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

Dr.-Ing. B. GLUCK, Jößnitz (Vogtl.)

1. Einführung

Eine Wasserheizungsanlage wird wie jede technische Anlage für bestimmte Parameter — den Auslegungszustand — bemessen. Diese Größen können im vorliegenden Fall vorteilhaft in intensive und extensive Auslegungsparameter eingeteilt werden. Das Ergebnis sind die technischen Bemessungsparameter. Die Tabelle 1 gibt Aufschluß über die Zuordnung spezieller Größen.

Tabelle 1

Intensive Auslegungsparameter I	Vorlauftemperatur Belastungsgrad
Extensive Auslegungsparameter E	Anlagengröße Rohrführung Heizflächenart Isolierdicke
Technische Bemessungsparameter T	Rohrdurchmesser Heizflächengröße Pumpendruck Massendurchsatz

Um eine wirtschaftlich-optimale Anlage zu erhalten, sind die Auslegungsparameter beider Gruppen und die technischen Bemessungsparameter unter Beachtung der Nebenbedingungen, die z. B. physikalischer, konstruktiver, regelungstechnischer, hygienischer und wärmephysiologischer Art sein können, so zu wählen, daß minimale Jahresgesamtkosten als Zielfunktion erreicht werden. Die zusammenfassende Zielfunktion kann rein formal in dieser Form

$$\Phi = \varphi\,(I_1, \cdots, I_k; E_1, \cdots, E_l; T_1, \cdots, T_m) + \sum_{\mu=1}^{n} \lambda_\mu\, \psi_\mu\,(I_1, \cdots, I_k; E_1, \cdots, E_l; T_1, \cdots, T_m) \rightarrow \text{Min.} \quad (1)$$

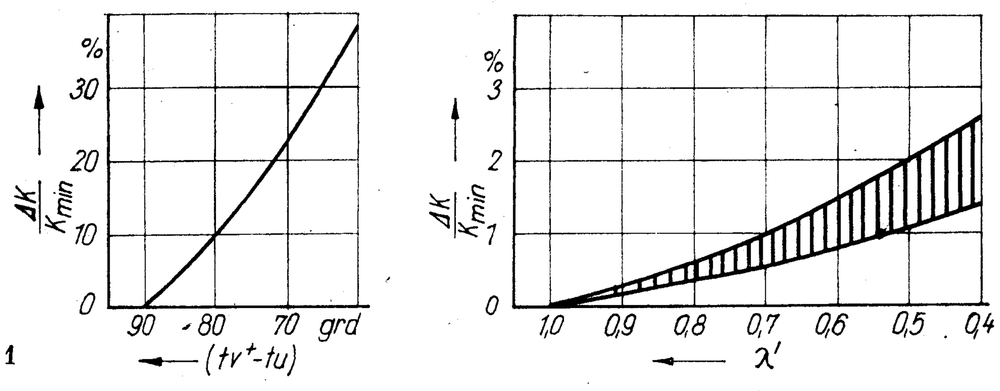
geschrieben werden, wenn φ die Zielfunktion, ψ die Nebenbedingung und λ ein Multiplikator bedeuten.
Die Lösung der Zielfunktion erfolgt wegen ihrer Kompliziertheit schrittweise:

I. Schritt: Optimale Bemessung bei vorgegebenem Auslegungszustand

Die intensiven und extensiven Auslegungsparameter werden als Konstanten betrachtet und für diese Verhältnisse die wirtschaftlich-optimalen Bemessungsparameter ermittelt. Zur Lösung dieses Problems ist ein Rechenprogramm erarbeitet worden [1]. Das Ergebnis stellt zunächst ein partielles Optimum dar.

II. Schritt: Optimale Auslegungsparameter bei vorgegebenem Bemessungsverfahren

Die optimalen intensiven Auslegungsparameter hinsichtlich der Kosten folgen aus Ergebnissen von Beispielrechnungen.



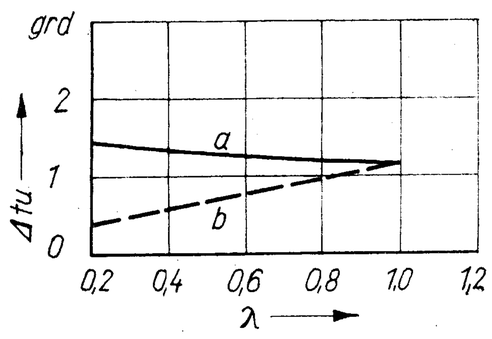
1

Es handelt sich dabei um Randoptima, da mit steigender Vorlauftemperatur tv^+ und steigendem Belastungsgrad λ' die Kosten abnehmen (Bild 1). (Im weiteren wird mit „′“ der Auslegungs- und mit „+“ der Vollastzustand gekennzeichnet.)

Zur Ermittlung des totalen Optimums unter dem Primat der hygienischen und wärmephysiologischen Nebenbedingungen ist das Regelungsverhalten der Anlage zu untersuchen. Die eigentliche Regelgröße — die Raumtemperatur tu — aller beheizten Räume zu ermitteln wäre ungemein aufwendig. Deshalb wird eine reduzierte Regelstrecke, deren Grenze um die Heizfläche verläuft, betrachtet und der Wärmetransport durch die Heizfläche in den auf Solltemperatur gehaltenen Raum als charakteristische Regelgröße verwendet. Zur Bewertung der Regelungsgüte soll jedoch die sekundäre Auswirkung bei veränderter Wärmelieferung soweit als möglich berücksichtigt werden. Als Beispiel sei ein mit Außenwänden umbauter Raum mit der Solltemperatur $tu = 20\,°C$, der mit einem Radiator ($tv^+ = 110\,°C$) beheizt wird, betrachtet. Die Abweichungen der Raumtemperatur während der Heizperiode sind im Bild 2 für zwei Fälle angegeben:

Kurve a — konstante absolute Wärmelieferabweichung (5% der Vollast)

Kurve b — konstante relative Wärmelieferabweichung (5% der jeweiligen Last)



2

Aus dem Bild geht hervor, daß die absolute Wärmelieferabweichung in guter Näherung ein Maß für die Raumtemperaturabweichung darstellt und somit als Bewertungsmaß benutzt werden soll. Um ein gutes Regelungsverhalten zu erzielen, werden die Zielfunktionen:

1. Die Summe der Abweichungsquadrate, über alle Abnehmer und die Gesamtheizperiode gebildet, soll ein Minimum sein.
2. Die Abweichungen an den einzelnen Abnehmern sind so über die Heizperiode zu verteilen, daß diese positiv und negativ auftreten.

Und die Nebenbedingungen:

1. Alle Einzelabnehmer sind untereinander gleichberechtigt zu bewerten.
2. Wärmebedarf und Wärmelieferung sollen für ein Gebäude stets übereinstimmen, um eine Gesamtunter- bzw. -überheizung zu vermeiden.

Da bei der praktischen Anwendung nicht alle Forderungen gleichzeitig erfüllbar sind, ist die genannte Reihenfolge als Prioritätsmaßstab zu werten.

2. Kennwerte und Bewertungsverfahren

Wie im folgenden Abschnitt bewiesen wird, kann der Wärmebedarf eines Raumes i als

$$Q_i = Q_i\,(ta) \tag{2}$$

dargestellt werden. Demgegenüber steht die Wärmelieferung an den Raum i mit

$$\overline{Q_i} = \overline{Q_i}\,(ta)\,. \tag{3}$$

An Stelle des Wärmebedarfs und der Wärmelieferung können auch die dimensionslosen Darstellungen

$$\text{Wärmebedarfsgrad}\quad \varphi_i = \frac{Q_i\,(ta)}{Q_i^+} = \varphi_i\,(ta) \tag{4}$$

und

$$\text{Wärmeliefergrad}\quad \beta_i = \frac{\overline{Q_i}\,(ta)}{Q_i^+} = \beta_i\,(ta) \tag{5}$$

verwendet werden. Die absolute Abweichung des Wärmeliefergrades vom Wärmebedarfsgrad ergibt sich zu

$$\varrho_i = \beta_i - \varphi_i = \varrho_i\,(ta)\,. \tag{6}$$

Zur exakten Beurteilung des Regelungsverhaltens muß weiterhin die Häufigkeitsverteilung aller vorkommenden Lastfälle berücksichtigt werden. Der dazu nötige Verlauf

$$ta = ta\,(\tau) \tag{7}$$

liegt aus langjährigen Messungen gesichert vor.

Zur Erläuterung des Bewertungsverfahrens ist im Bild 3 die absolute Abweichung als Funktion

$$\varrho = \varrho\,(r, \tau) \tag{8}$$

in geordneter Form für einen theoretischen Fall aufgetragen. Die Variable r wird dabei als symbolische Ortskoordinate der einzelnen Abnehmer (z. B. laufende Geschoßzahl an einem Strang) betrachtet. Zur Erfüllung der ersten Zielfunktion unter Beachtung der ersten Nebenbedingung sei

$$\frac{\partial}{\partial X} \int_\tau \int_r [\varrho\,(X, r, \tau)]^2\, dr\, d\tau = 0 \tag{9}$$

oder für diskrete Verteilung in zeitquantisierter Darstellung

$$\sum_j \sum_i [\varrho\,(X)_{i,j}]^2 \rightarrow \text{Minimum} \tag{10}$$

als Bedingungsgleichung angeschrieben, wobei X den jeweiligen Auslegungsparameter, r bzw. τ eine kontinuierliche und i bzw. j eine diskrete Orts- bzw. Zeitkoordinate darstellen. Da nach den Nebenbedingungen Gleichheit zwischen Wärmebedarfs- und -liefergrad für die Gesamtanlage vorliegen soll, wird zur besseren Darstellung der Belastungsgrad

$$\lambda\,(\tau) = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \beta\,(r, \tau)\, dr}{r_2 - r_1} \qquad \lambda\,(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \beta_i\,(\tau) \tag{11}$$

als zusätzliche Kenngröße eingeführt. Damit ist auch die Ermittlung der Funktion

$$tv = tv\,(\lambda) \tag{12}$$

leicht möglich.

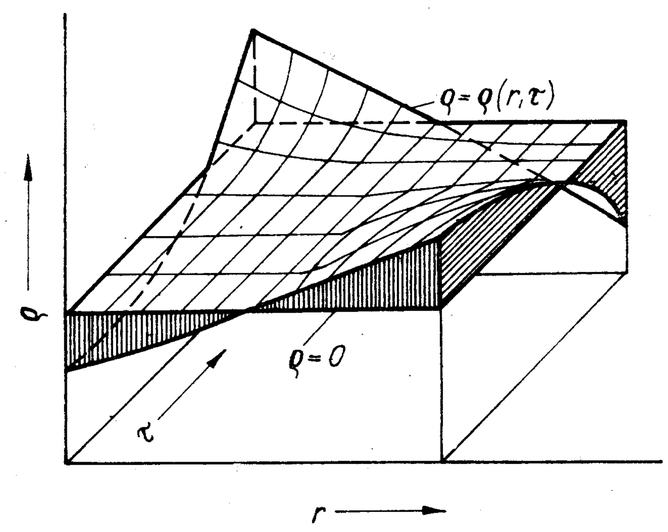
Die zweite Zielfunktion soll nur zur abschließenden Einschätzung der Regelungsgüte herangezogen werden.

3. Wärmebedarfscharakteristik von Gebäudeheizungsanlagen

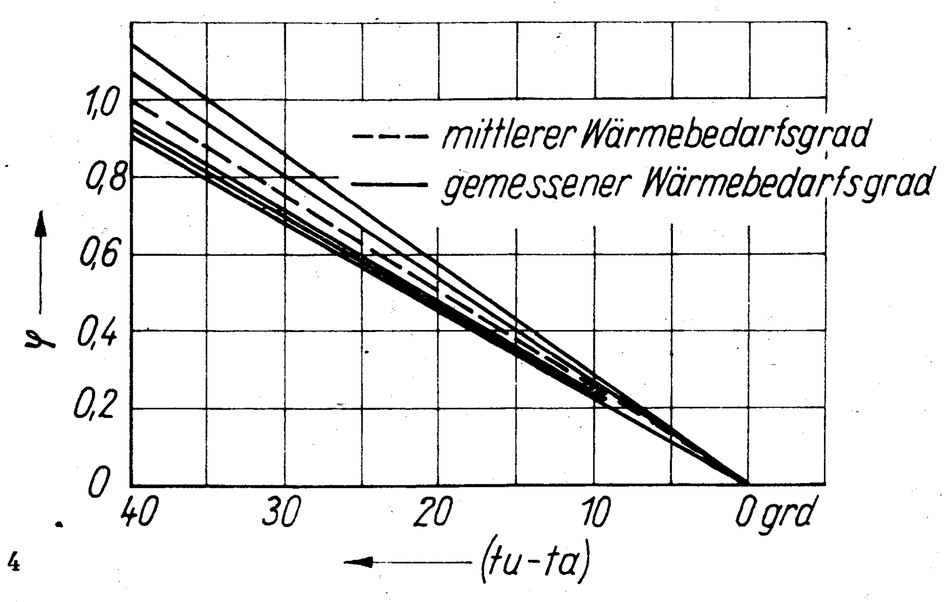
Unter der Annahme von stationären Verhältnissen wurden nach statistischen Methoden Q und ta als zwei Zufallsgrößen aufgefaßt und ihre stochastische Bindung untersucht. Da die meteorologischen Komponenten nicht fortlaufend monoton steigen oder fallen, ergeben sich bei der Annahme stationärer Verhältnisse Abweichungen in beiden Richtungen gegenüber den tatsächlichen Werten. Damit ist begründet anzunehmen, daß in der statistischen Aussage die fehlerhaften Einzelergebnisse kompensiert sind. In modifizierter Form kann man

$$Q = Q\,(z_1, \cdots, z_n; ta) \tag{13}$$

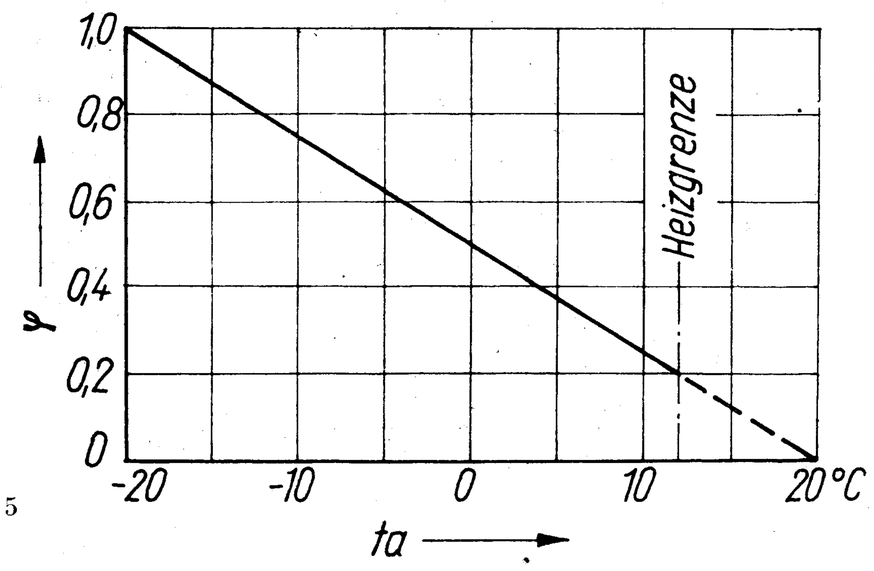
schreiben. Als Zufallsgrößen z wurden die Sonnenstrahlung (direkte und diffuse Strahlung, letztere bestehend aus diffuser



3

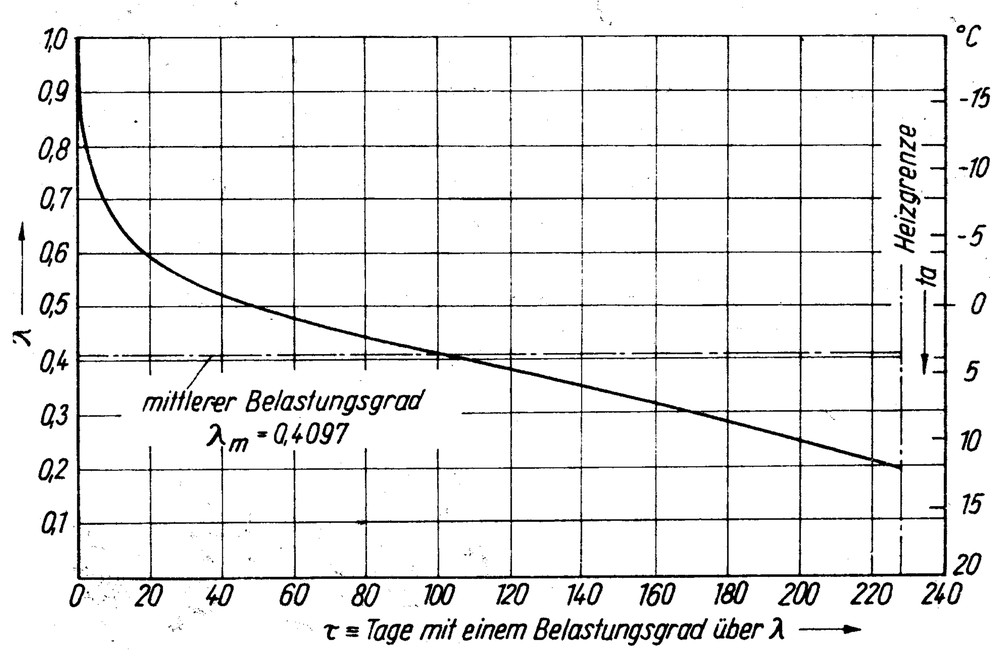


4

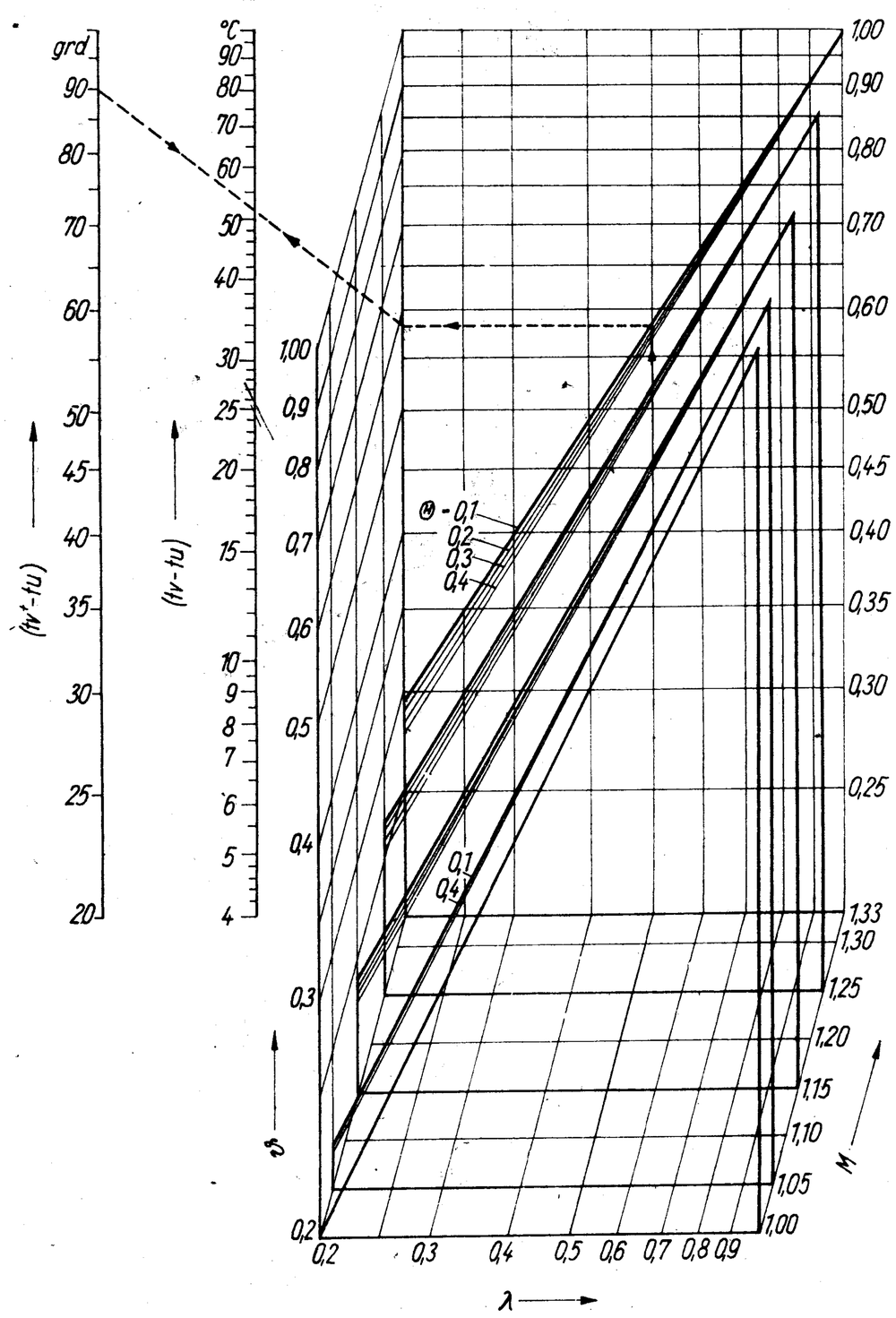


5

Himmelsstrahlung und der reflektierten direkten und diffusen Himmelsstrahlung auf die Umgebung), die Wärmestrahlung aus der Umgebung (atmosphärische Gegenstrahlung und Wärmestrahlung der terrestrischen Gegenstände der Umgebung), die Wärmeabstrahlung der Außenflächen sowie die Windgeschwindigkeit und -richtung mit ihrem Einfluß auf die konvektive Wärmeübergangszahl und den Lüftungswärmebedarf berücksichtigt. Im Ergebnis erhielt man lineare Regressionslinien für $Q = Q\,(t\mathrm{a})$. Diese theoretischen Ergebnisse wurden durch umfangreiche Messungen an drei Hochhäusern unterschiedlicher Konstruktion und Ausführung bestätigt [2]. Die Darstellung der mitgeteilten Ergebnisse zeigt Bild 4. Die quantitative Auswertung ergab, daß für die regelungstechnische Beurteilung eine Wärmebedarfskurve zugrunde gelegt werden muß, die im Mittel um etwa 13 Prozent niedriger liegt, als die nach TGL 112-0319 errechnete.



6



7

Nimmt man für die Raumtemperatur $t\mathrm{u} = 20$ °C und für die mittlere extreme Außentemperatur $t\mathrm{a} = -15$ °C an, so kann durch Ansetzen des Wärmebedarfs $Q^+ = Q_{\mathrm{TGL}}$ ($t\mathrm{a} = -15$ °C) bei $t\mathrm{a} = -20$ °C die Wärmebedarfskurve leicht konstruiert werden. Exakt gilt dann für den Wärmebedarf

$$Q = 0{,}875 \cdot Q_{\mathrm{TGL}} \tag{14}$$

und für den Wärmebedarfsgrad

$$\varphi = 0{,}875 \cdot \varphi_{\mathrm{TGL}}\,. \tag{15}$$

Als Heizgrenze soll der für die Gradtagszahlermittlung und den Fernheizbetrieb übliche Wert $t\mathrm{a} = 12$ °C Verwendung finden. Damit soll für die weiteren Betrachtungen bei üblichen Wohn- und Gesellschaftsbauten der im Bild 5 gezeigte Wärmebedarfsgradverlauf als erfahrungsstatistischer Mittelwert zugrunde gelegt werden. Für die Häufigkeitsverteilung der Außenlufttemperatur wurde eine mittlere Kurve aus den Angaben für Berlin und Dresden aufgestellt. Da $\varphi = \varphi\,(t\mathrm{a})$ als lineare Funktion approximiert wurde, ist die geordnete Häufigkeitsverteilung der Außenlufttemperatur und des Belastungsgrades bei entsprechendem Maßstabsfaktor kongruent. Der Verlauf des Belastungsgrades λ ist im Bild 6 dargestellt.

4. Wärmeliefercharakteristik von Wasserheizungsanlagen

Das hauptsächlichste Spezifikum der Regelung von Wasserheizungsanlagen besteht darin, daß vom Wärmebereitsteller aus durch definierte Verstellung einer Größe bei jedem vorkommenden Belastungsfall alle Wärmeverbraucher so beeinflußt werden, daß jeweils die Wärmelieferung dem Wärmebedarf entspricht. An allen Heizflächen eine örtliche manuelle Regelung vorzusehen, muß wegen des geringen Komforts, eine automatische Regelung wegen derzeit zu hoher Kosten abgelehnt werden. Weiterhin beeinflußt eine örtliche Regelung stets auch die Wärmeabgabe der übrigen Heizflächen, da das gemeinsam genutzte Übertragungsglied — Rohrsystem — infolge veränderter Belastung auch ein verändertes Übertragungsverhalten zeigt. Es werden die folgenden Festlegungen getroffen:

1. Die zentrale Regelung muß automatisch, kontinuierlich und so präzise arbeiten, daß eine örtliche Regelung nur im Ausnahmefall erforderlich ist.
2. Die örtliche Regelung erfolgt manuell und dient den individuellen Bedürfnissen.

Für die zentrale Regelung wird — dies ist in der Praxis auch allgemein üblich — die Temperaturregelung bevorzugt. Die wichtigsten Gründe sind:

1. Das Übertragungsverhalten des Rohrsystems kann bei Mengenregelung zu großen Unterschieden führen, da $\Delta p \sim m^r$ gilt und r streckenabhängig ist. Außerdem macht sich dann die Veränderung des thermodynamischen Druckanteils stark bemerkbar.
2. Eine Massenveränderung bei konstanter Vorlauftemperatur wirkt sich in den Heizflächenstrecken von Einrohrsystemen örtlich sehr unterschiedlich aus.
3. Durch gleitende Fahrweise der Fernheiznetze würde eine über die Heizperiode konstante Vorlauftemperatur unmöglich sein.
4. Die Wärmeverluste der Verteilungsleitungen sind bei Mengenregelung sehr groß.

Der funktionelle Zusammenhang zwischen Vorlauftemperatur und Belastungsgrad wurde analytisch zu

$$t\mathrm{v} - t\mathrm{u} = [(t\mathrm{v}^+ - t\mathrm{u}) - 0{,}525 \cdot \Delta t^+] \cdot \lambda^{1/M} + 0{,}525 \cdot \Delta t^+ \cdot \lambda \quad [\mathrm{grd}] \tag{16}$$

ermittelt. Die Ergebnisse praktischer Berechnungsbeispiele, die alle tatsächlichen Einflüsse enthalten, zeigen mit Gl. (16) eine sehr gute Übereinstimmung. Zur allgemeingültigen Dar-

stellung bietet sich eine dimensionslose Form für die Vorlaufübertemperatur

$$\vartheta = \frac{t_V - t_U}{t_{V^+} - t_U} = \lambda^{1/M} + 0{,}525 \cdot \Theta\,(\lambda - \lambda^{1/M}) \qquad (17)$$

mit

$$\Theta = \frac{t_{V^+} - t_{r^+}}{t_{V^+} - t_U} \qquad (18)$$

und M dem Heizflächenexponenten (z. B. 1,33 bei Radiatoren) an. Die Gl. (17) wurde im Bild 7 ausgewertet. Dabei ist sofort zu sehen, daß diese Gleichung einfach als

$$\vartheta = \lambda^N \qquad (19)$$

approximiert werden kann. Der Exponent N ist von der relativen Temperaturspreizung Θ abhängig. Die mittleren Exponenten N sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2

M	1,33	1,25	1,15	1,05	1,00
N	0,780	0,825	0,885	0,950	1,000