Optimierung eines klimatechnischen Prozesses

Bernd Glück

(Teil 2, Fortsetzung von Heft 3/1994)

5. *Thermodynamische Grundlagen zur feuchten Luft*

Bei allen Rechnungen zur Prozeßführung bilden die thermodynamischen Beziehungen die Basis. Die Grundlagen und zusammengefaßte Algorithmen sind in [1] ausführlich dargelegt. Sie werden von dort übernommen und kommen in drei Unterprogrammen zur Anwendung. Als Luftdruck (Gesamtdruck) p wird der Eingabewert für den Außenluftzustand (Unterprogramm EIN) allgemeingültig für alle Etappen des Klimaprozesses verwendet.

Unterprogramm ZUSTANDG (*Bild 17*):

Alle relevanten Zusammenhänge (G deutet auf „global" hin) werden ausgehend von den bekannten Parametern t* und x* berechnet.

Verfügbar sind: relative Feuchte φ^* ($\varphi^* = 2$ charakterisiert übersättigtes Gebiet bei $t^* > 0\,°C$; $\varphi^* = 3$ desgl. bei $t^* \leq 0\,°C$), spezifisches Volumen v*, Dichte ϱ^*, spezifische Enthalpie h*, Feuchtekugeltemperatur tf*, Taupunkttemperatur $t\tau^*$, Feuchtegehalte xW und xS, Partialdrücke pW, pL.

Unterprogramm ZUSTAND (*Bild 18*):

Hierbei handelt es sich um eine verkürzte Version von ZUSTANDG mit den Ergebnissen φ^*, h*, $t\tau^*$, xW.

Unterprogramm ZUSTANDH (*Bild 19*):

Bei den kalorischen Berechnungen zur feuchten Luft treten vielfach die spezifische Enthalpie h* und die Feuchte x* als Ergebnisse auf. Zur Weiterrechnung muß die Temperatur t* bestimmt werden. Dies erfolgt mit vorliegendem Unterprogramm (H deutet auf die Eingangsgröße h* hin).

In *Bild 20* sind die Verdampfungs- und Sublimationskurve in wechselseitiger Parameterzuordnung pS*(t*) bzw. tS*(p*), die an zahlreichen Stellen der Berechnung benötigt werden, als Unterprogramme oder Subroutinen formuliert.

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

6. *Raumzustandsänderungen*

Die Zustandsänderung, die die Luft beim Durchströmen des Raumes erfährt, wird in zwei Abschnitten betrachtet. Im Aufenthaltsbereich (unterer Raum) werden

ΔHR	W	Enthalpiestrom („trockene und feuchte Wärme")
ΔWR	kg_W/s	Feuchtestrom

zugeführt. Im oberen Raum erfolgt nur noch die Übergabe von

ΔHRO	W	trockener Wärmestrom,

der beispielsweise aus der Leuchtenwärme resultiert.

Vorgegeben ist weiterhin

$\dot{m}$	kg/s	Luftmassestrom.

Damit sind die beiden Unterprogramme RAUMU und RAUMO (*Bild 21*) nutzbar, woraus die Parameter am jeweiligen Austritt (tn; xn) folgen. Als „Aktion" wird die Richtung der Zustandsänderung (ΔHR/ΔWR) im unteren Raumabschnitt bzw. die reine Temperaturerhöhung (tn − t) im oberen Raumabschnitt vermerkt. Die „Endparameter des unteren Raumes" müssen definitionsgemäß den geforderten Raumsollwerten entsprechen. Das bedeutet, daß damit der zu optimierende Klimaprozeß endet. Die Zustandsänderung im oberen Raumbereich wird inhaltlich bereits zum Abschnitt „Verfolgung der Abluft" gerechnet.

7. *Aggregate zur Luftbehandlung*

Die Berechnungsalgorithmen sind in Datenflußplänen ausführlich dokumentiert. Sie werden deshalb nur kurz charakterisiert.

Generell stellen die nachfolgenden Algorithmen nur Beispiele dar, die jederzeit veränderbar sind. Theoretisch könnten sogar die exakten Aggregateberechnungen integriert werden, so daß der Approximationsgenauigkeit keine Grenzen gesetzt sind. Hier soll jedoch in erster Linie die Richtigkeit des Lösungsweges demonstriert werden. Als Zielfunktion sei eine Kostenfunktion verwendet.

Erhitzer: Unterprogramm ERHITZER (*Bild 22*)

Beginnend bei der Eintrittstemperatur t erfolgt in z Stufen eine Temperaturerhöhung um je 1 K bis zu einer Endtemperatur tn = 40 °C

$$tn = t + z. \tag{22}$$

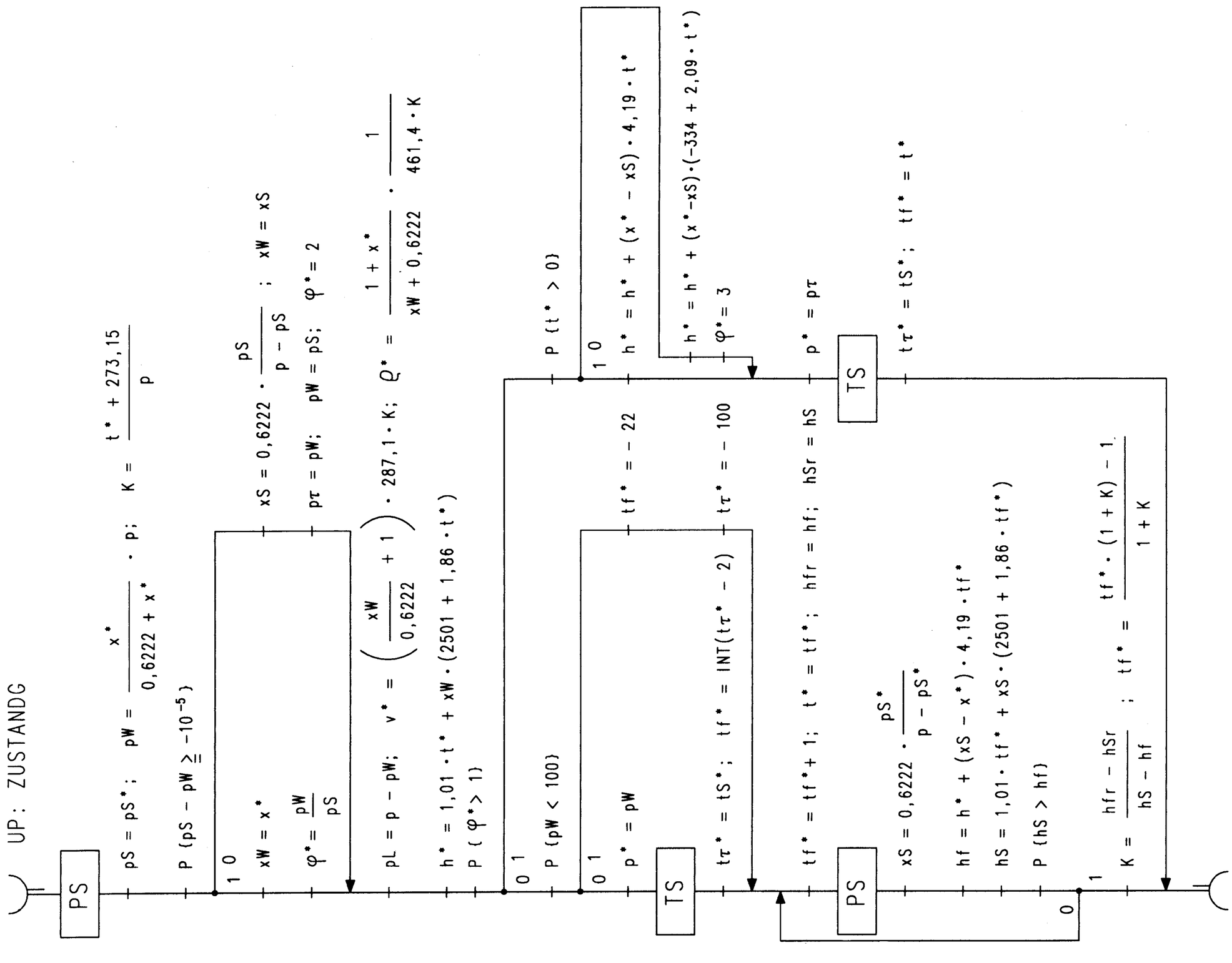

Bild 17. Unterprogramm ZUSTANDG zur Berechnung aller relevanten Zustandsgrößen für feuchte Luft ausgehend von t* und x* nach [1].

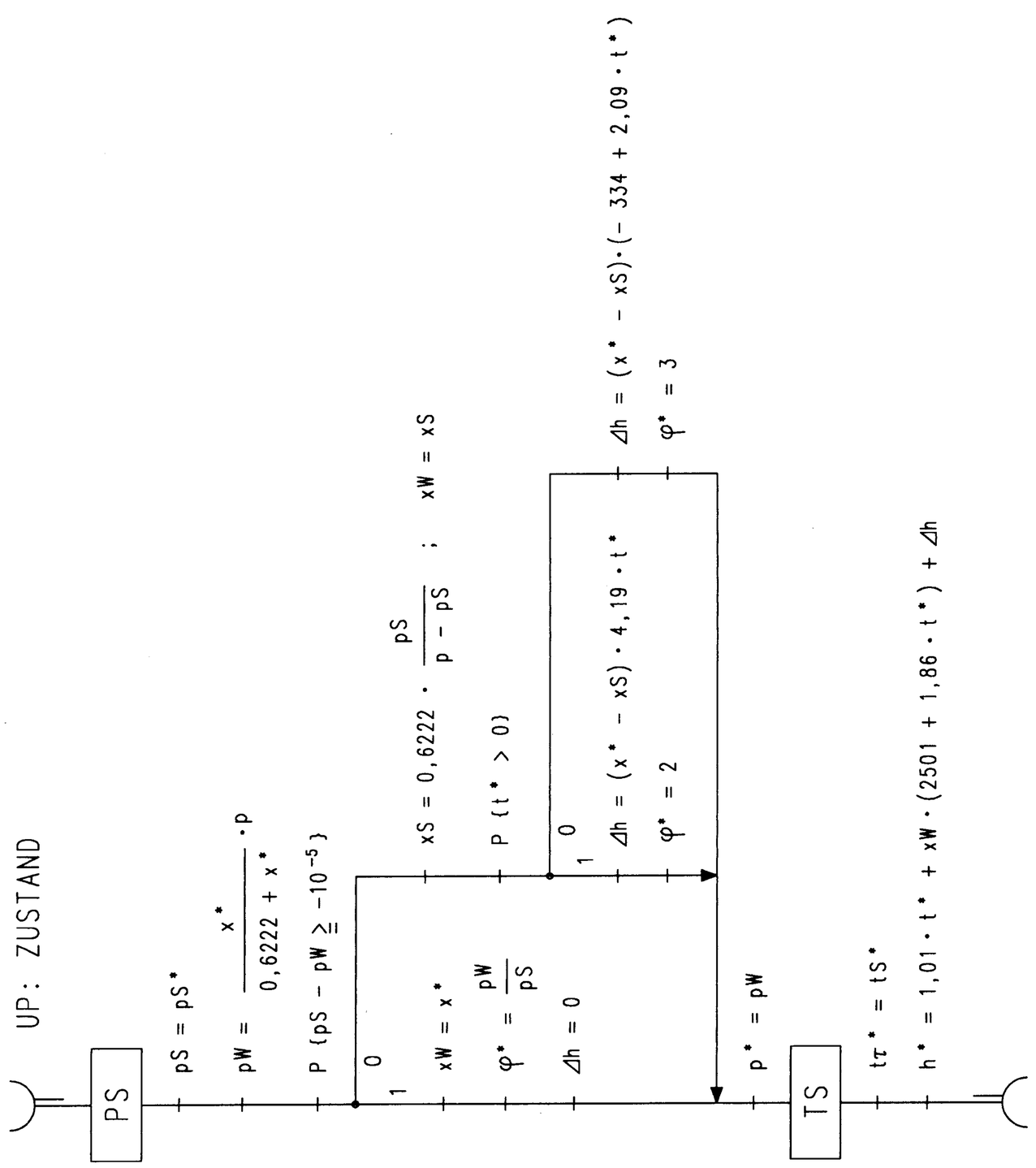

Bild 18. Unterprogramm ZUSTAND zur Berechnung der Zustandsgrößen φ^*, h^* und $t\tau^*$ für feuchte Luft ausgehend von t^* und x^* nach [1].

Die absolute Feuchte bleibt bei der Erwärmung konstant

$$xn = x. \tag{23}$$

Die übertragene Leistung beträgt

$$\Delta = (1{,}01 + 1{,}86\,x)\,(tn - t)\,\dot{m} \quad \text{in kW}. \tag{24}$$

Unterhalb der Grenztemperatur $tn \leq tHG$ wird mit spezifischen Kosten $kx = k1H$, darüber mit $kx = k2H$ – jeweils in DM/kWh – gerechnet. Damit sind kostengünstige oder kostenlose Umweltenergieangebote optimal nutzbar. Die Aufwendungen betragen

$$\Delta K = \Delta \quad kx \quad \text{in DM/h}. \tag{25}$$

Unter „Aktion" wird die Leistung Δ gespeichert.

Wäscher: Unterprogramm WAESCHER (*Bild 23*)

Es wird ein geregelter Wäscher zugrunde gelegt. Beim ersten Berech-

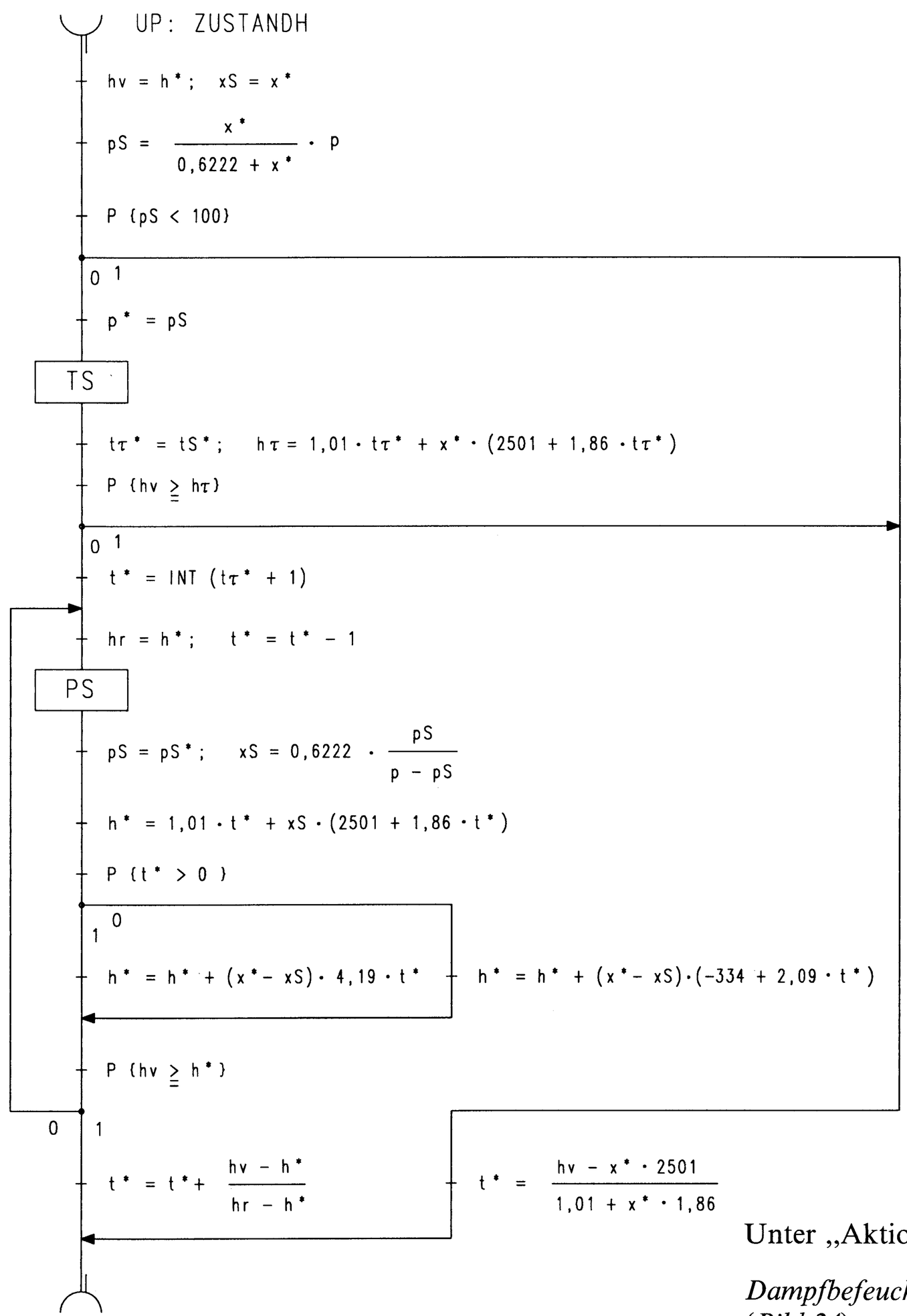

Bild 19. Unterprogramm ZUSTANDH zur Berechnung der Temperatur t* für feuchte Luft ausgehend von h* und x* nach [1].

nungsdurchgang (z = 0) erfolgt die Bestimmung der zu t und x gehörigen Feuchtkugeltemperatur tf* und die zu t* = tf* gehörige Sättigungsfeuchte xf. Vereinfachend werden die linearen Schrittweiten

$$\Delta tf = \frac{t - tf^*}{20} \tag{26}$$

$$\Delta xf = \frac{xf - x}{20} \tag{27}$$

bestimmt. Damit ergeben sich dann in z = 20 Schritten die Austrittsgrößen

$$tn = t - z\,\Delta tf \tag{28}$$

$$xn = x + z\,\Delta xf \tag{29}$$

und weiter der Befeuchtungsgrad

$$\eta B = \frac{xn - x}{xf - x}\,. \tag{30}$$

Liegt er im technisch möglichen Bereich – die Grenzwerte sind im UP EIN eingegeben worden –

$$\eta B\,\min \le \eta B \le \eta B\,\max \tag{31}$$

oder ist z = 0, dann werden die Kosten bestimmt.

Ausgehend von der Beziehung

$$\Delta K = \Delta p_W \dot{V}_W \frac{p_{el}}{\eta_P} \tag{32}$$

mit

ΔP_W Differenzdruck der Sprühwasserpumpe
$\dot{V}_W$ Wasserstrom
η_P Pumpen- und Motorwirkungsgrad
p_{el} spezifischer Preis der Elektroenergie.

und dem erforderlichen Wassermassestrom

$$\dot{m}_W \approx -\frac{1}{C}\ln(1 - \eta_B)\,\dot{m} \tag{33}$$

folgt

$$\Delta K = \Delta p_W \dot{m}_W \varrho_W^{-1} \eta_P^{-1} k_{el}\,. \tag{34}$$

Mit $\Delta p_w = 2$ bar, $\varrho_W = 1000$ kg/m³, C = 4 (Annahme für einen bestimmten Wäschertyp) und $kW = p_{el}/\eta_P$ in DM/kWh ergibt sich in der Flußbildschreibweise

$$\Delta K = -0{,}05\ln(1 - \eta B)\,\dot{m}\,kW \quad \text{in DM/h}. \tag{35}$$

Unter „Aktion" wird der Befeuchtungsgrad vermerkt.

Dampfbefeuchter: Unterprogramm DAMPFBEF (*Bild 24*)

Im ersten Berechnungsschritt (z = 0) werden zugehörig zum Eingabewert Dampfdruck pDB die Enthalpie des Sattdampfes ΔhD nach [1] und zum Lufteintrittszustand (t; x) mit UP ZUSTAND die Enthalpie der Luft h bestimmt.

Die Befeuchtung erfolgt in z = 10 Schritten jeweils um 1 g_w/kg_{tL}. Entsprechend erhöhen sich die Enthalpie- und Feuchtewerte:

$$hn = h + \frac{z}{1000}\,\Delta hD \tag{36}$$

$$xn = x + \frac{z}{1000}\,. \tag{37}$$

Das UP ZUSTANDH liefert das zugehörige tn. Die Kosten ergeben sich zu

$$\Delta K = \frac{z}{1000}\,\Delta hD\,\dot{m}\,kDB \quad \text{in DM/h}, \tag{38}$$

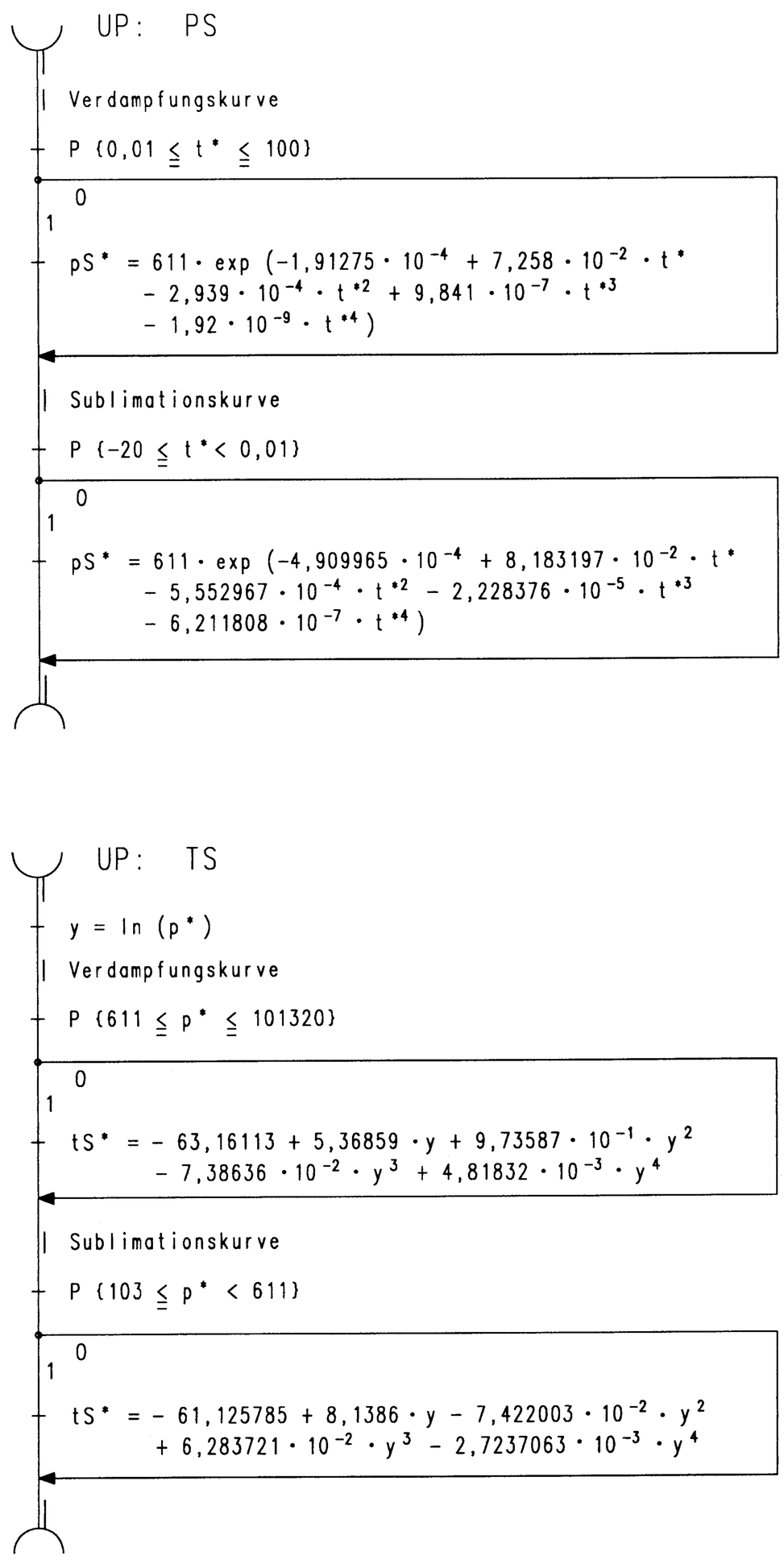

Bild 20. Unterprogramme PS und TS zur Wiedergabe der Verdampfungs- und Sublimationskurve von Wasser für die Zusammenhänge PS(t*) und TS(p*) nach [1].

wobei die spezifischen Energiekosten kDB aus dem spezifischen Preis der Elektroenergie p_{el} und dem Wirkungsgrad der Dampferzeugung η_D nach $kDB = p_{el}/\eta_D$ in DM/kWh zu bilden sind. Bei nichtelektrischer Dampferzeugung ist eine entsprechende Anpassung vorzunehmen.

Unter „Aktion" werde die Feuchtezunahme in g_W/kg_{tL} gespeichert.

Kühler: Unterprogramm KUEHLER (*Bild 25*)

Zur Ermittlung des Zustandsverlaufes im Oberflächenkühler wird ein einfaches Modell gewählt, das mit dem sogenannten Rippenwirkungsgrad des Kühlers ηK und dem Bypaßfaktor By arbeitet. Im ersten Berechnungsschritt (z = 0) erfolgt für den Lufteintrittszustand die Bestimmung der zu t und x gehörigen Werte h und $t\tau$.

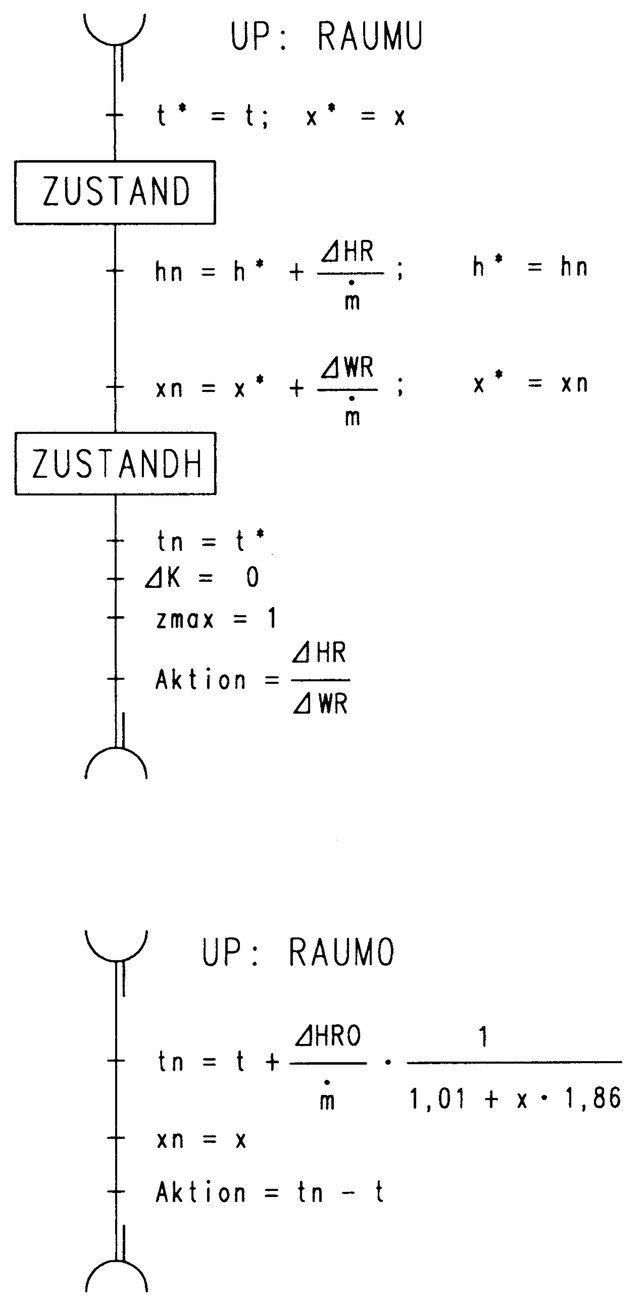

Bild 21. Unterprogramme RAUMU und RAUMO zur Ermittlung von Luftzustandsänderungen im unteren und oberen Raumabschnitt.

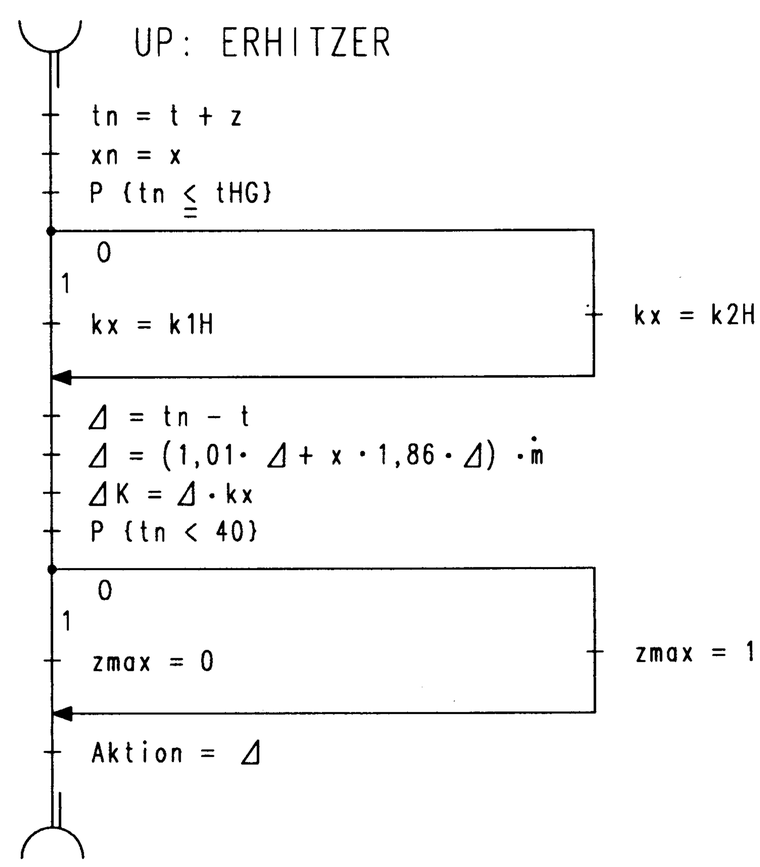

Bild 22. Unterprogramm ERHITZER zur Lufterwärmung.

Schrittweise wird die mittlere Kaltwassertemperatur um je 1 K abgesenkt

$$tKW = t - z. \tag{39}$$

Die untere Grenze beträgt $tKW = 6\,°C$.

Mit dem Rippenwirkungsgrad berechnet sich die mittlere Oberflächentemperatur zu

$$tK = t - \eta K\,(t - tKW). \tag{40}$$

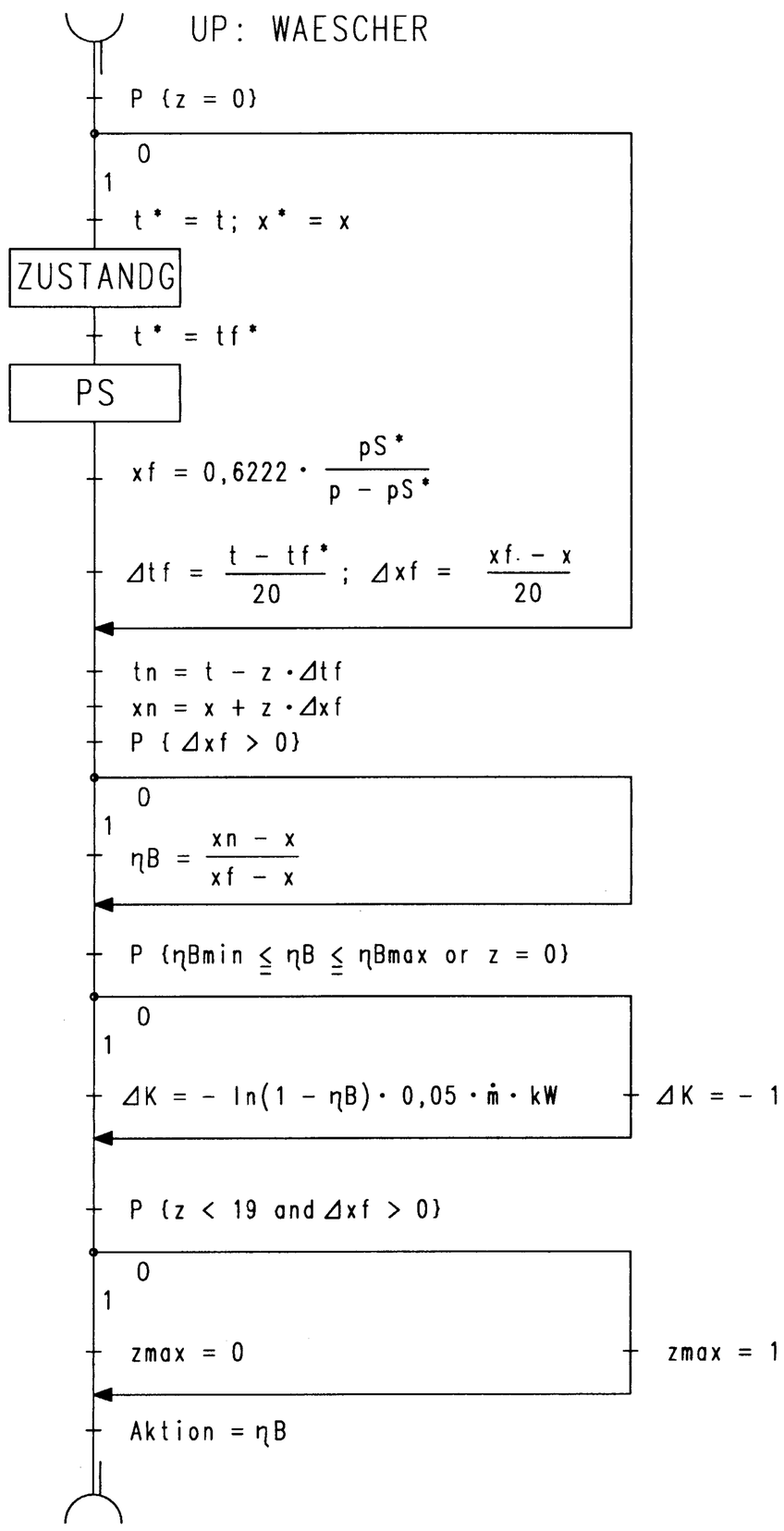

Bild 23. Unterprogramm WAESCHER zur adiabaten Luftbefeuchtung.

Liegt diese über der Taupunkttemperatur der Luft $t\tau$, so verläuft die Zustandsänderung auf einer Isohygren

$$xn = x, \tag{41}$$

ansonsten werde die zu tK gehörige Sättigungsfeuchte xK bestimmt und mit Hilfe des Bypaßfaktors die Austrittsfeuchte der Luft

$$xn = x - By(x - xK) \tag{42}$$

berechnet. Die Enthalpie an der Kühleroberfläche hK wird ermittelt. Eine „Mischung" dieses Luftzustandes mit der eintretenden Luft ergibt näherungsweise die Enthalpie am Austritt

$$hn = h - By(h - hK). \tag{43}$$

Mit UP ZUSTANDH folgt tn. Liegt die mittlere Kaltwassertemperatur tKW über der Grenztemperatur tKG, so gelten die spezifischen Kosten kx = k1K, sonst kx = k2K.

Die übertragene Leistung berechnet sich zu

$$\Delta = (h - hn)\dot{m} \quad \text{in kW}, \tag{44}$$

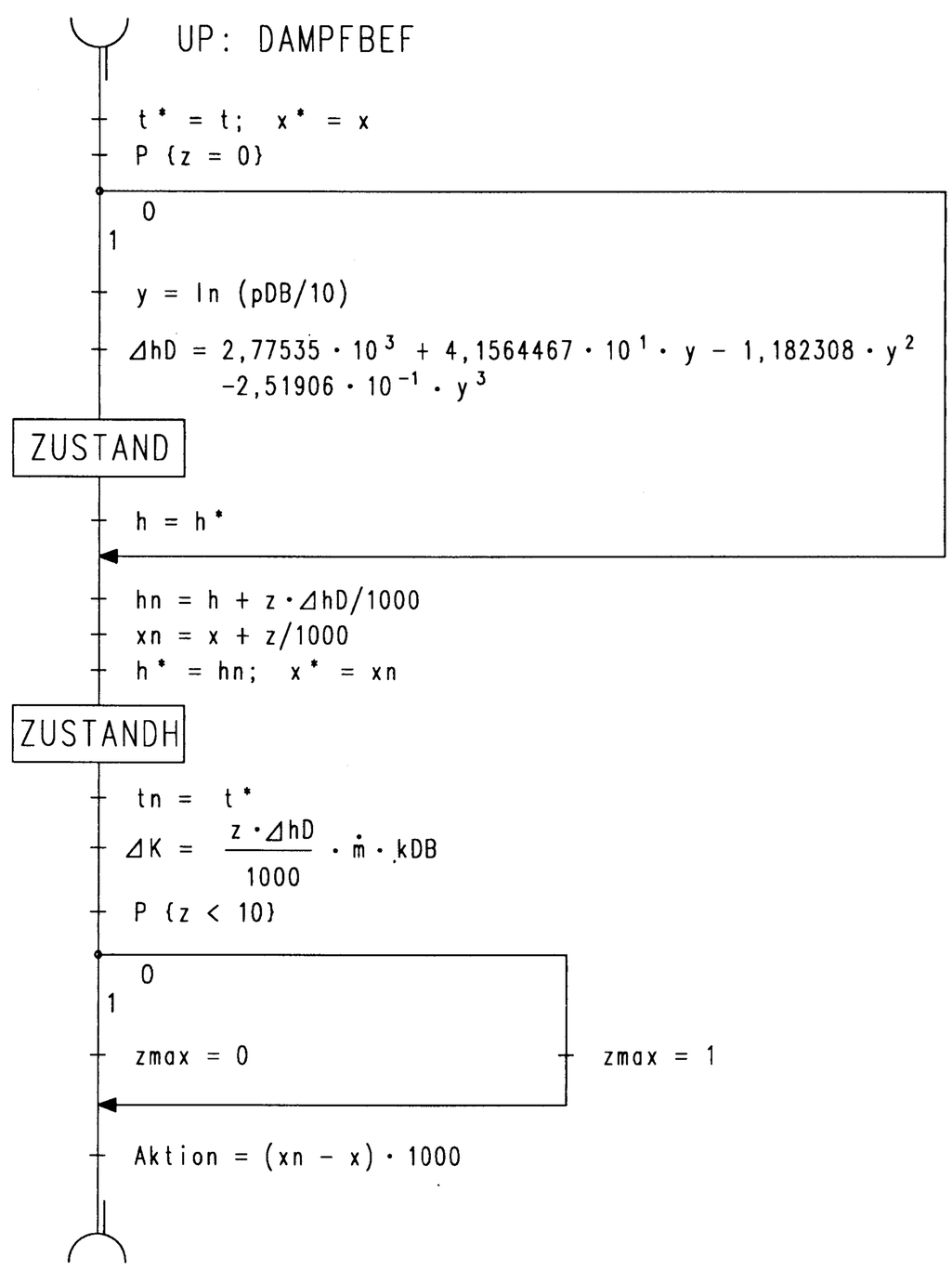

Bild 24. Unterprogramm DAMPFBEF zur Luftbefeuchtung.

die erforderlichen Kosten ergeben

$$\Delta K = \Delta \quad kx \quad \text{in DM/h}. \tag{45}$$

Unter „Aktion" werde die Leistung vermerkt.

Lüfter: Unterprogramme LUEFTER und ALUEFTER (*Bild 26*)

Ausgehend vom Lufteintrittszustand (t; x) und dem daraus bestimmten Größen h* und v*, folgt die Enthalpieerhöhung im Zu- bzw. Ablüfter

$$\Delta h = \frac{v^* p}{\eta L} \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{p + \Delta p}{p} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right] 10^{-3}$$

$$\text{in kJ/kg}_{tL}. \tag{46}$$

Dabei bedeuten:

v*	m^3/kg	spezifisches Volumen
Δp	Pa	Druckerhöhung (ΔpZ Zulüfter; ΔpA Ablüfter)
p	Pa	Vordruck (näherungsweise gleich dem Außenluftdruck)
ηL		Wirkungsgrad (ηLZ Zulüfter; ηLA Ablüfter)
κ		Isentropenexponent für Luft ($\kappa = 1{,}4$).

Die Feuchte bleibt konstant

$$xn = x, \tag{47}$$

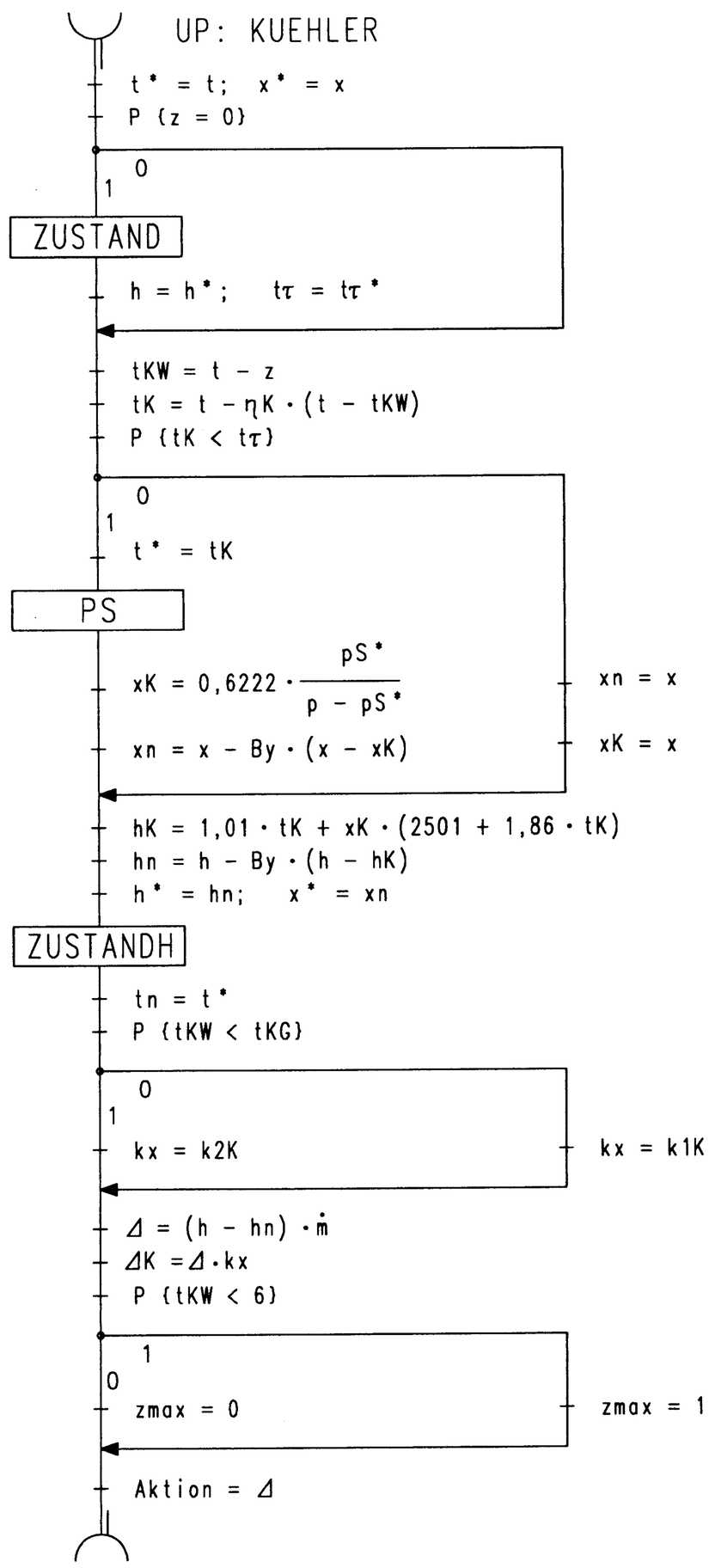

Bild 25. Unterprogramm KUEHLER zur Luftkühlung und Entfeuchtung.

woraus mit der neuermittelten Enthalpie unter Verwendung von UP ZUSTANDH die Endtemperatur tn folgt. Die Kosten für den Zu- und Ablüfter werden gemeinsam beim Zulüfter – der in der Optimierungsstrecke liegt – erfaßt:

$$\Delta K = \left(\frac{\Delta pZ}{\eta LZ} + \frac{\Delta pA}{\eta LA}\right) v^* \dot{m}\, kL\, 10^{-3} \quad \text{in DM/h}. \qquad (48)$$

Unter „Aktion" werde die Temperaturerhöhung gespeichert.

Mischer: Unterprogramme MISCHER und AMISCH (*Bild 27*)

Der durch die Klappen an der Mischkammer einstellbare Außenluftanteil MA (Außenluftmassestrom/Mischluftmassestrom) wird in Schritten (z = 0 bis z = 10) erhöht

$$MA = 1 - 0{,}1\, z. \qquad (49)$$

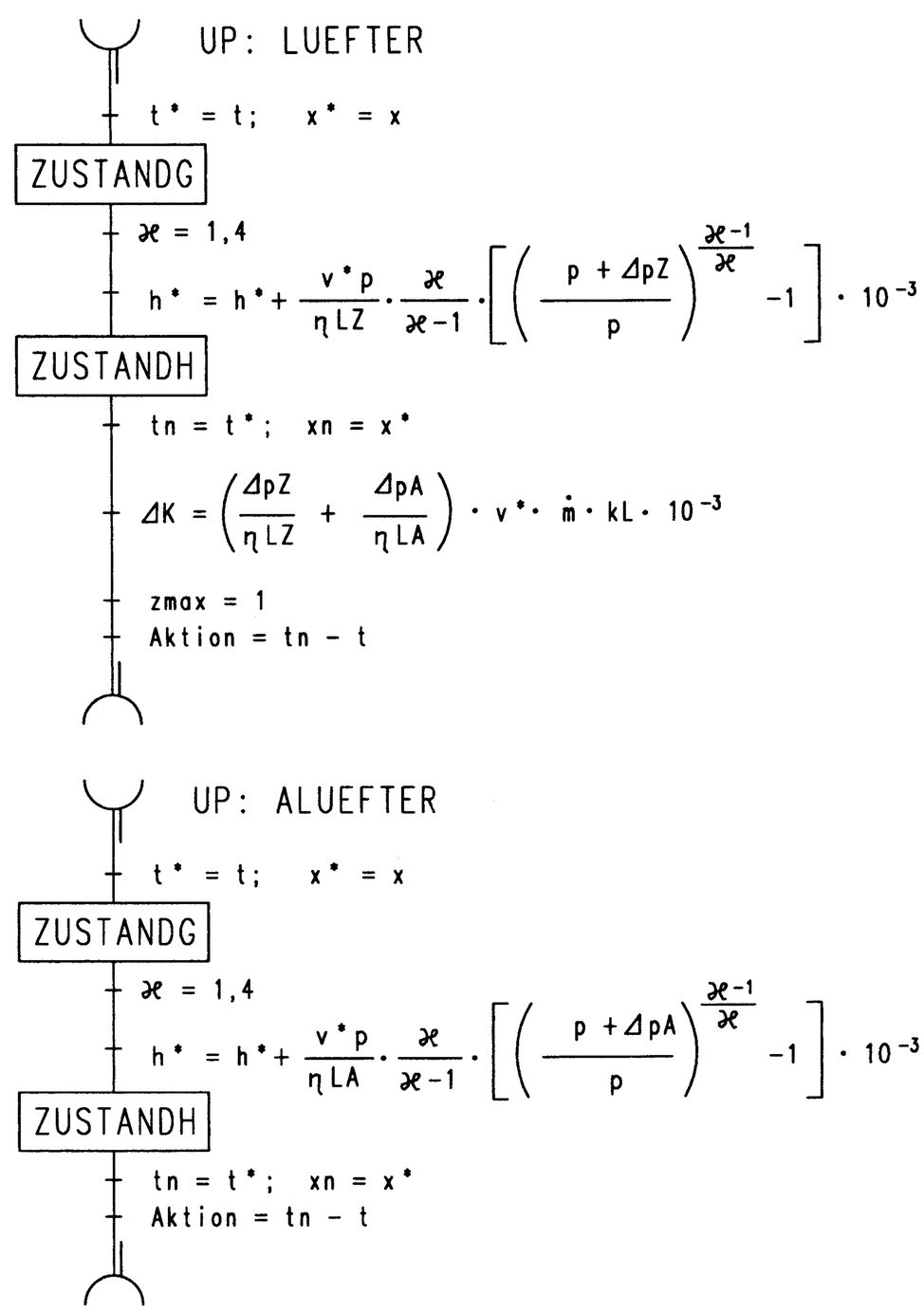

Bild 26. Unterprogramme LUEFTER und ALUEFTER zur Druckerhöhung des Zu- bzw. Abluftstromes.

Liegt er im zugelassenen Bereich

$$MA\,min \le MA \le MA\,max, \qquad (50)$$

folgen die Berechnungen

$$xn = MA\ x + (1 - MA)\, xMII \qquad (51)$$

$$hn = MA\ h + (1 - MA)\, hMII. \qquad (52)$$

Vorgegeben sind dabei die Luftzustände (x; t) und für den zweiten Zustrom (xMII; tMII), woraus mit UP ZUSTAND h und hMII ermittelt werden.

Aus xn und hn folgt mit UP ZUSTANDH endgültig tn. Als Kostenfunktion sei

$$\Delta K = \dot{m}\ kM \quad \text{in DM/h} \qquad (53)$$

verwendet. In der Regel wird jedoch kM = 0 gelten. Der charakteristische Außenluftanteil MA wurde unter „Aktion" vermerkt.

Das UP AMISCH betrachtet lediglich den Abzweig im Abluftweg, der zur Mischkammer führt. Die Parameter der Abluft ändern sich dadurch natürlich nicht.

Thermische Wärmerückgewinner: Unterprogramme WRGT und AWRGT (*Bild 28*)

Wegen der Variantenvielzahl von Wärmerückgewinneinrichtungen findet ein einfaches, jedoch recht allgemeingültiges Modell Anwendung. Es basiert auf dem Güte-

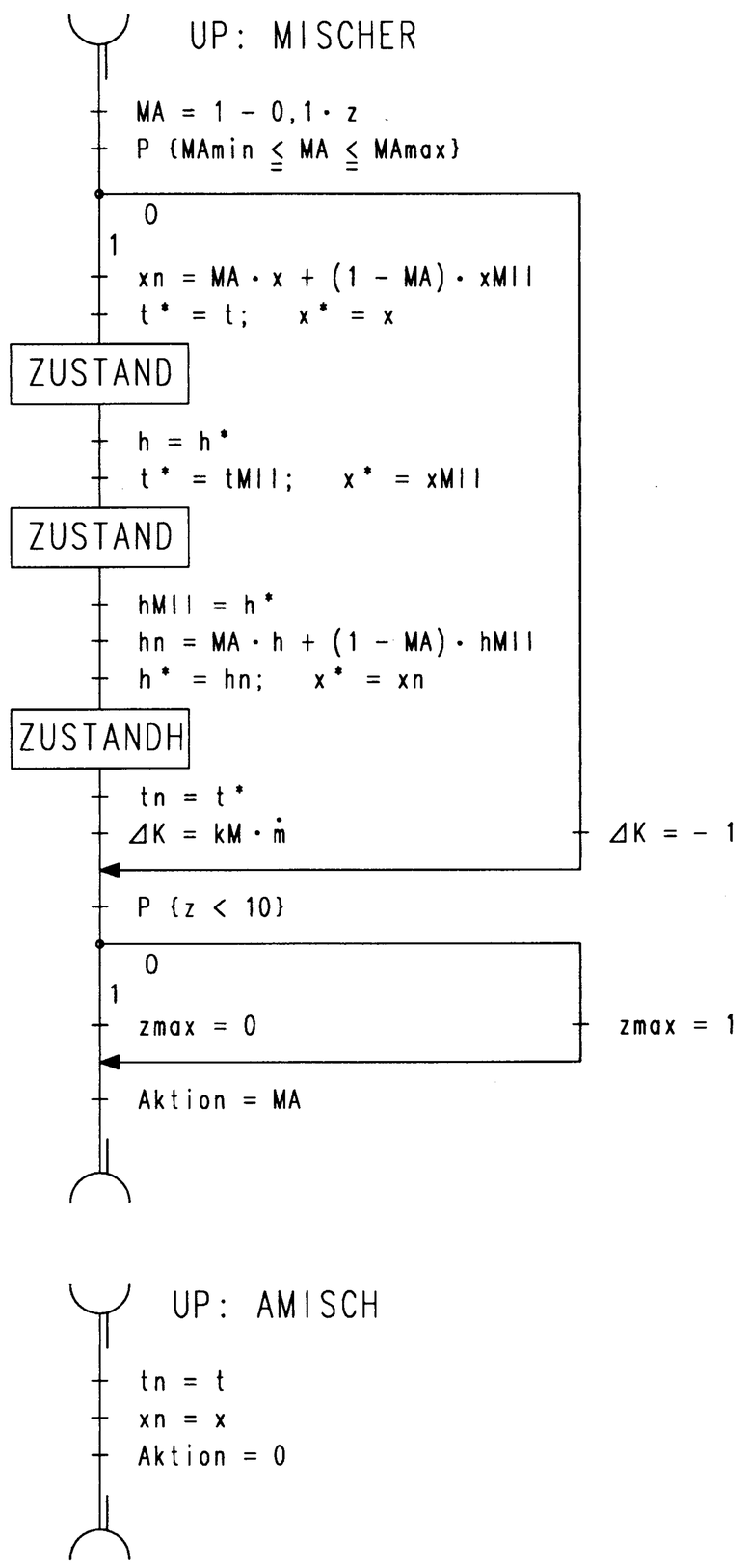

Bild 27. Unterprogramme MISCHER und AMISCH zur Zusammenführung von zwei Luftströmen.

grad (Betriebscharakteristik) ΦWRGT. Ausgehend von den Eintrittsgrößen (t; x) folgen die Endwerte der Zustandsänderung:

$$tn = t + \Phi WRGT\,(tWRGTII - t) \tag{54}$$

$$xn = x\,. \tag{55}$$

tWRGTII stellt die abluftseitige Lufteintrittstemperatur in den Wärmerückgewinner dar. Der übertragene Wärmestrom beträgt dann

$$\Delta WRGT = (1{,}01 + 1{,}86\,x)\,(tn - t)\,\dot{m} \quad \text{in kW}, \tag{56}$$

woraus aufbauend die Kostenfunktion

$$\Delta K = |\Delta WRGT|\,kWRGT \quad \text{in DM/h} \tag{57}$$

formuliert wird. Es kann vielfach auch sinnvoll sein,

$$\Delta K = kWRGT \quad \text{oder} \quad \Delta K = \dot{m}\,kWRGT \quad \text{in DM/h} \tag{58}$$

anzusetzen bzw. kWRGT = 0 zu verwenden. Die spezifischen Kosten sind im UP EIN entsprechend zu modifizieren. „Aktion" speichert den Betriebszustand des Wärmerückgewinners (0 außer Betrieb; 1 in Betrieb).

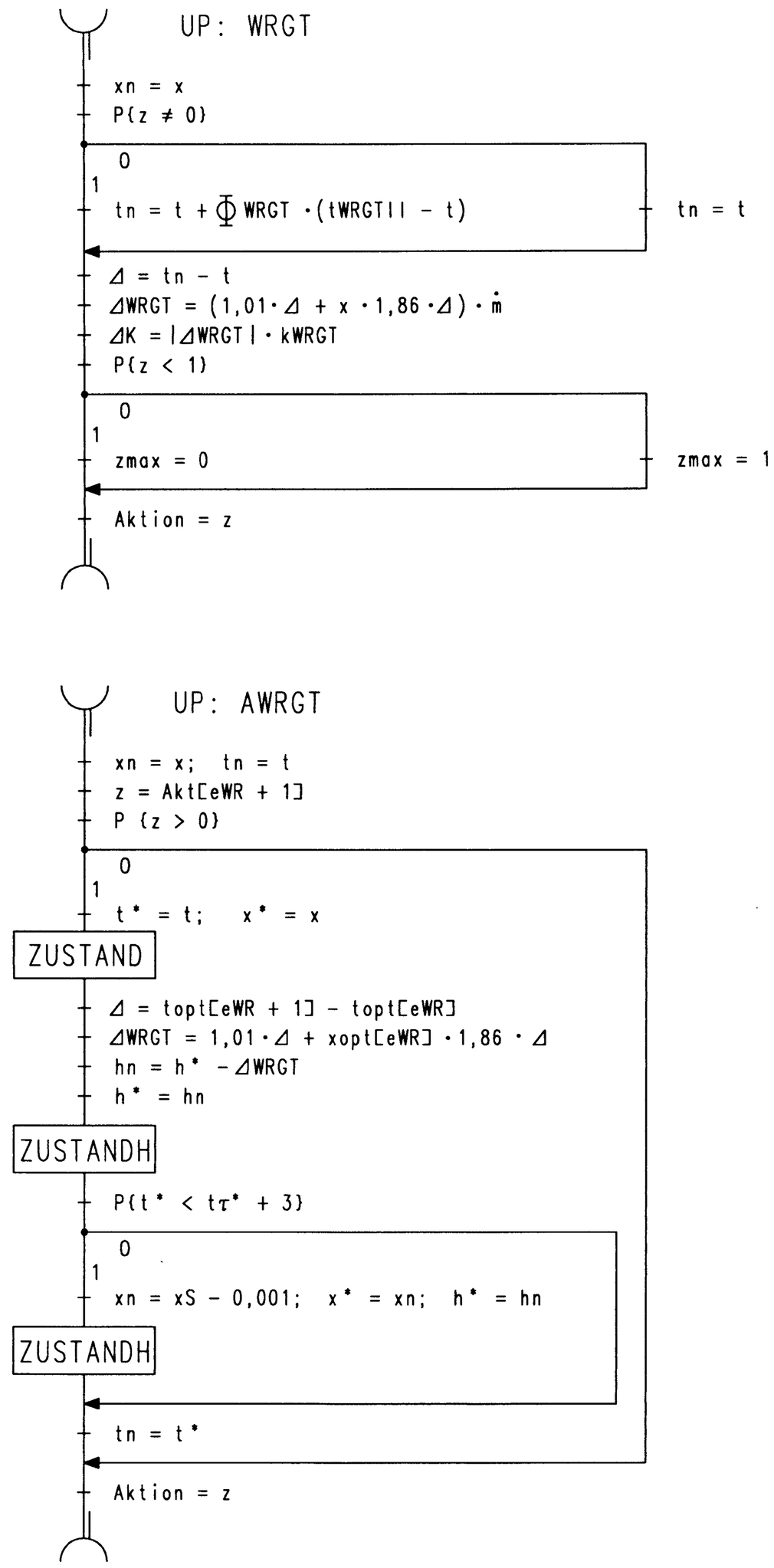

Bild 28. Unterprogramme WRGT und AWRGT zur Wärmerückgewinnung aus dem Abluftstrom.

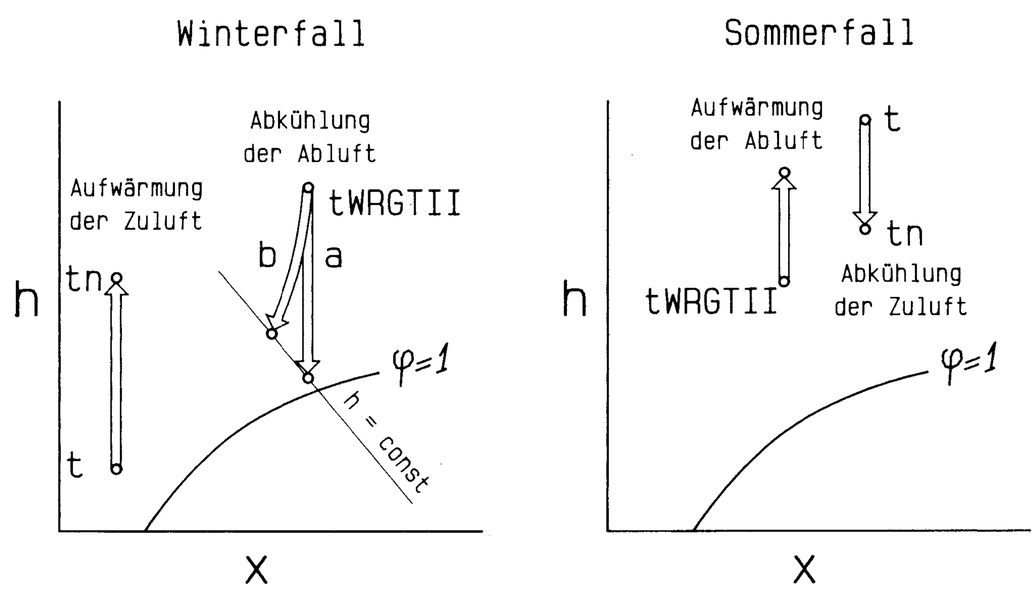

Bild 29. Typische Zustandsänderung bei Wärmerückgewinnungseinrichtungen in Komfort-Klimaanlagen.

Bild 29 zeigt, daß bei Komfortklimaanlagen die Zuluft-Zustandsänderung üblicherweise längs einer Isohygren verläuft. Die Abluft-Zustandsänderung kann im Winterfall sowohl nach a, bei tieferen Temperaturen t aber auch nach b verlaufen. In der Regel interessiert der Abluft-Austrittszustand nicht mehr, denn es handelt sich meistens um Fortluft. Dennoch soll im UP AWRGT (*Bild 28*) der Austrittszustand qualitativ richtig erfaßt werden. Die Abfrage Akt[eWR + 1] gibt an, ob der Wärmerückgewinner betrieben wurde. Wenn nein, dann gelten

$$tn = t$$
$$xn = x,$$

ansonsten werden mit UP ZUSTAND die Enthalpie am Eintritt des Abluftstromes h* und die im Zuluftstrom übertragene Enthalpiedifferenz ΔWRGT bestimmt. Mit der Enthalpie am Austritt des Abluftstromes

$$hn = h^* - \Delta WRGT$$

und x folgen aus UP ZUSTANDH die Größen tn = t* und $t\tau^*$. Liegt der Austrittszustand nahe an der Sättigungskurve, so wird

$$xn = xS - 0{,}001\ kg_W/kg_{tL}$$

gesetzt und mit UP ZUSTANDH erneut tn bestimmt. Unter „Aktion" werde wiederum der Betriebszustand des Wärmerückgewinners gespeichert.

Hinweis

Werden Wärmerückgewinner und Mischer kombiniert in Anlagen eingesetzt, so sind die Algorithmen bezüglich der Kostenfunktionen so zu gestalten, daß die jeweils realen oder überhaupt keine Masseströme Verwendung finden.

(wird fortgesetzt)

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