

Kombinationsverfahren zum optimalen Steuern und Regeln von Klimaanlage¹

Bernd Glück

In einem früheren Beitrag [1] wurde gezeigt, wie unbeeinflusst von einem subjektiv bestimmten Regelungsregime ein optimaler Vergleichsprozeß für Klimaanlage nur in Abhängigkeit von der Zielfunktion, der gewählten Anlagenhardware, dem zulässigen Raumzustandsbereich und den üblichen Randbedingungen ermittelt werden kann. Die direkte Umsetzung bereitet wirtschaftliche und technische Probleme (Stand der Sensorik). Es wird deshalb ein Kombinationsverfahren unter Einbeziehung konventioneller Regelungstechnik vorgestellt.

Combination procedure for optimal control systems for air conditioning plants

In an earlier paper [1] it was shown, how uninfluenced by a subjectively determined control regime an optimal comparison process for air conditioning systems only as a function of the main aims, the selected systems hardware, which admissible space status area and the usual boundary conditions can be determined. The direct conversion can rize economic and technical problems (status of the sensor technology). Therefore a combination procedure is presented including conventional control engineering.

Keywords: air conditioning plants, office air conditioning, temperature control, humidity control, optimization strategy, combination procedure

Dr.-Ing. habil. B. Glück, F+E TGA Jöbnitz (Plauen)

¹ Die Untersuchung erfolgte im Rahmen der Tätigkeit bei RUD. OTTO MEYER (ROM)-Zentrale, Hamburg

1 Bisherige Entwicklung

Kennzeichnend für die Regelung von Klimaanlage ist die enge Verknüpfung der Temperaturregelung mit der Feuchteregelung, d.h. eine Raumtemperaturänderung bewirkt auch eine Feuchteänderung im Raum und umgekehrt. Als klassische Varianten haben sich herausgebildet:

- Raumtemperaturregelung mit der Führungsgröße Außentemperatur
- Raumfeuchteregelung als Taupunktregelung oder direkte Feuchteregelung.

Bei der sogenannten *Taupunktregelung*, mit der sehr viele Anlagen betrieben wurden und häufig noch werden, wird die Temperatur nach dem Wäscher, die bei hohen Befeuchtungsgraden nahe an der Sättigungskurve liegt, als Regelgröße verwendet. Die Einfachheit bezüglich der Sensorik (nur Temperaturmessung) gewährleistet meistens einen störungsfreien Betrieb. Die Nachteile des Verfahrens sind aber durchaus schwerwiegend:

- Arbeitet die Regelung mit fest eingestellten Sollwerten, kann auf veränderliche Feuchtelasten nicht reagiert werden.
- Um stets einen definierten „Taupunkt“ zu haben, muß der Wäscher immer betrieben werden, so auch im Sommer bei vorgeschalteter Entfeuchtung mittels

eines Oberflächenkühlers. Dadurch ergeben sich energetische Mehraufwendungen.

Aus den genannten Gründen wird die Taupunktregelung – trotz großer Verbreitung – im weiteren außer acht gelassen und nur die direkte Feuchteregelung betrachtet.

Der *moderne Stand der konventionellen Prozeßführung* nutzt kombinierte Folge- und Bereichsumschaltungen in vielfältiger Form. Erstere sind technisch unerlässlich, um den stark veränderlichen Einsatzbedingungen – unter denen eine Klimaanlage arbeiten muß – zu entsprechen. So sind Umschaltungen von Aggregaten (Vorwärmer zum Kühler und umgekehrt) erforderlich, um den Sollwert einer Regelgröße einzuhalten. Man spricht dann von *Folge-* bzw. von *Sequenzschaltungen*.

Eine Möglichkeit zur wirtschaftlichen Prozeßverbesserung ist dadurch gegeben, daß man genau definierten *Außenluftzustandsbereichen (Feldern)* unterschiedliche Regelungsregime zuordnet. So kann beispielsweise nur die Klappenstellung vom Außenluftzustand abhängig gesteuert, aber auch die gesamte Prozeßstrategie von Feld zu Feld unterschiedlich entworfen werden. Es existiert eine Vielzahl von Vorschlägen [2 bis 6]. Die jeweiligen Regelungen entsprechen in allen diesen

Fällen konventionellen Verfahren. Wie kompliziert die Feldeinteilungen sein können, zeigt Bild 1 nach [6]. Die Feldbegrenzungen entspringen unterschiedlichen Festlegungen. Beispielsweise sind dies: Isothermen, Isohygren, Isenthalpen, Mischungsverhältnisse, Arbeitskur-

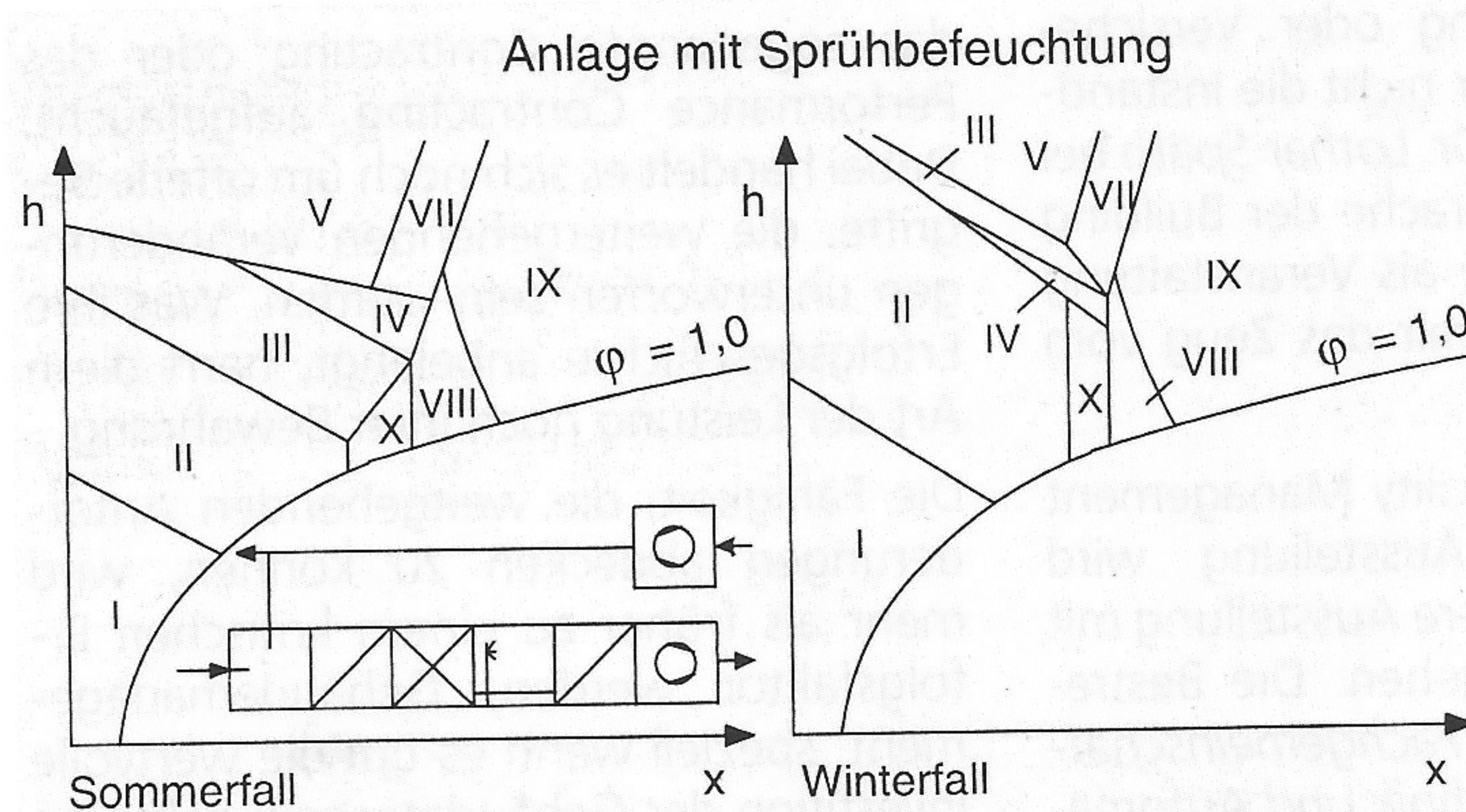


Bild 1 Einteilung der Außenluftzustände in Felder mit unterschiedlichen Regelungsregimen (Auszug aus [6])

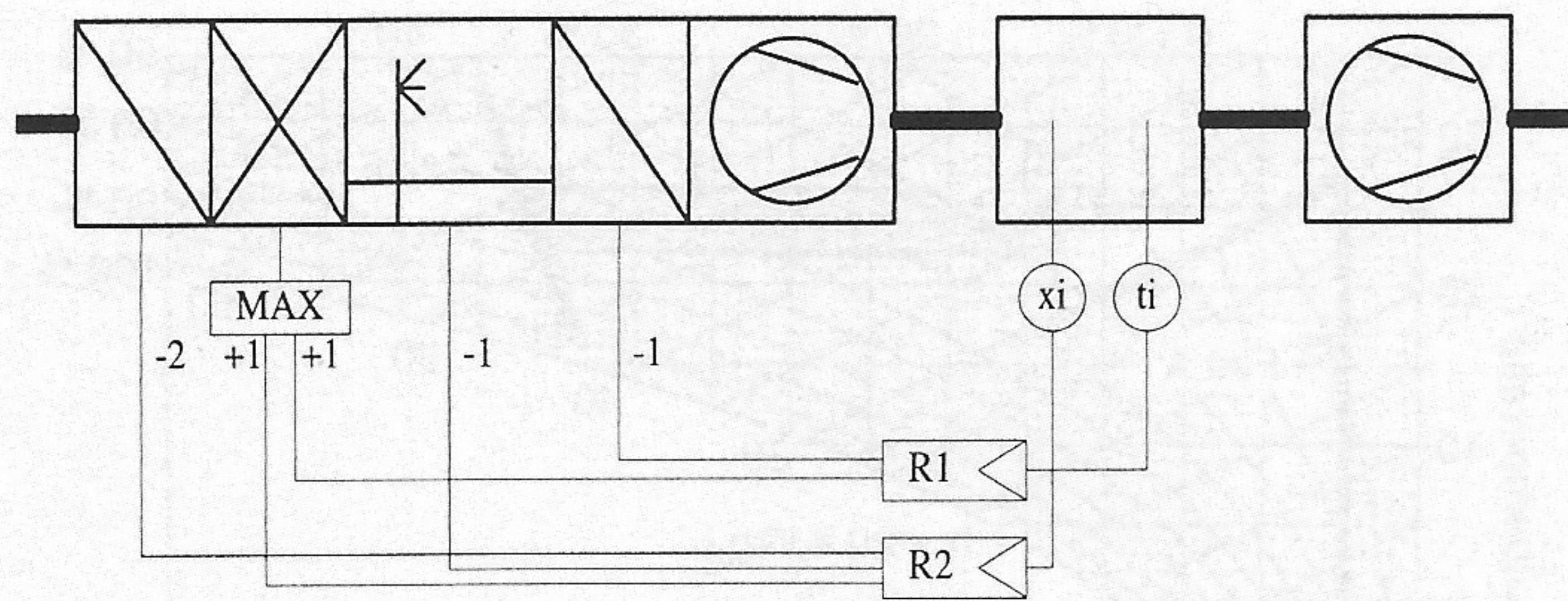


Bild 2 Schaltung einer einfachen, konventionell geregelten Klimaanlage mit Vorwärmer, Kühler, Wäscher und Nachwärmer

ven von Aggregaten (Feuchtkugeltemperatur bei Wäschern), Grenzkostenverhältnisse. Letztere werden aus Betriebskostenvergleichen bei unterschiedlichem Aggregateinsatz gebildet und stellen sehr häufig eingesetzte Feldebegrenzung dar. Bild 1 verdeutlicht nicht nur die vielfältigen Möglichkeiten der Bereichsgestaltung, sondern auch die damit verbundenen Nachteile. Dies sind:

- Voraussetzung für die Bereichsermittlung ist eine äußerst exakte Auslegung der Anlage, die nicht immer gegeben ist.
- Innerhalb der Bereiche werden Regelungsstrategien verwirklicht, die wiederum auch Folgeschaltungen einschließen. Damit ergeben sich sehr häufige Aggregateumschaltungen, die teilweise auch Hysteresen bewirken. Dies bedeutet, daß die mitunter sehr kleinen Felder an ihren Grenzen noch von Hystereseerscheinungen überlagert werden. Dann ist ein ordnungsgemäßer stabiler Anlagenbetrieb kaum möglich.
- Die Feldeinteilungen sind für jede Anlagenschaltung in Abhängigkeit der eingesetzten Aggregate (z. B. Sprüh- oder Dampfbefeuchter), des Betriebsfalles (Sommer, Winter) und der jeweils gültigen Kostenverhältnisse zu ermitteln. Diese Aufgabe ist nur mit großem Aufwand und hohem Intellekt lösbar, denn jeder denkbare Betriebszustand muß im voraus gedanklich analysiert werden. Die Umschaltung zwischen den wechselnden Betriebsfällen während der Übergangszeit ist nicht praktikabel. Weiterhin ändern sich oftmals die Kostenverhältnisse, die eine völlige Überarbeitung (Veränderung der Grenzkostenkurven) nach sich ziehen.

Aus den genannten Gründen wird diese immer detailliertere Gestaltung der Bereiche als nicht zukunftsfähige Zielrichtung eingeschätzt.

2 Beispiel 1 (konventionelle Lösung)

Eine Anlage zur Büroklimatisierung nach Bild 2 mit den konventionellen Folgeschaltungen gemäß Bild 3 wird mit einem Simulationsprogramm [7] untersucht. Die

Eingabedaten lauten (ausführliche Darstellung in [8]):

Raumluftzustand:

$t = 22\text{ °C}$; $x = 8\text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$ ($\varphi \approx 48\%$)

Aggregate- und Raumdaten:

Kühler:

$\eta_K = 0,9$; $B_y = 0,9$;

minimale Kühlmedientemperatur: 6 °C

Wäscher:

stetige Regelung; $\eta_{B, \min} = 0$;

$\eta_{B, \max} = 0,95$; Pumpenleistung: $0,2\text{ kW}$

Zu- und Ablüfter:

ungeregelt; $\dot{V} = 1000\text{ m}^3/\text{h}$;

$\Delta p = 450\text{ Pa}$; $\eta = 0,8$

Raum:

programminternes Lastmodell; Grundfläche 60 m^2 , 4 Außenfassaden; Heizlast nach DIN 4701: 2 kW ; Personenzahl 10

Energie- und Stoffpreise:

Wärme $0,08\text{ DM/kWh}$; Kälte $0,10\text{ DM/kWh}$; Elt $0,25\text{ DM/kWh}$; Wasser $8,00\text{ DM/m}^3$

Wetterdaten: TRY 03

Zeitpläne: alle Tage als Werktage von 5.00 bis 19.00 Uhr.

Zunächst werden mit dem Simulationsprogramm zur Kontrolle Einzelpunktberechnungen durchgeführt. Die Ergeb-

nisse (Zustandsverläufe der Luft im Klimaprozeß bei unterschiedlichen Außenluftzuständen und Raumlasten unter Beachtung des gegebenen, konstanten Raumsollzustandes) finden sich grafisch dargestellt im Bild 4. Es bedeuten dabei:

Fall A: $t_a = -12\text{ °C}$; $x_a = 1\text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$; innere Last und max. Heizlast berücksichtigt

Fall F: $t_a = 32\text{ °C}$; $\varphi_a = 40\%$; innere Last und max. Kühllast berücksichtigt

Fall B: $t_a = 20\text{ °C}$; $x_a = 2\text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$

Fall C: $t_a = 27\text{ °C}$; $\varphi_a = 30\%$

Fall D: $t_a = 20\text{ °C}$; $\varphi_a = 65\%$

Fall E: $t_a = 23\text{ °C}$; $\varphi_a = 80\%$

Bei den Fällen B bis E ist nur die innere Last berücksichtigt.

Erwartungsgemäß zeigt sich, daß der Raumsollzustand bis auf einen iterationsbedingten Toleranzbereich bei allen betrachteten Zustandsverläufen erreicht wird. Die Leistung der Aggregate ist entsprechend angepaßt, d. h. die Regelung erfüllt ihre Aufgabe fehlerfrei.

Tab. 1 Energie- und Stoffbedarf des konventionellen Klimaprozesses

konventionelle Regelung	Wärme kWh	Kälte kWh	Elt kWh	Wasser m ³
Vorwärmer	13 207	0	0	0
Kühler	0	5666	0	0
Wäscher	0	0	742	12,172
Nachwärmer	14 940	0	0	0
Zulüfter	0	0	798	0
Ablüfter	0	0	805	0
Summe	28 147	5666	2345	12,172

Eine Jahressimulation liefert die erforderlichen Energie- und Stoffsummen (Tab. 1) und die jährlichen Betriebskosten: 3502 DM.

Das Aufstellen von Feldeinteilungen und der zugehörigen Regelungen mit den entsprechenden Sequenzen zur Betriebskostensenkung ist nicht direkt zielführend. Der erfahrene Ingenieur erkennt zwar die qualitative Veränderungsrichtung seiner Maßnahmen durch Überlegung oder durch Vergleiche mit dem Optimalprozeß (Bild 5), die quantitative Auswirkung ist

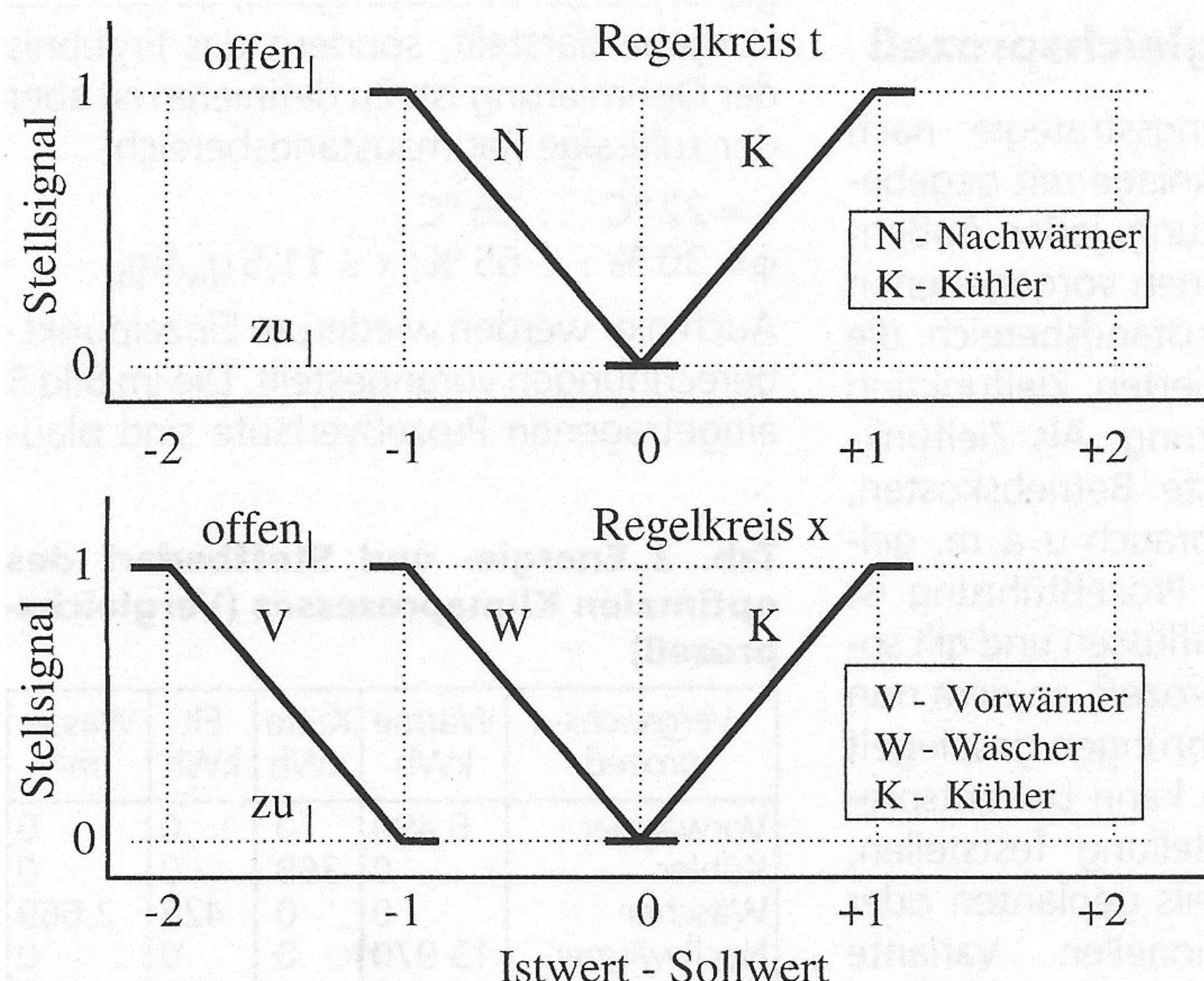


Bild 3 Sequenzschaubild für die im Bild 2 dargestellte Anlage

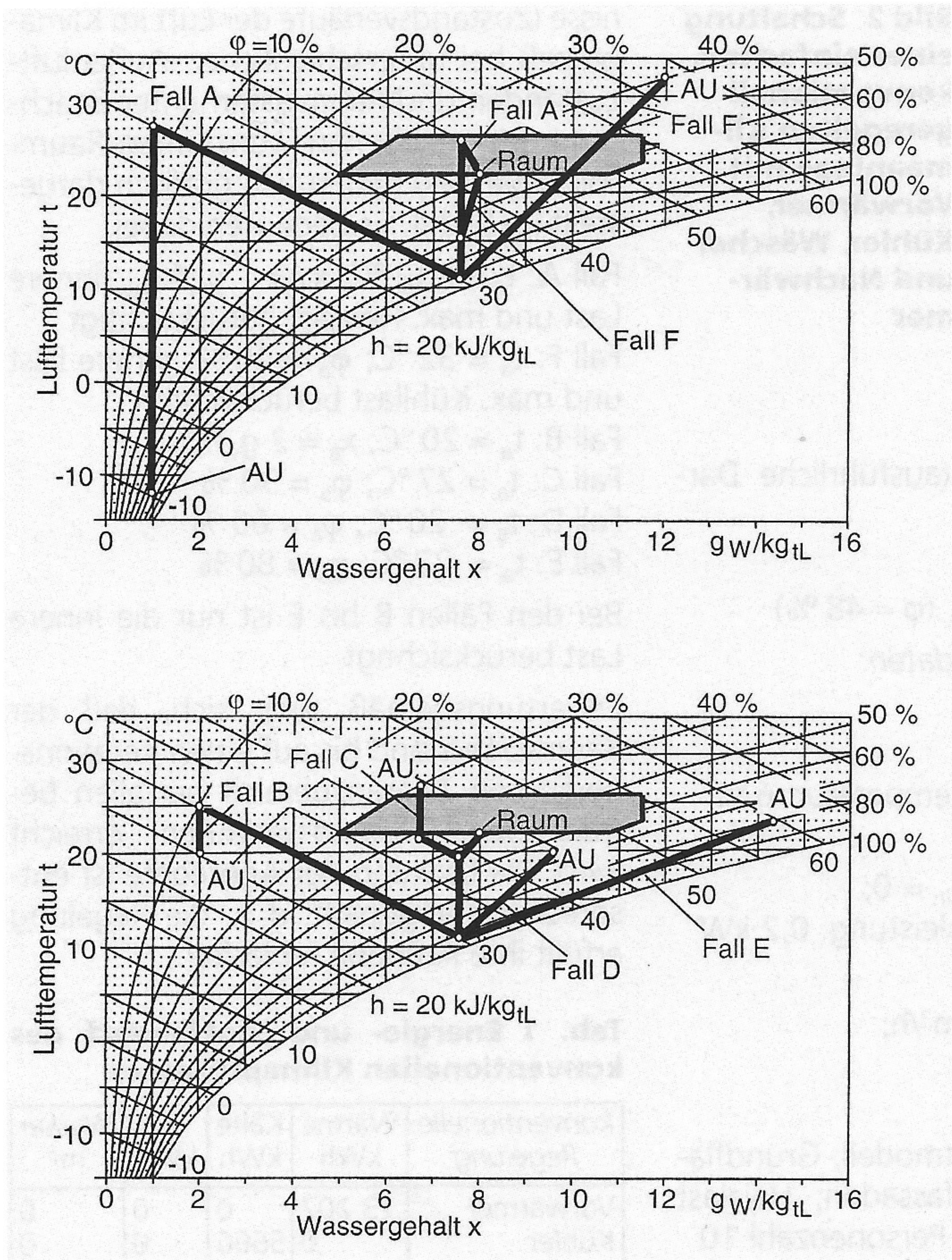


Bild 4 Zustandsverläufe der Luft im Klimaprozeß einer Anlage nach Bild 2 und 3 bei unterschiedlichen Außenluftzuständen und Raumlasten unter Beachten eines gegebenen Raumsollzustandes

wegen der Häufigkeitsverteilung jedoch kaum abschätzbar. In [8] wird in umfangreichen Beispielen gezeigt, welche beachtlichen Effekte dennoch möglich sind, ohne die Werte des Vergleichsprozesses völlig zu erreichen.

3 Optimaler Vergleichsprozess

Die neue Optimierungsstrategie nach [1, 8] liefert für jede Anlage mit gegebener Aggregatebestückung, jeden Außenluftzustand und für einen vorgegebenen zulässigen Raumluftzustandsbereich die im Sinne einer definierten Zielfunktion günstigste Prozeßführung. Als Zielfunktion können niedrigste Betriebskosten, geringster Energieverbrauch u. a. m. gelten. Diese günstigste Prozeßführung ist frei von subjektiven Einflüssen und gilt somit als ein *Vergleichsprozess*, an dem nun alle anderen Prozeßführungen gespiegelt werden können. Man kann bei entsprechender Gegenüberstellung feststellen, wo man mit der jeweils geplanten oder realisierten konventionellen Variante steht, und welches Optimierungspotential noch verfügbar ist. Das Beispiel 2 verdeutlicht dies.

4 Beispiel 2 (Vergleichsprozess)

Auf Grundlage des Beispiels 1 wird eine Optimierungsrechnung durchgeführt. Die bisher verwendete Regelungsstrategie ist hierbei bedeutungslos, da sie keine Vorgabe darstellt, sondern das Ergebnis der Optimierung ist. Zu definieren ist aber der zulässige Raumzustandsbereich:

$t = 22\text{ °C} \dots 26\text{ °C}$
 $\phi = 30\text{ \%} \dots 65\text{ \%}; x \leq 11,5\text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$

Auch hier werden wiederum Einzelpunktberechnungen vorangestellt. Die im Bild 5 eingetragenen Prozeßverläufe sind plau-

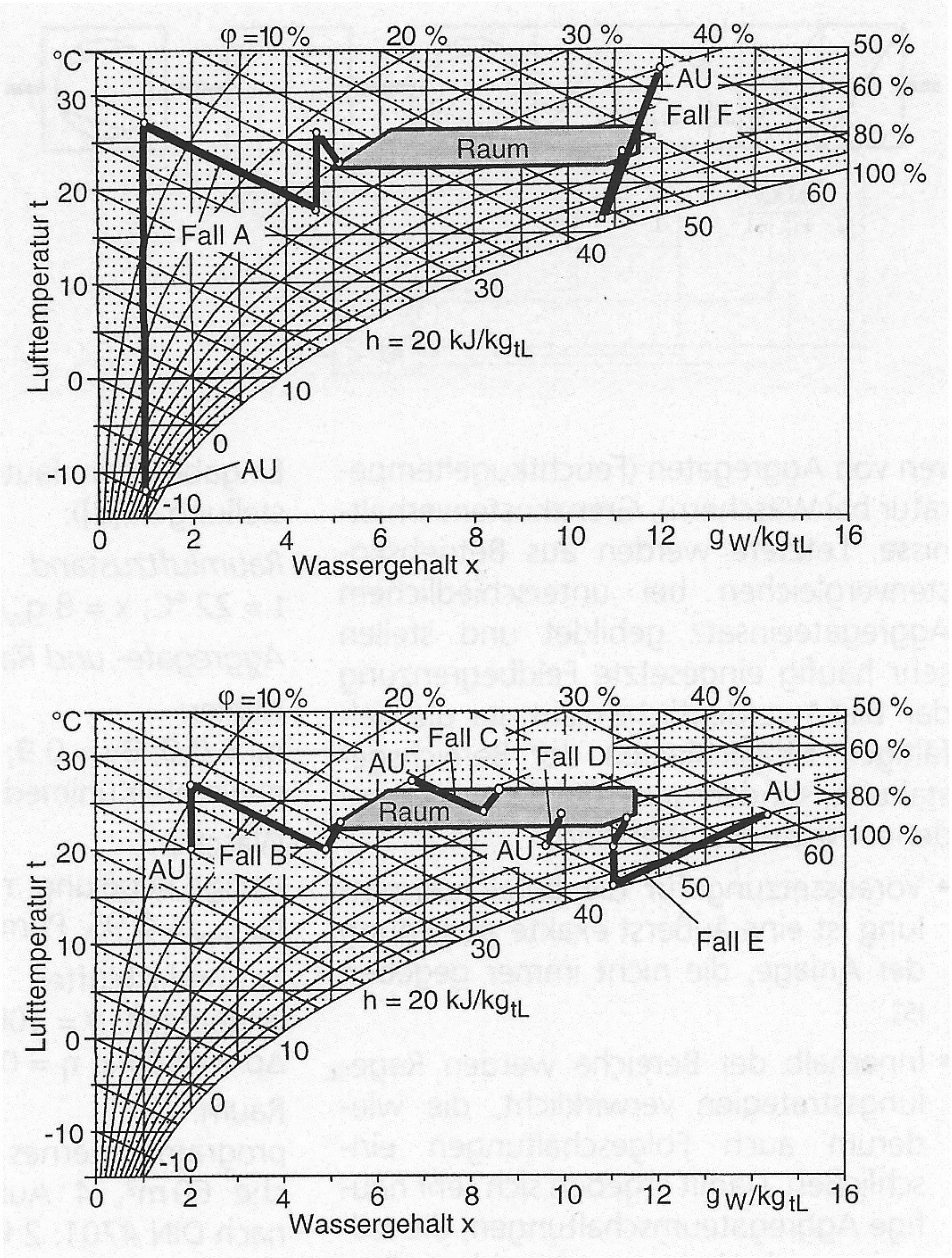


Bild 5 Betriebskostenoptimierte Zustandsverläufe (Vergleichsprozesse) der Luft im Klimaprozeß für eine Aggregatereihung nach Bild 2 bei unterschiedlichen Außenluftzuständen und Raumlasten unter Beachten eines gegebenen Raumsollzustandsbereiches

sibel und enden stets im zugelassenen Raumzustandsbereich (Behaglichkeitsbereich). Das Ergebnis der Jahressimulation zeigt Tab. 2, die jährlichen Betriebskosten betragen 2202 DM.

5 Auswertung des Optimierungspotentials

Die kostengünstigste Betriebsweise der betrachteten Klimaanlage wird dann erreicht, wenn man zu jeder Zeit den optimalen Vergleichsprozess realisiert. Der zulässige Raumzustandsbereich ist bezüglich seiner Grenzkurven durch DIN 1946, Teil 2 festgelegt. Mit der Optimierungsstrategie kann man diesen Bereich im Sinne der Zielfunktion voll ausnützen. Setzt man die Aufwendungen für den Vergleichsprozess gleich 100 %, so ergeben sich bei optimaler Prozeßführung bezüglich der Zielfunktion „minimale Betriebskosten“ nur noch Aufwendungen von 62,9 %. Als besonders interessante Feststellungen folgen aus den Ergebnissen:

- Die bemerkenswerten Unterschiede in den Betriebskosten unterstreichen die Notwendigkeit der Optimierung. Es sei

Tab. 2 Energie- und Stoffbedarf des optimalen Klimaprozesses (Vergleichsprozess)

Vergleichs-prozeß	Wärme kWh	Kälte kWh	Elt kWh	Wasser m³
Vorwärmer	6 490	0	0	0
Kühler	0	360	0	0
Wäscher	0	0	428	2,669
Nachwärmer	13 970	0	0	0
Zulüfter	0	0	798	0
Ablüfter	0	0	805	0
Summe	20 460	360	2031	2,669

nochmals angemerkt, daß als konventionelle Variante eine Anlage mit regelbarem Wäscher – also kein taupunktgeführter Prozeß – verwirklicht wurde.

- Selbst wenn die rechnerisch ermittelte Optimierungsstrategie praktisch nicht umsetzbar wäre, bietet diese doch den übergroßen Vorteil eines „unbestechlichen Gutachters“, der gnadenlos vorhandene Mängel erdachter Regelungsvarianten sichtbar macht.

6 Probleme bei der Umsetzung der Optimierungsstrategie

Bei der praktischen Umsetzung des objektiv ermittelten, optimalen Klimaprozesses mit definierter Zielfunktion – z. B. bezüglich der Kosten – erscheint es am sinnvollsten, eine Einzelregelung für jedes Aggregat mit den errechneten Zustandswerten als direkt vorgegebene Sollwerte vorzunehmen. Bei der praktischen Umsetzung gibt es jedoch einige Schwierigkeiten:

- Die Aggregate sind üblicherweise platzsparend, direkt aneinander geflanscht, so daß kaum eine repräsentative Meßmöglichkeit über den Querschnitt vorhanden ist.
- Die Zustandsgrößen und Massestromdichten sind üblicherweise nicht homogen über den Querschnitt der Aggregate verteilt, sondern konstruktionsbedingt ortsabhängig. Selbstverständlich müßte diese Messung einen repräsentativen Mittelwert bezogen auf den Massestrom darstellen. Derartige selbstintegrierende Sensoren bzw. Sensorschaltungen sind aus Gründen zu hoher Kosten in der Regel nicht einsetzbar.
- Ein weiteres Problem stellen die meist unterschiedlichen Zeitkonstanten der Temperatur- und Feuchtefühler dar, so daß es beim instationären Betrieb zu Fehlbestimmungen des Luftzustandes kommen kann.
- Die Optimierungsrechnung wird in vorgegebenen Zeitschritten wiederholt, d. h. die Ergebnisse der Strategie werden in Zeitetappen aktualisiert. Zwischenzeitliche Änderungen des Außenluftzustandes, der Raumlasten oder der Aggregatekenngößen führen zu Abweichungen des Raumzustandes, so daß dieser im ungünstigsten Fall außerhalb des Behaglichkeitsbereiches liegen könnte.

7 Ausweg Kombinationsverfahren

Es handelt sich dabei um eine Kombination, die Optimierungsstrategie mit einer

konventionellen Regelung zu verknüpfen. Die Grundphilosophie des Vorgehens ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Ausgewählte Aggregate einer Klimaanlage werden konventionell geregelt, wobei die Auswahl so zu erfolgen hat, daß Raumlufttemperatur sowie Raumluftfeuchte beeinflussbar sind und in der Realität auftretende Störungen bei stabilem Anlagenbetrieb beherrscht werden. Als Entscheidungshilfe für die Auswahl des konventionell geregelten Abschnittes können Optimierungsrechnungen für mehrere Außenluftzustände und Raumbelastungen durchgeführt und die optimierte Prozeßführung visualisiert werden. Bei relativ konstanter Feuchtelast ist nur eine Raumtemperaturregelung ausreichend.
- Der Umfang der konventionellen Regelung – d. h. deren Freiheitsgrad – ist soweit einzugrenzen, daß der durch Optimierung erzeugte Vergleichsprozeß im praktischen Betrieb weitestgehend realisiert wird.
- Eindeutig und praktikabel umsetzbare Optimierungsergebnisse werden den Stellorganen der Aggregate direkt zugeleitet (Beispiel: Steuerung des Außenluftanteils einer Mischkammer).
- Die Zuordnung der Aggregate in den regelbaren und in den steuerbaren Teil der Klimaanlage hat für alle Aggregate, deren Leistung beeinflussbar ist, zu erfolgen.
- Die Anlage wird mit vordefinierten Stellsignalen für die gesteuerten und geregelten Aggregate in Betrieb genommen.
- Nachdem ein nahezu stationärer Luftaufbereitungsprozeß abläuft, wird aus dem Zuluftzustand und dem Abluftzustand des Raumes (bzw. des angeschlossenen Systems) die Zustandsänderung im Raum ermittelt.
- Unter Zugrundelegung der Anlagenschaltung (d. h. der Aggregatereihung und der Apparatedaten), des Außenluftzustandes, der Raumbelastung und des zulässigen Behaglichkeitsbereiches für den Raum wird für die definierte Zielfunktion – in der Regel sind dies die Betriebskosten – eine Optimierung des Klimaprozesses durchgeführt. Die getroffene Aufteilung in einen regelbaren und steuerbaren Anlagenteil sowie die im konventionell betriebenen Anlagenabschnitt verwirklichten Regelungsstrategien gehen in das Optimierungsverfahren nicht ein.
- Die Ergebnisse der Optimierungsrechnung werden in zwei Etappen umgesetzt. Der optimale Raumzustand wird

als Temperatur- und Feuchtesollwert der konventionellen Regelung vorgegeben. Die direkt gesteuerten Aggregate erhalten aktualisierte Stellsignale gemäß der Optimierungsrechnung.

- Die Optimierungsrechnung wird in größeren Zeitabständen – z. B. stündlich – wiederholt. Zwischenzeitlich bleiben der Raumzustand als Sollwert und die Stellsignale an die steuerbaren Aggregate unverändert.
- Es ist auch möglich, nach der Optimierungsrechnung einen Bewertungsfilter der Ergebnisse einzusetzen, bevor die praktische Umsetzung auf die Aggregate bzw. den konventionell arbeitenden Regelungsteil erfolgt. Damit können große Änderungen der Optimierungsergebnisse gegenüber der vorherigen Phase auf ihre Plausibilität und sinnvolle Umsetzbarkeit überprüft werden. Treten große Änderungen auf, so könnten diese beispielsweise mit einem Dämpfungsfaktor belegt werden, um Schwingungen der konventionellen Regelkreise zu vermeiden.

Ist die Klimaanlage im Aufbau so einfach, daß der konventionell geregelte Teil zur Beeinflussung von Raumlufttemperatur sowie Raumluftfeuchte bereits alle vorhandenen Aggregate einer Klimaanlage einbezieht, so besteht die Kombination zur Optimierungsstrategie nur noch in der Vorgabe des optimalen Raumzustandes. In diesem Fall wäre es auch denkbar, diese Zustandspunkte durch ein trainiertes neuronales Netz nach [9] bereitzustellen.

8 Beispiel 3 (Kombinationsverfahren)

Im Beispiel 1 ist eine Anlage nach Bild 2 mit dem Sequenzbild nach Bild 3 einer Jahressimulation unterzogen worden. Im Beispiel 2 wurde der Vergleichsprozeß untersucht, um das Optimierungspotential festzustellen. Da die im Bild 2 betrachtete Anlage exakt der kleinsten, möglichen Aggregatereihung entspricht, mit der ein konventioneller Ersatzprozeß zur Temperatur- und Feuchteregelung

Tab. 3 Energie- und Stoffbedarf des Kombinationsprozesses (t-, x-Regelung)

Kombinationsprozeß	Wärme kWh	Kälte kWh	Elt kWh	Wasser m ³
Vorwärmer	2 065	0	0	0
Kühler	0	575	0	0
Wäscher	0	0	695	2,687
Nachwärmer	18 601	0	0	0
Zulüfter	0	0	798	0
Ablüfter	0	0	805	0
Summe	20 666	575	2298	2,687

durchführbar ist, soll das Beispiel erneut betrachtet werden.

Für diesen denkbar einfachsten Kombinationsprozeß hat nur der zu jeder Stunde ermittelte optimale Raumzustand als Vorgabe zu dienen. Die stundenweisen Ergebnisse der Optimierungsrechnung finden als Sollwerte für den Raumzustand Eingang in die konventionelle Anlagensimulation. Das Ergebnis der Jahressimulation zeigt Tab. 3. Die Jahresbetriebskosten betragen 2307 DM.

Dies sind nur 65,9 % der Variante mit konventioneller Regelung. Das Ideal – der Vergleichsprozeß – lag bei 62,9 %. Dies ist ein sehr gutes Ergebnis, wenn man bedenkt, daß diesem Kombinationsprozeß eine ganz konventionelle Regelung, die im gesamten Außenluftbereich gültig ist (1-Feld-Verfahren), zugrunde liegt. Der Erfolg beruht nur auf der Vorgabe des optimalen Raumpunktes aus dem Vergleichsprozeß. Die Abweichung zum Vergleichsprozeß (4,8 %) kann durch eine Verfeinerung des Diskretisierungsgitters beim Optimierungsverfahren noch verringert werden. Würde man auf eine stetige Feuchterege lung verzichten, d. h. die Aggregate Vorwärmer, Wäscher und Kühler werden nach dem Optimierungsergebnis bis zur nächstfolgenden Optimierungsrechnung gesteuert, dann wird nur noch eine Temperaturregelung über den Nachwärmer realisiert. Dies ist ein durchaus praktikables Verfahren, wenn keine plötzlichen Feuchtelaständerungen zu erwarten sind. (Die Raumkühlung über Oberflächenkühler oder Wäscherbetrieb ist in diesem Fall in die Feuchtesteuerung infolge des komplexen Steuersignals bei der Optimierung eingeschlossen.) Die Jahressimulation ergibt die Werte der Tab. 4 und die Betriebskosten: 2207 DM.

Tab. 4 Energie- und Stoffbedarf des Kombinationsprozesses (nur t-Regelung)

nur Temp.-regelung	Wärme kWh	Kälte kWh	Elt kWh	Wasser m³
Vorwärmer	5 660	0	0	0
Kühler	0	360	0	0
Wäscher	0	0	436	2,706
Nachwärmer	14 835	0	0	0
Zulüfter	0	0	798	0
Ablüfter	0	0	805	0
Summe	20 495	360	2039	2,706

Damit liegt man bei nur 63,0 % der Betriebskosten der Basisvariante. Vom Vergleichsprozeß ist man bezüglich der Kosten nur noch um 0,2 % vom Optimum entfernt. Dieses Ergebnis bestätigt die grundsätzliche Richtigkeit des Vorgehens.

Tab. 5 Optimierungspotentiale

Anlagentyp	eingesetzte Aggregate	Jahresbetriebskosten	Optimierungspotential
Variante 1: Einfache, moderne Klimaanlage			
konventionelle Regelung aller Aggregate (kein Taupunktbetrieb!) – (Beispiel 1) feste Sollwerte für Temperatur und Feuchte	Vorwärmer, Kühler, Wäscher, Nachwärmer	100 %	
Vergleichsprozeß (Beispiel 2)		63 %	37 %
Kombinationsprozeß (Beispiel 3; t-, x-Regelung)		66 %	34 %
Kombinationsprozeß (Beispiel 3; nur t-Regelung)		63 %	37 %
Variante 2: Einfache, moderne Klimaanlage mit Wärmerückgewinner konstanter Rückwärmzahl ($\Phi = 0,6$)			
Regelung wie bei Variante 1, WRG stets in Betrieb	WRG, Vorwärmer, Kühler, Wäscher, Nachwärmer	85 %	
Vergleichsprozeß		41 %	52 %
Variante 3: Einfache, moderne Klimaanlage mit Wärmerückgewinner konstanter Rückwärmzahl ($\Phi = 0,6$) und Mischkammer			
Regelung wie bei Variante 1, WRG stets in Betrieb, Mischkammer stets 50 % Außenluft	WRG, Mischer, Vorwärmer, Kühler, Wäscher, Nachwärmer	65 %	
Vergleichsprozeß		28 %	57 %

9 Schlußfolgerung und Extrapolation der Ergebnisse

Das Optimierungsergebnis – der sogenannte Vergleichsprozeß – legt an alle erdachten oder praktisch arbeitenden Prozesse eine objektive Meßlatte bezüglich der gewünschten Zielfunktion an. Dies können betriebswirtschaftliche oder auch rein thermodynamische Forderungen sein, wie beispielsweise Jahresbetriebskosten oder Exergieaufwendungen usw. [1, 8]. Die direkte praktische Umsetzung des Vergleichsprozesses zur Anlagensteuerung bereitet zur Zeit noch einige Schwierigkeiten, was vor allem im Entwicklungsstand der Sensorik begründet ist. Deshalb wurden verschiedene Möglichkeiten einer Teilumsetzung untersucht [8]. Die sicherste und zugleich einfachste Variante bietet der sogenannte Kombinationsprozeß. Ein Teil der Aggregate der Klimaanlage wird mit konventionell arbeitenden Regelkreisen verschaltet. Die Mindestanforderung wird die Gestaltung eines Temperaturregelkreises sein, meistens ist noch ein Feuchterege lkreise erforderlich. Die Sollwerte entstammen dem in gewissen Intervallen berechneten Vergleichsprozeß. Alle nicht in die Regelkreise integrierten Aggregate werden direkt mit den Daten aus der Optimierung gesteuert. Die Ergebnisse sind,

wie die durchgeführten Jahressimulationen zeigten, außerordentlich vielversprechend.

Um ein Gefühl für das vorhandene Optimierungspotential zu bekommen, seien einige Rechenergebnisse aus [8] einschließlich der Beispiele 1 und 2 in Tab. 5 zusammengestellt. Die prozentualen Jahresbetriebskosten beziehen sich jeweils auf die Ursprungsvariante (Variante 1 ist identisch mit der Anlage nach Bild 2). Die Variantenunterschiede liegen in der Aggregatebestückung begründet. Mit aufsteigender Variantenzahl erhöht sich die Anlagenkomplexität, und die Wärmerückgewinnung nimmt zu. Deshalb sinken die Betriebskosten von 100 % über 85 % bis auf 65 %. Innerhalb dieser festen Aggregatekonfiguration besteht durch die Optimierung der Prozeßführung aber noch ein sehr großes Einsparpotential.

Sehr bemerkenswert ist es, daß mit zunehmender Anlagenkomplexität das Optimierungspotential von 37 % über 52 % bis auf 57 % ansteigt. Selbstverständlich gibt es keine Beweisführung, daß diese hier festgestellte Erkenntnis auch allgemeingültig ist. Die bisherigen Untersuchungen und die gemachten Erfahrungen erlauben – mit etwas Spekulation – jedoch die Aussage, daß in den immer

komplizierteren Systemen das relative Einsparpotential durchaus wachsen kann. Die Ursachen können vielfältig sein:

- Unübersichtlichkeit der immer komplexer werdenden Anlagen
- zu kleine Bilanzkreise (wärmetechnische Verbesserungen werden durch hydraulische Mehraufwendungen mitunter stark reduziert)
- Schwächen des menschlichen Denkens.

Der zuletzt genannte Mangel kann nur durch das Aufstellen von überschaubaren Einzelalgorithmen und deren anschließender, sinnvoller Vernetzung beseitigt werden. Ein kleiner, gut erweiterbarer Beitrag dazu liegt in [8] vor. Es sei daran erinnert, daß die dynamische Optimierung nach [1] zweidimensional – für Temperatur und Feuchte – geführt wird. Dieses Verfahren umfaßt eine sehr umfangreiche Betrachtung. Ab einer bestimmten Genauigkeitsanforderung gehört natürlich auch der Luftdruck dazu und schließlich auch die zeitliche Dimension. Bisher beschränkte man sich auf die Aneinanderreihung quasistationärer Zustände. Die genannten Einschränkungen werden

beim derzeitigen Entwicklungsstand aber für vertretbar gehalten. Sie sollten nicht als Abwehrargumente gegen das vorgestellte Verfahren Verwendung finden.

Einsparpotentiale der aufgeführten Größenordnung objektiv aufzudecken, ihre praktische Nutzbarkeit zu eröffnen und den Wettbewerb auf eine qualifiziertere Stufe zu heben, rechtfertigen nach Ansicht des Verfassers, auch aufwendigere, der heutigen Zeit aber durchaus entsprechende Algorithmen umzusetzen.

Literatur

- [1] Glück, B.: Optimale Vergleichsprozesse der Klimatechnik. Ki Luft- und Kältetechnik 34 (1998) 8, S. 364–370, Patentschrift 4330646 (1993)
- [2] Glück, B.: Entwurf einer Klimaanlage. Diplomarbeit Nr. 234 am Institut für Thermodynamik und Energiewirtschaft, TU Dresden (1967)
- [3] Kreslin, A.: Thermodynamische Analyse von Regelprozessen einer Einzonenklimaanlage. Luft- und Kältetechnik 8 (1972) 5, S. 227–229
Automatische Steuerung von Klimaanlagen. Verlag Literatur für Bauwesen, Moskau (1972)
- [4] Bork, P.: Energieeinsparung bei Lüftungs- und Klimaanlagen mit Hilfe verbesserter

Automatisierungskonzepte. atp 28 (1986) 4, S. 184–190, Patentschrift 3439288, 1984

- [5] Müller, K.: Energieeinsparung an ausgeführten Anlagen mit Dampfbefeuchtung. VDI-Berichte 542, VDI Verlag, Düsseldorf (1984)
- [6] Feder, U.: Grundstrukturen und Steuer-algorithmen zur wirtschaftlichen Betriebsweise von Klimaanlagen und Möglichkeiten der Prozeßbewertung. Dissertation TU Dresden 1992, Patentschrift DD 295706 A5, 1990
- [7] Schiller, H.: ROM-h,x-Modul, Simulationsprogramm für raumlufthtechnische Anlagen (1994)
- [8] Glück, B.: Vergleichsprozesse der Klimatechnik. C.F. Müller Verlag, Heidelberg (1998)
- [9] Glück, B.: Simulation des optimalen Raumlufthzustandes mit neuronalem Netz. Ki Luft- und Kältetechnik 34 (1998) 11, S. 530–533

Schlüsselwörter

Klimaanlagen
Büroklimatechnik
Temperaturregelung
Feuchteregelung
Optimierungsstrategie
Kombinationsverfahren