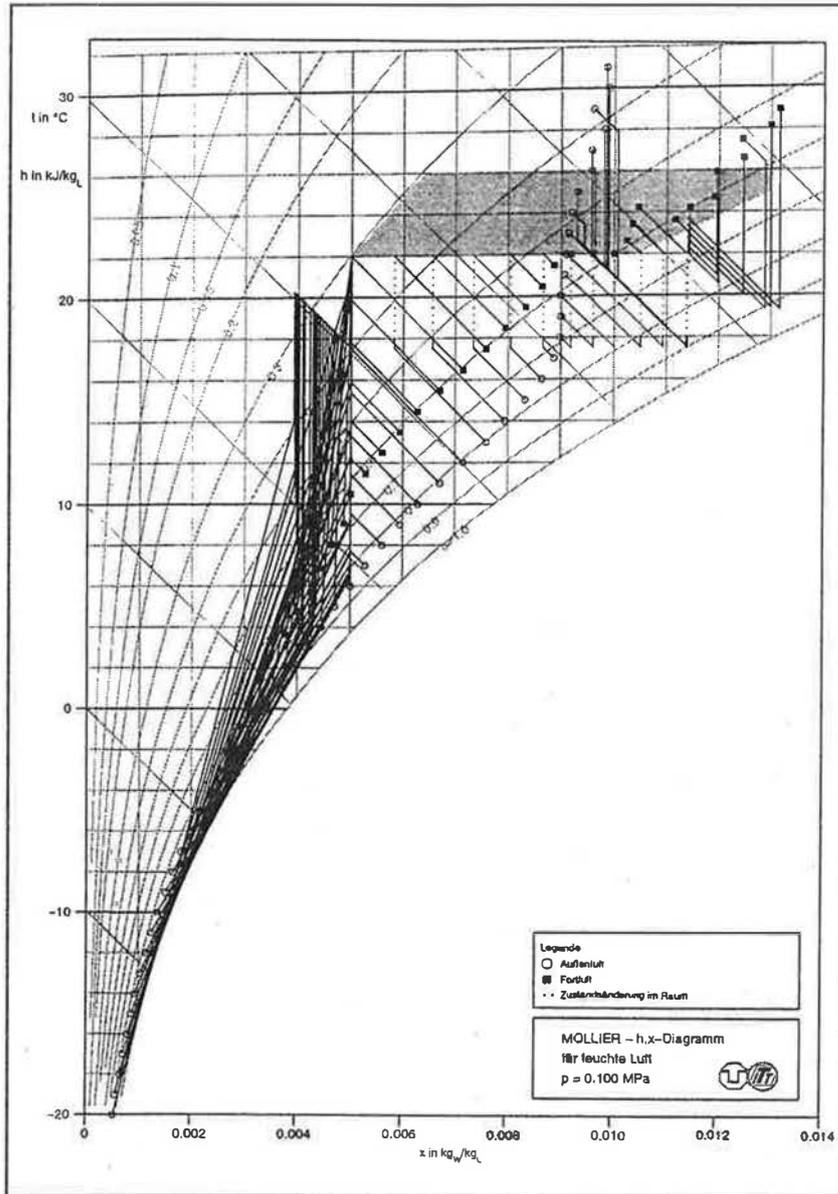


Bild 7

Zustandsänderungen einer DEC im  $h,x$ -Diagramm bei optimalem Betrieb

resgang zum Referenzjahr liegt in der Größenordnung nach [16]. Für von dieser Untersuchung abweichende Annahmen ergeben sich andere, vollkommen spezifische Ergebnisse.

Bei einer Bewertung der absoluten Kosten mit der Häufigkeit des Auftretens der entsprechenden Außenluftzustände nach Bild 6 ergibt sich die in Bild 8 dargestellte Verteilung der Anlagenkosten. Die Unterschiede der von den beiden untersuchten Betriebsarten verursachten Kosten wird in dieser Darstellung besonders deutlich. Wie sich aus dem Vergleich der Kosten entnehmen lässt, verursacht die Sequenzregelung vor allem bei Außentemperaturen  $\vartheta_{\alpha} = 18^{\circ}\text{C} \dots 26^{\circ}\text{C}$  höhere Kosten gegenüber dem optimalen Betrieb.

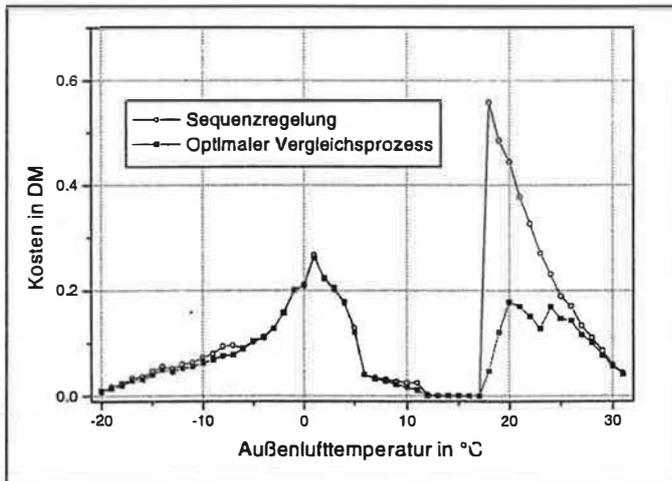


Bild 8

Vergleich der häufigkeitsbewerteten Gesamtkosten Regelung – Optimierung

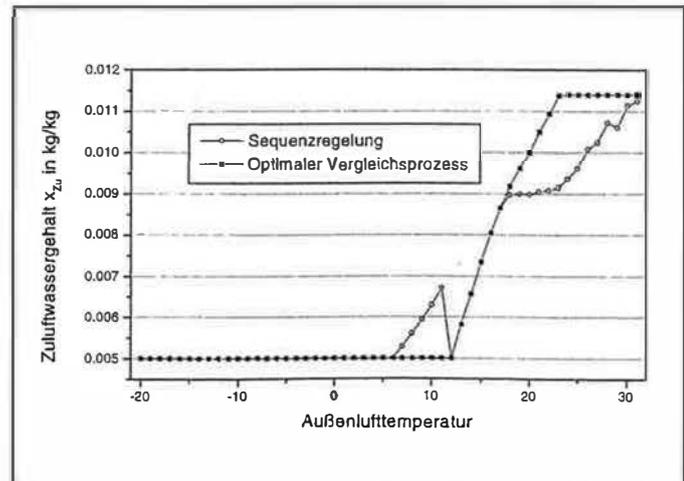


Bild 9

Wassergehalt der Zuluft Sequenzregelung – Optimierung

# Fachzeitschriften sind unverzichtbares Wissen

**Beratende Ingenieure** berichtet aus der Bau- und Consultingbranche des Inlandes und der Europäischen Union. Als berufliches Informationsmedium wendet sich die Fachzeitschrift an Planer und Berater sowie an das Projektmanagement auf den Gebieten: Ingenieurbauwerke, Umweltschutz und Umweltmanagement, Wasser und Abfall, Städtebau und Regionalstruktur, Prüfung und Überwachung technischer Anlagen, technische Ausrüstung, technische und wirtschaftliche Unternehmensberatung, Facility Management, EDV/Kommunikationstechnik/Bauinformatik und Verkehr.



Testen Sie unsere Fachzeitschrift **Beratende Ingenieure** und fordern Sie noch heute ein **kostenloses Probeexemplar** an.

**Springer**  
**VDI Verlag**  
Verlag für technische Zeitschriften

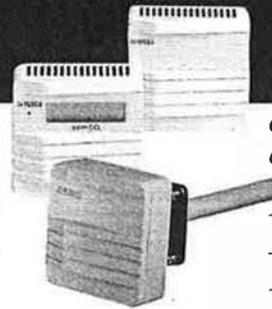
**FAX-Nr.: 02 11/61 03-414**

Vertrieb Zeitschriften, Postfach 10 10 22, 40001 Düsseldorf,  
Heinrichstr. 24, 40239 Düsseldorf, E-Mail: [vertrieb@technikwissen.de](mailto:vertrieb@technikwissen.de)

CO<sub>2</sub>

Feuchte  
Taupunkt  
CO<sub>2</sub>  
Luftdruck

## CO<sub>2</sub> messen - kontrolliert lüften



**CARBOCAP-CO<sub>2</sub>-Messwertgeber  
GMD 20 und GMW 20**

- Hohe Langzeitstabilität
- 5 Jahre Kalibrierintervall
- Einfacher und zuverlässiger Aufbau
- Wand- und Kanalmontage

**VAISALA**

Vaisala GmbH · Postfach 54 02 67 · D-22502 Hamburg  
Telefon (040) 85 17 630 · Telefax (040) 85 08 444  
[www.vaisala.com](http://www.vaisala.com) · [ssdvertrieb@vaisala.com](mailto:ssdvertrieb@vaisala.com)

**FOR SALE**

**www.henrybutcher.com**

Im Auftrag von Agfa-Gevaert AG  
Freihändiger Verkauf

Vollständige Fertigungsstraße für die photographische  
Filmbeschichtung (1991/2)

Herstellungs- und Verarbeitungsdienst für Emulsionsherstellung  
und -vorbereitung

Filmsetzung und Bearbeitungsgerät

Emulsionsultrafiltrationsanlage (1994),  
Nirospray Trocknungsanlage (1995)

Dazu gehörend:

Kompressoren für Klima- und Kühlanlagen

- 3 York Codepak YTH3H3E25CMF Turbine (1992)
- 2 York Typ LC3HD345WL (1992) BBC York, Linde und Trane
- 4 Faeco Typ 2200H Eisbänke
- 13 Baltimore Kühltürme
- 33 Robatherm und GEA Luftbearbeitungseinheiten (1992/5) Sauglüfter

Hausunterdruckeinheit mit 4 Altmann und 2 S1H1 Vakuumpumpen mit  
Filtereinheiten (1992)

Millipore IonPure elektrostatische Ultra-Entionisierungsanlage (1993)

- 2 GRP & SS Wasserspeichertanks, Wasserheizungen, Behältnisse und  
Pumpen
- 8 AEG Motorsteuerzentralen (1993/1), AEG Kraftschluß-Konden-  
satorenbänke (1993)
- 3 AEG 60 KVA/15min unterbrechungsfreie Stromversorgungen  
(1993)

Standort: Neu-Isenburg, Deutschland  
Einzelheiten mit Fotos befinden sich auf unserer Webseite:  
[www.henrybutcher.com](http://www.henrybutcher.com)

Für weitere Informationen und einen Besichtigungstermin setzen Sie  
sich bitte in Verbindung mit  
Christine Danielou/Susan Bromwich

**HENRY  
BUTCHER**

TEL: +44(0)20 7405 8411  
FAX: +44(0)20 7405 9772  
Email: [salaa@henrybutcher.com](mailto:salaa@henrybutcher.com)

Brownlow House, 50/51 High Holborn, London WC1V 6EG, UK

## – STELLENGESUCH –

### Wir vermitteln:

#### Diplom-Ingenieur Versorgungstechnik

43, verh., (VDI), langj. berufl. Erfahrung in  
Planung, Kostenberechnung, Ausschreibung  
(incl. STLB) und Bauleitung (LP 1 - 9 HOAI)  
für Heizungs-, Sanitär-, MSR- und Lüftungs-  
technik; EDV-Anwendungen: MS-Office, FAK-  
TOR, HTT, MWIN, FRIATEC-CAD;  
sucht ab sofort bundesweit Tätigkeit als  
Planungsingenieur, in Versorgungstechnik.

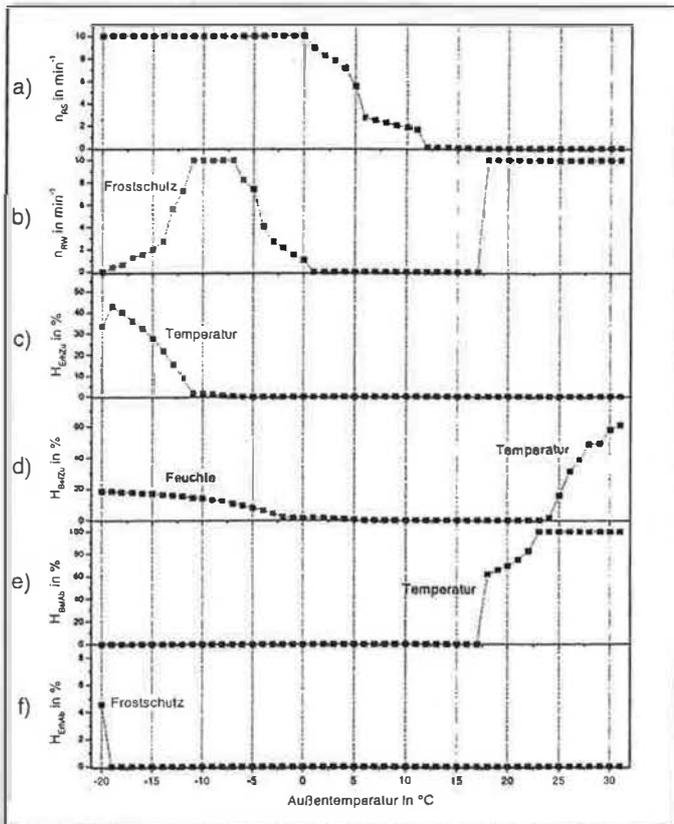
Auskünfte gibt Frau Pflugbeil

#### Arbeitsamt Riesa

Paul-Greifzu-Str. 61, 01591 Riesa  
Tel. 03525/711-109, Fax 03525/711-631

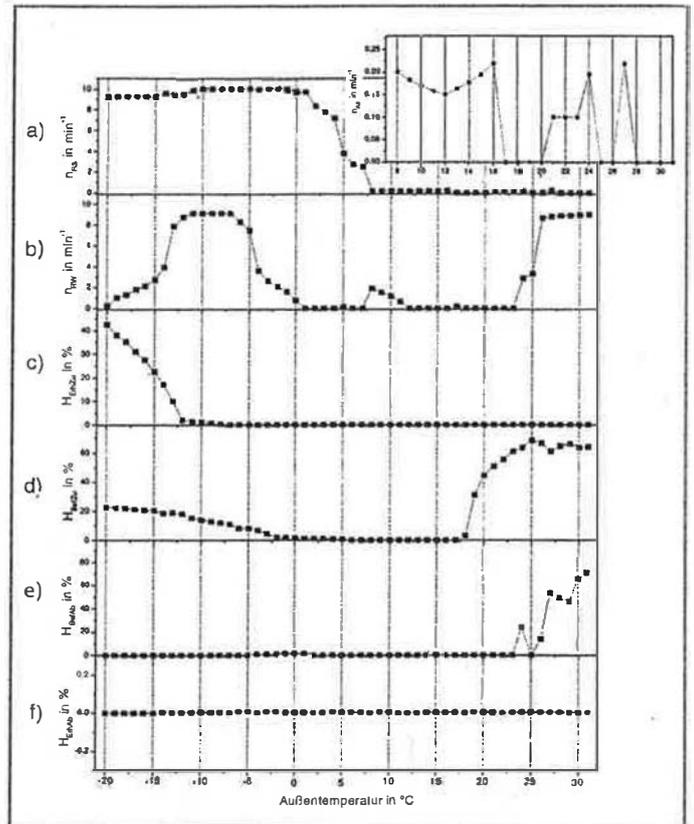


**Bundesanstalt für Arbeit**



**Bild 10**

Stellsignale Sequenzregelung (a-Drehzahl Sorptionsregenerator; b-Drehzahl Wärmergenerator; c-Ventilhub Zulufterhitzer; d-Ventilhub Zuluftbefeuchter; e-Ventilhub Abluftbefeuchter; f-Ventilhub Abluftherhitzer)



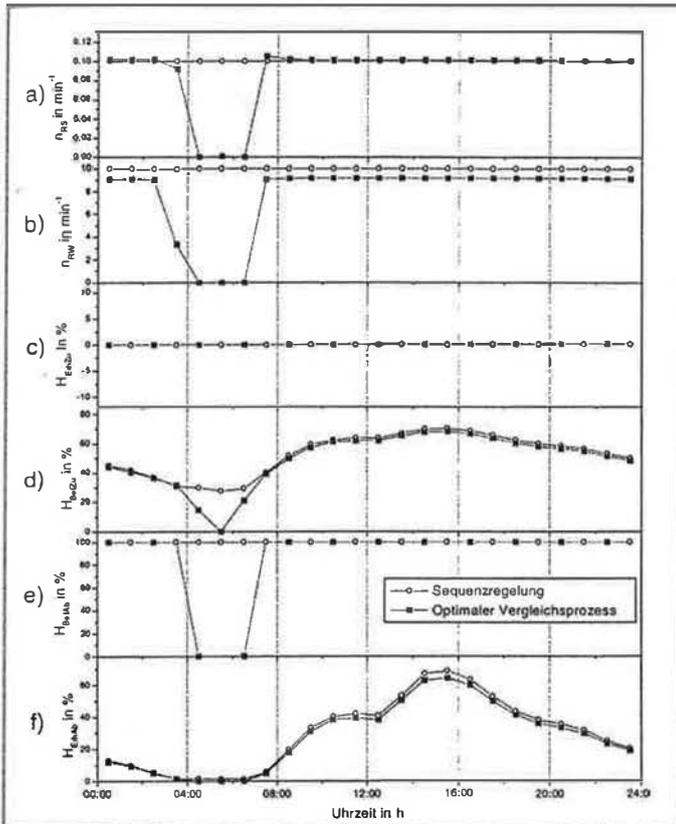
**Bild 11**

Stellsignale Optimierung (Bezeichnung vgl. Abb. 10)

Die Außenluft- und Raumlufzustände sowie die Zulufttemperatur bei Anwendung der Sequenzschaltung stimmen mit den Werten der Optimierungsrechnung überein. Unterschiede ergeben sich aber im Wassergehalt der Zuluft. Dieser wurde nicht als einzelner Sollwert vorgegeben. Hier waren beliebige Werte innerhalb eines oberen und unteren Grenzwertes möglich. Den Verlauf

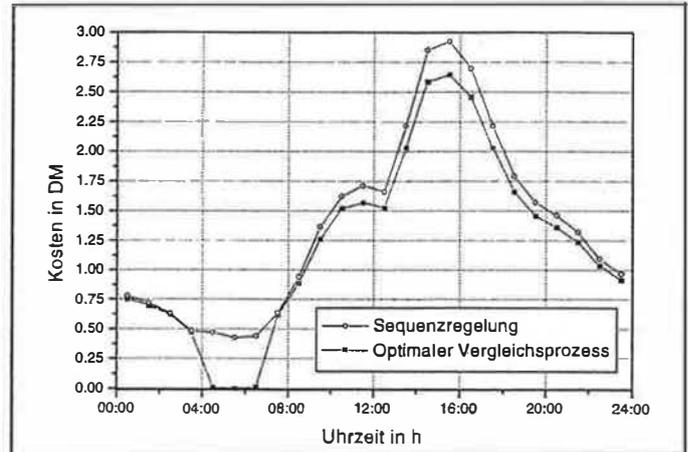
## Literatur

- [1] B. Gluck: Vergleichsprozesse der Klimatechnik. C. F. Müller Verlag Heidelberg, 1998.
- [2] G. Bachmann und B. Schumacher: Optimales Klima durch  $h, x$ -geführte Regelung. *Kl Luft- und Kältetechnik*, 33(11), S. 527-530, 1997.
- [3] U. Feder: Grundstrukturen und Steueralgorithmen zur wirtschaftlichen Betriebsweise von Klimaanlage und Möglichkeiten der Prozessbewertung. Diss., Institut für Thermodynamik und TGA, TU Dresden, 1991.
- [4] G. Knabe: Simulation und Programmierung von Klimaprozessen. *Kl Luft- und Kältetechnik*, 14(4), S. 202-207, 1978.
- [5] H. Schiller: Energieverbrauch raumluftechnischer Anlagen. *HLH Bd. 45* (1994) Nr. 7, S. 345-348.
- [6] A. Rathey: Entwicklung optimierter Regelverfahren für raumluftechnische Anlagen mit Hilfe des Simulationsprogramms TRNSYS. Forschungsbericht TU Dresden, 1999.
- [7] Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart. TRNSYS-a transient system simulation Programm, Dokumentation, 1996.
- [8] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajew: Ergänzende Kapitel zu Taschenbuch der Mathematik. BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 3. Aufl., 1984.
- [9] The MathWorks Inc. Optimization toolbox user's guide, 1997. MATLAB Optimization Toolbox 1.5.2
- [10] The MathWorks Inc. MATLAB The language of technical computing, 1998. Version 5.2
- [11] G. Knabe and C. Felsmann: Optimal operation control of HVAC systems. Tagungsband, S. 1277-1284, 1999. Building Simulation 99, Kyoto, Japan.
- [12] G. Heinrich; U. Franke (Hrsg.): Sorptionsgestützte Klimatisierung. Entfeuchtung und DEC in der Klima-Kälte-Technik. C. F. Müller Verlag Heidelberg, 1. Aufl., 1997.
- [13] A. Rathey: Dokumentation Klimaanlage-Regelungsmodul Type 93 und Type 95 S. Institut für Thermodynamik und TGA, TU Dresden, 1997; unveröffentlichter Bericht
- [14] A. Rathey: Dokumentation Klimaanlage-Simulationsmodul Type 94 für TRNSYS. Institut für Thermodynamik und TGA, TU Dresden, 1997; unveröffentlichter Bericht.
- [15] ILKA Berechnungskatalog. Wärme und Stofflast; Daten der Meteorologie. VEB Kombinat-ILKA Luft- und Kältetechnik Dresden, 1974.
- [16] J. Masuch: Die Genauigkeit von Energieverbrauchsrechnungen für Raumluftechnische Anlagen bei reduzierter Wetterdatenmenge. *HLH Bd. 33* (1982) Nr. 11, S. 387-393.



**Bild 12**  
**Vergleich der Steuergrößen bei Sequenzregelung und Optimierung für einen ausgewählten Sommertag**

des Zuluftwassergehaltes für die bekannten Zustandspunkte bei Anwendung von Regel- und Optimierungsverfahren zeigt Bild 9. Hierbei wäre zu überprüfen, inwieweit die Festsetzung der optimierten Zuluftzustände als Sollwert



**Bild 13**  
**Vergleich der Gesamtkosten bei Sequenzregelung und Optimierung für einen ausgewählten Sommertag**

für die Sequenzregelung zu einer Kostenminderung führen kann.

Die folgenden Bilder 10 und 11 enthalten die Stellsignale der einzelnen Bauteile der DEC-Klimaanlage. Für die Sequenzschaltung sind die aktiven Bauteile den einzelnen Regelkreisen der Temperatur bzw. der Feuchte zugeordnet. Es sind auch die für den Frostschutz erforderlichen Stellvorgänge erkennbar.

Für den Sorptionsregenerator wird als Nebenbedingung eine Drehzahl  $n_{RS} \geq 0,1 \text{ min}^{-1}$  festgelegt. Für die gewählten Außenluftzustände ist kein Abluftherhitzer nötig.

Für einen typischen Sommertag eines Referenzjahres zeigen die Bilder 12 und 13 den Vergleich der Resultate der Folgeschaltung und der Optimierung. H 110

Unschlagbar schnell...

60%  
Sparen

Das neue Truhen-Splitklimagerät California SX ist im Handumdrehen installiert. Der praktische Montage-rahmen machts möglich.

3 Regelungsmöglichkeiten:  
 LCD Infrarot-Fernbedienung  
 Kabelfernbedienung  
 Bedienung am Gerät

Gleichzeitige Klimatisierung von 2 Räumen durch rückwärtige Luftverteilung.

**Airwell**

ACE Klimatechnik GmbH  
 Telefon 0 69 / 5 07 02-0 • Telefax 0 69 / 5 07 02-2 50  
<http://www.airwell.de>