Simulation des Abnahmeverhaltens und der Stellgliedbelastungen von fernwärmeversorgten Hausstationen

Bernd GLÜCK

(Teil 2, Fortsetzung von Heft 1/1987)

3. Gebäudeheizungsanlage

3.1 Mathematisches Modell

Vorab sei der Belastungsgrad

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}^+} \tag{1}$$

mit

$\dot{Q}$ ... Wärmestrom des Abnehmers

definiert. Der Zeiger „+" markiert generell den Vollastzustand. Für übliche Raumheizungen werde wegen der relativ starken stochastischen Bindung zwischen Wärmebedarf und Außentemperatur sowie wegen der guten Reproduzierbarkeit in erster Näherung der normmäßige bzw. der reale Belastungsgrad

$$\lambda_n = \frac{t_i^+ - t_a}{t_i^+ - t_a^+} \quad \text{bzw.} \quad \lambda = \frac{t_i - t_a}{t_i^+ - t_a^+} \tag{2}$$

geschrieben, wobei

t_i ... Raumtemperatur (Innentemperatur)
t_a ... Außentemperatur

bedeuten.

Nach [1, 2] können für Raumheizungen unter normmäßigen Bedingungen folgende Approximationen verwendet werden:

Vorlauftemperatur

$$t_{V,n} = t_i^+ + [(t_V^+ - t_i^+) - 0{,}525\,\Delta t^+]\,\lambda_n^{1/M} + 0{,}525\,\Delta t^+\,\lambda_n \tag{3}$$

Rücklauftemperatur

$$t_{R,n} = t_{V,n} - \Delta t^+\,\lambda_n \tag{4}$$

Es gelten:

Δt ... Temperaturspreizung ($\Delta t = t_v - t_R$)
M ... Heizflächenexponent

Radiator	M = 1,33
Plattenheizkörper	M = 1,24 ... 1,34
Fußbodenheizung	M = 1,00 ... 1,15.

Dr. sc. techn. Bernd Glück, c/o VEB Forschung und Rationalisierung, Techn. Gebäudeausrüstung, Weststraße 58, DDR-9900 Plauen.

Durch die örtlichen Regelungen an den Heizflächen können den individuellen wärmephysiologischen Bedürfnissen sehr gut entsprochen und zu geringe Heizleistungen, die auf bautechnische Fehler, Projektmängel oder unkorrekte Installation zurückzuführen sind, kompensiert werden. Voraussetzung ist allerdings, daß die Temperaturfahrkurven über denen nach Gl. (3) liegen, um im Ausnahmefall höhere Wärmeabgaben der Heizflächen – als normgerecht vorgesehen – zu erreichen. Andererseits sollte man eine Vorregelung aber trotzdem realisieren, da dadurch ein optimaler Arbeitsbereich für die Heizkörperventile geschaffen wird. Üblicherweise erhöht man die Vorlauftemperatur nach Gl. (3) um 5 bis 10 K, allgemeingültig um den Zuschlag Δt_{VZ}, so daß $t_V = t_{V,n} + \Delta t_{VZ}$ gilt.

Der *Massestrom* $\dot{m}$ ist bei Abnehmern ohne örtliche Regelung stets gleich dem Vollastwert

$$\dot{m} \equiv \dot{m}^+ = \frac{\dot{Q}^+}{c(t_V^+ - t_R^+)}. \tag{5}$$

Im Falle der individuellen Regelung muß der Massestrom lastabhängig bestimmt werden. Um umfassend gültig zu sein, wird für die mittlere Heizflächenübertemperatur $\vartheta_{H,m}$ das logarithmische Mittel gebildet

$$\vartheta_{H,m} = \frac{\Delta t}{\ln \dfrac{t_V - t_i}{t_V - \Delta t - t_i}}. \tag{6}$$

Mit dem üblicherweise verwendeten Potenzgesetz für den realen Belastungsgrad

$$\lambda = \left(\frac{\vartheta_{H,m}}{\vartheta_{H,m}^+}\right)^M \tag{7}$$

ergibt sich unter Beachten des Vorlauftemperaturzuschlages Δt_{VZ} eine iterationsfähige Berechnungsgleichung für die Temperaturspreizung in der Form

$$\Delta t = (t_v - t_i)\left[1 - e^{-\frac{\Delta t}{\Delta t^+ - \lambda^{1/M}} \ln \frac{t_V^+ - t_i^+}{t_V^+ - \Delta t^+ - t_i^+}}\right]. \tag{8}$$

Zu Iterationsbeginn wird für Δt ein Schätzwert – zum Beispiel $\Delta t = \lambda_n \cdot \Delta t^+$ – eingesetzt. Das jeweilige Ergebnis stellt eine Verbesserung dar. Um zu starke Schwankungen der Zwischenergebnisse um das endgültige Resultat zu vermeiden, werden vor jedem neuen Iterationsschritt die Ein- und Ausgabewerte (Δt_0 und Δt) arithmetisch gemittelt. Die Genauigkeit des Verfahrens ist beliebig wählbar.

Die *Rücklauftemperatur* ergibt sich weiter zu

$$t_R = t_V - \Delta t \tag{9}$$

und der *Massestrom* beträgt abschließend

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c\Delta t} = \frac{\lambda \dot{Q}^+}{c\Delta t}. \tag{10}$$

Im Sonderfall, daß der Massedurchsatz $\dot{m}$ durch den Heizkörper vorgegeben ist – dies trifft bei genau bekannter Ventilöffnung zu – folgt aus der Enthalpiebilanz für das Heizwasser gemäß Gl. (5) für den Belastungsgrad

$$\lambda = \frac{\dot{m}c(t_V - t_R)}{\dot{m}^+ c(t_V^+ - t_R^+)} = \mu \frac{\Delta t}{\Delta t^+}. \tag{11}$$

Die Gl. (8) nimmt mit dem relativen Massestrom $\mu = \dot{m}/\dot{m}^+$ dann die Form

$$\Delta t = (t_V - t_i)\left[1 - e^{-\lambda^{(1-1/M)}\frac{1}{\mu}\ln\frac{t_V^+ - t_i^+}{t_V^+ - \Delta t^+ - t_i^+}}\right] \tag{12}$$

an.

Durch das mögliche Abschalten einzelner Heizflächen erhöht sich der hydraulische Widerstand des Abnehmernetzes. Der Betriebspunkt würde sich dann gemäß *Bild 6* bei Einsatz einer drehzahlstarren Pumpe vom Punkt A zum Punkt B verlagern. Der erhöhte Pumpendifferenzdruck $\Delta p_B (> \Delta p_A)$ ist zur ordnungsgemäßen Versorgung der restlichen Heizkörper jedoch nicht erforderlich. Vielfach macht es sich sogar nachteilig bemerkbar, da durch zu hohe Pumpendifferenzdrücke Strömungsgeräusche in den Heizkörperventilen auftreten. Andererseits kann eine zulässige Reduzierung auf Differenzdrücke unter dem Vollastzustand nicht mit einfachen Mitteln vorausbestimmt werden. Es ist deshalb zweckmäßig, den *Differenzdruck* durch Drehzahlregelung der Umwälzpumpe auf Δp_A = const. zu halten, wodurch prinzipiell die ausreichende Massestrombeaufschlagung der Heizflächen mit Sicherheit gewährleistet werden kann. Damit ergibt sich der Betriebspunkt B′. (Überströmeinrichtungen zur Druckbegrenzung sollten aus energetischen Gründen nur bei sehr kleinen Anlagen zum Einsatz kommen.)

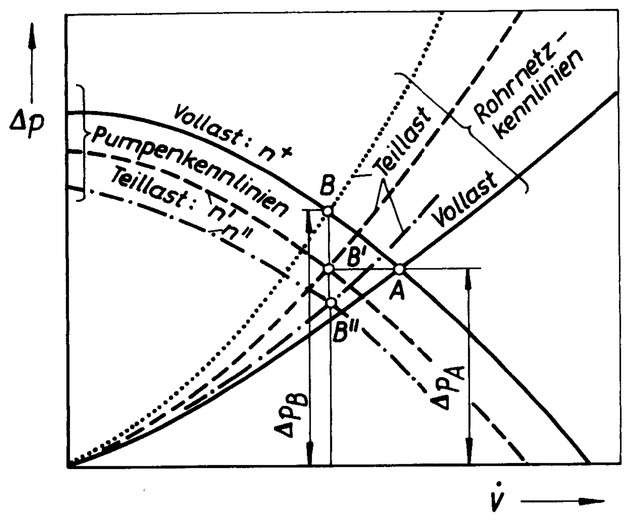


Bild 6. Hydraulische Betriebspunkte der Gebäudeheizungsanlage.
A Vollastbetrieb
B Teillastbetrieb bei voller Drehzahl $n^+ (\Delta p_B > \Delta p_A)$
B′ Teillastbetrieb bei reduzierter Drehzahl $n' (\Delta p_{B'} = \Delta p_A)$
B″ Teillastbetrieb bei reduzierter Drehzahl $n'' (\Delta p_{B''} < \Delta p_A)$

Neuerdings werden auch Pumpenregelungen angeboten, die bei verringertem Fördersystem gleichzeitig auch den Pumpendruck reduzieren, so daß sich beispielsweise der Betriebspunkt B″ einstellt. Dies setzt allerdings genaue Kenntnisse über den Anlagenaufbau und das statistische Abnahmeverhalten voraus.

Zur weitestgehend echten Simulation des Lastverhaltens werden die Abnehmer in maximal *drei Gruppen* unterschiedlich variierbarer Belastung und Solltemperaturen unterteilt. Die Leistungsanteile beziehen sich auf den Vollastzustand und werden

$$\gamma_1 = \frac{\dot{Q}_1^+}{\dot{Q}^+}; \quad \gamma_2 = \frac{\dot{Q}_2^+}{\dot{Q}^+}; \quad \gamma_3 = \frac{\dot{Q}_3^+}{\dot{Q}^+} \tag{13}$$

genannt, wobei $\dot{Q}_1^+ + \dot{Q}_2^+ + \dot{Q}_3^+ = \dot{Q}^+$ gilt.

Im *Bild 7* ist der Flußplan für eine rechnergestützte Abnehmersimulation dargestellt. Die Indizes der Größen wurden jeweils auf Zeilenhöhe geschrieben. Es sind folgende Eingaben vorzunehmen:

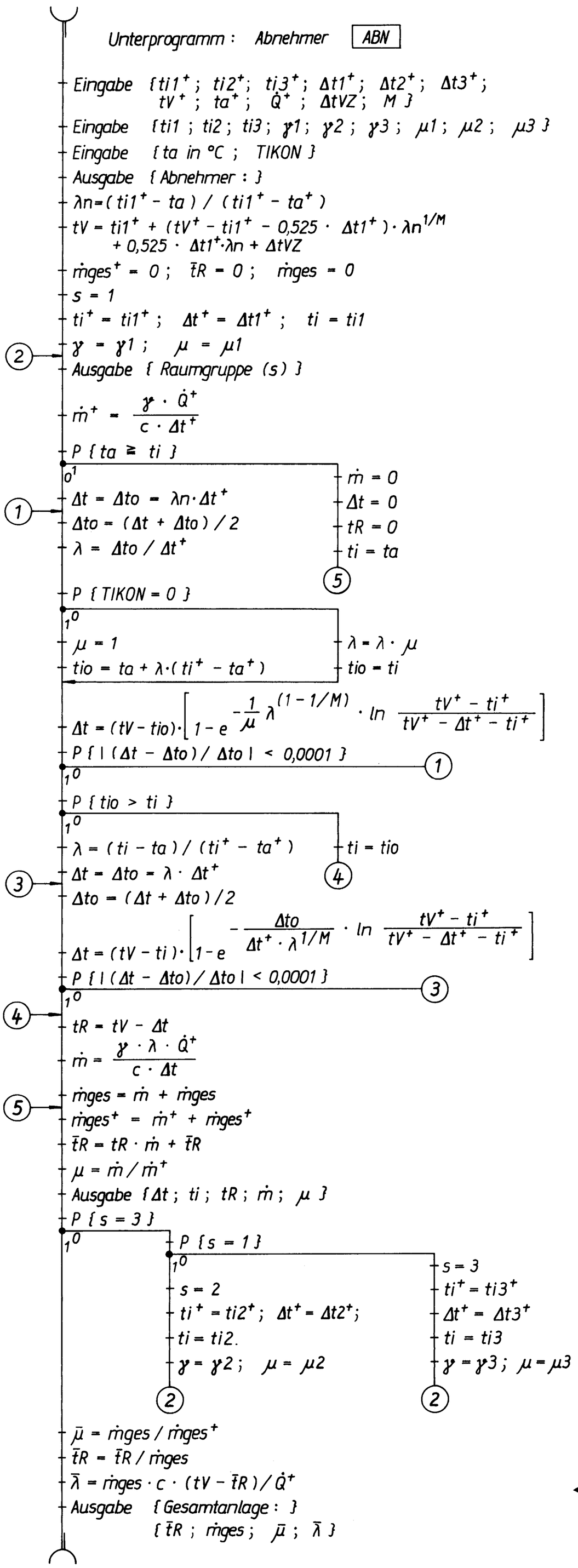
$ti1^+, \ldots, ti3^+ \ldots$	Raumtemperaturen in °C	bei Vollast
$\Delta t1^+, \ldots, \Delta t3^+ \ldots$	Temperaturspreizungen in K	bei Vollast
$tV^+ \ldots$	Vorlauftemperatur in °C	bei Vollast
$\dot{Q}^+ \ldots$	Gesamtwärmestrom einer Einheit (Gebäude, Wohnung) in kW	bei Vollast
$ta^+ \ldots$	Außentemperatur in °C	bei Vollast
$\gamma 1, \ldots, \gamma 3 \ldots$	Leistungsanteile der Raumgruppen	bei Vollast
$\mu 1, \ldots, \mu 3$	Relative Masseströme (Nur bei TIKON = 1 erforderlich!)	
$\Delta tVZ \ldots$	Vorlauftemperaturzuschlag in K	
$M \ldots$	Heizflächenexponent	
$ti1, \ldots, ti3 \ldots$	Gewünschte Raumtemperatur in °C	
$ta \ldots$	Angenommene Außentemperatur in °C	
TIKON	Steuergröße	

TIKON = 1: Raumtemperatur und relativer Massestrom sind konstant den Vorgabewerten; (keine direkte thermische Ankopplung des Raumes an die Atmosphäre).

TIKON = 0: Raumtemperatur und Massestrom werden unter Beachtung der gewünschten Raumtemperatur ermittelt; (vollkommene thermische Ankopplung des Raumes an die Atmosphäre).

Die Berechnung der sich einstellenden Parameter der Abnehmeranlage erfolgt schrittweise. Die Raumgruppe 1 hat Pilotfunktion. Bezugnehmend auf deren Vollastdaten werden die Gln. (2) und (3) unter Berücksichtigung von Δt_{VZ} ausgewertet. Im Ergebnis erhält man die für den gesamten Abnehmerbereich gültige Vorlauftemperatur t_V. Die weitere Berechnung erfolgt einzeln für die Raumgruppen 1 bis 3. Der Massestrom bei Vollast ergibt sich zu

$$\dot{m}^+ = \frac{\gamma \dot{Q}^+}{c\Delta t^+}. \tag{14}$$



Für die Bestimmung des Massestromes bei Teillast werde vereinfacht angenommen, daß die Raumgruppen thermisch vollkommen an die Außenatmosphäre angekoppelt sind und untereinander nicht im Wärmeaustausch stehen. Der Massestrom und die Temperaturspreizung berechnen sich nach verschiedenen Varianten:

- Wenn $t_a > t_i$ gilt, folgt $\dot{m} = 0$, d.h. der Heizkörper ist abgesperrt. Die übrigen Parameter sind praktisch uninteressant. Es werden für einen kompletten Rechnerausdruck $\Delta t = 0$; $t_R = 0$ und $t_i = t_a$ gesetzt.
- Bei TIKON = 1 wird die Raumtemperatur t_i und der relative Massestrom μ als konstant angenommen. Dies ist zu Beginn einer Parameteränderung – z.B. der Vorlauftemperatur – infolge der thermischen Trägheit des Raumes realistisch. Die Temperaturspreizung berechnet sich über Iterationen nach Gl. (12). Der Belastungsgrad gemäß Gl. (11) ist in die Iterationsschleife einbezogen. Eine thermische Anbindung des Raumes an die Außenatmosphäre werde nicht berücksichtigt. Damit können in erster Näherung auch instationäre Verhältnisse durch sinnvolle Vorgaben von t_i und μ nachgerechnet werden. Die Rücklauftemperatur ergibt sich in einfacher Weise nach Gl. (9).
- Bei TIKON = 0 erfolgt die Berechnung für einen thermisch stationären Zustand unter vollkommener Ankopplung an die Außenatmosphäre in zwei Etappen. Zunächst wird geprüft, welche Raumtemperatur t_{i0} sich einstellen würde, wenn der Vollast-Massestrom die Heizflächen beaufschlagt. In den vorher beschriebenen Iterationsverlauf mit Gl. (12) als Kernstück und dem Belastungsgrad nach Gl. (11) wird mit $\mu = 1$, d.h. für vollen Durchsatz, die Raumtemperatur nach der Beziehung

$$t_{i0} = t_a + \lambda(t_i^+ - t_a^+) \tag{15}$$

schrittweise aktualisiert.

Wenn die ermittelte Raumtemperatur t_{i0} niedriger als die gewünschte Temperatur t_i liegt, wird die Rechnung mit den Gln. (9) und

$$\dot{m} = \frac{\lambda \gamma \dot{Q}^+}{c \Delta t} \tag{16}$$

abgeschlossen. Ansonsten erfolgt imVerlaufe einer zweiten Iterationsschleife die Bestimmung der Temperaturspreizung Δt gemäß Gl. (8) unter Vorgabe des Belastungsgrades

$$\lambda = \frac{t_i - t_a}{t_i^+ - t_a^+}. \tag{17}$$

Die Rücklauftemperatur folgt aus Gl. (9) und der Massestrom der Raumgruppe nach Gl. (16).

◀**Bild 7.** Programmablaufplan zur Simulation des Abnehmerverhaltens ABN.
Einheiten: Temperaturen in °C; Temperaturdifferenzen in K; Wärmeströme in kW; Masseströme in kg/s; spezifische Wärmekapazität in kW/kg K

Abschließend wird noch in jedem Fall der relative Massestrom der Raumgruppe

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}^+} \tag{18}$$

berechnet.

Nach Abarbeitung der drei Raumgruppen werden die nachfolgenden Parameter für den Gesamtabnehmer bestimmt:

Rücklauftemperatur $\bar{t}_R$

Massestrom $\dot{m}_{ges}$

relativer Massestrom $\bar{\mu}$.

Mitunter ist der relative Belastungsgrad der Gesamtanlage $\bar{\lambda}$ von besonderem Interesse, so beispielsweise bei der Abschätzung der Wärmestromentnahme aus dem Fernwärmenetz bei Nachtabsenkung der Vorlauftemperatur t_V oder definierter Raumtemperaturveränderung. Die Gl. (1) gilt allgemeingültig auch für die mit Restriktionen belegte Anlage

$$\bar{\lambda} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}^+} = \frac{\dot{m}_{ges}\, c\,(t_V - \bar{t}_R)}{\dot{Q}^+}. \tag{19}$$

3.2 Ergebnisse von Beispielrechnungen

Die Vielzahl der Parameter, die Einfluß auf die hydraulische Belastung der Gebäudeheizungsanlage nehmen, erfordert eine relativ aufwendige Auswertung der funktionellen Abhängigkeiten. Zur Verdeutlichung dieser Abhängigkeiten werden die relevanten Parameteränderungen jeweils separat vorgenommen und die Ergebnisse analysiert.

Grundsätzlich werden zwei Anlagen (A und B) betrachtet. Die Anlage A repräsentiert eine Gebäudeheizung mit den üblichen Auslegungstemperaturen ($t_V^+ = 90\,°C$; $t_R^+ = 70\,°C$) und konventionellen Heizflächen (Radiatoren; Plattenheizkörper). Die Anlage B sei eine Fußbodenheizung mit Heizmedientemperaturen im Niedertemperaturbereich ($t_V^+ = 50\,°C$; $t_R^+ = 40\,°C$). Die zu versorgenden Raumgruppen sind in beiden Fällen gleich. Die Vollastdaten und spezielle Anlagenfixwerte finden sich in *Tab. 1*.

In Abhängigkeit der Außentemperatur t_a berechnet sich unter Annahme der Raumtemperatur für die Raumgruppe 1 (Pilotraumgruppe) $t_{i,1}^+$ mittels der Gln. (2) und (3) die *Norm-Vorlauftemperatur* $t_{V,n}$. Die Ergebnisse für beide Anlagen sind in *Tab. 2* vermerkt und im *Bild 8* aufgetragen. Bei reiner temperaturvariabler Fahrweise soll auch im Teillastfall stets der Vollastmassestrom fließen. Die hohe Qualität der approximierten Fahrkurve (Gl. (3)) wird durch die im *Bild 8* eingetragenen relativen Massenströme μ bewiesen. Sie weichen nur maximal um 2% ab, obwohl – wie später noch deutlich sichtbar – der Massestrom auf thermische Veränderungen außerordentlich sensibel reagiert. Die μ-Werte wurden nach iterativer Rechnung unter Bezugnahme auf die mittlere logarithmische Temperatur (*Tab. 3*: Fälle 1, 5, 9) bestimmt.

Für die variablen Eingabedaten (Raumtemperaturen $t_{i,1}$ bis $t_{i,3}$; Außentemperatur t_a; Vorlauftemperaturzuschlag Δt_{VZ}) sind die Ergebnisse unter vollkommener thermischer Ankopplung der Räume an die Außenatmosphäre (TIKON = 0) in *Tab. 3* zusammengestellt. Nachfolgend werden die wichtigsten Veränderungen der Einflußgrößen auf den *relativen Massestrom* μ und die *Rücklauftemperatur* t_R diskutiert. Die Nummern der Berechnungsfälle werden je-

Tabelle 1. *Grunddaten für Beispielrechnungen.*

		Raumgruppe 1	2	3
Raumtemperatur t_i^+	°C	22	20	24
Lastanteile γ	–	0,50	0,40	0,10

		Anlage A	B
Vorlauftemperatur t_V^+	°C	90	50
Temperaturspreizung Δt^+	K	20	10
Außentemperatur t_a^+	°C	−15	−15
Gesamtwärmeleistung $\dot{Q}^+$	kW	500	500
Heizflächenexponent M	–	1,3	1,1

Tabelle 2. *Normvorlauftemperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur für die Anlagen A und B.*

t_a in °C	−15	−10	−5	0	5	10	15	20
$t_{V,n,A}$ in °C	90,0	82,5	74,8	66,8	58,4	49,6	40,0	28,7
$t_{V,n,B}$ in °C	50,0	46,5	42,9	39,3	35,6	31,9	28,0	23,9

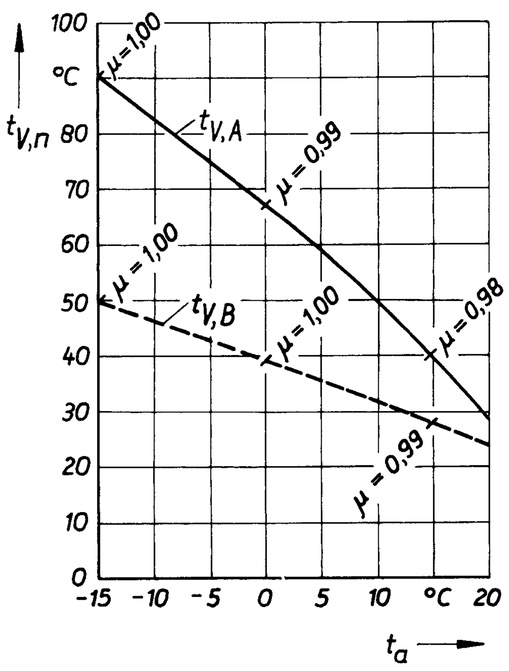


Bild 8. Norm-Vorlauftemperaturkurven (Heizkurven) in Abhängigkeit der Außentemperatur nach Gl. (3). Die sich nach exakter Berechnung einstellenden relativen Masseströme sind vermerkt.

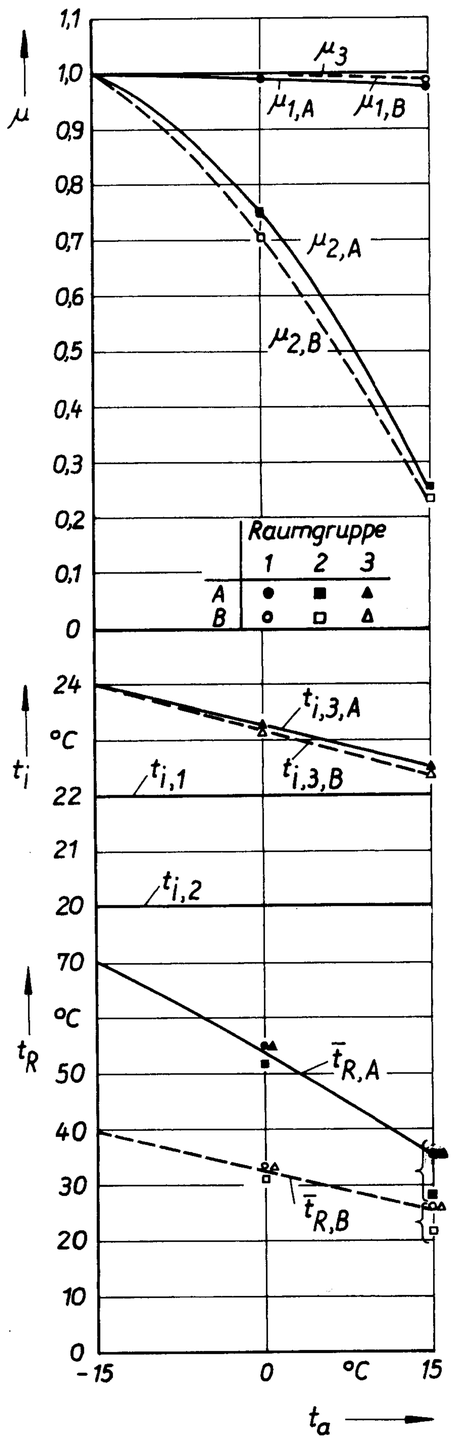


Bild 9. Relative Masseströme, Raumtemperaturen und Rücklauftemperaturen als Funktion der Außentemperatur bei $\Delta t_{VZ} = 0$ (Auswertung 1).

Tabelle 3. *Spezielle Eingaben und Ergebnisse von Testrechnungen zum Abnehmerverhalten (TIKON = 0) Teil 1: Anlage A.*

			Berechnungsfall											
			1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A	11A	12A
Spezielle Eingaben	$t_{i,1}$	°C	22	20	18	16	22	20	18	16	22	20	18	16
	$t_{i,2}$	°C	20	18	16	14	20	18	16	14	20	18	16	14
	$t_{i,3}$	°C	24	22	20	18	24	22	20	18	24	22	20	18
	t_a	°C	−15	−15	−15	−15	0	0	0	0	15	15	15	15
	Δt_{VZ}	K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ergebnisse	Δt_1	K	20,0	27,6	35,0	42,0	12,0	20,1	27,8	34,8	3,9	13,0	20,0	23,9
	$t_{i,1}$	°C	22,0	20,0	18,0	16,0	22,0	20,0	18,0	16,0	22,0	20,0	18,0	16,0
	$t_{R,1}$	°C	70,0	62,4	55,0	48,0	54,8	46,6	39,0	32,0	36,1	26,9	20,0	16,0
	μ_1	–	1,00	0,68	0,51	0,40	0,99	0,54	0,35	0,25	0,98	0,21	0,08	0,02
	Δt_2	K	20,0	28,1	35,8	43,2	15,3	23,7	31,5	38,6	11,6	19,4	23,9	0
	$t_{i,2}$	°C	20,0	18,0	16,0	14,0	20,0	18,0	16,0	14,0	20,0	18,0	16,0	15,0
	$t_{R,2}$	°C	70,0	61,9	54,2	46,8	51,5	43,1	35,3	28,2	28,3	20,5	16,0	0
	μ_2	–	1,00	0,67	0,49	0,38	0,75	0,43	0,29	0,21	0,25	0,09	0,02	0
	Δt_3	K	20,0	27,3	34,2	40,9	11,9	16,9	24,3	31,2	3,8	6,0	14,2	20,4
	$t_{i,3}$	°C	24,0	22,0	20,0	18,0	23,3	22,0	20,0	18,0	22,5	22,0	20,0	18,0
	$t_{R,3}$	°C	70,0	62,7	55,8	49,1	54,9	49,9	42,5	35,6	36,1	34,0	25,7	19,6
	μ_3	–	1,00	0,70	0,52	0,41	1,00	0,67	0,42	0,30	1,00	0,60	0,18	0,08
	$\bar{t}_R$	°C	70,0	62,2	54,8	47,7	53,7	45,9	38,2	31,1	35,0	27,9	21,0	17,4
	$\bar{\mu}$	–	1,00	0,68	0,51	0,39	0,90	0,51	0,33	0,24	0,69	0,20	0,07	0,02

			13A	14A	15A	16A	17A	18A	19A	20A	21A	22A	23A	24A
Spezielle Eingaben	$t_{i,1}$	°C	22	22	22	22	22	22	22	22	22	20	20	20
	$t_{i,2}$	°C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18	18	18
	$t_{i,3}$	°C	24	24	24	24	24	24	24	24	24	22	22	22
	t_a	°C	−15	−15	−15	0	0	0	15	15	15	−15	0	15
	Δt_{VZ}	K	10	5	−10	10	5	−10	10	5	−10	5	5	5
Ergebnisse	Δt_1	K	37,2	28,8	17,8	29,0	20,7	9,9	20,0	12,4	2,1	36,0	28,3	20,1
	$t_{i,1}$	°C	22,0	22,0	18,0	22,0	22,0	18,3	22,0	22,0	18,8	20,0	20,0	20,0
	$t_{R,1}$	°C	62,8	66,2	62,2	47,8	51,1	46,9	30,0	32,5	27,9	59,0	43,5	24,9
	μ_1	–	0,54	0,70	1,00	0,41	0,57	1,00	0,19	0,30	1,00	0,52	0,38	0,13
	Δt_2	K	37,2	28,8	17,8	31,9	23,8	9,8	25,6	19,0	2,1	36,5	31,7	25,4
	$t_{i,2}$	°C	20,0	20,0	16,2	20,0	20,0	17,2	20,0	20,0	18,6	18,0	18,0	18,0
	$t_{R,2}$	°C	62,8	66,2	62,2	44,9	47,9	47,0	24,4	26,0	27,9	58,5	40,1	19,6
	μ_2	–	0,54	0,69	1,00	0,36	0,48	1,00	0,11	0,15	1,00	0,52	0,32	0,07
	Δt_3	K	37,1	28,7	17,8	26,3	17,9	9,9	14,2	5,7	2,1	35,6	25,3	14,1
	$t_{i,3}$	°C	24,0	24,0	19,8	24,0	24,0	19,3	24,0	24,0	19,1	22,0	22,0	22,0
	$t_{R,3}$	°C	62,9	66,3	62,2	50,5	53,9	46,9	35,8	39,2	27,9	59,4	46,5	30,8
	μ_3	–	0,54	0,70	1,00	0,47	0,69	1,00	0,33	0,80	1,00	0,53	0,45	0,25
	$\bar{t}_R$	°C	62,8	66,2	62,2	47,1	50,3	46,9	29,6	33,0	27,9	58,5	42,6	25,0
	$\bar{\mu}$	–	0,54	0,70	1,00	0,40	0,55	1,00	0,17	0,29	1,00	0,52	0,37	0,12

Tabelle 3. *Teil 2: Anlage B.*

			Berechnungsfall																				
			1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B	11B	12B	14B	15B	17B	18B	20B	21B	22B	23B	24B
Spezielle Eingaben	$t_{i,1}$	°C	22	20	18	16	22	20	18	16	22	20	18	16	22	22	22	22	22	22	20	20	20
	$t_{i,2}$	°C	20	18	16	14	20	18	16	14	20	18	16	14	20	20	20	20	20	20	18	18	18
	$t_{i,3}$	°C	24	22	20	18	24	22	20	18	24	22	20	18	24	24	24	24	24	24	22	22	22
	t_a	°C	−15	−15	−15	−15	0	0	0	15	15	15	15	−15	−15	−15	0	0	15	15	15	0	15
	Δt_{VZ}	K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	−10	5	−10	5	−10	5	5	5
Ergebnisse	Δt_1	K	10,0	15,2	20,0	24,4	6,0	11,1	15,7	19,7	1,9	6,7	9,9	12,0	18,3	8,4	14,1	4,4	9,3	0,4	23,0	18,5	12,6
	$t_{i,1}$	°C	20,0	20,0	18,0	16,0	22,0	20,0	18,0	16,0	22,0	20,0	18,0	16,0	22,0	16,1	22,0	16,2	22,0	16,5	20,0	20,0	20,0
	$t_{R,1}$	°C	40,0	34,8	30,0	25,6	33,3	28,2	23,6	19,6	26,1	21,3	18,1	16,0	36,7	31,6	30,2	24,9	23,7	17,6	32,0	25,8	20,4
	μ_1	–	1,00	0,62	0,45	0,34	1,00	0,48	0,31	0,22	0,99	0,20	0,08	0,02	0,55	1,00	0,42	1,00	0,20	1,00	0,41	0,29	0,11
	Δt_2	K	10,0	15,5	20,7	25,4	8,2	13,5	18,1	22,1	6,1	9,8	12,0	0	18,4	8,4	16,1	4,4	12,3	0,4	23,4	20,6	14,9
	$t_{i,2}$	°C	20,0	18,0	16,0	14,0	20,0	18,0	16,0	14,0	20,0	18,0	16,0	15,0	20,0	14,4	20,0	15,3	20,0	16,4	18,0	18,0	18,0
	$t_{R,2}$	°C	40,0	34,5	29,3	24,6	31,1	25,8	21,2	17,2	21,9	18,3	16,0	0	36,6	31,6	28,2	24,9	20,7	17,6	31,6	23,7	18,1
	μ_2	–	1,00	0,61	0,43	0,33	0,70	0,38	0,25	0,18	0,23	0,09	0,02	0	0,54	1,00	0,36	1,00	0,12	1,00	0,40	0,25	0,06
	Δt_3	K	10,0	14,9	19,4	23,5	6,0	9,0	13,5	17,5	1,9	3,0	7,2	9,9	18,2	8,4	12,2	4,4	6,0	0,4	22,5	16,5	9,9
	$t_{i,3}$	°C	20,0	22,0	20,0	18,0	23,2	22,0	20,0	18,0	22,4	22,0	20,0	18,0	24,0	17,8	24,0	17,2	24,0	16,6	22,0	22,0	22,0
	$t_{R,3}$	°C	40,0	35,1	30,6	26,5	33,3	30,3	25,8	21,8	26,1	25,0	20,8	18,1	36,8	31,6	32,1	24,9	27,0	17,6	32,5	27,8	23,1
	μ_3	–	1,00	0,64	0,46	0,36	1,00	0,63	0,38	0,26	1,00	0,60	0,18	0,08	0,55	1,00	0,50	1,00	0,38	1,00	0,42	0,34	0,18
	$\bar{t}_R$	°C	40,0	34,7	29,8	25,3	32,6	27,7	23,1	19,1	25,5	21,9	18,5	16,8	36,7	31,6	29,7	24,9	23,6	17,6	31,9	25,3	20,4
	$\bar{\mu}$	–	1,00	0,62	0,44	0,34	0,88	0,46	0,29	0,21	0,69	0,20	0,07	0,02	0,55	1,00	0,40	1,00	0,19	1,00	0,41	0,28	0,09

weils angegeben. (Steht die Ziffer allein, so wurden stets die Anlagen A und B betrachtet.)

Spezielle Aussagen sind individuell noch aus *Tab. 3* oder mit Hilfe des Rechenprogramms (*Bild 7*) zu ermitteln.

Auswertung 1:
Raumtemperaturen möglichst Auslegungswerte t_i^+; Vorlauftemperaturzuschlag $\Delta t_{VZ} = 0$
(Fälle 1, 5, 9 / *Bild 9*)

Die Heizkurve, die für Raumgruppe 1 ($t_{i,1}^+ = 22\,°C$) gilt, führt für Raumgruppe 2 ($t_{i,2}^+ = 20\,°C$) im Teillastbereich bereits zu einem Temperatur-Überangebot. Die örtlichen Heizkörperregelungen reduzieren den Massestrom μ_2 beträchtlich.

Umgekehrt ist das Temperaturangebot für Raumgruppe 3 ($t_{i,3}^+ = 24\,°C$) unzureichend, wodurch die Heizkörperventile voll öffnen. Trotz Beaufschlagung mit dem vollen Massestrom (Annahme: $\mu_3 = 1$) sinkt die Raumtemperatur $t_{i,3}$ ab. Bemerkenswert sind die geringen Unterschiede zwischen beiden Anlagen.

Obwohl die Rücklauftemperaturen t_R aus den einzelnen Raumgruppen schwanken, stellt sich ein Anlagenmittelwert $\bar{t}_R$ nahe $t_{R,1}$ ein. Die niedrige Rücklauftemperatur $t_{R,2}$ ist an einen stark reduzierten Massestrom μ_2 gebunden, wodurch der spezifische Enthalpiestrom sich relativ unbedeutend für die Mittelwertbildung darstellt.

Auswertung 2:
Abgesenkte Raumtemperaturen $t_i < t_i^+$; Vorlauftemperaturzuschlag $\Delta t_{VZ} = 0$
(Fälle 1 bis 12 / *Bild 10*)

Um eine repräsentative Aussage zu erhalten, werden alle Raumgruppen um die jeweils gleiche Temperaturdifferenz ($t_i = t_i^+ - 2\,K$; $-4\,K$; $-6\,K$) gegenüber den Auslegungstemperaturen abgesenkt. Im *Bild 10* sind die relativen Masseströme $\bar{\mu}$ und die Rücklauftemperatur $\bar{t}_R$, die die Mittelwerte der Gesamtanlage verkörpern, aufgetragen. Zum Vergleich dienen die Werte bei $t_i = t_i^+$ (Raumtemperaturen möglichst Auslegungswerte). Daß unter diesen Umständen für $t_a > -15\,°C$ der Wert $\bar{\mu} < 1$ ist, liegt an der Reduzierung von μ_2 (vgl. *Bild 9*) infolge ungleicher Raumtemperaturen $t_{i,1}^+ \neq t_{i,2}^+$. Demgegenüber verringert sich der Anlagenmassestrom $\bar{\mu}$ bei abgesenkten Raumtemperaturen im gesamten Lastbereich beträchtlich. So sinkt dieser bei $t_i = t_i^+ - 2\,K$ an der Heizgrenze bereits auf 20 %. Die Auslegungsdaten der Anlagen A und B haben auf $\bar{\mu}$ relativ geringen Einfluß.

Die Absenkungen der Rücklauftemperaturen sind beachtenswert. Über den gesamten Lastbereich weisen sie etwa konstante Reduzierungen auf, die allerdings von den Anlagenparametern abhängig sind.

Auswertung 3:
Raumtemperaturen möglichst Auslegungswerte t_i^+; Vorlauftemperaturzuschlag $\Delta t_{VZ} \neq 0$
(Fälle 13 bis 21 / *Bild 11*)

Das Ziel, die Raumtemperaturen auf Höhe der Auslegungswerte t_i^+ zu halten, ist bei $\Delta t_{VZ} = -10\,K$ natürlich

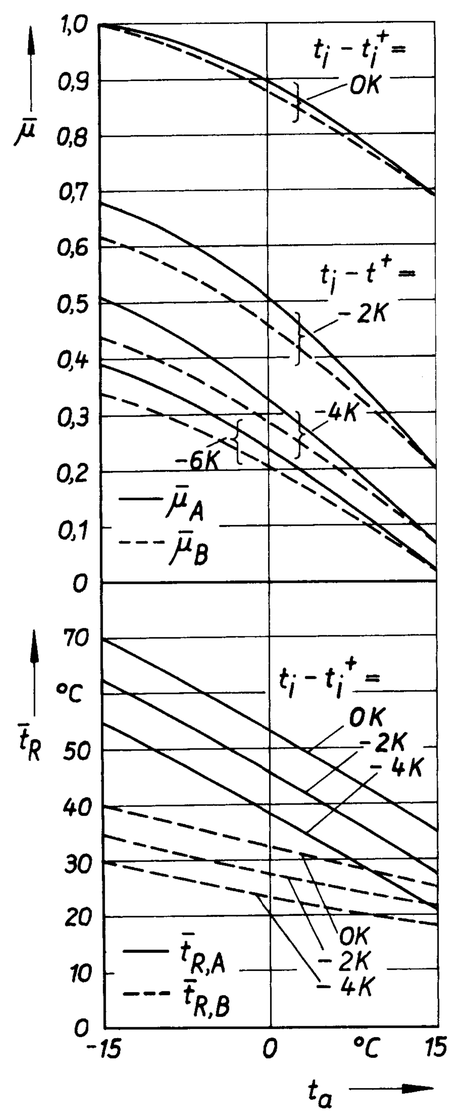


Bild 10.

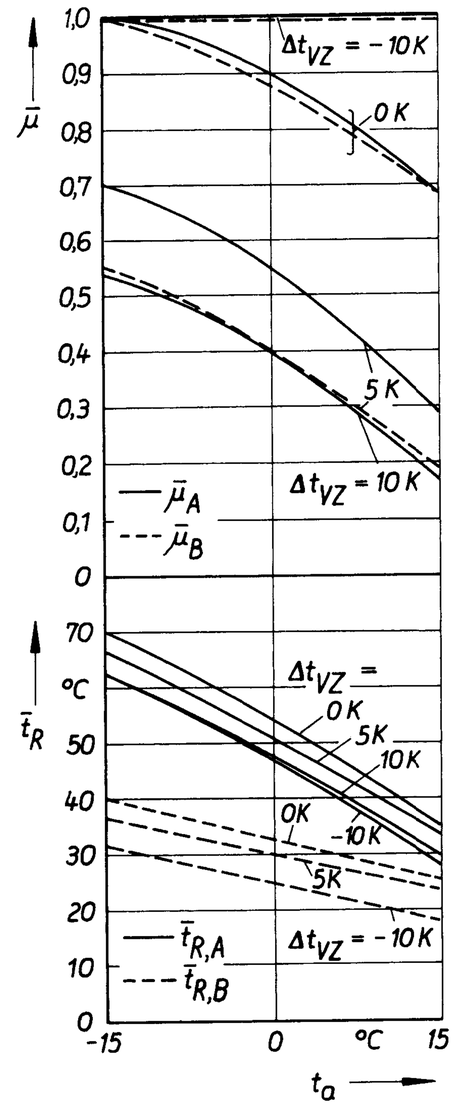


Bild 11.

Bild 10. Relativer Massestrom und Rücklauftemperatur der Gesamtanlage als Funktion der Außentemperatur bei $\Delta t_{VZ} = 0$ und einer gewollten Raumtemperatursenkung um einen konstanten Betrag für alle Raumgruppen (Auswertung 2).

Bild 11. Relativer Massestrom und Rücklauftemperatur der Gesamtanlage als Funktion der Außentemperatur bei variablem Δt_{VZ} (Auswertung 3).

nicht möglich, auch wenn sich der Massestrom $\mu = 1$ für alle Belastungsfälle einstellt. Bereits bei einer Vorlauftemperaturerhöhung um $\Delta t_{VZ} = 5\,K$ reduziert sich dagegen der Gesamtmassestrom erheblich. Das Ergebnis ist in starkem Maße von den Anlagenparametern (A bzw. B) abhängig. Die Rücklauftemperaturen sinken bei normgerechter Raumheizung mit steigenden Vorlauftemperaturen. Niedrige Rücklauftemperaturen werden bei Fernwärmeversorgung stets angestrebt und deshalb der beschriebene Zusammenhang oftmals auch als zusätzlicher „Kunstgriff" angewandt.

(Niedrige Rücklauftemperaturen erhält man natürlich auch bei abgesenkten Vorlauftemperaturen, allerdings liegen dann die Raumtemperaturen auch unter den Sollwerten.)

Interessante Erkenntnisse liefert die detaillierte Betrachtung der Raumgruppen. Im *Bild 12* sind für beide Anlagentypen die relativen Masseströme und die Rücklauftemperaturen der jeweiligen drei Raumgruppen für eine um $\Delta t_{VZ} = 5\,K$ erhöhte Vorlauftemperatur dargestellt.

Die Masseströme der Pilotraumgruppe μ_1 sinken in Abhängigkeit der Außentemperatur bei Anlage A von 0,7 bis auf 0,3, bei Anlage B von 0,55 bis auf 0,20. Bei Raumgruppe 2 tritt ein noch stärkerer Abfall auf, da $t_{i,2}^+ < t_{i,1}^+$ gilt. Grundlegend anders verhält sich die Raumgruppe 3; so steigt beispielsweise $\mu_{3,A}$ von 0,7 auf 0,8 an. Es ist die Folge von $t_{i,3}^+ > t_{i,1}^+$.

(Fortsetzung auf Seite 145)

(Fortsetzung von Seite 136)

Durch die Vorlauftemperaturerhöhung von $\Delta t_{VZ} = 5\,K$ gelingt es, die Raumgruppe mit den erhöhten Temperaturbedürfnissen – auch bei einer Fahrweise nach der Raumgruppe 1 – zu befriedigen. Im Falle $\Delta t_{VZ} = 0\,K$ war dies, wie *Bild 9* zeigte, nicht möglich.

Auswertung 4:

Abgesenkte Raumtemperaturen $t_i = t_i^+ - 2\,K$; Vorlauftemperaturzuschlag $\Delta t_{VZ} = 5\,K$
(Fälle 22 bis 24 / *Bild 13*)

Die Überlagerung der genannten zwei Änderungen soll repräsentativ für den stationären Betriebsfall sein. Somit kann sich der relative Massestrom der Anlage im Bereich $\mu = 1{,}0 \ldots 0{,}1$ ändern. Das Ergebnis ist in erster Näherung unabhängig vom Anlagentyp.

Bei den bisherigen stationären Betrachtungen wurde vor allem die Schwankungsbreite des Anlagenmassestromes untersucht.

Die *Nachtabsenkung der Vorlauftemperatur* t_V führt zu instationären Betriebsverhältnissen. Zur näherungsweisen Ermittlung des auf die Gesamtanlage bezogenen *relativen Massestromes* $\bar{\mu}$ und des *Belastungsgrades* $\bar{\lambda}$ wird der eigentliche Vorgang stark vereinfacht als quasistationär betrachtet. Es soll folgendes Gedankenmodell gelten:

I. Ein stationärer Lastfall, der unmittelbar vor Beginn der zentralen Vorlauftemperaturabsenkung auftritt, wird berechnet.

II. Die ermittelten Masseströme gelten als Fixwerte für den unmittelbaren Zeitraum nach der Temperaturerniedrigung des Vorlaufs. Die Raumtemperaturen t_i werden ebenfalls konstant belassen. Diese quasistationären Bedingungen sind Grundlage der zweiten Berechnung.

III. Nachdem die Raumtemperatur um 1 ... 2 K gesunken ist, werden je nach Proportionalbereich der thermostatischen Regler die Heizkörperventile voll geöffnet haben ($\mu = 1$). Die dritte Berechnung kann erfolgen.

IV. Nach unendlich langer Zeit wird sich ein stationärer Gleichgewichtszustand bei Annahme vollkommener thermischer Kopplung zur Außenatmosphäre einstellen.

Auswertung 5:

Vorlauftemperaturabsenkung $\Delta t_{VZ} = -10\,K$; als Variante für eine zentrale Nachtabsenkung
(Fälle 25 bis 28 / *Bild 14*)

Die in *Tab. 4* dargestellten Belastungsfälle entsprechen in aufsteigender Reihenfolge den vorgenannten quasistationären Bedingungen I. bis IV. Weiterhin sind die Fälle 25 und 22 sowie 28 und 15 identisch. Die grafische Verdeutlichung der Ergebnisse erfolgt im *Bild 14*. Die Abszisse gibt zwar die Reihenfolge der zeitlichen Anlagenbelastung wieder, die Teilung selbst stellt aber keinen Zeitmaßstab dar, da die Dynamik des thermischen Raumverhaltens unbeachtet blieb. Dies ist in erster Näherung auch nicht nötig, wenn nur Aussagen über Grenzbelastungen der Hausstation gesucht werden.

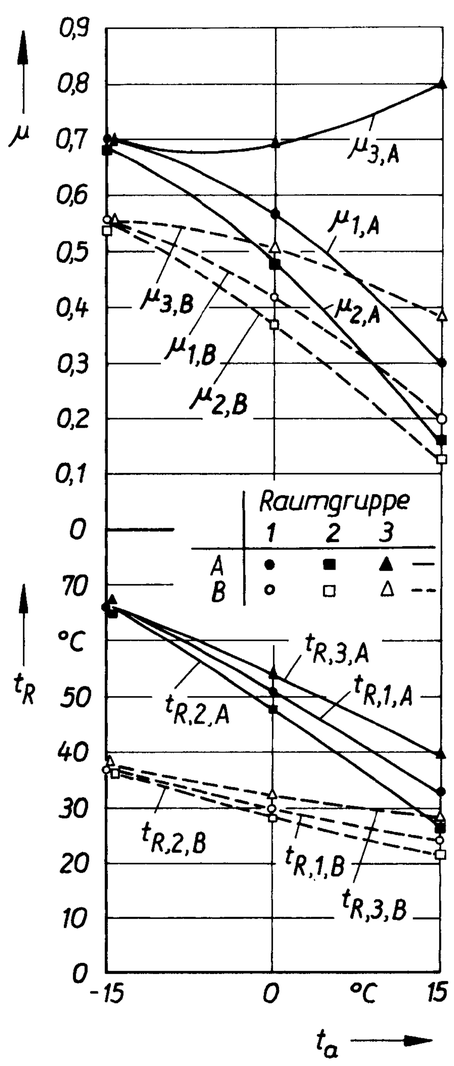


Bild 12.

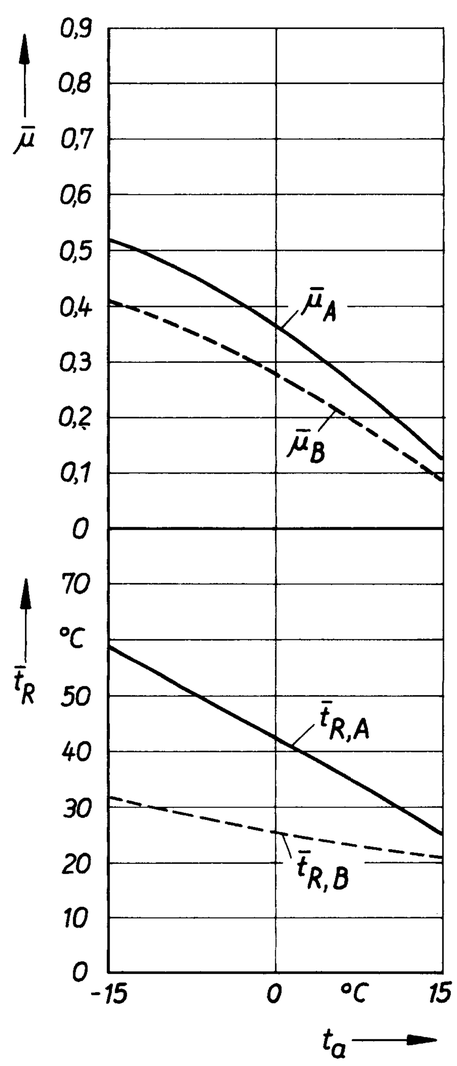


Bild 13.

Bild 12. Relativer Massestrom und Rücklauftemperatur der drei Raumgruppen als Funktion der Außentemperatur bei $\Delta t_{VZ} = 5\,K$ (Auswertung 3).

Bild 13. Relativer Massestrom und Rücklauftemperatur der Gesamtanlage als Funktion der Außentemperatur bei einer Raumtemperatursenkung um 2 K und einer Vorlauftemperaturerhöhung um 5 K.

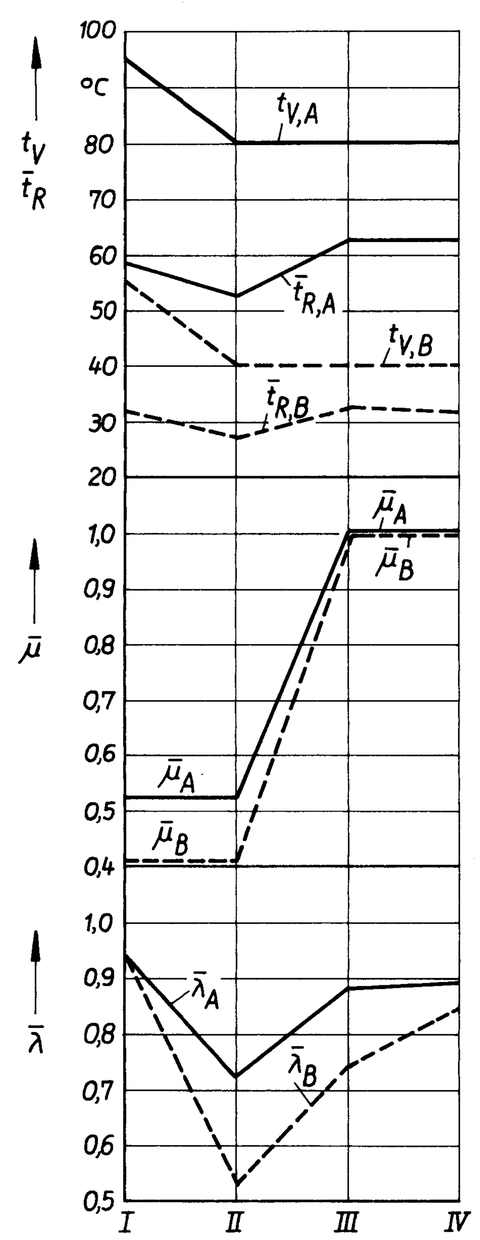


Bild 14. Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur, relativer Massestrom und realer Belastungsgrad für vier ausgewählte quasistationäre Lastfälle.

Tabelle 4. *Spezielle Eingaben und Ergebnisse von Testrechnungen zum Abnehmerverhalten bei Nachtabsenkung.*

			Berechnungsfall							
			25 A I	26 A II	27 A III	28 A IV	25 B I	26 B II	27 B III	28 B IV
Spezielle Eingaben	$t_{i,1}$	°C	20	20	19	20	20	20	19	20
	$t_{i,2}$	°C	18	18	17	18	18	18	17	18
	$t_{i,3}$	°C	22	22	21	22	22	22	21	22
	μ_1	–	–	0,5249	1	–	–	0,4121	1	–
	μ_2	–	–	0,5168	1	–	–	0,4029	1	–
	μ_3	–	–	0,5324	1	–	–	0,4214	1	–
	t_a	°C	−15	−15	−15	−15	−15	−15	−15	−15
	Δt_{VZ}	K	5	−10	−10	−10	5	−10	−10	−10
	TIKON	–	0	1	1	0	0	1	1	0
Ergebnisse	Δt_1	K	36,0	27,6	17,5	17,8	23,0	12,7	7,3	8,4
	$t_{i,1}$	°C	20,0	20,0	19,0	18,0	20,0	20,0	19,0	16,1
	$t_{R,1}$	°C	59,0	52,4	62,5	62,2	32,0	27,3	32,7	31,6
	μ_1	–	0,5249	0,5249	1	1	0,4121	0,4121	1	1
	Δt_2	K	36,5	28,1	17,5	17,8	23,4	13,5	7,5	8,4
	$t_{i,2}$	°C	18,0	18,0	17,0	16,2	18,0	18,0	17,0	14,4
	$t_{R,2}$	°C	58,5	51,9	62,5	62,2	31,6	26,5	32,5	31,6
	μ_2	–	0,5168	0,5168	1	1	0,4029	0,4029	1	1
	Δt_3	K	35,6	27,1	17,4	17,8	22,5	11,9	7,1	8,4
	$t_{i,3}$	°C	22,0	22,0	21,0	19,8	22,0	22,0	21,0	17,8
	$t_{R,3}$	°C	59,4	52,9	62,6	62,2	32,5	28,1	32,9	31,6
	μ_3	–	0,5324	0,5324	1	1	0,4214	0,4214	1	1
	t_V	°C	95,0	80,0	80,0	80,0	55,0	40,0	40,0	40,0
	$\bar{t}_R$	°C	58,8	52,2	62,5	62,2	31,9	27,05	32,6	31,6
	$\bar{\mu}$	–	0,5224	0,5224	1	1	0,4094	0,4093	1	1
	$\bar{\lambda}$	–	0,94	0,72	0,88	0,89	0,94	0,53	0,74	0,84

Erwartungsgemäß sind die Parameter und Kennwertverläufe für beide Anlagen qualitativ gleich. Die Abweichungen resultieren aus der stets gleichen Absenkung um 10 K trotz stark unterschiedlicher Vorlauftemperaturen ($t^+_{V,A} > t^+_{V,B}$). Damit treten bei Anlage B natürlich relativ stärkere Änderungen als bei Anlage A auf.

Schlußfolgernd aus den betrachteten Auswertungen sollten die im *Bild 13* dargestellten Verhältnisse als Referenzbelastung gelten. Sie ergeben sich aus der Vorlauftemperaturberechnung nach Gl. (3), einem additiven Vorlauftemperaturzuschlag um $\Delta t_{VZ} = 5\,K$ und einer Absenkung der Raumtemperatur um $t_i^+ - t_i = 2\,K$.

4. Fernwärmenetz

Es sei die *Netz-Vorlauftemperatur* t_{VN} in Abhängigkeit von der Außentemperatur t_a in Form eines Polygonzuges gegeben:

$$\begin{aligned} t_{VN} &= a_1 + b_1 t_a \quad \text{für} \quad t \leqq t_{a1} \\ t_{VN} &= a_2 + b_2 t_a \quad \text{für} \quad t_{a1} \leqq t \leqq t_{a2} \\ t_{VN} &= a_3 + b_3 t_a \quad \text{für} \quad t_{a2} \leqq t\,. \end{aligned} \tag{20}$$

Im *Bild 15* sind ein allgemein möglicher und ein praxistypischer Verlauf dargestellt. Nach [3] sollte er das Ergebnis von speziellen Optimierungsrechnungen sein.

Die *Netz-Rücklauftemperatur* t_{RN} entspricht bei Schaltungen nach *Bild 3* bzw. *5* der Temperatur des Gebäuderücklaufs t_R.

Die *Netz-Vorlaufdrücke* p_{VN} und die *Netz-Rücklaufdrücke* p_{RN} werden im allgemeinen Fall auch als Polygonzüge nachgebildet. Die Geltungsbereiche sollen – gemäß der zu erwartenden Realität – der Gl. (20) entsprechen. Die allgemeinen Gleichungen lauten damit:

$$\begin{aligned} p_{VN} &= c_1 + d_1 t_a \\ p_{VN} &= c_2 + d_2 t_a \\ p_{VN} &= c_3 + d_3 t_a \end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned} p_{RN} &= e_1 + f_1 t_a \\ p_{RN} &= e_2 + f_2 t_a \\ p_{RN} &= e_3 + f_3 t_a. \end{aligned} \tag{22}$$

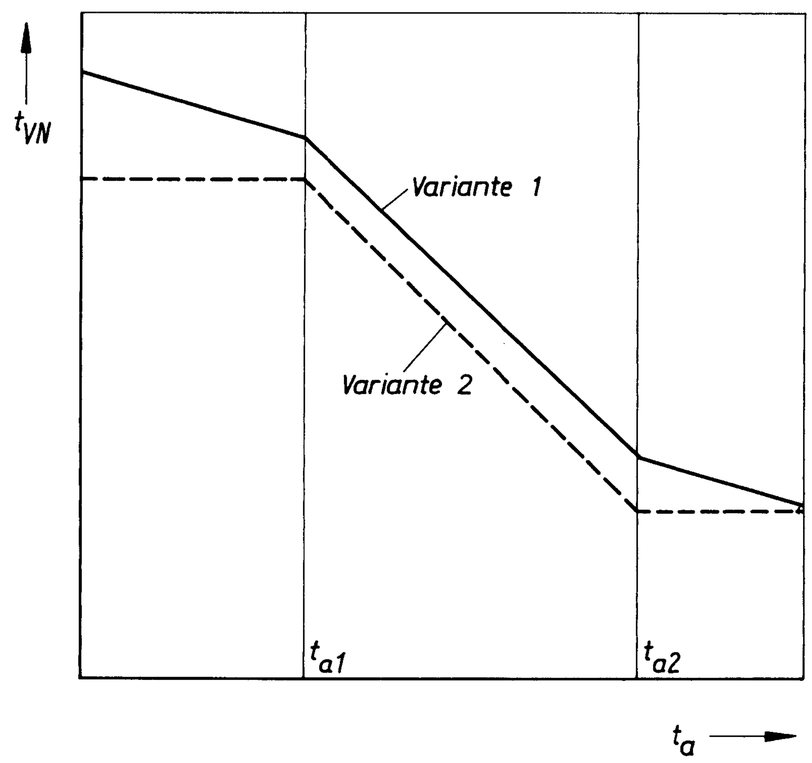


Bild 15. Approximation der Netzvorlauftemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur als dreiteiliger Polygonzug.
Variante 1: Mathematisch mögliche Form gemäß Gl. (20)
Variante 2: Übliche Netzbetriebsweise

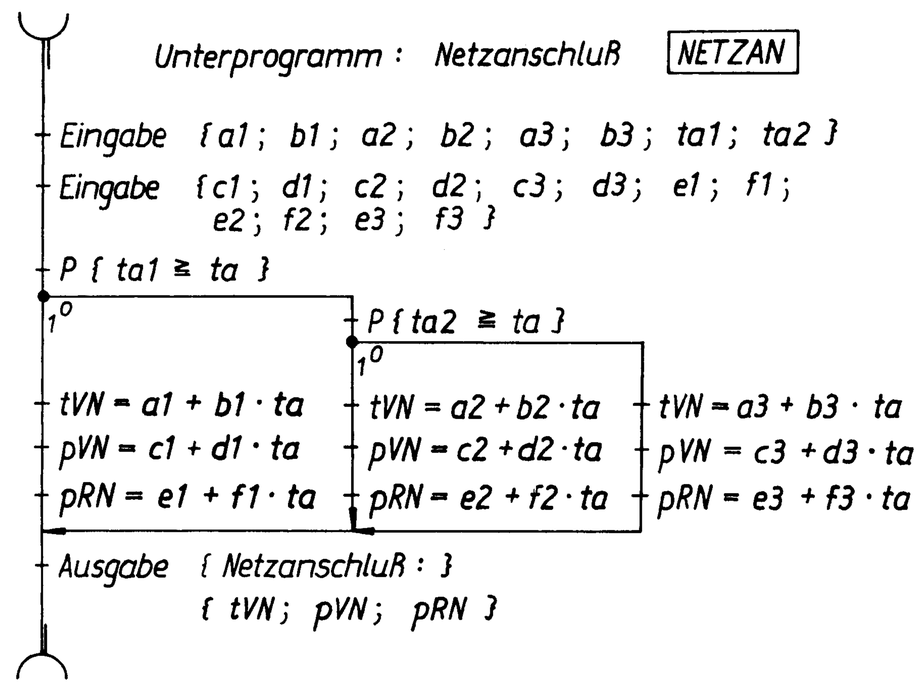


Bild 16. Programmablaufplan zur Simulation der Netzverhältnisse am Anschlußpunkt NETZAN.
Einheiten: Temperaturen in °C; Drücke in MPa

Im *Bild 16* wird der Ablaufplan des zugehörigen Unterprogramms vorgestellt. Die Indizes sind wiederum auf Zeilenhöhe gesetzt. Die Ein- und Ausgabewerte entsprechen den in den Gln. (20) bis (22) vorgestellten Größen und Koeffizienten.

5. Hausstation

Der mathematischen Modellierung liegen die Schaltungen nach *Bild 3* und *5* zugrunde. Die abnehmerseitigen Parameter sind im Abschnitt 3.1., die Werte des Fernwärmenetzes im Abschnitt 4. definiert. Somit sind die aus den *Enthalpie-* und *Druckbilanzen* berechenbaren Belastungen der Hausstation determiniert.

Aufbauend auf Gl. (19) berechnen sich der aus dem Netz entnommene *Massestrom*

$$\dot{m}_N = \dot{m}_{ges} \frac{t_V - \bar{t}_R}{t_{VN} - \bar{t}_R} . \tag{23}$$

und der *Wärmestrom*

$$\dot{Q} = \bar{\lambda} \dot{Q}^+ . \tag{24}$$

Aus der *Druckbilanz*, deren Einzelgrößen im *Bild 5* vermerkt sind, folgt der allgemeingültige Zusammenhang

$$p_{VN} - \Delta p_{VV} - \Delta p_V + \Delta p_B - \Delta p_R - \Delta p_{VR} = p_{RN} . \tag{25}$$

Dabei bedeuten:

Δp_{VV} ... Druckabfall im Vorlaufstellventil
Δp_{VR} ... Druckabfall im Rücklaufstellventil
Δp_V ... Druckabfall in der Vorlaufleitung der Station
Δp_R ... Druckabfall in der Rücklaufleitung der Station
Δp_B ... Druckabfall in der Beimischleitung der Station
p_{VN} ... Vorlaufdruck am Netzanschlußpunkt
p_{RN} ... Rücklaufdruck am Netzanschlußpunkt.

Wird eine Schaltung nach *Bild 3* realisiert, so entfällt das Stellventil im Rücklauf und es gilt $\Delta p_{VR} = 0$. Die Druckdifferenzen in Gl. (25) berechnen sich, wenn es sich vornehmlich um Rohrleitungsabschnitte handelt, mit genügender Genauigkeit nach den Beziehungen

$$\Delta p_V = C_V \dot{m}_N^2 \tag{26}$$

$$\Delta p_R = C_R \dot{m}_N^2 \tag{27}$$

$$\Delta p_B = C_B (\dot{m}_{ges} - \dot{m}_N)^2 , \tag{28}$$

wobei C einen Druckverlustbeiwert in MPa/(kg/s)^2 darstellt. Eine besondere Berechnung erfordert dagegen der Druckverlust der Stellventile. Es gilt allgemein die Größengleichung

$$\Delta p = \frac{1}{\varrho} \left(\frac{\dot{m}}{k_v} \right)^2 \tag{29}$$

mit den SI kohärenten Einheiten

Δp ... Differenzdruck in Pa
$\dot{m}$ ... Massestrom in kg/s
ϱ ... Dichte in kg/m^3
k_v ... Ventilkoeffizient in m^2

Im letzten Fall handelt es sich um die theoretische Form [4]. Üblicherweise geben die Herstellerfirmen den Ventilkoeffizienten k_v^* in m^3/h an. Es gilt die Umrechnung

$$k_v = 28 \cdot 10^{-6} k_v^* . \tag{30}$$

Als zugeschnittene Größengleichung wird damit

$$\Delta p_V = \frac{1}{\varrho} \left(\frac{1000 \dot{m}_N}{28 k_v^*} \right)^2 \tag{31}$$

verwendet. Die zugehörigen Einheiten lauten:

Δp_V ... Differenzdruck in MPa
$\dot{m}_N$ ... Massestrom in kg/s
ϱ ... Dichte in kg/m^3
k_v^* ... Ventilkoeffizient (praktische Form) in m^3/h.

Bild 17 zeigt den Ablaufplan der Berechnung. Die Indizes sind wiederum auf Zeilenhöhe gesetzt. Es gelten die Eingabewerte:

$\dot{m}NG$ ... Grenzmassestrom (maximal aus dem Netz entnehmbarer Massestrom) in kg/s
$\dot{Q}G$ ... Grenzwärmestrom (maximal aus dem Netz entnehmbarer Wärmestrom) in kW
$\bar{t}RG$ ... Grenzrücklauftemperatur (maximale Rücklauftemperatur des ins Netz zurückfließenden Massestromes) in °C
pVG ... Grenzvorlaufdruck (maximal zulässiger Druck in der Station nach dem Vorlauf-Stellventil) in MPa
pRS ... Mindestdruck im Rücklauf der Station vor dem Rücklauf-Stellventil in MPa

kvr* ... Ventilkoeffizient des bereits ausgewählten Rücklauf-Stellventils in m^3/h (ist kein Stellventil vorgesehen, so wird kvr* = 0 gesetzt!)

C_V, C_R, C_B } Druckverlustbeiwerte nach Gln. (26) bis (28).

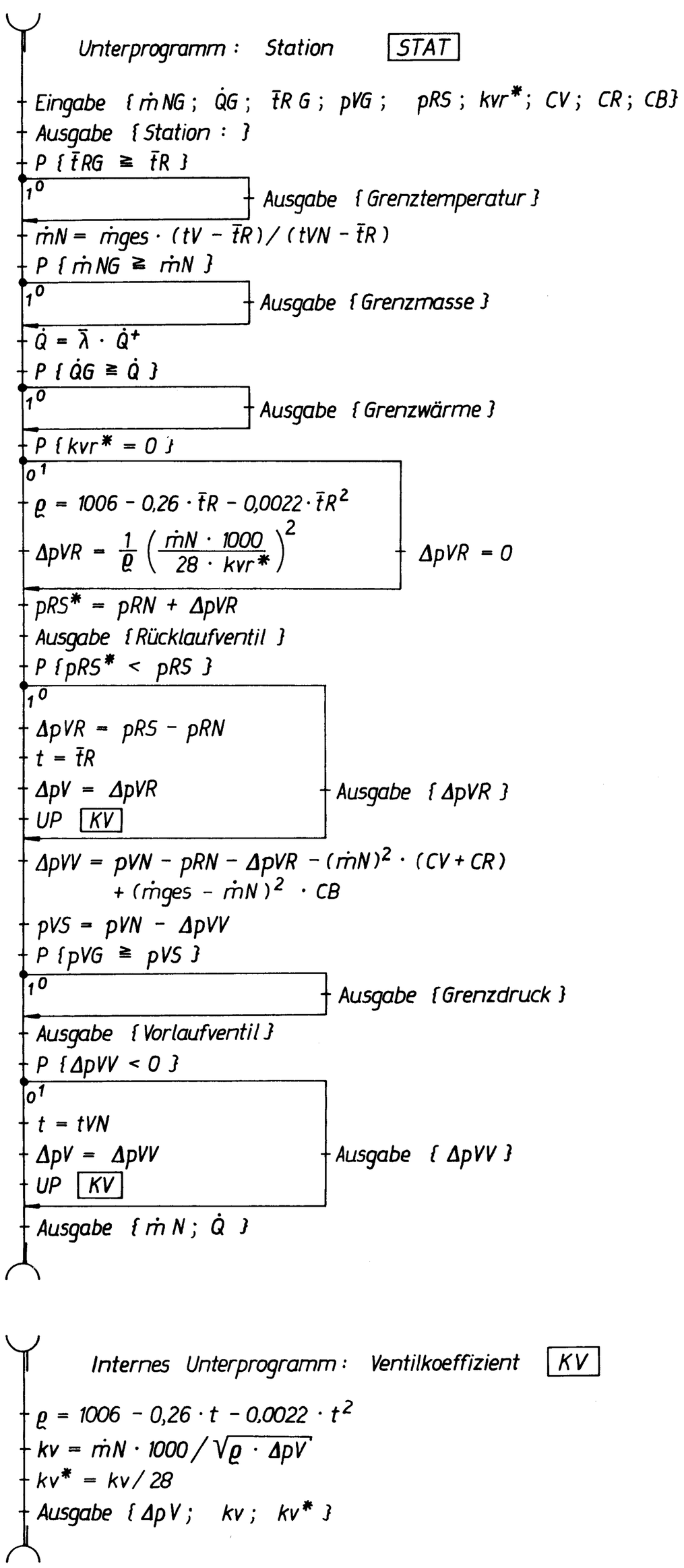


Bild 17. Programmablaufplan zur Ermittlung des Stationsverhaltens STST.

Einheiten: Temperaturen in °C; Drücke in MPa; Masseströme in kg/s; Wärmeströme in kW; Dichte in kg/m^3; k_v in mm^2; k_v^* in m^3/h

Gemäß *Bild 17* werden zunächst die Masse- und Wärmeströme nach Gln. (23) und (24) berechnet. Sie werden ebenso wie die Rücklauftemperatur mit den zulässigen Grenzwerten verglichen. Bei Überschreiten der Limite erfolgen die Ausschriften „Grenztemperatur", „Grenzmasse" bzw. „Grenzwärme".

Ist ein kvr* für ein Rücklauf-Stellventil vorgegeben, so folgt die Berechnung des realen Differenzdruckes nach Gl. (31), ansonsten gilt $\Delta p_{VR} = 0$. Anschließend wird ausgehend vom Netzrücklaufdruck p_{RN} der Rücklaufdruck der Station unmittelbar vor dem Rücklaufventil

$$p_{RS}^* = p_{RN} + \Delta p_{BR} \tag{32}$$

bestimmt. Ist dieser Rechenwert kleiner als der Vorgabewert p_{RS}, dann wird ein neues Regelventil für den Rücklauf ausgewählt. Die Druckdifferenz

$$\Delta p_{VR} = p_{RS} - p_{RN} \tag{33}$$

ist dafür maßgebend (vgl. auch *Bild 5*).

Danach wird aus Gl. (25) der Druckabfall über dem Vorlauf-Stellventil Δp_{VV} eliminiert. Der nach diesem Stellventil auftretende Druck

$$p_{VS} = p_{VN} - \Delta p_{VV} \tag{34}$$

ist dann mit dem Grenzwert p_{VG} zu vergleichen. Das Überschreiten des zulässigen Stationsdruckes

$$p_{VS} > p_{VG} \tag{35}$$

wird durch den Ausdruck „Grenzdruck" signalisiert.

Schließlich erfolgt die Bemessung des Vorlauf-Stellventils für Δp_{VV}. Falls $\Delta p_{VV} < 0$ gilt, so wird dieser Wert sofort ausgegeben.

Der Ventilkoeffizient wird innerhalb eines separaten Unterprogramms auf der Grundlage der Gl. (31) berechnet, wobei für die Dichte nach [3] die Gleichung

$$\varrho = 1006 - 0{,}26\,t - 0{,}0022\,t^2 \tag{36}$$

Verwendung findet.

Grundsätzlich können mit dem Unterprogramm „STATION" die erforderlichen k_v-Werte der Vor- und Rücklauf-Ventile für den jeweiligen Betriebsfall bestimmt werden. Die Darstellung dieser Ergebnisse über den möglichen Jahresverlauf sollte dann zur Auswahl des Rücklauf-Stellventils führen. Mit dem dann fixierten k_{vr}^*-Wert, sind die Ventilkoeffizienten für das Vorlauf-Stellventil durch erneute Durchrechnung der relevanten Belastungsfälle oder durch Umrechnung der Ergebnisse mittels der bekannten Beziehung für den resultierenden k_v-Wert zweier in Reihe geschalteter Stellglieder

$$k_{v,res} = \frac{1}{\sqrt{k_{v,V}^{-2} + k_{v,R}^{-2}}} \tag{37}$$

bestimmbar.

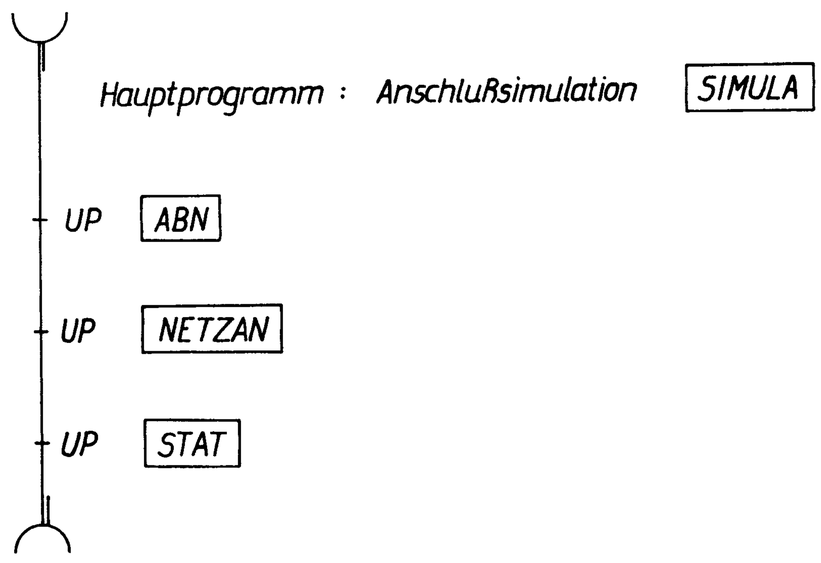


Bild 18. Hauptprogramm zur Simulation des Verhaltens aller Systemteile SIMULA.

6. Gemeinsame Simulation der Systemteile

Die vorgestellten drei Unterprogramme können durch einfache, linienförmige Verknüpfung zu einem Hauptprogramm „SIMULA" (*Bild 18*) formiert werden. Zwei Beispiele sollen die Leistungsfähigkeit und den simplen Gebrauch demonstrieren.

Beispiel 1

In einem Wohngebäude ist eine Zweirohrheizung mit den Temperaturparametern 90 °C/70 °C und dem maximalen Wärmebedarf von $\dot{Q}^+ = 500$ kW bei $t_a^+ = -15$ °C installiert. Der Heizflächenexponent betrage $M = 1{,}3$. Die drei Raumgruppen (Wohnzimmer/Schlafräume und Küchen/Bäder) zeichnen sich durch die Auslegungstemperaturen t_i^+: 22 °C/20 °C/24 °C und die Lastanteile γ: 0,5/0,4/0,1 aus. Das Betriebsregime des Fernwärmenetzes läßt am Anschlußpunkt der Hausstation den im *Bild 19* dargestellten Parameterverlauf erwarten. Abnehmerrestriktionen bestehen praktisch nicht, denn es sollen $\dot{m}_{NG} = 7$ kg/s, $\dot{Q}_G = 600$ kW und $\bar{t}_{RG} = 70$ °C gelten.

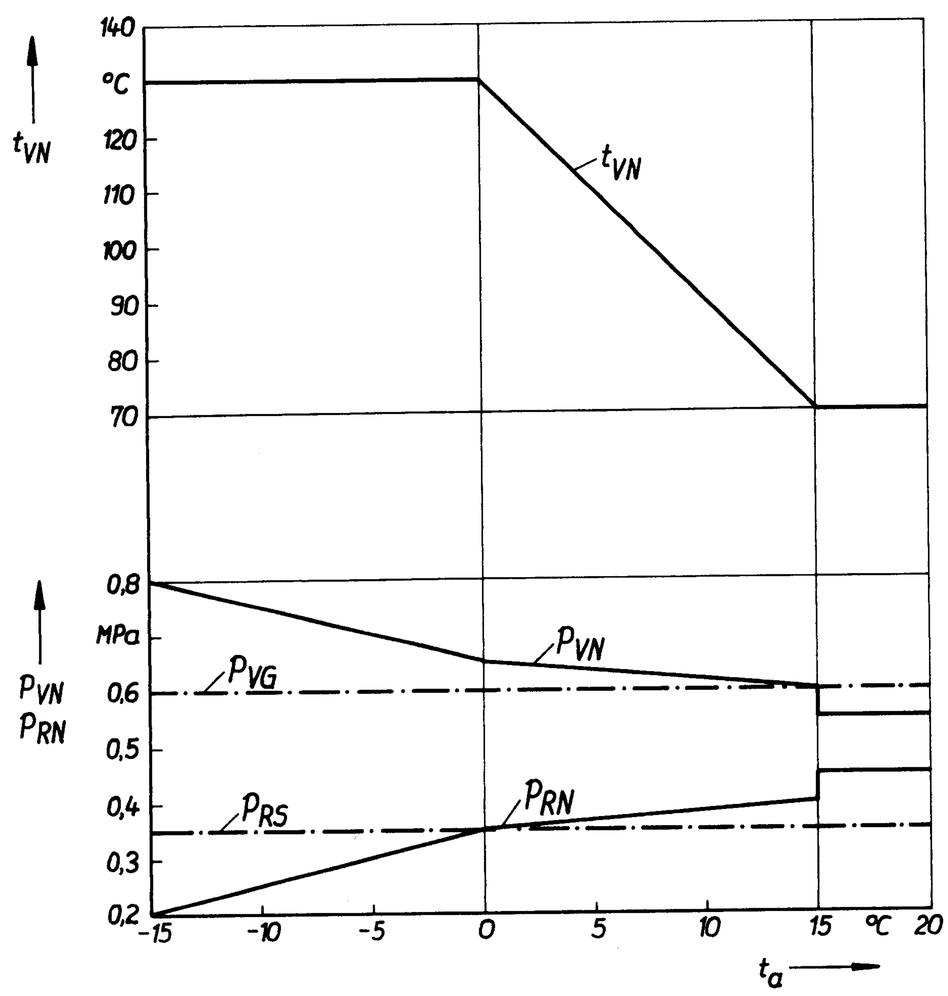


Bild 19. Temperatur- und Druckverläufe des Fernwärmenetzes in Abhängigkeit von der Außentemperatur am Anschlußpunkt (Beispiel 1).

Besonderer Beachtung bedürfen dagegen die Druckgrenzwerte, die durch die Gebäudeheizungsanlage gegeben sind. Der maximal zulässige Druck beträgt $p_{VG} = 0{,}6$ MPa und der Mindestwert $p_{RS} = 0{,}35$ MPa. (Diese Drücke sind ebenfalls im *Bild 19* vermerkt.)

Unter Annahme einer praxisüblichen Fahrweise des Abnehmers sind die k_v-Werte der Stellventile zu bestimmen!

Lösung

Die dem Beispiel zugrundeliegende Gebäudeheizungsanlage entspricht der Anlagenvariante A des Abschnittes 3.2. Die Ergebnisse stimmen deshalb partiell auch mit denen der *Tab. 3* überein. Es sollen im Bereich von $t_a = -15$ °C ... 20 °C für die Vorlauftemperaturerhöhung von $\Delta t_{VZ} = 0$ und Raumsolltemperaturen t_i^+ oder für $\Delta t_{VZ} = 5$ K und um 2 K abgesenkte Raumtemperaturen $t_i = t_i^+ - 2$ K die Berechnungen erfolgen.

Die Netzparameter nach *Bild 19* lassen sich durch die Gln. (20) bis (22) approximieren. Es ergeben sich die Koeffizienten:

$a_1 = 130$ °C $\quad a_2 = 130$ °C $\quad a_3 = 70$ °C $\quad t_{a1} = 0$ °C
$b_1 = 0 \quad b_2 = -4$ K/K $\quad b_3 = 0 \quad t_{a2} = 15$ °C

$c_1 = 0{,}65$ MPa $\quad c_2 = 0{,}65$ MPa
$d_1 = -0{,}01$ MPa/K $\quad d_2 = -0{,}003333$ MPa/K

$c_3 = 0{,}55$ MPa
$d_3 = 0$

$e_1 = 0{,}35$ MPa $\quad e_2 = 0{,}35$ MPa
$f_1 = 0{,}01$ MPa/K $\quad f_2 = 0{,}003333$ MPa/K

$e_3 = 0{,}45$ MPa
$f_3 = 0$.

Die Druckverlustbeiwerte für die Rohrleitungen der Station sind aus dem wirklichen Aufbau der Station abzuleiten. Es mögen gelten:

$$C_V = 0{,}000130 \text{ MPa/(kg/s)}^2$$
$$C_R = 0{,}002200 \text{ MPa/(kg/s)}^2$$
$$C_B = 0{,}001100 \text{ MPa/(kg/s)}^2 .$$

Die Ergebnisse – nach wiederholtem Durchlauf des Programms „SIMULA" – sind in *Tabelle 5* zusammengestellt. Die erforderlichen k_v-Werte der Stellventile schwanken in Abhängigkeit der Belastung stark. Dies verdeutlicht *Bild 20*. Der rasche Abfall der k_v^*-Werte im Bereich von $t_a = 15$ °C ... 20 °C wird durch das Erreichen der Heizgrenze für einige Raumgruppen verursacht. Ein Stellventil im Rücklauf ist nur bei $t_a = -15$ °C ausgewiesen. Gemäß *Bild 19* wäre es im Außentemperaturbereich von $t_a = -15$ °C ... 0 °C erforderlich. Damit der Mindestdruck im Rücklauf der Station gewährleistet ist, sei ein Ventilkoeffizient für das Rücklauf-Stellventil von $k_{vr}^* = 4$ m³/h gewählt. Eine Neuberechnung mit diesem Festwert ergibt die

Tabelle 5. Ergebnisse des Beispiels 1.

			Variante 1	2	3	4	5	6	7	8
Eingaben	t_a	°C	−15	0	15	20	−15	0	15	20
	t_i	°C			$t_i = t_i^+$		$t_i = t_i^+ - 2K$			
	Δt_{VZ}	K			0			5		
Ergebnisse	Abnehmerdaten: Ergebnisse analog Tab. 3, Fall:		1 A	5 A	9 A		22 A	23 A	24 A	
	$\bar{t}_R$	°C	70,0	53,7	35,0	27,6	58,8	42,6	25,0	24,2
	$\dot{m}_{ges}$	kg/s	5,95	5,33	4,1	3,48	3,11	2,17	0,71	0,06
	$\bar{\mu}$	–	1,00	0,90	0,69	0,58	0,52	0,37	0,12	0,01
	$\bar{\lambda}$	–	1,00	0,59	0,17	0,03	0,94	0,53	0,12	0,01
	Netzparameter:									
	t_{VN}	°C	130,0	130,0	70,0	70,0	130,0	130,0	70,0	70,0
	p_{VN}	MPa	0,800	0,650	0,600	0,550	0,800	0,650	0,600	0,550
	p_{RN}	MPa	0,200	0,350	0,400	0,450	0,200	0,350	0,400	0,450
	Rücklaufventil:									
	Δp_{VR}	MPa	0,150	0	0	0	0,150	0	0	0
	k_v^*	m^3/h	5,85	–	–	–	4,65	–	–	–
	Vorlaufventil:									
	Δp_{VV}	MPa	0,45815	0,31955	0,21282	0,11259	0,44675	0,30108	0,19994	0,10000
	k_v^*	m^3/h	3,42	1,89	1,44	0,31	2,76	1,54	0,81	0,05
	Netzströme:									
	$\dot{m}_N$	kg/s	1,984	0,914	0,581	0,091	1,580	0,726	0,317	0,013
	$\dot{Q}$	kW	500,0	292,8	85,4	16,3	472,5	266,2	59,9	2,6
Ergebnisse	Neuberechnung mit vorgegebenem $k_{vr}^* = 4{,}0\ m^3/h$ Rücklaufventil:									
	Δp_{VR}	MPa	0,32122	0,06754	0,02708	0,00067	0,20256	0,04235	0,00801	0,00001
	k_v^*	m^3/h	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
	Vorlaufventil:									
	Δp_{VV}	MPa	0,28693	0,25201	0,18574	0,11192	0,39420	0,25873	0,19193	0,09999
	k_v^*	m^3/h	4,33	2,13	1,54	0,31	2,94	1,67	0,83	0,05

zugehörigen Druckverluste Δp_{VR} und die angepaßten Ventilkoeffizienten des Vorlauf-Stellventils, wie sie im unteren Teil der *Tab. 5* vermerkt sind. Die Aufzeichnung der k_v^*-Werte im *Bild 21* zeigt wiederum den Einfluß der Belastung deutlich.

Es erscheint akzeptabel, wenn Vor- und Rücklauf mit gleichen Stellventilen – $k_v^* = 4\ m^3/h$ – bestückt werden. Zur Kontrolle kann man die resultierenden Ventilkoeffizienten für die hintereinandergeschalteten Stellventile nach Gl. (37) berechnen. Es ergeben sich für die alte und neue Berechnung (*Tab. 5*) stets gleiche $k_{v,res}$.

Schließlich sind im *Bild 22* noch die Druckverläufe unmittelbar nach dem Vorlauf-Stellventil und vor dem Rücklauf-Stellventil aufgetragen. Sie liegen im zulässigen Bereich.

Beispiel 2

Die Heizungsanlage eines Büro- und Fabrikgebäudes soll an das Fernwärmenetz angeschlossen werden. Da dessen Kapazität am Anschlußpunkt kalorische und hydraulische Grenzen aufweist, sind zunächst für den Vollastzustand die Anschlußbedingungen zu untersuchen. Die Ergebnisse sollen dann Aufschluß geben, ob die Heizungsanlage prinzi-

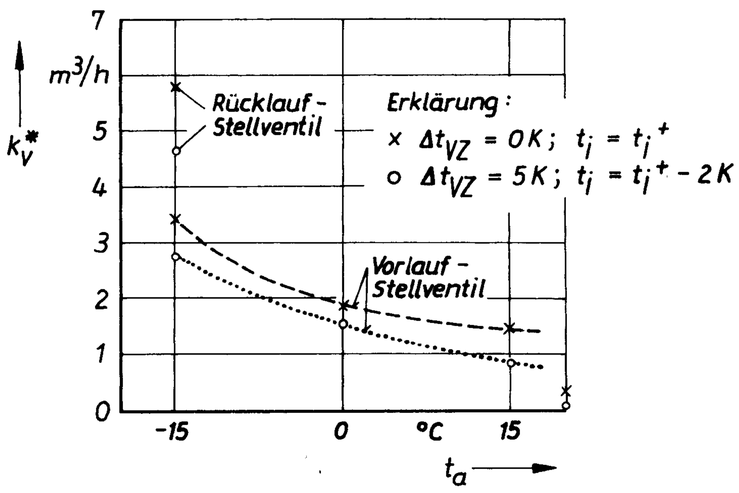


Bild 20. Erforderliche k_v^*-Werte für die Stellventile im Vor- und Rücklauf der Station für zwei verschiedene Abnehmerbetriebsweisen in Abhängigkeit der Außentemperatur.

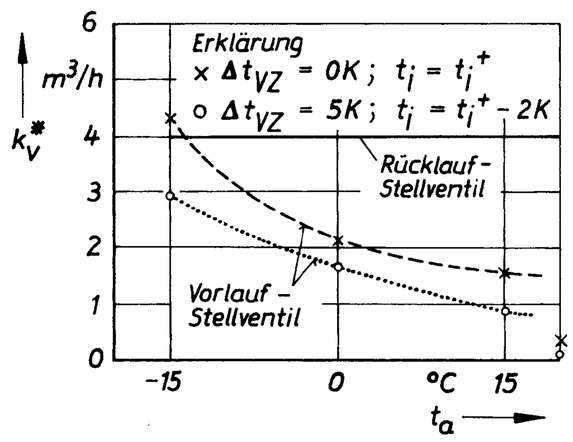


Bild 21. Erforderliche k_v^*-Werte für das Vorlauf-Stellventil bei bereits gewähltem Rücklauf-Stellventil für zwei verschiedene Abnehmerbetriebsweisen in Abhängigkeit der Außentemperatur.

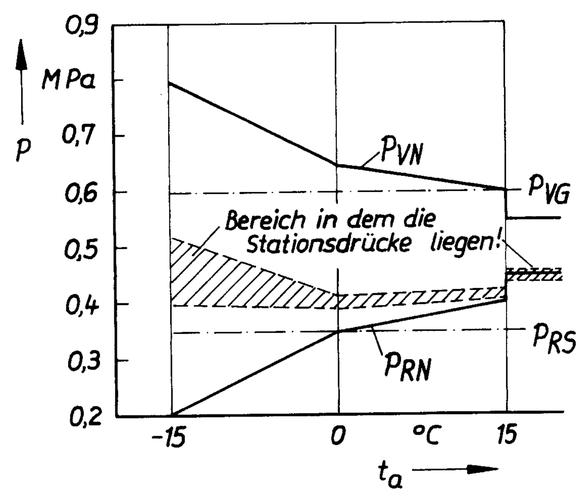


Bild 22. Rechnerische Drücke nach dem Vorlauf-Stellventil und vor dem Rücklauf-Stellventil in Abhängigkeit der Außentemperatur.

```
VARIANTE 1                VARIANTE 2                VARIANTE 3

ABNEHMER:                 ABNEHMER:                 ABNEHMER:
---------------------     ---------------------     ---------------------
RAUMGRUPPE 1,             RAUMGRUPPE 1,             RAUMGRUPPE 1,
DT =  20,00 K             DT =  28,78 K             DT =  33,87 K
TI =  21,00°C             TI =  21,00°C             TI =  21,00°C
TR =  70,00°C             TR =  66,22°C             TR =  64,13°C
M  =   4,48 KG/S          M  =   3,11 KG/S          M  =   2,64 KG/S
MY =   1,00               MY =   0,70               MY =   0,59
RAUMGRUPPE 2,             RAUMGRUPPE 2,             RAUMGRUPPE 2,
DT =  20,00 K             DT =  28,79 K             DT =  33,90 K
TI =  20,00°C             TI =  20,00°C             TI =  20,00°C
TR =  70,00°C             TR =  66,21°C             TR =  64,10°C
M  =   3,36 KG/S          M  =   2,33 KG/S          M  =   1,98 KG/S
MY =   1,00               MY =   0,69               MY =   0,59
RAUMGRUPPE 3,             RAUMGRUPPE 3,             RAUMGRUPPE 3,
DT =  20,00 K             DT =  47,40 K             DT =  52,00 K
TI =  20,00°C             TI =  15,00°C             TI =  15,00°C
TR =  70,00°C             TR =  47,60°C             TR =  46,00°C
M  =   3,36 KG/S          M  =   1,21 KG/S          M  =   1,11 KG/S
MY =   1,00               MY =   0,36               MY =   0,33

GESAMTANLAGE:             GESAMTANLAGE:             GESAMTANLAGE:
TRQ =  70,00°C            TRQ =  62,82°C            TRQ =  60,62°C
MGES=  11,19 KG/S         MGES=  6,66 KG/S          MGES=  5,73 KG/S
MYQ =   1,00              MYQ =   0,59              MYQ =   0,51
LAMQ=   1,00              LAMQ=   0,96              LAMQ=   0,96

NETZANSCHLUSS:            NETZANSCHLUSS:            NETZANSCHLUSS:
---------------------     ---------------------     ---------------------
TVN  =  120,00°C          TVN  =  120,00°C          TVN  =  120,00°C
PVN  =  0,600000 MPA      PVN  =  0,600000 MPA      PVN  =  0,600000 MPA
PRN  =  0,400000 MPA      PRN  =  0,400000 MPA      PRN  =  0,400000 MPA

STATION:                  STATION:                  STATION:
---------------------     ---------------------     ---------------------

GRENZTEMPERATUR           GRENZMASSE                RUECKLAUFVENTIL
                                                    DPVR =  0,000000 MPA
GRENZMASSE                RUECKLAUFVENTIL
                          DPVR =  0,000000 MPA      VORLAUFVENTIL
GRENZWAERME                                         DPVV =  0,177180 MPA
                          VORLAUFVENTIL             KV   =  279,05 MM↑2
RUECKLAUFVENTIL           DPVV =  0,178997 MPA      KV*  =   9,97 M↑3/H
DPVR =  0,000000 MPA      KV   =  288,34 MM↑2
                          KV*  =   10,30 M↑3/H      MN   =  3,607 KG/S
VORLAUFVENTIL                                       Q    =  899,7 KW
DPVV =  0,203005 MPA      MN   =  3,746 KG/S
KV   =  323,50 MM↑2       Q    =  899,7 KW
KV*  =   11,55 M↑3/H

MN   =  4,476 KG/S
Q    =  940,0 KW
```

Bild 23. Ergebnisse des Beispiels 2 (Druckgestaltung unter Verwendung von Programmierhilfen der Fa. MW-Software Köln).

piell mit Fernwärme versorgt werden kann. Es gelten für das Netz:

$t_{VN}^{+} = 120\,°C$; $p_{VN}^{+} = 0{,}6$ MPa; $p_{RN}^{+} = 0{,}4$ MPa

$\dot{m}_{NG} = 13$ t/h $= 3{,}611$ kg/s; $\dot{Q}_G = 900$ kW; $\bar{t}_{RG} = 65\,°C$.

Aufgrund der installierten Meßtechnik liegen über die Gebäudeheizung bei $t_a^{+} = -15\,°C$ sehr genaue Kenntnisse vor:

$t_{i,1}^{+} = t_{i,1} = 21\,°C$; $\gamma_1 = 0{,}4$ (Büroräume)

$t_{i,2}^{+} = t_{i,2} = 20\,°C$; $\gamma_2 = 0{,}3$ (Werkräume)

$t_{i,3}^{+} = t_{i,3} = 20\,°C$; $\gamma_3 = 0{,}3$ (Montagehalle)

$t_V^{+} = 90\,°C$; $t_R^{+} = 70\,°C$; $M = 1{,}3$; $\dot{Q}^{+} = 940$ kW.

Der Druck in der Station darf nur in relativ engen Grenzen ($p_{VG} = 0{,}5$ MPa; $p_{VS} = 0{,}4$ MPa) schwanken, um die Gebäudeanlage nicht zu gefährden.

Zur Berechnung der Druckverluste in der Station werden überschläglich $C_V = 0{,}0001$; $C_R = 0{,}0002$; $C_B = 0{,}001$ jeweils in MPa/(kg/s)^2 angenommen.

Lösung

Die erste Berechnung mit „SIMULA" zeigt die Ergebnisse für unveränderte Vorgabe der in der Aufgabenstellung gegebenen Daten (*Bild 23*, Variante 1). Die Überschreitungen

„Grenztemperatur" ($\bar{t}_R = 70\,°C > 65\,°C = \bar{t}_{RG}$)

„Grenzmasse" ($\dot{m}_N = 4{,}476$ kg/s $> 3{,}611$ kg/s)

„Grenzwärme" ($\dot{Q}_G = 940{,}0$ kW > 900 kW)

würden den Anschluß der Gebäudeheizung zunächst verbieten. Untersuchungen ergaben, daß durch die völlige Automatisierung der Montage ein Absenken der Raumtemperatur von $t_{i,3} = 20\,°C$ auf $15\,°C$ möglich ist. Gleichzeitig wird sich zur Verringerung des Massestromes und der Anlagenrücklauftemperatur des Kunstgriffes „Erhöhung der Anlagenvorlauftemperatur um $\Delta t_{VZ} = 5$ K" bedient. Durch die Thermostatventile an den Heizkörpern ist dies möglich. Die Ergebnisse (*Bild 23*, Variante 2) weisen jetzt nur noch eine geringfügige Überschreitung des Massestromes (3,746 kg/s > 3,611 kg/s) auf.

Schließlich führt eine weitere Steigerung der Gebäudevorlauftemperatur ($\Delta t_{VZ} = 8$ K) zum positiven Ergebnis (*Bild 23*, Variante 3). Die Parameter betragen

$$\bar{t}_R = 60{,}6\,°C; \quad \dot{m}_N = 3{,}607 \text{ kg/s}; \quad \dot{Q} = 899{,}7 \text{ kW},$$

d.h. ein Fernwärmeanschluß ist technisch realisierbar.

7. Schlußfolgerungen

Die Hausstation als Bindeglied zwischen Fernwärmenetz und Gebäudeheizungsanlage hat gezielt auf zahlreiche Parameteränderungen mit differenzierter Sensibilität zu reagieren. Zur Bemessung der Stellorgane und zur Festlegung bzw. Überprüfung von technischen Grenzwerten sind Simulationen des Abnehmer-, des Netz- und des Stationsverhaltens notwendig. Mit dem vorgestellten Programm können stationäre Zustände und instationäre Abläufe näherungsweise durch quasistationäre Zustände unter Einbeziehen zahlreicher, gleichzeitig wirkender Einflüsse untersucht werden.