Optimierung eines klimatechnischen Prozesses

Bernd Glück

(Teil 3, Fortsetzung von Heft 4/1994)

Beispiele

Bei der numerischen Abarbeitung der Beispiele und der zugehörigen Ergebnisdarstellung der Prozeßverläufe im h, x-Diagramm ist zu beachten, daß durch die Einteilung in Abschnitte von 1 K und 1 g_W/kg_{tL} (siehe *Bild 9*) Fehler von der halben Abschnittsgröße entstehen können. Außerdem sind die zulässigen Fehlerschranken bei der Hauptprogramm-Iterationsschleife ebenfalls mit 1 K und 1 g_W/kg_{tL} festgelegt.

Beispiel 1

Eine einfache Teilklimaanlage – bestehend aus Vorwärmer, Wäscher, Nachwärmer – soll Außenluft (−14 °C, 1 g_W/kg_{tL}) so aufbereiten, daß der Endzustand im Bereich $t = (20 \ldots 24)$ °C; $\varphi = (0{,}30 \ldots 0{,}65)$ bzw. $x < 11{,}5$ g_W/kg_{tL} liegt. Für die Zwischenzustände existieren keinerlei Begrenzungen. Die spezifischen Kosten betragen:

Wärmeenergie bis zu $t_{Luftaustritt}$ von 25 °C:
k1H = 0,05 DM/kWh

Wärmeenergie über $t_{Luftaustritt}$ von 25 °C:
k2H = 0,15 DM/kWh

Betriebsenergie für Befeuchterpumpe inclusive Wirkungsgrad:
kW = 0,35 DM/kWh.

Der Wäscher ist regelbar im Bereich: $\eta B\,min = 0{,}50$; $\eta B\,max = 0{,}95$. Es sind $\dot{m} = 8{,}8$ kg/s (ca. 27 500 m^3/h) Luft aufzubereiten. Der Prozeßverlauf ist so zu bestimmen, daß minimale Kosten entstehen.

Lösung

Zur Berechnung wird das Optimierungs-Programmsystem eingesetzt. Um den Lösungsweg verständlich zu machen, seien im *Bild 30* die einzelnen Etappenfelder, die angelehnt an ein h, x-Diagramm gestaltet und mit der Zielfunktion „Kosten in DM/h" gefüllt sind, ausgedruckt. Die Zwischenergebnisse werden kurz charakterisiert:

Etappenfeld e = 1

Es ist nur der Außenluftzustand (−14 °C; 1 g_W/kg_{tL}) mit den Kosten 0 DM/h belegt.

Etappenfeld e = 2

Die Aufheizung erfolgt in 1 K-Schritten, die Feuchte bleibt konstant. An den möglichen Endpunkten sind die Kosten vermerkt. Die höheren spezifischen Energiekosten bei Temperaturen > 25 °C werden durch den abgebildeten Kostensprung deutlich.

Etappenfeld e = 3

Zwischen e = 2 und e = 3 ist der Wäscher installiert. Wird er nicht betrieben, so bleiben die bisherigen Werte erhalten (siehe Reihe x = 1 g_W/kg_{tL}). Geht er in Betrieb, so folgen Luftzustände mit x > 1 g_W/kg_{tL}, wobei nur die technisch möglichen Endpunkte ($\eta B = 0{,}5 \ldots 0{,}95$ und tf = const) belegt sind. Geringe Abweichungen und Fehlstellen im geschlossenen Gebiet entstehen durch den Übergang von t; x auf i; j, der mit UP FELD vorgenommen wird.

Etappenfeld e = 4

Von jedem in e = 3 belegten Abschnitt erfolgt eine Aufwärmung in 1 K Stufen. Gemäß geltender Kostenfunktion werden die Ergebnisse vermerkt. Es treten hierbei besonders deutlich hervor, daß

- technisch gleiche Endpunkte stets überspeichert werden mit den kostengünstigsten Zustandsänderungen;
- nur die im zugelassenen Zielgebiet liegenden Luftzustände eingetragen werden.

Optimaler Weg

Bild 31 faßt nach Auswahl der niedrigsten Kosten im Zielgebiet und Rückverfolgung der jeweils vorangegangenen Quelle den optimalen Weg der Zustandsänderungen mit Angabe der jeweils signifikanten „Aktion" zusammen. *Bild 32* zeigt den Verlauf im h, x-Diagramm.

Beispiel 2

Es ist der optimale Prozeßverlauf für eine Hörsaal-Klimatisierung im Winter- und Sommerfall zu ermitteln. Es sind gegeben:

Außenluftzustand
Winter: tAU = − 12 °C; xAU = 1 g_W/kg_{tL}
Sommer: tAU = 32 °C; xAU = 19 g_W/kg_{tL}
Luftdruck: p = 101 300 Pa

Raumluftbereich
Winter: $t = 20$ °C … 23 °C; $\varphi = 0{,}30 \ldots 0{,}65$; $x < 11{,}5$ g_W/kg_{tL}
Sommer: $t = 24$ °C … 27 °C; $\varphi = 0{,}30 \ldots 0{,}65$; $x < 11{,}5$ g_W/kg_{tL}

Zwischenbereiche: $\varphi \leq 1$

Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, ROM-Zentrale, Hamburg.

ETAPPENFELD e = 4

t °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	x in g Wasser/ kg trockene Luft													
40	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
39	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
38	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
37	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
36	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
35	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
34	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
33	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
32	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
29	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
26	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24	...	...	...	...	...	...	22	24	62	67	72	76	...	...
23	...	...	...	...	...	...	22	23	62	66	72	75	...	...
22	...	...	...	...	...	20	21	23	61	66	71	...	...	...
21	...	...	...	...	...	20	21	22	61	66	71	...	...	...
20	...	...	...	...	...	19	20	22	60	65	...	...	...	...
19	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-----
17	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-----
16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------	
15	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------		
14	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------			
13	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------			
12	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------				
11	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------				
10	...	...	...	...	...	...	...	...	----------					
9	...	...	...	...	...	...	...	...	----------					
8	...	...	...	...	...	...	...	----------						
7	...	...	...	...	...	...	...	----------						
6	...	...	...	...	...	...	----------							
5	...	...	...	...	...	...	----------							
4	...	...	...	...	...	...	----------							
3	...	...	...	...	...	----------								
2	...	...	...	...	...	----------								
1	...	...	...	...	...	----------								
0	...	...	...	...	----------									
-1	...	...	...	...	----------									
-2	...	...	...	...	----------									
-3	...	...	...	----------										
-4	...	...	...	----------										
-5	...	...	...	----------										
-6	...	...	...	----------										
-7	...	...	...	----------										
-8	...	...	----------											
-9	...	...	----------											
-10	...	...	----------											
-11	...	...	----------											
-12	...	...	----------											
-13	...	...	----------											
-14	...	...	----------											

ⓐ d)

ETAPPENFELD e = 2

t °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	x in g Wasser/ kg trockene Luft													
40	...	72	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
39	...	71	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
38	...	69	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
37	...	68	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
36	...	67	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
35	...	65	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
34	...	64	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
33	...	63	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
32	...	61	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31	...	60	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30	...	59	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
29	...	57	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28	...	56	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27	...	55	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
26	...	53	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25	...	17	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24	...	17	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23	...	16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22	...	16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21	...	16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20	...	15	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
19	...	15	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18	...	14	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-----
17	...	14	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-----
16	...	13	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------	
15	...	13	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------		
14	...	12	...	...	...	...	...	...	...	...	----------			
13	...	12	...	...	...	...	...	...	...	...	----------			
12	...	12	...	...	...	...	...	...	...	----------				
11	...	11	...	...	...	...	...	...	...	----------				
10	...	11	...	...	...	...	...	...	----------					
9	...	10	...	...	...	...	...	...	----------					
8	...	10	...	...	...	...	...	----------						
7	...	9	...	...	...	...	...	----------						
6	...	9	...	...	...	...	----------							
5	...	8	...	...	...	...	----------							
4	...	8	...	...	...	...	----------							
3	...	8	...	...	...	----------								
2	...	7	...	...	...	----------								
1	...	7	...	...	...	----------								
0	...	6	...	...	----------									
-1	...	6	...	...	----------									
-2	...	5	...	...	----------									
-3	...	5	...	----------										
-4	...	4	...	----------										
-5	...	4	...	----------										
-6	...	4	...	----------										
-7	...	3	...	----------										
-8	...	3	----------											
-9	...	2	----------											
-10	...	2	----------											
-11	...	1	----------											
-12	...	1	----------											
-13	...	0	----------											
-14	...	0	----------											

ⓑ

Bild 30. Etappenfelder e = 1 bis e = 4, die die Werte der Zielfunktion in Abhängigkeit von ganzzahligen t- und x-Werten in einer dem h, x-Diagramm analogen Form für *Beispiel 1* angeben.

OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	topt °C	xopt g_W/kg_{tL}	Kopt DM/h	Aktion
1		-14.0	1.0	0.00	
	ERHITZER				347.3 kW (Leistung)
2		25.0	1.0	17.36	
	WÄSCHER				0.6 (Befeuchtungsgrad)
3		16.0	5.0	17.50	
	ERHITZER				35.9 kW (Leistung)
4		20.0	5.0	19.30	

Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 19.30 DM/h bei einem Luftmassestrom $\dot{m}$ = 8.80 kg/s

Bild 31. Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen, der Kostenaufwendungen und der signifikanten Aktionen für *Beispiel 1* (Rechnerausdruck).

Aggregate- und Raumdaten:

Wärmerückgewinner:
ΦWRGT = 0,6; kWRGT = 0 DM/kWh

Mischer:
MA min = 0,5; MA max = 1;
kM = 0 DM/h/kg s

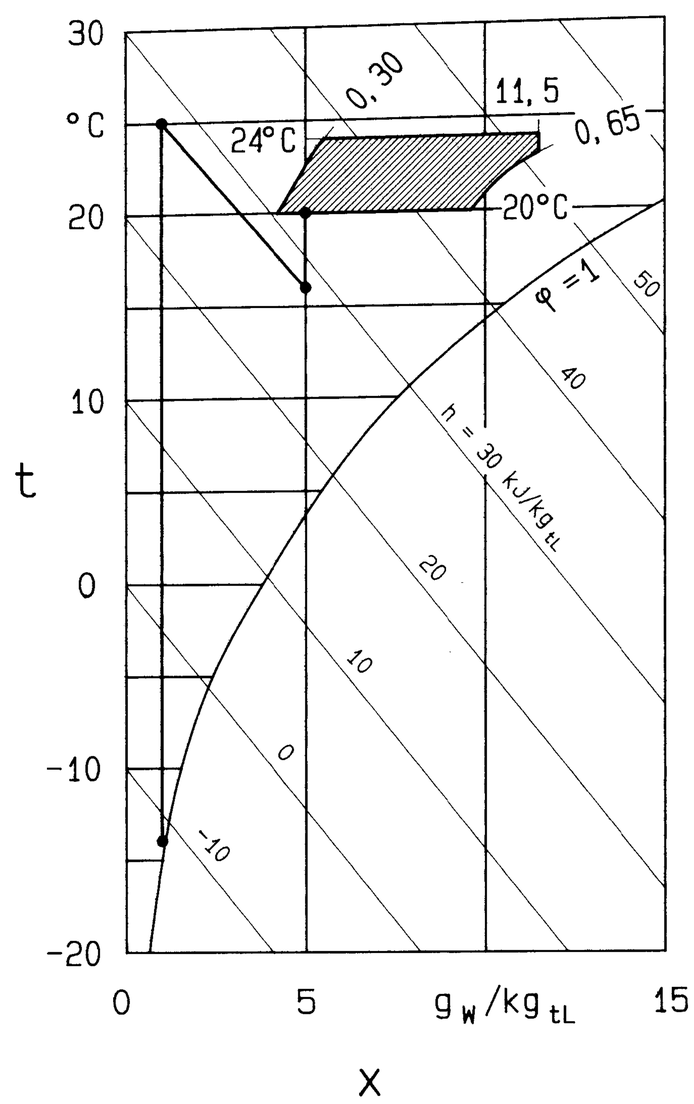


Bild 32. Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für *Beispiel 1*, dargestellt im h, x-Diagramm.

ETAPPENFELD e = 3

t °C	x in g Wasser/ kg trockene Luft 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
40	...	72	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
39	...	71	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
38	...	69	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
37	...	68	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
36	...	67	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
35	...	65	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
34	...	64	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
33	...	63	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
32	...	61	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31	...	60	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30	...	59	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
29	...	57	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28	...	56	...	...	...	...	72	...	...	...	...	...	...	...
27	...	55	...	...	...	...	...	72	...	...	...	...	...	...
26	...	53	...	...	...	...	68	...	...	...	...	...	...	...
25	...	17	...	...	...	67	68	71	...	...	...	...	...	...
24	...	17	...	...	...	64	67	70	72	...	...	...	...	...
23	...	16	...	...	...	63	64	68	72	...	...	...	...	...
22	...	16	...	...	...	60	63	67	70	72	...	...	...	...
21	...	16	...	...	...	59	63	64	70	...	...	...	...	...
20	...	15	...	...	...	58	60	66	67	71	...	...	...	...
19	...	15	...	...	...	56	59	63	66	70	72	...	...	...
18	...	14	...	...	...	55	59	62	66	68	71	...	...	-----
17	...	14	...	...	17	54	56	60	63	67	70	73	...	-----
16	...	13	...	...	17	18	56	59	63	66	69	...	----------	
15	...	13	...	...	16	17	54	58	60	64	...	----------		
14	...	12	...	...	15	17	54	56	60	65	----------			
13	...	12	...	...	15	16	17	55	58	62	----------			
12	...	12	...	14	15	16	17	54	57	----------				
11	...	11	...	13	14	15	16	18	...	----------				
10	...	11	...	13	14	15	16	17	----------					
9	...	10	...	13	13	14	16	17	----------					
8	...	10	...	12	13	14	15	----------						
7	...	9	...	11	12	14	15	----------						
6	...	9	...	11	12	13	----------							
5	...	8	...	10	11	13	----------							
4	...	8	9	10	11	...	----------							
3	...	8	...	9	10	----------								
2	...	7	9	9	10	----------								
1	...	7	8	9	10	----------								
0	...	6	8	8	----------									
-1	...	6	7	8	----------									
-2	...	5	6	7	----------									
-3	...	5	6	7	----------									
-4	...	4	5	7	----------									
-5	...	4	5	----------										
-6	...	4	4	----------										
-7	...	3	4	----------										
-8	...	3	3	----------										
-9	...	2	3	----------										
-10	...	2	----------											
-11	...	1	----------											
-12	...	1	----------											
-13	...	0	----------											
-14	...	0	----------											

ⓒ

ETAPPENFELD e = 1

t °C	x in g Wasser/ kg trockene Luft 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
40	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
39	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
38	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
37	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
36	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
35	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
34	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
33	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
32	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
29	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
28	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
27	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
26	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
21	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
20	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
19	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
18	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-----
17	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	-----
16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------	
15	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------		
14	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------			
13	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------			
12	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------				
11	...	...	...	...	...	...	...	...	...	----------				
10	...	...	...	...	...	...	...	...	----------					
9	...	...	...	...	...	...	...	...	----------					
8	...	...	...	...	...	...	...	----------						
7	...	...	...	...	...	...	...	----------						
6	...	...	...	...	...	...	----------							
5	...	...	...	...	...	...	----------							
4	...	...	...	...	...	...	----------							
3	...	...	...	...	...	----------								
2	...	...	...	...	...	----------								
1	...	...	...	...	...	----------								
0	...	...	...	...	----------									
-1	...	...	...	...	----------									
-2	...	...	...	...	----------									
-3	...	...	...	----------										
-4	...	...	...	----------										
-5	...	...	...	----------										
-6	...	...	...	----------										
-7	...	...	...	----------										
-8	...	...	----------											
-9	...	...	----------											
-10	...	...	----------											
-11	...	...	----------											
-12	...	...	----------											
-13	...	...	----------											
-14	...	0	----------											

ⓓ 9)

Erhitzer (Vorwärmer):
$k1H = 0{,}05$ DM/kWh für $t \leq 25\,°C$,
sonst $k2H = 0{,}15$ DM/kWh

Kühler:
$\eta K = 0{,}8$; $By = 0{,}75$
$k1K = 0{,}20$ DM/kWh für $t \geq 16\,°C$,
sonst $k2K = 0{,}50$ DM/kWh

Wäscher:
$\eta B\,min = 0{,}50$; $\eta B\,max = 0{,}95$;
$kW = 0{,}35$ DM/kWh

Erhitzer (Nachwärmer):
$k1H = 0{,}05$ DM/kWh für $t \leq 25\,°C$,
sonst $k2H = 0{,}15$ DM/kWh

Zulüfter:
$\eta LZ = 0{,}70$; $\Delta pZ = 700$ Pa;
$kL = 0{,}25$ DM/kWh

Raum (unten)
Winter (vollbesetzt): $\Delta HR = 38$ kW
$\Delta WR = 0{,}0055\ kg_w/s$
Sommer (vollbesetzt): $\Delta HR = 75$ kW
$\Delta WR = 0{,}0096\ kg_w/s$

Raum (oben)
Winter und Sommer: $\Delta HRO = 9$ kW

Ablüfter:
$\eta LA = 0{,}83$; $\Delta pA = 600$ Pa

Die Anordnung der Aggregate und des Raumes entspricht der Richtung des Luftdurchganges und damit auch dem Rechenweg. Es sind für beide Betriebsfälle folgende Varianten zu untersuchen:

Variante 1: Wärmerückgewinner; kein Mischer
Variante 2: Mischer; kein Wärmerückgewinner
Variante 3: Wärmerückgewinner und Mischer.

Der Luftmassestrom beträgt idealerweise stets $\dot{m} = 8{,}8$ kg/s.

Lösung

Die Möglichkeiten des Optimierungs-Rechenprogramms werden voll genutzt. Sowohl der Wärmerückgewinner als auch der Mischer besitzen eine Ankopplung an den Abluftstrom, so daß iterative Berechnungen notwendig sind. Trotz des enormen Rechenaufwandes betragen die PC-Bearbeitungszeiten nur ca. 1 Minute. Die optimalen Ergebnisse sind in den *Bildern 33* bis *38* dargestellt.

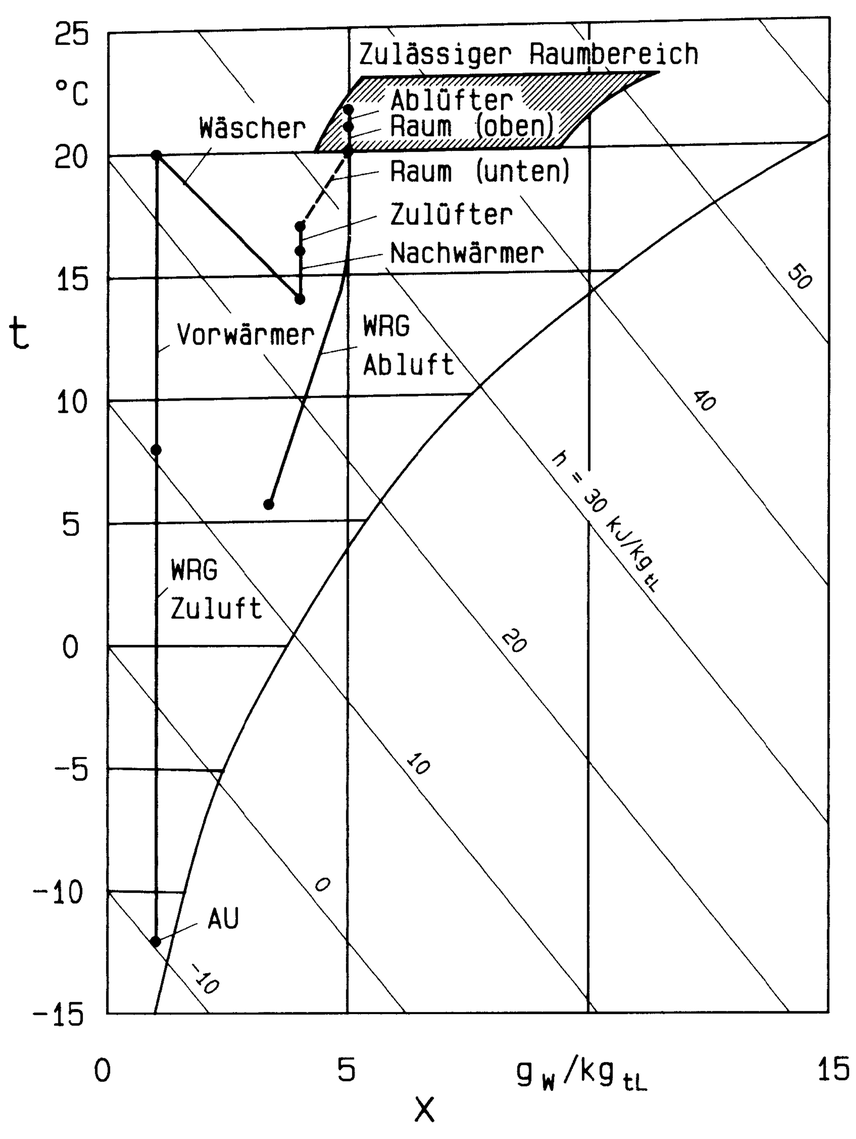
OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	topt °C	xopt g_W/kg_{tL}	Kopt DM/h	Aktion
1		-12.0	1.0	0.00	
	WÄRMERÜCKGEWINNER				1.0 (Betriebszustand)
2		8.0	1.0	0.00	
	ERHITZER				106.9 kW (Leistung)
3		20.0	1.0	5.34	
	KÜHLER				0.0 kW (Leistung)
4		20.0	1.0	5.34	
	WÄSCHER				0.5 (Befeuchtungsgrad)
5		14.0	4.0	5.45	
	ERHITZER				17.9 kW (Leistung)
6		16.0	4.0	6.34	
	ZULÜFTER				0.8 K (Temp.-Erhöhung)
7		17.0	4.0	9.47	
	RAUM (unten)				6909.1 kJ/kg_W (dh/dx)
8		20.0	5.0	9.47	
	Raum (oben)				1.0 K (Temp.-Erhöhung)
9		21.0	5.0	9.47	
	ABLÜFTER				0.6 K (Temp.-Erhöhung)
10		21.6	5.0	9.47	
	ABLUFT-WÄRMERÜCKGEWINNER				1.0 (Betriebszustand)
11		5.8	3.4	9.47	

Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 9.47 DM/h bei einem Luftmassestrom $\dot{m}$ = 8.80 kg/s

ⓐ



ⓑ

Bild 33. Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für *Beispiel 2*, Variante 1, Winterbetrieb mit Wärmerückgewinner.

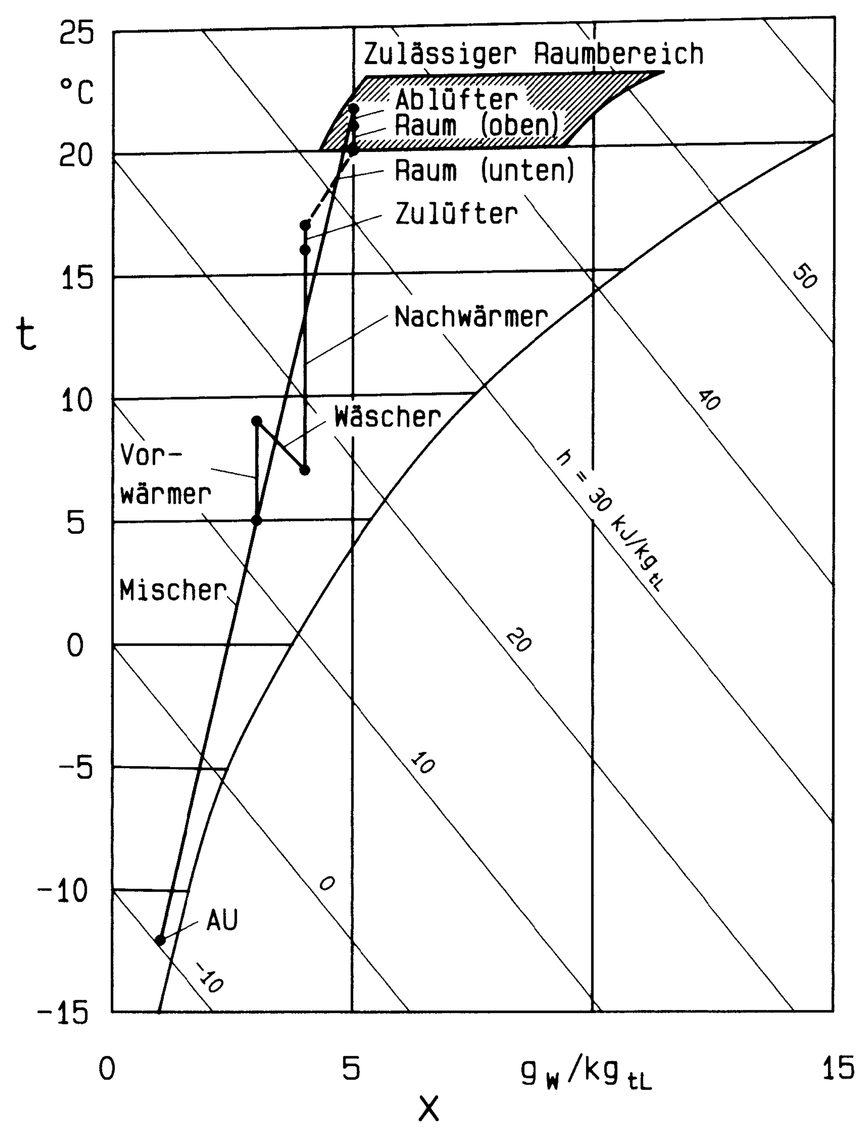
OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	topt °C	xopt g_W/kg_{tL}	Kopt DM/h	Aktion
1		-12.0	1.0	0.00	
	MISCHER				0.5 (Außenluftanteil)
2		5.0	3.0	0.00	
	ERHITZER				35.7 kW (Leistung)
3		9.0	3.0	1.79	
	KÜHLER				0.0 kW (Leistung)
4		9.0	3.0	1.79	
	WÄSCHER				0.5 (Befeuchtungsgrad)
5		7.0	4.0	1.89	
	ERHITZER				80.6 kW (Leistung)
6		16.0	4.0	5.92	
	ZULÜFTER				0.8 K (Temp.-Erhöhung)
7		17.0	4.0	9.05	
	RAUM (unten)				6909.1 kJ/kg_W (dh/dx)
8		20.0	5.0	9.05	
	Raum (oben)				1.0 K (Temp.-Erhöhung)
9		21.0	5.0	9.05	
	ABLÜFTER				0.6 K (Temp.-Erhöhung)
10		21.6	5.0	9.05	
	ABZWEIG-MISCHER				0.0
11		21.6	5.0	9.05	

Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 9.05 DM/h bei einem Luftmassestrom $\dot{m}$ = 8.80 kg/s

ⓐ



ⓑ

Bild 34. Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für *Beispiel 2*, Variante 2, Winterbetrieb mit Mischer.

Die tabellarische Zusammenfassung zeigt die deutlichen Vorteile des Mischkammereinsatzes (MI) und die zusätzliche Kopplung mit einer Wärmerückgewinnungseinrichtung (WR):

	Kosten in DM/h		
	WR	MI	WR + MI
Winterfall	9,47	9,05	5,48
Sommerfall	163,77	112,42	108,86

Beispiel 3

Die sommerliche Raumbelastung, der zulässige Raumluftbereich sowie die Aggregatezusammenstellung mit Wärmerückgewinner und Mischer gelten wie in *Beispiel 2* beschrieben. Variiert wird lediglich der sommerliche Außenluftzustand. Die Ergebnisse der optimalen Prozeßverläufe werden in den *Bildern 39* und *40* vorgestellt und in den Bildunterschriften charakterisiert.

OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	topt °C	xopt g_W/kg_{tL}	Kopt DM/h	Aktion
1		-12.0	1.0	0.00	
	WÄRMERÜCKGEWINNER				1.0 (Betriebszustand)
2		8.0	1.0	0.00	
	MISCHER				0.5 (Außenluftanteil)
3		15.0	3.0	0.00	
	ERHITZER				8.9 kW (Leistung)
4		16.0	3.0	0.45	
	KÜHLER				0.0 kW (Leistung)
5		16.0	3.0	0.45	
	WÄSCHER				0.5 (Befeuchtungsgrad)
6		12.0	5.0	0.55	
	ERHITZER				35.9 kW (Leistung)
7		16.0	5.0	2.35	
	ZULÜFTER				0.8 K (Temp.-Erhöhung)
8		17.0	5.0	5.48	
	RAUM (unten)				6909.1 kJ/kg_W (dh/dx)
9		20.0	6.0	5.48	
	Raum (oben)				1.0 K (Temp.-Erhöhung)
10		21.0	6.0	5.48	
	ABLÜFTER				0.6 K (Temp.-Erhöhung)
11		21.6	6.0	5.48	
	ABZWEIG-MISCHER				0.0
12		21.6	6.0	5.48	
	ABLUFT-WÄRMERÜCKGEWINNER				1.0 (Betriebszustand)
13		6.6	4.0	5.48	

Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 5.48 DM/h bei einem Luftmassestrom $\dot{m}$ = 8.80 kg/s

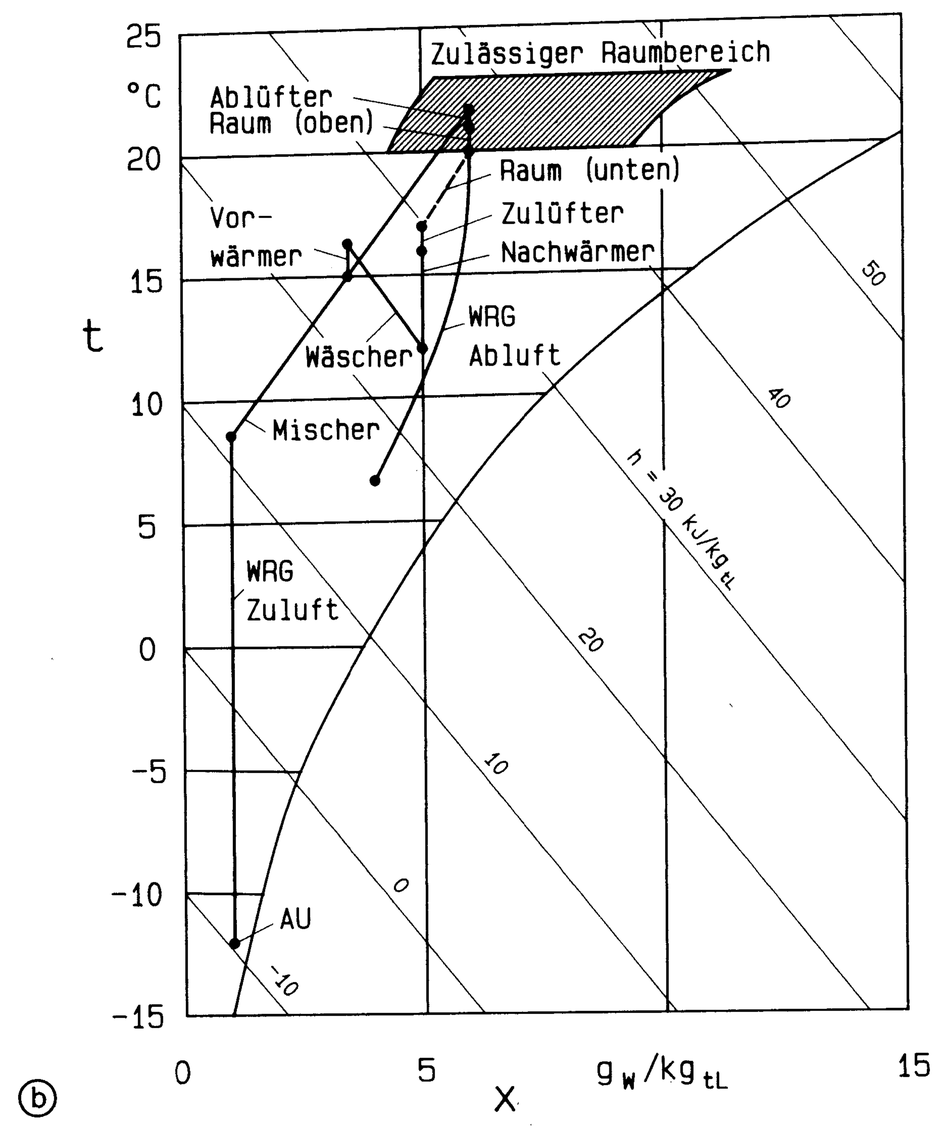


Bild 35. Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für *Beispiel 2*, Variante 3, Winterbetrieb mit Wärmerückgewinner und Mischer.

Erweiterte Anwendungsmöglichkeiten des Algorithmus

1. Automatisierte Ermittlung des zulässigen Raumbereiches

Zugehörig zur Außenlufttemperatur können mit sehr geringem Aufwand die zulässigen Raumluft-Zustandsbereiche, bei Komfortklimaanlagen z. B. nach DIN 1946 Teil 2, formuliert werden. Damit ist die Eingabe zu vereinfachen. Weiter wird durch Ergänzung einer äußeren Abarbeitungsschleife die Berechnung einer Folge von Außenluftzuständen automatisiert möglich.

OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	topt °C	xopt g_W/kg_{tL}	Kopt DM/h	Aktion
1		32.0	19.0	0.00	
	WÄRMERÜCKGEWINNER				1.0 (Betriebszustand)
2		28.0	19.0	0.00	
	ERHITZER				0.0 kW (Leistung)
3		28.0	19.0	0.00	
	KÜHLER				319.4 kW (Leistung)
4		15.0	10.0	159.70	
	WÄSCHER				0.0 (Befeuchtungsgrad)
5		15.0	10.0	159.70	
	ERHITZER				18.1 kW (Leistung)
6		17.0	10.0	160.60	
	ZULÜFTER				0.8 K (Temp.-Erhöhung)
7		18.0	10.0	163.77	
	RAUM (unten)				7812.5 kJ/kg_W (dh/dx)
8		24.0	11.0	163.77	
	Raum (oben)				1.0 K (Temp.-Erhöhung)
9		25.0	11.0	163.77	
	ABLÜFTER				0.6 K (Temp.-Erhöhung)
10		25.6	11.0	163.77	
	ABLUFT-WÄRMERÜCKGEWINNER				1.0 (Betriebszustand)
11		29.7	11.0	163.77	

Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 163.77 DM/h bei einem Luftmassestrom $\dot{m}$ = 8.80 kg/s

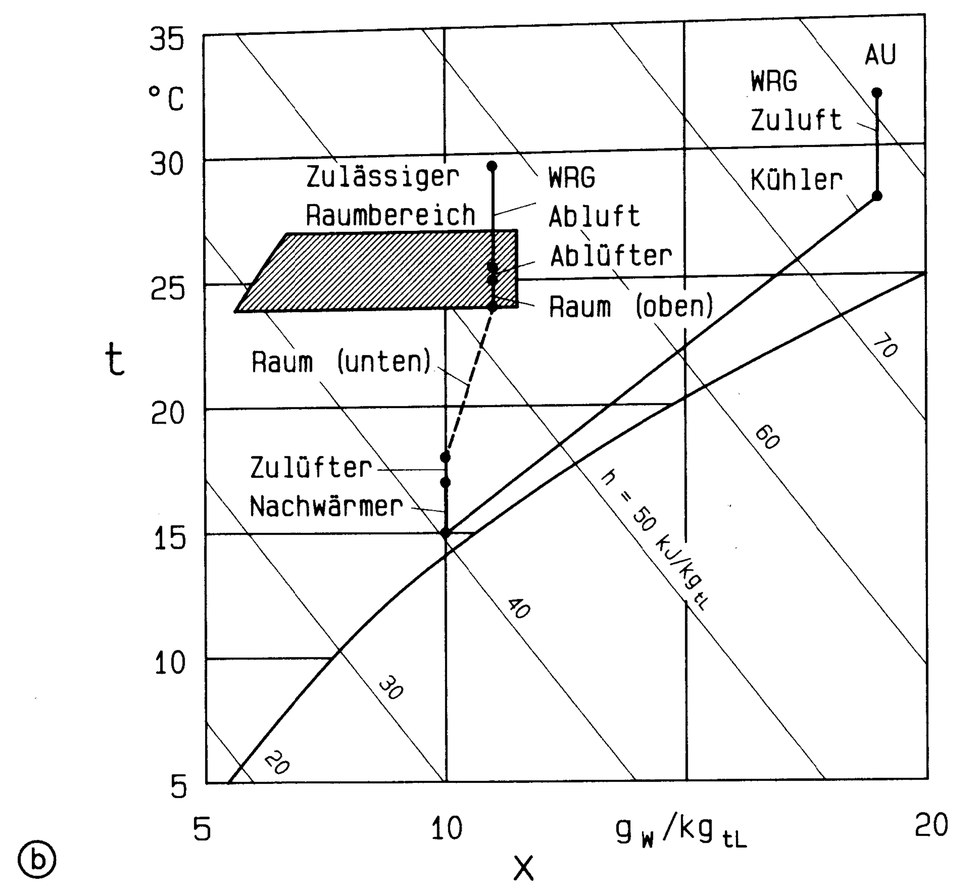


Bild 36. Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für *Beispiel 2*, Variante 1, Sommerbetrieb mit Wärmerückgewinner.

2. Ermittlung von Zielfunktions-Intervallsummen

Häufig interessieren die Energie- oder/und Kostenaufwendungen für den Betrieb einer Klimaanlage während eines vorgegebenen Zeitraumes, beispielsweise für ein Jahr. Die Außenluftzustände können dabei nach Temperatur, Feuchte und zugehöriger Häufigkeit gemäß DIN 4710 vorgegeben werden, oder ihre Beschreibung erfolgt mit Hilfe des Test-Referenzjahres. Die Summenbildung der Zielfunktion ist problemlos möglich. Da die untersuchten Zustandsänderungen jeweils optimale Betriebsabläufe darstellen, wird die Zielfunktion zum Minimum. Das Ergebnis repräsentiert somit einen optimalen Vergleichsprozeß.

3. Optimierung des Massestromes

Der im Sinne der Zielfunktion optimale Weg der Luftzustandsänderungen gilt für den vorgegebenen Massestrom. In der Regel nehmen die Energie- und Kostenauf-

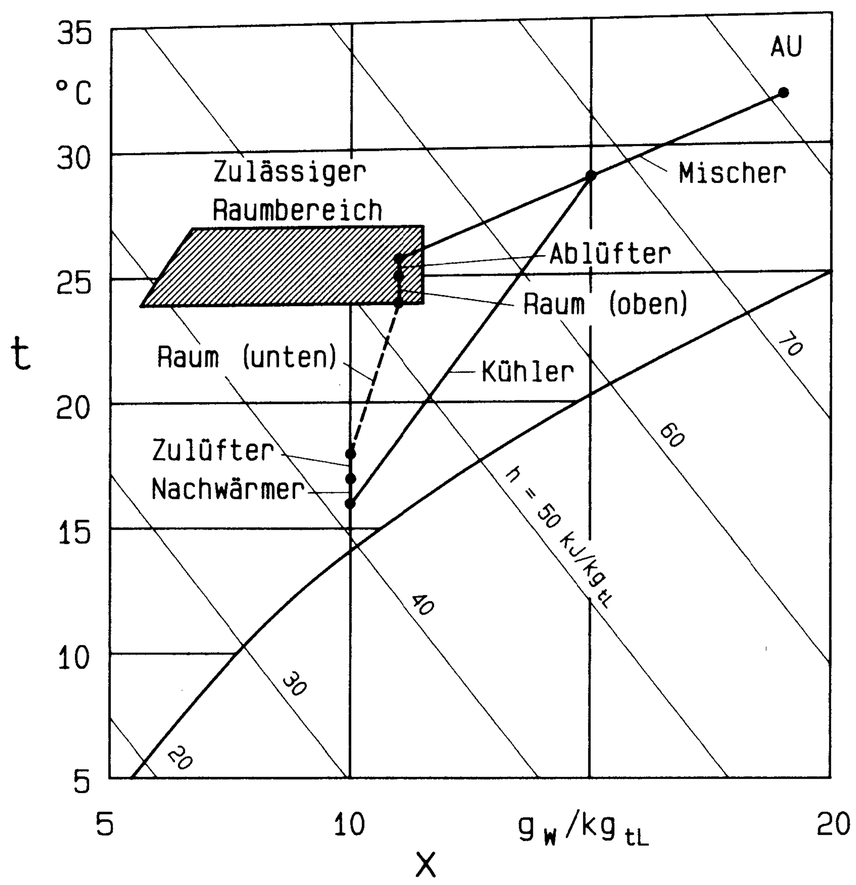
OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	topt °C	xopt g_W/kg_{tL}	Kopt DM/h	Aktion
1		32.0	19.0	0.00	
	MISCHER				0.5 (Außenluftanteil)
2		29.0	15.0	0.00	
	ERHITZER				0.0 kW (Leistung)
3		29.0	15.0	0.00	
	KÜHLER				217.6 kW (Leistung)
4		16.0	10.0	108.80	
	WÄSCHER				0.0 (Befeuchtungsgrad)
5		16.0	10.0	108.80	
	ERHITZER				9.1 kW (Leistung)
6		17.0	10.0	109.25	
	ZULÜFTER				0.8 K (Temp.-Erhöhung)
7		18.0	10.0	112.42	
	RAUM (unten)				7812.5 kJ/kg_W (dh/dx)
8		24.0	11.0	112.42	
	Raum (oben)				1.0 K (Temp.-Erhöhung)
9		25.0	11.0	112.42	
	ABLÜFTER				0.6 K (Temp.-Erhöhung)
10		25.6	11.0	112.42	
	ABZWEIG-MISCHER				0.0
11		25.6	11.0	112.42	

Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 112.42 DM/h bei einem Luftmassestrom $\dot{m}$ = 8.80 kg/s

ⓐ



ⓑ

Bild 37. Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für *Beispiel 2*, Variante 2, Sommerbetrieb mit Mischer.

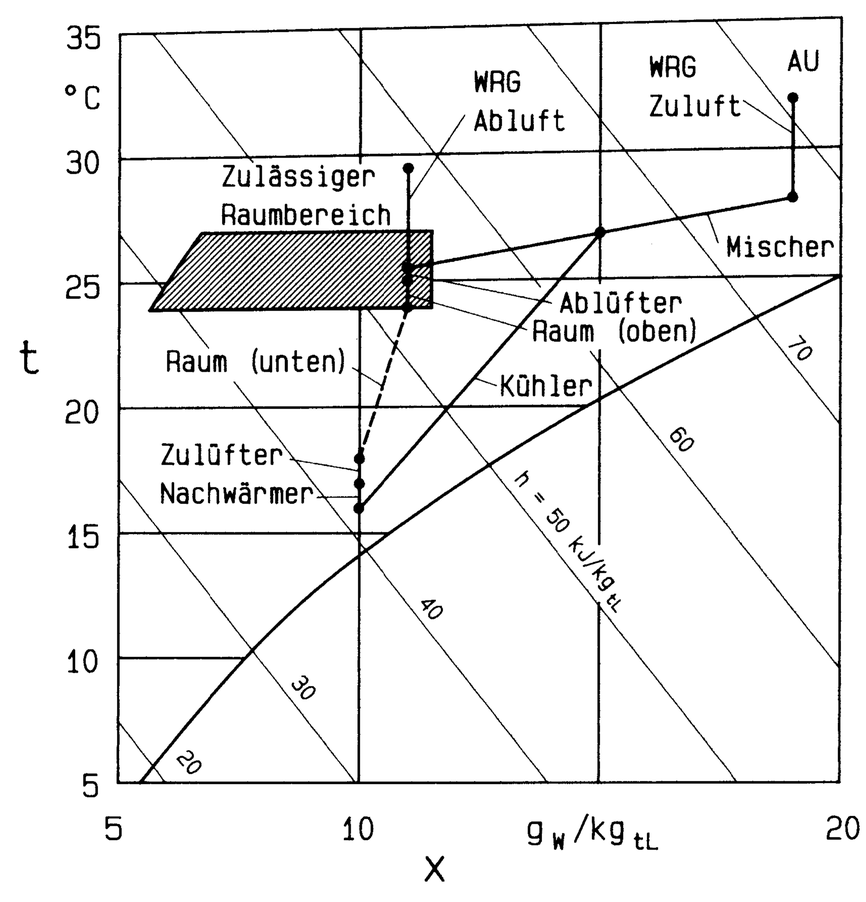
OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	topt °C	xopt g_W/kg_{tL}	Kopt DM/h	Aktion
1		32.0	19.0	0.00	
	WÄRMERÜCKGEWINNER				1.0 (Betriebszustand)
2		28.0	19.0	0.00	
	MISCHER				0.5 (Außenluftanteil)
3		27.0	15.0	0.00	
	ERHITZER				0.0 kW (Leistung)
4		27.0	15.0	0.00	
	KÜHLER				210.5 kW (Leistung)
5		16.0	10.0	105.24	
	WÄSCHER				0.0 (Befeuchtungsgrad)
6		16.0	10.0	105.24	
	ERHITZER				9.1 kW (Leistung)
7		17.0	10.0	105.70	
	ZULÜFTER				0.8 K (Temp.-Erhöhung)
8		18.0	10.0	108.86	
	RAUM (unten)				7812.5 kJ/kg_W (dh/dx)
9		24.0	11.0	108.86	
	Raum (oben)				1.0 K (Temp.-Erhöhung)
10		25.0	11.0	108.86	
	ABLÜFTER				0.6 K (Temp.-Erhöhung)
11		25.6	11.0	108.86	
	ABZWEIG-MISCHER				0.0
12		25.6	11.0	108.86	
	ABLUFT-WÄRMERÜCKGEWINNER				1.0 (Betriebszustand)
13		29.7	11.0	108.86	

Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 108.86 DM/h bei einem Luftmassestrom $\dot{m}$ = 8.80 kg/s

ⓐ



ⓑ

Bild 38. Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für *Beispiel 2*, Variante 3, Sommerbetrieb mit Wärmerückgewinner und Mischer.

wendungen mit sinkendem Massestrom ebenfalls ab. Der minimale Luftstrom wird durch hygienische, teilweise auch durch bauphysikalische Erfordernisse vorgegeben. Direkt an den Luftstrom ist die sich einstellende Temperaturdifferenz Raumtemperatur minus Zulufttemperatur gekoppelt. Für sie gelten behaglichkeits- und luftführungsbedingte Grenzwerte, die zu beachten sind.

Generell kann eine Optimierung des Massestromes (bzw. des Volumenstromes) folgendermaßen vorgenommen werden:

- Berechnung der Zielfunktion Z (z. B.: KSUM) und der Temperaturänderung der Zuluft im Raum (Δt_{ZU} = topt[eR] – topt[eR – 1] für ein vorgegebenes $\dot{m}$;
- Liegt $\dot{m}$ über dem zulässigen Minimalwert und Δt_{ZU} im zulässigen Bereich wird solange eine Luftstromreduzierung (z. B.: $\dot{m}_1 = 0{,}95\,\dot{m}$; $\dot{m}_2 = 0{,}95\,\dot{m}_1$ usw.) und eine Neuberechnung des optimalen Weges durchgeführt, bis einer der Grenzwerte erreicht ist. Sind die Leistungen der Bauteile vom Luftwechsel abhängig, so muß dies in den entsprechenden Algorithmen berücksichtigt werden. Die Randbedingungen bedürfen gegebenenfalls auch der Anpassung, so beispielsweise der zulässige Außenluftanteil des Mischers MA min. Die zu den $\dot{m}_1$; $\dot{m}_2$ usw. gehörigen Zielfunktionsgrößen Z_1; Z_2 usw. werden vermerkt und das Minimum bestimmt. Damit ist dann der optimale Luftdurchsatz determiniert.

  Bei speziellen Zielfunktionen wäre es auch denkbar, daß über dem Erstwert $\dot{m}$ liegende Luftdurchsätze das Ergebnis positiv beeinflussen. Technisch sinnvolle, maximale Luftdurchsätze sind zu postulieren.
- Zum Auffinden des optimalen Luftstromes sollten bei größerer Variationsbreite die bekannten mathematischen Lösungsverfahren angewendet werden.

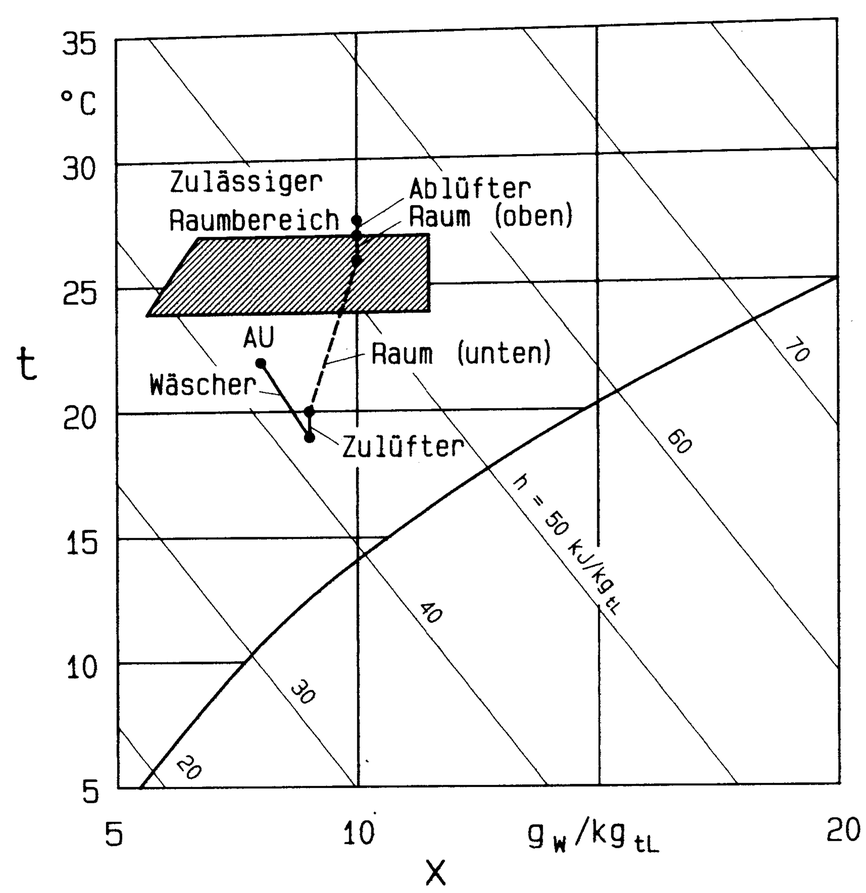
OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	topt °C	xopt g_W/kg_{tL}	Kopt DM/h	Aktion
1		22.0	8.0	0.00	
	WÄRMERÜCKGEWINNER				0.0 (Betriebszustand)
2		22.0	8.0	0.00	
	MISCHER				1.0 (Außenluftanteil)
3		22.0	8.0	0.00	
	ERHITZER				0.0 kW (Leistung)
4		22.0	8.0	0.00	
	KÜHLER				0.0 kW (Leistung)
5		22.0	8.0	0.00	
	WÄSCHER				0.5 (Befeuchtungsgrad)
6		19.0	9.0	0.11	
	ERHITZER				0.0 kW (Leistung)
7		19.0	9.0	0.11	
	ZULÜFTER				0.8 K (Temp.-Erhöhung)
8		20.0	9.0	3.29	
	RAUM (unten)				7812.5 kJ/kg_W (dh/dx)
9		26.0	10.0	3.29	
	Raum (oben)				1.0 K (Temp.-Erhöhung)
10		27.0	10.0	3.29	
	ABLÜFTER				0.6 K (Temp.-Erhöhung)
11		27.6	10.0	3.29	
	ABZWEIG-MISCHER				0.0
12		27.6	10.0	3.29	
	ABLUFT-WÄRMERÜCKGEWINNER				0.0 (Betriebszustand)
13		27.6	10.0	3.29	

Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 3.29 DM/h bei einem Luftmassestrom $\dot{m}$ = 8.80 kg/s

ⓐ



ⓑ

Bild 39. Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für *Beispiel 3* bei einem sommerlichen Außenluftzustand $t_{AU} = 22\,°C$; $x_{AU} = 8\ g_W/kg_{tL}$.
Der Wärmerückgewinner ist außer Betrieb. Der Mischer steht auf 100% Außenluft. Der Wäscher arbeitet mit dem kleinsten Befeuchtungsgrad, so daß der Raumpunkt sich im zugelassenen Raumzustandsfeld einstellt.

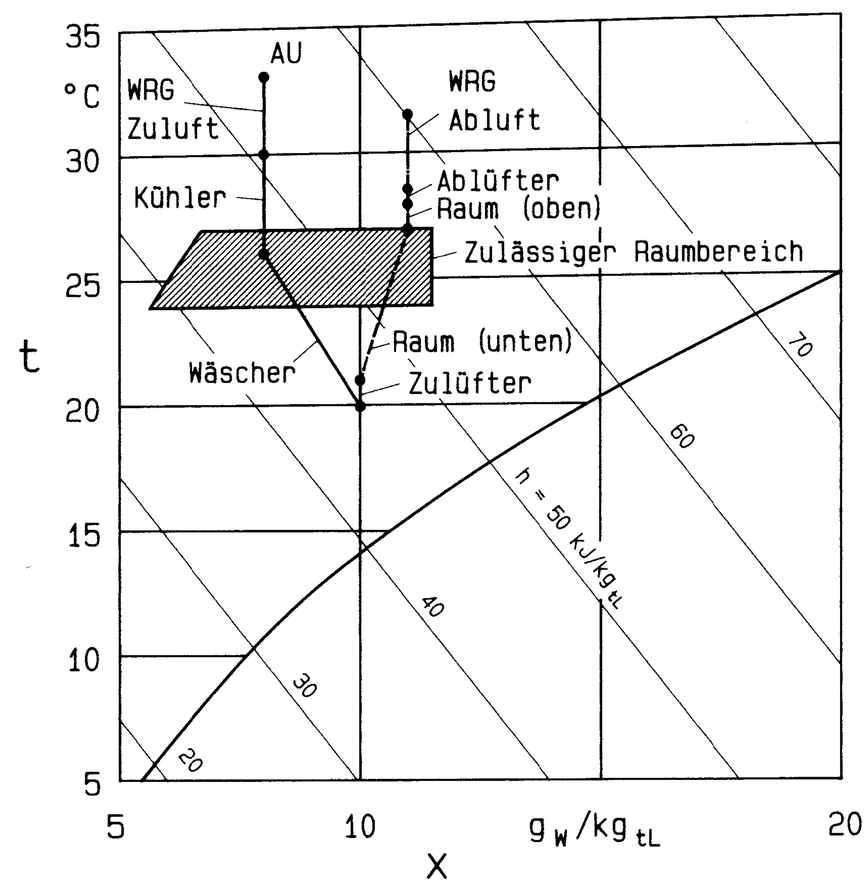
OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	topt °C	xopt gW/kgtL	Kopt DM/h	Aktion
1		33.0	8.0	0.00	
	WÄRMERÜCKGEWINNER				1.0 (Betriebszustand)
2		30.0	8.0	0.00	
	MISCHER				1.0 (Außenluftanteil)
3		30.0	8.0	0.00	
	ERHITZER				0.0 kW (Leistung)
4		30.0	8.0	0.00	
	KÜHLER				32.5 kW (Leistung)
5		26.0	8.0	6.49	
	WÄSCHER				0.6 (Befeuchtungsgrad)
6		20.0	10.0	6.63	
	ERHITZER				0.0 kW (Leistung)
7		20.0	10.0	6.63	
	ZULÜFTER				0.8 K (Temp.-Erhöhung)
8		21.0	10.0	9.83	
	RAUM (unten)				7812.5 kJ/kgW (dh/dx)
9		27.0	11.0	9.83	
	Raum (oben)				1.0 K (Temp.-Erhöhung)
10		28.0	11.0	9.83	
	ABLÜFTER				0.6 K (Temp.-Erhöhung)
11		28.6	11.0	9.83	
	ABZWEIG-MISCHER				0.0
12		28.6	11.0	9.83	
	ABLUFT-WÄRMERÜCKGEWINNER				1.0 (Betriebszustand)
13		31.6	11.0	9.83	

Minimalwert der Zielfunktion:

KSUM = 9.83 DM/h bei einem Luftmassestrom $\dot{m}$ = 8.80 kg/s

ⓐ



ⓑ

Bild 40. Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für *Beispiel 3* bei einem sommerlichen Außenluftzustand $t_{AU} = 33\,°C$; $x_{AU} = 8\ g/kg_{tL}$.
Bis auf Vor- und Nachwärmer werden alle Aggregate betrieben. Es wird nur Außenluft eingesetzt.

4. Optimale Aggregatebestückung

Summiert man die Zielfunktion – beispielsweise die Betriebskosten – über einen Jahreszeitraum für verschiedene Konfigurationen der Klimaanlage, so kann die optimale Aggregatebestückung ermittelt werden. Typische Beispiele sind die Gegenüberstellung von Dampfbefeuchter, regelbarem Wäscher und nichtregelbarem Wäscher oder die Überprüfung der Wirtschaftlichkeit von Wärmerückgewinnern u. a. m.

Es wäre auch denkbar, in der Klimaanlage einen Dampfbefeuchter und einen Wäscher gleichzeitig vorzusehen und zu prüfen, welches Aggregat unter welchen Bedingungen bei der Optimierung ausgewählt wird. Gegebenenfalls wären die Betriebszeiten über ein Jahr zu ermitteln und danach die Auswahl zu treffen.

Betrieb der raumlufttechnischen Anlage

Die Optimierung des Luftaufbereitungsprozesses liefert Aussagen über den im Sinne der Zielfunktion günstigsten Raumluftzustand und die Betriebszustände der einzelnen Aggregate. Diese *optimale Strategie* ist ein absolut neuwertiges Ergebnis von sehr großer Bedeutung für die Steuerung und Regelung von RLT-Anlagen. Die Aus-

wahl der zu betreibenden Bauteile und ihre Leistungen liegen vor. Entsprechende *Steuerungen* können auf dieser Grundlage vorgenommen werden, z. B.:

- Wärmerückgewinner in Betrieb setzen;
- Wäscherpumpe einschalten;
- Klappen am Mischer in die berechnete Stellung fahren;
- Kälte- oder Wärmebereitstellung, falls nicht ständig verfügbar, in Betrieb nehmen.

Problematischer verhält es sich mit der *Regelung* zur Leistungsanpassung der Aggregate. Es gibt dazu zwei Möglichkeiten:

- Jedes Aggregat erhält eine Einzelregelung mit dem errechneten Luftaustrittszustand als Sollwert.
- Mehrere Aggregate – z. B. Vorwärmer, Kühler, Nachwärmer (vgl. *Bild 2*) – werden mit einer Regelung bei entsprechenden Verknüpfungen und Sequenzen betrieben. Dies stellt im Sinne der Zielfunktion keinen „Rückschritt" dar, wenn Optimierungs- und Regelungsstrategie übereinstimmen oder wenn die Regelung nur in einem engbegrenzten Bereich „eigenmächtig" operieren darf.

Welche der beiden Varianten gewählt werden sollte, ist vor allem durch praktische Gesichtspunkte – beispielsweise Stabilitätsbetrachtungen und Hardwareeinsatz – zu bestimmen.

Die Berechnung der optimalen Prozeßführung ist in rhythmischen Abständen zu wiederholen. Dabei sollten die realen Verhältnisse adaptiert werden. Dies bezieht sich auf die Leistungscharakteristiken der Bauteile und auf die Zustandsänderungen im Raum. Geht man davon aus, daß die entsprechenden Ein- und Austrittsparameter bekannt sind, so gibt es für die *Adaption* mehrere Möglichkeiten:

- Die Zustandsänderung wird durch Ermittlung von Δh sowie Δx direkt bestimmt. Die Programmeingaben erfahren eine entsprechende Korrektur. Dieses Vorgehen bietet sich zur Erfassung der realen Raumlasten an. Es ist aber auch denkbar, dieses Verfahren auf Aggregate der RTL-Anlage anzuwenden und eine Zuordnung beispielsweise zu den Luft- und Wassereintrittstemperaturen herzustellen.
- Die im Optimierungsalgorithmus verwendeten Ersatzmodelle werden durch die realen Zustandsänderungen korrigiert. So sind beispielsweise aus dem Eintritts- und Austrittstemperaturen der Luft und des Kaltwassers der Rippenwirkungsgrad und der Bypaßfaktor des Oberflächenkühlers für den vorgegebenen Einsatzbereich realistisch bestimmbar.
- Die Modelle zur Nachbildung der Aggregatecharakteristiken können durch Auswertung stochastischer Zusammenhänge über längere Zeiträume und wechselnden Betriebsbedingungen bedeutend verfeinert werden.

(Schluß)

Literatur siehe Teil 1, Heft 3/94, Seite 126.

22. Berliner Gesundheitstechnische Tagung

Generalthema:	Neue Wege des Betreibens gebäudetechnischer Anlagen. Gebäudebetrieb, Gebäudemanagement und Facility-Management.
Termin:	Freitag, 21. Oktober 1994
Veranstalter:	Gesundheitstechnische Gesellschaft e.V. und Umweltbundesamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene
Tagungsort:	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, Berlin-Lichterfelde
Information:	Geschäftsstelle der GG, Alt-Marienfelde 12b, 12277 Berlin