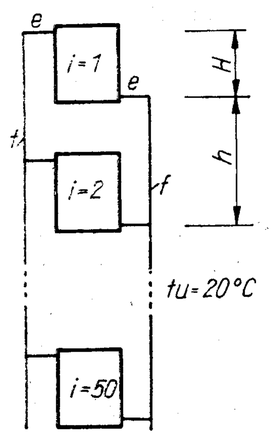
Wahl der Auslegungsparameter von Wasserheizungsanlagen zur Erzielung optimaler Regelungsverhältnisse (III)

Dr.-Ing. B. GLÜCK, Jößnitz (Vogtl.)

7.2. *Einfluß des thermodynamischen Umtriebsdruckes*

Der Einfluß des thermodynamischen Umtriebsdruckes auf das Regelverhalten ist zu kompliziert, als daß er in geschlossener Form — in analoger Weise zu den Betrachtungen beim Heizflächenexponent — untersucht werden könnte. Es sei deshalb ein Modell, das aus einem Strang eines Zweirohrsystems besteht und dessen intensive und extensive Auslegungsparameter sowie auch die technischen Bemessungsparameter variiert werden können, vorgestellt.

Um einen annähernd kontinuierlichen Verlauf der Regelungsabweichungen entlang der Abnehmer zu erhalten, sind die in den einzelnen Geschossen angebrachten Heizflächen über die gesamte Geschoßhöhe aufgeteilt. Die damit entstandenen Elementarabnehmer werden als Parallelschaltungen zu den eigentlichen Abnehmern betrachtet. Insgesamt sind $i = 50$ Abnehmer gleicher geforderter Wärmelieferung ΔQ mit dem vertikalen Abstand h und der Eigenhöhe H vorgesehen (Bild 18). Dabei charakterisiert



18

e Heizflächenstrecken und f Verbindungsleitungen. Zur weiteren Modellbemessung wird zur Simulierung wirklichkeitsnaher Verhältnisse zweckmäßigerweise von den technischen Bemessungsparametern Druckdifferenz durch Reibung $\Delta e_{i=1}$, Temperaturspreizung im Abnehmer $\Delta t_{i=1}$ und von der Vorlauftemperatur $tv_{i=50}$ für den Auslegungsfall ausgegangen. Diese Größen können entlang der Abnehmer als lineare Funktionen der Form

$$\Delta e_i = \Delta e_{i-1} + ddp \text{ in } \frac{\text{kp}}{\text{m}^2}\,; \quad \Delta t_i = \Delta t_{i-1} - ddt \text{ in grd}\,;$$

$$tv_i = tv_{i+1} - t \text{ in } °\text{C},$$

wobei ddp, ddt und t konstante Schrittweiten darstellen, berücksichtigt werden. Damit sind sofort alle Elementarmassenströme me_i und durch Aufsummierung alle mf_i berechenbar. Zur Berücksichtigung der Abkühlung längs der Verteilungsleitungen wird für den Vorlauf der charakteristische Wert

$$K_i = (k \cdot A)_i = \frac{mf_i \cdot c \cdot t}{tv_i - 20} \text{ in } \frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot \text{grd}} \tag{32}$$

ermittelt und gleichfalls für die Rücklaufleitung angesetzt. Die Rücklauftemperaturen der Abnehmer tr_i und die sich durch Mischung und Abkühlung in der Rücklaufsammelleitung einstellenden Temperaturen tr_i' sind nunmehr bestimmbar. Mit Kenntnis des Temperaturverlaufs kann die modifizierte Heizfläche $A \cdot \overline{k} = A \cdot k_o \cdot \vartheta_o^{1-M}$ — im folgenden $\overline{A}$ genannt — zu

$$\overline{A}_i = \frac{\Delta Q}{\left(tv_i - 20 - 0{,}525\,\dfrac{\Delta Q}{me_i}\right)^M} \text{ in } \frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot \text{grd}^M}\,. \tag{33}$$

ermittelt werden. Die thermodynamischen Druckdifferenzen sind zu

$$\widetilde{\Delta e}_i = (\varrho v_i + \varrho r_i)\,0{,}5 \cdot H\,; \quad \widetilde{\Delta f}_i = (\varrho r_i' - \varrho v_i)\,h\,;$$

$$\widetilde{\Delta f}_{i=50} = -\,\varrho v_i \cdot H \text{ in } \frac{\text{kp}}{\text{m}^2} \tag{34}$$

unter Verwendung von

$$\varrho = 1000 - \frac{(t - 3{,}982)^2}{466{,}7} \cdot \frac{t + 273}{t + 67} \cdot \frac{350 - t}{365 - t} \text{ in kg/m}^3 \tag{35}$$

berechenbar. Damit können schrittweise die Druckdifferenzen durch Reibung in den Verbindungsleitungen

$$\Delta f_{i-1} = \Delta e_i + \widetilde{\Delta e}_i - \Delta e_{i-1} - \widetilde{\Delta e}_{i-1} - \widetilde{\Delta f}_{i-1} \tag{36}$$

und der Pumpendruck an den Stranganschlußpunkten

$$P = \Delta e_{i=50} + \widetilde{\Delta e}_{i=50} + \widetilde{\Delta f}_{i=50} \tag{37}$$

bestimmt werden. Aus den genannten Werten seien abschließend Widerstandskennzahlen

$$Ce_i = \frac{\Delta e_i}{me_i^2} \text{ und } Cf_i = \frac{\Delta f_i}{mf_i^2} \text{ in } \frac{\text{kp} \cdot \text{h}^2}{\text{m}^2 \cdot \text{kg}^2} \tag{38}$$

ermittelt.

Nachdem die Modellierung des Versuchsobjektes erfolgt ist, kann das Regelverhalten untersucht werden.

Zu jeder Vorlauftemperatur tv ist nach iterativem Druckabgleich am Strangfuß bei ständiger Neuberechnung des Temperatur- und Druckverlaufes die Wärmelieferung jedes Elementarabnehmers unter Verwendung der zur Iteration geeigneten Gleichung

$$\Delta \overline{Q}_i = \overline{A}_i\,(tv_i - 20 - 0{,}525\,\Delta \overline{Q}_i/me_i)^M \text{ in kcal/h} \tag{39}$$

errechenbar. Daraus folgt weiter der Wärmeliefergrad

$$\beta_i = \frac{\Delta \overline{Q}_i}{\Delta Q_i^+} = \frac{\Delta \overline{Q}_i}{\Delta Q_i'} \cdot \frac{\Delta Q_i'}{\Delta Q_i^+} = \frac{\Delta t_i \cdot me_i \cdot c}{\Delta Q'}\,\lambda' = \overline{\beta}_i \cdot \lambda' \tag{40}$$

und der nach Gl. (11) zu bildende Belastungsgrad

$$\lambda = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \beta_i\,. \tag{41}$$

Zur Bildung der Abweichungsquadratsumme werden die eingangs ausgewählten 50 Belastungsfälle $\overline{\lambda}_j$ verwendet. Entsprechend Gl. (6) sind die Abweichungen

$$\varrho_{i,j} = \beta_{i,j} - \overline{\lambda}_j \tag{42}$$

und damit die Summe der Abweichungsquadrate analog Gl. (30) zu bilden.

$$Z = 2 \cdot \frac{10^9}{228} \sum_{j=1}^{50} \sum_{i=1}^{50} \varrho_{i,j}^2 \cdot x_j \tag{43}$$

Bei der Variation des Belastungsgrades λ' werden die modifizierten Heizflächen $\overline{A}_i$ für das jeweilige λ' solange iterativ angepaßt, bis die Abweichungen aller Abnehmer Null sind. Dabei bleiben die übrigen Modellmaße unverändert. Eine systemcharakteristische Kennzahl bezüglich des Regelverhaltens zu definieren, bereitet wegen der zahlreichen Einflüsse Schwierigkeiten. Auf Grund der Rechenergebnisse konnte eine empirisch gefundene Kennzahl

$$V = \widetilde{\Delta s}^+ \left(\frac{488}{-\,\Delta e_s^+}\right)^{\dfrac{\widetilde{\Delta s}^{+0,2}}{6{,}3}} \text{ in } \frac{\text{kp}}{\text{m}^2} \tag{44}$$

definiert werden. Dabei sind die Kennwerte auf den Wärmeschwerpunkt bezogen und bedeuten

$$\Delta e_S^+ = \Delta e_{i=25}^+ \text{ und } \tilde{\Delta}_S^+ = \left|\frac{d\varrho}{dt}\right| \Delta t^+ \cdot 25hg$$

$$= 681{,}25 \frac{\Delta Q' \cdot h}{\lambda' \cdot mf_{i=50}^+} \qquad (45)$$

Den quantitativen Untersuchungen wurden Modelle mit den Kennwerten

$\Delta e^+_{i=1}$ = — 1200 · · · — 100 kp/m²,
ddp^+ = — 50 · · · — 12 kp/m²,
$\Delta t^+_{i=1}$ = 5 · · · 30 grd,
ddt^+ = — 0,06 · · · 0,2 grd,
$tv^+_{i=50}$ = 90 · · · 110 °C,
t^+ = 0 · · · 0,1 grd,
ΔQ^+ = 200 · · · 400 kcal/h,
M = 1,333 · · · 1,25,
H = 0,5 · · · 1 m und
h = 0,0 · · · 0,3 m

zugrunde gelegt.

Die Auswertung sei wiederum in zyklischer Vertauschung von variablen und konstanten Parametern vorgenommen, wobei mit dem Einfluß der *intensiven Auslegungsparameter* auf das Regelverhalten begonnen wird. Wie Bild 19 zeigt, liegt in den dargestellten Fällen das Minimum der Abweichungsquadrate bei $\lambda' = 0{,}50$. Dieses konnte auch durch weitere Berechnungen bei extremen Modellbemessungen und Berücksichtigung der Rohrabkühlung bestätigt werden.

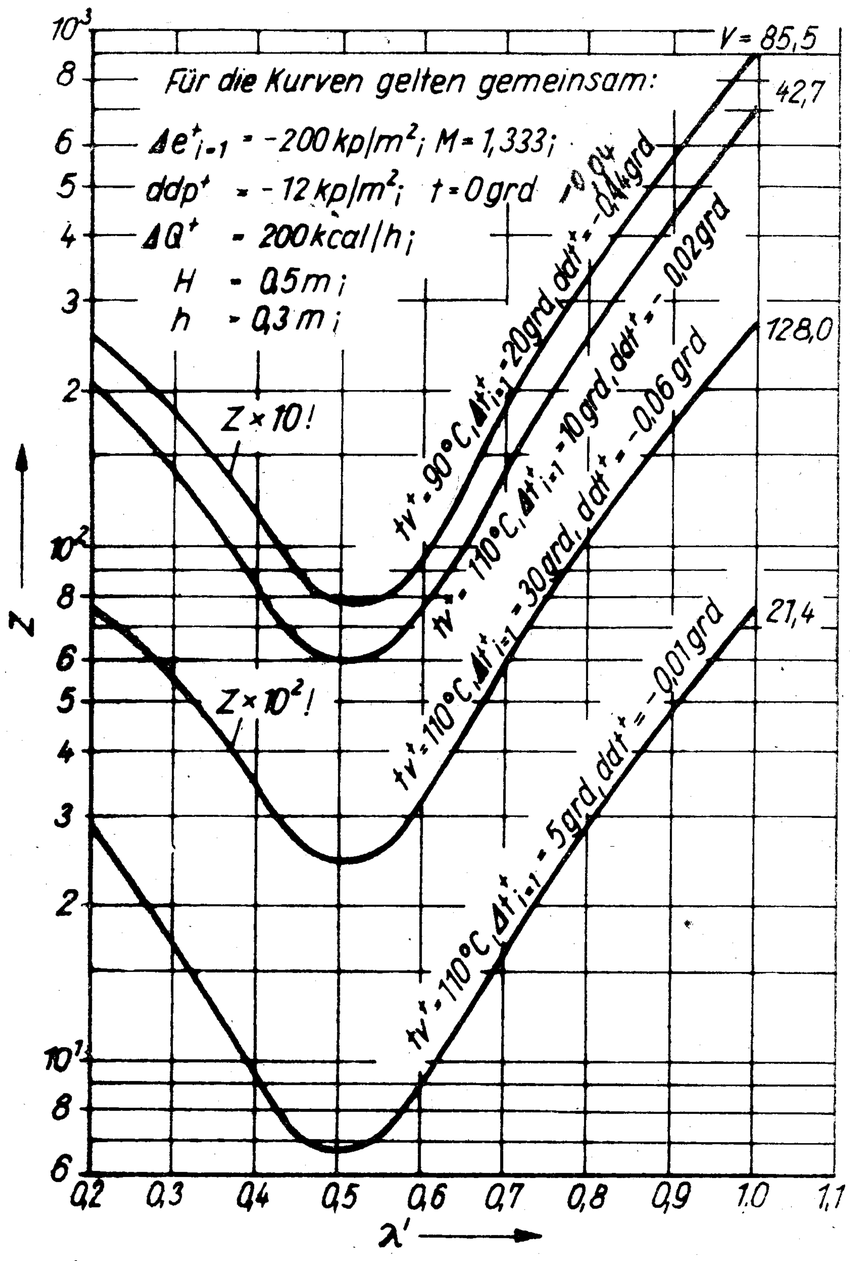
Die Verteilung der Abweichungen $\varrho_{i,j}$ über alle Abnehmer und die gesamte Heizperiode ist in Bild 20 für das Beispiel $\Delta e_{i=1} = -200$ kp/m², $ddp = -12$ kp/m², $\Delta t_{i=1} = 20$ grd, $ddt = -0{,}04$ grd, $tv^+ = 110$ °C, $t = 0$ grd, $\Delta Q = 200$ kcal/h, M = 1,333, $H = 0{,}5$ m und $h = 0{,}3$ m für die drei Belastungsfälle $\lambda' = 1{,}0$, 0,5 und 0,2 dargestellt.

Beim Vergleich der Ergebnisse fällt wiederum auf, daß bei $\lambda' = 0{,}5$ größere maximale Einzelabweichungen als bei $\lambda' = 1{,}0$ — im Gegensatz zur Summe der Abweichungsquadrate — vorliegen. Weiterhin ist deutlich erkennbar, daß die Abweichungen mit zunehmender Höhe der Abnehmer ansteigen. Die Variierung der Vorlauftemperatur ergibt bei Steigerung kleinere Regelungsabweichungen, die durch die Spezifika der Funktionen $\varrho = \varrho(t)$ und $tv = tv(\lambda)$ bzw. $tr = tr(\lambda)$ bedingt sind (Bild 21).

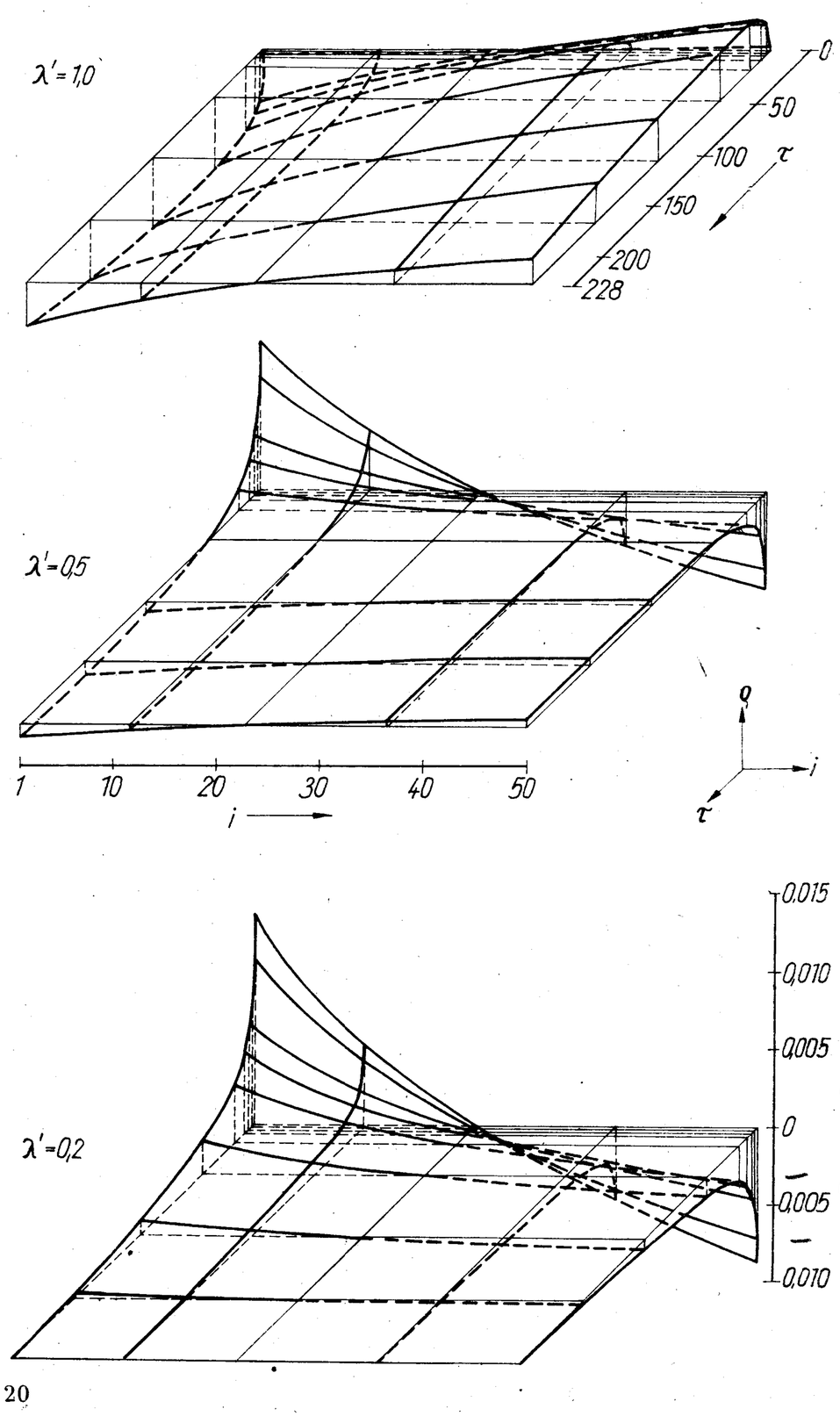
Bei der Betrachtung der *extensiven Auslegungsparameter* hinsichtlich des Regelverhaltens wurde festgestellt, daß nur die Höhe h die Summe der Abweichungsquadrate maßgeblich beeinflußt (Bild 22). Dagegen haben die Größe der geforderten Wärmeleistung ΔQ sowie die Abnehmerhöhe H keinen und der Heizflächenexponent nur geringen Einfluß auf die Regelungsabweichung.

Der Einfluß der systemcharakteristischen Kennzahl V auf die Abweichungsquadrate ist in Bild 23 für ein Modell mit den Werten $\Delta e^+_{i=1} = -200$ kp/m², $ddp^+ = -12$ kp/m², $\Delta e^+_S = -488$ kp/m², $tv^+ = 110$ °C, $t^+ = 0$ grd, $\Delta Q^+ = 200$ kcal/h, M = 1,333, $H = 0{,}5$ m, $h = 0{,}3$ m, $\Delta t^+_{i=1} = 5 \cdots 30$ grd und $ddt^+ = -0{,}01 \cdots -0{,}06$ grd dargestellt.

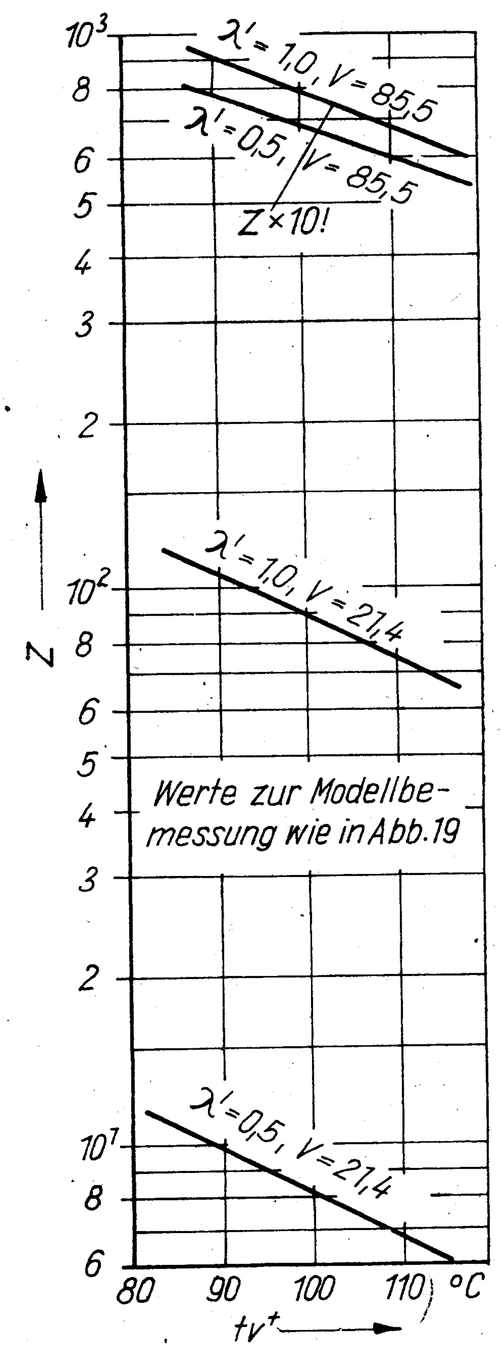
Wie die in Bild 23 eingezeichneten Punkte ausweisen, ergeben sich auch bei geänderten Parametern Δe_S^+, ddp^+ und tv^+ über große Variationsbereiche deckungsgleiche Kurvenzüge. Obwohl der Anstieg der Kurven von der Modellbemessung abhängt, ist stets sehr deutlich erkennbar, daß mit abnehmendem V (kleinere Temperaturspreizungen und größere Pumpendrücke) das Regelverhalten verbessert wird. Im Grenzfall $V = 0$ sind schließlich alle Abweichungen — unabhängig von λ' — Null.



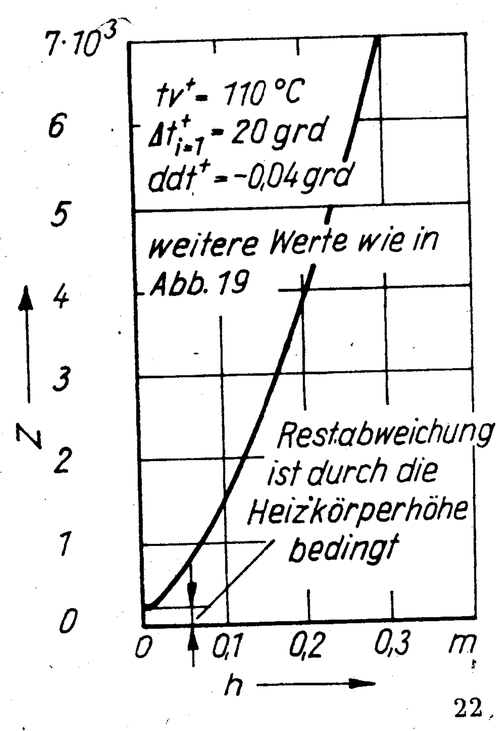
19



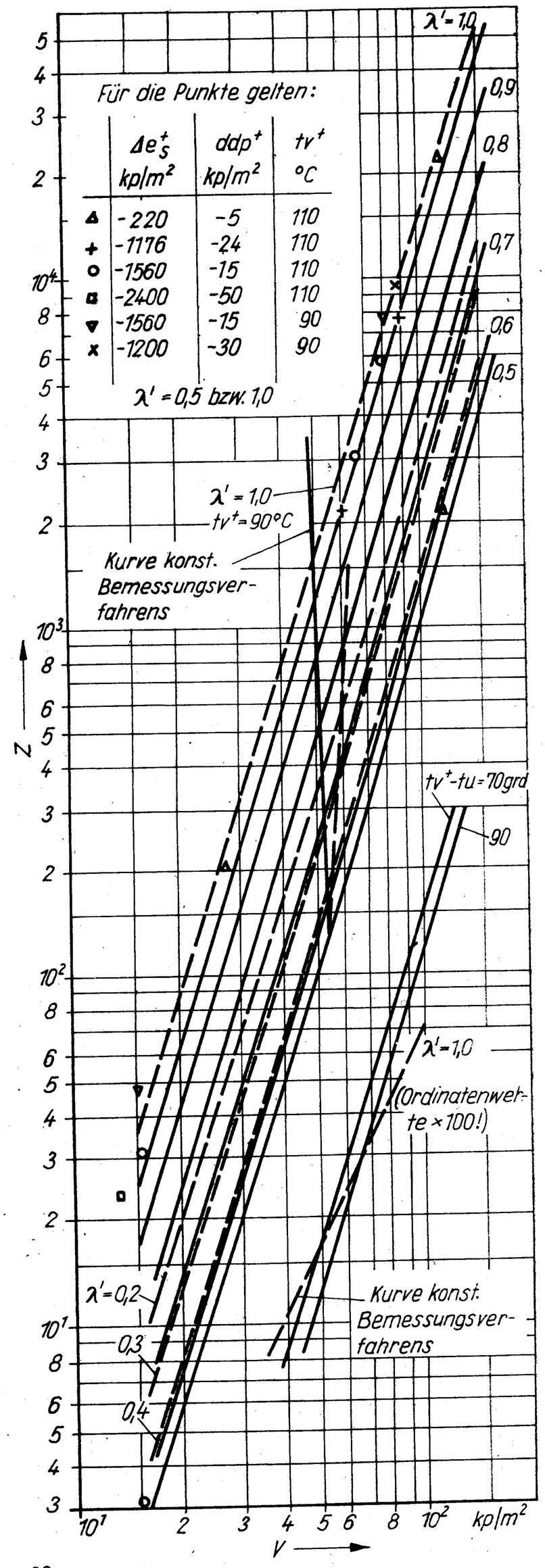
20



21



22



23

Die optimalen intensiven Auslegungsparameter hinsichtlich des Regelverhaltens können bei konventioneller Bemessung aus den bisherigen Ergebnissen sofort, bei optimaler Bemessung erst nach Überlagerung der Kurven $Z = Z(V)$ mit den „Kurven konstanten Bemessungsverfahrens" angegeben werden. In beiden Fällen erhält man:

1. Belastungsgrad $\lambda' = 0{,}50$;
2. Vorlaufübertemperatur ($tv^+ - tu$) möglichst niedrig.

Während $\lambda' = 0{,}50$ gegenüber $\lambda' = 1{,}00$ eine Senkung der Abweichungsquadrate um etwa 89 Prozent ergibt, führt die Änderung $tv^+ - tu = 90$ grd auf $tv^+ - tu = 70$ grd nur zu einer Senkung um etwa 43 Prozent.

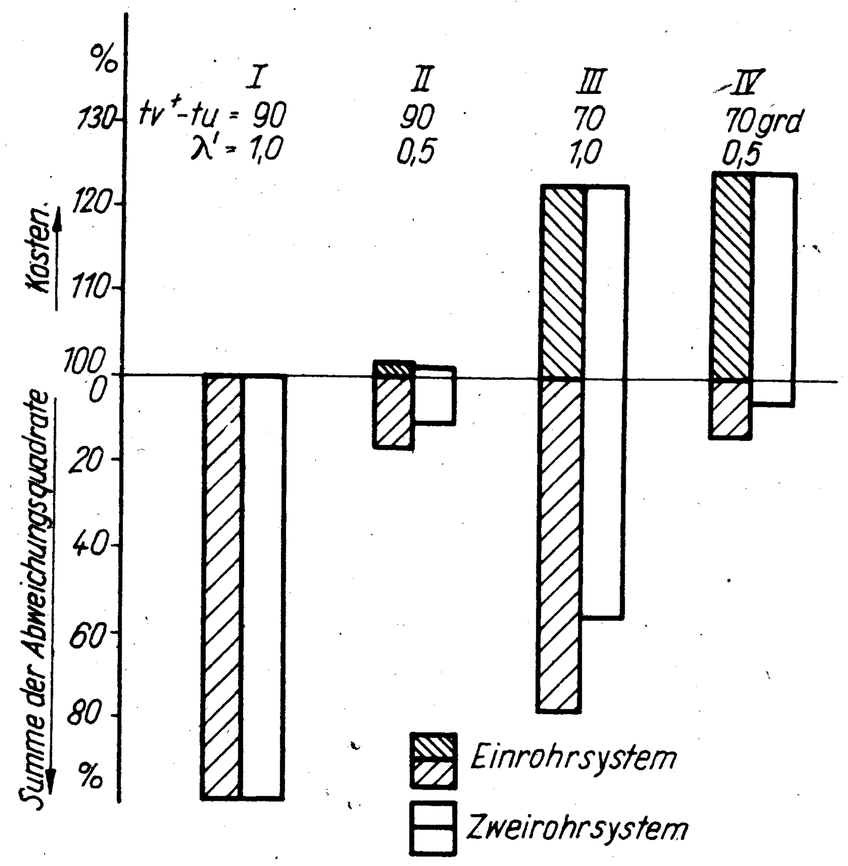
7.3. Einfluß des Übertragungsverhaltens der Verteilungsleitungen

Infolge der unterschiedlichen Strangbelastungen, Temperaturspreizungen oder der verschiedenen Verhältnisse von Einzelwiderständen zu Rohrreibungswiderständen werden bei Belastungsgraden, die nicht dem Auslegungszustand entsprechen ($\lambda \neq \lambda'$) die thermodynamischen Druckanteile örtlich unterschiedlich verändert und der Pumpenbetriebspunkt geringfügig verschoben.

Die so verursachten Abweichungen können in einen positiven und negativen Bereich aufgeteilt werden, wenn die Auslegung für einen mittleren Belastungsgrad erfolgt. In Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen bietet sich ebenfalls $\lambda' = 0{,}50$ an. Auf Grund des relativ hohen optimalen Pumpendruckes kommen die genannten Einflüsse kaum zur Geltung.

8. Optimale Vorlauftemperatur und optimaler Belastungsgrad

Als Ergebnis der bisherigen Untersuchungen erhält man für die partiellen Optima der intensiven Auslegungsparameter gegenläufige Tendenzen. Die Vorlauftemperatur im Vollastfall sollte bezüglich minimaler Kosten möglichst hoch, bezüglich minimaler Regelabweichung niedrig sein. Für den Belastungsgrad im Auslegungsfall sollten hinsichtlich der ersten Forderung 100 Prozent, hinsichtlich der zweiten 50 Prozent gewählt werden. Die Unterschiedlichkeit der einzelnen Gradienten bei Abweichungen von den partiellen Optima führt aber zu einem wirklich „optimalen Kompromiß". In Bild 24 sind die speziellen Ergebnisse aus den Bildern 1, 17 und 23 für die typischen Auslegungsparameter graphisch dargestellt. Deutlich ist erkennbar, daß niedrige Kosten bei gleichzeitig niedrigen Regelabweichungen am besten durch die Parameterpaarung II verwirklicht werden. Da die angegebenen speziellen Werte qualitativ verallgemeinerungsfähig sind, können die intensiven Auslegungsparameter für das totale Optimum wie folgt festgelegt werden:



1. Vorlaufübertemperatur für den Vollastfall ($tv^+ - tu$) = 90 grd
2. Belastungsgrad für den Auslegungsfall $\lambda' = 0{,}50$.

Die praktische Handhabung müßte damit so aussehen, daß man die gesamte Anlage (Heizflächen, Rohrleitungen usw.) für die halbe Wärmemenge und die halbe Temperaturspreizung — bezogen auf den Vollastfall — dimensioniert. Die Vorlauftemperatur darf selbstverständlich dann auch nur die der Halblast entsprechenden Größe haben. Sie kann aus Gl. (16), (19) oder aus Bild 7 entnommen werden. Sie beträgt z. B. bei Verwendung von Radiatoren (M = 1,33) und 110/70 °C tv' = 72,0 °C sowie bei 90/70 °C tv' = 60,5 °C. Außer dieser kleinen Umrechnung entsteht keinerlei Mehraufwand bei der Dimensionierung.

Literatur

[1] *Glück, B.*, Optimale Auslegung von Wasserheizungsanlagen mit Umwälzpumpe, TGA-Informationen, VEB Kombinat TGA 1970, H. 2

[2] *Raiss, W.* u. *Mönner, W.*, Der Heizwärmebedarf von Wohnhochhäusern, Gesundheitsingenieur 1965, H. 8