Betrachtungen zur erforderlichen Genauigkeit bei der automatisierten Projektierung von Gebäudeheizungsanlagen

Dr.-Ing. B. GLUCK,
VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung – Institut

Durch den Einsatz von Rechenautomaten ist es möglich geworden, bei der Projektierung von Gebäudeheizungsanlagen umfangreichere Berechnungen, als es konventionell üblich war, durchzuführen. Die Meinung der Fachleute über die notwendige Genauigkeit und die Größe der einzusetzenden Rechenautomaten ist geteilt, da die einzelnen Einflüsse subjektiv beurteilt werden.

Eine undogmatische, allgemeingültige Entscheidung läßt sich nicht treffen, da dies die Einflußfaktoren: Raumnutzung, Heizungssystem, Heizflächeneinsatz usw. unberücksichtigt ließe. Der folgende Beitrag soll aber einen objektiven Maßstab zur Entscheidungsfindung setzen.

Sieht man von den Rechenverfahren zur Optimierung ab und betrachtet die üblichen automatisierten Dimensionierungsverfahren, so ergibt der Vergleich mit einer exakt durchgeführten manuellen Berechnung:

- Die Anzahl der zugrunde gelegten Eingabedaten ist gleich;
- die durchzuführenden Berechnungsschritte, wie z. B. Ermittlung des thermodynamischen Umtriebsdruckes, der Rohrabkühlung, die Heizflächenauswahl, Pumpenauswahl usw., sind qualitativ gleich;
- quantitativ ergibt sich eine Vergrößerung der Berechnungsschritte, da eine iterative Anpassung der Mengenströme derart erfolgt, daß eine Einregulierung bei der Montage entfallen kann. Der damit verbundene rechentechnische Aufwand wäre manuell nicht durchführbar.

Die Genauigkeit, mit der die Iterationen — z. B. Einpassen von Strängen — erfolgen, steht im direkten Verhältnis zur Rechenzeit. Sie hat im allgemeinen nichts mit der erforderlichen Automatengröße zu tun, da diese in erster Linie durch den benötigten Speicherplatz, der direkt vom Anlagenumfang abhängt, bestimmt wird.

Die von den Praktikern oft kritisierten zahlreichen Dezimalstellen auf Rechnerausdrucken haben nichts mit der wirklichen Genauigkeit und der Rechenzeit zu tun. Sie entstehen bei der Rückkonvertierung von Dual- in Dezimalzahlen. Man sollte jedoch nur die praktisch sinnvollen Dezimalen ausdrucken.

Die im Zusammenhang mit der automatisierten Projektierung aufgestellten Betrachtungen zur Genauigkeit können in vollem Umfang auch auf die Ausführung und den Betrieb von Wasserheizungsanlagen angewendet werden.

Maßstab der Genauigkeit

Die Wärmeabgabe $\dot{Q}$ der Heizfläche errechnet sich zu

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (t_v - t_r) = \bar{k} \cdot A \cdot [t_v - t_i - 0{,}525\,(t_v - t_r)]^M, \tag{1}$$

wobei

$\dot{m}$ der Massenstrom in kg/h
c die spezifische Wärme in kcal/kg·grd
t_v die Vorlauftemperatur in °C
t_r die Rücklauftemperatur in °C
t_i die Raumtemperatur in °C
A die Heizfläche in m²
M der Heizflächenexponent
$\bar{k}$ die modifizierte Wärmedurchgangszahl in kcal/m²h grd^M

bedeuten.

Der objektive Maßstab der Genauigkeit bei der Berechnung einer Heizungsanlage ist das Verhältnis der vorhandenen Wärmeabgabe der Heizfläche zur erforderlichen.

Dabei wird als Bezugstemperatur t_i jeweils der geforderte Sollwert t_i' zugrunde gelegt.

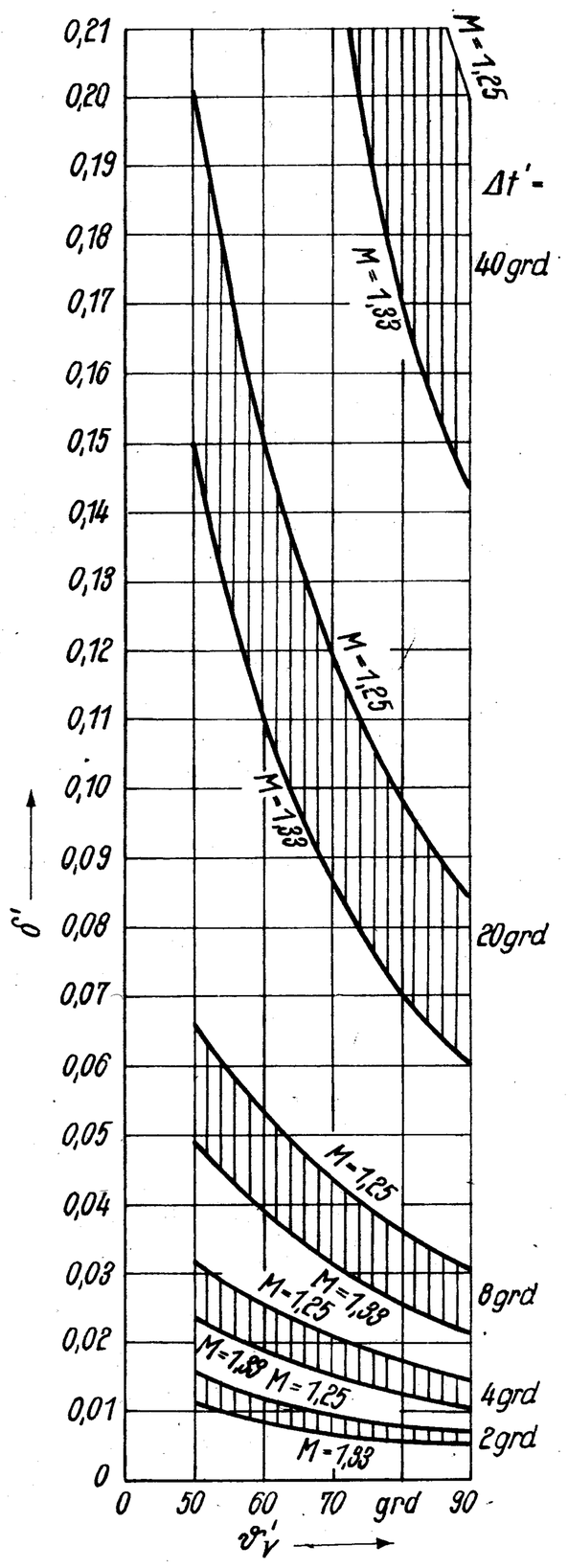
Es gilt

$$\varrho = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}'} = \frac{\dot{m} \cdot c \cdot (t_v - t_r)}{\dot{m}' \cdot c \cdot (t_v' - t_r')} = \frac{\bar{k} \cdot A \cdot [t_v - t_i' - 0{,}525 \cdot (t_v - t_r)]^M}{\bar{k} \cdot A' \cdot [t_v' - t_i' - 0{,}525 \cdot (t_v' - t_r')]^M}. \tag{2}$$

Die Kennzeichnung „′“ weist auf den Sollzustand (exakte Auslegung) hin. Die Gl. (2) kann in der angeschriebenen Form nicht allgemeingültig und aussagekräftig ausgewertet werden. Als Anlagenkenngröße wird deshalb aus Gl. (1) der Faktor

$$\delta' = \frac{\bar{k} \cdot A'}{\dot{m}' \cdot c} = \frac{t_v' - t_r'}{[t_v' - t_i' - 0{,}525 \cdot (t_v' - t_r')]^M} \tag{3}$$

gebildet und für eine umfassende Auswertung der reale Größenbereich (Bild 1) untersucht.



1

Dabei ergibt es sich, daß bei

Einrohrheizungen $\delta' = 0{,}01 \cdots 0{,}05$

Zweirohrheizungen $\delta' = 0{,}1 \cdots 0{,}2$

zu betrachten sind.

Zur Ermittlung der Kenngröße δ' können stets die Temperaturverhältnisse des Vollastzustandes als Grundlage dienen, da für die Errechnung der Temperaturkurve $\delta' =$ const. vorausgesetzt wird.

In Ergänzung des Bildes 1 ist Bild 2 gestaltet worden, wobei lediglich die Parameter ϑ_v' und $\Delta t'$ vertauscht sind, um ein kontinuierliches Ablesen der Werte zu ermöglichen.

Die iterativ errechenbaren Temperaturspreizungen können somit

$$\Delta t' = (t_v' - t_r') = \delta' \cdot [t_v' - t_i' - 0{,}525 \cdot \Delta t']^M \tag{4}$$

und

$$\Delta t = (t_v - t_r) = \delta' \cdot [t_v' - t_i' + \Delta\vartheta_v - 0{,}525 \cdot \Delta t]^M \cdot \frac{\alpha}{\mu} \tag{5}$$

geschrieben werden.

Dabei sind in Gl. (5)

$$\delta = \frac{\bar{k} \cdot A}{\dot{m} \cdot c} = \frac{\bar{k} \cdot A'}{\dot{m}' \cdot c} \cdot \frac{\dot{m}'}{\dot{m}} \cdot \frac{A}{A'} = \delta' \cdot \frac{\alpha}{\mu}$$

d. h.

$$\alpha = \frac{A}{A'} \quad \text{und} \quad \mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}'} \tag{6}$$

sowie

$$t_v = t_v' + \Delta\vartheta_v \tag{7}$$

gesetzt. Damit kann Gl. (2) endgültig als

$$\varrho = \frac{\dot{m} \cdot \Delta t}{\dot{m}' \cdot \Delta t'} = \mu \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t'} \tag{8}$$

angegeben werden.

Auswertung

Die Gleichungen (4), (5) und (8) wurden mit Hilfe eines Rechenprogrammes für sämtliche Kombinationen der Abweichungen

$\alpha = 1{,}0;\ 1{,}05;\ 1{,}10;$

$\mu = 1{,}0;\ 1{,}1;\ 1{,}2;\ 0{,}8;$

$\Delta\vartheta_v = (-2;\ 0;\ 2)$ grd,

die Anlagenkennzahlen

$\delta' = 0{,}01;\ 0{,}02;\ 0{,}04;\ 0{,}1;\ 0{,}2;$

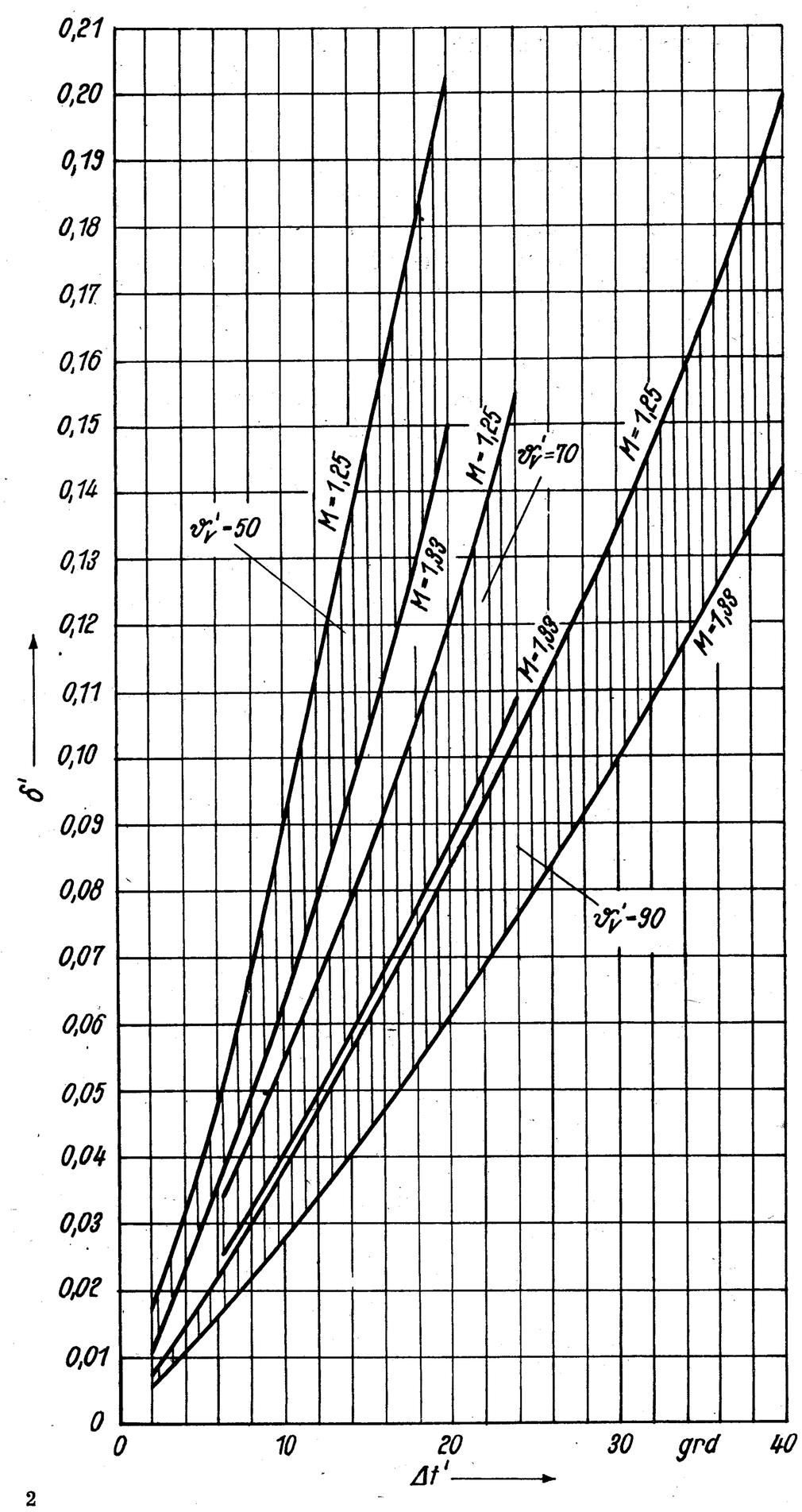
die Heizflächenexponenten

$M = 1{,}25;\ 1{,}33;$

sowie die Vorlaufübertemperaturen

$\vartheta_v' = t_v' - t_i' = (90;\ 75;\ 70;\ 60;\ 52;\ 43;\ 34;\ 25;\ 20)$ grd

ausgewertet. Einen Überblick der Ergebnisse geben die Tabellen 1 und 2.



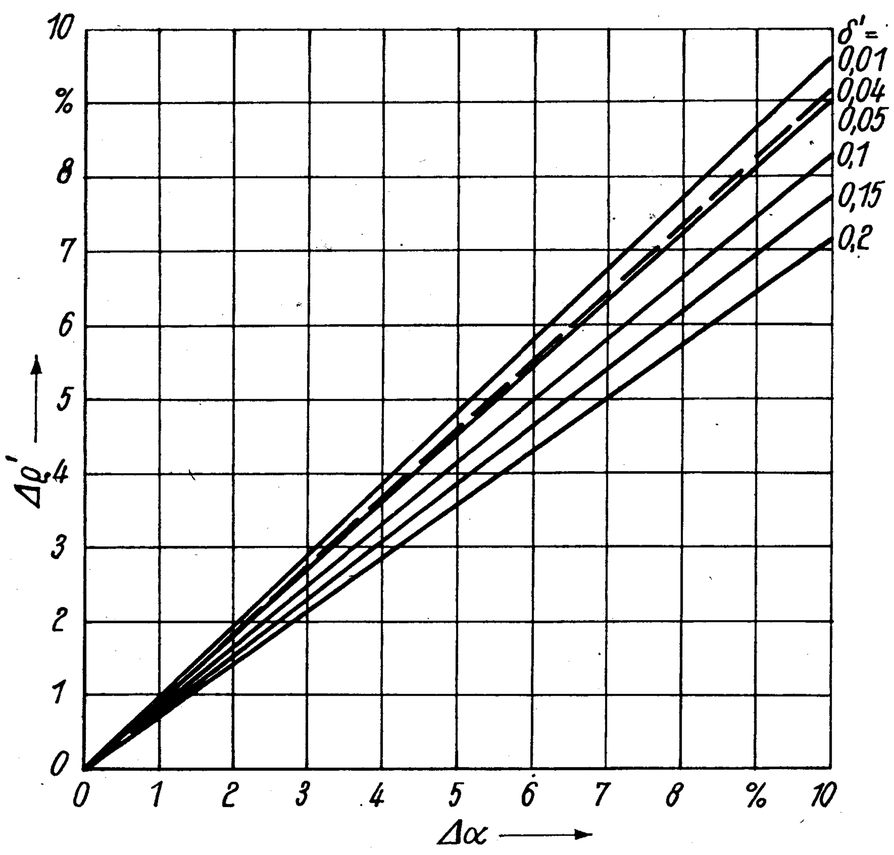
2

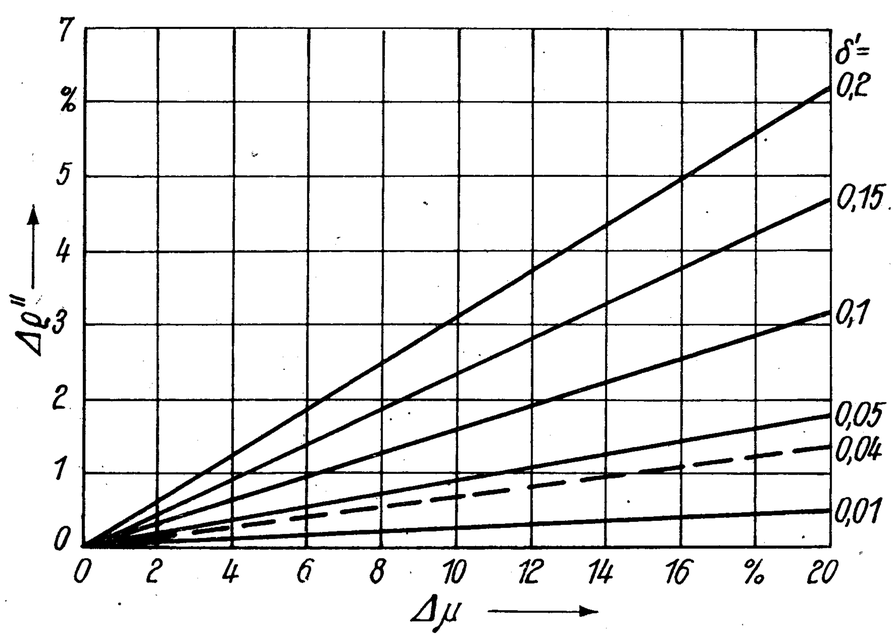
Tabelle 1 Abweichung ϱ (für M = 1,25)

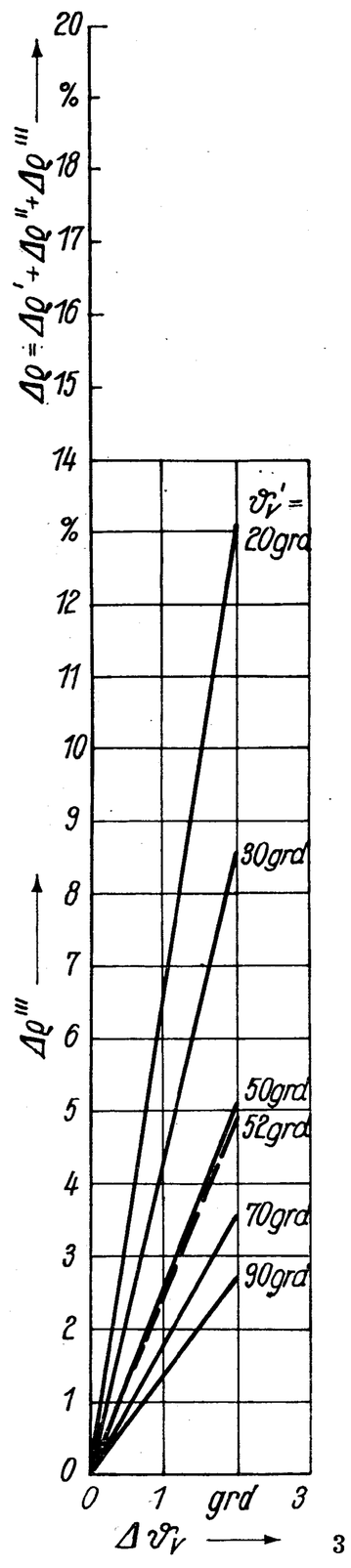
ϑ	in grd	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20
α		1	1	1	1,05	1,05	1,05	1,1	1,1	1,1	1	1	1	1,05	1,05	1,05	1,1	1,1	1,1	1	1	1	1,05	1,05	1,05	1,1	1,1	1,1
Δ	in grd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	—2	—2	—2	—2	—2	—2	—2	—2	—2
$\delta'=$	$\mu=0{,}8$	0,995	0,996	0,997	1,044	1,044	1,046	1,092	1,093	1,094	1,023	1,044	1,122	1,072	1,095	1,177	1,122	1,145	1,232	0,968	0,948	0,874	1,015	0,995	0,917	1,062	1,041	0,960
0,01	$\mu=1{,}0$	1,000	1,000	1,000	1,049	1,049	1,049	1,098	1,098	1,099	1,028	1,048	1,126	1,078	1,100	1,182	1,128	1,151	1,237	0,972	0,952	0,877	1,020	0,999	0,920	1,068	1,046	0,963
	$\mu=1{,}1$	1,002	1,002	1,001	1,051	1,051	1,051	1,100	1,100	1,100	1,030	1,050	1,128	1,080	1,101	1,183	1,131	1,153	1,239	0,974	0,954	0,878	1,022	1,001	0,921	1,070	1,048	0,965
	$\mu=1{,}2$	1,003	1,003	1,002	1,053	1,052	1,052	1,102	1,102	1,101	1,031	1,051	1,129	1,082	1,103	1,185	1,132	1,155	1,240	0,976	0,955	0,879	1,024	1,002	0,922	1,071	1,049	0,966
$\delta'=$	$\mu=0{,}8$	0,982	0,984	0,987	1,026	1,029	1,033	1,070	1,074	1,079	1,009	1,031	1,110	1,054	1,078	1,162	1,100	1,125	1,213	0,955	0,938	0,867	0,998	0,981	0,907	1,041	1,023	0,948
0,04	$\mu=1{,}0$	1,000	1,000	1,000	1,046	1,047	1,047	1,092	1,093	1,094	1,027	1,048	1,125	1,075	1,097	1,178	1,122	1,145	1,231	0,973	0,953	0,878	1,018	0,997	0,919	1,062	1,041	0,961
	$\mu=1{,}1$	1,007	1,006	1,005	1,054	1,053	1,053	1,100	1,100	1,100	1,034	1,054	1,131	1,082	1,103	1,184	1,130	1,152	1,238	0,979	0,958	0,882	1,025	1,003	0,924	1,070	1,048	0,966
	$\mu=1{,}2$	1,012	1,011	1,009	1,060	1,059	1,057	1,107	1,106	1,105	1,040	1,059	1,135	1,089	1,109	1,189	1,137	1,159	1,243	0,985	0,963	0,885	1,031	1,008	0,928	1,076	1,054	0,970
$\delta'=$	$\mu=0{,}8$	0,961	0,965	0,971	0,999	1,005	1,012	1,037	1,043	1,053	0,987	1,010	1,090	1,026	1,051	1,136	1,065	1,092	1,182	0,935	0,920	0,855	0,973	0,958	0,891	1,009	0,995	0,927
0,1	$\mu=1{,}0$	1,000	1,000	1,000	1,041	1,042	1,044	1,082	1,084	1,087	1,027	1,047	1,123	1,069	1,091	1,172	1,111	1,135	1,221	0,973	0,953	0,879	1,014	0,994	0,918	1,053	1,034	0,956
	$\mu=1{,}1$	1,015	1,013	1,011	1,058	1,057	1,056	1,100	1,100	1,100	1,043	1,061	1,136	1,086	1,106	1,186	1,130	1,152	1,235	0,988	0,966	0,889	1,030	1,008	0,928	1,071	1,049	0,967
	$\mu=1{,}2$	1,028	1,025	1,020	1,072	1,070	1,066	1,115	1,114	1,111	1,056	1,073	1,146	1,101	1,120	1,198	1,145	1,166	1,248	1,000	0,977	0,897	1,043	1,020	0,937	1,085	1,062	0,977
$\delta'=$	$\mu=0{,}8$	0,930	0,942	0,950	0,968	0,974	0,986	0,998	1,006	1,020	0,961	0,985	1,064	0,993	1,019	1,104	1,023	1,052	1,142	0,912	0,899	0,839	0,943	0,931	0,870	0,972	0,961	0,901
0,2	$\mu=1{,}0$	1,000	1,000	1,000	1,036	1,037	1,039	1,071	1,073	1,078	1,027	1,046	1,121	1,063	1,084	1,165	1,099	1,122	1,207	0,974	0,955	0,881	1,009	0,990	0,916	1,043	1,025	0,950
	$\mu=1{,}1$	1,026	1,023	1,019	1,063	1,062	1,060	1,100	1,100	1,100	1,053	1,070	1,143	1,091	1,111	1,189	1,129	1,151	1,233	0,999	0,977	0,898	1,035	1,014	0,934	1,071	1,050	0,970
	$\mu=1{,}2$	1,048	1,043	1,036	1,087	1,084	1,078	1,126	1,124	1,120	1,076	1,092	1,163	1,116	1,134	1,209	1,155	1,175	1,255	1,021	0,996	0,913	1,059	1,035	0,950	1,096	1,072	0,987

Tabelle 2 Abweichung ϱ (für M = 1,33)

ϑ	in grd	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20	90	52	20
α		1	1	1	1,05	1,05	1,05	1,1	1,1	1,1	1	1	1	1,05	1,05	1,05	1,1	1,1	1,1	1	1	1	1,05	1,05	1,05	1,1	1,1	1,1
Δ	in grd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	—2	—2	—2	—2	—2	—2	—2	—2	—2
$\delta'=$	$\mu=0{,}8$	0,993	0,994	0,995	1,040	1,042	1,044	1,088	1,090	1,093	1,022	1,045	1,129	1,071	1,095	1,184	1,120	1,145	1,239	0,964	0,944	0,866	1,010	0,989	0,908	1,056	1,035	0,950
0,01	$\mu=1{,}0$	1,000	1,000	1,000	1,048	1,049	1,049	1,097	1,097	1,098	1,029	1,051	1,134	1,079	1,102	1,190	1,129	1,153	1,246	0,971	0,949	0,870	1,018	0,996	0,912	1,065	1,042	0,955
	$\mu=1{,}1$	1,003	1,002	1,002	1,051	1,051	1,051	1,100	1,100	1,100	1,032	1,054	1,136	1,082	1,105	1,192	1,132	1,156	1,248	0,973	0,952	0,871	1,021	0,998	0,914	1,068	1,044	0,957
	$\mu=1{,}2$	1,005	1,004	1,003	1,054	1,053	1,052	1,103	1,102	1,102	1,035	1,056	1,138	1,085	1,107	1,194	1,135	1,159	1,250	0,976	0,953	0,872	1,023	1,000	0,915	1,071	1,047	0,958
$\delta'=$	$\mu=0{,}8$	0,974	0,978	0,983	1,016	1,021	1,028	1,058	1,064	1,072	1,002	1,027	1,113	1,045	1,072	1,164	1,088	1,117	1,214	0,946	0,929	0,857	0,987	0,971	0,896	1,028	1,011	0,935
0,04	$\mu=1{,}0$	1,000	1,000	1,000	1,044	1,045	1,046	1,088	1,090	1,093	1,029	1,050	1,133	1,074	1,100	1,185	1,120	1,145	1,237	0,971	0,950	0,871	1,014	0,993	0,912	1,057	1,036	0,952
	$\mu=1{,}1$	1,010	1,008	1,006	1,055	1,054	1,053	1,100	1,100	1,100	1,039	1,059	1,140	1,086	1,107	1,193	1,132	1,155	1,246	0,981	0,958	0,877	1,025	1,002	0,918	1,068	1,045	0,958
	$\mu=1{,}2$	1,018	1,016	1,012	1,064	1,062	1,059	1,110	1,108	1,106	1,048	1,067	1,146	1,095	1,116	1,200	1,142	1,164	1,253	0,989	0,965	0,881	1,034	1,009	0,923	1,078	1,053	0,964
$\delta'=$	$\mu=0{,}8$	0,947	0,954	0,964	0,982	0,990	1,003	1,015	1,025	1,041	0,973	1,000	1,087	1,009	1,038	1,131	1,043	1,075	1,174	0,921	0,908	0,843	0,954	0,943	0,877	0,987	0,977	0,911
0,1	$\mu=1{,}0$	1,000	1,000	1,000	1,039	1,040	1,042	1,076	1,079	1,083	1,028	1,049	1,130	1,068	1,091	1,177	1,106	1,131	1,224	0,972	0,952	0,874	1,010	0,989	0,911	1,046	1,027	0,947
	$\mu=1{,}1$	1,021	1,018	1,014	1,061	1,060	1,057	1,100	1,100	1,100	1,049	1,068	1,146	1,090	1,111	1,195	1,131	1,153	1,242	0,992	0,969	0,886	1,031	1,008	0,924	1,070	1,047	0,961
	$\mu=1{,}2$	1,039	1,034	1,026	1,080	1,076	1,071	1,121	1,118	1,114	1,068	1,085	1,160	1,110	1,129	1,210	1,152	1,173	1,259	1,010	0,983	0,896	1,050	1,024	0,935	1,090	1,064	0,973
$\delta'=$	$\mu=0{,}8$	0,919	0,927	0,940	0,946	0,956	0,972	0,973	0,984	1,004	0,943	0,970	1,057	0,972	1,001	1,093	0,998	1,030	1,128	0,894	0,883	0,826	0,921	0,912	0,854	0,947	0,938	0,882
0,2	$\mu=1{,}0$	1,000	1,000	1,000	1,031	1,034	1,037	1,062	1,066	1,072	1,027	1,048	1,126	1,060	1,082	1,167	1,090	1,116	1,207	0,974	0,953	0,877	1,003	0,986	0,910	1,034	1,017	0,941
	$\mu=1{,}1$	1,033	1,030	1,024	1,068	1,065	1,062	1,101	1,100	1,100	1,062	1,079	1,154	1,097	1,116	1,196	1,129	1,152	1,239	1,006	0,982	0,897	1,038	1,015	0,931	1,071	1,048	0,965
	$\mu=1{,}2$	1,064	1,057	1,045	1,099	1,094	1,085	1,133	1,130	1,124	1,093	1,107	1,178	1,129	1,146	1,223	1,164	1,183	1,266	1,035	1,006	0,915	1,070	1,042	0,951	1,103	1,077	0,985







3

Für die praktische Anwendung der Ergebnisse, z. B.:

- Ermittlung der zulässigen Abweichungen des Massenstromes, der Heizflächengröße oder der Vorlauftemperatur unter der Voraussetzung, einen maximalen Fehler bezüglich ϱ nicht zu überschreiten, und Einarbeitung dieser Schranken in die Iterationszyklen von Rechenprogrammen.
- Beurteilung des Fehlers ϱ in Abhängigkeit der o. g. Abweichungen zur Argumentation bei fachlichen Diskussionen über erforderliche Genauigkeiten, Heizflächenabstufungen usw.

ist es zweckmäßig, eine Gleichung der Form

$$\varrho = \varrho\,(\alpha, \mu, \Delta\vartheta_v, \delta', \vartheta_v') \tag{9}$$

zu konzipieren, so daß die Gesamtabweichung explizit errechenbar ist. Die Gl. (9) kann naturgemäß nur eine Näherungsgleichung sein und sollte einfachen Aufbau haben. Des weiteren soll der Einfluß des Heizflächenexponenten unterdrückt werden, da in den praktisch ausgeführten Anlagen, die mit Konvektortruhen, Platten- oder Flachheizkörpern bestückt sind, ohnehin eine breite Streuung der Heizflächenexponenten vorliegt. Die Genauigkeit der Approximationsgleichung leidet natürlich darunter.

Eine umfangreiche Auswertung der Rechenergebnisse (Tabelle 1 und 2) ergab, daß in guter Näherung das Prinzip der ungestörten Superposition als gültig angenommen werden darf. Dies bedeutet, daß die Überlagerung mehrerer gleichzeitiger Änderungen die gleiche Wirkung hat wie die Summe der Wirkungen von Einzeländerungen.

Als Näherungsgleichung wurde

$$\varrho = \alpha^{0,97-1,3\cdot\delta'}\cdot\mu^{0,01+1,5\cdot\delta'} + 1,43\cdot\vartheta_v^{-1,03}\cdot\Delta\vartheta_v \tag{10}$$

gefunden. Da die Größen α und μ nur wenig von Eins verschieden sind, kann unter Berücksichtigung von

$$\alpha = 1 + \Delta\alpha \quad \text{und} \quad \mu = 1 + \Delta\mu \tag{11}$$

$$\varrho = [1 + (0,97 - 1,3\cdot\delta')\cdot\Delta\alpha]\cdot[1 + (0,01 + 1,5\cdot\delta')\cdot\Delta\mu] + 1,43\cdot\vartheta_v^{-1,03}\cdot\Delta\vartheta_v \tag{12}$$

geschrieben werden. Das Ausmultiplizieren der Gleichung ergibt bei Vernachlässigung der kleinen Größe zweiter Ordnung und der Umrechnung auf den prozentualen Fehler

$$\Delta\varrho = (0,97 - 1,3\cdot\delta')\cdot\Delta\alpha + (0,01 + 1,5\cdot\delta')\cdot\Delta\mu + 143\cdot\vartheta_v^{-1,03}\cdot\Delta\vartheta_v\,, \tag{13}$$

wobei

$$\Delta\varrho = \frac{\dot{Q} - \dot{Q}'}{\dot{Q}'}\cdot 100\,\%\,; \quad \Delta\alpha = \frac{A - A'}{A'}\cdot 100\,\%$$

$$\Delta\mu = \frac{\dot{m} - \dot{m}'}{\dot{m}'}\cdot 100\,\%\,; \quad \Delta\vartheta_v = t_v - t_v' \quad \text{in grd}$$

bedeuten. Zur weiteren Vereinfachung können die einzelnen Summanden aus dem Diagramm (Bild 3) abgelesen werden. Die gestrichelten Kurven sind eingezeichnet, um den Vergleich mit den Tabellenwerten zu ermöglichen. Eine Summation der Fehler ist durch Addition der entsprechenden Längen mit Hilfe des Zirkels leicht möglich. Die Addition kann auch vorzeichenbehaftet erfolgen, d. h., ist beispielsweise $\Delta\alpha$ negativ, so wird die zu $|\Delta\alpha|$ gehörige Abweichung $\Delta\varrho'$ mit (-1) multipliziert, das bedeutet, die entsprechende Strecke ist zu subtrahieren.

Beispiel 1:

Eine Heizfläche einer Zweirohrheizung (110 °C/70 °C; $t_i = 20$ °C) ist um $\Delta\alpha = 10$ Prozent zu groß bemessen.

Außerdem wird diese von einem um $\Delta\mu = 10$ Prozent erhöhtem Massenstrom beaufschlagt.

Wie groß ist die prozentuale Abweichung der Wärmelieferung, wenn zudem die Vorlauftemperatur um $\Delta\vartheta_v = 2$ grd über der jeweiligen exakten Vorlauftemperatur $\vartheta_v' = 90$ grd bzw. $\vartheta_v' = 20$ grd liegt?

Aus Bild 1 kann der Mittelwert $\delta' = 0{,}17$ abgelesen werden. Um eine Vergleichbarkeit mit den exakt errechneten Tabellenwerten zu haben, sei der aufgerundete Wert $\delta' = 0{,}2$ für die weitere Rechnung verwendet. Die Addition der Abweichungen ergibt nach Bild 3:

$\vartheta_v' = 90$ grd:

$$\begin{aligned}
\Delta\alpha &= 10\,\% \rightarrow \Delta\varrho' = 7{,}1\,\% \quad (7{,}1\,\%;\ 6{,}2\,\%)\\
\Delta\mu &= 10\,\% \rightarrow \Delta\varrho'' = 3{,}1\,\% \quad (2{,}6\,\%;\ 3{,}3\,\%)\\
\Delta\vartheta_v &= 2\text{ grd} \rightarrow \Delta\varrho''' = 2{,}7\,\% \quad (2{,}7\,\%;\ 2{,}7\,\%)\\
\hline
\Delta\varrho &= 12{,}9\,\% \ (12{,}9\,\%;\ 12{,}9\,\%)
\end{aligned}$$

$\vartheta_v' = 20$ grd:

$$\begin{aligned}
\Delta\alpha &= 10\,\% \rightarrow \Delta\varrho' = 7{,}1\,\% \quad (7{,}8\,\%;\ 7{,}2\,\%)\\
\Delta\mu &= 10\,\% \rightarrow \Delta\varrho'' = 3{,}1\,\% \quad (1{,}9\,\%;\ 2{,}4\,\%)\\
\Delta\vartheta_v &= 2\text{ grd} \rightarrow \Delta\varrho''' = 13{,}1\,\% \ (12{,}1\,\%;\ 12{,}6\,\%)\\
\hline
\Delta\varrho &= 23{,}3\,\% \ (23{,}3\,\%;\ 23{,}9\,\%)
\end{aligned}$$

Die Klammerwerte sind den Tabellen 1 und 2 entnommen, wobei für die partiellen Abweichungen $\Delta\varrho'$; $\Delta\varrho''$; $\Delta\varrho'''$ die Tabellenwerte bei Variierung nur einer Veränderlichen zugrunde gelegt wurden. Die Gesamtabweichung $\Delta\varrho$ ist bei gleichzeitiger Variation aller Veränderlichen $\Delta\alpha$; $\Delta\mu$; $\Delta\vartheta_v$ entnommen.

Die vorhandenen Abweichungen zwischen Approximations- und Tabellenwerten liegen in den bereits erwähnten vereinfachten Annahmen begründet.

Erweiterung der Ergebnisse auf Einrohrsysteme

Die bisherigen Untersuchungen gestatten, für Heizflächen, die unmittelbar mit dem abweichungsbehafteten Heizmedienstrom beaufschlagt werden, d. h. für sämtliche Heizflächen in Zweirohrheizungen und für die jeweils erste Heizfläche in Einrohrheizungen, ausgehend von Bild 3, sofortige Aussagen. Für in Einrohrheizungsanlagen nachgeschaltete Heizflächen sind jedoch noch gesonderte Betrachtungen erforderlich.

Grundsätzlich könnte man wechselweise die Abweichungen $\Delta\varrho_i$ und dann nach Gl. (8) die wirkliche Temperaturspreizung Δt_i für jede Heizfläche i errechnen und damit die Abweichung der Eintrittsübertemperatur $\Delta\vartheta_{v,i+1}$ für die nächste Heizfläche $i + 1$ ermitteln. Da es im allgemeinen nicht um ein spezielles Beispiel, sondern um die Ermittlung der Fehlerschranken geht, ist zu prüfen, unter welchen Umständen eine vorgeschaltete Heizfläche eine maximale Abweichung der Wärmeabgabe der nachgeschalteten Heizfläche verursacht. Die vorgeschalteten Heizflächen können dabei rechnungsmäßig zu einer einzigen Heizfläche zusammengefaßt werden, für die die wirkliche Temperaturdifferenz aus Gl. (8) folgt

$$\Delta t_1 = \Delta t_1' \cdot \frac{\varrho_1}{\mu_1} \tag{14}$$

Substituiert man Gl. (10), so ergibt sich

$$\Delta t_1 = \Delta t_1' \cdot \left[\alpha_1^{0{,}97-1{,}3\delta 1'} \cdot \mu_1^{-0{,}99+1{,}5\delta 1'} + \frac{1{,}43 \cdot \Delta\vartheta_{v,1}}{\vartheta_{v,1}^{1{,}03} \cdot \mu_1} \right], \tag{15}$$

woraus die Eintrittstemperaturabweichung für die nachgeschaltete Heizfläche zu

$$\Delta\vartheta_{v,2} = \Delta\vartheta_{v,1} + \Delta t_1' - \Delta t_1 = \Delta\vartheta_{v,1} + \Delta t_1' \cdot \left(1 - \frac{\varrho_1}{\mu_1}\right)$$

$$= \Delta\vartheta_{v,1} + \Delta t_1' \cdot \left(1 - \frac{100 + \Delta\varrho_1}{100 + \Delta\mu_1}\right)$$

$$\Delta\vartheta_{v,2} = \Delta\vartheta_{v,1} + \Delta t_1' \cdot \left\{ 1 - \alpha_1^{0{,}97-1{,}3\cdot\delta 1'} \cdot \mu_1^{-0{,}99+1{,}5\cdot\delta 1'} - \frac{1{,}43 \cdot \Delta\vartheta_{v,1}}{\vartheta_{v,1}^{1{,}03} \cdot \mu_1} \right\} \tag{16}$$

folgt.

Es ist zu untersuchen, unter welchen Bedingungen die Abweichung bezüglich der Wärmeabgabe der Heizfläche 2

$$\varrho_2 = \alpha_2^{0{,}97-1{,}3\cdot\delta 2'} \cdot \mu_2^{0{,}01+1{,}5\cdot\delta 2'} + 1{,}43 \cdot \vartheta_{v,2}^{-1{,}03} \cdot \Delta\vartheta_{v,2} \tag{17}$$

ein Maximum erreicht:

- Je größer die Heizflächenabweichung α_2 ist, desto größer ist auch ϱ_2.
- Die Einflüsse von μ und $\Delta\vartheta_v$ sind durch die Gl. (16) und (17) miteinander verknüpft. Beachtet man, daß bei Einrohrsystemen $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ betragen muß, kann man schlußfolgern:
  Je größer μ und $\Delta\vartheta_{v,1}$ sind, desto größer ist ϱ_2.
- Je kleiner α_1 ist, desto größer ist ϱ_2.
- Ob die Betrachtungen für einen Heizkörper in der Mitte oder am Ende eines Stranges durchzuführen sind, kann nicht sofort entschieden werden, da die Einflüsse von $\Delta t_1'$; $\vartheta_{v,1}$; $\vartheta_{v,2}$; δ_1'; δ_2' teilweise gegenläufig sind. Durch Abschätzen der praktischen Werte ergibt sich jedoch, daß am Ende liegende Heizflächen die größten Abweichungen ϱ_2 aufweisen.

Beispiel 2:

In einem zehngeschossigen Hochhaus ist eine Einrohrheizung 110 °C/70 °C bei $t_i = 20$ °C installiert. Die abzugebenden Wärmemengen längs des Stranges sind gleich, so daß $\Delta t' = 4$ grd für jedes Geschoß gelten.

Wie groß ist der relative Fehler in der Wärmeabgabe des letzten Heizkörpers, wenn angenommen wird, daß die vorgeschalteten Abnehmer bezüglich der Heizfläche exakt dimensioniert sind mit $\Delta\alpha_1 = 0$ Prozent, der Massenstrom einen Fehler von $\Delta\mu = 5$ Prozent aufweist und die Temperaturabweichung $\Delta\vartheta_{v,1} = 1$ grd beträgt? Der Fehler der letzten Heizfläche sei $\Delta\alpha_2 = 10$ Prozent.

Werden die Heizkörper der ersten neun Geschosse zu „einem" Heizkörper zusammengefaßt, so hat dieser eine rechnerische Temperaturspreizung von $\Delta t_1' = 36$ grd. Daraus folgt nach Bild 2 $\delta_1' \approx 0{,}15$ als mittlerer Wert.

Aus Bild 3 ergibt sich damit

$$\begin{aligned}
\Delta\varrho_1' &= 0\,\%\\
\Delta\varrho_1'' &= 1{,}2\,\%\\
\Delta\varrho_1''' &= 1{,}3\,\%\\
\hline
\Delta\varrho_1 &= 2{,}5\,\%
\end{aligned}$$

Nach Gl. (16) kann nunmehr die Eintrittstemperaturabweichung am letzten Heizkörper berechnet werden.

$$\Delta\vartheta_{v,2} = 1\text{ grd} + 36\text{ grd}\left(1 - \frac{100 + 2{,}5}{100 + 5}\right) = 1{,}8\text{ grd}.$$

Die rechnerische Eintrittsübertemperatur am letzten Heizkörper beträgt

$$\vartheta_{v,2} = 110\,°\text{C} - 20\text{ grd} - 36\text{ grd} = 54\text{ grd},$$

wofür aus Bild 1 $\delta_2' = 0{,}025$ abgelesen werden kann. Damit ergibt sich endgültig nach Bild 3

$$\begin{aligned}
\Delta\varrho_2' &= 9{,}3\,\%\\
\Delta\varrho_2'' &= 0{,}3\,\%\\
\Delta\varrho_2''' &= 4{,}3\,\%\\
\hline
\Delta\varrho &= 13{,}9\,\%.
\end{aligned}$$

Schlußfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, daß eine Abweichung der Heizflächengröße vom exakten Wert stark die Wärmeabgabe beeinflußt. So ergibt eine Vergrößerung der Heizfläche um $\Delta\alpha = 10$ Prozent eine Erhöhung der Wärmeabgabe von $\Delta\varrho = 7 \cdots 10$ Pro-

zent. Der obere Grenzwert wird bei geringen Temperaturspreizungen — vornehmlich also bei Einrohrheizungen — erreicht.

Die Abweichung der Vorlauftemperatur von beispielsweise $\Delta\vartheta_v = 2$ grd führt zu einer Erhöhung der Wärmeabgabe von $\Delta\varrho = 3 \cdots 13$ Prozent. Die hohen Werte ergeben sich bei verhältnismäßig niedrigen Vorlaufübertemperaturen, wie sie z. B. an der Heizgrenze und am Ende von Einrohrsträngen auftreten.

Der Einfluß eines fehlerhaften Massenstromes erscheint zunächst gering, da bei $\Delta\mu = 10$ Prozent die Wärmeabgaben nur um $\Delta\varrho = 0 \cdots 3$ Prozent größer werden. Die oberen Werte treten bei großen Temperaturspreizungen über der Heizfläche — d. h. bei Zweirohrheizungen — auf. Bei geringen Temperaturspreizungen ist $\Delta\varrho < 1$ Prozent. Dies ist jedoch nur für den jeweils zuerst beaufschlagten Heizkörper eines Einrohrstranges vorteilhaft. Für die nachgeschalteten Heizflächen wirkt sich dies sehr ungünstig aus, da durch den erhöhten Massenstrom und die geringe Vergrößerung der Wärmeabgabe die Übertemperatur weit über den exakten Wert ansteigt und dadurch in den nachgeschalteten Heizflächen eine starke Überschreitung der geplanten Wärmeabgabe auftritt.

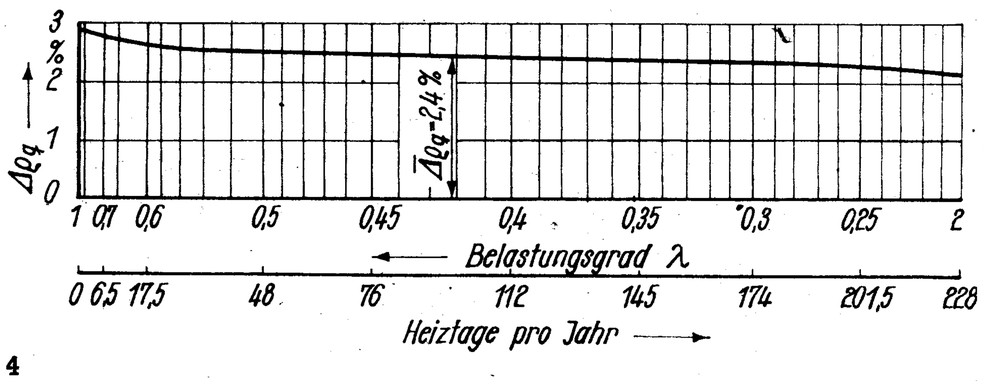
Die gleichen Ergebnisse treten bei negativen Abweichungen $\Delta\alpha$, $\Delta\mu$ und $\Delta\vartheta_v$ auf.

Insgesamt sei festgestellt, daß möglichst genau gerechnet werden sollte, solange keine automatischen Heizkörperregulierventile zum Einsatz gelangen. Die etwas längere Rechenzeit macht sich durch den sparsameren Energieverbrauch beim Betrieb der Heizungsanlagen bezahlt.

Beispiel 3:

Eine Heizungsanlage für die Auslegungsparameter 110 °C/70 °C bei $t_i = 20$ °C und $t_a = -15$ °C benötigt beim Belastungsgrad λ die Vorlauftemperatur ϑ_v

$$(\lambda; \vartheta_v) = (1{,}0;\ 90 \text{ grd});\ (0{,}8;\ 75{,}2 \text{ grd});\ (0{,}6;\ 59{,}6 \text{ grd});\ (0{,}5;\ 51{,}5 \text{ grd});\ (0{,}4;\ 43{,}1 \text{ grd});\ (0{,}3;\ 34{,}3 \text{ grd});\ (0{,}2;\ 24{,}8 \text{ grd}).$$



4

Wie groß sind die jährlichen Wärmeverlustkosten je Wohnungseinheit ($\dot{Q} = 5000$ kcal/h·WE), wenn die Vorlauftemperatur ganzjährig ($b = 3700$ h/a) eine Abweichung von $\Delta\vartheta_v = 2$ grd aufweist? Der Wärmepreis betrage $k_q = 40$ M/Gcal.

Die prozentualen Abweichungen können Bild 3 entnommen oder nach Gl. (13) errechnet werden. Die absoluten Verluste in Prozent der Vollastwärmeabgabe ergeben sich als Produkt von $\Delta\varrho_q = \Delta\varrho \cdot \lambda$. Diese Werte betragen in der Reihenfolge der eingangs aufgeführten Wertepaare

$$\Delta\varrho_q = 2{,}8\%;\ 2{,}7\%;\ 2{,}6\%;\ 2{,}5\%;\ 2{,}4\%;\ 2{,}3\%;\ 2{,}1\%$$

und werden in Bild 4 in geordneter Häufigkeitsverteilung eingetragen. Als Mittelwert folgt $\overline{\Delta\varrho}_q = 2{,}4$ Prozent. Damit ergeben sich die Wärmeverlustkosten zu

$$K_Q = \dot{Q} \cdot b \cdot \overline{\Delta\varrho}_q \cdot a_q$$
$$= 5000 \cdot 3700 \cdot \frac{2{,}4}{100} \cdot 40 \cdot 10^{-6} \frac{\text{M}}{\text{WE} \cdot \text{a}} \approx 18 \frac{\text{M}}{\text{WE} \cdot \text{a}}.$$

Dem in der Praxis verbreiteten Standpunkt, daß es bei den gegebenen Fertigungsungenauigkeiten und Regelungstoleranzen irreal ist, so genau zu rechnen, sei entgegnet, daß man gerade wegen dieser Fertigungsungenauigkeiten und Regelungstoleranzen es nicht wagen kann, zusätzliche Abweichung durch ungenaue Rechnungen zu riskieren.