

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 643 271 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
04.06.1997 Patentblatt 1997/23

(51) Int Cl.6: **F24F 11/00**

(21) Anmeldenummer: **94114028.7**

(22) Anmeldetag: **07.09.1994**

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

Process for controlling the temperature and the humidity of the air in rooms with an air conditioning installation

Procédé pour la régulation de la température et de l'humidité dans les enceintes utilisant une installation de climatisation d'air

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

(30) Priorität: **10.09.1993 DE 4330646**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
15.03.1995 Patentblatt 1995/11

(73) Patentinhaber: **FA. RUD. OTTO MEYER**
22047 Hamburg (DE)

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

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

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A- 0 415 747 **DE-A- 3 439 288**

EP 0 643 271 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

Die Erfindung geht aus einem Verfahren zum Regeln von Temperatur und Feuchte von Luft in Räumen mittels einer lufttechnischen Anlage, die aus einer Anzahl von aggregaten 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 lufttechnischen 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-Zustandspunktes 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 Lufterhitzer nur längs einer Isohygren ($x = \text{const}$) die Luft erwärmen, ein adiabatisch arbeitender Wäscher nur längs der Feuchtkugelisothermen ($t_f = \text{const}$) 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 haften diesen Strategien noch systemimmanente Nachteile an:

1. Das Auflösen des Gesamtprozesses in einzelne Regelkreise bzw. bei Beachten der Sequenzen in kreiskomplexe 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 Raumlufthemperatur 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 nutzen (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 gegebenen Nutzungszeitraum und zum praktischen genbetrieb 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 nutzen - 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 Strategie betrachtung 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 Steueralsorithmen 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. Zwischenliegende 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 Sollwert in Abhängigkeit von der Lufttemperatur. Die Außenluftanteile MA können durch fixierte Klappenstellungen an der Mischkammer realisiert werden.

Fig. 4 Zulässiger Raumluftzustand (schraffierter Bereich) und zugehöriger Zuluftzustand (doppelschraffierter 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 Peraturgrenze tHG Umweltenergie (z.B. Abwärme) kostengünstiger 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 führten Leistung abhängig. Der Temperaturabfall im Wäscher wird durch die peraturdifferenz - Eintrittstemperatur minus Feuchtkugelttemperatur - und den Befeuchtungswirkungsgrad beeinflusst. Es sind unendlich viele Zustandsverläufe möglich.
- Fig. 7** Abarbeitungsschema der dynamischen Optimierung nach Einteilung der Zielgebiete in feste Abschnitte Δt . Die Endpunkte werden jeweils auf die Mitte der Abschnitte gelegt.
- 10 **Fig. 8** Prinzipschaltung einer bekannten Klimaanlage mit Kennzeichnung der signifikanten Luftzustände.
- Fig. 9** Schematische Einteilung des h,x-Diagramms in Zustandsabschnitte (i,j). (Die Sättigungslinie entspricht nicht der Realität!).
- 15 **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 programm geltenden Variablen.
- 20 **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.
- 25 **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 Lufterhitzer. Ausgehend von drei Startpunkten im Etappenfeld e ergibt sich eine Auffüllung im Etappenfeld e + 1 durch unterschiedliche Heizintensitäten, die von z aus gesteuert werden.
- 30 **Fig. 16** Unterprogramm ABLUFT zur Ermittlung des Luftzustandsverlaufes im Abluftweg, ausgehend vom Optimierungsergebnis (Etappenfeld e = eR).
- 35 **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).
- 40 **Fig. 19** Unterprogramm ZUSTANDH zur Berechnung der Temperatur t* für feuchte Luft, ausgehend von h* und x* nach (1).
- 45 **Fig. 20** Unterprogramms PS und TS zur Wiedergabe der Verdampfungs- und Sublimationskurve von Wasser für die Zusammenhänge PS (t*) und TS (p*) nach (1).
- Fig. 21** Unterprogramme RAUMU und RAUMO zur Ermittlung von Luftzustandsänderungen im unteren und oberen Raumabschnitt.
- 50 **Fig. 22** Unterprogramm ERHITZER zur Lufterwärmung.
- Fig. 23** Unterprogramm WAESCHER zur adiabaten Luftbefeuchtung.
- Fig. 24** Unterprogramm DAMPFBEF zur Luftbefeuchtung mit Dampf.
- 55 **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.

5 **Fig. 29** Typische Zustandsänderung bei rückgewinnungseinrichtungen in Komfort-Klimaanlagen.

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.

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

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

15 **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.

20 **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.

25 **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.

30 **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.

35 **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.

40 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.

45 Fig. 7 zeigt den möglichen Ausweg; die "Etappenziele" der Zustandsänderung werden in *Abschnitte* der Größe Δt 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).

50 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*"),

55 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 gereimte 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 $\Delta t = 1$ K bzw. $\Delta x = 0,001$ kg_W/kg_{IL}. Es wird der Bereich $-19,5^\circ\text{C} \leq t < 40,5^\circ\text{C}$; $0 \leq x < 0,0245$ kg_W/kg_{IL} abgedeckt. Die Feldnummern ergeben sich mit t in $^\circ\text{C}$ und x in kg_W/kg_{IL} zu:

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

Beispiele

$t; x$	-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_W/kg_{IL} wiedergegeben. Dies wird aus Fig. 9 deutlich.

Für die inverse Zuordnung gelten:

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

Beispiele

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

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:

$K[e; i; j] = -1$ 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 ($e - 1; Q_i; Q_j$) die Zustandsänderung zum Feld ($e; i; j$) führt;
 $A[e; i; j] = 0$ Aktion, die eine kennzeichnende Größe der Zustandsänderung von ($e - 1; Q_i; Q_j$) nach ($e; i; j$) vermerkt (z. B. Leistung eines Erhitzers; Stellung der Mischklappe usw.).

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:

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

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

Wird am Ende der Berechnung ein Unterschied zu diesen Annahmen von $> 1 \text{ K}$ oder $> 1 \text{ g}_W/\text{kg}_L$ festgestellt, beginnt eine erneute Iterationsrechnung ab Sprungmarke (1).

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:

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

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.

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 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 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 ΔK werden berechnet. Ist im betrachteten Aggregat technisch keine Zustandsänderung durchführbar, so wird $\Delta K < 0$ gesetzt.

Das Unterprogramm ZUSTAND liefert die zu t_n und x_n gehörigen Werte: relative Feuchte ϕ_n , spezifische Enthalpie h_n und Taupunkttemperatur t_{pn} .

Liegen die neuen Zustandswerte im zulässigen Zielgebiet

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

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

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

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

$$5 \quad t_{\tau \min}[e + 1] \leq t_{\tau n} \leq t_{\tau \max}[e + 1] \quad (11)$$

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 $\pm 0,0005$ kg_W/kg_L zu tolerieren.). Sie findet endgültig Aufnahme, wenn für die Zielfunktion des neuen Punktes $i_n; j_n$

$$10 \quad K[e + 1; i_n; j_n] < 0 \quad (12)$$

oder

$$15 \quad K[e; i; j] + \Delta K < K[e + 1; i_n; j_n] \quad (13)$$

gilt. Es folgen dann die Speicherbelegungen:

$$20 \quad K[e + 1; i_n; j_n] = K[e; i; j] + \Delta K \quad (14)$$

$$25 \quad Q_i[e + 1; i_n; j_n] = i \quad (15)$$

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

$$30 \quad A[e + 1; i_n; j_n] = \text{Aktion.} \quad (17)$$

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 ($e = eR$) und den optimalen Raumzustandswerten ($t = \text{topt}[eR]$; $x = \text{xopt}[eR]$) 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

$$45 \quad \text{topt}[e + 1] = t_n \quad (18)$$

$$\text{xopt}[e + 1] = x_n \quad (19)$$

zugeordnet. Die Zielfunktion erfährt keine weitere Veränderung

$$50 \quad K_{\text{opt}}[e + 1] = K_{\text{opt}}[eR]; \quad (20)$$

die aggregattypische Handlung wird vermerkt

$$55 \quad A_k[e + 1] = \text{Aktion.} \quad (21)$$

Die im Abluftweg auftretenden Beeinflussungen der Zielfunktion - beispielsweise der Betriebskosten für den Ab-

lüfter - sind bereits im Optimierungsalgorithmus mit zu berücksichtigen, da die eigentliche Optimierung am Etappenfeld $e = e_R$ 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.

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):

Alle relevanten Zusammenhänge (G deutet auf "global" hin) werden ausgehend von den bekannten Parametern t^* und x^* berechnet. Verfügbar sind: relative Feuchte ϕ^* ($\phi^* = 2$ charakterisiert übersättigtes Gebiet bei $t^* > 0^\circ\text{C}$; $\phi^* = 3$ desgl. bei $t^* \leq 0^\circ\text{C}$), spezifisches Volumen v^* , Dichte ρ^* , spezifische Enthalpie h^* , Feuchtekugelttemperatur t_f^* , Taupunkttemperatur t_{τ}^* , Feuchtegehalte x_W und x_S , Partialdrücke p_W , p_L .

Unterprogramm ZUSTAND (Fig. 18):

Hierbei handelt es sich um eine verkürzte Version von ZUSTANDG mit den Ergebnissen ϕ^* , h^* , t_{τ}^* , x_W .

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).

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

ΔH_R W Enthalpiestrom ("trockene und feuchte Wärme")

ΔW_R kg_W Feuchtestrom

zugeführt. Im oberen Raum erfolgt nur noch die Übergabe von

ΔH_{RO} W trockener Wärmestrom,

der beispielsweise aus der Leuchtenwärme resultiert.

Vorgegeben ist weiterhin

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

Damit sind die beiden Unterprogramme RAUMU und RAUMO (Fig. 21) nutzbar, woraus die Parameter am jeweiligen Austritt (t_n ; x_n) folgen. Als "Aktion" wird die Richtung der Zustandsänderung ($\Delta H_R/\Delta W_R$) im unteren Raumabschnitt bzw. die reine Temperaturerhöhung ($t_n - t$) 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.

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

Erhitzer: Unterprogramm ERHITZER (Fig. 22)

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

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

Die absolute Feuchte bleibt bei der Erwärmung konstant

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

Die übertragene Leistung beträgt

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

EP 0 643 271 B1

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

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

Unter "Aktion" wird die Leistung Δ 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

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

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

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

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

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

und weiter der Befeuchtungsgrad

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

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

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

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

Ausgehend von der Beziehung

$$\Delta K = \Delta p_W \dot{V}_W \frac{P_{e1}}{\eta_P} \quad (32)$$

mit

Δp_W Differenzdruck der Sprühwasserpumpe
 $\dot{V}_W$ Wasserstrom
 η_P Pumpen- und Motorwirkungsgrad
 P_{e1} spezifischer Preis der Elektroenergie.

und dem erforderlichen Wassermassestrom

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

folgt

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

5 Mit $\Delta p_w = 2 \text{ bar}$, $\varrho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, $C = 4$ (Annahme für einen bestimmten Wäschertyp) und $kW = p_{e1}/\eta_P$ in DM/kWh ergibt sich in der Flußbildschreibweise

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

10

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 Sattdampfes Δh_D nach (1) und zum Lufteintrittszustand (t ; x) mit UP ZUSTAND die Enthalpie der Luft h bestimmt.

15 Die Befeuchtung erfolgt in $z = 10$ Schritten jeweils um $1 \text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$. Entsprechend erhöhen sich die Enthalpie- und Feuchtwerte:

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

20

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

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

25

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

30

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

Unter "Aktion" werde die Feuchtezunahme in $\text{g}_w/\text{kg}_{tL}$ gespeichert.

Das Unterprogramm KUEHLER ist in Fig. 25 dargestellt.

35

Zur Ermittlung des Zustandsverlaufes im Oberflächenkühler wird ein einfaches Modell gewählt, das mit dem sogenannten Rippenwirkungsgrad des Kühlers η_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

40

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

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

Mit dem Rippenwirkungsgrad berechnet sich die mittlere Oberflächentemperatur zu

45

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

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

50

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

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

55

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

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

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

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

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

die erforderlichen Kosten ergeben

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

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

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

Dabei bedeuten:

v^* m ³ /kg	spezifisches Volumen
Δp Pa	Druckerhöhung (Δp_Z Zulüfter; Δp_A Ablüfter)
p Pa	Vordruck (näherungsweise gleich dem Außenluftdruck)
η_L	Wirkungsgrad (η_{LZ} Zulüfter; η_{LA} Ablüfter)
κ	Isentropenexponent für Luft ($\kappa = 1,4$).

Die Feuchte bleibt konstant

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

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:

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

Unter "Aktion" werde die Temperaturerhöhung gespeichert.

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

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

folgen die Berechnungen

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

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

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.

Aus x_n und h_n folgt mit UP ZUSTANDH endgültig t_n . Als Kostenfunktion sei

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

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

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

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) Φ_{WRGT} . Ausgehend von den Eintrittsgrößen (t ; x) folgen die Endwerte der Zustandsänderung:

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

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

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

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

woraus aufbauend die Kostenfunktion

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

formuliert wird. Es kann vielfach auch sinnvoll sein,

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

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).

Fig. 29 zeigt, daß bei Komfortklimaanlagen die Zuluft-Zustandsänderung üblicherweise längs einer Isohygen 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

$$t_n = t$$

5

$$x_n = x,$$

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 Luftstromes

10

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

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

15

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

20

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.

25

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.

Beispiel 1

30

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 Kosten betragen:

35

Wärmeenergie bis zu $t_{\text{Luftaustritt}}$ von 25°C :	$k1H = 0,05 \text{ DM/kWh}$
Wärmeenergie über $t_{\text{Luftaustritt}}$ von 25°C :	$k2H = 0,15 \text{ DM/kWh}$
Betriebsenergie für Befeuchterpumpe inclusive Wirkungsgrad:	$kW = 0,35 \text{ DM/kWh}$

40

Der Wäscher ist regelbar im Bereich: $\eta_{B\min} = 0,50$; $\eta_{B\max} = 0,95$. 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.

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:

45

Etappenfeld $e = 1$

Es ist nur der Außenluftzustand (-14°C ; 1 $\text{g}_W/\text{kg}_{tL}$) mit den Kosten 0 DM/h belegt.

Etappenfeld $e = 2$

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

50

Etappenfeld $e = 3$

Zwischen $e = 2$ und $e = 3$ ist der Wäscher installiert. Wird er nicht betrieben, so bleiben die bisherigen Werte erhalten (siehe Reihe $x = 1 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$). 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.

55

Etappenfeld $e = 4$

Von jedem in $e = 3$ belegten Abschnitt erfolgt eine Aufwärmung in 1 K Stufen. Gemäß geltender Kostenfunktion

werden die Ergebnisse vermerkt. Es treten hierbei besonders deutlich hervor, daß

- technisch gleiche Endpunkte stets überschneitert 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:

Außenluftzustand Winter:	$t_{AU} = -12^{\circ}\text{C}$; $x_{AU} = 1 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$
Sommer:	$t_{AU} = 32^{\circ}\text{C}$; $x_{AU} = 19 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$
Luftdruck:	$p = 101300 \text{ Pa}$
Raumluftbereich Winter:	$t = 20^{\circ}\text{C}..23^{\circ}\text{C}$; $\phi = 0,30..0,65$; $x < 11,5 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$
Sommer:	$t = 24^{\circ}\text{C}..27^{\circ}\text{C}$; $\phi = 0,30..0,65$; $x < 11,5 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$
Zwischenbereiche:	$\phi \leq 1$

Aggregate- und Raumdaten:

Wärmerückgewinner:	Φ_{WRGT}	$= 0,6$;	$k_{WRGT} = 0 \text{ DM/kWh}$
Mischer:	M_{Amin}	$= 0,5$;	$M_{Amax} = 1$;
	k_M	$= 0 \text{ DM/h/kg s}$	
Erhitzer (Vorwärmer):	k_{1H}	$= 0,05 \text{ DM/kWh}$	für $t \leq 25^{\circ}\text{C}$,
	sonst k_{2H}	$= 0,15 \text{ DM/kWh}$	
Kühler:	η_K	$= 0,8$;	$B_y = 0,75$
	k_{1K}	$= 0,20 \text{ DM/kWh}$	für $t \geq 16^{\circ}\text{C}$,
	sonst k_{2K}	$= 0,50 \text{ DM/kWh}$	
Wäscher:	η_{Bmin}	$= 0,50$;	$\eta_{Bmax} = 0,95$;
	k_W	$= 0,35 \text{ DM/kWh}$	
Erhitzer (Nachwärmer):	k_{1H}	$= 0,05 \text{ DM/kWh}$	für $t \leq 25^{\circ}\text{C}$,
	sonst k_{2H}	$= 0,15 \text{ DM/kWh}$	
Zulüfter:	η_{LZ}	$= 0,70$;	$\Delta p_Z = 700 \text{ Pa}$;
	k_L	$= 0,25 \text{ DM/kWh}$	

Raum (unten) Winter (vollbesetzt):	ΔHR	=	38 kW
	ΔWR	=	0,0055 kg _w /s
Sommer (vollbesetzt):	ΔHR	=	75 kW
	ΔWR	=	0,0096 kg _w /s
Raum (oben) Winter und Sommer:	ΔHRO	=	9 kW
Ablüfter:	ηLA	=	0,83; ΔpA = 600 Pa

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.

Der Luftmassenstrom beträgt idealerweise stets $\dot{m} = 8,8$ kg/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):

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

Beispiel 3

Die sommerliche Raumbelastung, der zulässige Raumluftbereich sowie die Aggregatezusammenstellung mit Wärmerückgewinner und Mischer gelten wie in Beispiel 2 beschrieben. Variiert wird lediglich der sommerliche Außenluftzustand. Die Ergebnisse der optimalen Prozeßverläufe werden in den 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 Raumluft-Zustandsbereiche, bei Komfortklimaanlagen z. B. nach DIN 1946 Teil 2, formuliert werden. Damit ist die Eingabe zu vereinfachen. Weiter wird durch Ergänzung einer äußeren Abarbeitungsschleife die Berechnung einer Folge von Außenluftzuständen automatisiert möglich.

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 ($\Delta t_{ZU} = topt[eR] - topt[eR - 1]$) für ein vorgegebenes $\dot{m}$;
- Liegt $\dot{m}$ über dem zulässigen Minimalwert und Δt_{ZU} im zulässigen Bereich wird solange eine Luftstromreduzierung (z. B.: $\dot{m}_1 = 0,95 \dot{m}$; $\dot{m}_2 = 0,95 \dot{m}_1$ usw.) und eine Neuberechnung des optimalen Weges durchgeführt, bis einer der Grenzwerte erreicht ist. Sind die Leistungen der Bauteile vom Luftwechsel abhängig, so muß dies in den entsprechenden Algorithmen berücksichtigt werden. Die Randbedingungen bedürfen gegebenenfalls auch der Anpassung, so beispielsweise der zulässige Außenluftanteil des Mischers 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 raumlufttechnischen 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 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 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 Bauteile und auf die Zustandsänderungen im Raum. Geht man davon aus, daß die entsprechenden Ein- und Austrittsparameter bekannt sind, so gibt es für die *Adaption* mehrere Möglichkeiten:

- Die Zustandsänderung wird durch Ermittlung von Δh sowie Δx direkt bestimmt. Die Programmeingaben erfahren eine entsprechende Korrektur. Dieses Vorgehen bietet sich zur Erfassung der realen Raumlasten an. Es ist aber auch denkbar, dieses Verfahren auf Aggregate der RLT-Anlage anzuwenden und eine Zuordnung beispielsweise zu den Luft- und Eintrittstemperaturen herzustellen.
- Die im Optimierungsalgorithmus verwendeten Ersatzmodelle werden durch die realen Zustandsänderungen korrigiert. So sind beispielsweise aus dem Eintritts- und Austrittstemperaturen der Luft und des Kaltwassers der Rip-

penwirkungsgrad 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.

5

Patentansprüche

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 Raumlufzustand 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, daß der Prozeßlauf so bestimmt wird,

10

15

20

25

30

35

40

45

- 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 (Δt und Δx) diskretisiert wird, so daß ausgehend vom Zustand der Außenluft sich eine endliche Anzahl von (unter Berücksichtigung der Randbedingungen) theoretisch möglichen Wegen bis zum Raumluf- oder 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,
- b) daß als Zielfunktion die "Minimierung der exergetisch, umweltrelevant, kalorisch oder kostenmäßig bewerteten Energieaufwendungen" oder die "Minimierung direkt eingesetzter Naturressourcen" vorgegeben wird, wobei der Bewertungsmaßstab für jedes Einzelaggregat auch unterschiedlich festlegbar ist,
- 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 Kühlmedienseitigen Durchflußparameter, der Leistung, der Zustandsgrößen der aufzubereitenden Luft oder gatespezifischer 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 austrittszustandes, der nach Anwenden eines Rundungsalgorithmus - wiederum in diskretisierter Form vorliegt, und dem zweiten Ergebnis eines Summanden zur Gesamtbewertung im Sinne der funktion, wobei im Falle, daß mehrere Parameterschritte den gleichen diskretisierten trittszustand 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 austrittsparameter 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 (Δt und Δx), deren Flächenmittelpunkte innerhalb des definierten Bereiches liegen, untereinander gleichwertig sind.

50

55

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
daß die optimale Prozeßführung auch eine Optimierung des Luftdurchsatzes einschließt, wobei hygienisch, luft-
führungstechnisch 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 Teilkombi-
nationen 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 $\Delta t \leq 1 \text{ K}$ und in j Feuch-
teabschnitten $\Delta x \leq 1 \text{ g/kg}$ betrachtet werden und die Zielfunktionssumme K stimmt wird, wobei als Aus-
gangspunkt der luftzustand (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 wer-
den,

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 Raumluf-
tustände, 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, Luft-
zustandsänderungen der Eingangsgrößen (Außen-, Ab- und/oder Zuluft) folgt.

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.

Claims

1. Process for the regulation of temperature and humidity of air in rooms with the aid of a ventilation and air condi-
tioning system which is comprised of a plurality of individual units for effecting air condition changes and which
uses outside air and outgoing air as entry flows, in which case the control of the individual air conditioning units
and the conduction of the process are effected in such a way that the supply air brings about a predetermined
room air condition, whereby an objective function is fulfilled, viz. that the target condition is reached with a minimum
of energy expenditure and in which marginal conditions with regard to the the air conditions adjustable by means
of individual units are preset and the realizable condition changes are determined,
characterized in that

the process conduction is determined in such a way

a) that at certain selectable time intervals, the respective operating parameters of the system meeting the objective function are determined by computation, in that the condition field of the air passed through the individual units is discretized by the division into temperature and humidity sections (Δt and Δx) so that, setting out from the condition of the outside air, a finite number of (while taking the marginal conditions into account) theoretically possible ways up to the room air or supply air condition results and each of these ways is pursued in a stepwise fashion, in which case, for each way, the evaluations of the air treatment by the individual units are added up with regard to the objective function and, finally, the parameters of that way are selected for the operation of the individual units, whose summed overall evaluation fulfills the objective function;

b) in that, as objective function, the "minimization of the exergonic, environment-relevant, calorific or cost-wise assessed energy expenditures" or the "minimization of directly employed nature resources" is predetermined, while the evaluation standard for each individual unit can also be assessed variably;

c) in that, as marginal conditions, the air conditions at the outlets of the individual units with regard to the temperature, the absolute humidity, the specific enthalpy and the dew point temperature - specifically related to a constant air pressure, which may be different for each individual unit - or of values derived therefrom, are used as well as limitations of the unit employment with regard to the air throughput, of the flow parameters on the part of the heating or cooling media, the output, the condition values of the air to be processed or of unit-specific characteristics, are predetermined;

d) in that the technically-physically realizable condition changes in the individual units - while setting out from the occurring supply air conditions discretized according to temperature and humidity - are examined in parameter steps characteristic of the unit (temperature increases, increases in humidity, lowering of cooling water entry temperatures, etc.), in which case, for non-regulated units, the examination comprises solely a single step, with the first result of the air exit condition which, after the use of a rounding algorithm - is available once more in a discretized form and the second result of a summand for the overall evaluation in line with the objective function, in which case, in the event that several parameter steps produce the same discretized air exit condition, the step which, in line with the target function, reaches the most favourable (smallest or largest) summand, enters into the evaluations, and

e) in that, accordingly, the operation of every unit, individually or combined into groups, can be controlled or regulated, while in the latter case the optimized air exit parameters can be employed as nominal values.

2. Process according to Claim 1, characterized in that

in lieu of the predetermined room air condition, an air condition defined by the parameters of the entry air flow, with regard to temperature and humidity, a defined room air condition range, whose limitations, both in dependence of the internal heat and humidity burdens - detectable from the air conditions measured during the operation of the system for the outgoing air and the supply air ($\Delta h/\Delta x$, room), the number of persons in the room and/or of the electrical devices being operated in the room - as well as the external meteorological conditions and also the utilization time, are predeterminable, in which case the discretized temperature and humidity sections (Δt and Δx), whose area centers are located within the defined range, are equivalent amongst themselves.

3. Process according to either Claim 1 or Claim 2, characterized in that

the optimal process conduction also includes an optimization of the air throughput, in which case hygienically, air conduction-technically and/or constructionally-physically caused limitations are predeterminable.

4. Process according to any of Claims 1 to 3,

wherein the room air conditioning system comprises a plurality of individual units, viz. at least one heating unit (EH), one cooling unit (KU) and one humidification unit (WA) and possesses the sensor which supplies the relevant air conditions (pressure (p), temperature (t), humidity (x) and/or also other air condition values) of the outside air, the outgoing air and the supply air, in which case, on the strength of optimization results detected on the lines of the objective function while taking into consideration the room air-technical and unit-specific marginal conditions, all units or part combinations are operated by units, with the aid of which the room target condition range ($t_{\text{TARGET min}} \dots t_{\text{TARGET max}}$, $x_{\text{TARGET min}} \dots x_{\text{TARGET max}}$, $\phi_{\text{TARGET min}} \dots \phi_{\text{TARGET max}}$, $\tau_{\text{TARGET min}} \dots$

tau TARGET max) is attainable,
characterized in that

a) while taking into account the predetermined, stored marginal conditions all temperature changes and/or changes in humidity possible with the individual units in i temperature sections $\Delta t \leq 1$ K and in j humidity sections $\Delta x \leq 1$ g/kg are viewed and the object function sum K is determined, in which case, as point of departure, the outside air condition (tAU, xAU) with $K = 0$ is valid;

b) in that all technically possible air conditions after each unit in a t, x stage field e are characterized by the minimum expenditure (e,i,j) necessary up to this condition point in line with the objective function;

c) in that only the $K_{\min}(e,i,j) \geq 0$ can be point of departure for the condition change in the next unit;

d) in that the condition change in the room, preferably divided into the residence area and an upper area, is regarded technically-physically as the condition change in a unit, but that no additive is added to the object function sum;

e) in that the condition points t (e,i), x (e,j) occupied by $K_{\min}(e,i,j) \geq 0$, which are located within the room target range, while taking into consideration all marginal conditions, constitute the technically possible room air conditions which are achievable in the air conditioning process;

f) in that the optimal ventilation process along the lines of the objective function within the room residence area leads through the condition point possessing the lowest occupied $K_{\min}(e,i,j)$ value;

g) in that the optimization of the ventilation process is repeated at regular intervals, while this takes place at predetermined time intervals or in dependence of the measured, by preference time-related changes in the air condition of the entry values (outside air, outgoing air and/or supply air).

5. Process according to any of Claims 1 to 4,

characterized in that

the unit-specific marginal conditions and technically feasible condition changes, while setting out from the pre-determination values while using the actually measured air condition change, are automatically changed and stored after a predetermined approximation operation.

Revendications

1. Procédé pour la régulation de la température et de l'humidité de l'air dans des pièces au moyen d'une installation de climatisation d'air qui est constituée par un certain nombre d'agréats séparés pour effectuer des modifications de l'état de l'air et qui utilise de l'air extérieur et de l'air d'évacuation comme courants d'entrée, la commande des agréats de climatisation séparés et la conduite du processus étant effectuées de manière telle que l'air amené provoque un état d'air ambiant prédéfini, une fonction visée étant remplie, à savoir que l'état nominal est atteint avec un minimum de déploiement d'énergie, et les conditions marginales étant prédéfinies pour ce qui est des états d'air réglables par les agréats individuels et les modifications d'état réalisables étant déterminées, caractérisé en ce que la marche du processus est déterminée de telle manière

a) qu'à certains intervalles de temps pouvant être sélectionnés, les paramètres de marche qui remplissent respectivement la fonction visée sont déterminés par le calcul, le champ d'état de l'air qui traverse les agréats séparés étant discrétisé par la répartition en tronçons de température et d'humidité (Δt et Δx) si bien qu'en partant de l'état de l'air extérieur, on obtient un nombre fini de voies possibles théoriquement (en tenant compte des conditions marginales) jusqu'à l'état de l'air ambiant ou de l'air amené et que chacune de ces voies est suivie pas à pas, les évaluations du traitement de l'air par les agréats séparés étant, pour chaque voie, totalisées pour ce qui est de la fonction visée, et que finalement les paramètres qui sont sélectionnés pour la marche des agréats séparés sont ceux de la voie dont l'évaluation globale totalisée remplit la fonction visée,

b) que la "minimalisation des déploiements d'énergie évalués du point de vue de l'exergie, de la pertinence

pour l'environnement, calorique ou sur le plan des frais" ou la "minimalisation des ressources de la nature mises en oeuvre directement" est prédéfinie comme fonction visée, le critère d'évaluation pouvant également être fixé différemment pour chaque agrégat séparé,

5 c) que, comme conditions marginales, on utilise les états de l'air à la sortie des agrégats séparés pour ce qui est de la température, de l'humidité absolue, de l'enthalpie spécifique et de la température du point de rosée - par rapport à une pression de l'air constante qui peut être différente pour chaque agrégat séparé - ou des grandeurs dérivées de ceux-ci et que l'on prédéfinit des limitations de la mise en oeuvre de l'agrégat pour ce qui est de la quantité d'air passée, des paramètres d'écoulement du côté des agents de chauffage ou des agents de refroidissement, de la puissance, des paramètres d'état de l'air à traiter ou des caractéristiques spécifiques aux agrégats,

10 d) que les modifications d'état réalisables techno-physiquement dans les différents agrégats - en partant des états de l'air amené qui interviennent, discrétisés selon la température et l'humidité - sont étudiées dans des pas de paramètres caractéristiques pour l'agrégat (augmentations de température, augmentations de l'humidité, baisses de la température d'entrée de l'eau de refroidissement etc.), l'examen ne consistant, pour des agrégats non régulés, qu'en un seul pas, avec le premier résultat de l'état de sortie de l'air qui, après avoir appliqué un algorithme d'arrondi, se présente à nouveau sous forme discrétisée, et le second résultat d'un membre de la somme pour l'évaluation globale dans le sens de la fonction visée, cependant que, dans le cas où plusieurs pas de paramètres provoquent le même état de sortie de l'air discrétisé, c'est le pas qui atteint le terme le plus favorable (le plus petit ou le plus grand) de la somme dans le sens de la fonction visée qui intervient dans l'évaluation et

25 e) qu'après ceci, la marche de chaque agrégat séparément ou des agrégats réunis en groupes peut être commandée ou régulée, les paramètres de sortie de l'air optimisés pouvant, dans le dernier cas, être utilisés comme valeurs nominales.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce

30 qu'à la place de l'état de l'air ambiant prédéfini, un état de l'air ambiant défini par les paramètres des courants d'air d'entrée ou une plage d'état de l'air ambiant définie pour ce qui est de la température et de l'humidité, dont les limites peuvent être prédéfinies aussi bien en fonction des charges de chaleur et d'humidité intérieures - qui peuvent être déterminées à partir des états de l'air pour l'air d'évacuation et l'air amené, mesurés pendant la marche de l'installation (delta h/delta x, pièce), du nombre de personnes dans la pièce et/ou des appareils électriques qui se trouvent en marche - que des conditions atmosphériques extérieures et du temps d'utilisation, les tronçons de température et d'humidité discrétisés (delta t et delta x), dont les points centraux de surface se situent à l'intérieur de la plage définie, sont équivalents entre eux.

40 3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce

que la conduite optimale du processus inclut également une optimisation du passage d'air, des limites déterminées sur le plan de l'hygiène, de la technique de la conduite de l'air et/ou de la physique du bâtiment pouvant être prédéfinies.

45 4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel l'installation de climatisation d'air comprend un certain nombre d'agrégats individuels, à savoir au moins un agrégat de chauffage (EH), un agrégat de refroidissement (KU) et un agrégat d'humidification (WA) et présente des capteurs qui donnent les états actuels de l'air (pression (p), température (t), humidité (x) et/ou également d'autres paramètres de l'état de l'air) pour l'air extérieur, l'air d'évacuation et l'air amené, cependant qu'en raison des résultats d'optimisation déterminés dans le sens de la fonction visée en tenant compte des conditions marginales de technique de climatisation et spécifiques aux agrégats, tous les agrégats ou combinaisons partielles d'agrégats, avec lesquelles on peut atteindre la plage d'état nominal de la pièce (t SOLL min...t SOLL max, x SOLL min... x SOLL max, phi SOLL min...phi SOLL max, tau SOLL min...tau SOLL max), étant utilisés,

55 caractérisé en ce

a) qu'en tenant compte des conditions marginales prédéfinies mémorisées, toutes les modifications de température et/ou d'humidité possibles avec les agrégats séparés sont considérées dans i tronçons de température $\Delta t \leq 1 \text{ K}$ et dans j tronçons d'humidité $\Delta x \leq 1 \text{ g/kg}$ et la somme de la fonction visée K est déterminée,

l'état de l'air extérieur (t AU, x AU) valant $K = 0$ comme point de départ,

b) que tous les états de l'air possibles techniquement sont caractérisés selon l'agrégat dans un champ d'étapes t,x e par le déploiement minimal (e,i,j) nécessaire jusqu'à ce point d'état dans le sens de la fonction visée,

c) que seulement les $K_{min}(e,i,j) \geq 0$ peuvent être des points de départ pour la modification d'état dans le prochain agrégat,

d) que la modification d'état dans la pièce, de préférence divisée dans la zone de séjour et une zone supérieure, est observée de manière techno-physique comme la modification d'état dans un agrégat, que cependant aucun additif n'est ajouté à la somme de la fonction visée,

e) que les points d'état t(e, i), x(e,j) occupés avec $K_{min}(e,i,j) \geq$ dans la zone de séjour de la pièce, qui se situent à l'intérieur de la plage nominale de la pièce représentent, en tenant compte de toutes les conditions marginales, les états de l'air ambiant techniquement possibles qui peuvent être atteints avec le processus de climatisation,

f) que le processus de climatisation optimal dans le sens de la fonction visée dans la zone de séjour de la pièce passe par le point d'état avec la plus petite valeur $K_{min}(e,i,j)$ occupée,

g) que l'optimisation du processus de climatisation est répétée à intervalles réguliers, ceci étant effectué pour des intervalles de temps prédéfinis ou en fonction des modifications d'état de l'air mesurées des paramètres d'entrée (air extérieur, air d'évacuation et/ou air amené), de préférence par rapport au temps.

5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce

que l'on fait varier les conditions marginales spécifiques aux agrégats et les modifications d'état possibles techniquement automatiquement selon une fonction prédéfinie d'approximation en partant des valeurs prédéfinies en utilisant la modification d'état de l'air mesurée effectivement et qu'elles sont mémorisées.

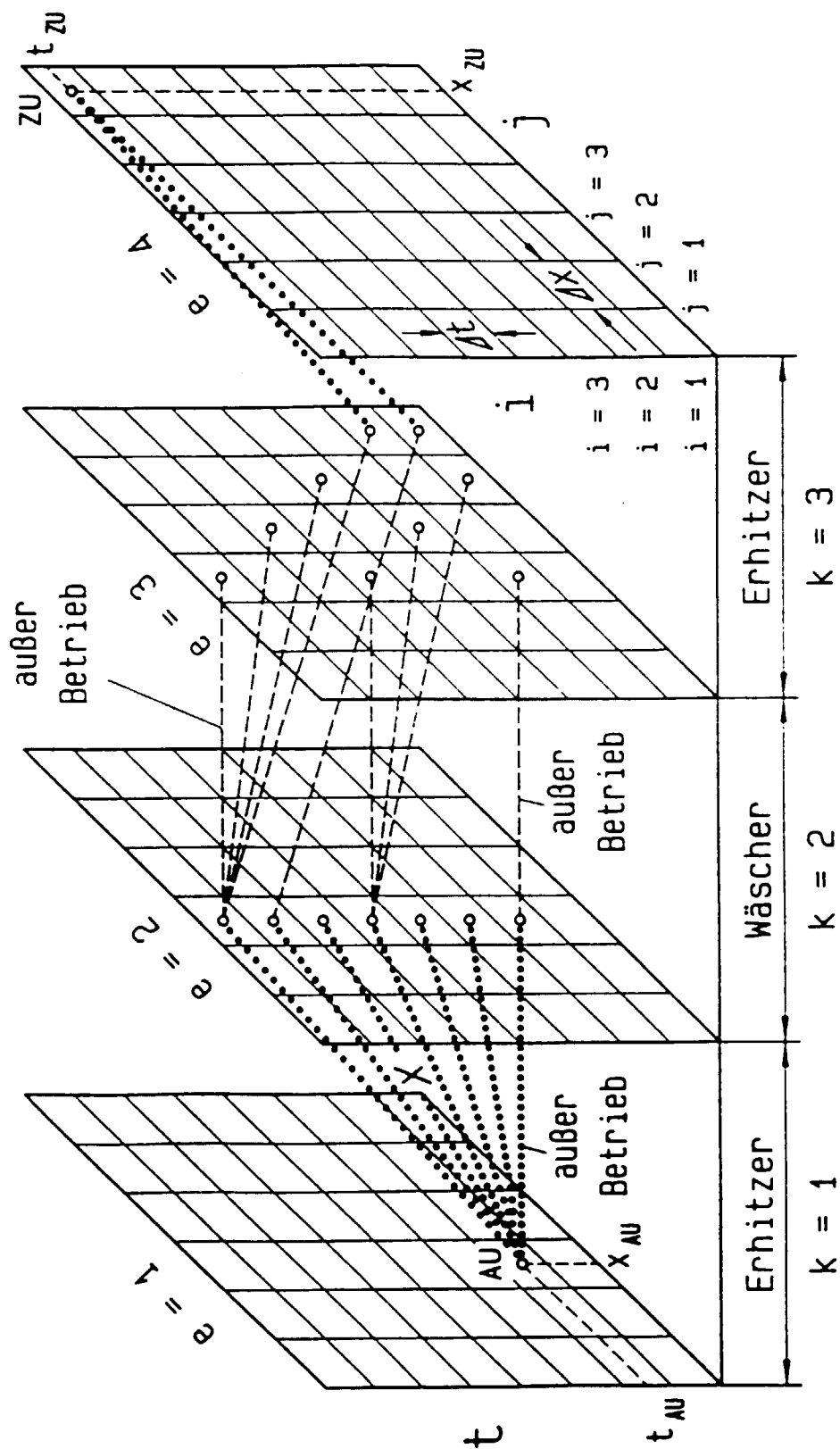


Fig. 1

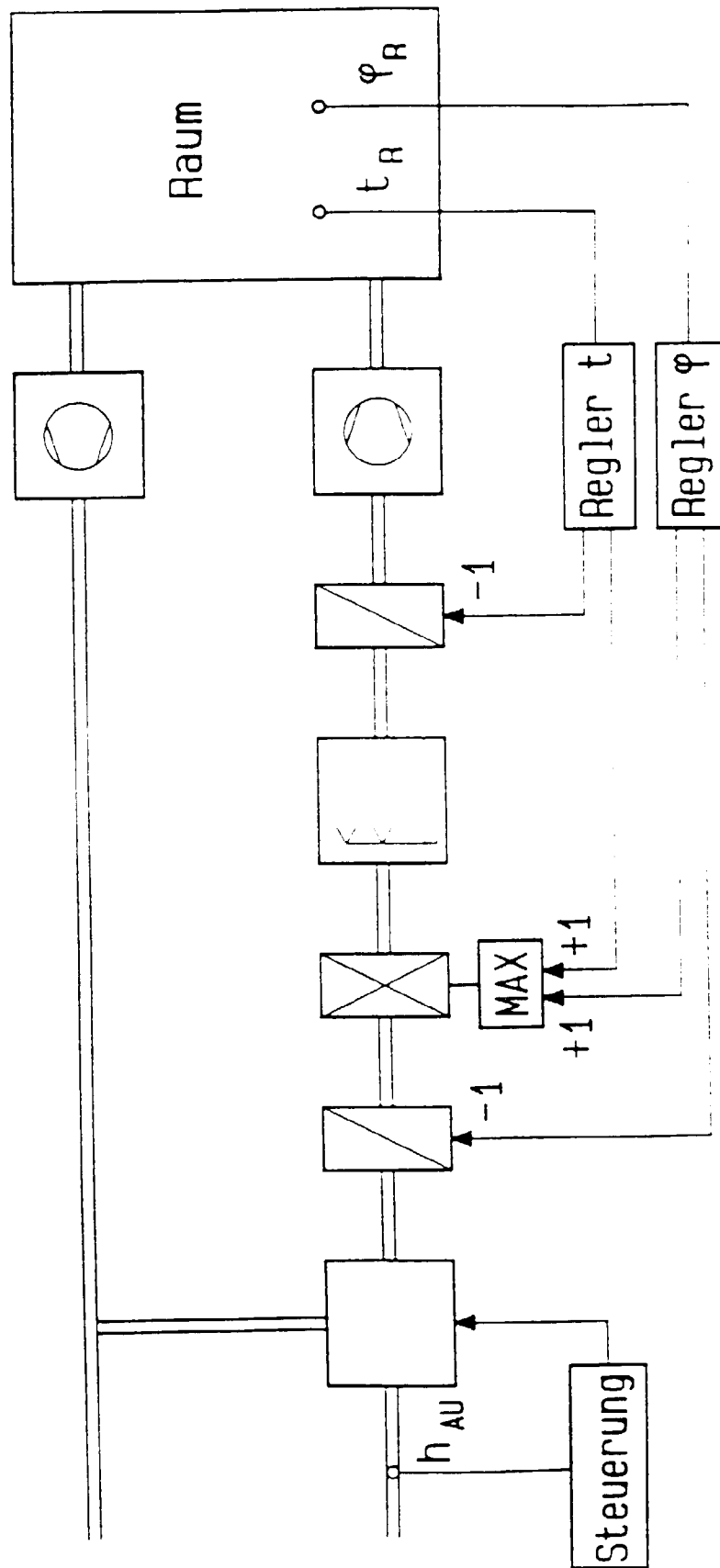


Fig. 2

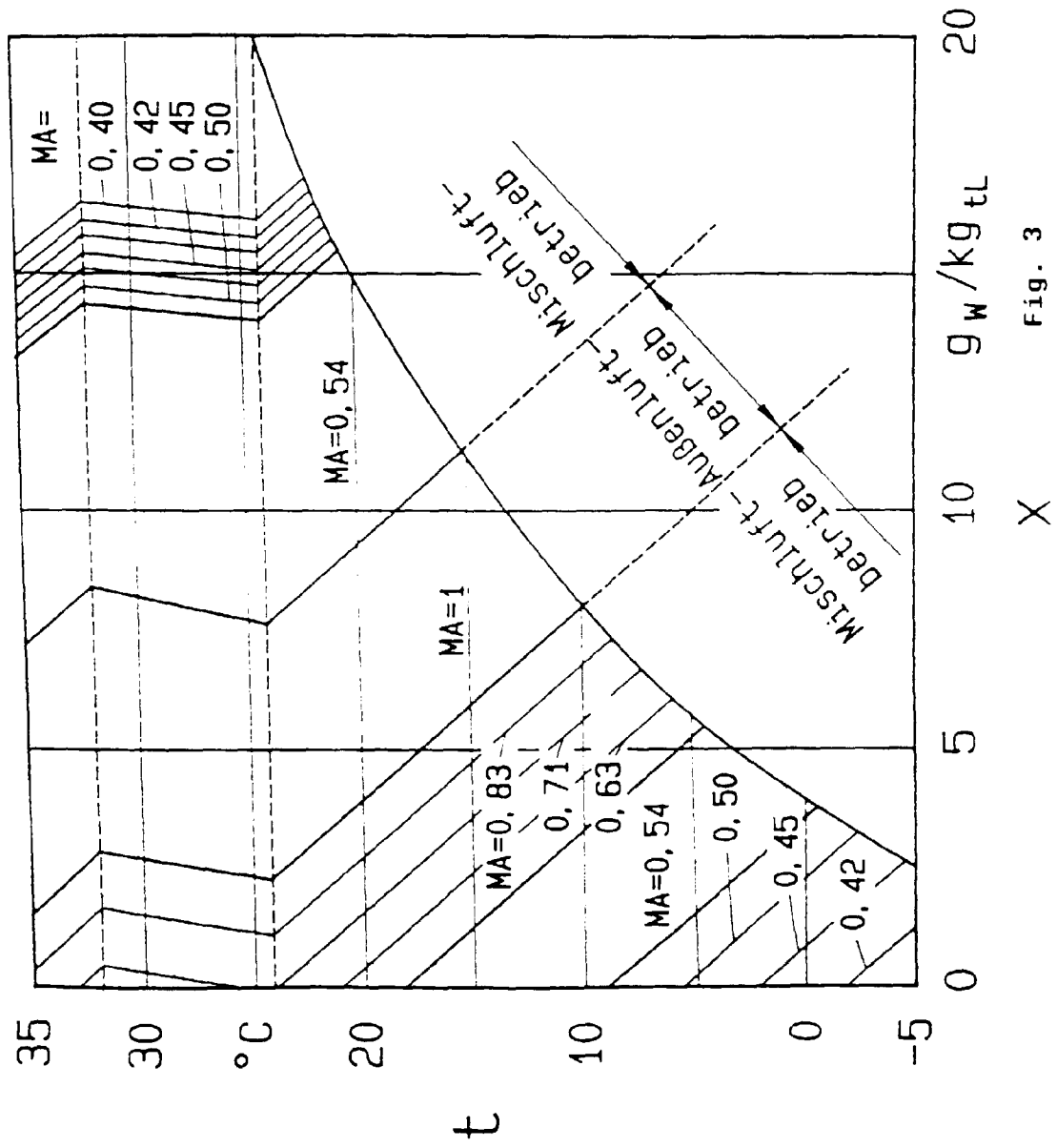


Fig. 3

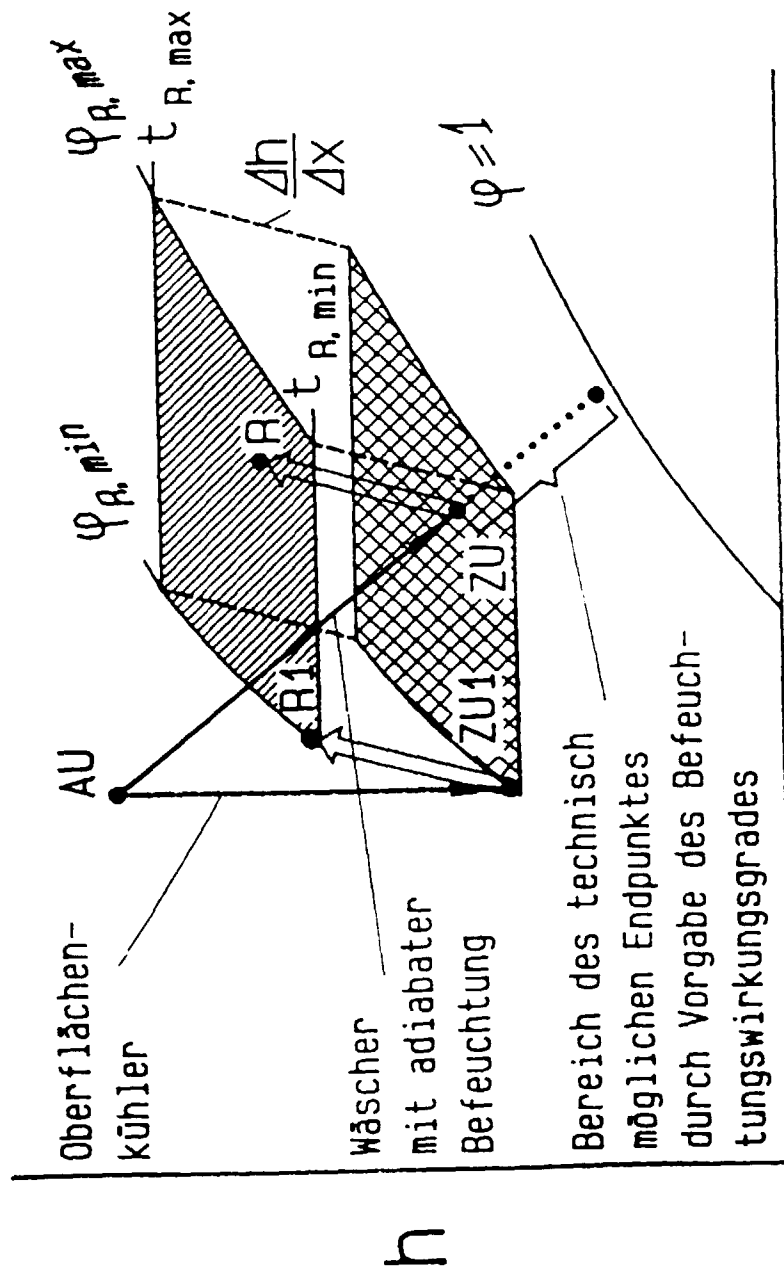


Fig. 4

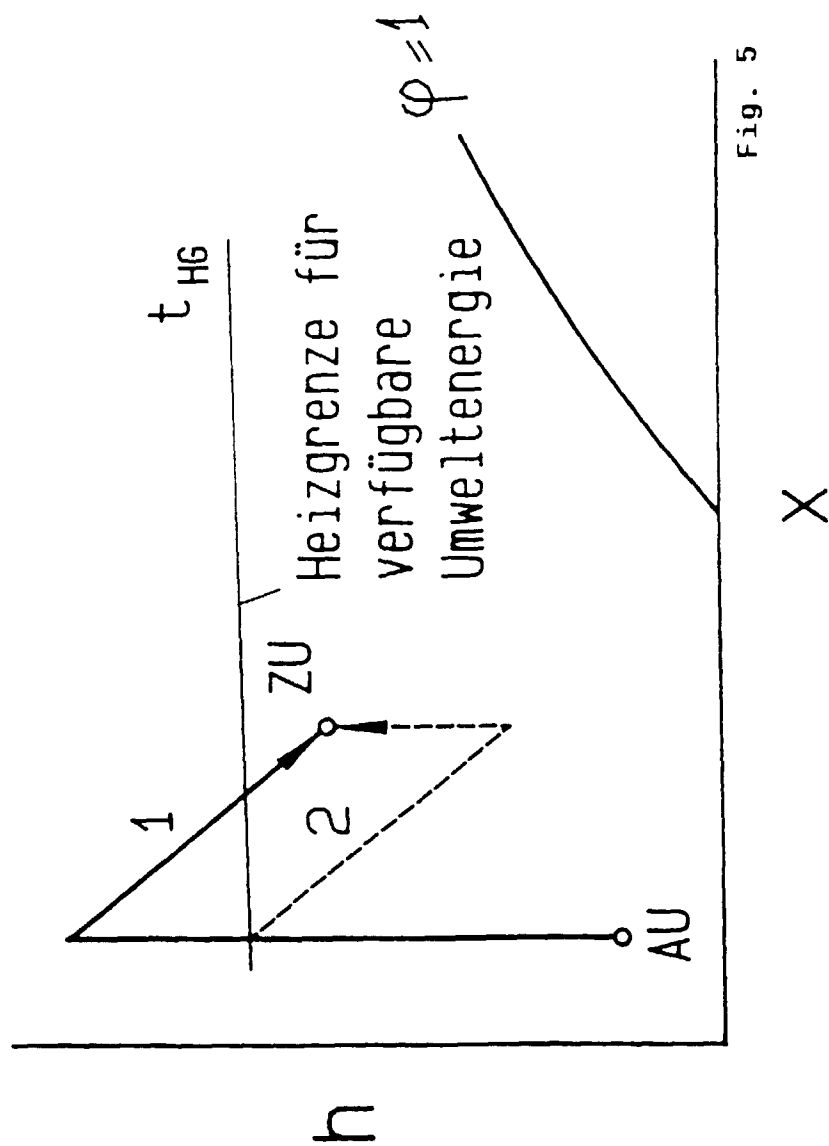


Fig. 5

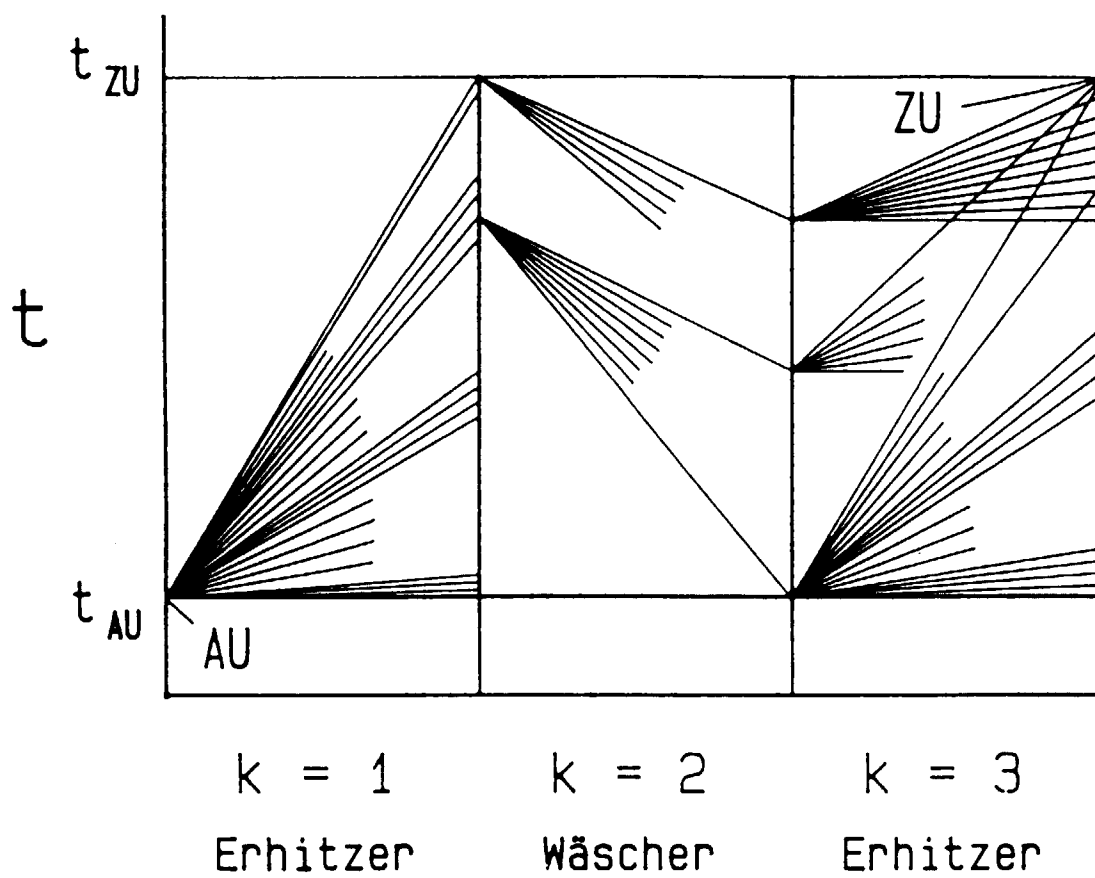


Fig. 6

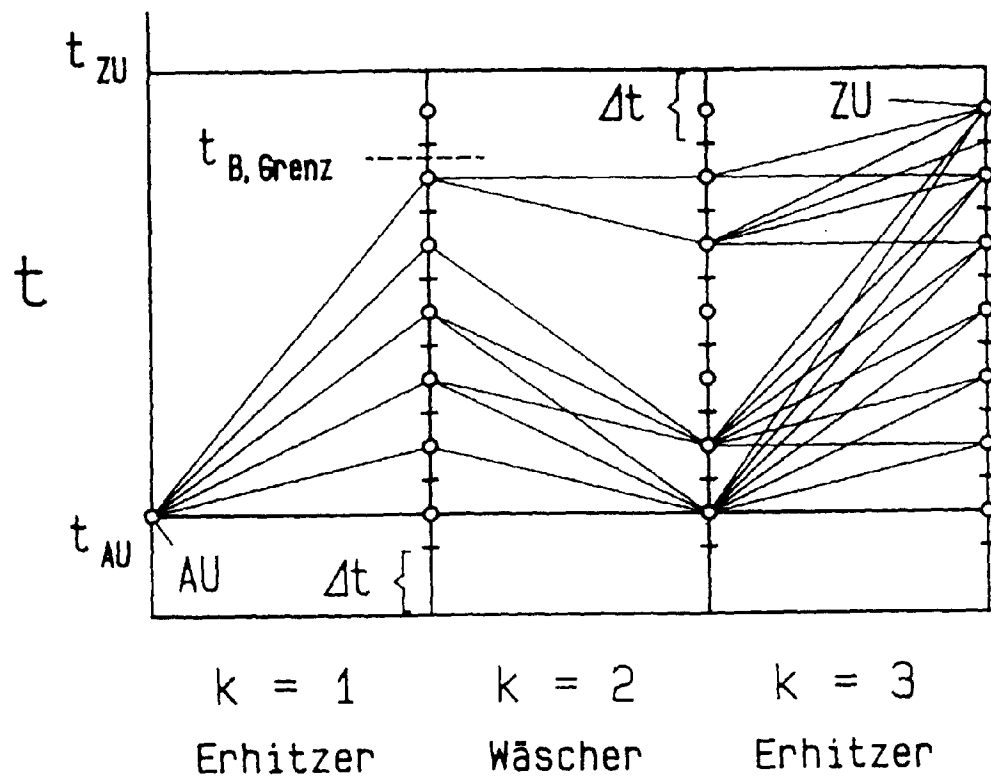


Fig. 7

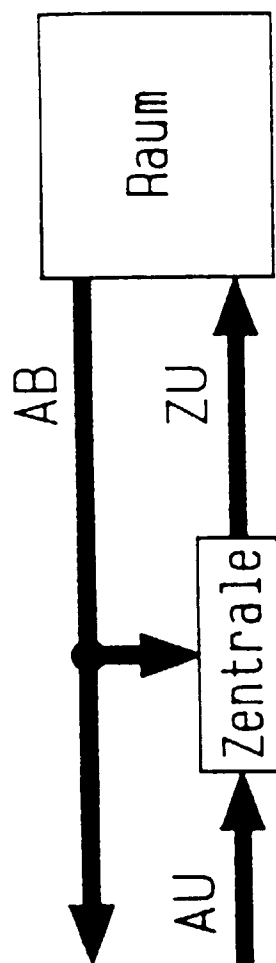


Fig. 8

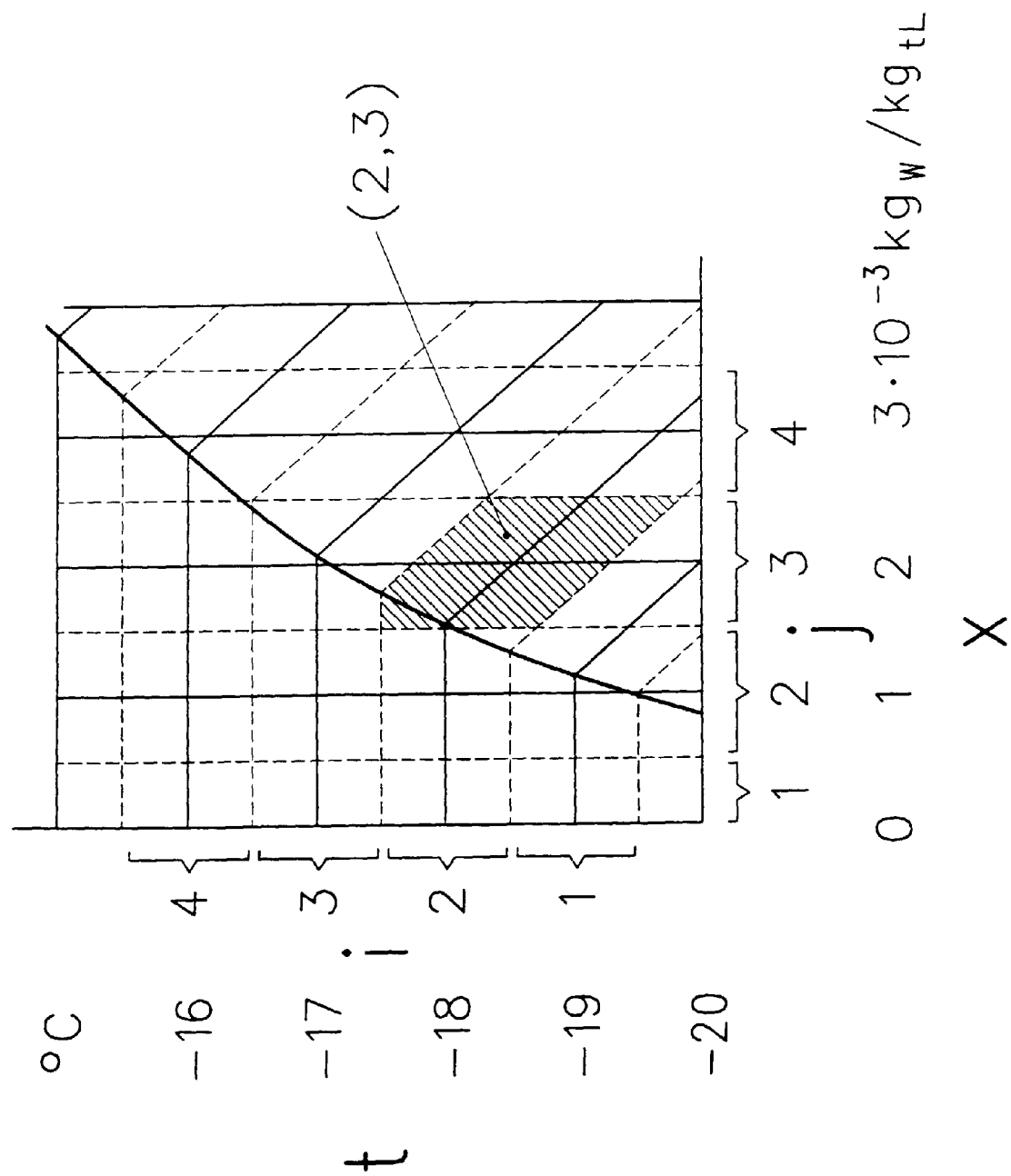


Fig. 9

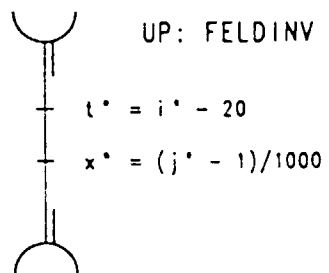
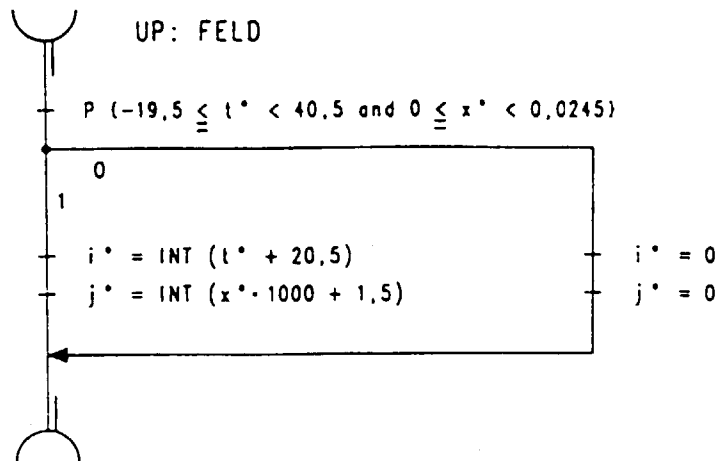


Fig. 10

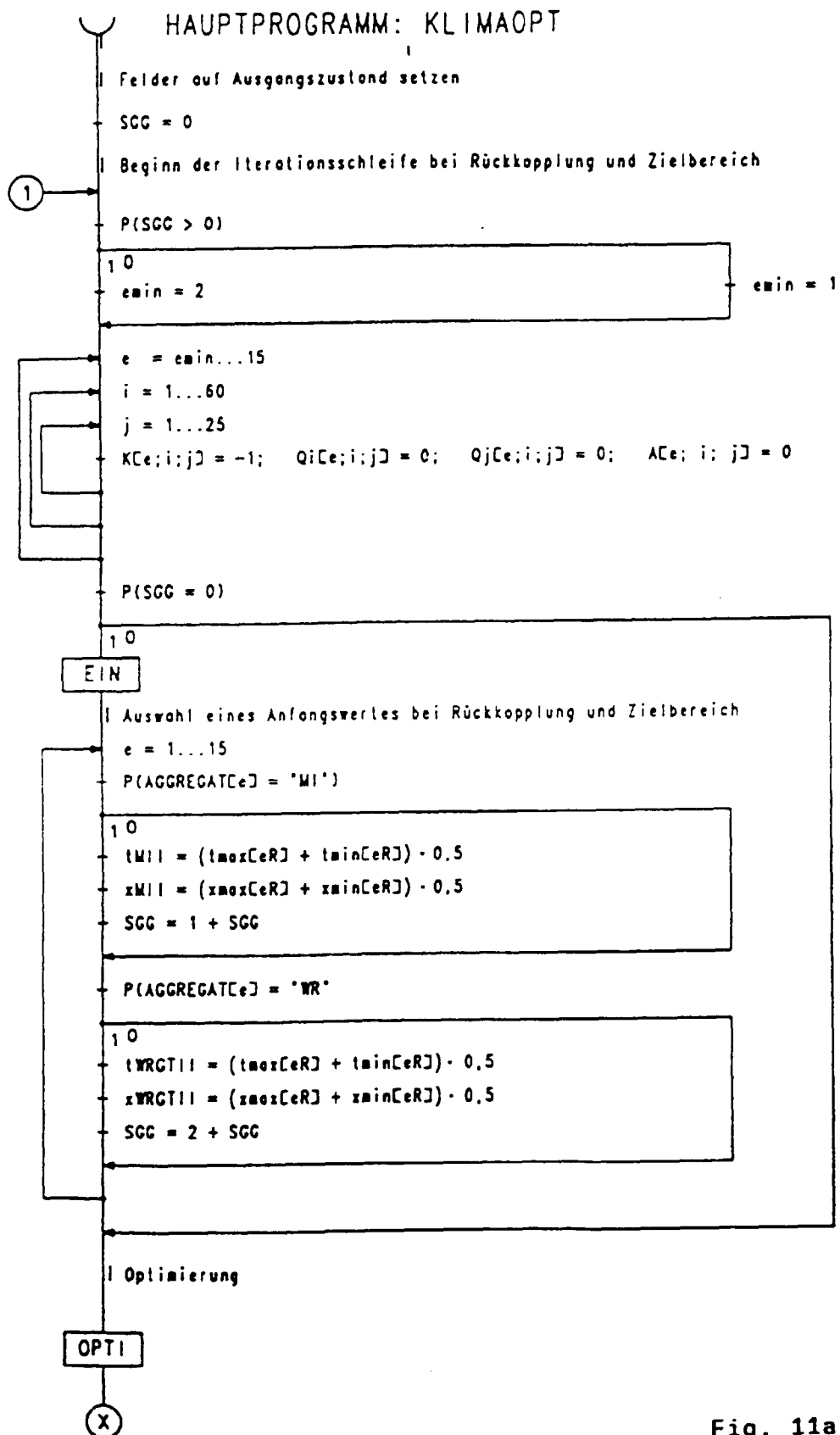


Fig. 11a

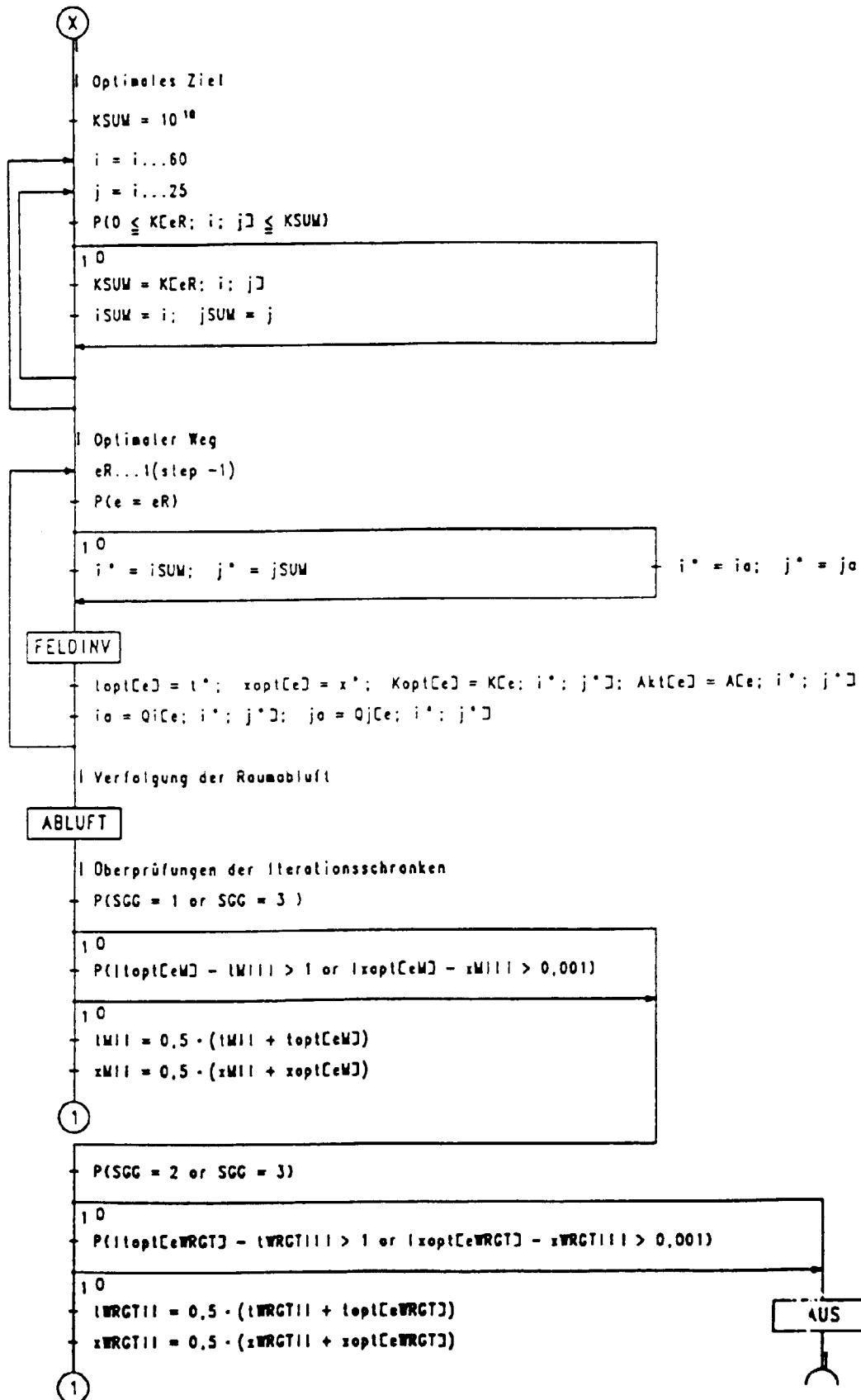


Fig. 11b

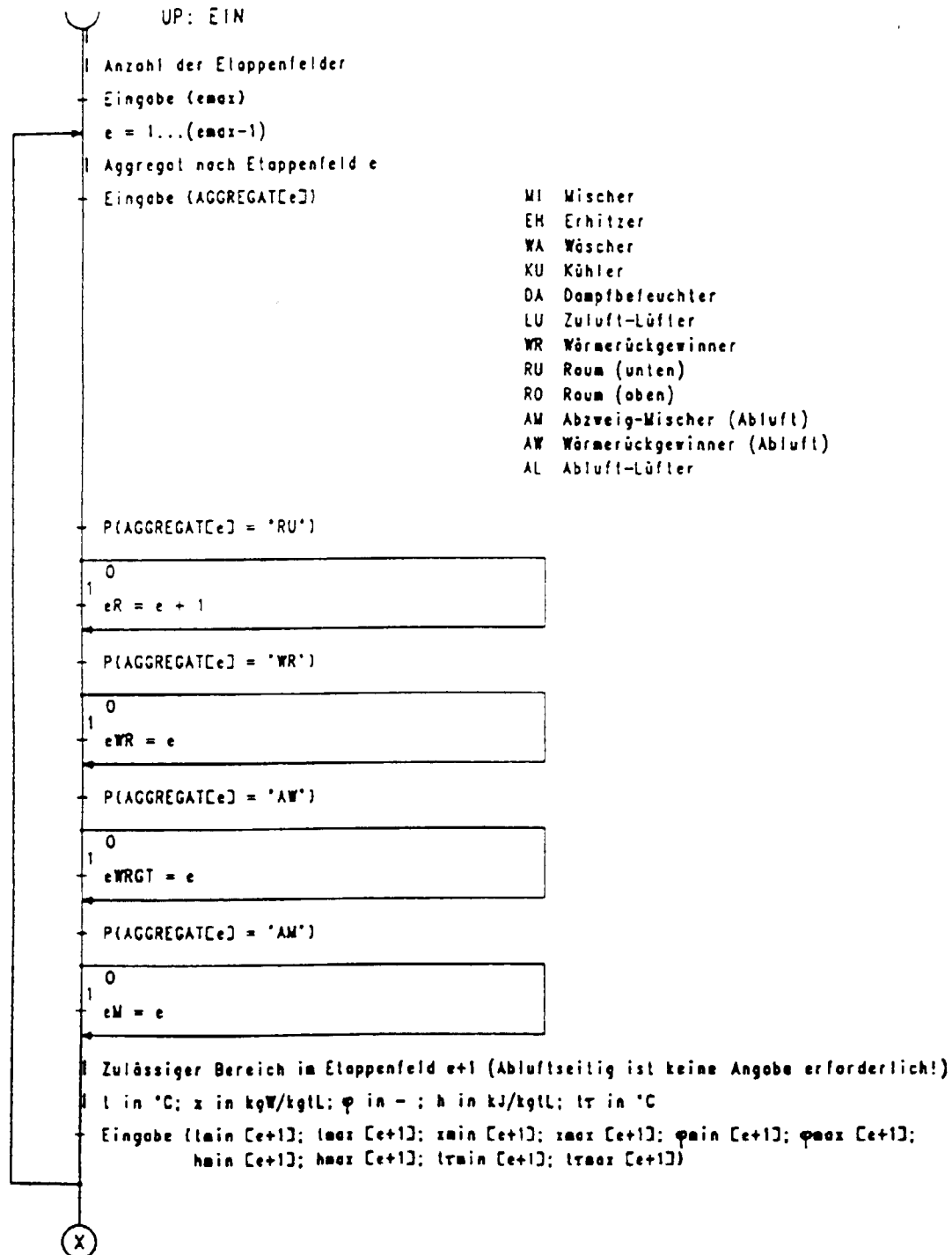


Fig. 12a

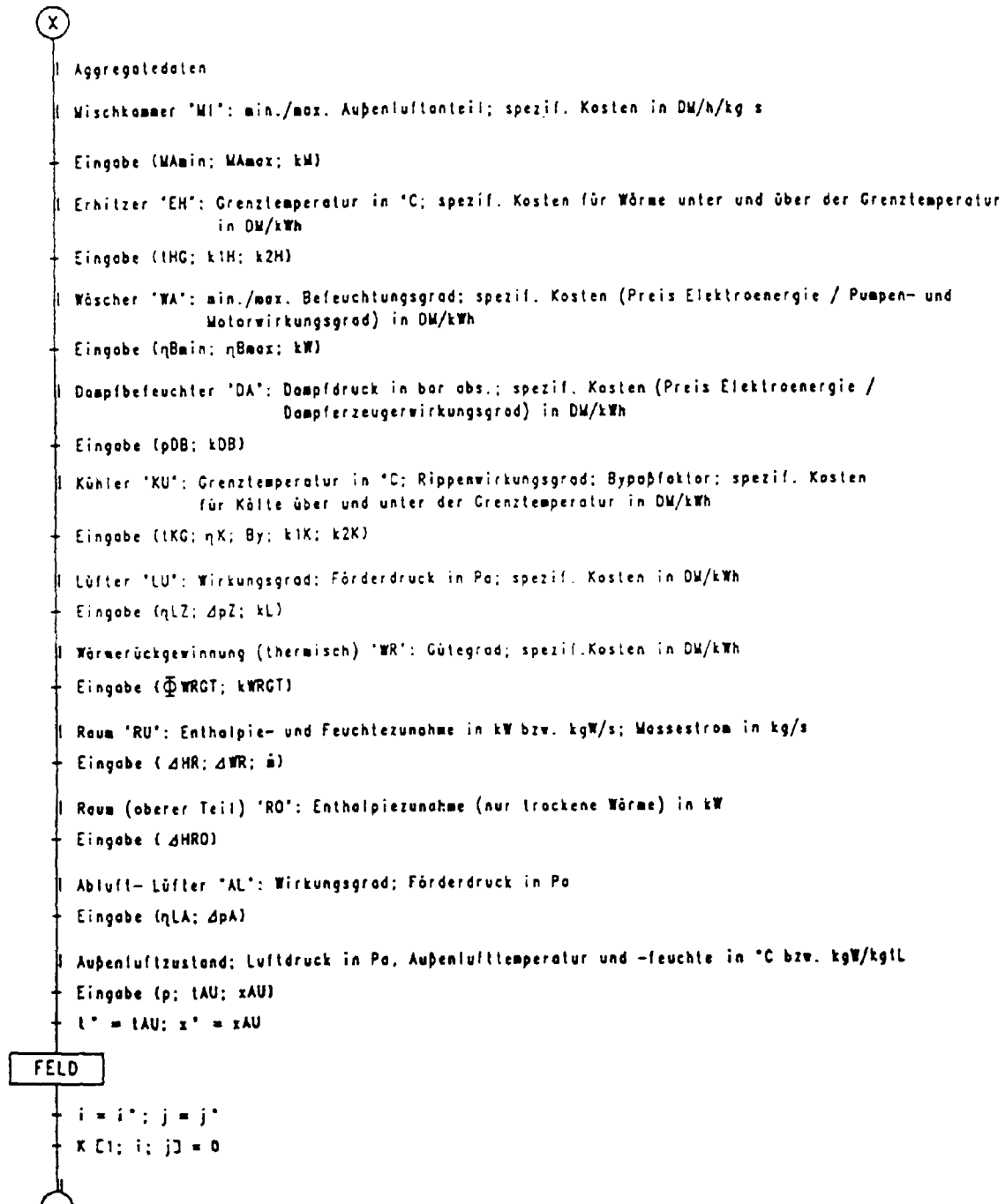


Fig. 12b

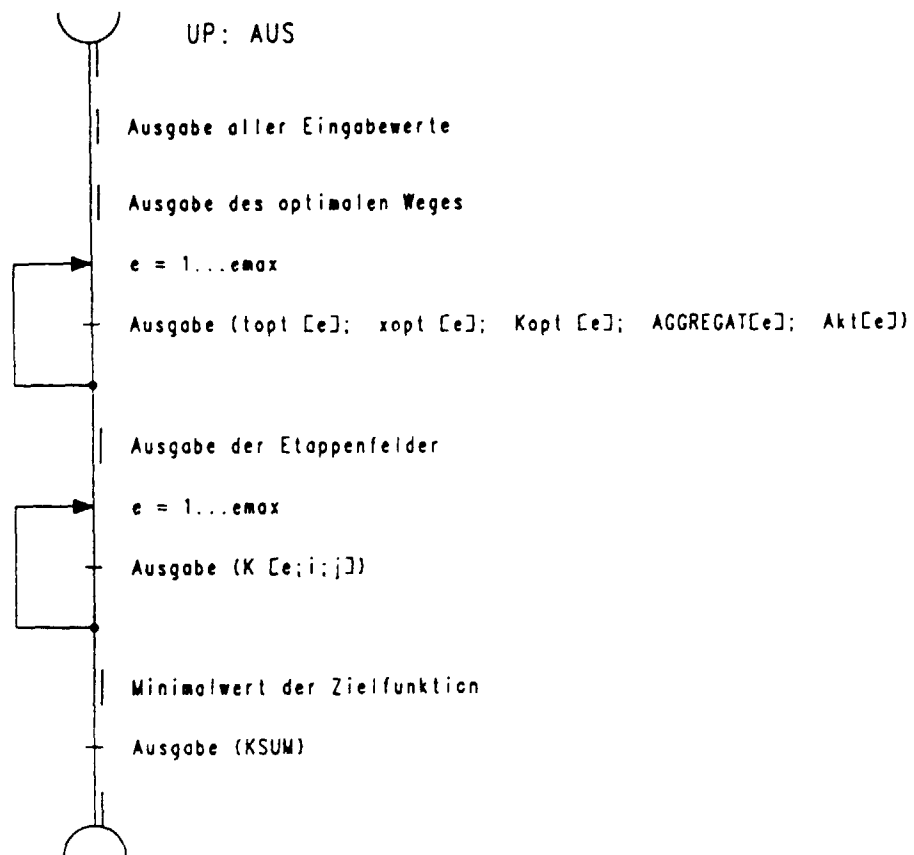


Fig. 13

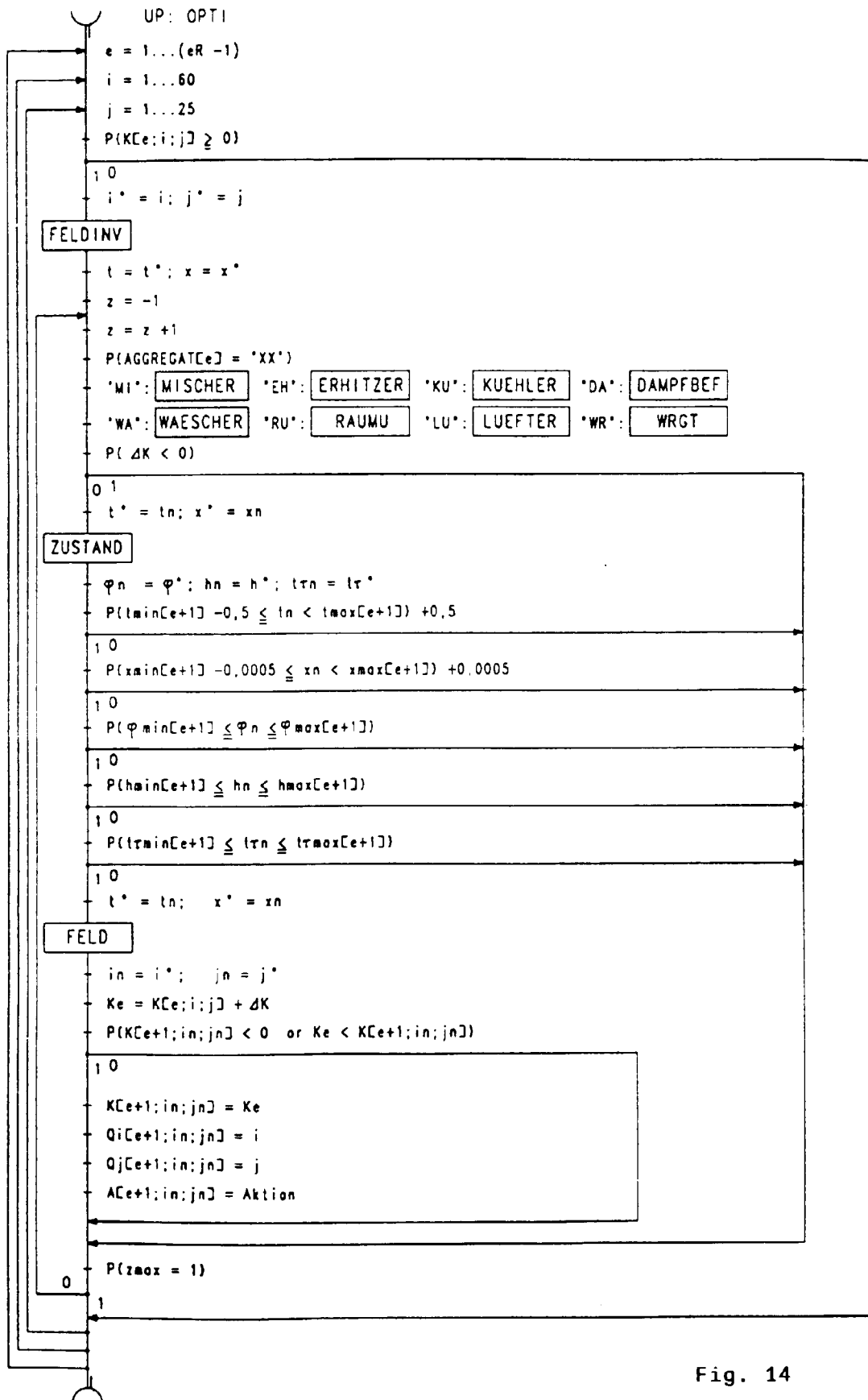


Fig. 14

		K[e; i; j]										K[e+1; in; jn]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	...	1	2	3	4	5	6	7	8	...		
i	:	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	16	12	-1	18	-1	
	11	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	14	10	-1	16	-1	
	10	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	12	8	-1	14	-1	
	9	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	10	6	-1	12	-1	
	8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	8	4	-1	10	-1	
	7	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	6	2	-1	8	-1	
	6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	4	0	-1	-1	-1	
	5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	2	-1	-1	-1	-1	
jn	4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	
	3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
	2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	

Fig. 15

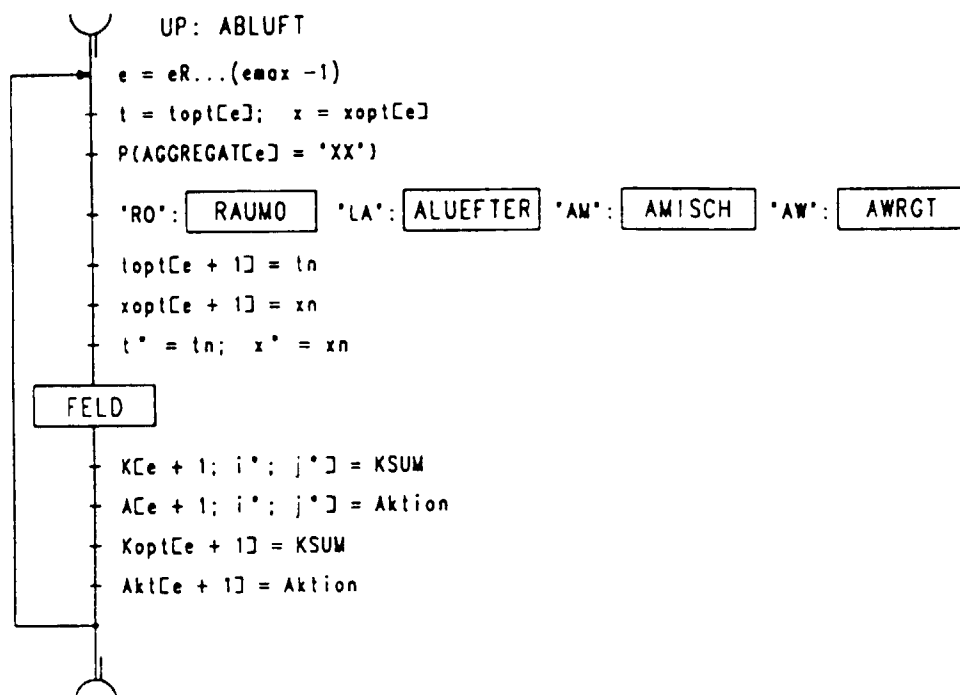


Fig. 16

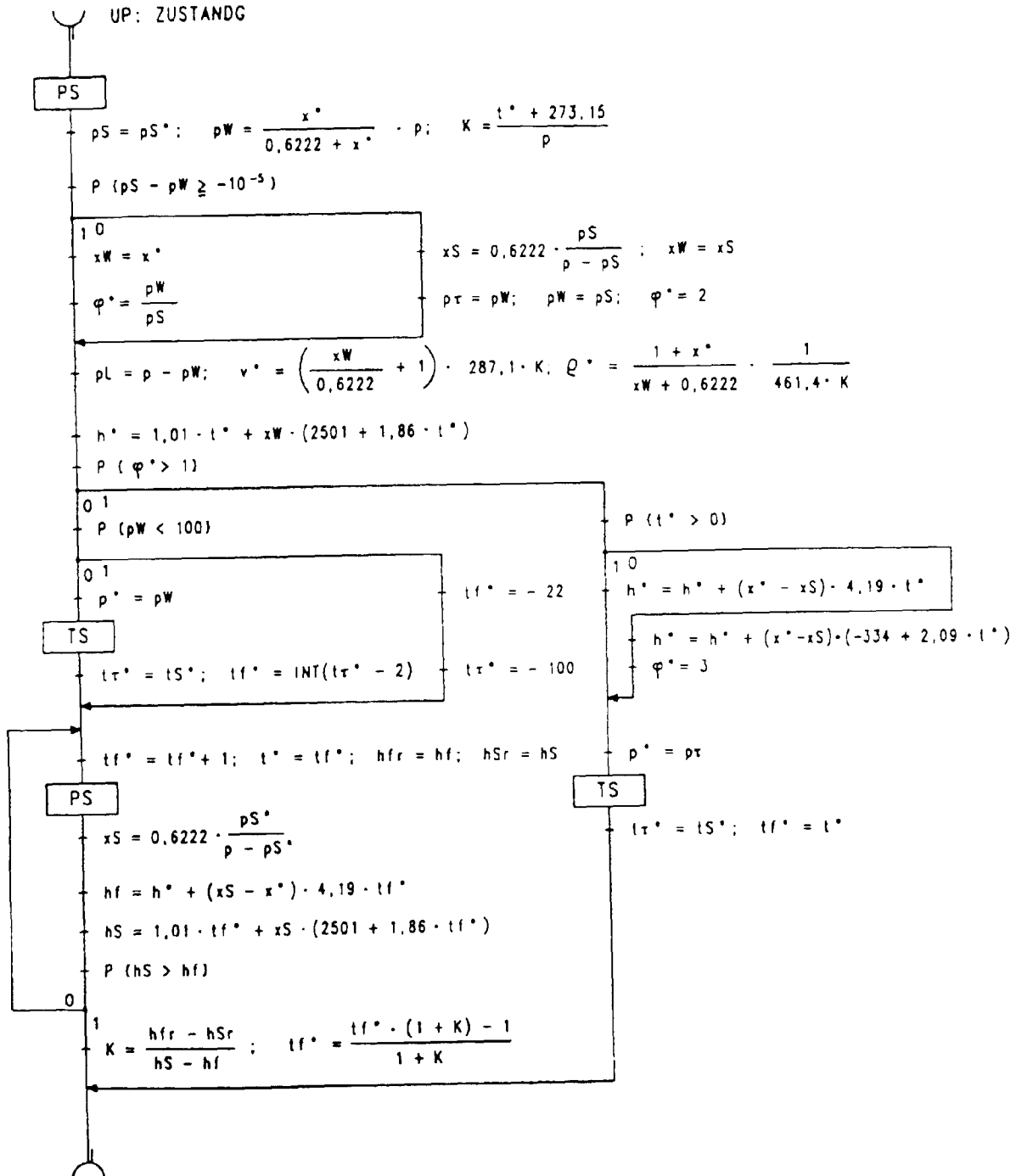


Fig. 17

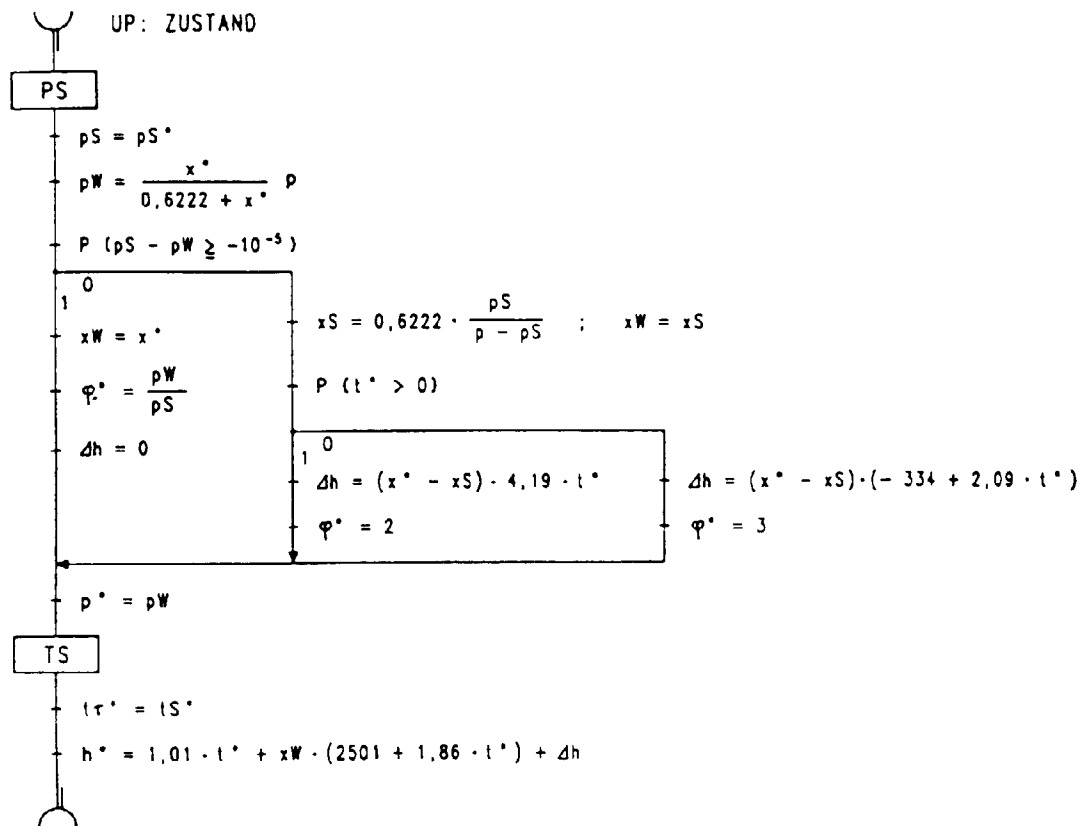


Fig. 18

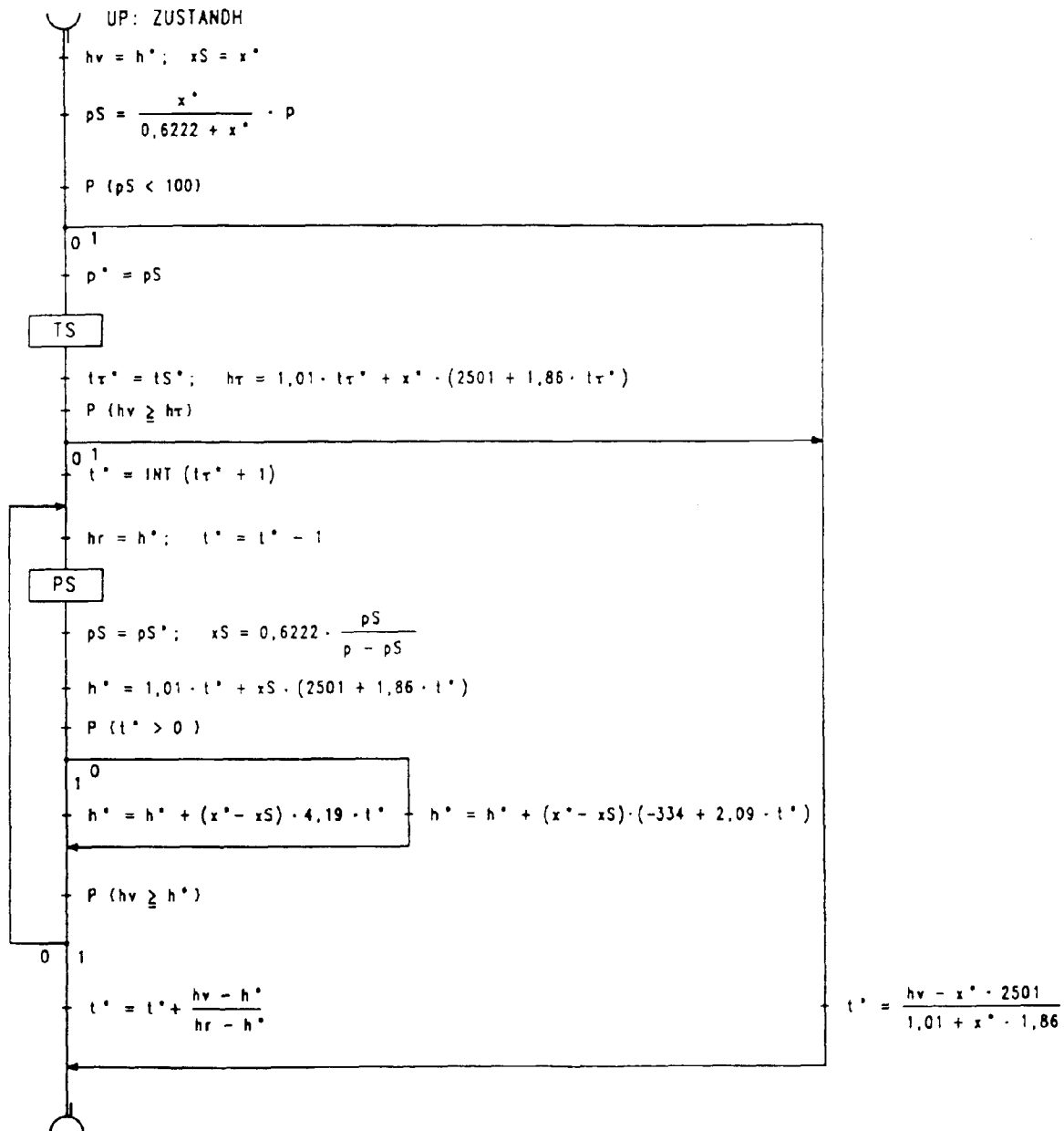


Fig. 19

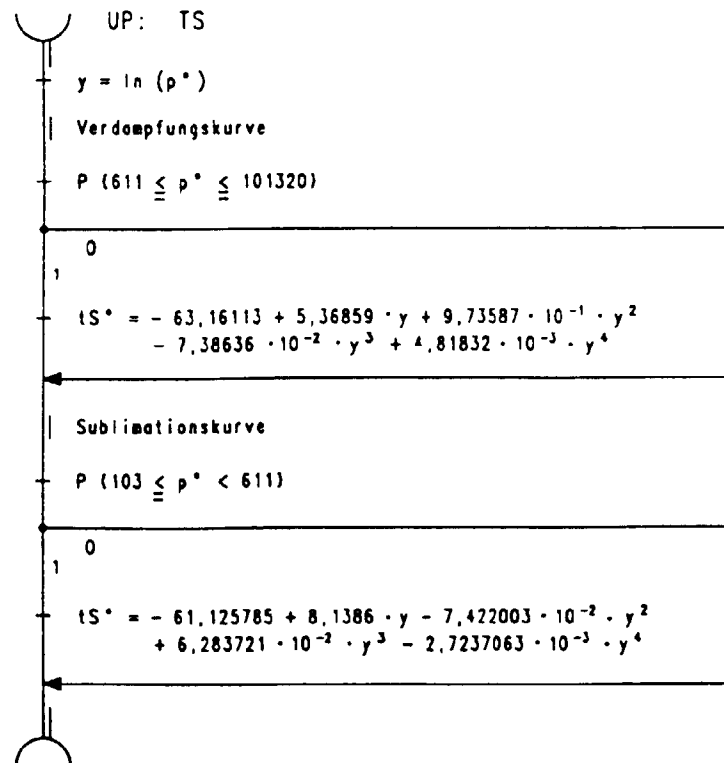
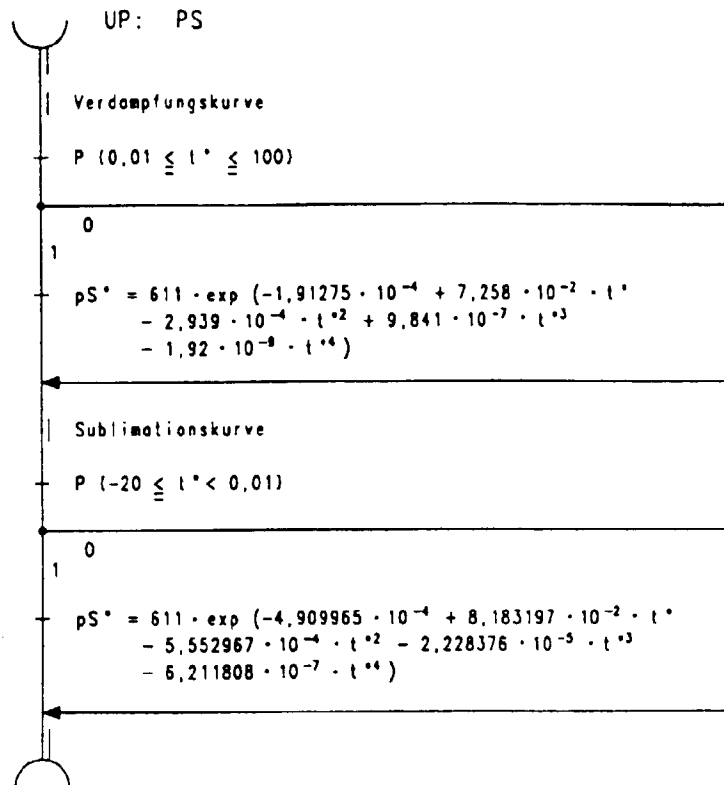


Fig. 20

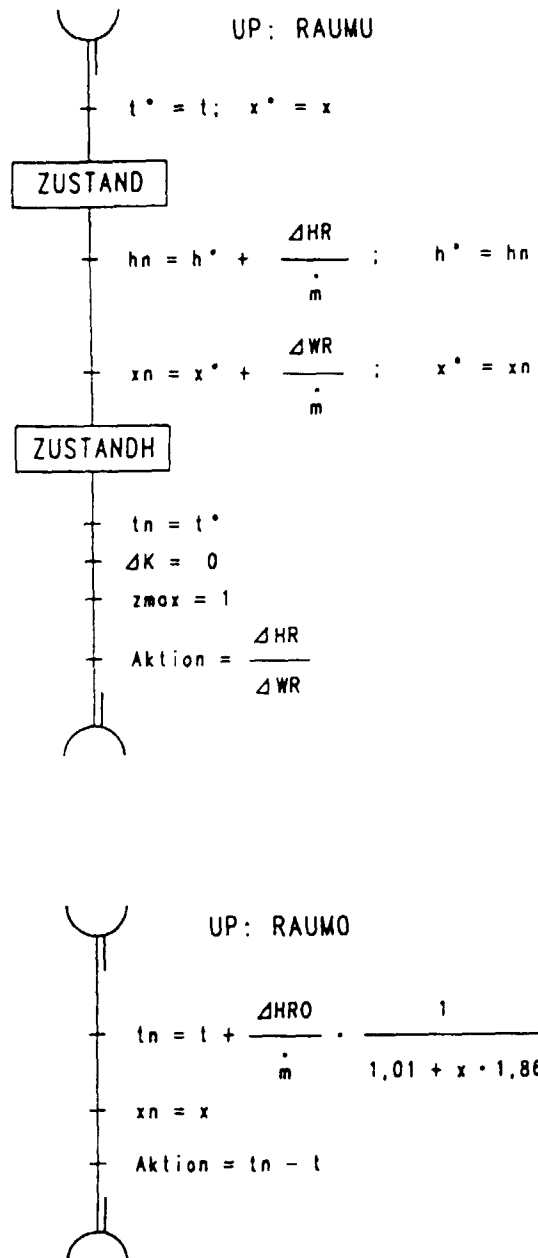


Fig. 21

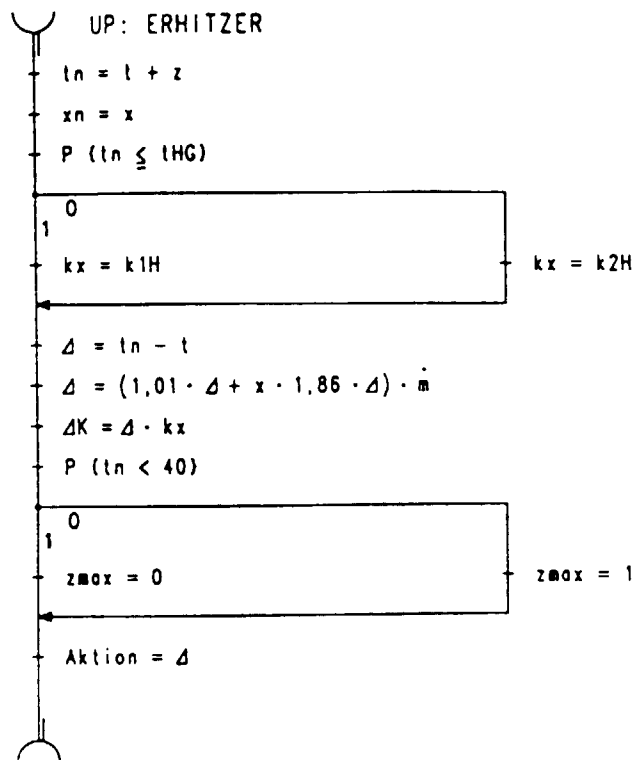


Fig. 22

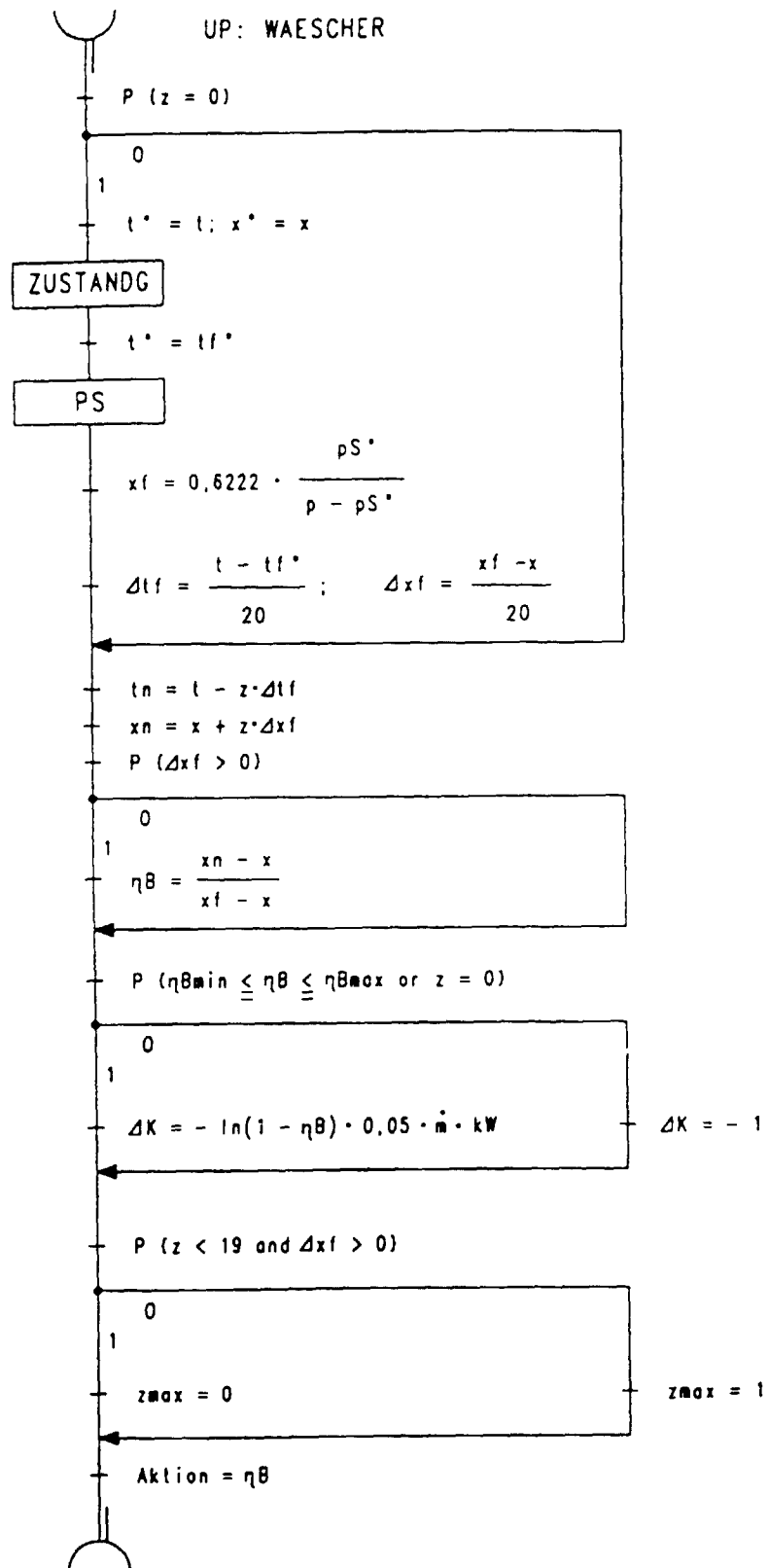


Fig. 23

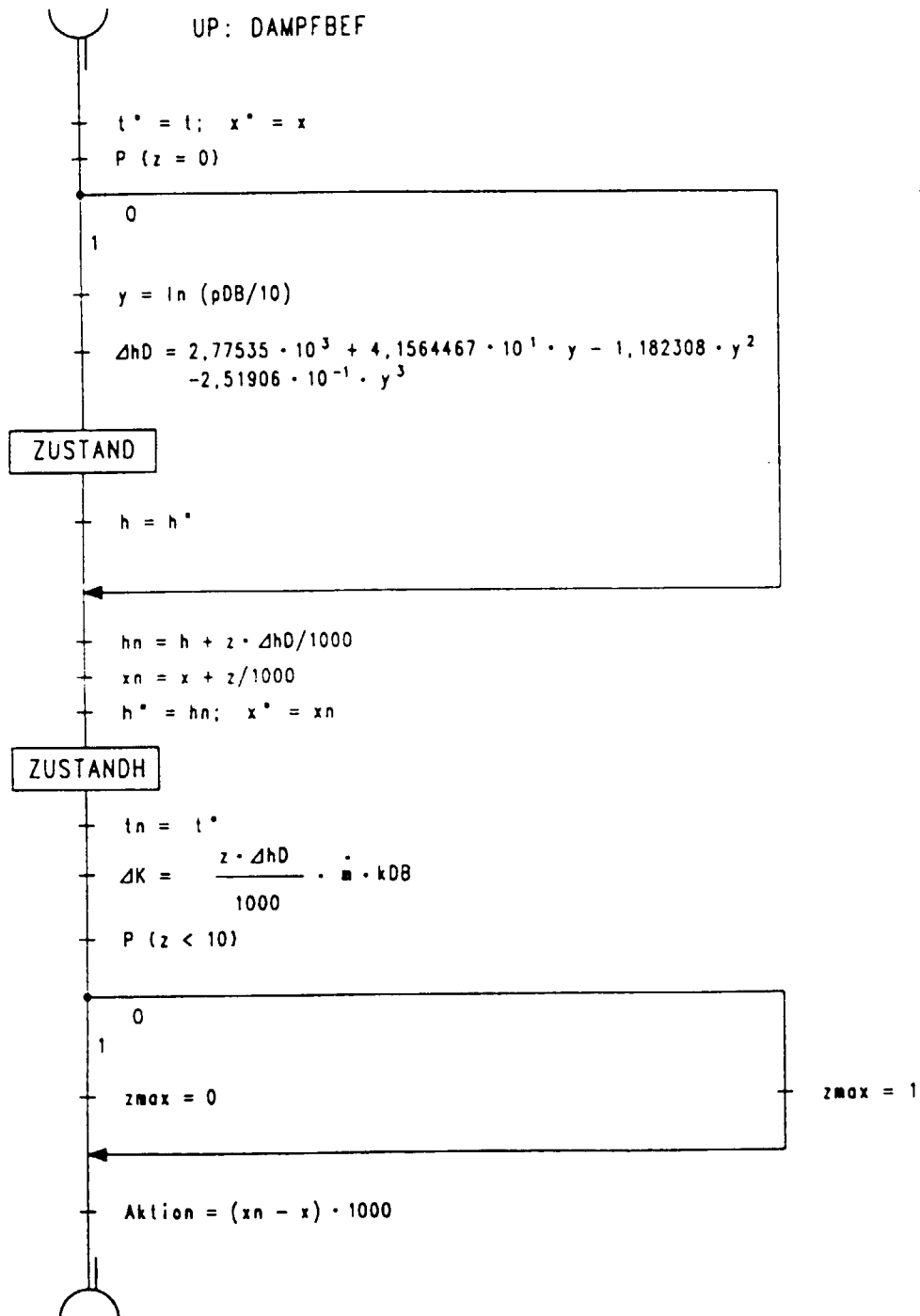


Fig. 24

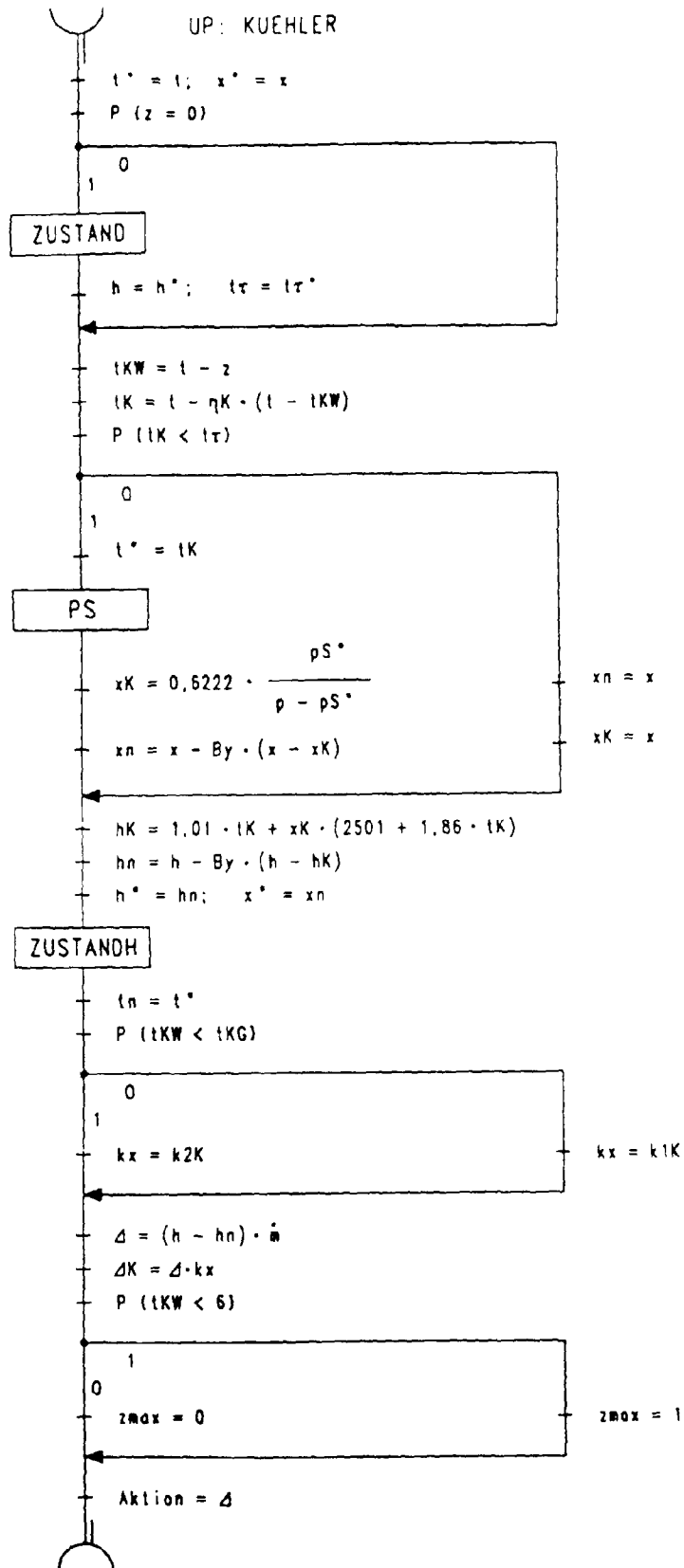


Fig. 25

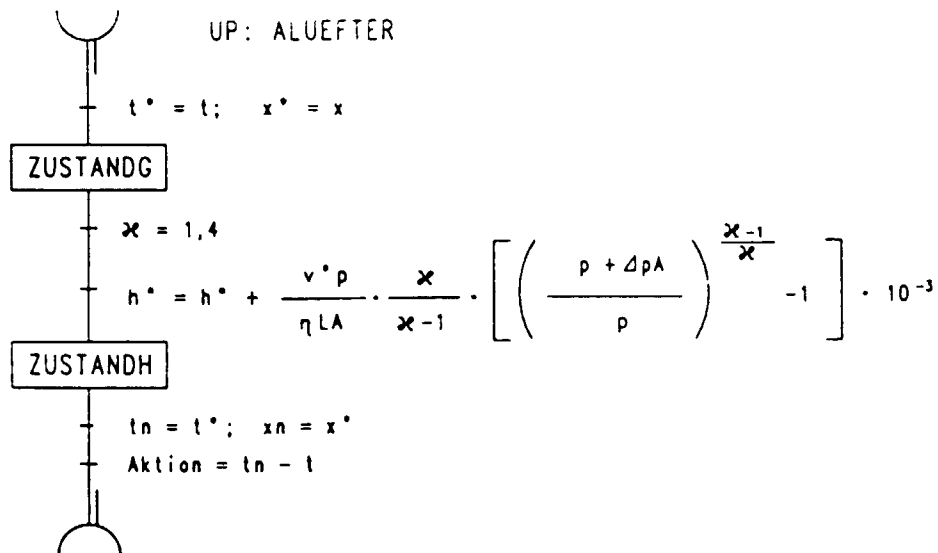
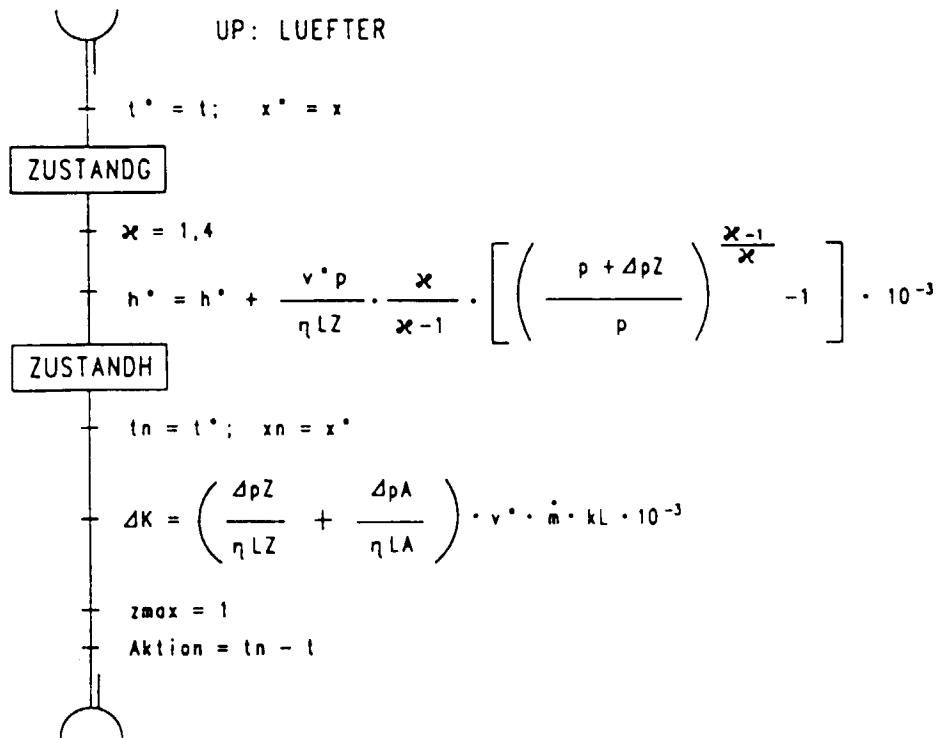


Fig. 26

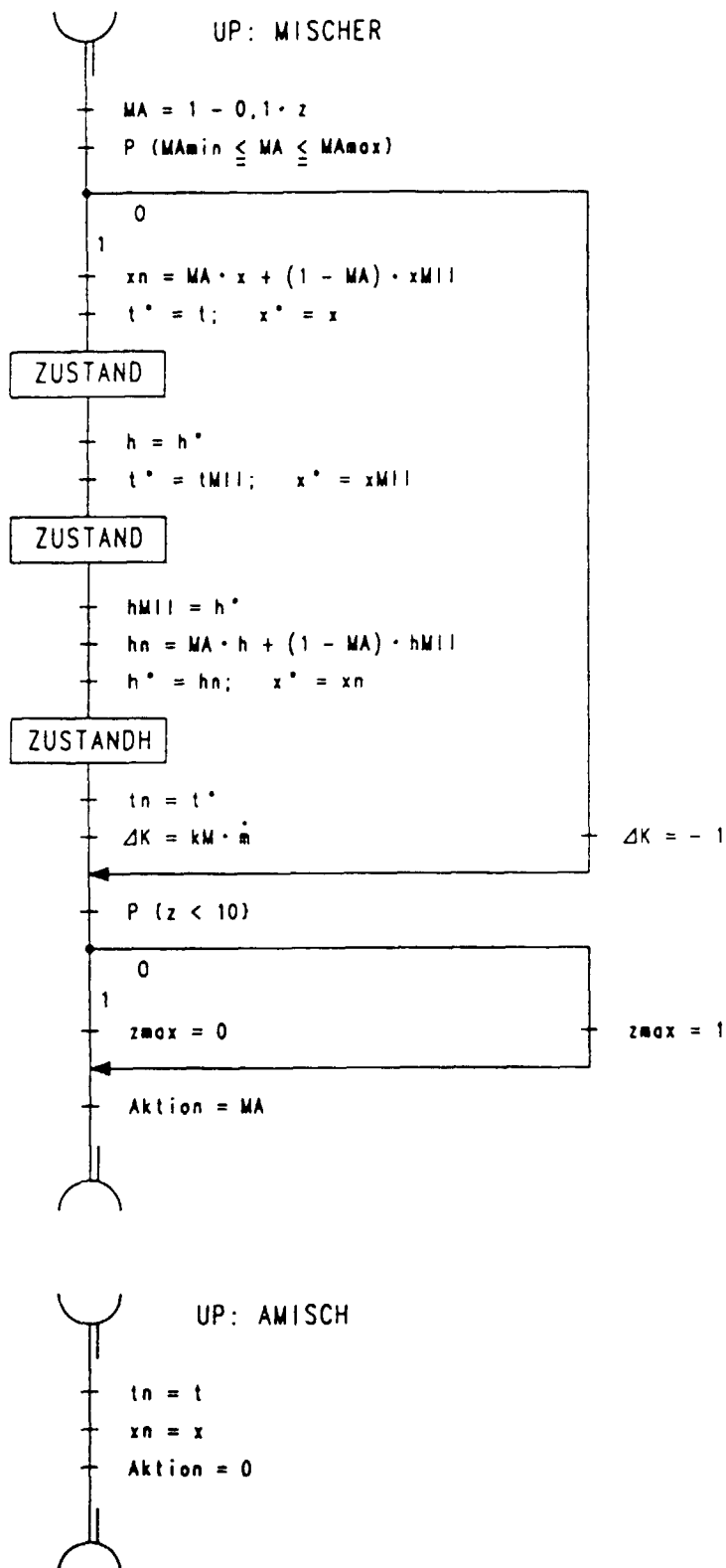


Fig. 27

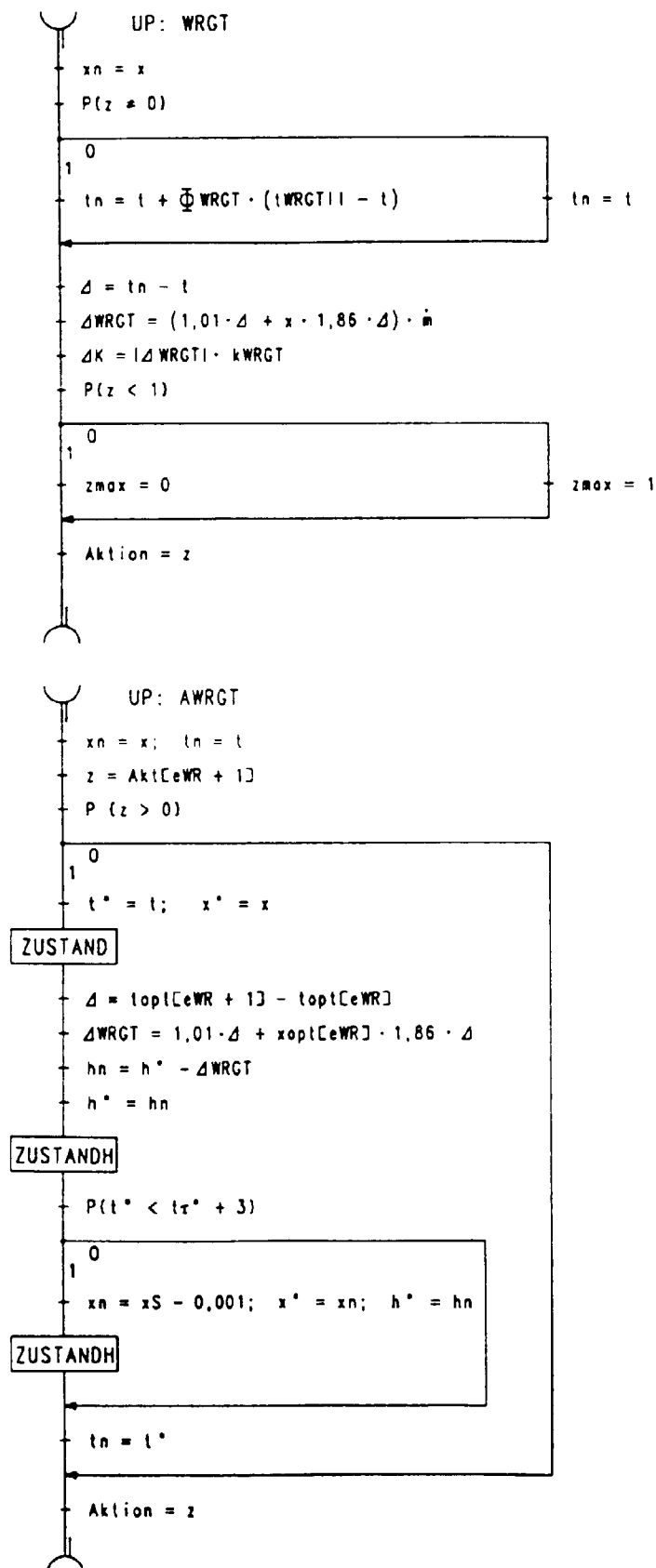


Fig. 28

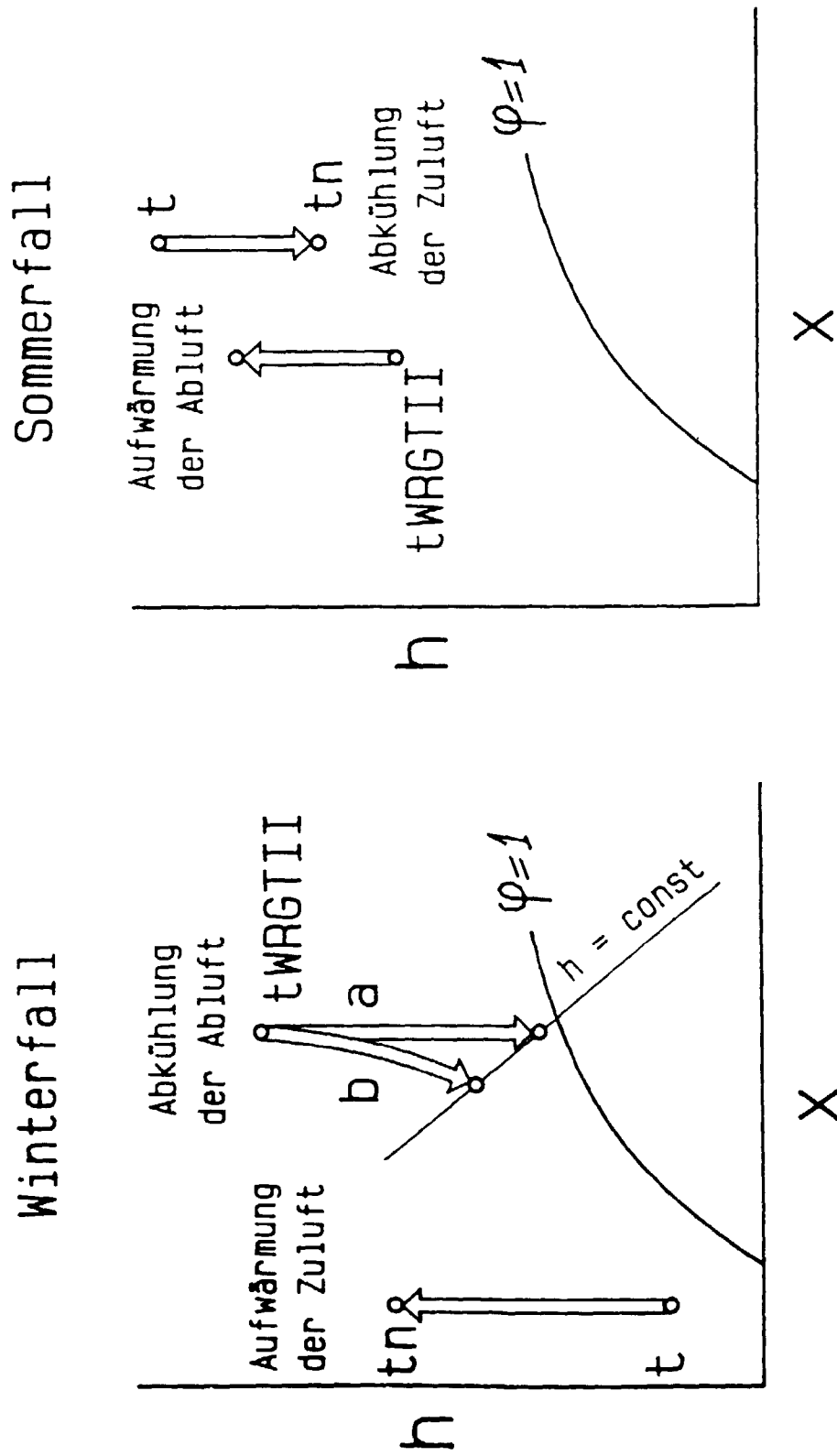


Fig. 29

ETAPPENFELD e = 1

[illegible]

Fig. 30

[illegible]

Fig. 30a

ETAPPENFELD e = 3

t °C	0	1	2	x in g Wasser/ kg trockene Luft										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	t_{opt} °C	x_{opt} g_w/kg_{tL}	K_{opt} 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 Luftmassestrom $\dot{m} = 8.80 \text{ kg/s}$

Fig. 31

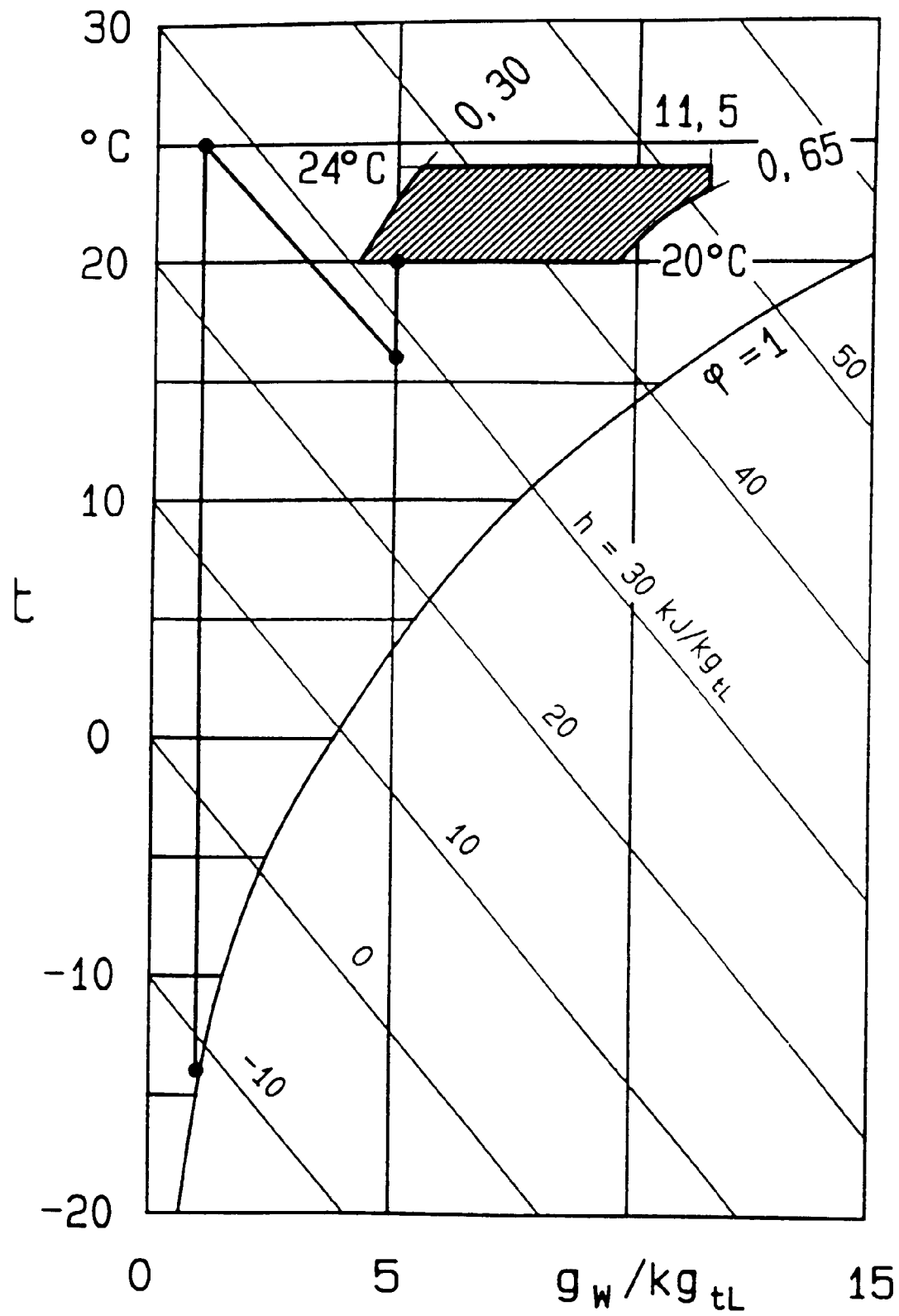


Fig. 32

OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	t_{opt} °C	x_{opt} g_w/kg_{tL}	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 _w (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 $\dot{m} = 8.80 \text{ kg/s}$

Fig. 33a

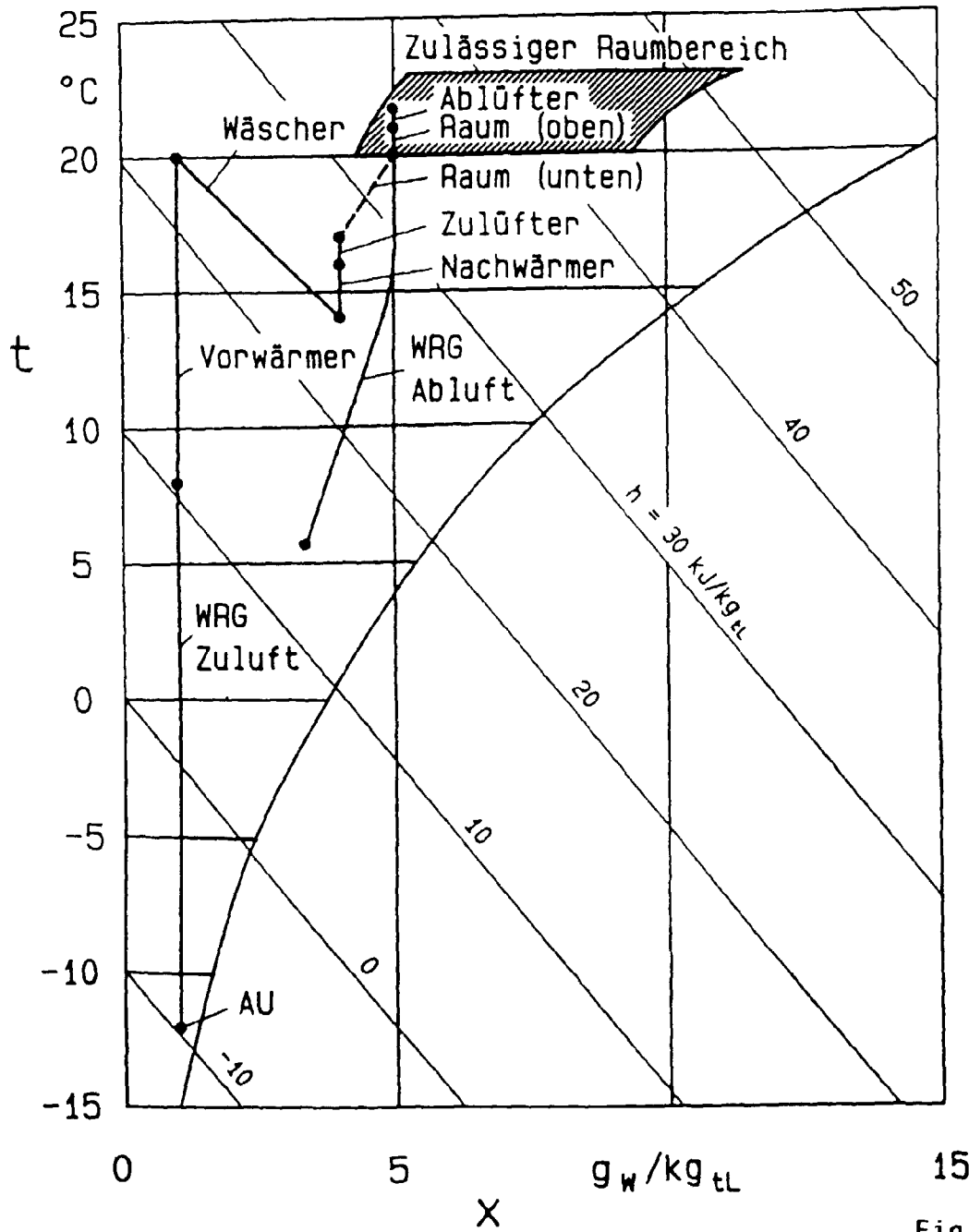


Fig. 33b

OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	t_{opt} °C	x_{opt} g_w/kg_{tL}	K_{opt} 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 _w (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

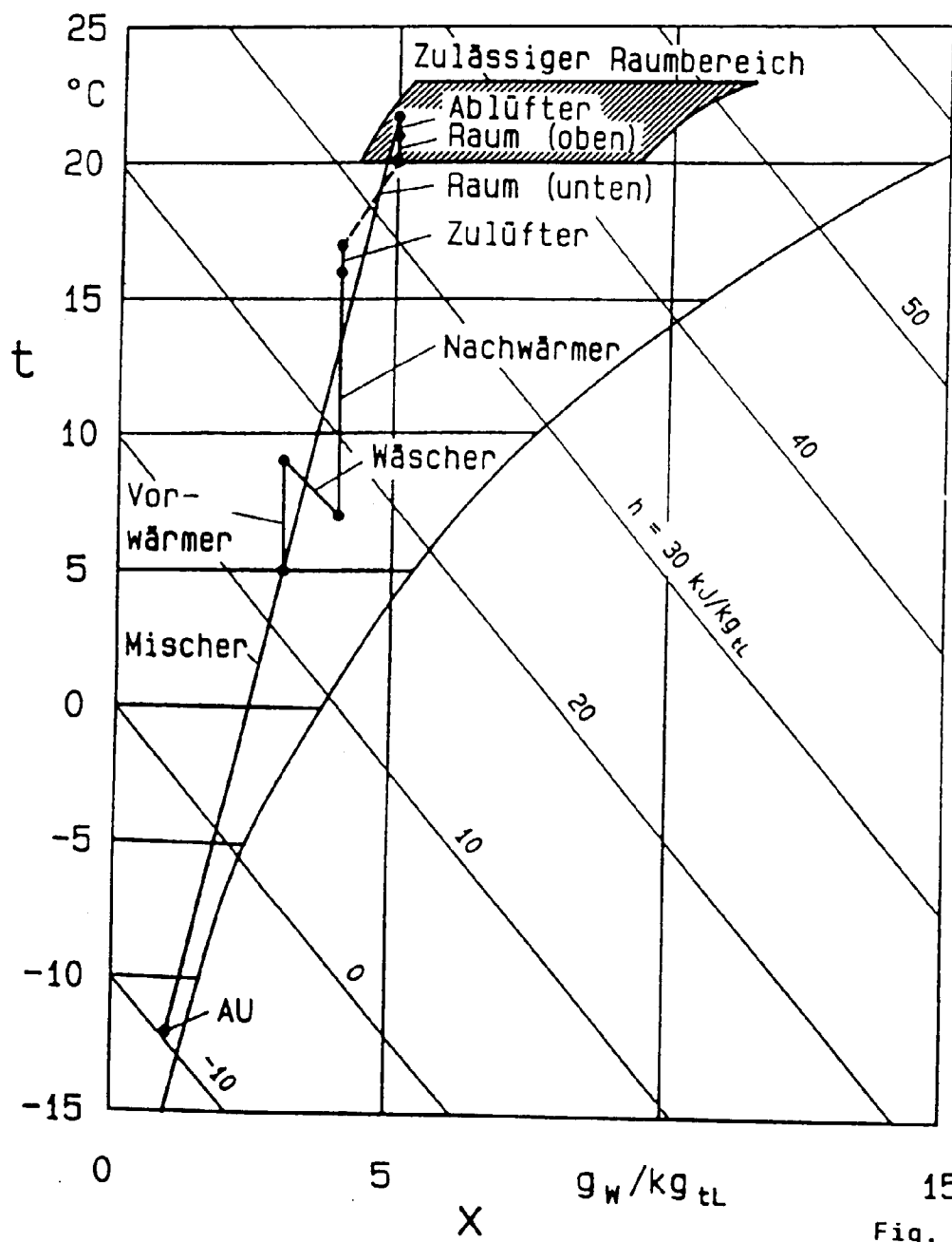


Fig. 34b

OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	t_{opt} °C	x_{opt} g_w/kg_{tL}	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 _w (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 $\dot{m} = 8.80 \text{ kg/s}$

Fig. 35a

OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	topt °C	xopt g _w /kg _{tl}	Kopt 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 _w (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 $\dot{m} = 8.80 \text{ kg/s}$

Fig. 36a

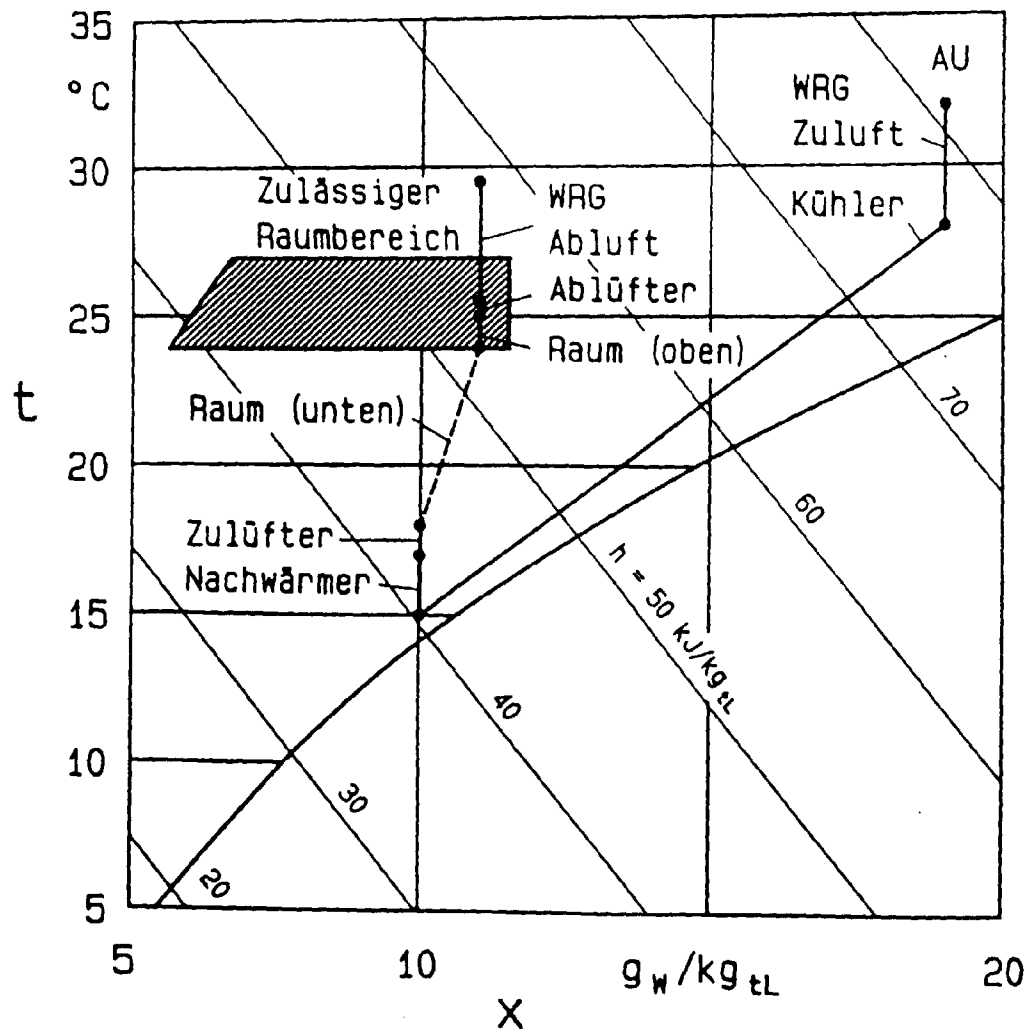


Fig. 36b

OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	t_{opt} °C	x_{opt} g_w/kg_{tl}	K_{opt} 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 _w (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 $\dot{m} = 8.80 \text{ kg/s}$

Fig. 37a

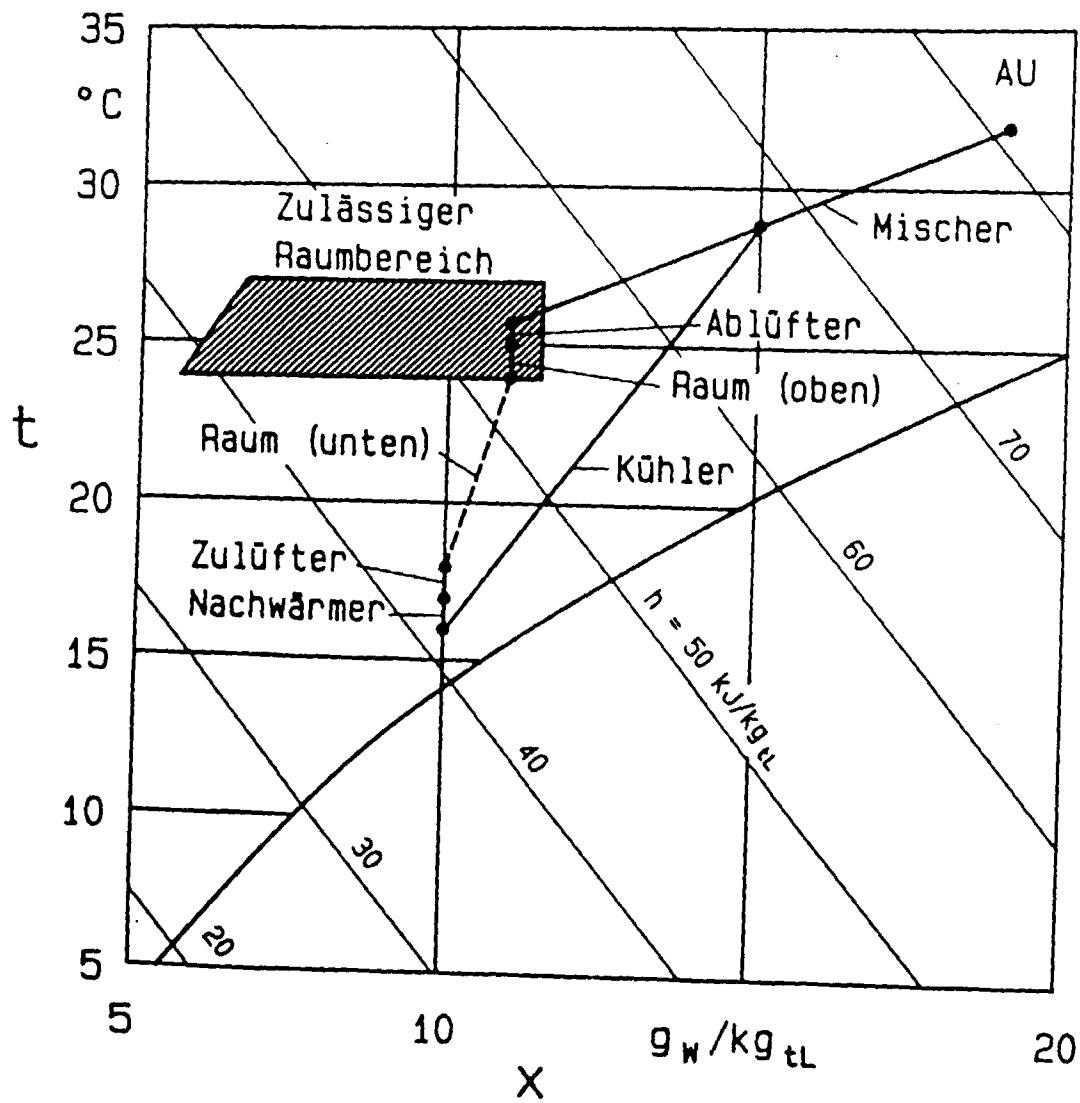


Fig. 37b

OPTIMALER WEG DER LUFTZUSTANDSÄNDERUNG:

e	Aggregat	t_{opt} °C	x_{opt} g_w/kg_{tL}	K_{opt} 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 _w (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

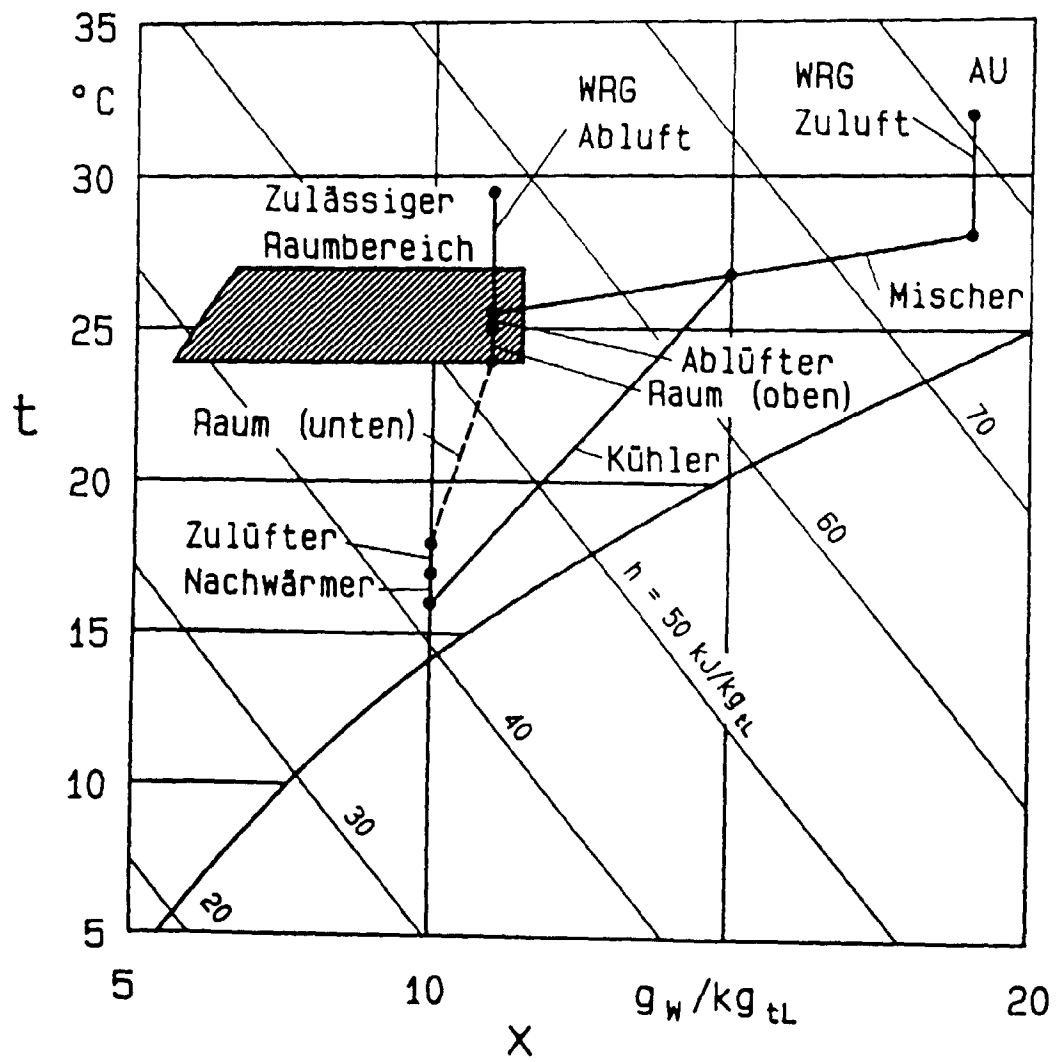


Fig. 38b

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 _w (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	ABLUFT-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 $\dot{m} = 8.80 \text{ kg/s}$

Fig. 39a

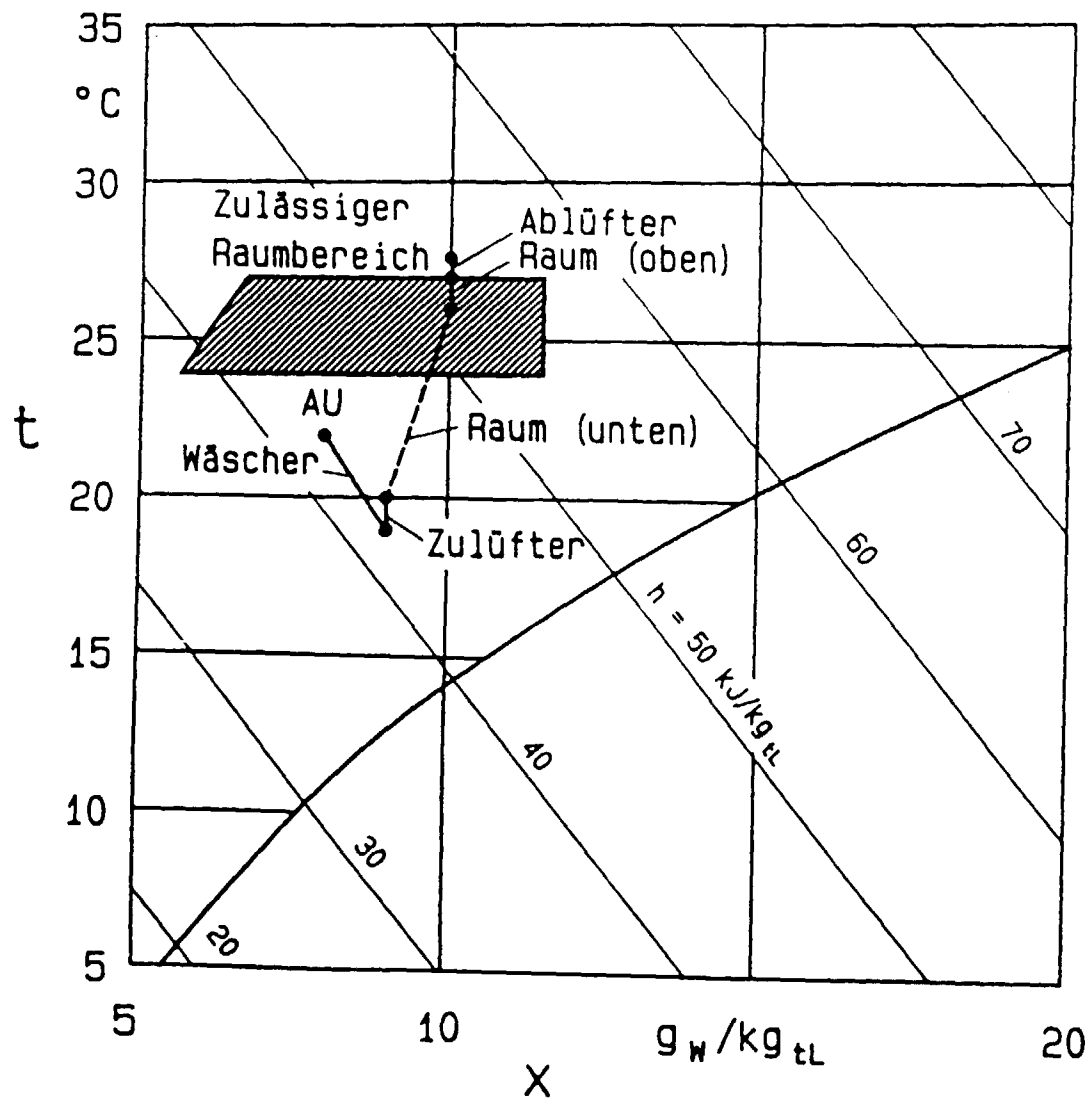


Fig. 39b

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	ABLUF-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

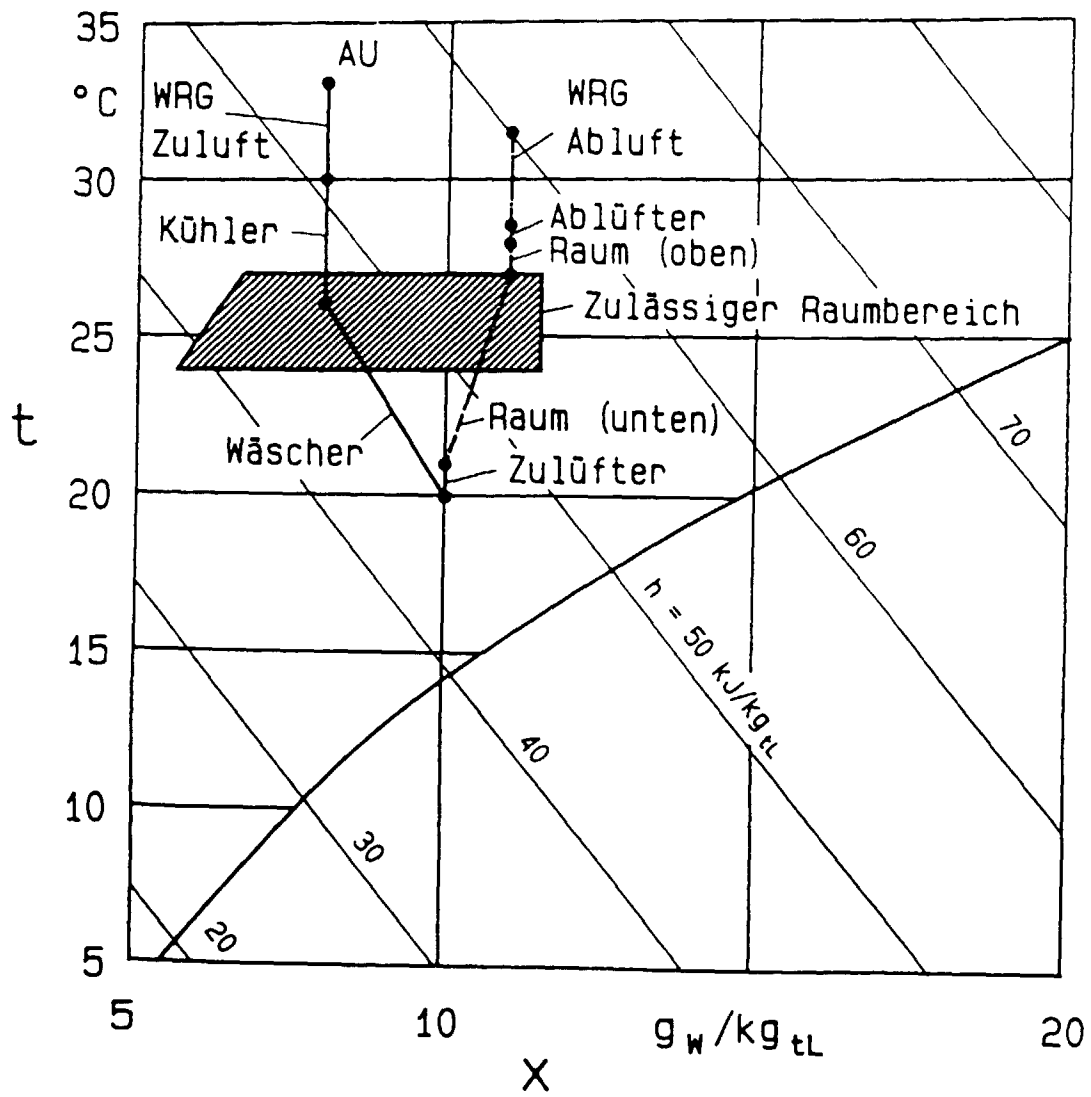


Fig. 40b