

19



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



11) Veröffentlichungsnummer: **0 643 271 A1**

12

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

21) Anmeldenummer: **94114028.7**

51) Int. Cl.<sup>6</sup>: **F24F 11/00**

22) Anmeldetag: **07.09.94**

30) Priorität: **10.09.93 DE 4330646**

**D-22047 Hamburg (DE)**

43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**15.03.95 Patentblatt 95/11**

72) Erfinder: **Glück, Bernd, Dr.-Ing.**  
**Goethestrasse 18**  
**D-08547 Jössnitz (DE)**

84) Benannte Vertragsstaaten:  
**BE CH DE ES FR LI**

71) Anmelder: **FA. RUD. OTTO MEYER**  
**Tilsiter Strasse 162**

74) Vertreter: **Richter, Werdermann & Gerbaulet**  
**Neuer Wall 10**  
**D-20354 Hamburg (DE)**

54) **Verfahren zum Regeln von Temperatur und Feuchte von Luft in Räumen mittels einer raumluftechnischen Anlage.**

57) Um ein Verfahren zum Regeln von Temperatur und Feuchte von Luft in Räumen mittels einer raumluftechnischen Anlage dahingehend weiterzubilden, daß eine universelle Optimierung unter Vorgabe verschiedener Zielfunktionen möglich ist, wird der Prozeßverlauf so bestimmt,

- daß eine gewählte Zielfunktion erfüllt wird, wobei der Bewertungsmaßstab für jedes Einzelaggregat ggf. unterschiedlich festlegbar ist,
- daß Randbedingungen, die Luftzustände am Austritt der Einzelaggregate hinsichtlich relevanter Größen begrenzen, sowie den Aggregateinsatz hinsichtlich charakteristischer Größen einschränken, vorgegeben werden,
- daß die technisch physikalisch realisierbaren Zustandsänderungen in den einzelnen Aggregaten ermittelt werden,
- daß der Gesamtprozeßverlauf durch Aneinanderreihung der Zustandsänderungen in den einzelnen Aggregaten realisiert wird und nach Erreichung der Zielfunktion die Steuerungsergebnisse durch Angabe der Luftzustandsparameter nach dem jeweiligen Aggregat so festgelegt wird,
- daß danach der Betrieb jedes Aggregats einzeln oder in Gruppen zusammengefaßt steuerbar oder regelbar ist, wobei im letzten Fall die optimierten Luftaustrittsparameter als Sollwerte verwendbar sind.

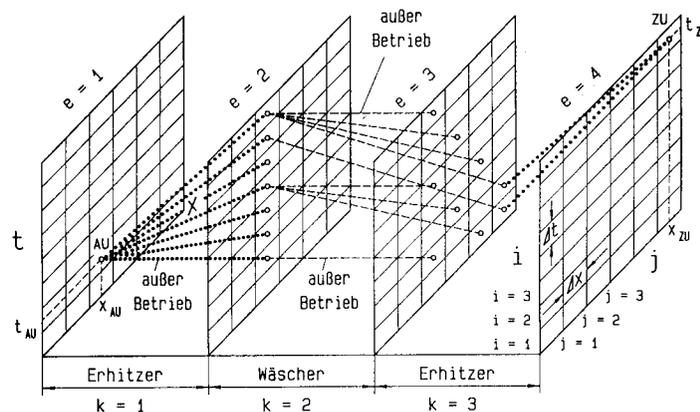


Fig. 1

EP 0 643 271 A1

Die Erfindung geht aus einem Verfahren zum Regeln von Temperatur und Feuchte von Luft in Räumen mittels einer raumlufttechnischen Anlage, die aus einer Anzahl von Einzelaggregaten zum Durchführen von Luftzustandsänderungen besteht und als Eingangsströme Außenluft und Abluft nutzt, wobei die Steuerung der Einzelklimaaggregate und die Prozeßführung so erfolgt, daß die Zuluft einen vorgegebenen Raumluftzustand bewirkt, wobei eine Zielfunktion erfüllt wird, nämlich daß der Sollzustand mit einem Minimum an Energieaufwand erreicht wird, und wobei Randbedingungen hinsichtlich der durch die Einzelaggregate einstellbaren Luftzustände vorgegeben und die realisierbaren Zustandsänderungen ermittelt werden, wie es aus der DE 34 39 288 A1 bekannt ist.

Die Luftaufbereitung in modernen Anlagen erfolgt nach Regelungsstrategien, die eine energetische Teiloptimierung beinhalten. Dabei werden die verschiedenen Energieformen nur kalorisch bewertet, und zugelassene Bereiche des Raumluftzustandes sind nur ungenügend nutzbar.

Um ein Verfahren zum Regeln von Temperatur und Feuchte in Räumen anzugeben, mit dem eine mehrere Klimaaggregate enthaltenden Luftaufbereitungsanlage für jeden Zustand der Außenluft mit möglichst geringem Energieverbrauch betrieben wird, ist bereits ein Verfahren für eine Luftaufbereitungsanlage angegeben worden, welche als Klimaaggregate mindestens eine Mischkammer zum Mischen der Außenluft mit Abluft der Räume, ein Heizaggregat, ein Kühlaggregat und eine Befeuchtungseinrichtung enthält, und mit die aktuellen Luftzustände liefernden Meßfühlern für die Abluft, die Außen- und die Zuluft, wobei aufgrund der gespeicherten raumlufttechnischen Betriebsparameter der Klimaaggregate, des aktuellen Zustandes der Außenluft und der Abluft, des Sollzustandes der Zuluft sowie des Mindestvolumenanteils der Außenluft in der Zuluft jeweils eine Teilkombination von Klimaaggregaten betrieben wird, mit welcher der Sollzustand der Zuluft erreichbar ist, wobei vorgesehen ist, daß aufgrund der gespeicherten raumlufttechnischen Betriebsparameter der Klimaaggregate, des aktuellen Zustandes der Abluft, des Sollzustandes der Zuluft sowie des Mindestvolumenanteils der Außenluft in der Zuluft Grenzen von Außenluft-Zustandsbereichen berechnet werden, denen jeweils die energetisch günstigste Teilkombination der Klimaaggregate und deren Betriebsart zugeordnet werden, mit denen der Sollzustand der Zuluft erreichbar ist, daß die Zugehörigkeit des jeweils herrschenden Außenluftzustandes zu einem Außenluft-Zustandsbereich ermittelt wird und daß die diesem Außenluft-Zustandsbereich zugeordnete Teilkombination die Klimaaggregate und deren Betriebsart freigegeben werden. Dabei kann vorgesehen werden, daß jedem Klimaaggregat ein eigener Regelkreis zugeordnet wird, wobei in Abhängigkeit von der jeweilig optimalen Betriebsweise, die sich aus der Zuordnung des Außenluft-Zustandpunktes zu einem der Außenluft-Zustandsbereiche ergibt, die einzelnen Regler mit den aktuellen Eingangsgrößen versorgt und nicht benötigte Klimaaggregate gesteuert abgeschaltet werden (DE 34 39 288 A1).

Es ist bereits vorgeschlagen worden, den Gesamtprozeßverlauf als Aneinanderreihung der einzelnen Zustandsänderungen in den Einzelaggregaten zu betrachten, wobei zur Erreichung der energiesparendsten Betriebsart die Regelparameter für die Einzelaggregate festlegbar sind (Energieeinsparung bei Lüftungs- und Klimaanlage mit Hilfe verbesserter Automatisierungskonzepte" von P. Bork in Automatisierungstechnische Praxis, 28. Jhg, Heft 4/1986, S.184-190).

Es ist auch bereits bekannt, statt eines festen Wertes einen Zustandsbereich für die Raumluft vorzugeben (DD 295 706 A5).

In der Zentrale einer Klimaanlage wird der Luftstrom einer gezielten Zustandsänderung unterworfen. Der allgemeinste Fall besteht darin, daß der Anlage Außenluft AU vom Zustand  $(t_{AU};x_{AU})$  sowie Abluft aus dem Raum AB vom Zustand  $(t_{AB};x_{AB})$  zuströmt und daraus in den Raum eintretende Zuluft ZU vom Zustand  $(t_{ZU};x_{ZU})$  aufzubereiten ist (Fig.8). Die technisch möglichen Zustandsänderungen sind an die eingesetzten Aggregate gebunden. So kann ein üblicher Luftherhitzer nur längs einer Isohygren ( $x = \text{const}$ ) die Luft erwärmen, ein adiabater arbeitender Wäscher nur längs der Feuchtkugelisoothermen ( $t_f = \text{const}$ ) befeuchten usw.. Die Auswahl der eingesetzten Aggregate, ihre Reihenfolge, die vorgesehenen Regelkreise und ihre Sequenzen bestimmen die Prozeßführung. Der Außenluftzustand AU ändert sich witterungsbedingt; oft ist auch der Raumsollwert gleitend an die Außenlufttemperatur  $t_{AU}$  gebunden, so daß der Abluftzustand AB ebenfalls variabel ist. Diese Tatsache und die zeitlich wechselnde Raumbelastung (Enthalpie- und Feuchtezunahme) erfordern einen angepaßten und damit veränderlichen Zuluftzustand ZU. Diese laufenden Variationen der Lufteintrittszustände in die Zentrale und die zugehörig geforderten Luftaustrittszustände aus der Zentrale sind durch einfach wirkende Regelkreise nicht realisierbar. Entsprechende Verknüpfungen (Sequenzen), die Aggregate abschalten und andere in Folge zuschalten, müssen vorgesehen werden. Die Wahl der Aggregate sowie ihre Betriebspunkte bestimmen die Prozeßführung und somit die energetischen sowie finanziellen Aufwendungen, d.h. die Betriebskosten der Anlage über den Jahresgang. Zahlreiche ausgefeilte Regelungsstrategien wurden entwickelt und durch Computersimulationen sowie durch den Praxiseinsatz getestet. Sie arbeiten bei sorgfältiger Planung sehr gut. Dennoch hatten diesen Strategien noch systemimmanente Nachteile an:

1. Das Auflösen des Gesamtprozesses in einzelne Regelkreise bzw. bei Beachten der Sequenzen in Regelkreiskomplexe gestattet nur die Optimierung von Prozeßteilen (Fig.2). Eine Summe optimaler Teilprozesse führt aber nicht zwangsläufig zu einem Optimum des Gesamtprozesses.

2. Die Vorgabe der Regelstrategie ist vom investierten Zeitaufwand sowie von der Intelligenz des Planers abhängig; das Ergebnis - die Betriebskosten - somit stark subjektiv beeinflußt. Bei der Vielzahl der im Jahresgang zu erwartenden Luftzustandsvarianten muß die Strategie der Prozeßführung ohnehin von Vereinfachungen - z.B. von zusammengefaßten Zustandsbereichen ausgehen (Fig.3).

3. Üblicherweise können die behaglichen oder technologisch erforderlichen Raumlufzustände in relativ großen Bereichen schwanken. Dies betrifft die Raumlufthtemperatur und in ganz besonderem Maße die Raumlufthfeuchte. Soweit für diesen Fall bisher überhaupt Regelungsstrategien entwickelt wurden, gehen sie von sehr vereinfachten Vorstellungen aus. Eine typische, oft nicht zutreffende Annahme legt den "optimalen" Raumpunkt stets auf den Rand des zulässigen Bereiches (Fig.4).

4. Die Strategien gehen von kontinuierlichen Zielfunktionen - z.B. der Minimierung des Energieeinsatzes - aus. Eine aggregatespezifische Bewertung der Energie ist üblicherweise nicht möglich. Somit können Strategien, die sich lediglich auf Enthalpiedifferenzen gründen, die evtl. verfügbare Umweltenergie nicht bevorzugt nützen (Fig.5).

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art dahingehend weiterzubilden, daß eine universelle Optimierung unter Vorgabe verschiedener Zielfunktionen möglich ist.

Diese Aufgabe wird durch die im Patentanspruch 1 gekennzeichneten Merkmale gelöst.

Es handelt sich dabei um eine universelle Optimierungstechnik auf der Grundlage der dynamischen Optimierung.

Die Zielfunktionen sind frei gestaltbar und können beispielsweise Energieaufwendungen, Betriebskosten oder umweltrelevante Belastungen minimieren. Als Ergebnis werden die optimale Prozeßführung, die Betriebszustände und Leistungen der Aggregate sowie der optimale Raumlufzustand im zugelassenen Bereich exakt angegeben. Bei Umsetzung dieses Verfahrens mittels einer modernen Datenverarbeitung ist es als idealer Vergleichsprozeß, zur Summierung der Zielfunktion über einen vorgegebenen Nutzungszeitraum und zum praktischen Anlagenbetrieb direkt nutzbar.

Während bekannte Verfahren vorsahen, daß jedem Klimaaggregat ein eigener Regelkreis zugeordnet wird, wobei in Abhängigkeit von der jeweilig optimalen Betriebsweise, die sich aus der Zuordnung des Außenluft-Zustandspunktes zu einem der Außenluft-Zustandsbereiche ergibt, die einzelnen Regler mit den aktuellen Eingangsgrößen versorgt und nicht benötigte Klimaaggregate gesteuert abgeschaltet werden, war es bisher nicht vorgesehen, eine Verfahrensweise so vorzusehen, daß ein Optimum im Gesamtergebnis dadurch erreicht wird, daß einerseits die einzelnen Klimaaggregate möglicherweise nicht optimal arbeiten und andererseits kein spezieller Zielpunkt für den Zuluftzustand, sondern ein Zielbereich für den Luftzustand im Raum-Aufenthaltsbereich vorgegeben wird, der es ermöglicht, unter Berücksichtigung der erfaßten Eingangsgrößen diesen variabel zu nützen - ggf. an den Randbereich zu gehen -, der ein Optimum in der Betriebsweise zuläßt.

Der Kerngedanke für das erfindungsgemäße Verfahren besteht darin, daß erkannt worden ist, daß in erster Linie eine technische Strategie der Prozeßführung erforderlich ist. Diese legt gemäß der Zielfunktionen (minimale Kosten oder minimale Umweltbelastung oder minimaler Energieaufwand oder..)

und variabel vereinbarten Randbedingungen (alle Zustandspunkte müssen im ungesättigten Gebiet liegen, Einsatz einer Wärmerückgewinnungseinrichtung, einer Mischkammer usw.) den optimalen Weg - d.h. den Einsatz der Aggregate - fest. Als Endziel ist ein Gebiet, welches beispielsweise gemäß DIN 1946 Teil 2 außentemperaturabhängig definiert wird, fixiert. Würden alle technischen Vorausberechnungen exakt zutreffen, könnte die Klimaanlage nach dieser Strategie betrieben werden. Weicht beispielsweise die Raumbelastung ab, so muß dies die Regelung korrigieren.

Es ist deutlich, daß primär die Strategie den optimalen Weg festlegt. Theoretisch könnte man nur mit der Strategiebetrachtung auskommen, wenn bei jeder real festgestellten Abweichung sofort eine Neubestimmung der Strategie erfolgen würde. Für den praktischen Betrieb wird es jedoch für zweckmäßiger gehalten, mit einer zweistufigen Anlagenintelligenz zu arbeiten:

I. In vorgegebenen Zeitabständen wird der Ausgangspunkt (Außenluftzustand) abgefragt, das Zielgebiet darauf aufbauend neu festgelegt und die optimale Steuer-Strategie errechnet. Der optimale Weg gibt an, welche Aggregate zu betreiben sind. Sie werden eingeschaltet.

II. Die betriebsbereiten Aggregate sind bezüglich ihrer Leistung so zu regeln, daß

- die gewünschte, optimale Zustandsänderung erfolgt,
- Abweichungen ausgeglichen werden,
- der Betrieb schwingungsfrei realisiert wird.

Die bekannten Verfahren waren dadurch geprägt, daß ausgehend von der Regelung immer bessere und umfangreichere strategische Zielstellungen integriert wurden ("Grundstrukturen und Steueralthmen zur wirtschaftlichen Betriebsweise von Klimaanlage und Möglichkeiten der Prozeßbewertung", Abschnitt 4, Diss.von U.Feder, TU Dresden, 1993. Gemäß der erfindungsgemäßen Überlegungen muß die Rangfolge jedoch gerade umgekehrt sein.

Die erforderliche Luftzustandsänderung vom Außenluftpunkt AU zum Zuluftpunkt ZU ist nur in den seltensten Fällen auf geradlinigem Weg längs  $\Delta h/\Delta x$  AU-ZU = const möglich. Den physikalischen und technischen Gegebenheiten Rechnung tragend, wird eine Aneinanderreihung von Zustandsänderungen in den verschiedenen Aggregaten erforderlich sein. Allgemein ist die Richtung der Zustandsänderung im Aggregat k durch  $(\Delta h/\Delta X)_k$  darstellbar. Ist weiterhin die Änderung der Feuchte  $(\Delta x)_k$  bekannt, dann folgt sofort die Enthalpieänderung zu

$$(\Delta h)_k = \left( \frac{\Delta h}{\Delta x} \right)_k (\Delta x)_k \quad (1)$$

Damit ergeben sich formal für den Gesamtprozeß:

$$h_{ZU} - h_{AU} = \sum_{k=1}^n \left( \frac{\Delta h}{\Delta x} \right)_k (\Delta x)_k = \sum_{k=1}^n (\Delta h)_k \quad (2)$$

$$x_{ZU} - x_{AU} = \sum_{k=1}^n (\Delta x)_k \quad (3)$$

Die Gln. (2) und (3) stellen die Nebenbedingungen dar. Die Auswahl der einzusetzenden Aggregate  $k = 1 \dots n$  und die dort vorzunehmende Feuchteänderung  $(\Delta x)_k$  hat so zu erfolgen, daß die Zielfunktion, die die Kosten, den Energieaufwand oder umweltrelevante Größen beinhaltet, zum Minimum wird:

$$\sum_{k=1}^n K_k - \text{Minimum.}$$

**Fig. 1** Zweidimensionales Abarbeitungsschema der dynamischen Optimierung für die Variablen  $t$  und  $x$ . Vom Außenluftpunkt AU ausgehende Zustandsänderungen und am Zuluftpunkt ZU ankommende Zustandsänderungen sind komplett dargestellt. Dazwischenliegende Zustandsänderungen sind der besseren Übersicht wegen nur beispielhaft eingetragen.

**Fig. 2** Beispiel für eine bekannte Regelung einer Klimaanlage. Die Strategie hat das Ziel, optimale Teilprozesse zu führen.

**Fig. 3** Außenluftanteile MA sind vorgegebenen Außenluftenthalpiebereichen zugeordnet. Der Versatz zwischen je zwei Isenthalpen berücksichtigt den gleitenden Raumsollwert in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Die Außenluftanteile MA können durch fixierte Klappenstellungen an der Mischkammer realisiert werden.

**Fig. 4** Zulässiger Raumluftzustand (schraffierter Bereich) und zugehöriger Zuluftzustand (doppelt-schraffierter Bereich) verknüpft durch die Raumzustandsänderung  $\Delta h/\Delta x$ . Der im Sinne der Zielfunktion optimale Prozeß endet nicht zwangsläufig auf einer Begrenzung des Bereiches. Der Zuluftpunkt ZU ist beispielsweise kostengünstiger zu erreichen als der Punkt ZU1. Damit ergibt sich der Raumpunkt R als Optimum.

**Fig. 5** Gegenüberstellung einer zusammengesetzten Prozeßführung (Heizen und Befeuchten) vom Außenluftpunkt AU zum Zuluftpunkt ZU. Wird die Heizenergie von der Temperatur unabhängig (kalorisch) bewertet, so sind die Prozeßverläufe 1 und 2 völlig gleichwertig. Berücksichtigt man dagegen, daß bis zur Heiztemperaturgrenze tHG Umweltenergie (z.B. Abwärme) kosten-

- günstiger oder sogar kostenlos anfällt, so ist der Prozeßverlauf 2 zu bevorzugen.
- 5 **Fig. 6** Prinzipielles Abarbeitungsschema der dynamischen Optimierung. Die Temperaturerhöhung im Erhitzer ist von der zugeführten Leistung abhängig. Der Temperaturabfall im Wäscher wird durch die Temperaturdifferenz - Eintrittstemperatur minus Feuchtkugeltemperatur - und den Befeuchtungswirkungsgrad beeinflusst. Es sind unendlich viele Zustandsverläufe möglich.
- Fig. 7** Abarbeitungsschema der dynamischen Optimierung nach Einteilung der Zielgebiete in feste Abschnitte  $\Delta t$ . Die Endpunkte werden jeweils auf die Mitte der Abschnitte gelegt.
- Fig. 8** Prinzipschaltung einer bekannten Klimaanlage mit Kennzeichnung der signifikanten Luftzustände.
- 10 **Fig. 9** Schematische Einteilung des  $h,x$ -Diagramms in Zustandsabschnitte  $(i;j)$ . (Die Sättigungslinie entspricht nicht der Realität!).
- Fig. 10** Unterprogramm FELD zur Bestimmung des Feldes  $(i^*;j^*)$  für die Parameterpaarung  $(t^*;x^*)$  und das Unterprogramm FELDINV zur Zuordnung der Zustandspaarung  $(t^*; x^*)$  aus dem Feld  $(i^*;j^*)$ . Die Zustandskennung "" wurde im Hinblick auf das spätere Gesamtprogramm gewählt. Sie kennzeichnet die jeweilige Übergabevariable zur Unterscheidung der im Hauptprogramm geltenden Variablen.
- 15 **Fig. 11** Hauptprogramm zur Ermittlung der optimalen Luftzustandsänderungen im Klimaprozeß.
- Fig. 12** Unterprogramm EIN zur Organisation der Dateneingabe.
- Fig. 13** Unterprogramm AUS zur Organisation der Datenausgabe.
- 20 **Fig. 14** Unterprogramm OPTI zur Ermittlung der Luftzustandsänderung in den Aggregaten, Überprüfung des Endpunktes auf Zulässigkeit und ggf. Aktualisierung der Speicherinhalte.
- Fig. 15** Zielfunktionen der Etappenfelder  $e$  und  $e + 1$  mit dazwischen angeordnetem Luftherhitzer. Ausgehend von drei Startpunkten im Etappenfeld  $e$  ergibt sich eine Auffüllung im Etappenfeld  $e + 1$  durch unterschiedliche Heizintensitäten, die von  $z$  aus gesteuert werden.
- 25 **Fig. 16** Unterprogramm ABLUFT zur Ermittlung des Luftzustandsverlaufes im Abluftweg, ausgehend vom Optimierungsergebnis (Etappenfeld  $e = eR$ ).
- Fig. 17** Unterprogramm ZUSTANDG zur Berechnung aller relevanten Zustandsgrößen für feuchte Luft, ausgehend von  $t^*$  und  $x^*$  nach (1).
- Fig. 18** Unterprogramm ZUSTAND zur Berechnung der Zustandsgrößen  $^*$ ,  $h^*$  und  $t^*$  für feuchte Luft, ausgehend von  $t^*$  und  $x^*$  nach (1).
- 30 **Fig. 19** Unterprogramm ZUSTANDH zur Berechnung der Temperatur  $t^*$  für feuchte Luft, ausgehend von  $h^*$  und  $x^*$  nach (1).
- Fig. 20** Unterprogramms PS und TS zur Wiedergabe der Verdampfungs- und Sublimationskurve von Wasser für die Zusammenhänge PS ( $t^*$ ) und TS ( $p^*$ ) nach (1).
- 35 **Fig. 21** Unterprogramme RAUMU und RAUMO zur Ermittlung von Luftzustandsänderungen im unteren und oberen Raumabschnitt.
- Fig. 22** Unterprogramm ERHITZER zur Luftherwärmung.
- Fig. 23** Unterprogramm WAESCHER zur adiabaten Luftbefeuchtung.
- Fig. 24** Unterprogramm DAMPFBEF zur Luftbefeuchtung mit Dampf.
- 40 **Fig. 25** Unterprogramm KUEHLER zur Luftkühlung und Entfeuchtung.
- Fig. 26** Unterprogramme LUEFTER und ALUEFTER zur Druckerhöhung des Zu- bzw. Abluftstromes.
- Fig. 27** Unterprogramme MISCHER und AMISCH zur Zusammenführung von zwei Luftströmen.
- Fig. 28** Unterprogramme WRGT und AWRGT zur Wärmerückgewinnung aus dem Abluftstrom.
- Fig. 29** Typische Zustandsänderung bei Wärmerückgewinnungseinrichtungen in Komfort-Klimaanlagen.
- 45 **Fig. 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.
- Fig. 31** Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen, der Kostenaufwendungen und der signifikanten Aktionen für Beispiel 1 (Rechnerausdruck).
- 50 **Fig. 32** Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für Beispiel 1, dargestellt im  $h,x$ -Diagramm.
- Fig. 33** Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für Beispiel 2, Variante 1, Winterbetrieb mit Wärmerückgewinner.
- Fig. 34** Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für Beispiel 2, Variante 2, Winterbetrieb mit Mischer.
- 55 **Fig. 35** Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für Beispiel 2, Variante 3, Winterbetrieb mit Wärmerückgewinner und Mischer.
- Fig. 36** Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für Beispiel 2, Variante 1, Sommerbetrieb mit

Wärmerückgewinner.

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

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

**Fig. 39** Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für Beispiel 3 bei einem sommerlichen Außenluftzustand  $t_{AU} = 22^\circ\text{C}$ ;  $x_{AU} = 8 \text{ gW/kgtL}$ . 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.

**Fig. 40** Optimaler Weg der Luftzustandsänderungen für Beispiel 3 bei einem sommerlichen Außenluftzustand  $t_{AU} = 33^\circ\text{C}$ ;  $x_{AU} = 8 \text{ gW/kgtL}$ . Bis auf Vor- und Nachwärmer werden alle Aggregate betrieben. Es wird nur Außenluft eingesetzt.

Das Arbeitsprinzip der dynamischen Optimierung zeigt Fig. 6, wobei zunächst nur die Variable  $t$  und drei Aggregate (Erhitzer, Wäscher, Erhitzer) betrachtet werden. Von AU aus ist ZU auf *unendlich* vielen Wegen erreichbar. Diese theoretische Datenmenge kann nicht verarbeitet werden.

Fig. 7 zeigt den möglichen Ausweg; die "Etappenziele" der Zustandsänderung werden in *Abschnitte* der Größe  $\Delta t$  eingeteilt und alle in diesem Abschnitt endenden Zustandsverläufe mit der mittleren Temperatur des Abschnittes etikettiert. Damit gibt es zwischen AU und ZU nun *endlich* viele Wege. Die zahlreichen physikalischen und technischen Randbedingungen, die beispielsweise Temperaturen an bestimmten Etappenzielen begrenzen, sind leicht zu berücksichtigen (siehe  $t_{B,Grenz}$  in Fig. 7).

Parallel zu jeder technisch-physikalisch möglichen Zustandsänderung wird das *Additiv der Zielfunktion*  $K_k$  ermittelt und zur bisherigen Zielfunktionssumme addiert. Enden mehrere Zustandsänderungen im gleichen Abschnitt, so wird stets die Zustandsänderung abgespeichert, deren Zielfunktion den kleinsten Wert aufweist. Zu jedem Abschnitt eines Etappenzieles sind

- die bis dahin gültige *Zielfunktionssumme* und
- die *Abschnittskennzeichnung*, aus der die Zustandsänderung entsprang ("*Quelle*"),

zu vermerken. Dies ist notwendig, denn erst am Endpunkt ZU kann man an Hand der Zielfunktionssumme die letzte optimale Zustandsänderung lokalisieren. Die schrittweise Rückverfolgung über die jeweiligen Quellpunkte ermöglicht es, den gesamten optimalen Prozeßverlauf zu kennzeichnen.

In Wirklichkeit ist der dargestellte Lösungsweg aufwendiger, denn die dynamische Optimierung muß zweidimensional für die Variablen Temperatur  $t$  und Feuchte  $x$  geführt werden. Fig. 1 zeigt den schematischen Lösungsweg. Zwischen den aufeinanderfolgenden Zustandsverläufen wird jeweils ein *Etappenfeld*  $e$  angeordnet. In ihm können alle relevanten Daten, wie Zielfunktionssumme und Quelle der ankommenden Zustandsänderung vermerkt werden. Folgende *Kennzeichnungen* sind zu verwenden:

- e* Nummer des Etappenfeldes
- i* Nummer des Temperaturabschnittes
- j* Nummer des Feuchteabschnittes.

Für die spätere Algorithmierung und Programmierung erweisen sich diese Ordnungskennungen als besonders vorteilhaft. Auf die gereichte Numerierung der Aggregate  $k$  kann dagegen verzichtet werden, wenn man die Aggregate den am Eintritt liegenden Etappenfeldern  $e$  zuordnet.

Im weiteren erfolgen zahlreiche Hinweise auf Datenflußpläne für das Verfahren und einzelne Verfahrensmaßnahmen, um hierdurch die tatsächliche technische Abwicklung darzustellen und zu erläutern.

Jedes in Fig. 1 dargestellte Etappenfeld  $e$  kann man sich als  $t,x$ -Diagramm für feuchte Luft vorstellen. Der besseren Anschaulichkeit wegen sei jedoch das allseits eingeführte  $h,x$ -Diagramm zur bildlichen Darstellung verwendet, dennoch aber bei den Variablen  $t$  und  $x$  verblieben. Der Bereich des ablaufenden Klimaprozesses wird in 60 Temperatur- und 25 Feuchteabschnitte, also in 1500 Felder eingeteilt. Die Abmessungen eines Feldes betragen  $\Delta t = 1 \text{ K}$  bzw.  $\Delta x = 0,001 \text{ kgW/kgtL}$ . Es wird der Bereich  $-19,5 \text{ }^\circ\text{C} \leq t < 40,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $0 \leq x < 0,0245 \text{ kgW/kgtL}$  abgedeckt. Die Feldnummern ergeben sich mit  $t$  in  $^\circ\text{C}$  und  $x$  in  $\text{kgW/kgtL}$  zu:

$$i = \text{INT}(t + 20,5); j = \text{INT}(1000 x + 1,5). \quad (5)$$

Beispiele

5

t; x	-19,5; 0	0; 0,005	40,4; 0,0244
i; j	1; 1	20; 6	60; 25

Die vorgegebenen Zustandspunkte t; x werden durch die Zuordnung in Zustandsabschnitte (i; j) mit einem Fehler  $\leq 0,5$  K und  $\leq 0,0005$  kg<sub>w</sub>/kg<sub>tL</sub> wiedergegeben. Dies wird aus Fig. 9 deutlich.

10

Für die inverse Zuordnung gelten:

$$t = i - 20 \text{ in } ^\circ\text{C}; x = (j - 1) / 1000 \text{ in kg}_w/\text{kg}_{tL}. \quad (6)$$

Beispiele

15

i; j	1; 1	20; 6	60; 25
t; x	-19; 0	0; 0,005	40; 0,024

20

Die zu den Gln.(5) und (6) gehörigen Unterprogramme FELD und FELDINV sind in Fig. 10 dargestellt.

Der Datenflußplan des Hauptprogramms ist in Fig.11 dargestellt. Zunächst werden alle Feldgrößen auf den Ausgangszustand gesetzt. Es sind dies:

25

$K[e; i; j] = -1$  Zielfunktion (z. B. Kostenfunktion), die die Summe der Aufwendungen bis zum Zustandspunkt e; i; j erfaßt;

$Q_i[e; i; j] = 0$  Quellfunktionen, die angeben von welchem

$Q_j[e; i; j] = 0$  Feld (e - 1; Q<sub>i</sub>; Q<sub>j</sub>) die Zustandsänderung zum Feld (e; i; j) führt;

$A[e; i; j] = 0$  Aktion, die eine kennzeichnende Größe der Zustandsänderung von (e - 1; Q<sub>i</sub>; Q<sub>j</sub>) nach (e; i; j) vermerkt (z. B. Leistung eines Erhitzers; Stellung der Mischklappe usw.).

30

Es erfolgt dann die Dateneingabe mit dem Unterprogramm EIN. Sie wird später vorgestellt.

Zwischen den Etappenfeldern e; e + 1 usw. ist jeweils ein Aggregat angeordnet, welches eine Luftzustandsänderung vornimmt. Bei bekannten Eintrittsbedingungen ist die physikalisch, technische Beschreibung gut durchführbar. Problematisch sind lediglich die Aggregate Mischer (MI) und Wärmerückgewinner (WR), die über einen zweiten Eingang eine Rückkopplung aus dem nachfolgenden Prozeßverlauf erhalten. Dies ist besonders kompliziert, wenn der gewünschte Raumzustand keinen Fixwert darstellt, sondern wenn es sich um einen Zielbereich handelt. In diesem Fall muß eine iterative Rechnung erfolgen. Der Ablauf wird durch die Steuergröße SGG > 0 bestimmt. Ein Anfangswert folgt aus der Mittelung der Begrenzungen für den Raumluftzustand:

35

$$(t_{\max}[eR] + t_{\min}[eR])/2$$

$$(x_{\max}[eR] + x_{\min}[eR])/2.$$

40

Wird am Ende der Berechnung ein Unterschied zu diesen Annahmen von > 1 K oder > 1 g<sub>w</sub>/kg<sub>tL</sub> festgestellt, beginnt eine erneute Iterationsrechnung ab Sprungmarke (1).

45

Das Kernstück des Hauptprogramms stellt das Unterprogramm OPTI dar, in ihm werden alle technisch möglichen Zustandsänderungen in den Aggregaten zwischen den Etappenfeldern e = 1 (Außenluftzustand) und e = eR (Raumzustand) berechnet und bewertet (Einzelheiten im separaten Abschnitt).

Das optimale Ziel wird ausgewählt, indem im zugelassenen Zielgebiet der Wert mit der kleinsten Zielfunktion - z. B. den niedrigsten Kosten - ermittelt wird. Anschließend erfolgt eine Rückverfolgung des optimalen Weges mit Kennzeichnung der signifikanten Etappenwerte:

50

topt[e]; xopt[e]; Kopt[e]; Akt[e].

Mit dem Unterprogramm ABLUFT wird die den Raumaufenthaltsbereich verlassende Luft weiter verfolgt.

Nach Abschluß der Iterationen werden mit dem Unterprogramm AUS alle interessierenden Größen ausgegeben.

55

Die Unterprogramme zur Datenein- und -ausgabe EIN und AUS sind in den Figuren 12 und 13 detailliert dargestellt.

Der Algorithmus zur Optimierung und der zugehörige Ablaufplan ist im Unterprogramm OPTI (Fig. 14) veranschaulicht. Es werden alle Etappenfelder von e = 1 (Außenluftzustand AU) bis e = eR - 1 -

(Raumeintritt) und innerhalb dieser wiederum alle  $i = 1 \dots 60$  sowie  $j = 1 \dots 25$  abgearbeitet, wenn die Zielfunktion  $K[e; i; j] \geq 0$  ist. Zu Beginn stellt der Außenluftzustand einen Quellpunkt dar, da im UP EIN der Außenluftpunkt im Etappenfeld  $e = 1$  mit  $K[1; i^*; j^*] = 0$  besetzt wurde.

Mittels UP FELDINV folgen  $t$  und  $x$ . Die Zustandsänderungen in den zwischen  $e$  und  $e + 1$  angeordneten Aggregaten kann in verschiedenen Stufen vorgenommen werden. So sind in einem Erhitzer beispielsweise 5 Temperaturerhöhungen um 1 K, 2 K usw. bis zu einer Endtemperatur von z. B. 40 °C möglich. Diese Intensitätsvariationen werden durch den Zähler  $z$  gesteuert. Ist die technisch mögliche Endstufe der Zustandsänderung erreicht, so wird die Steuergröße  $z_{\max} = 1$ , ansonsten  $z_{\max} = 0$  gesetzt.

Als AGGREGAT[e] können Mischer, Erhitzer, Kühler, Dampfbefeuchter, Wäscher, Lüfter und thermische 10 Wärmerückgewinner durch die gleichnamigen Unterprogramme aufgerufen werden. Gleichfalls wird die Aufenthaltszone des Raumes (Raum-unten) als Aggregat aufgefaßt. Mit diesem sei der Weg der zu optimierenden Zustandsänderungen abgeschlossen.

Die Enddaten der Luftzustandsänderung  $t_n$  (neue Temperatur) und  $x_n$  (neue Feuchte) sowie das Additiv der Zielfunktion  $\Delta K$  werden berechnet. Ist im betrachteten Aggregat technisch keine Zustandsänderung durchführbar, so wird  $\Delta K < 0$  gesetzt. 15

Das Unterprogramm ZUSTAND liefert die zu  $t_n$  und  $x_n$  gehörigen Werte: relative Feuchte  $\phi_n$ , spezifische Enthalpie  $h_n$  und Taupunkttemperatur  $t_{r,n}$ .

Liegen die neuen Zustandswerte im zulässigen Zielgebiet

$$20 \quad t_{\min}[e + 1] \leq t_n \leq t_{\max}[e + 1] \quad (7)$$

$$x_{\min}[e + 1] \leq x_n \leq x_{\max}[e + 1] \quad (8)$$

$$\phi_{\min}[e + 1] \leq \phi_n \leq \phi_{\max}[e + 1] \quad (9)$$

$$25 \quad h_{\min}[e + 1] \leq h_n \leq h_{\max}[e + 1] \quad (10)$$

$$t_{r,\min}[e + 1] \leq t_{r,n} \leq t_{r,\max}[e + 1] \quad (11)$$

30 und gilt außerdem  $\Delta K \geq 0$ , dann wird die betrachtete Zustandsänderung akzeptiert (Im Zusammenwirken mit Gl.(5) ist es sinnvoll, die Grenzwerte für  $t$  mit  $\pm 0,5$  K und für  $x$  mit  $\pm 0,0005$   $\text{kg}_w/\text{kg}_{tL}$  zu tolerieren.). Sie findet endgültig Aufnahme, wenn für die Zielfunktion des neuen Punktes  $i_n; j_n$

$$K[e + 1; i_n; j_n] < 0 \quad (12)$$

35 oder

$$K[e; i; j] + \Delta K < K[e + 1; i_n; j_n] \quad (13)$$

40 gilt. Es folgen dann die Speicherbelegungen:

$$K[e + 1; i_n; j_n] = K[e; i; j] + \Delta K \quad (14)$$

$$Q_i[e + 1; i_n; j_n] = i \quad (15)$$

$$45 \quad Q_j[e + 1; i_n; j_n] = j \quad (16)$$

$$A[e + 1; i_n; j_n] = \text{Aktion.} \quad (17)$$

50 Letzteres stellt ein typisches Merkmal der durchgeführten Zustandsänderung dar.

Bild 15 zeigt zwei aufeinanderfolgende Etappenfelder; dazwischen befindet sich ein Luftherhitzer, der beispielsweise pro 1 K Temperaturerhöhung einen Kostensummanden von  $\Delta K = 2$  DM/h verursacht.

Das Unterprogramm ABLUFT (Fig.16) Zeigt den Algorithmus zur Abluftverfolgung und den detaillierten Ablauf. Ausgehend vom Etappenfeld ( $e = e_R$ ) und den optimalen Raumzustandswerten ( $t = t_{\text{opt}}[e_R]$ ;  $x = x_{\text{opt}}[e_R]$ ) werden bis zum Etappenfeld ( $e_{\max} - 1$ ) die möglicherweise einsetzbaren AGGREGATE [e], wie z. B. Raum-oben, Ablüfter, Abzweig-Mischer und Abluft-Wärmerückgewinner, betrachtet. Die durch diese Aggregate bewirkten Zustandsänderungen sind Inhalt der entsprechenden Unterprogramme. Die Austrittsgrößen ( $t_n; x_n$ ) werden dem nächsten Etappenfeld

topt[e + 1] = tn (18)

xopt[e + 1] = xn (19)

5

zugeordnet. Die Zielfunktion erfährt keine weitere Veränderung

Kopt[e + 1] = Kopt[eR]; (20)

10 die aggregattypische Handlung wird vermerkt

Akt[e + 1] = Aktion. (21)

15 Die im Abluftweg auftretenden Beeinflussungen der Zielfunktion - beispielsweise der Betriebskosten für den Ablüfter - sind bereits im Optimierungsalgorithmus mit zu berücksichtigen, da die eigentliche Optimierung am Etappenfeld e = eR abgeschlossen wird. Dies ist leicht möglich, indem die Antriebskosten beim Zulüfter bereits mit zu erfassen sind (siehe UP: LUEFTER). Analog kann nötigenfalls auch bei der stets zweiteiligen Abwärmerückgewinnung vorgegangen werden.

20 Bei allen Rechnungen zur Prozeßführung bilden die thermodynamischen Beziehungen die Basis. Die Grundlagen und zusammengefaßte Algorithmen sind bekannt. Sie werden vorausgesetzt 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 ( Fig. 17):

25 Alle relevanten Zusammenhänge (G deutet auf "global" hin) werden ausgehend von den bekannten Parametern t\* und x\* berechnet. Verfügbar sind: relative Feuchte  $\phi^*$  ( $\phi^* = 2$  charakterisiert übersättigtes Gebiet bei t\* > 0 °C;  $\phi^* = 3$  desgl. bei t\* ≤ 0 °C), spezifisches Volumen v\*, Dichte  $\rho^*$ , spezifische Enthalpie h\*, Feuchtekugeltemperatur tf\*, Taupunkttemperatur tr\*, Feuchtegehalte xW und xS, Partialdrücke pW, pL.

Unterprogramm ZUSTAND (Fig. 18):

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

30 Unterprogramm ZUSTANDH (Fig. 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).

35 In Fig. 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.

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

40  $\Delta HR$  W Enthalpiestrom ("trockene und feuchte Wärme")

$\Delta WR$  kg<sub>w</sub> Feuchtestrom

zugeführt. Im oberen Raum erfolgt nur noch die Übergabe von

$\Delta HRO$  W trockener Wärmestrom,

der beispielsweise aus der Leuchtenwärme resultiert.

Vorgegeben ist weiterhin

45  $\dot{m}$  kg/s Luftmassenstrom.

Damit sind die beiden Unterprogramme RAUMU und RAUMO (Fig. 21) nutzbar, woraus die Parameter am jeweiligen Austritt (tn; xn) folgen. Als "Aktion" wird die Richtung der Zustandsänderung ( $\Delta HR/\Delta WR$ ) 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.

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

55 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.

## EP 0 643 271 A1

Erhitzer: Unterprogramm ERHITZER (Fig. 22)

Beginnend bei der Eintrittstemperatur  $t$  erfolgt in  $z$  Stufen eine Temperaturerhöhung um je 1 K bis zu einer Endtemperatur  $t_n = 40^\circ\text{C}$

$$5 \quad t_n = t + z. \quad (22)$$

Die absolute Feuchte bleibt bei der Erwärmung konstant

$$x_n = x. \quad (23)$$

10

Die übertragene Leistung beträgt

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

15

Unterhalb der Grenztemperatur  $t_n \leq t_{HG}$  wird mit spezifischen Kosten  $k_x = k_{1H}$ , darüber mit  $k_x = k_{2H}$  - jeweils in DM/kWh - gerechnet. Damit sind kostengünstige oder kostenlose Umweltenergieangebote optimal nutzbar. Die Aufwendungen betragen

$$\Delta K = \Delta k_x \text{ in DM/h.} \quad (25)$$

20

Unter "Aktion" wird die Leistung  $\Delta$  gespeichert.

Das Unterprogramm WAESCHER ist in Fig. 23 dargestellt.

Es wird ein geregelter Wäscher zugrunde gelegt. Beim ersten Berechnungsdurchgang ( $z = 0$ ) erfolgt die Bestimmung der zu  $t$  und  $x$  gehörigen Feuchtkugeltemperatur  $t_f^*$  und die zu  $t^* = t_f^*$  gehörige Sättigungsfeuchte  $x_f$ . Vereinfachend werden die linearen Schrittweiten

25

$$\Delta t_f = \frac{t - t_f^*}{20} \quad (26)$$

30

$$\Delta x_f = \frac{x_f - x}{20} \quad (27)$$

35

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

$$t_n = t - z \Delta t_f \quad (28)$$

40

$$x_n = x + z \Delta x_f \quad (29)$$

und weiter der Befeuchtungsgrad

45

$$\eta_B = \frac{x_n - x}{x_f - x} \quad (30)$$

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

50

$$\eta_{Bmin} \leq \eta_B \leq \eta_{Bmax} \quad (31)$$

oder ist  $z = 0$ , dann werden die Kosten bestimmt. Ausgehend von der Beziehung

55

$$\Delta K = \Delta p_w \dot{V}_w \frac{p_{s1}}{\eta_p} \quad (32)$$

mit

- $\Delta P_w$  Differenzdruck der Sprühwasserpumpe  
 $\dot{V}_w$  Wasserstrom  
 $\eta_P$  Pumpen- und Motorwirkungsgrad  
 5  $P_{e1}$  spezifischer Preis der Elektroenergie.  
 und dem erforderlichen Wassermassestrom

$$\dot{m}_w \approx \frac{1}{C} \ln(1 - \eta_B) \dot{m} \quad (33)$$

10 folgt

$$\Delta K = \Delta p_w \dot{m}_w e_w^{-1} \eta_P^{-1} k_{e1} \cdot \quad (34)$$

- 15 Mit  $\Delta p_w = 2$  bar,  $\rho_w = 1000$  kg/m<sup>3</sup>,  $C = 4$  (Annahme für einen bestimmten Wäschertyp) und  $kW = p_{e1}/\eta_P$  in DM/kWh ergibt sich in der Flußbildschreibweise

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

20 Unter "Aktion" wird der Befeuchtungsgrad vermerkt.

Das Unterprogramm DAMPFBEF ist in Fig. 24 dargestellt.

Im ersten Berechnungsschritt ( $z = 0$ ) werden zugehörig zum Eingabewert Dampfdruck  $p_{DB}$  die Enthalpie des Sattedampfes  $\Delta h_D$  nach (1) und zum Lufteintrittszustand ( $t; x$ ) mit UP ZUSTAND die Enthalpie der Luft  $h$  bestimmt.

- 25 Die Befeuchtung erfolgt in  $z = 10$  Schritten jeweils um  $1$  g<sub>w</sub>/kg<sub>tL</sub>. Entsprechend erhöhen sich die Enthalpie- und Feuchtwerte:

$$h_n = h + \frac{z}{1000} \Delta h_D \quad (36)$$

30

$$x_n = x + \frac{z}{1000} \cdot \quad (37)$$

35

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

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

40

wobei die spezifischen Energiekosten  $k_{DB}$  aus dem spezifischen Preis der Elektroenergie  $P_{e1}$  und dem Wirkungsgrad der Dampferzeugung  $\eta_D$  nach  $k_{DB} = p_{e1}/\eta_D$  in DM/kWh zu bilden sind. Bei nichtelektrischer Dampferzeugung ist eine entsprechende Anpassung vorzunehmen.

- 45 Unter "Aktion" werde die Feuchtezunahme in g<sub>w</sub>/kg<sub>tL</sub> gespeichert.

Das Unterprogramm KUEHLER ist in Fig. 25 dargestellt.

Zur Ermittlung des Zustandsverlaufes im Oberflächenkühler wird ein einfaches Modell gewählt, das mit dem sogenannten Rippenwirkungsgrad des Kühlers  $\eta_K$  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  $t_r$ . Schrittweise wird die mittlere Kaltwassertemperatur um je  $1$  K abgesenkt

50

$$t_{KW} = t - z. \quad (39)$$

Die untere Grenze beträgt  $t_{KW} = 6^\circ \text{C}$ .

- 55 Mit dem Rippenwirkungsgrad berechnet sich die mittlere Oberflächentemperatur zu

$$t_K = t - \eta_K (t - t_{KW}). \quad (40)$$

## EP 0 643 271 A1

Liegt diese über der Taupunkttemperatur der Luft  $t_r$ , so verläuft die Zustandsänderung auf einer Isohygen

$$x_n = x, \quad (41)$$

- 5 ansonsten werde die zu  $t_K$  gehörige Sättigungsfeuchte  $x_K$  bestimmt und mit Hilfe des Bypassfaktors die Austrittsfeuchte der Luft

$$x_n = x - B_y (x - x_K) \quad (42)$$

- 10 berechnet. Die Enthalpie an der Kühloberfläche  $h_K$  wird ermittelt. Eine "Mischung" dieses Luftzustandes mit der eintretenden Luft ergibt näherungsweise die Enthalpie am Austritt

$$h_n = h - B_y (h - h_K). \quad (43)$$

- 15 Mit UP ZUSTANDH folgt  $t_n$ . Liegt die mittlere Kaltwassertemperatur  $t_{KW}$  über der Grenztemperatur  $t_{KG}$ , so gelten die spezifischen Kosten  $k_x = k_{1K}$ , sonst  $k_x = k_{2K}$ . Die übertragene Leistung berechnet sich zu

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

- 20 die erforderlichen Kosten ergeben

$$\Delta K = \Delta k_x \text{ in DM/h.} \quad (45)$$

- 25 Unter "Aktion" werde die Leistung vermerkt.

Die Unterprogramme LUEFTER und ALUEFTER sind in Fig. 26 dargestellt.

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

$$30 \quad \Delta h = \frac{v^* p}{\eta_L} \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[ \left( \frac{p + \Delta p}{p} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right] 10^{-3} \quad \text{in kJ/kg}_{tL} . \quad (46)$$

- 35 Dabei bedeuten:

$v^*$   $\text{m}^3/\text{kg}$  spezifisches Volumen  
 $\Delta p$  Pa Druckerhöhung ( $\Delta p_Z$  Zulüfter;  $\Delta p_A$  Ablüfter)  
 $p$  Pa Vordruck (näherungsweise gleich dem Außenluftdruck)  
 $\eta_L$  Wirkungsgrad ( $\eta_{LZ}$  Zulüfter;  $\eta_{LA}$  Ablüfter)

- 40  $\kappa$  Isentropenexponent für Luft ( $\kappa = 1,4$ ).

Die Feuchte bleibt konstant

$$x_n = x, \quad (47)$$

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

$$50 \quad \Delta K = \left( \frac{\Delta p_Z}{\eta_{LZ}} + \frac{\Delta p_A}{\eta_{LA}} \right) v^* \dot{m} \text{ kL } 10^{-3} \quad \text{in DM/h.} \quad (48)$$

Unter "Aktion" werde die Temperaturerhöhung gespeichert.

- 55 Die Unterprogramme MISCHER und AMISCH sind in Fig. 27 dargestellt. Der durch die Klappen an der Mischkammer einstellbare Außenluftanteil  $MA$  (Außenluftmassenstrom/Mischluftmassenstrom) wird in Schritten ( $z = 0$  bis  $z = 10$ ) erhöht

$$MA = 1 - 0,1 z. \quad (49)$$

Liegt er im zugelassenen Bereich

$$5 \quad MA_{\min} \leq MA \leq MA_{\max}, \quad (50)$$

folgen die Berechnungen

$$x_n = MA x + (1 - MA) x_{MII} \quad (51)$$

10

$$h_n = MA h + (1 - MA) h_{MII}. \quad (52)$$

Vorgegeben sind dabei die Luftzustände ( $x$ ;  $t$ ) und für den zweiten Zustrom ( $x_{MII}$ ;  $t_{MII}$ ), woraus mit UP ZUSTAND  $h$  und  $h_{MII}$  ermittelt werden.

15 Aus  $x_n$  und  $h_n$  folgt mit UP ZUSTAND  $h$  endgültig  $t_n$ . Als Kostenfunktion sei

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

20 verwendet. In der Regel wird jedoch  $k_M = 0$  gelten. Der charakteristische Außenluftanteil  $MA$  wurde unter "Aktion" vermerkt.

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

25 Die Unterprogramme WRGT und AWRGT sind in Fig. 28 dargestellt. Wegen der Variantenvielzahl von Wärmerückgewinneinrichtungen findet ein einfaches, jedoch recht allgemeingültiges Modell Anwendung. Es basiert auf dem Gütegrad (Betriebscharakteristik)  $\Phi_{WRGT}$ . Ausgehend von den Eintrittsgrößen ( $t$ ;  $x$ ) folgen die Endwerte der Zustandsänderung:

$$t_n = t + \Phi_{WRGT} (t_{WRGTII} - t) \quad (54)$$

$$30 \quad x_n = x. \quad (55)$$

$t_{WRGTII}$  stellt die abluftseitige Lufteintrittstemperatur in den Wärmerückgewinner dar. Der übertragene Wärmestrom beträgt dann

$$35 \quad \Delta WRGT = (1,01 + 1,86 x) (t_n - t) \dot{m} \text{ in kW}, \quad (56)$$

woraus aufbauend die Kostenfunktion

$$\Delta K = \dot{m} \Delta WRGT \text{ in DM/h} \quad (57)$$

40

formuliert wird. Es kann vielfach auch sinnvoll sein,

$$\Delta K = k_{WRGT} \dot{m} \text{ oder } \Delta K = \dot{m} k_{WRGT} \text{ in DM/h} \quad (58)$$

45 anzusetzen bzw.  $k_{WRGT} = 0$  zu verwenden. Die spezifischen Kosten sind im UP EIN entsprechend zu modifizieren. "Aktion" speichert den Betriebszustand des Wärmerückgewinners (0 außer Betrieb; 1 in Betrieb).

50 Fig.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 (Fig.28) der Austrittszustand qualitativ richtig erfaßt werden. Die Abfrage Akt[eWR + 1] gibt an, ob der Wärmerückgewinner betrieben wurde. Wenn nein, dann gelten

$$55 \quad t_n = t \\ x_n = x,$$

ansonsten werden mit UP ZUSTAND die Enthalpie am Eintritt des Abluftstromes  $h^*$  und die im Zuluftstrom

übertragene Enthalpiedifferenz  $\Delta WRGT$  bestimmt. Mit der Enthalpie am Austritt des Abluftstromes

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

- 5 und  $x$  folgen aus UP ZUSTANDH die Größen  $t_n = t^*$  und  $t_r^*$ . Liegt der Austrittszustand nahe an der Sättigungskurve, so wird

$$x_n = x_S - 0,001 \text{ kg}_W/\text{kg}_{tL}$$

- 10 gesetzt und mit UP ZUSTANDH erneut  $t_n$  bestimmt. Unter "Aktion" werde wiederum der Betriebszustand des Wärmerückgewinners gespeichert.

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.

- 15 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  $\text{g}_W/\text{kg}_{tL}$  - (siehe Fig. 9) Fehler von der halben Abschnittsgröße entstehen können. Außerdem sind die zulässigen Fehlerschranken bei der Hauptprogramm-Iterationsschleife ebenfalls mit 1 K und 1  $\text{g}_W/\text{kg}_{tL}$  festgelegt.

20 **Beispiel 1**

- Eine einfache Teilklimaanlage - bestehend aus Vorwärmer, Wäscher, Nachwärmer - soll Außenluft (-14 °C, 1  $\text{g}_W/\text{kg}_{tL}$ ) so aufbereiten, daß der Endzustand im Bereich  $t = (20 \dots 24)^\circ\text{C}$ ;  $\phi = (0,30 \dots 0,65)$  bzw.  $x < 11,5 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$  liegt. Für die Zwischenzustände existieren keinerlei Begrenzungen. Die spezifischen  
25 Kosten betragen:

Wärmeenergie bis zu $t_{\text{Luftaustritt}}$ von 25 °C:	$k_{1H} = 0,05 \text{ DM/kWh}$
Wärmeenergie über $t_{\text{Luftaustritt}}$ von 25 °C:	$k_{2H} = 0,15 \text{ DM/kWh}$
Betriebsenergie für Befeuchterpumpe inclusive Wirkungsgrad:	$k_W = 0,35 \text{ DM/kWh}$

30

Der Wäscher ist regelbar im Bereich:  $\eta_{B\text{min}} = 0,50$ ;  $\eta_{B\text{max}} = 0,95$ . Es sind  $\dot{m} = 8,8 \text{ kg/s}$  (ca. 27500  $\text{m}^3/\text{h}$ ) Luft aufzubereiten. Der Prozeßverlauf ist so zu bestimmen, daß minimale Kosten entstehen.

Zur Optimierung des Anlagenbetriebs wird das vorgestellte Programmsystem eingesetzt.

- 35 Um den Lösungsweg verständlich zu machen, seien im Fig. 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  $\text{g}_W/\text{kg}_{tL}$ ) mit den Kosten 0 DM/h belegt.

40

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  $> 25^\circ\text{C}$  werden durch den abgebildeten Kostensprung deutlich.

Etappenfeld  $e = 3$

45

Zwischen  $e = 2$  und  $e = 3$  ist der Wäscher installiert. Wird er nicht betrieben, so bleiben die bisherigen Werte erhalten (siehe Reihe  $x = 1 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$ ). Geht er in Betrieb, so folgen Luftzustände mit  $x > 1 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$ , wobei nur die technisch möglichen Endpunkte ( $\eta_B = 0,5 \dots 0,95$  und  $t_f = \text{const}$ ) 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.

50

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

55

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

Fig. 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. Fig. 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:

- 5 Außenluftzustand Winter:  $t_{AU} = -12\text{ °C}; x_{AU} = 1\text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$
- Sommer:  $t_{AU} = 32\text{ °C}; x_{AU} = 19\text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$
- Luftdruck:  $p = 101300\text{ Pa}$
- Raumluftbereich Winter:  $t = 20\text{ °C}..23\text{ °C}; \phi = 0,30..0,65;$   
 $x < 11,5\text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$
- 10 Sommer:  $t = 24\text{ °C}..27\text{ °C}; \phi = 0,30..0,65;$   
 $x < 11,5\text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$
- Zwischenbereiche:  $\phi \leq 1$
- Aggregate- und Raumdaten:
- Wärmerückgewinner:  $\Phi_{WRGT} = 0,6; k_{WRGT} = 0\text{ DM}/\text{kWh}$
- 15 Mischer:  $M_{Amin} = 0,5; M_{Amax} = 1;$   
 $k_M = 0\text{ DM}/\text{h}/\text{kg s}$
- Erhitzer (Vorwärmer):  $k_{1H} = 0,05\text{ DM}/\text{kWh}$  für  $t \leq 25\text{ °C},$
- sonst  $k_{2H} = 0,15\text{ DM}/\text{kWh}$
- Kühler:  $\eta_K = 0,8; B_y = 0,75$
- 20 sonst  $k_{1K} = 0,20\text{ DM}/\text{kWh}$  für  $t \geq 16\text{ °C},$
- sonst  $k_{2K} = 0,50\text{ DM}/\text{kWh}$
- Wäscher:  $\eta_{Bmin} = 0,50; \eta_{Bmax} = 0,95;$   
 $k_W = 0,35\text{ DM}/\text{kWh}$
- Erhitzer (Nachwärmer):  $k_{1H} = 0,05\text{ DM}/\text{kWh}$  für  $t \leq 25\text{ °C},$
- 25 sonst  $k_{2H} = 0,15\text{ DM}/\text{kWh}$
- Zulüfter:  $\eta_{LZ} = 0,70; \Delta p_Z = 700\text{ Pa};$   
 $k_L = 0,25\text{ DM}/\text{kWh}$
- Raum (unten) Winter (vollbesetzt):  $\Delta HR = 38\text{ kW}$   
 $\Delta WR = 0,0055\text{ kg}_w/\text{s}$
- 30 Sommer (vollbesetzt):  $\Delta HR = 75\text{ kW}$   
 $\Delta WR = 0,0096\text{ kg}_w/\text{s}$
- Raum (oben) Winter und Sommer:  $\Delta HR_O = 9\text{ kW}$
- Ablüfter:  $\eta_{LA} = 0,83; \Delta p_A = 600\text{ Pa}$

35 Die aufgeführte Anordnung der Aggregate und des Raumes entspricht der Richtung des Luftdurchganges. Es sind für beide Betriebsfälle folgende Varianten zu untersuchen:

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

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

Die Möglichkeiten des Optimierungsverfahrens 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 Figuren 33 bis 38 dargestellt. Die tabellarische Zusammenfassung zeigt die deutlichen Vorteile des Mischkammereinsatzes (MI) und die zusätzliche Kopplung mit einer Wärmerückgewinnungseinrichtung (WR):

50

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

55

## 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 Figuren 39 und 40 vorgestellt und in den Figurenbeschreibungen charakterisiert.

Vorteilhafterweise ist eine automatisierte Ermittlung des zulässigen Raumbereiches möglich.

Zugehörig zur Außenlufttemperatur können mit sehr geringem Aufwand die zulässigen Raumluf-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.

Auch ist die Ermittlung von Zielfunktions-Intervallsummen möglich.

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.

Auch die Optimierung des Massestromes kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren durchgeführt werden.

Der im Sinne der Zielfunktion optimale Weg der Luftzustandsänderungen gilt für den vorgegebenen Massestrom. In der Regel nehmen die Energie- und Kostenaufwendungen 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 ( $\Delta t_{ZU} = t_{opt}[eR] - t_{opt}[eR - 1]$ ) für ein vorgegebenes  $\dot{m}$ ;
- Liegt  $\dot{m}$  über dem zulässigen Minimalwert und  $\Delta t_{ZU}$  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 Mixers  $M_{Amin}$ . 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.

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.

Der verfahrensgemäße Betrieb der raumluftechnischen Anlage ist nachstehend dargestellt.

Die Optimierung des Luftaufbereitungsprozesses liefert Aussagen über den im Sinne der Zielfunktion günstigsten Raumlufzustand 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 Auswahl 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  
5 zwei Möglichkeiten:

- Jedes Aggregat erhält eine Einzelregelung mit dem errechneten Luftaustrittszustand als Sollwert.
- Mehrere Aggregate - z. B. Vorwärmer, Kühler, Nachwärmer (vgl. Fig.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  
10 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 Hardwareinsatz - 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  
15 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  $\Delta h$  sowie  $\Delta x$  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 RLT-Anlage anzuwenden und eine Zuordnung beispielsweise zu den Luft- und Wassereintrittstemperaturen herzustellen.  
20
- 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.  
25

### Patentansprüche

30

1. Verfahren zum Regeln von Temperatur und Feuchte von Luft in Räumen mittels einer raumlufttechnischen Anlage, die aus einer Anzahl von Einzelaggregaten zum Durchführen von Luftzustandsänderungen besteht und als Eingangsströme Außenluft und Abluft nutzt, wobei die Steuerung der Einzelklimaaggregate und die Prozeßführung so erfolgt, daß die Zuluft einen vorgegebenen Raumluftzustand bewirkt, wobei eine Zielfunktion erfüllt wird, nämlich daß der Sollzustand mit einem Minimum an Energieaufwand erreicht wird, und wobei Randbedingungen hinsichtlich der durch die Einzelaggregate einstellbaren Luftzustände vorgegeben und die realisierbaren Zustandsänderungen ermittelt werden, dadurch gekennzeichnet,  
35 daß der Prozeßlauf so bestimmt wird,

40

a) daß in bestimmten, wählbaren Zeitabständen die jeweils die Zielfunktion erfüllenden Betriebsparameter der Anlage rechnerisch ermittelt werden, indem das Zustandsfeld der durch die Einzelaggregate geführten Luft durch das Aufteilen in Temperatur- und Feuchteabschnitte ( $\Delta t$  und  $\Delta x$ ) diskretisiert wird, so daß ausgehend vom Zustand der Außenluft sich eine endliche Anzahl von (unter Berücksichtigung der Randbedingungen) theoretisch möglichen Wegen bis zum Raumluft- oder  
45 Zuluftzustand ergibt und jeder dieser Wege schrittweise verfolgt wird, wobei für jeden Weg die Bewertungen der Luftbehandlung durch die Einzelaggregate hinsichtlich der Zielfunktion aufsummiert werden, und schließlich die Parameter desjenigen Weges zum Betrieb der Einzelaggregate ausgewählt werden, dessen aufsummierte Gesamtbewertung die Zielfunktion erfüllt,

50

b) daß als Zielfunktion die "Minimierung der exergetische, umweltrelevant, kalorisch oder kostenmäßig bewerteten Energieaufwendungen" oder die "Minimierung direkt eingesetzter Naturressourcen" vorgegeben wird, wobei der Bewertungsmaßstab für jedes Einzelaggregat auch unterschiedlich festlegbar ist,

55

c) daß als Randbedingungen die Luftzustände am Austritt der Einzelaggregate hinsichtlich der Temperatur, der absoluten Feuchte, der spezifischen Enthalpie und der Taupunkttemperatur - bezogen auf einen konstanten Luftdruck, welcher für jedes Einzelaggregat unterschiedlich sein kann - oder daraus abgeleiteter Größen verwendet werden sowie Begrenzungen des Aggregateinsatzes hinsichtlich des Luftdurchsatzes, der heiz- oder kühlmedien seitigen Durchflußparameter, der Leistung, der Zustandsgrößen der aufzubereitenden Luft oder aggregatespezifischer Charakteristiken,

vorgegeben werden,

d) daß die technisch-physikalisch realisierbaren Zustandsänderungen in den einzelnen Aggregaten - ausgehend von den nach Temperatur sowie Feuchte diskretisierten, eintretenden Zuluftzuständen - in für das Aggregat charakteristischen Parameterschritten (Temperaturerhöhungen, Feuchtezunahmen, Kühlwassereintrittstemperaturabsenkungen usw.) untersucht werden, wobei für unregelmäßige Aggregate die Untersuchung nur aus einem einzigen Schritt besteht, mit dem ersten Ergebnis des Luftaustrittszustandes, der nach Anwenden eines Rundungsalgorithmus - wiederum in diskretisierter Form vorliegt, und dem zweiten Ergebnis eines Summanden zur Gesamtbewertung im Sinne der Zielfunktion, wobei im Falle, daß mehrere Parameterschritte den gleichen diskretisierten Luftaustrittszustand bewirken, der Schritt, welcher im Sinne der Zielfunktion den günstigsten (kleinsten oder größten) Summanden erreicht, in die Bewertung eingeht und

e) daß danach der Betrieb jedes Aggregats einzeln oder in Gruppen zusammengefaßt steuerbar oder regelbar ist, wobei im letzteren Fall die optimierten Luftaustrittsparameter als Sollwerte verwendbar sind.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

daß anstelle des vorgegebenen Raumlufzustandes ein durch die Parameter der Eingangsluftströme definierter Raumlufzustand oder hinsichtlich Temperatur und Feuchte ein definierter Raumlufzustandsbereich, dessen Begrenzungen sowohl in Abhängigkeit der inneren Wärme- und Feuchtelasten - ermittelbar aus den während des Anlagenbetriebs gemessenen Luftzuständen für die Ab- und Zuluft (Delta h/Delta x, Raum) der Personenzahl im Raum und/oder der im Raum in Betrieb befindlichen elektrischen Geräte - sowie der äußeren Witterungsbedingungen als auch der Nutzungszeit vorgebar sind, wobei die diskretisierten Temperatur- und Feuchteabschnitte (Delta t und Delta x), deren Flächenmittelpunkte innerhalb des definierten Bereiches liegen, untereinander gleichwertig sind.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet,

daß die optimale Prozeßführung auch eine Optimierung des Luftdurchsatzes einschließt, wobei hygienisch, luftführungstechnisch und/oder bauphysikalisch bedingte Begrenzungen vorgebar sind.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

bei dem die raumluftechnische Anlage eine Anzahl Einzelaggregate, nämlich mindestens ein Heizaggregat (EH), ein Kühlaggregat (KU) und ein Befeuchtungsaggregat (WA) enthält und die aktuellen Luftzustände (Druck (p), Temperatur (t), Feuchte (x) und/oder auch andere Luftzustandsgrößen) liefernde Meßfühler für die Außen-, die Ab- und Zuluft aufweist, wobei aufgrund der im Sinne der Zielfunktion unter Beachtung der raumluftechnischen und aggregatespezifischen Randbedingungen ermittelten Optimierungsergebnisse alle Aggregate oder Teilkombinationen von Aggregaten betrieben werden, mit denen der Raum-Sollzustandsbereich (t SOLL min...t SOLL max, x SOLL min ... x SOLL max, phi SOLL min ... phi SOLL max, tau SOLL min...tau SOLL max) erreichbar ist, dadurch gekennzeichnet,

a) daß unter Beachtung der vorgegebenen, gespeicherten Randbedingungen alle mit den Einzelaggregaten möglichen Temperatur- und/oder Feuchteänderungen in i Temperaturabschnitten  $\Delta t \leq 1$  K und in j Feuchteabschnitten  $\Delta x \leq 1$  g/kg betrachtet werden und die Zielfunktionssumme K bestimmt wird, wobei als Ausgangspunkt der Außenluftzustand (t AU, x AU) mit  $K = 0$  gilt,

b) daß alle technisch möglichen Luftzustände nach jedem Aggregat in einem t,x-Etappenfeld e durch den bis zu diesem Zustandspunkt im Sinne der Zielfunktion erforderlichen Minimalaufwand(e,i, j) gekennzeichnet werden,

c) daß nur die  $K_{min}(e,i,j) \geq 0$  Ausgangspunkte für die Zustandsänderung im nächsten Aggregat sein können,

d) daß die Zustandsänderung im Raum, vorzugsweise geteilt in den Aufenthaltsbereich und einen oberen Bereich, technisch-physikalisch wie die Zustandsänderung in einem Aggregat betrachtet wird, jedoch kein Additiv zur Zielfunktionssumme hinzugefügt wird,

e) daß die im Raum-Aufenthaltsbereich mit  $K_{min}(e,i,j) \geq 0$  belegten Zustandspunkte, t(e,i), x(e,j), die innerhalb des Raum-Sollbereiches liegen, unter Beachtung aller Randbedingungen die technisch möglichen Raumlufzustände, die mit dem Klimaprozeß erreichbar sind, darstellen,

f) daß der optimale lufttechnische Prozeß im Sinne der Zielfunktion im Raum-Aufenthaltsbereich durch den Zustandspunkt mit dem kleinsten, belegten  $K_{min}(e,i,j)$ -Wert führt,

g) daß die Optimierung des lufttechnischen Prozesses in regelmäßigen Abständen wiederholt wird, wobei dies für vorgegebene Zeitintervalle oder in Abhängigkeit der gemessenen, vorzugsweise zeitbezogenen, Luftzustandsänderungen der Eingangsgrößen (Außen-, Ab- und/oder Zuluft) erfolgt.

- 5 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4,  
dadurch gekennzeichnet,  
daß die aggregatespezifischen Randbedingungen und technisch möglichen Zustandsänderungen, ausgehend von den Vorgabewerten unter Verwendung der tatsächlich gemessenen Luftzustandsänderung selbsttätig nach einer vorgegebenen Approximationsfunktion verändert und gespeichert werden.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

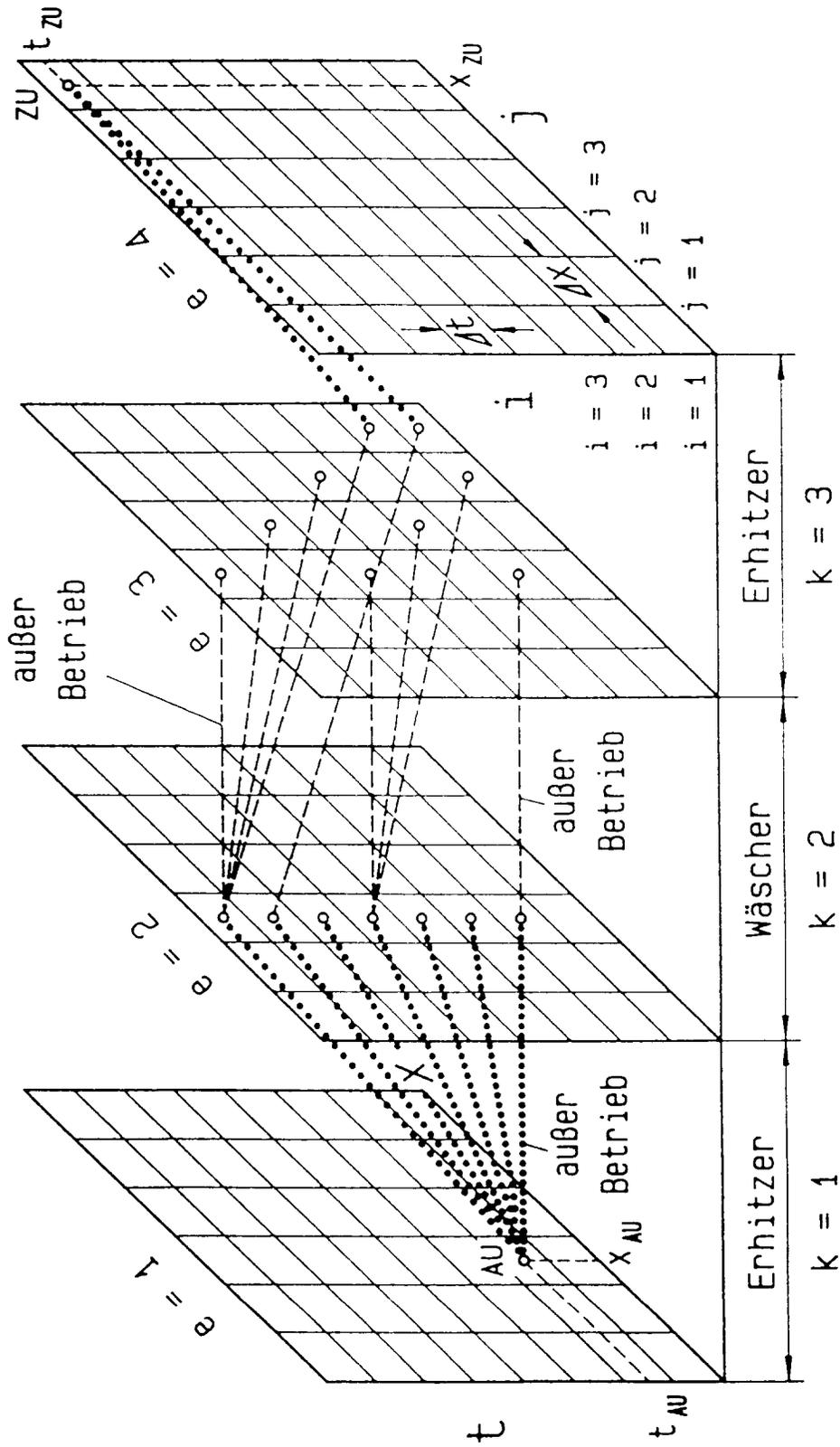


Fig. 1

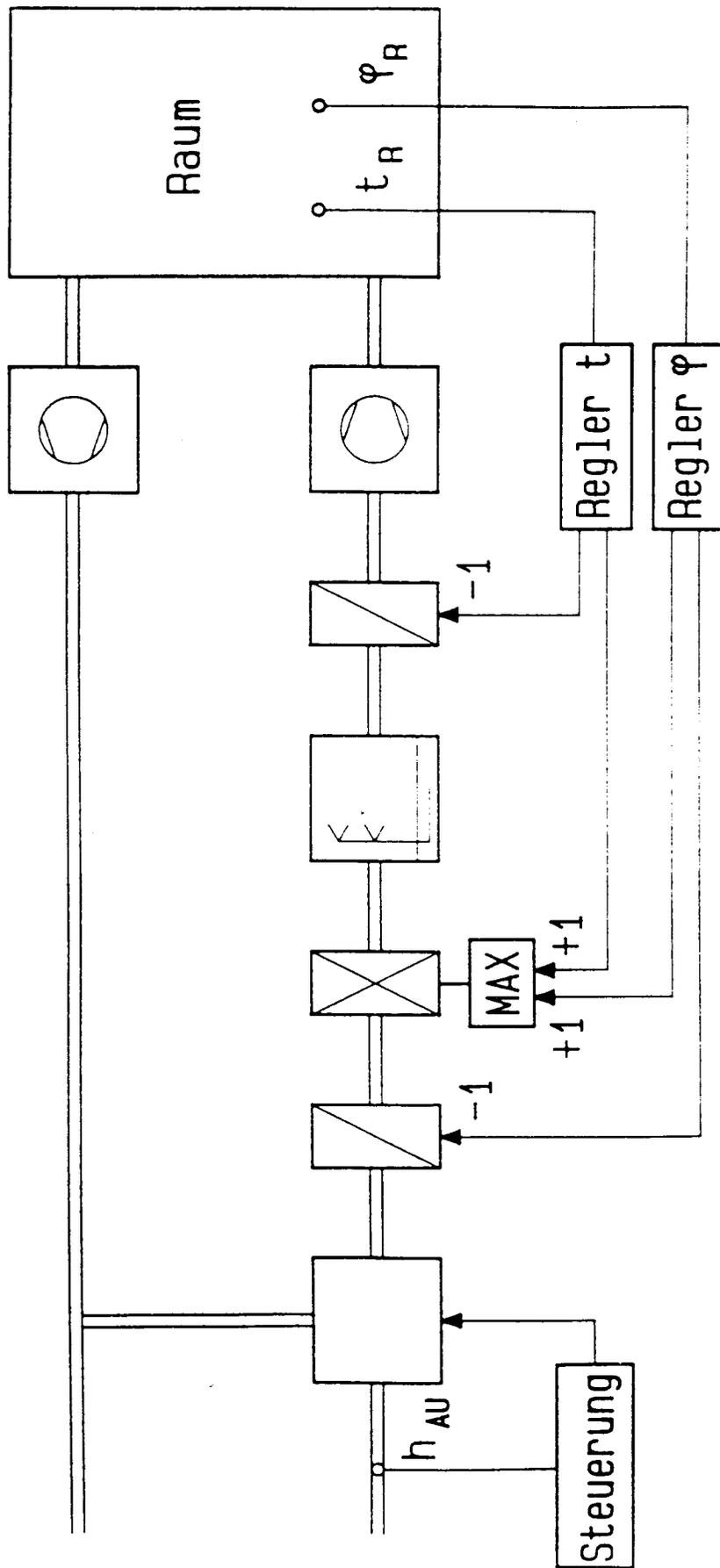


Fig. 2

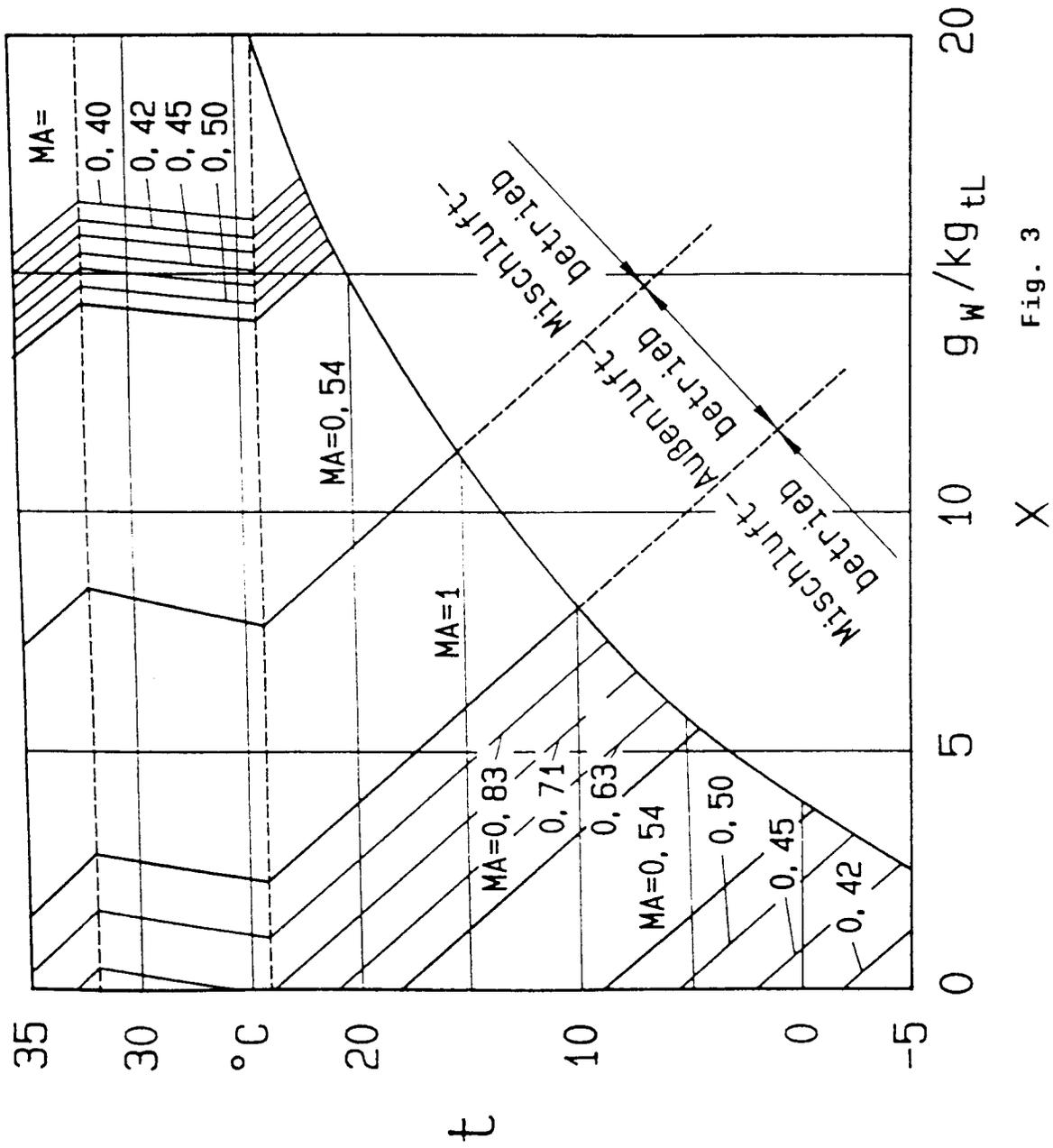


Fig. 3

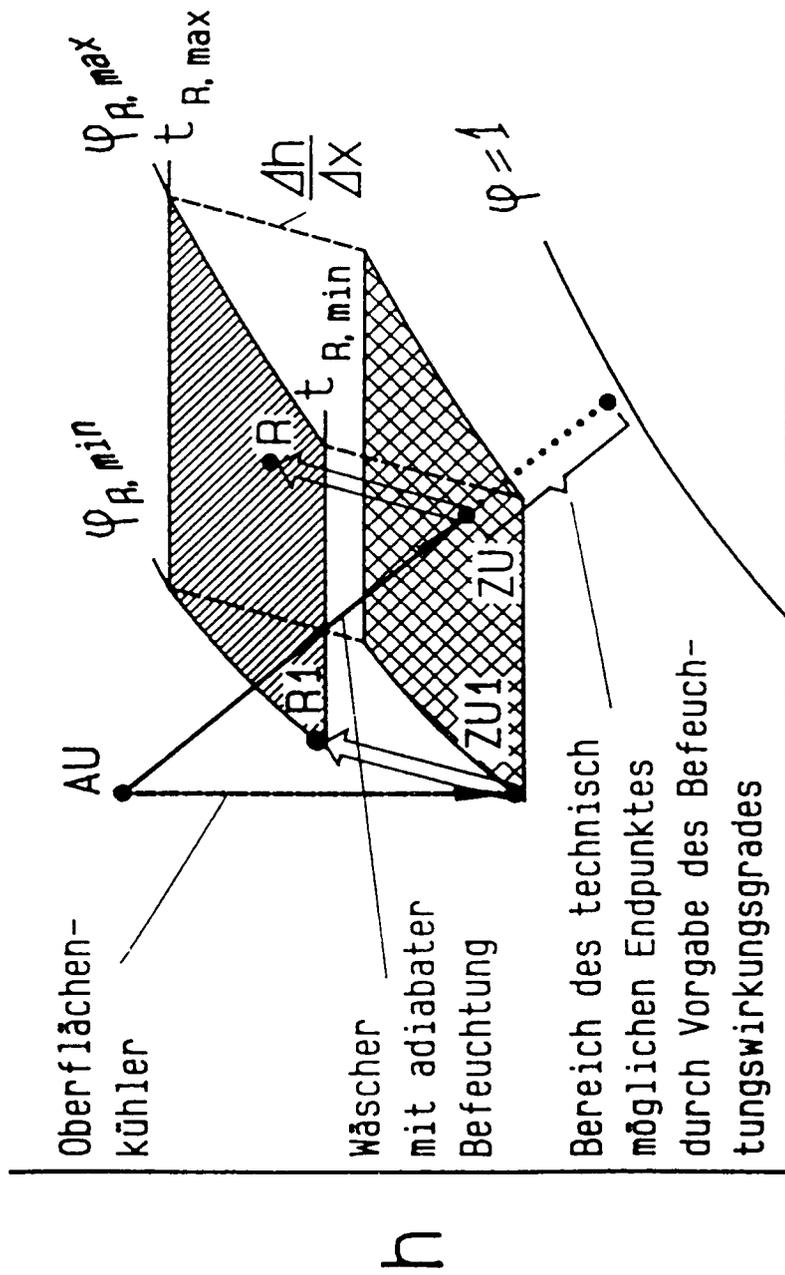


Fig. 4

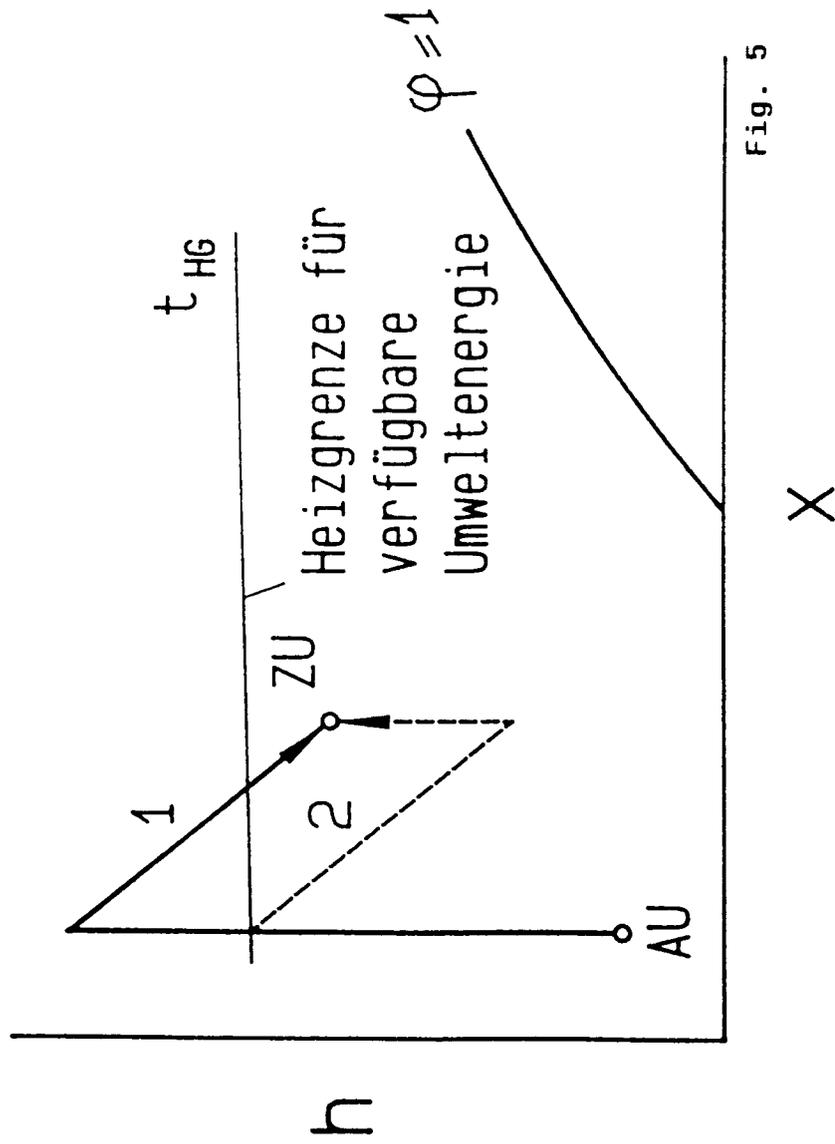


Fig. 5

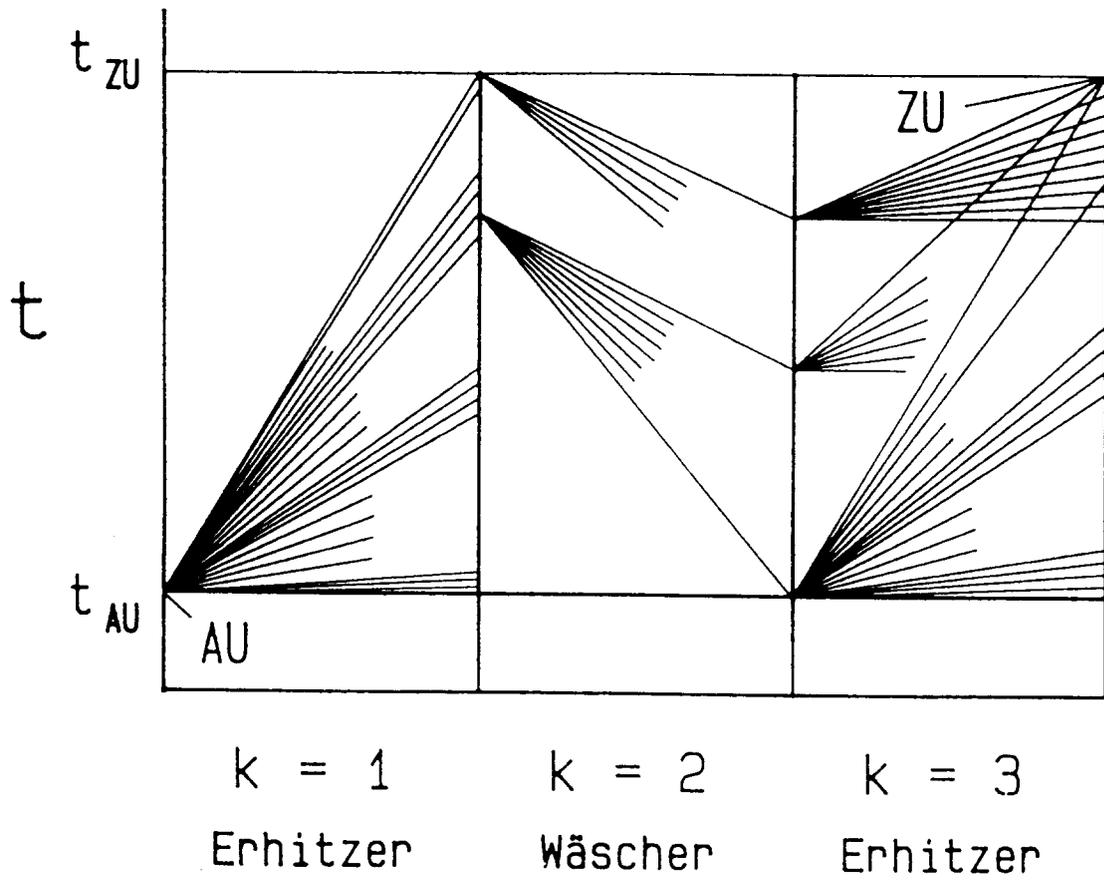
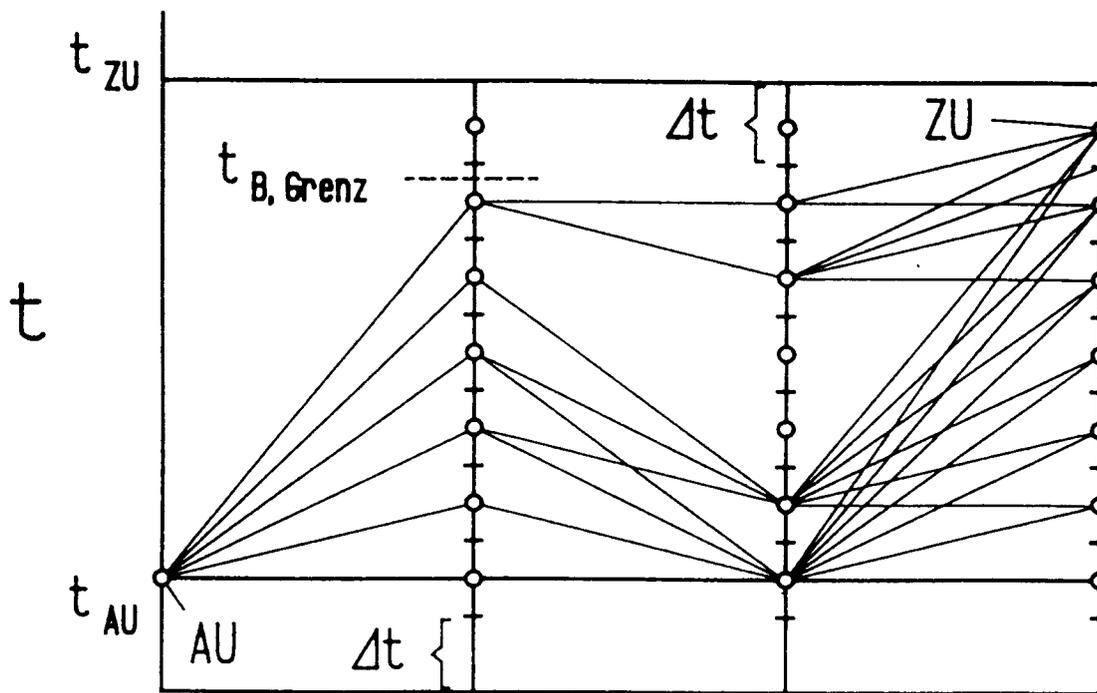


Fig. 6



$k = 1$                        $k = 2$                        $k = 3$   
 Erhitzer                      Wäscher                      Erhitzer

Fig. 7

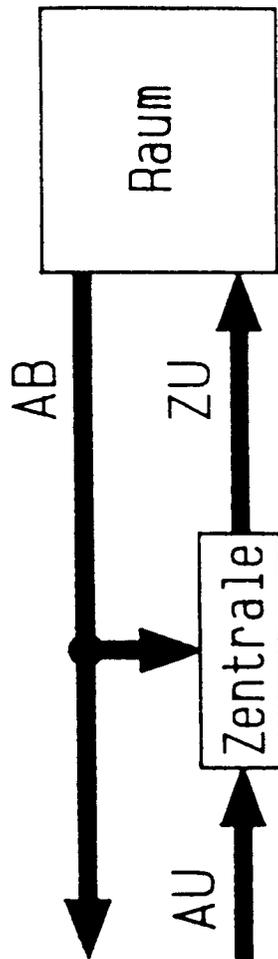


Fig. 8

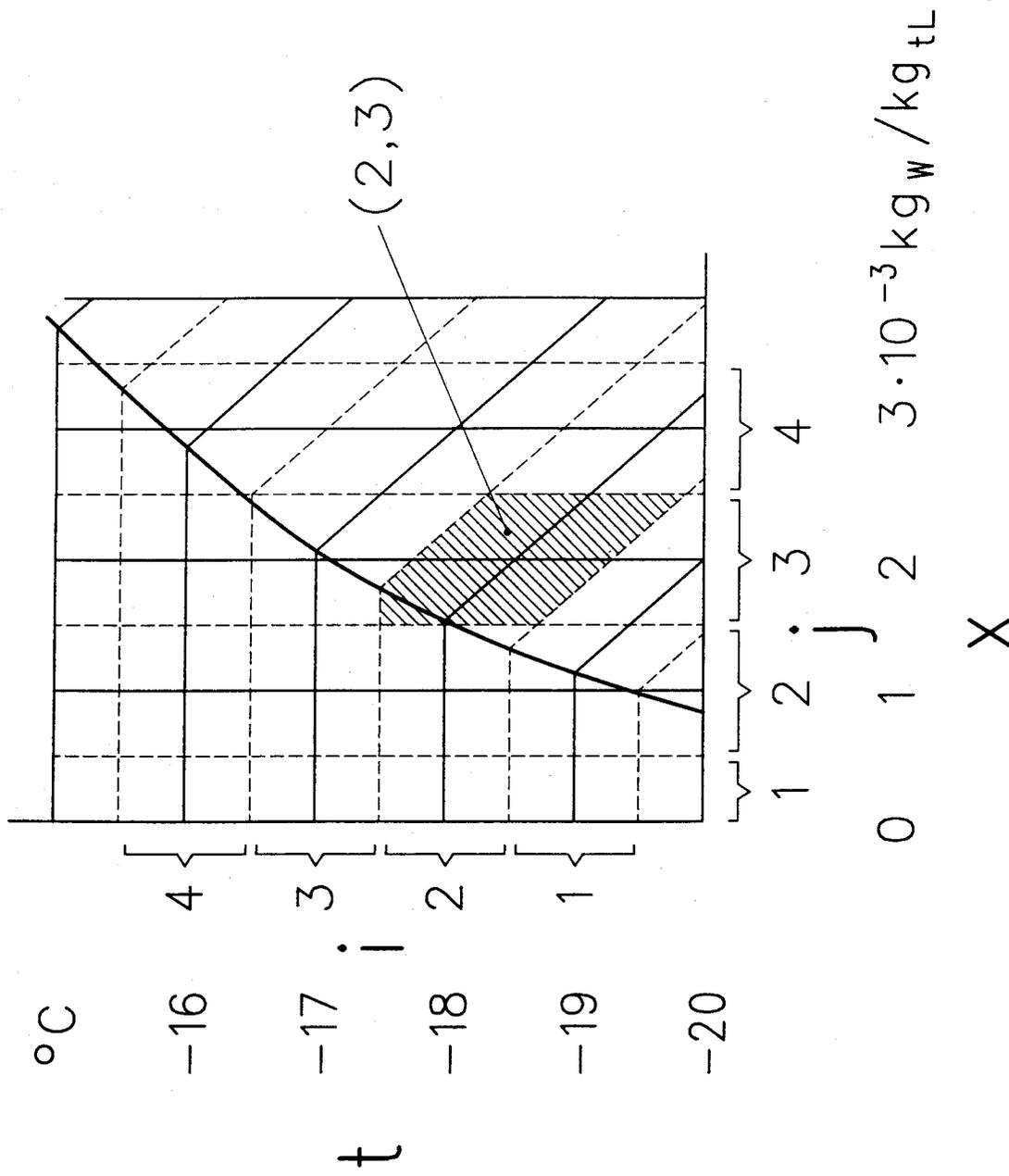


Fig. 9

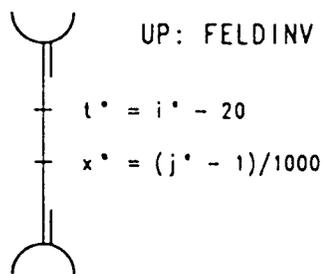
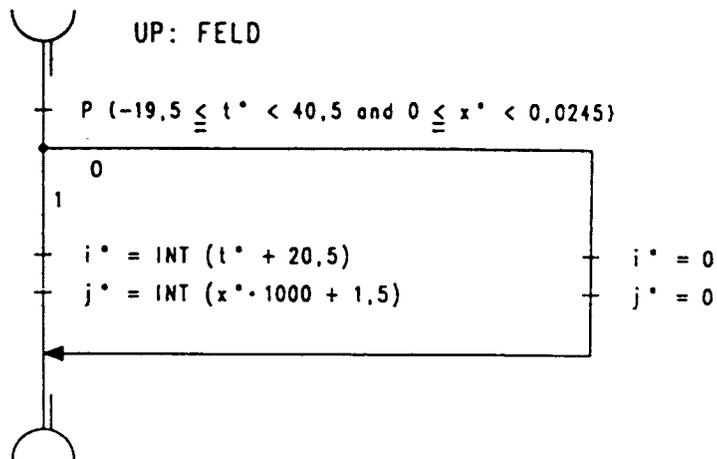


Fig. 10

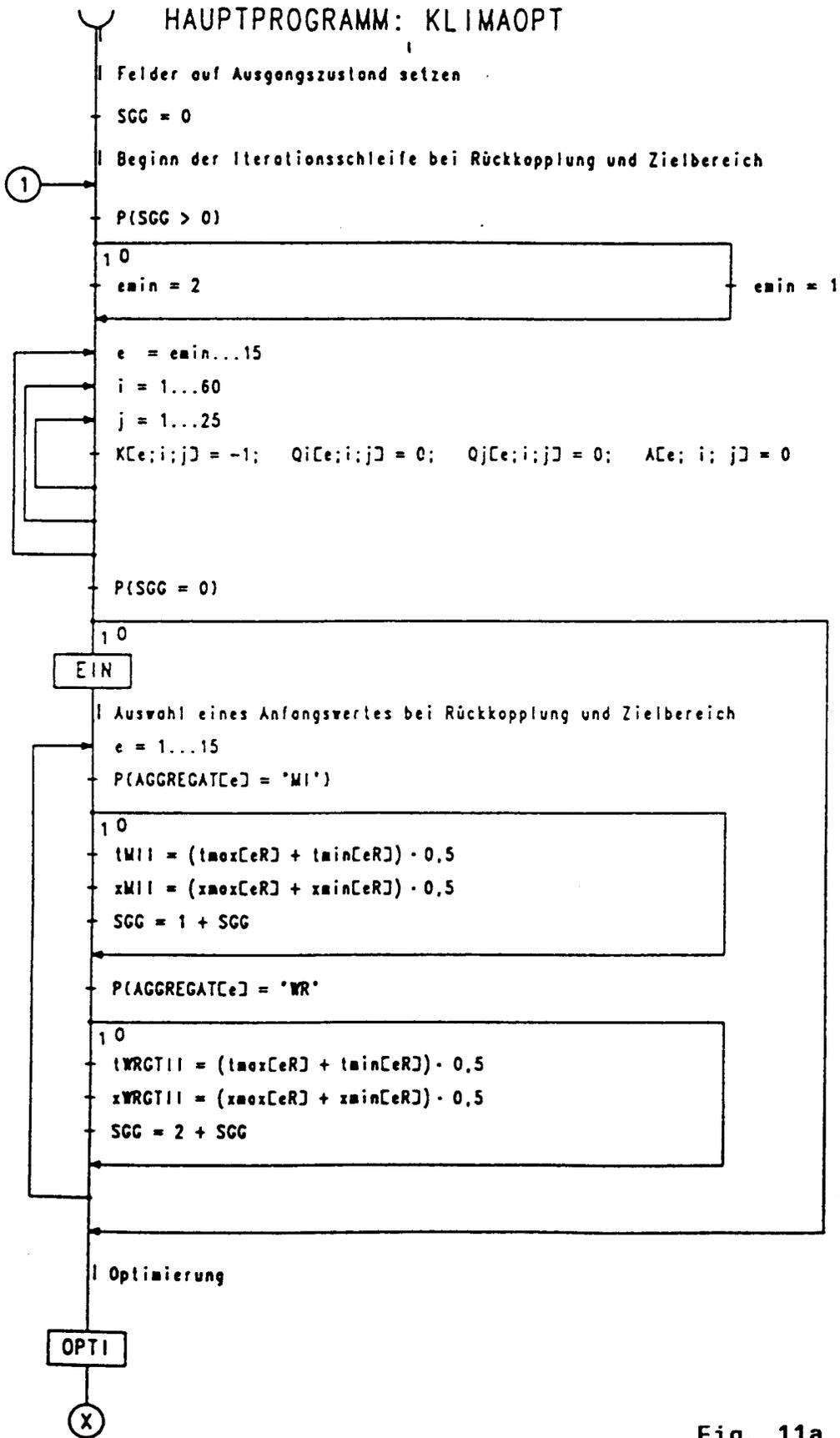


Fig. 11a

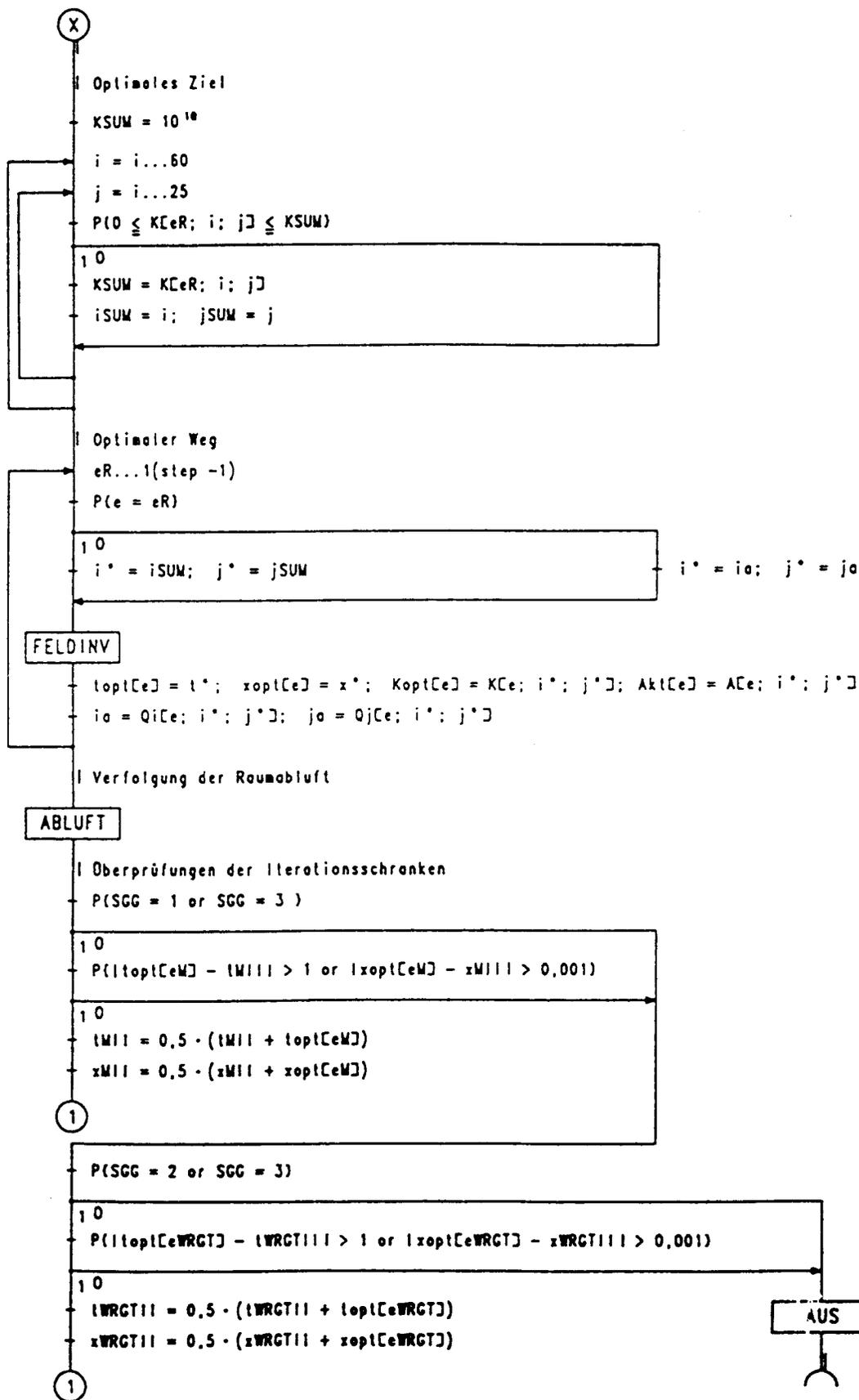


Fig. 11b

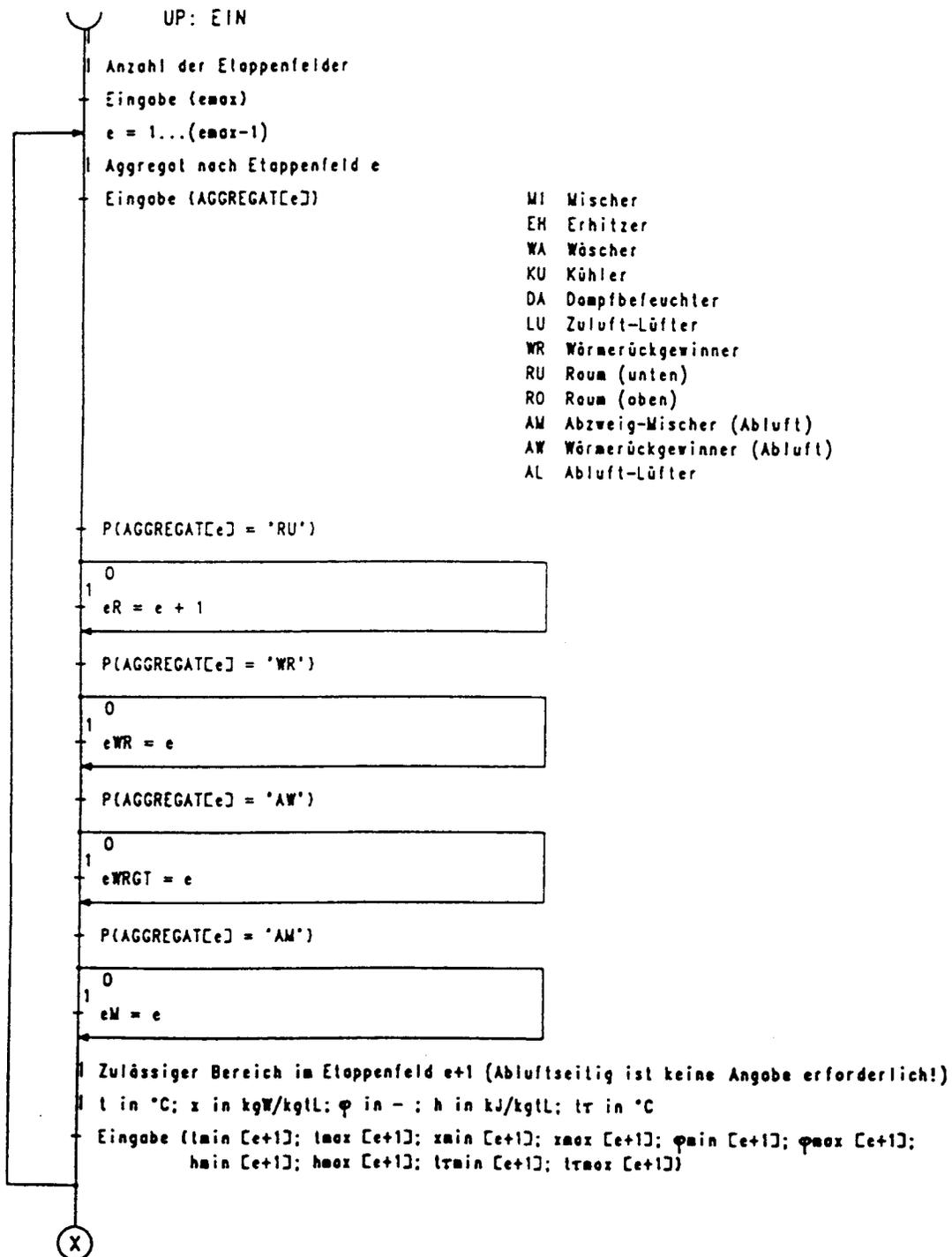


Fig. 12a

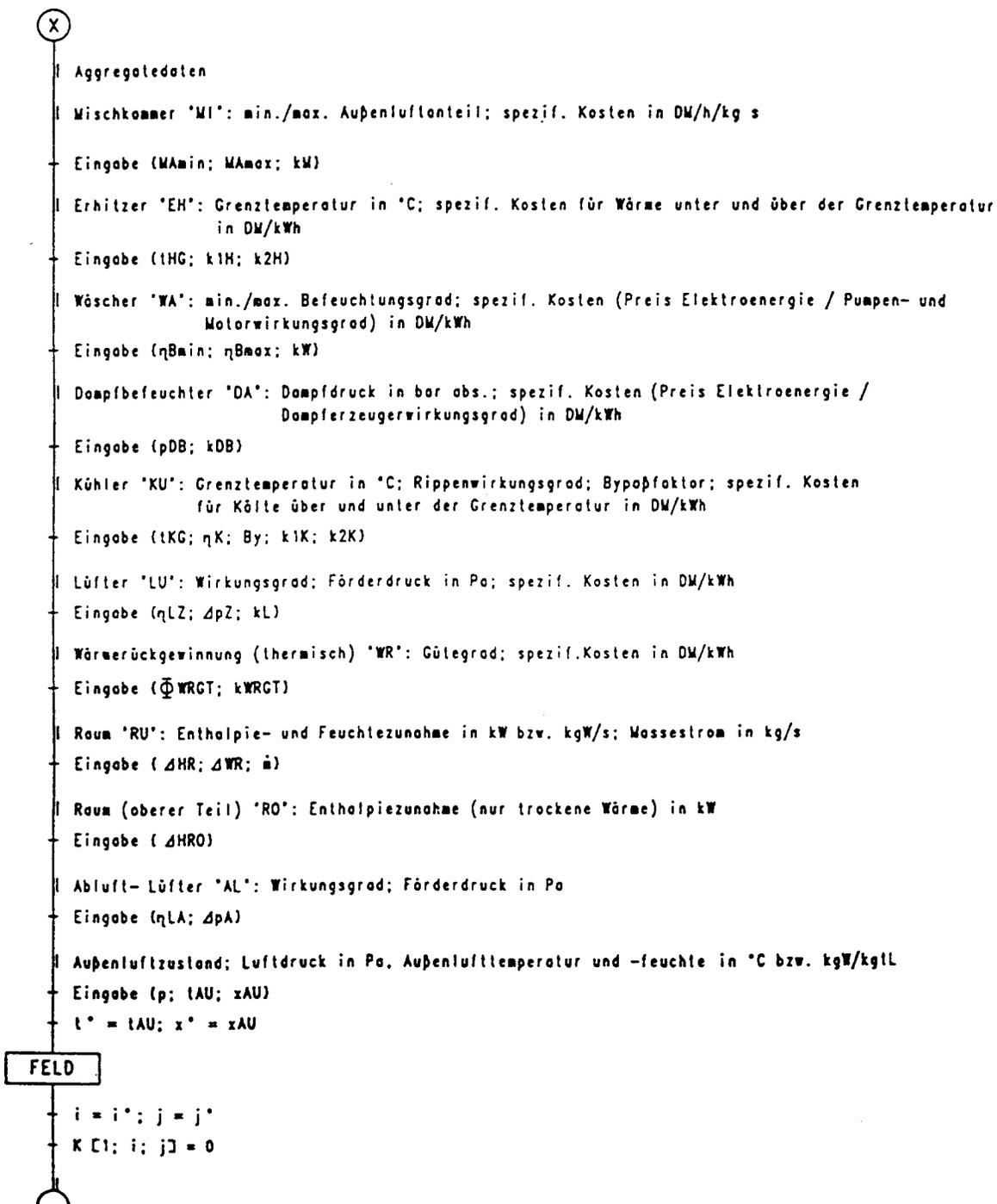


Fig. 12b

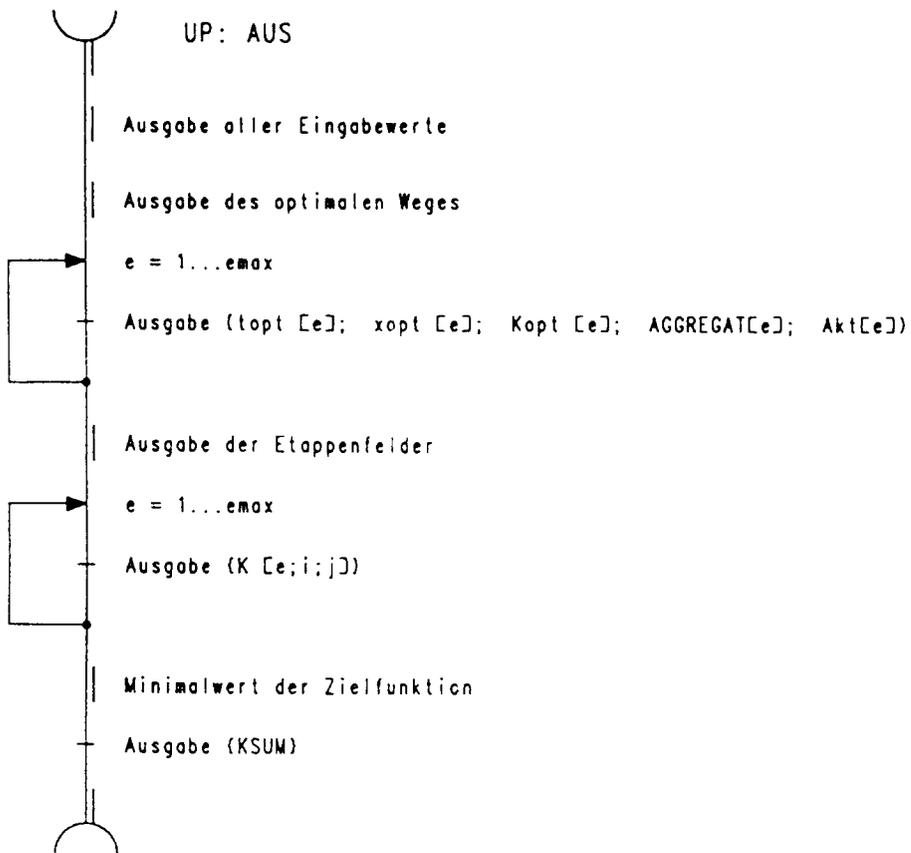


Fig. 13

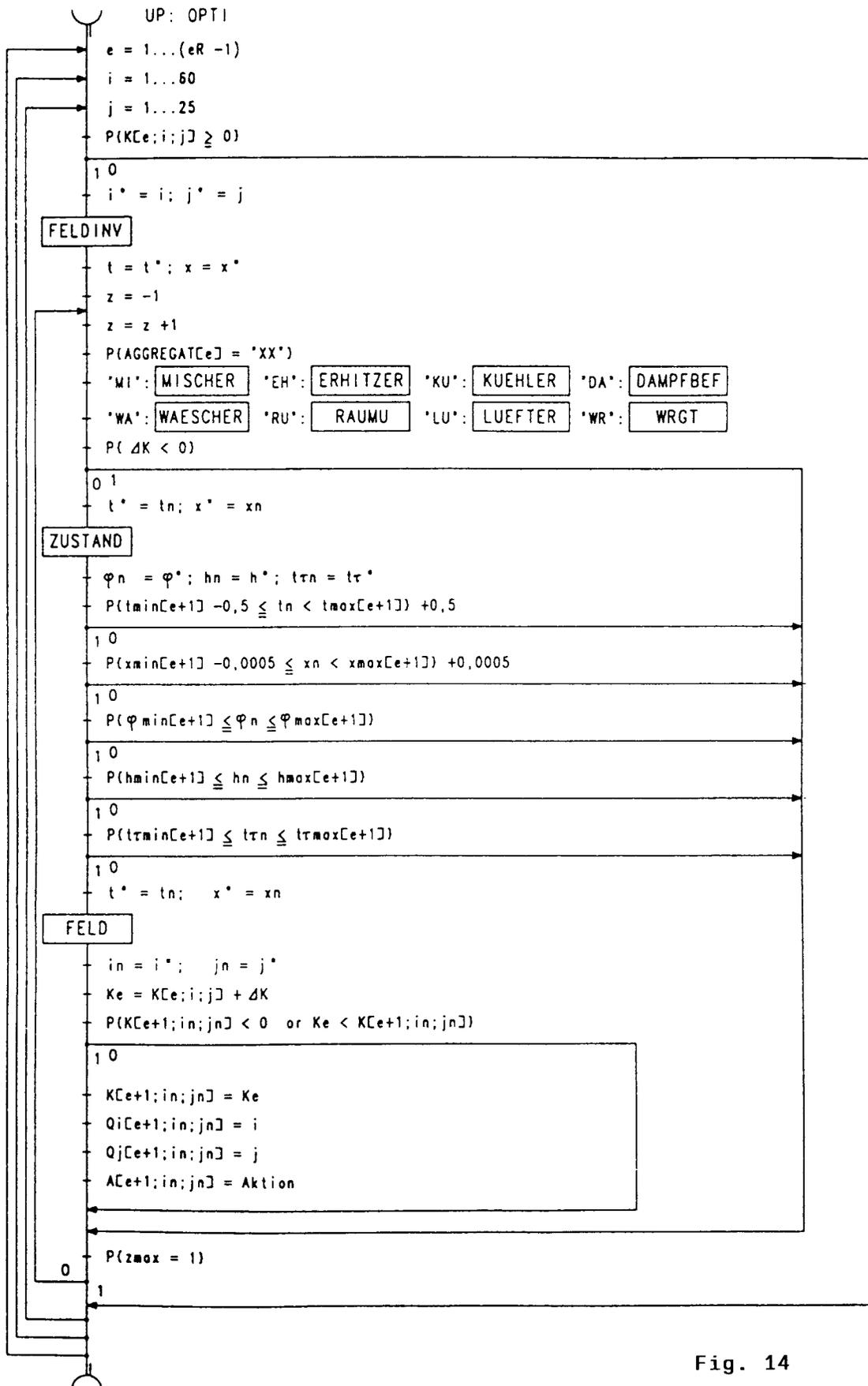


Fig. 14

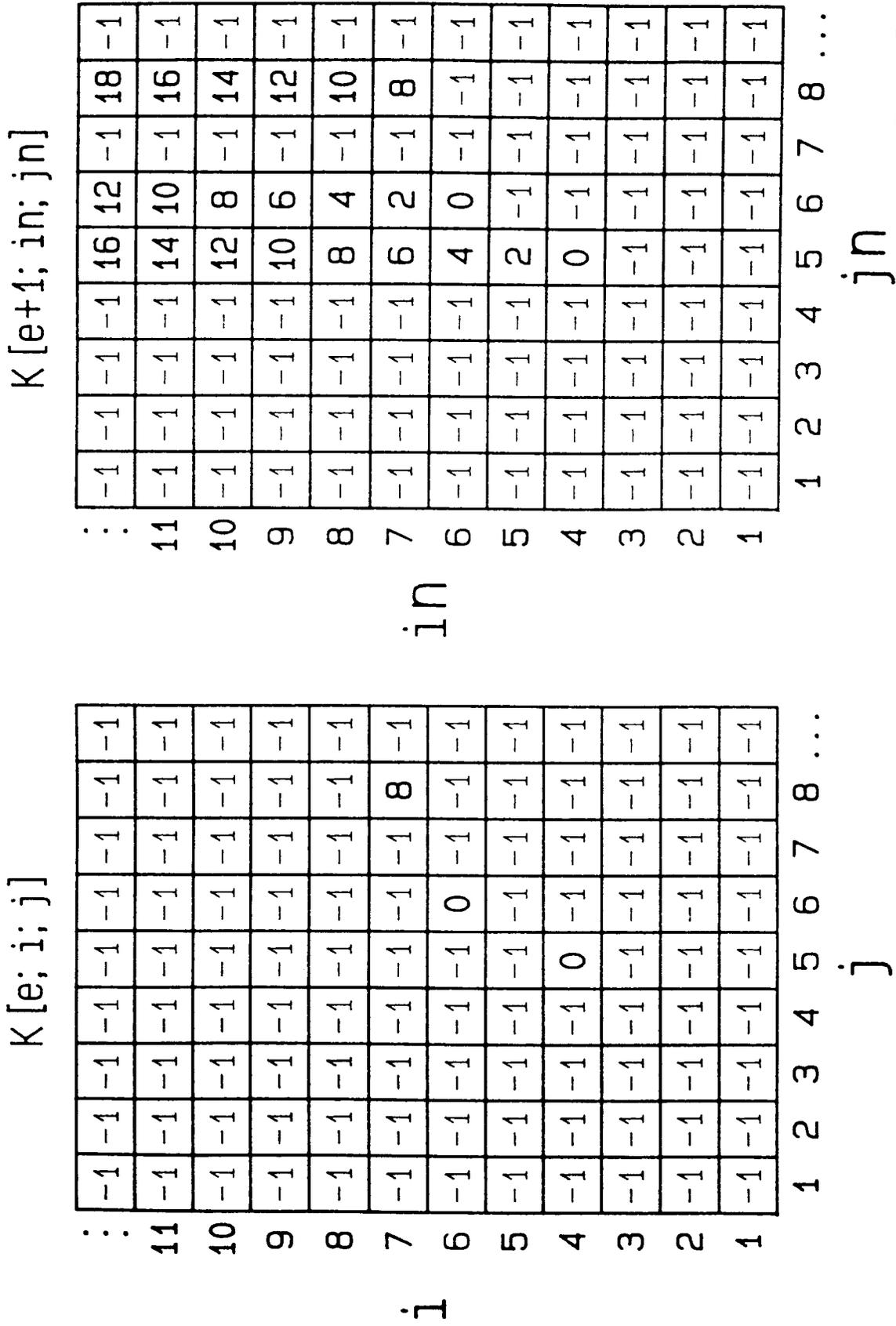


Fig. 15

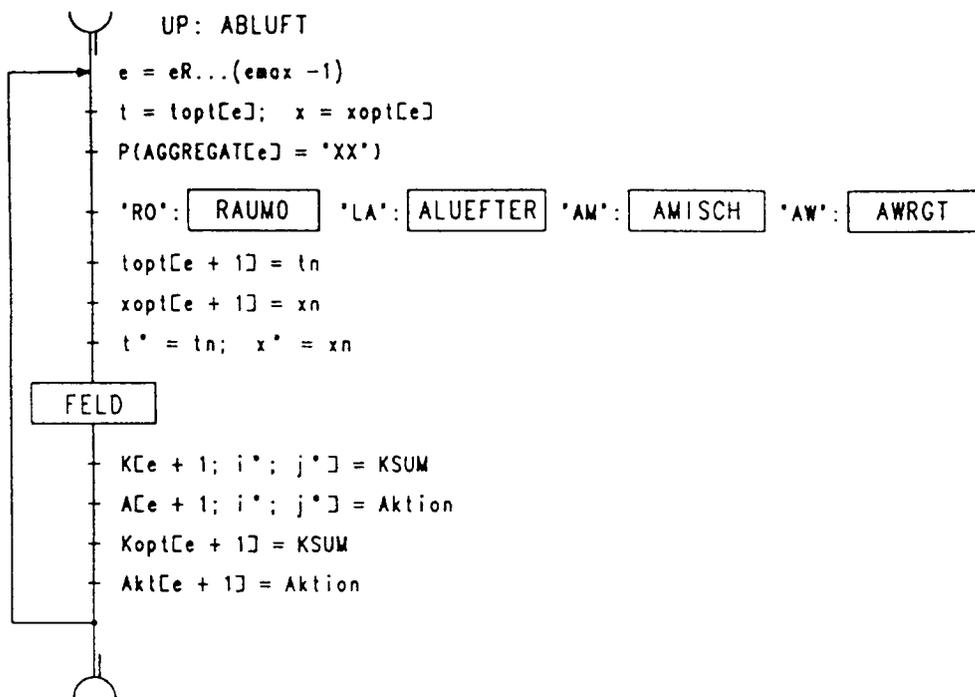


Fig. 16

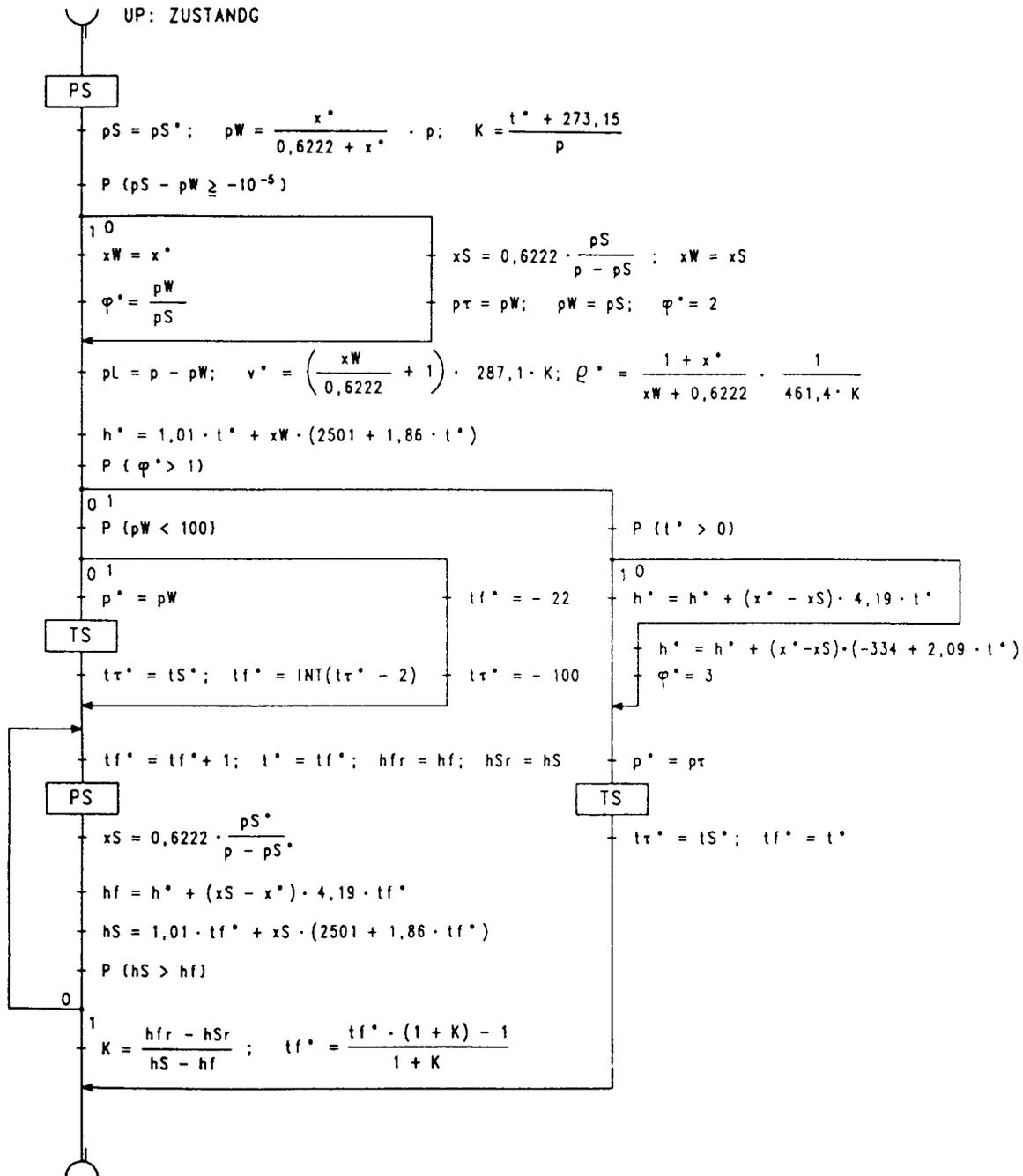


Fig. 17

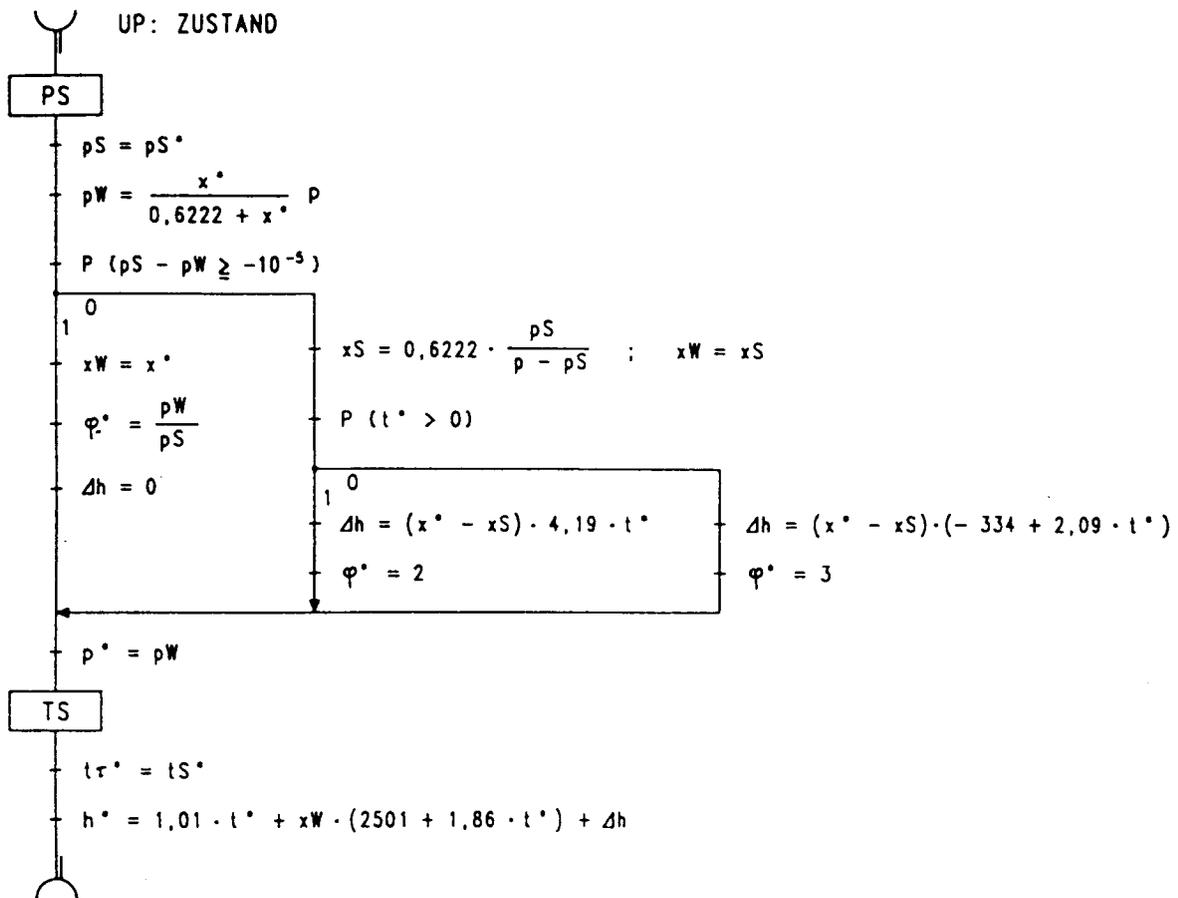


Fig. 18

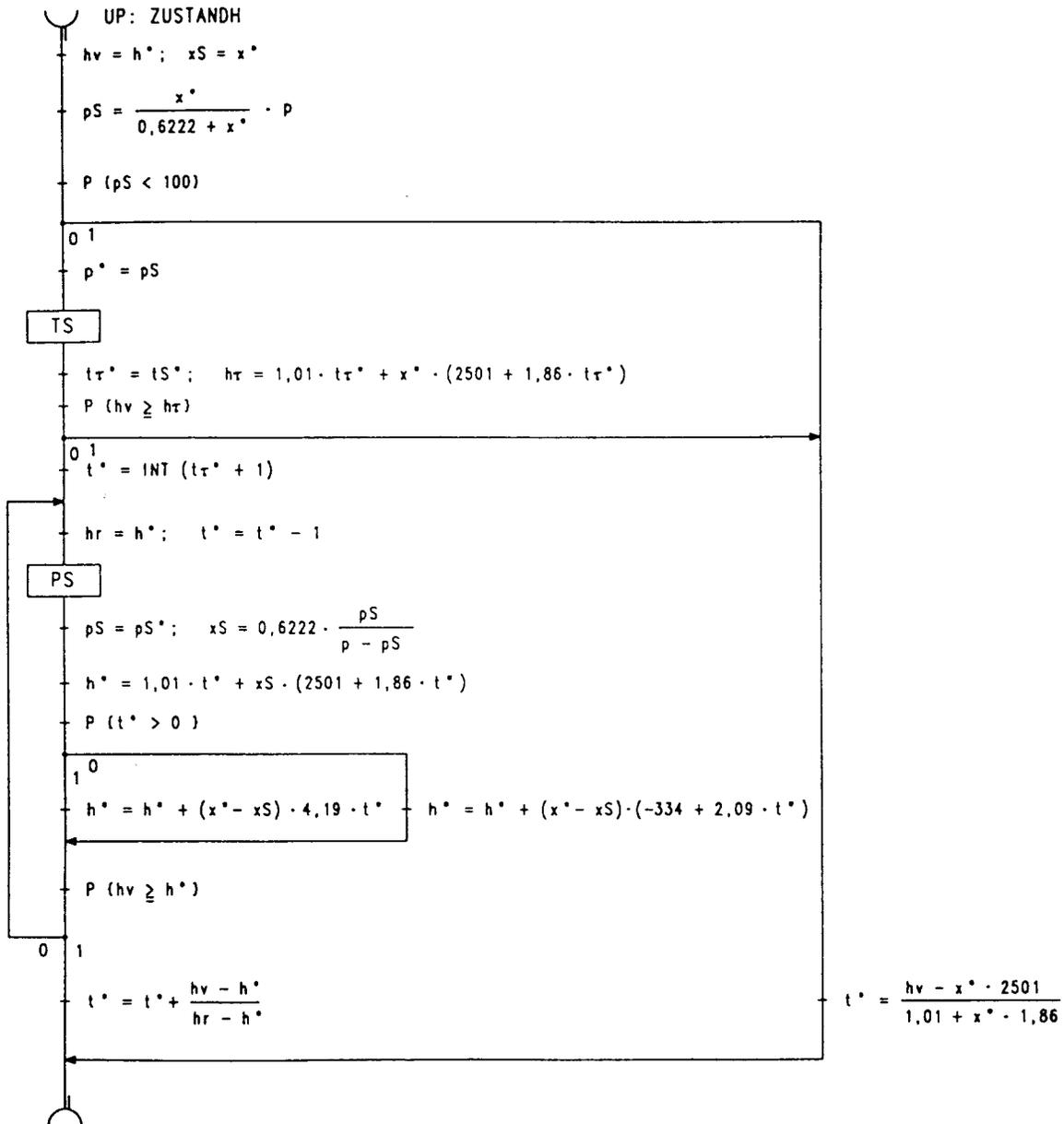


Fig. 19

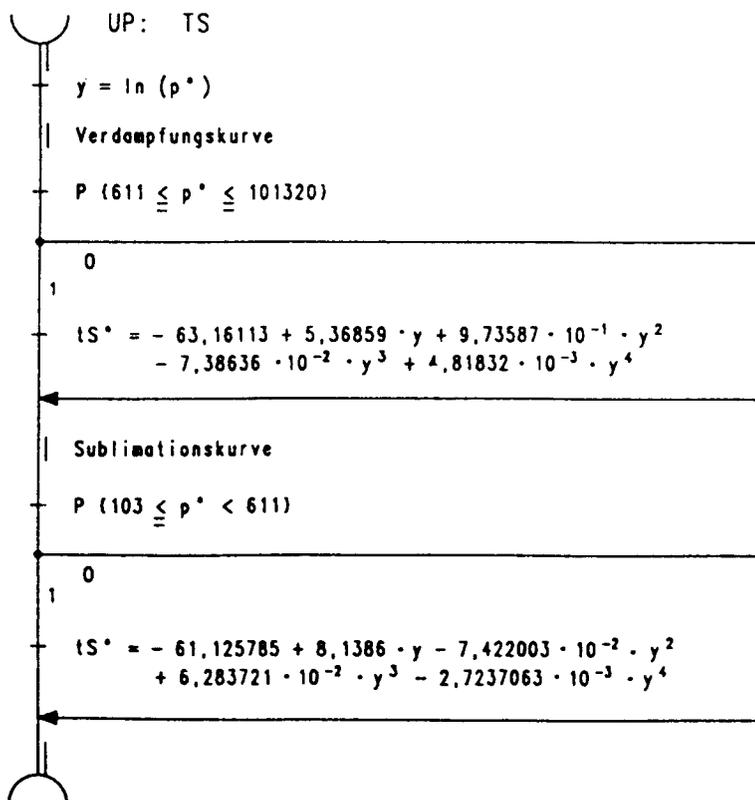
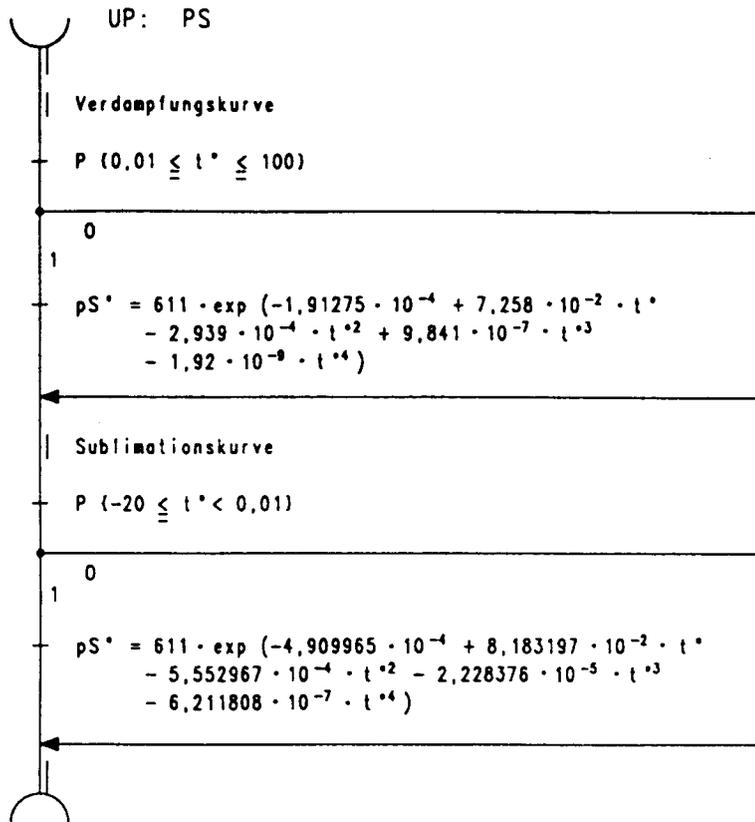


Fig. 20

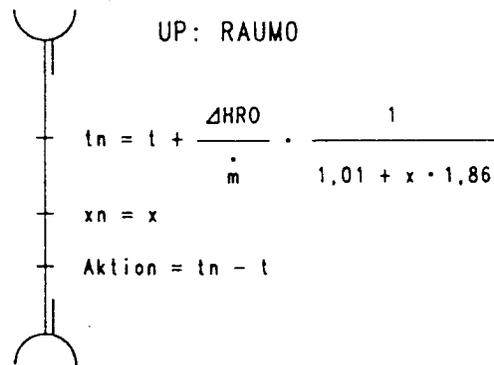
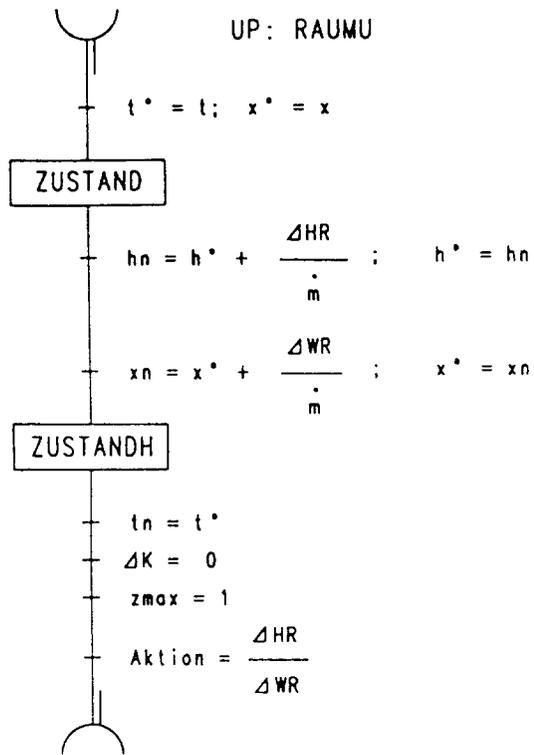


Fig. 21

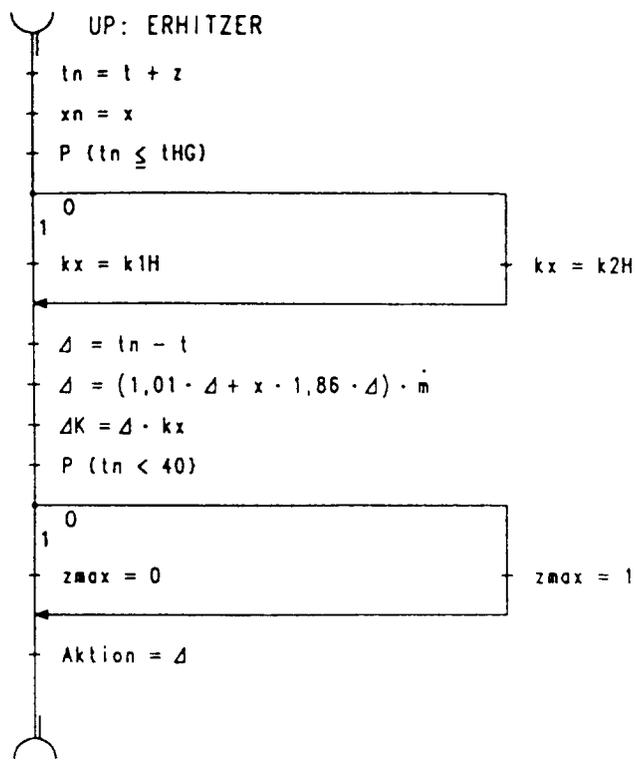


Fig. 22

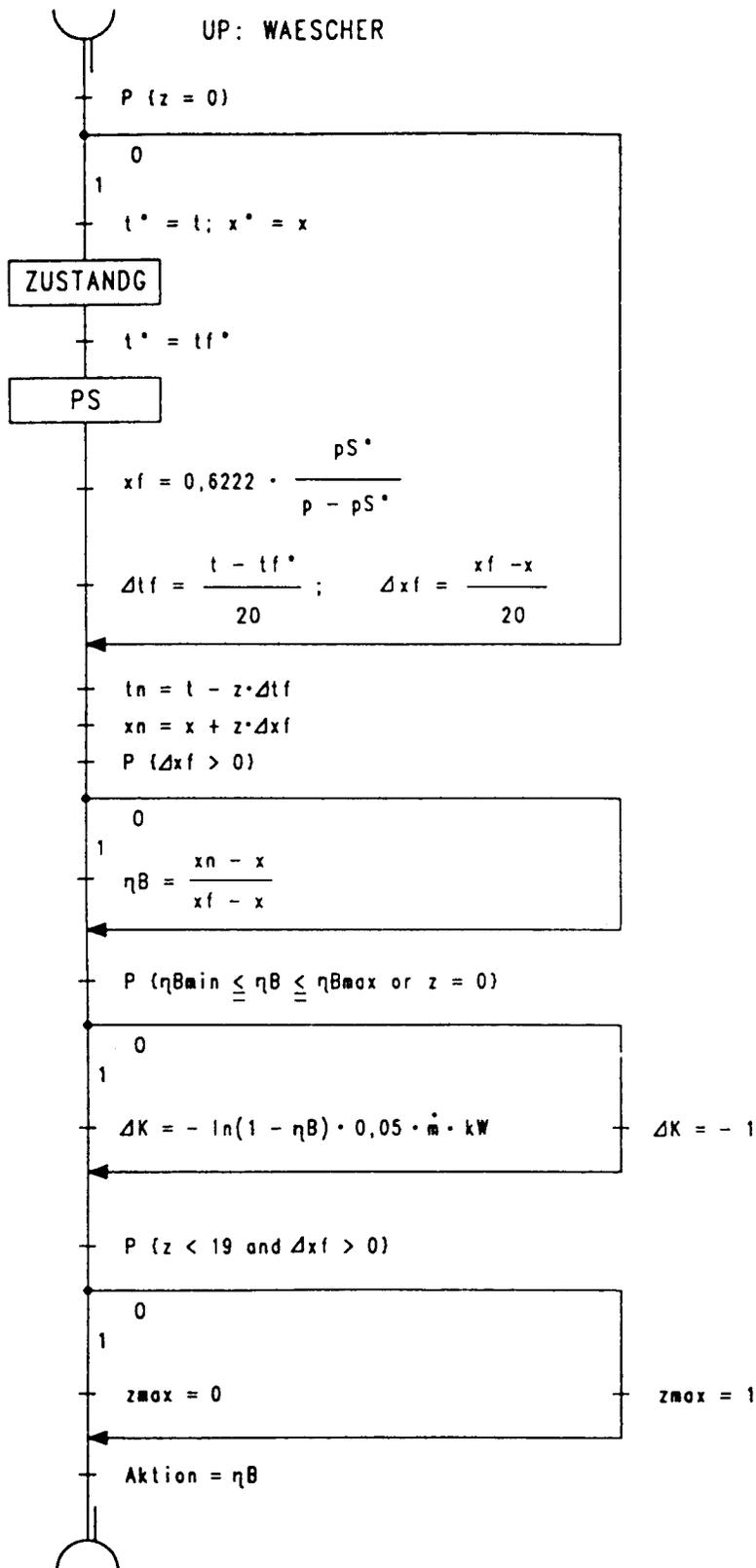


Fig. 23

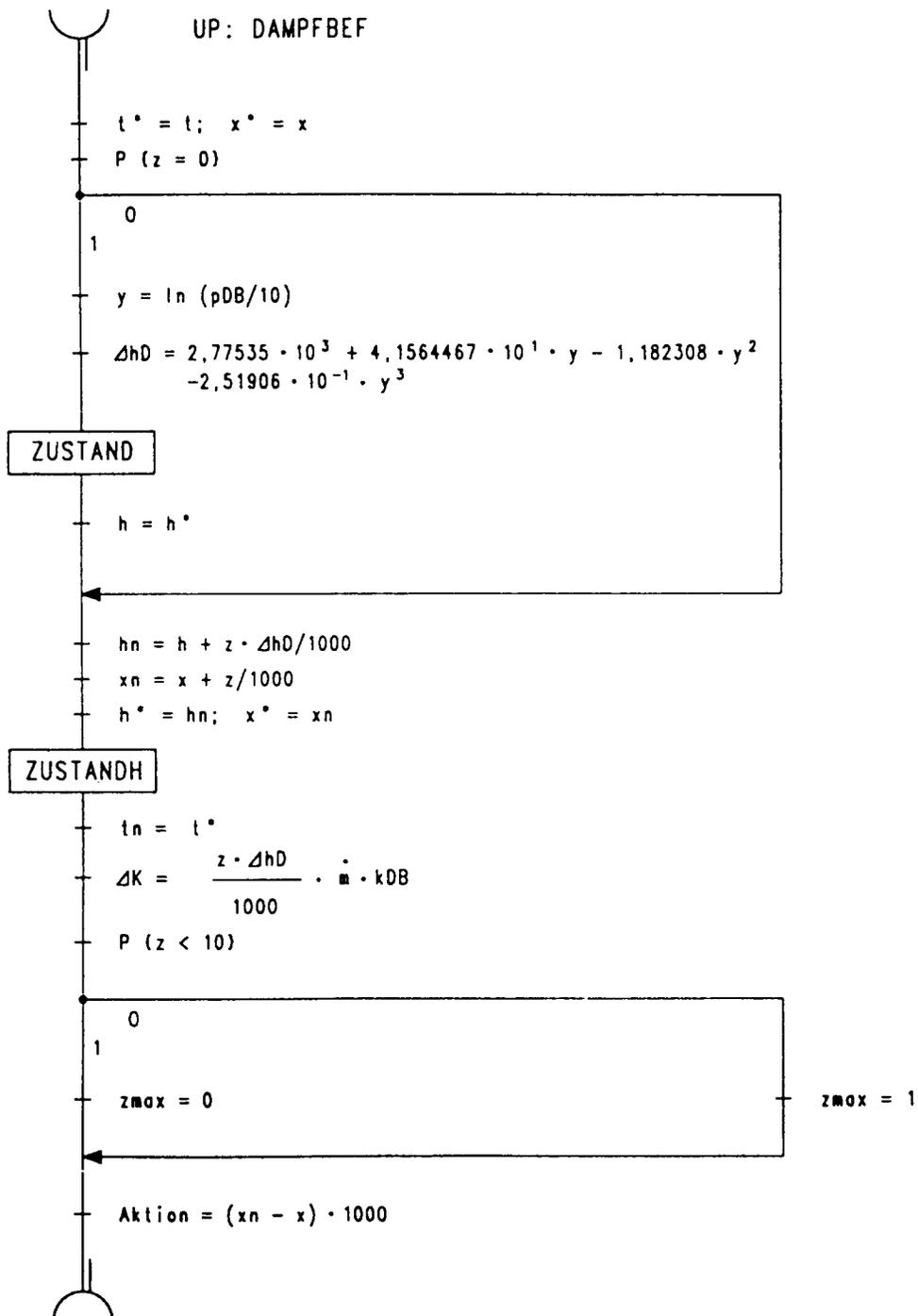


Fig. 24

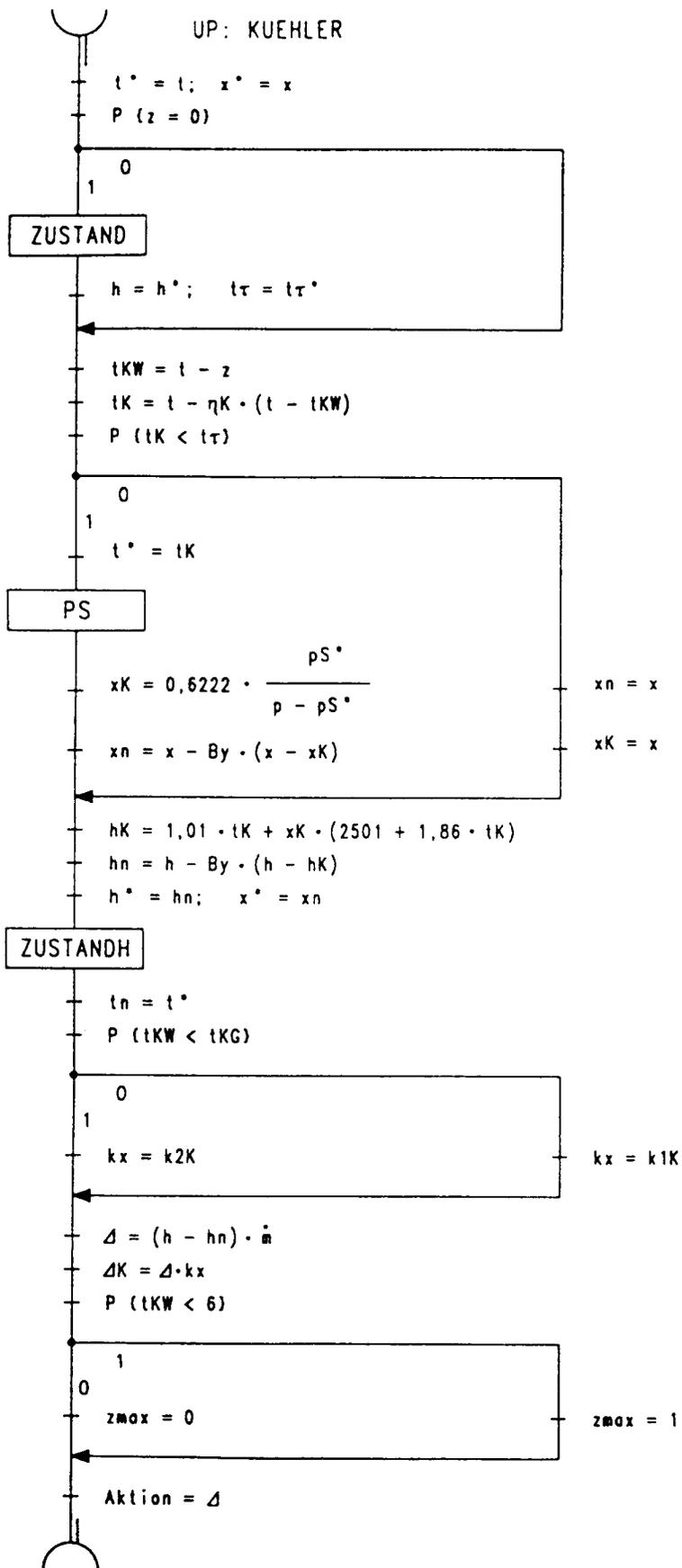


Fig. 25

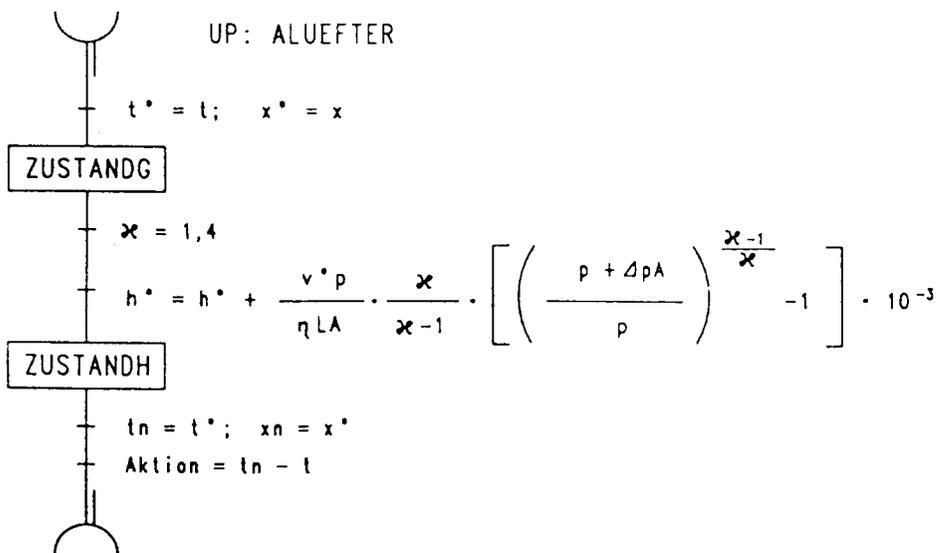
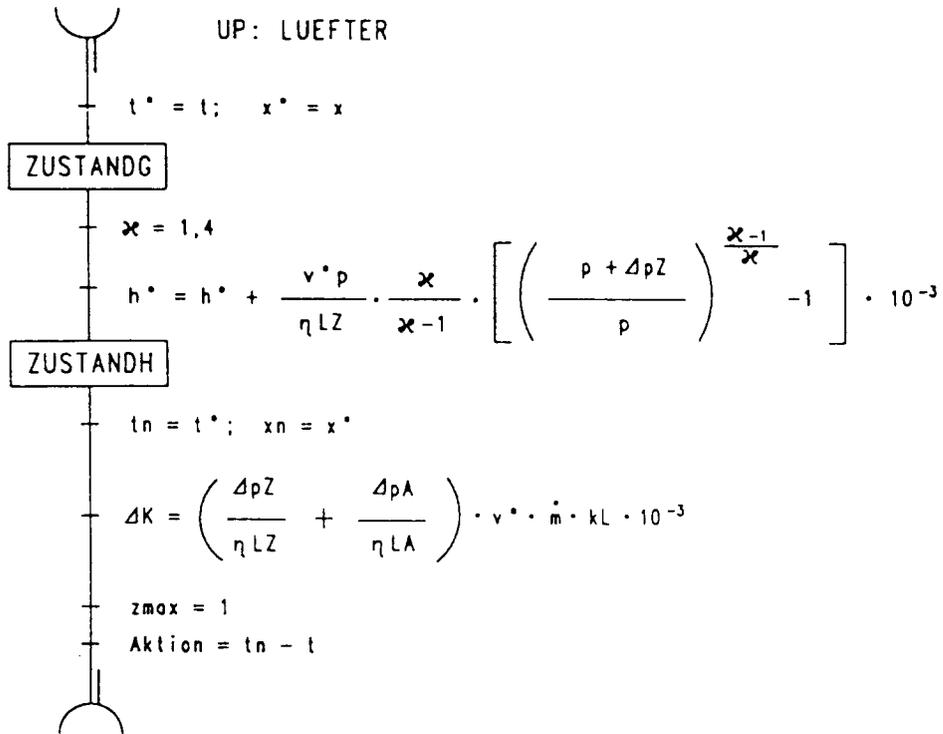


Fig. 26

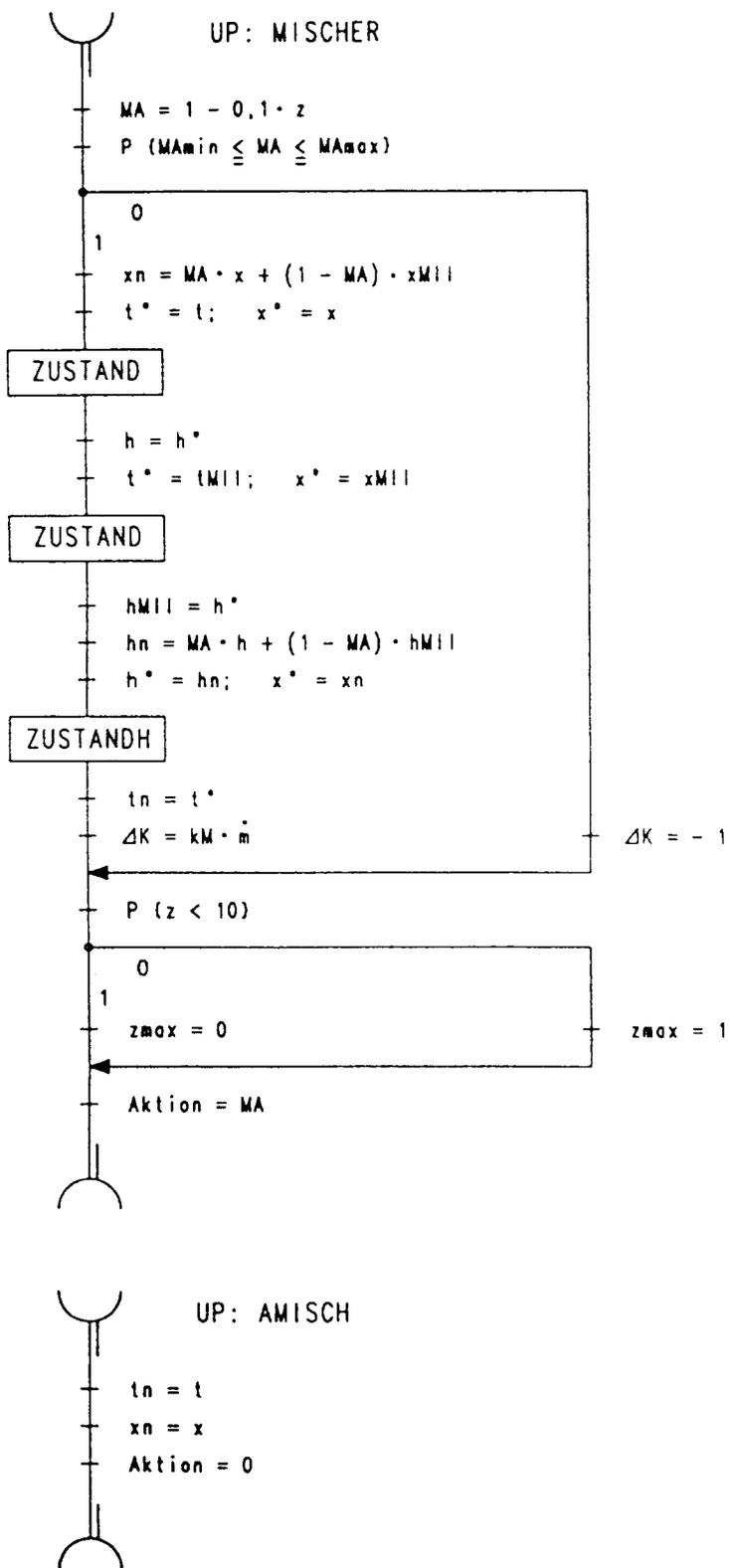


Fig. 27

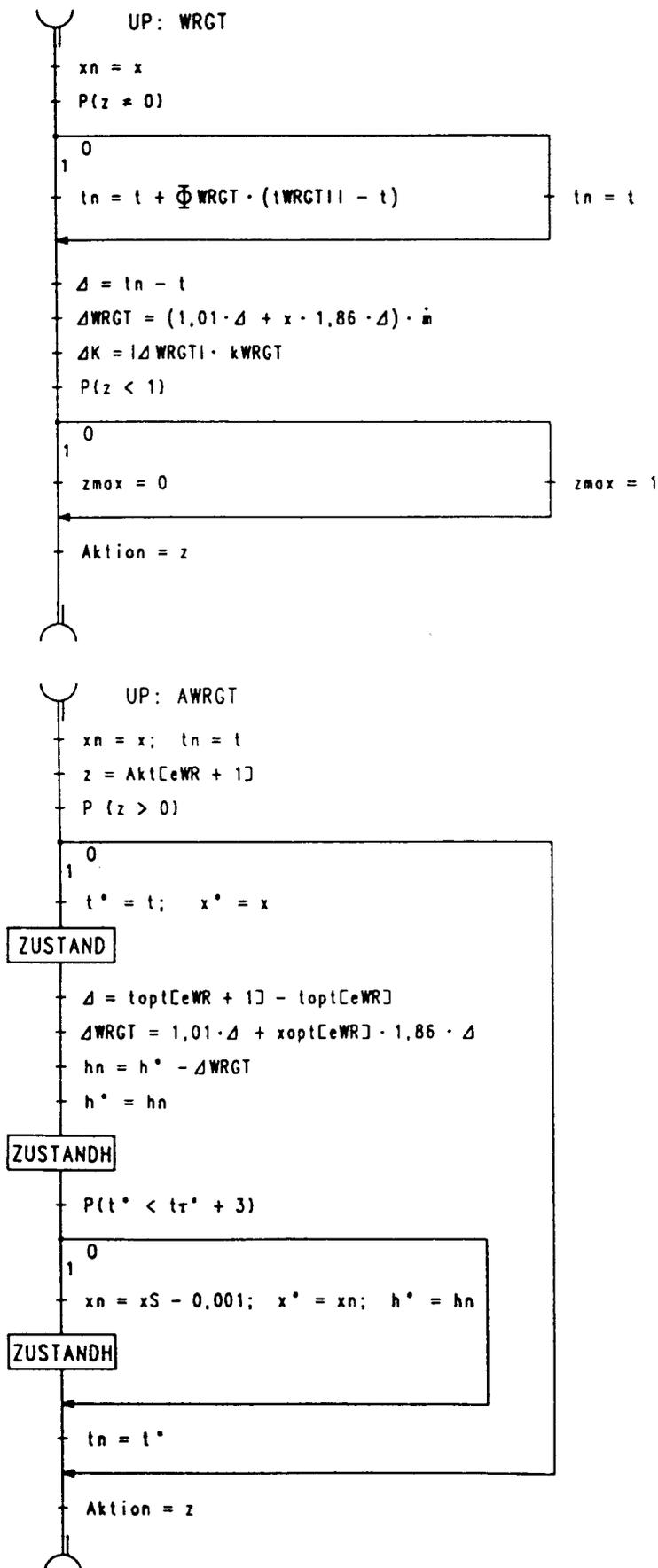
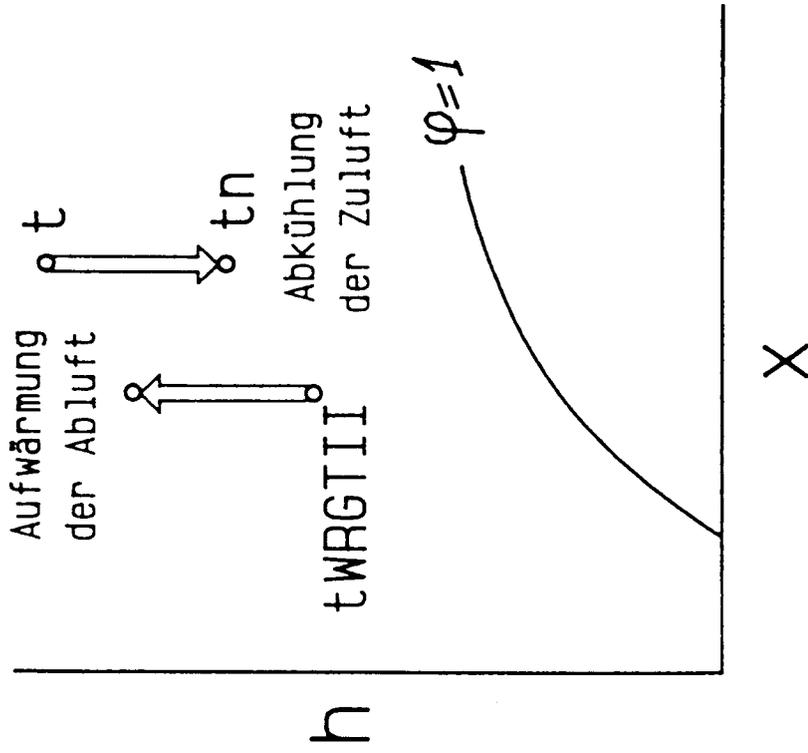


Fig. 28

Sommerfall



Winterfall

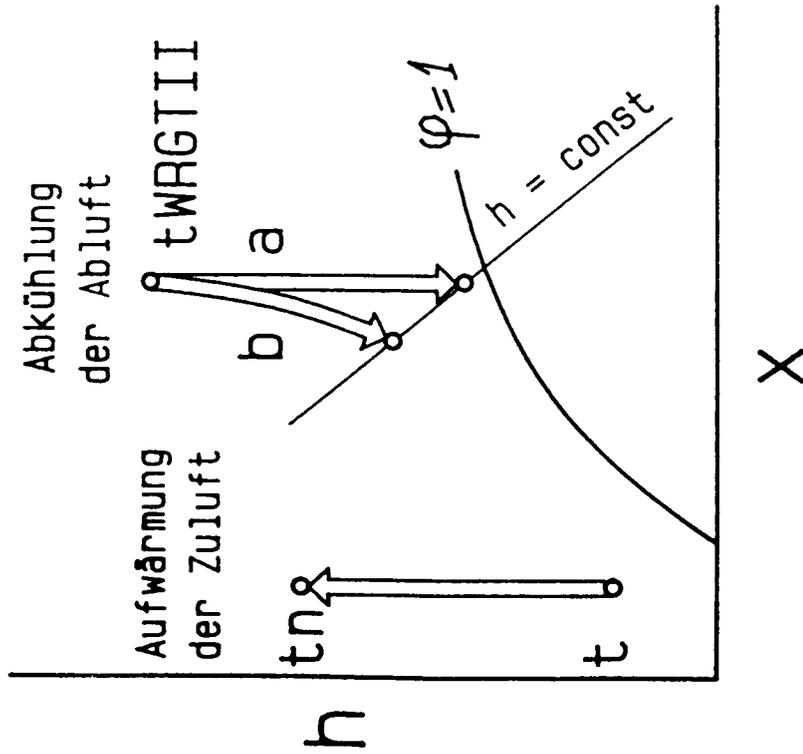


Fig. 29



ETAPPENFELD e = 2

t °C	0	1	2	x in g Wasser/ kg trockene Luft										
				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	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
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	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Fig 30a

ETAPPENFELD e = 3

t °C	0	1	2	x in g Wasser/ kg trockene Luft											
	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	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Fig 30b

ETAPPENFELD e = 4

t °C	0	1	2	x in g Wasser/ kg trockene Luft										
				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	...	...	...	...	...	...	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	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Fig. 30c

**OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:**

e	Aggregat	topt °C	xopt g <sub>w</sub> /kg <sub>tL</sub>	Kopt DM/h	Aktion
1	ERHITZER	-14.0	1.0	0.00	347.3 kW (Leistung)
2	WÄSCHER	25.0	1.0	17.36	0.6 (Befeuchtungsgrad)
3	ERHITZER	16.0	5.0	17.50	35.9 kW (Leistung)
4		20.0	5.0	19.30	

**Minimalwert der Zielfunktion:**

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

Fig. 31

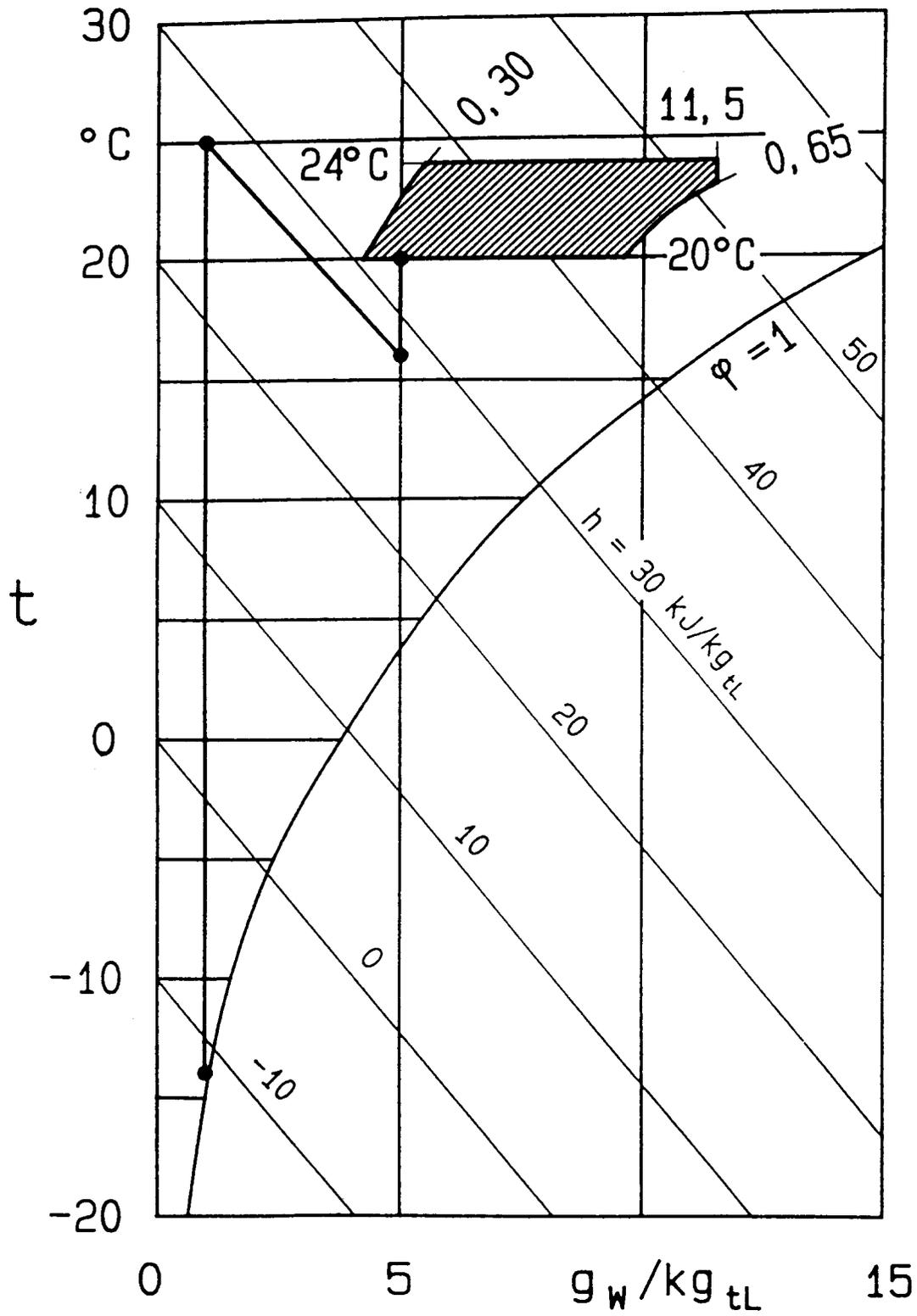


Fig. 32

**OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:**

e	Aggregat	$t_{opt}$ °C	$x_{opt}$ g <sub>w</sub> /kg <sub>tl</sub>	$K_{opt}$ DM/h	Aktion
1	WÄRMERÜCKGEWINNER	-12.0	1.0	0.00	1.0 (Betriebszustand)
2	ERHITZER	8.0	1.0	0.00	106.9 kW (Leistung)
3	KÜHLER	20.0	1.0	5.34	0.0 kW (Leistung)
4	WÄSCHER	20.0	1.0	5.34	0.5 (Befeuchtungsgrad)
5	ERHITZER	14.0	4.0	5.45	17.9 kW (Leistung)
6	ZULÜFTER	16.0	4.0	6.34	0.8 K (Temp.-Erhöhung)
7	RAUM (unten)	17.0	4.0	9.47	6909.1 kJ/kg <sub>w</sub> (dh/dx)
8	Raum (oben)	20.0	5.0	9.47	1.0 K (Temp.-Erhöhung)
9	ABLÜFTER	21.0	5.0	9.47	0.6 K (Temp.-Erhöhung)
10	ABLUF-WÄRMERÜCKGEWINNER	21.6	5.0	9.47	1.0 (Betriebszustand)
11		5.8	3.4	9.47	

**Minimalwert der Zielfunktion:**

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

Fig. 33a

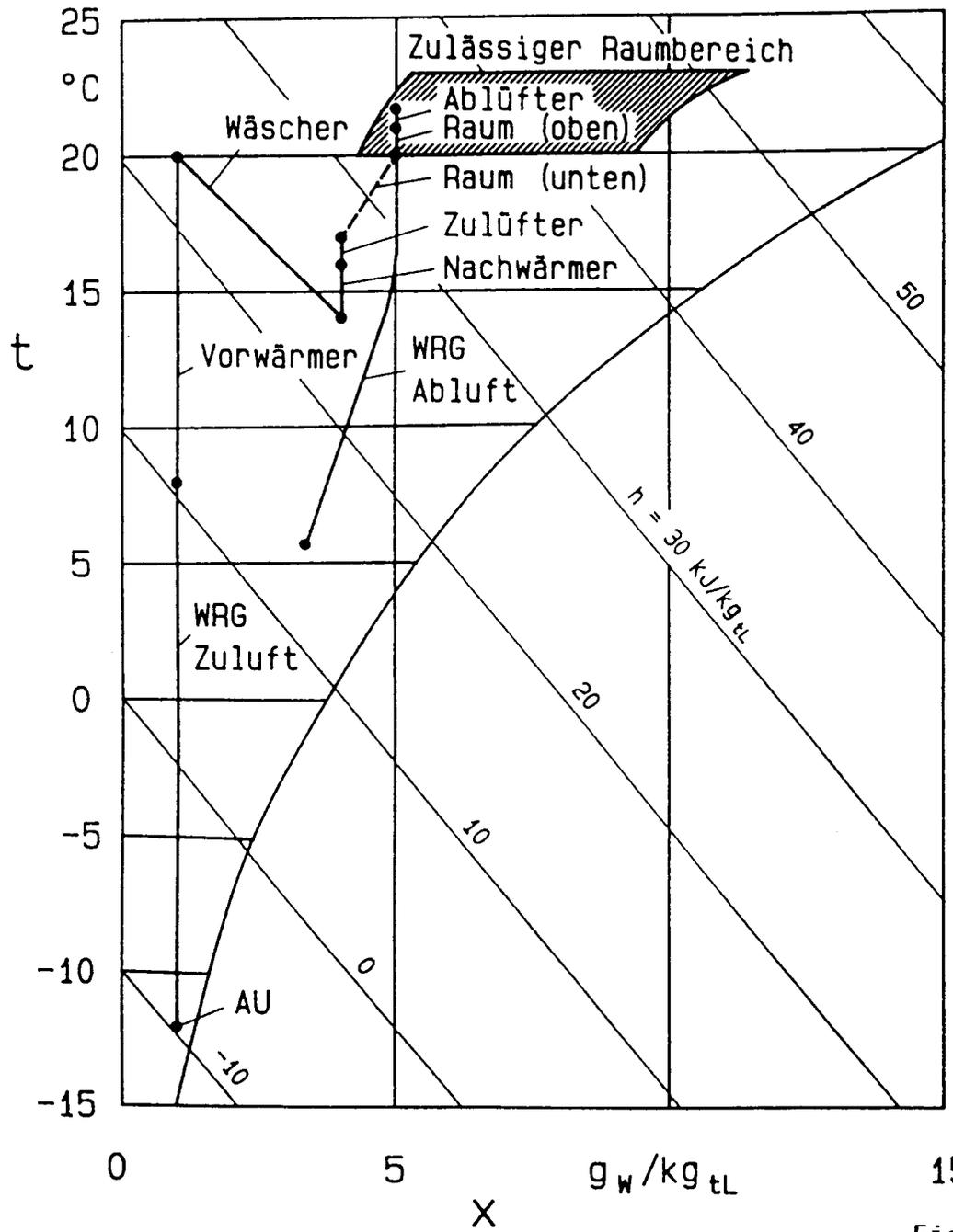


Fig. 33b

**OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:**

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

**Minimalwert der Zielfunktion:**

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

Fig. 34a

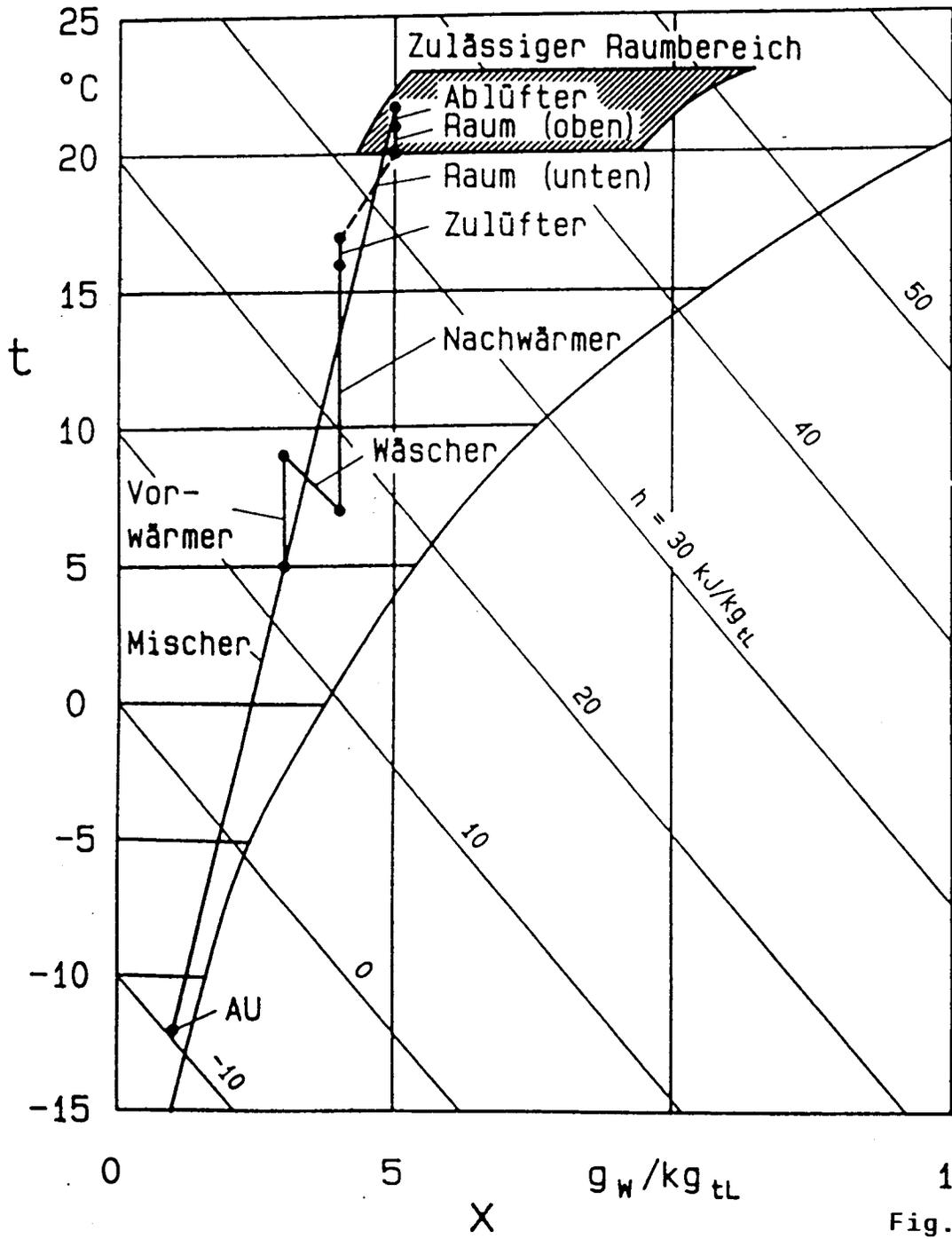


Fig. 34b

**OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:**

e	Aggregat	$t_{opt}$ °C	$x_{opt}$ g <sub>w</sub> /kg <sub>tl</sub>	$K_{opt}$ DM/h	Aktion
1	WÄRMERÜCKGEWINNER	-12.0	1.0	0.00	1.0 (Betriebszustand)
2	MISCHER	8.0	1.0	0.00	0.5 (Außenluftanteil)
3	ERHITZER	15.0	3.0	0.00	8.9 kW (Leistung)
4	KÜHLER	16.0	3.0	0.45	0.0 kW (Leistung)
5	WÄSCHER	16.0	3.0	0.45	0.5 (Befeuchtungsgrad)
6	ERHITZER	12.0	5.0	0.55	35.9 kW (Leistung)
7	ZULÜFTER	16.0	5.0	2.35	0.8 K (Temp.-Erhöhung)
8	RAUM (unten)	17.0	5.0	5.48	6909.1 kJ/kg <sub>w</sub> (dh/dx)
9	Raum (oben)	20.0	6.0	5.48	1.0 K (Temp.-Erhöhung)
10	ABLÜFTER	21.0	6.0	5.48	0.6 K (Temp.-Erhöhung)
11	ABZWEIG-MISCHER	21.6	6.0	5.48	0.0
12	ABLUF-WÄRMERÜCKGEWINNER	21.6	6.0	5.48	1.0 (Betriebszustand)
13		6.6	4.0	5.48	

**Minimalwert der Zielfunktion:**

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

Fig. 35a

**OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:**

e	Aggregat	$t_{opt}$ °C	$x_{opt}$ g <sub>w</sub> /kg <sub>tl</sub>	$K_{opt}$ DM/h	Aktion
1	WÄRMERÜCKGEWINNER	32.0	19.0	0.00	1.0 (Betriebszustand)
2	ERHITZER	28.0	19.0	0.00	0.0 kW (Leistung)
3	KÜHLER	28.0	19.0	0.00	319.4 kW (Leistung)
4	WÄSCHER	15.0	10.0	159.70	0.0 (Befeuchtungsgrad)
5	ERHITZER	15.0	10.0	159.70	18.1 kW (Leistung)
6	ZULÜFTER	17.0	10.0	160.60	0.8 K (Temp.-Erhöhung)
7	RAUM (unten)	18.0	10.0	163.77	7812.5 kJ/kg <sub>w</sub> (dh/dx)
8	Raum (oben)	24.0	11.0	163.77	1.0 K (Temp.-Erhöhung)
9	ABLÜFTER	25.0	11.0	163.77	0.6 K (Temp.-Erhöhung)
10	ABLUFT-WÄRMERÜCKGEWINNER	25.6	11.0	163.77	1.0 (Betriebszustand)
11		29.7	11.0	163.77	

**Minimalwert der Zielfunktion:**

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

Fig. 36a

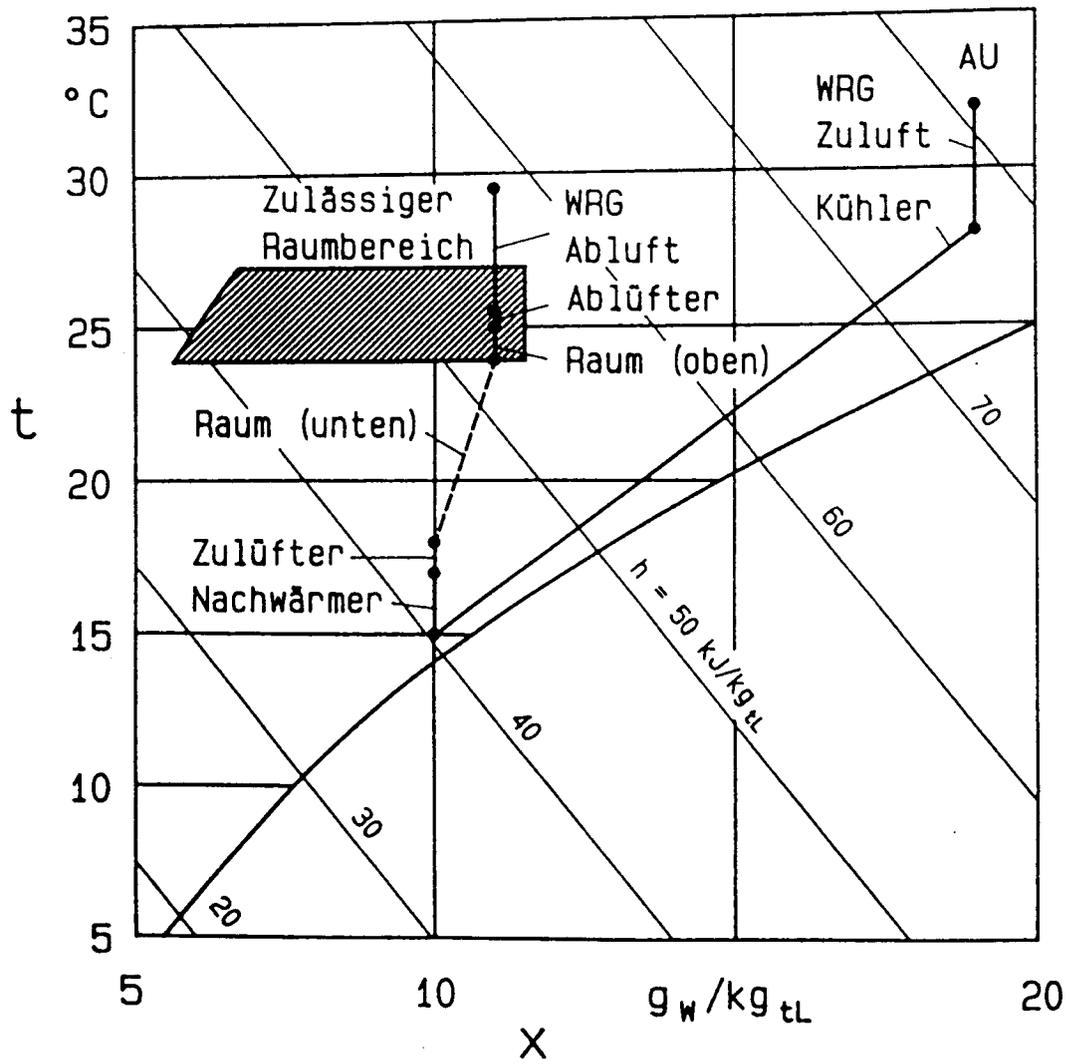


Fig. 36b

**OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:**

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

**Minimalwert der Zielfunktion:**

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

Fig. 37a

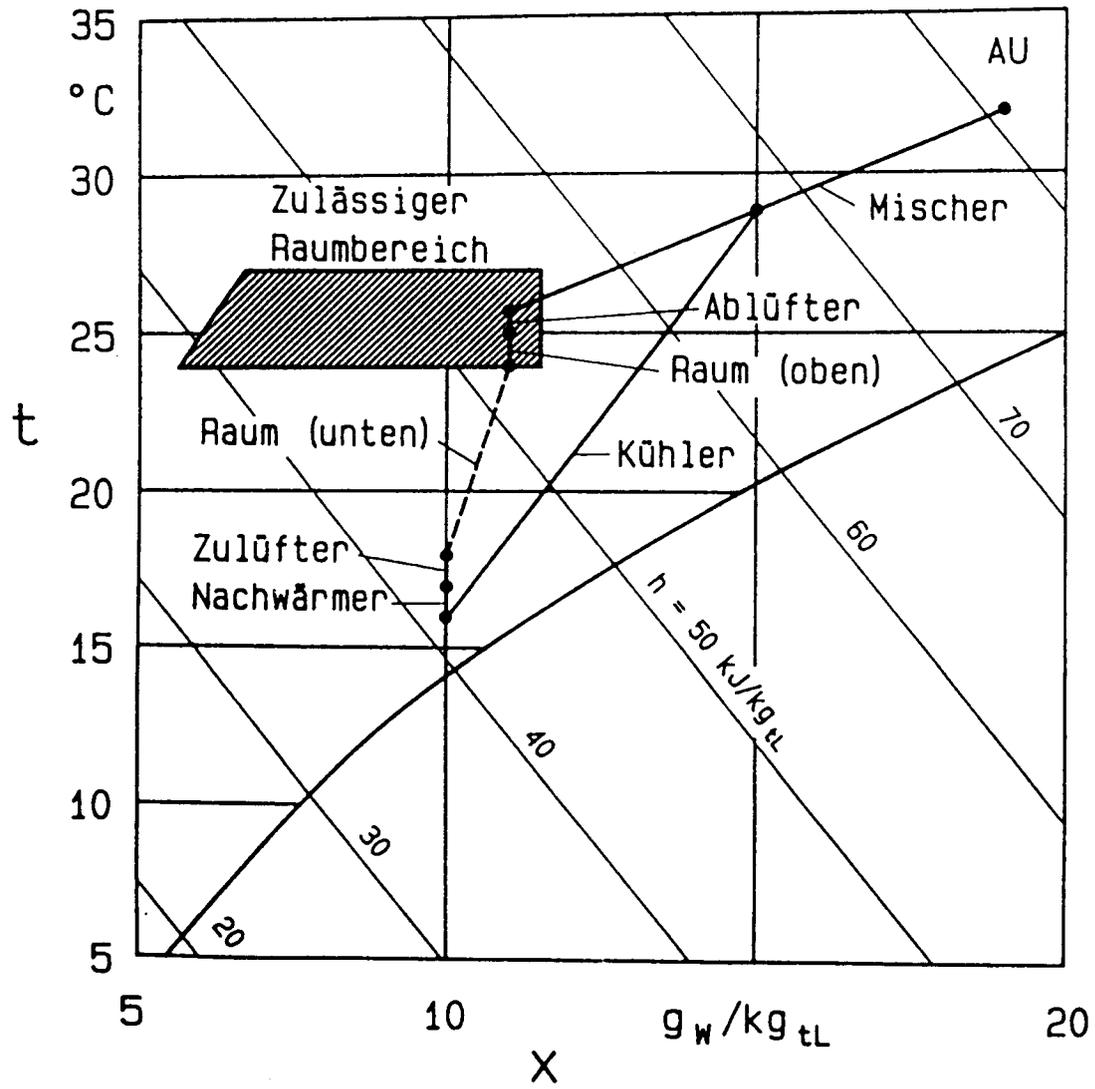


Fig. 37b

## OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

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

## Minimalwert der Zielfunktion:

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

Fig. 38a

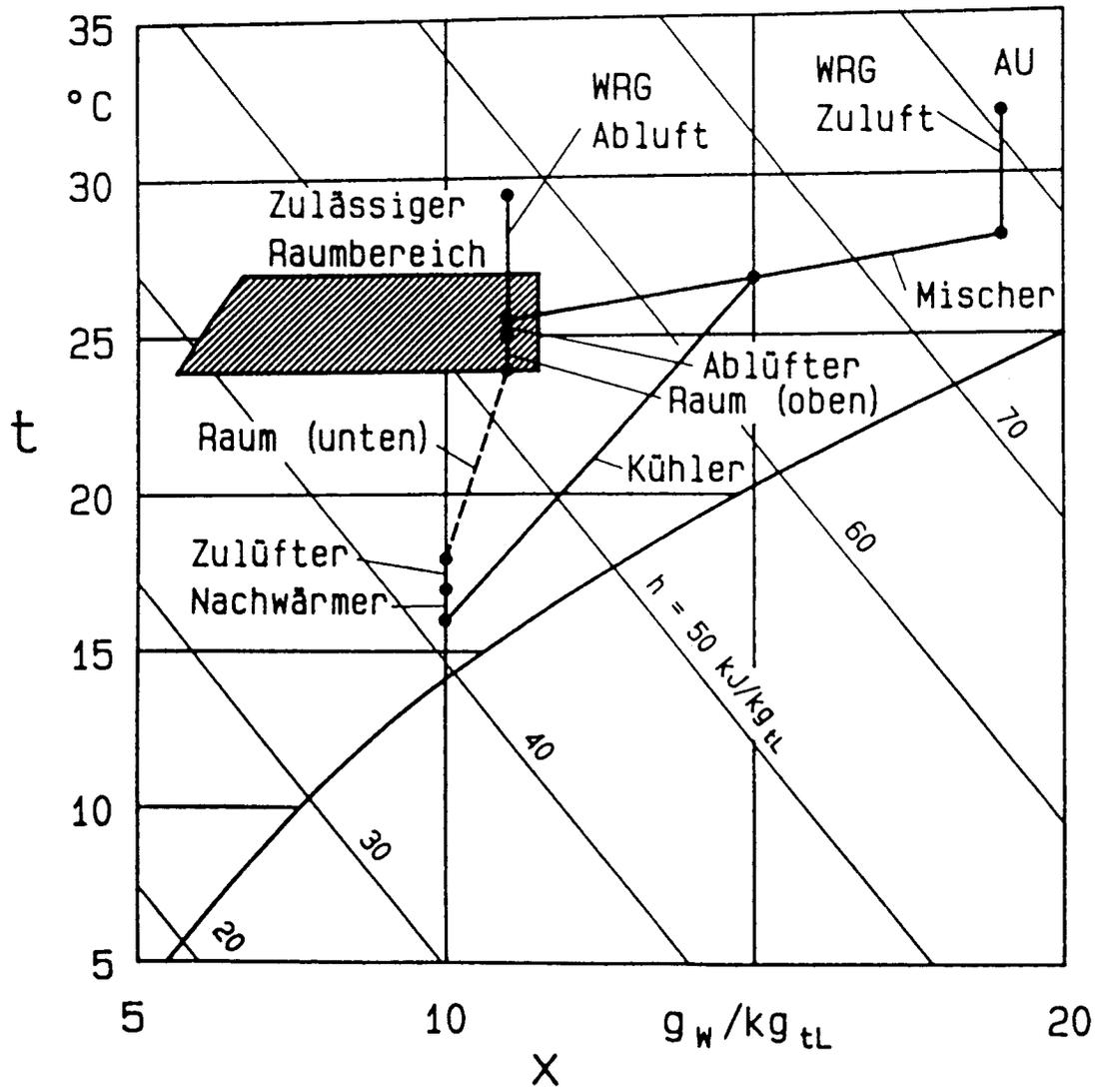


Fig. 38b

**OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:**

e	Aggregat	$t_{opt}$ °C	$x_{opt}$ $g_w/kg_{tL}$	$K_{opt}$ DM/h	Aktion
1	WÄRMERÜCKGEWINNER	22.0	8.0	0.00	0.0 (Betriebszustand)
2	MISCHER	22.0	8.0	0.00	1.0 (Außenluftanteil)
3	ERHITZER	22.0	8.0	0.00	0.0 kW (Leistung)
4	KÜHLER	22.0	8.0	0.00	0.0 kW (Leistung)
5	WÄSCHER	22.0	8.0	0.00	0.5 (Befeuchtungsgrad)
6	ERHITZER	19.0	9.0	0.11	0.0 kW (Leistung)
7	ZULÜFTER	19.0	9.0	0.11	0.8 K (Temp.-Erhöhung)
8	RAUM (unten)	20.0	9.0	3.29	7812.5 kJ/kg <sub>w</sub> (dh/dx)
9	Raum (oben)	26.0	10.0	3.29	1.0 K (Temp.-Erhöhung)
10	ABLÜFTER	27.0	10.0	3.29	0.6 K (Temp.-Erhöhung)
11	ABZWEIG-MISCHER	27.6	10.0	3.29	0.0
12	ABLUF-WÄRMERÜCKGEWINNER	27.6	10.0	3.29	0.0 (Betriebszustand)
13		27.6	10.0	3.29	

**Minimalwert der Zielfunktion:**

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

Fig. 39a

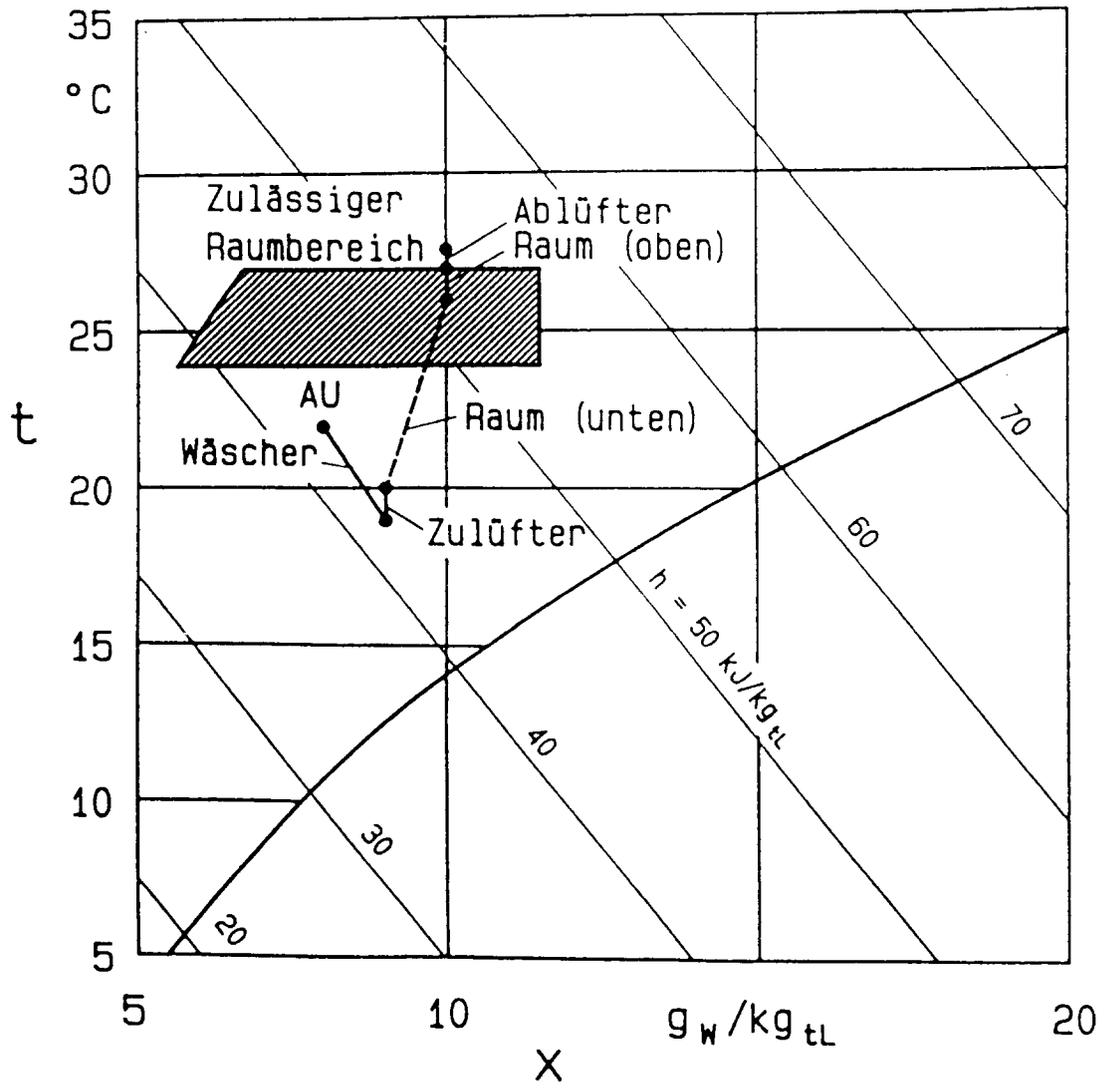


Fig. 39b

## OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

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

## Minimalwert der Zielfunktion:

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

Fig. 40a

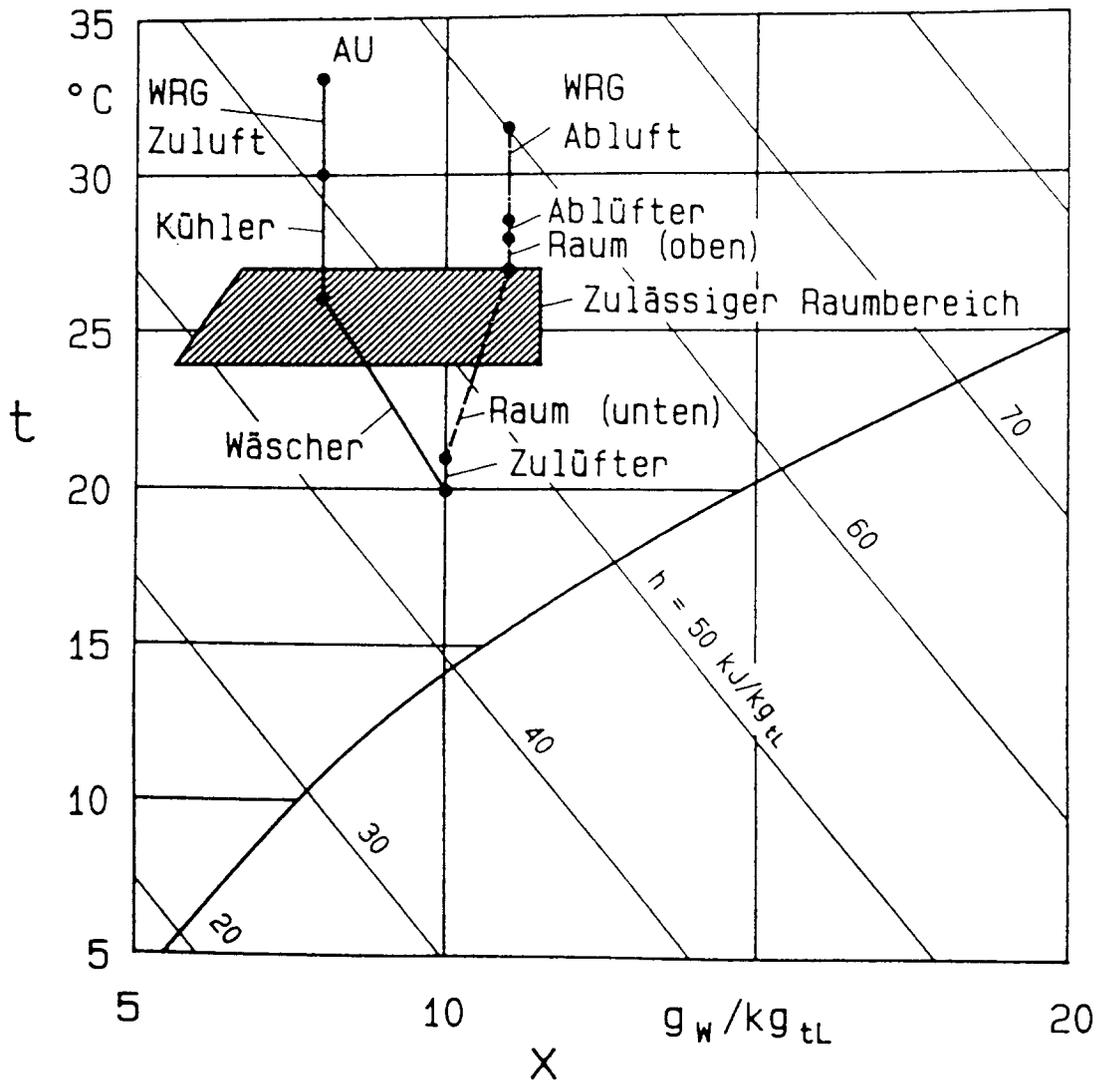


Fig. 40b



Europäisches  
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 94 11 4028

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.6)
A	EP-A-0 415 747 (LUMINIS) * Seite 11, Zeile 15 - Zeile 25; Abbildung 6B *		F24F11/00
D,A	DE-A-34 39 288 (SIEMENS) * Seite 8, Zeile 4 - Seite 9, Zeile 17; Abbildung 1 *	1	
			<b>RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.6)</b>
			F24F
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer	
DEN HAAG	21. Dezember 1994	Peschel, G	
<b>KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE</b>		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze	
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet		E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist	
Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie		D : in der Anmeldung angeführtes Dokument	
A : technologischer Hintergrund		L : aus andern Gründen angeführtes Dokument	
O : mündliche Offenbarung		.....	
P : Zwischenliteratur		& : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P44C03)