Pauschale Ermittlung der Temperaturänderungen in Wärmenetzen

Dr. sc. techn. B. GLUCK
VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung – Institut –

(Fortsetzung von Heft 8/1981)

2.2. Beispiele

Beispiel 1

Das Wärmenetz des Beispiels 1.2. wird mit konstantem Massendurchsatz und den folgenden Vorlauftemperaturen gefahren:

Zeit	Temperatur
...7.15	$t_V° = 120$ °C
7.15...7.30	$t_V' = 110$ °C
7.30...	$t_V'' = 100$ °C

Die Temperaturspreizung beträgt für die genannten Betriebsbereiche stets $\Delta t_A = 60$ K. Es ist die Rücklauftemperatur t_R, die am Eintritt des Wassererwärmers ankommt, zu ermitteln.

Lösung

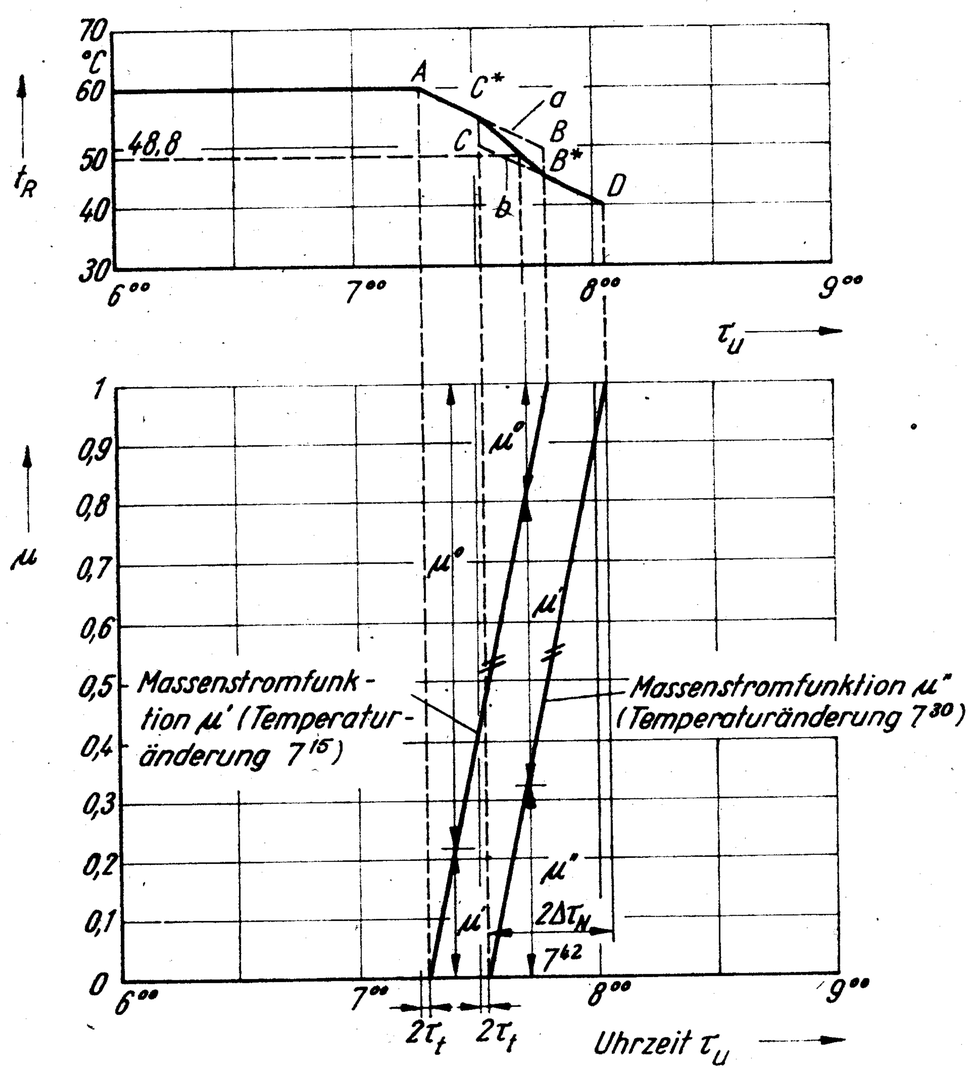
Zunächst werden die μ-Werte als Zeitfunktionen unter Verwendung der Gl. (9) und des Beispiels 1.2. ermittelt. Es gilt

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ges}} = \frac{\tau - 2\tau_t}{2\Delta\tau_N} = \frac{\tau - 2\cdot 60}{2\cdot 922}$$

mit τ in s. Dies bedeutet, daß eine Änderung der Vorlauftemperatur nach $2\tau_t = 120$ s $\triangleq$ 0,03 h am Wassererwärmer bemerkt wird und daß nach $2(\tau_t + \Delta\tau_N) = 1964$ s $\triangleq$ 0,55 h die Reaktion beendet ist. Da der Zusammenhang linear ist, kann die im Bild 10 gezeigte Grafik aufgestellt werden. Zuerst sind die Anfangs- und Endpunkte der Massenstromfunktionen μ' und μ'' zu markieren. Sie liegen um jeweils $2\tau_t$ bzw. $2(\tau_t + \Delta\tau_N)$ zum Zeitpunkt — an dem die Änderung der Vorlauftemperatur erfolgte — versetzt. Die Verbindung der Punkte liefert die zwei parallelen Geraden μ' und μ''. Die jeweils gültigen Abschnitte μ', μ'' und $\mu°$ sind eingetragen. Mit Kenntnis dieser Werte kann nach Gl. (14) der Verlauf der Rücklauftemperatur ermittelt werden. So gilt beispielsweise für 7,42 Uhr

$$t_R = (0{,}48\cdot 110 + 0{,}32\cdot 100 + 0{,}20\cdot 120)\ °C - 60\ K = 48{,}8\ °C,$$

Zur Berechnung des gesamten Temperaturverlaufs sind lediglich die Knickpunkte zu betrachten. Man kann den Kurvenzug auch rein grafisch ermitteln, indem gemäß Bild 10 die Temperaturkurve a zwischen 60 und 50 °C so bestimmt wird, als ob eine weitere Temperaturänderung nicht folgt. Die Knickpunkte A und B können aus dem μ, τ_U-Schaubild hochgelotet werden. Anschließend wird die



Temperaturkurve b zwischen 50 und 40 °C entwickelt, ohne die vorherige Temperaturänderung zu beachten, indem ebenfalls die Punkte C und D aus der unteren Grafik entnommen werden. Zwischen C* und B ist die Kurve a und zwischen C und B* die Kurve b nur fiktiv vorhanden, da zwischen C* und B* beide Vorlauftemperaturänderungen gleichzeitig die Rücklauftemperatur beeinflussen. Wegen der linearen Änderungen von μ' und μ'' kann die Kurve t_R auch nur aus Geraden bestehen, so daß der Linienzug im Bild 10 oben zwischen C* und B* durch eine Gerade zu schließen ist. Der Vergleich der rechnerischen Temperatur von $t_R = 48{,}8$ °C um 7.42 Uhr mit dem Diagramm zeigt Übereinstimmung.

Beispiel 2

Es wird wiederum das Wärmenetz des Beispiels 1.2. zugrunde gelegt und konstanter Massendurchsatz vorausgesetzt. Zur Zeit $\tau = 0$ wird die Austrittstemperatur der Abnehmer von 60 auf 70 °C erhöht. Die Temperaturkurve am Eintritt in den Wassererwärmer ist analytisch zu beschreiben.

Lösung

Nach Gl. (16) und den Ergebnissen des Beispiels 1.2. gilt

$$t_R = \frac{70 - 60}{922}(\tau - 60)\ \mathrm{K} + 60\ °\mathrm{C}$$

für

$$60\ \mathrm{s} < \tau < 982\ \mathrm{s}.$$

Weiterhin sind außerhalb der Unter- und Obergrenze

$$\tau < 60\ \mathrm{s} \qquad t_R = 60\ °\mathrm{C}$$
$$\tau > 982\ \mathrm{s} \qquad t_R = 70\ °\mathrm{C}.$$

Beispiel 3

Die Abnehmer eines Wärmenetzes haben außentemperaturabhängige Steuerungen. Da die Heizungssysteme untereinander ähnlich sind, kann näherungsweise angenommen werden, daß sich die Abnehmer-Austrittstemperaturen gleichzeitig und auch quantitativ gleich ändern. So sollen die Rücklauftemperaturen bis 10.00 Uhr $t_{R,1} = 60$ °C und ab 13.00 Uhr $t_{R,3} = 44$ °C betragen; in der Zwischenzeit erfolgte ein linearer Temperaturabfall. Die in einer zentralen Wärmeübertragerstation ankommende Rücklauftemperatur ist in Abhängigkeit der Zeit zu ermitteln, wenn die Massenstromfunktion

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ges}} = \frac{\tau - 300}{2400} \qquad \text{mit } \tau \text{ in s}$$

gilt ($\tau_t = 0{,}08$ h; $\Delta\tau_N = 0{,}67$ h).

Lösung

Die Aufgabe soll zunächst rein analytisch auf der Grundlage der Gl. (26) gelöst werden. Es gelten folgende Fundamentalwerte:

$\tau = 0$ um 0.00 Uhr
$\tau^* = 10$ h
$\tau^{**} = 13$ h
$t_{R,1} = 60$ °C = const. für $\tau^* < 10$ h
$t_{R,3} = 44$ °C = const. für $\tau^{**} > 13$ h

$$t_{R,2} = \frac{44 - 60}{(13 - 10)}(\tau - 10) + 60\ °\mathrm{C}$$

$$t_{R,2} = 113{,}33\ °\mathrm{C} - 5{,}33\,\tau\ \mathrm{K} \quad \text{für} \quad 10\ \mathrm{h} < \tau < 13\ \mathrm{h}$$

Integrationsgrenzen: $\tau - \tau_t - \Delta\tau_N = \tau - 0{,}75\ \mathrm{h} = \tau^\circ$
$\tau - \tau_t = \tau - 0{,}08\ \mathrm{h} = \tau^{\circ\circ}$

Liegen τ^* oder τ^{**} innerhalb dieser Werte, so sind die entsprechenden Teilintegrale unter Beachtung dieser Zwischengrenzen zu bilden.

Für die in Gl. (26) aufgeführten Integrale ergeben sich:

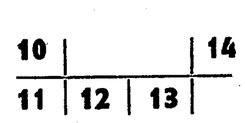
1. $\int_{\tau'}^{\tau''} 60\,\mathrm{d}\tau = 60\,(\tau'' - \tau')$ Kh

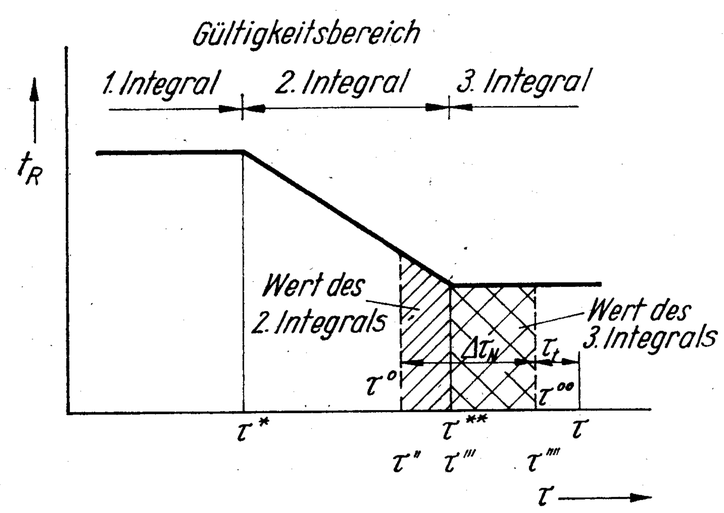
2. $\int_{\tau''}^{\tau'''} (113{,}33 - 5{,}33\tau)\,\mathrm{d}\tau = [113{,}33\,(\tau''' - \tau'') - 2{,}67\,(\tau'''^2 - \tau''^2)]$ Kh

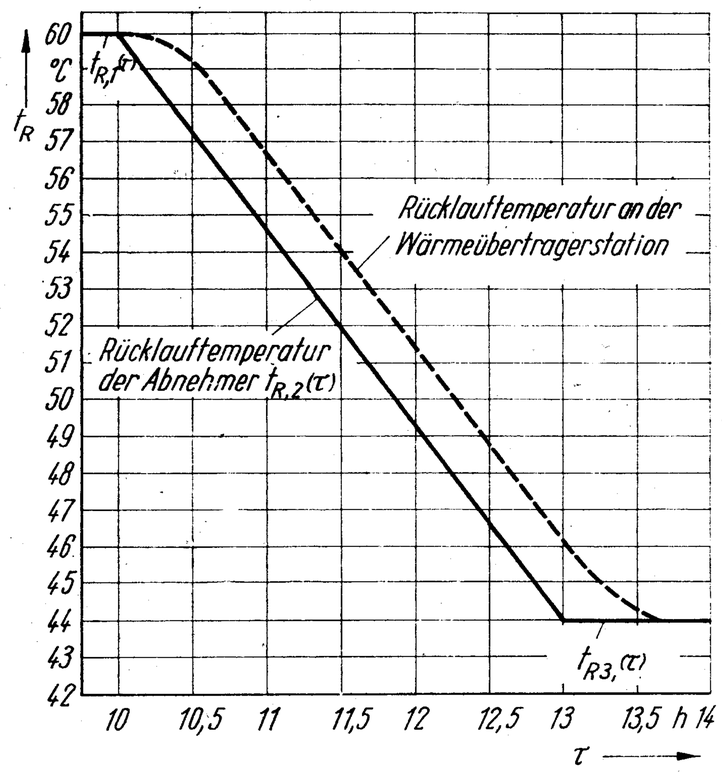
3. $\int_{\tau'''}^{\tau''''} 44\,\mathrm{d}\tau = 44\,(\tau'''' - \tau''')$ Kh.

Welche Integrale auszuwerten sind, verdeutlicht Bild 11. Im einzelnen gelten:

$\tau^\circ, \tau^{\circ\circ} < \tau^*$:	nur 1. Integral auswerten	$\tau' = \tau^\circ$; $\tau'' = \tau^{\circ\circ}$
$\tau^* < \tau^\circ, \tau^{\circ\circ} < \tau^{**}$:	nur 2. Integral auswerten	$\tau'' = \tau^\circ$; $\tau''' = \tau^{\circ\circ}$
$\tau^\circ, \tau^{\circ\circ} > \tau^{**}$:	nur 3. Integral auswerten	$\tau''' = \tau^\circ$; $\tau'''' = \tau^{\circ\circ}$







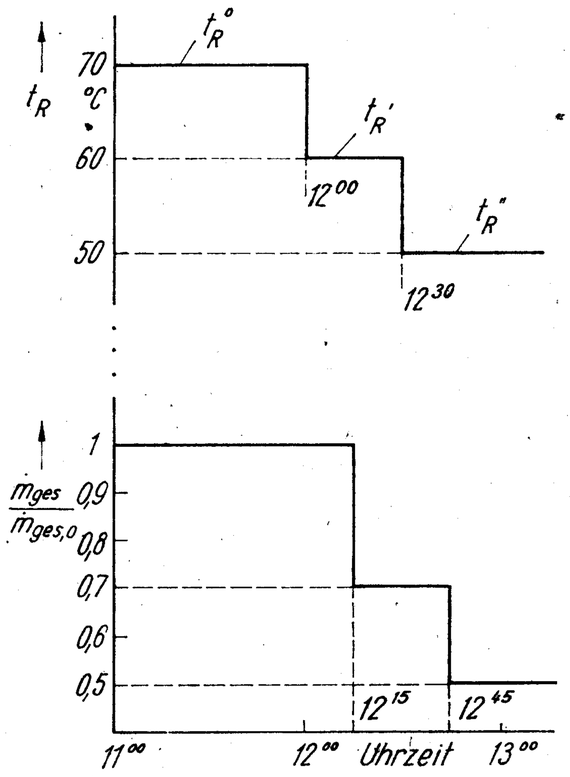
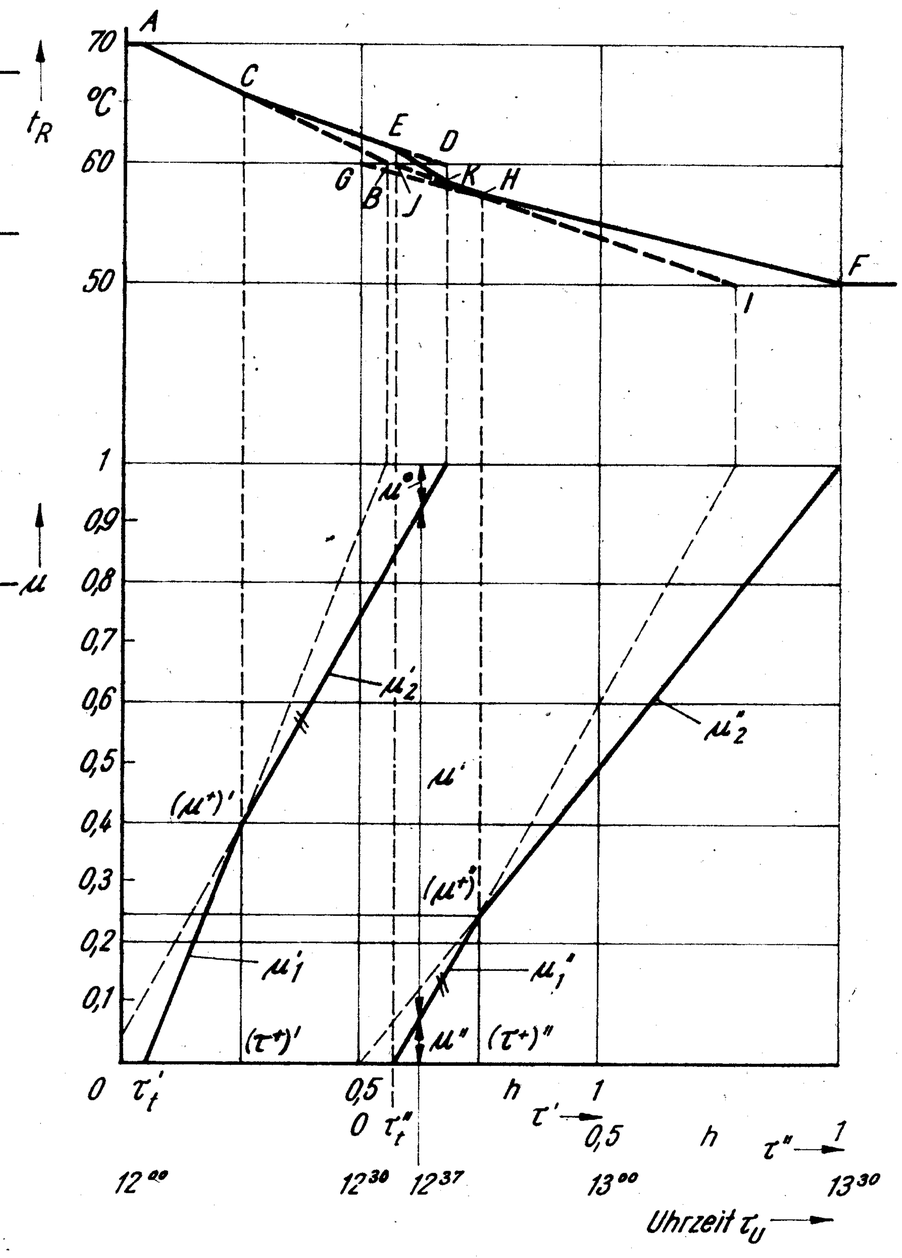


Tabelle 3

Zeit	Integrationsgrenzen		Spezielle Grenzen				Werte der Integrale 1.	2.	3.	Summe	t_R
τ	τ°	$\tau^{\circ\circ}$	τ'	τ''	τ'''	τ''''					
h	h	h	h	h	h	h	Kh	Kh	Kh	Kh	°C
10	9,25	9,92	9,25	9,92	—	—	40,20	—	—	40,20	60,0
10,5	9,75	10,42	9,75	10,00	10,42	—	15,00	24,70	—	39,70	59,3
11	10,25	10,92	—	10,25	10,92	—	—	38,06	—	38,06	56,8
11,5	10,75	11,42	—	10,75	11,42	—	—	36,27	—	36,27	54,1
12	11,25	11,92	—	11,25	11,92	—	—	34,48	—	34,48	51,5
12,5	11,75	12,42	—	11,75	12,42	—	—	32,69	—	32,69	48,8
13	12,25	12,92	—	12,25	12,92	—	—	30,90	—	30,90	46,1
13,5	12,75	13,42	—	12,75	13,00	13,42	—	11,14	18,48	29,62	44,2
14	13,25	13,92	—	—	13,25	13,92	—	—	29,48	29,48	44,0



$$\left.\begin{array}{l}\tau^\circ < \tau^* \\ \tau^* < \tau^{\circ\circ} < \tau^{**}\end{array}\right\} : \text{1. und 2. Integral auswerten} \quad \begin{array}{l}\tau' = \tau^\circ; \\ \tau'' = \tau^*; \\ \tau''' = \tau^{\circ\circ}\end{array}$$

$$\left.\begin{array}{l}\tau^* < \tau^\circ < \tau^{**} \\ \tau^{\circ\circ} > \tau^{**}\end{array}\right\} : \text{2. und 3. Integral auswerten} \quad \begin{array}{l}\tau'' = \tau^\circ; \\ \tau''' = \tau^{**}; \\ \tau'''' = \tau^{\circ\circ}\end{array}$$

Dieses Beispiel ist im Bild 11 eingetragen.

$$\left.\begin{array}{l}\tau^\circ < \tau^* \\ \tau^{\circ\circ} > \tau^{**}\end{array}\right\} : \begin{array}{l}\text{1., 2. und 3. Integral} \\ \text{auswerten}\end{array} \quad \begin{array}{l}\tau' = \tau^\circ; \\ \tau'' = \tau^*; \\ \tau''' = \tau^{**}; \\ \tau'''' = \tau^{\circ\circ}.\end{array}$$

Die punktweise Berechnung der Rücklauftemperaturen nach Gl. (26) erfolgt tabellarisch (Tabelle 3).
Die Ergebnisse sind im Bild 12 aufgezeichnet.

Anmerkung

Anstelle der Integration wäre auch die Flächenermittlung z. B. durch Planimetrieren möglich.

2.3. Temperaturänderungsfunktion bei variablem Massendurchsatz

Erfolgen die Massenstromänderungen an allen Abnehmern gleichzeitig und stets verhältnisgleich, können die in den Abschnitten 2.1. und 2.2. vorgestellten Lösungen in modifizierter Form angewendet werden. Die Gln. (14) und (17) gelten weiterhin, wobei lediglich die Ermittlung der dimensionslosen Massenstromanteile μ neu festzulegen ist. Die Gln. (8) und (9), die lineare Massenstromfunktionen beschreiben, gelten nur für ein begrenztes Intervall, das kleiner als die Zeitverschiebung im Netz ($2\,\Delta\tau_N$ oder $\Delta\tau_N$) ist. Sie lauten bei Veränderungen, die das gesamte System (Vor- und Rücklauf) betreffen

$$\mu_1 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_{ges,1}} = \frac{\tau - 2\tau_{t,1}}{2\Delta\tau_{N,1}} \tag{27}$$

und bei begrenzter Beeinflussung (Vor- oder Rücklauf)

$$\mu_1 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_{ges,1}} = \frac{\tau - \tau_{t,1}}{\Delta\tau_{N,1}} \tag{28}$$

Zur Zeit des Temperatursprungs sei $\tau = 0$. Ändern sich die Massenströme zum Zeitpunkt $\tau = \tau^+$ verhältnisgleich von $\dot{m}_{ges,1}$ auf $\dot{m}_{ges,2}$, dann ergeben sich damit auch neue Zeitverschiebungen im Netz

$$\tau_{t,2} = \tau_{t,1}\,\frac{\dot{m}_{ges,1}}{\dot{m}_{ges,2}};\quad \Delta\tau_{N,2} = \Delta\tau_{N,1}\,\frac{\dot{m}_{ges,1}}{\dot{m}_{ges,2}}. \tag{29}$$

Die Massenstromfunktion steigt dann mit $(2\Delta\tau_{N,2})^{-1}$ bzw. $(\Delta\tau_{N,2})^{-1}$ an, so daß für $\tau \geqq \tau^+$ gelten:

$$\mu_2 = \frac{\tau^+ - 2\tau_{t,1}}{2\Delta\tau_{N,1}} + \frac{\tau - \tau^+}{2\Delta\tau_{N,2}} \tag{30}$$

bzw.

$$\mu_2 = \frac{\tau^+ - \tau_{t,1}}{\Delta\tau_{N,1}} + \frac{\tau - \tau^+}{\Delta\tau_{N,2}}. \tag{31}$$

Würde zur Zeit $\tau = \tau^{++}$ eine erneute Massenstromänderung auftreten, dann ergäben sich analog zu den vorhergehenden Gleichungen

$$\mu_3 = \frac{\tau^+ - 2\tau_{t,1}}{2\Delta\tau_{N,1}} + \frac{\tau^{++} - \tau^+}{2\Delta\tau_{N,2}} + \frac{\tau - \tau^{++}}{2\Delta\tau_{N,3}} \tag{32}$$

und

$$\mu_3 = \frac{\tau^+ - \tau_{t,1}}{\Delta\tau_{N,1}} + \frac{\tau^{++} - \tau^+}{\Delta\tau_{N,2}} + \frac{\tau - \tau^{++}}{\Delta\tau_{N,3}}. \tag{33}$$

Erfolgt zu einem weiteren Zeitpunkt ein Temperatursprung, so wird zweckmäßigerweise von da aus die Zeitkoordinate neu gezählt. Die abgeleiteten Gleichungen (27) bis (33) gelten dann gleichermaßen. Die Überlagerung der Änderungsfunktionen ist im nachfolgenden Beispiel gezeigt.

2.4. Beispiel

Ein Wärmenetz wird infolge einer annähernd synchronen Steuerung in den Abnehmerstationen mengen- und temperaturvariabel betrieben. Die realen Fahrkurven können durch die im Bild 13 dargestellten Treppenkurven approximiert werden. Im Ausgangszustand betrugen die Zeitverschiebungen $\tau_{t,1} = 0{,}05$ h und $\Delta\tau_{N,1} = 0{,}5$ h. Es ist die Rücklauftemperatur am Eintritt in das Heizwerk zu ermitteln.

Lösung

Die erste Temperaturänderung erfolgt um 12.00 Uhr. Zur Kennzeichnung werden die zugehörigen Größen mit dem Zeiger ′ versehen. Zu dieser Zeit sei $\tau' = 0$ gesetzt. Nach Gl. (28) gilt mit τ' in h

$$\mu_1' = \frac{\tau' - 0{,}05}{0{,}5} = -0{,}1 + 2\tau'$$

bis zur Änderung des Massenstromes zur Zeit $(\tau^+)' = 0{,}25$ h. Der dimensionslose Massenstrom hat dann den Wert

$$(\mu_1^+)' = \frac{0{,}25 - 0{,}05}{0{,}5} = 0{,}4$$

erreicht. Nach der Änderung des Massenstroms gelten gemäß Gl. (29)

$$\tau'_{t,2} = 0{,}05\,\frac{1}{0{,}7}\,\text{h} = 0{,}07\,\text{h};\quad \Delta\tau'_{N,2} = 0{,}5\,\frac{1}{0{,}7}\,\text{h} = 0{,}71\,\text{h},$$

wodurch

$$\mu_2' = \frac{0{,}25 - 0{,}05}{0{,}5} + \frac{\tau' - 0{,}25}{0{,}71} = 0{,}048 + 1{,}41\,\tau'$$

wird. Die Zeit, nach der die Reaktion auf den Temperatursprung beendet ist, beträgt

$$\tau' = \frac{1 - 0{,}048}{1{,}41}\,\text{h} = 0{,}675\,\text{h}.$$

Die nächste Temperaturänderung erfolgt um 12.30 Uhr. Wird hier die Zeitkoordinate wiederum Null gesetzt (Zeiger ″), ergeben sich

analog zum vorherigen Berechnungsgang mit den neuen Ausgangswerten $\tau''_{t,1} = 0{,}07$ h und $\Delta\tau''_{N,1} = 0{,}71$ h:

$$\mu_1'' = \frac{\tau'' - 0{,}07}{0{,}71} = -0{,}1 + 1{,}41\,\tau''$$

Massenstromänderung bei $(\tau^+)'' = 0{,}25$ h

$$(\mu_1^+)'' = \frac{0{,}25 - 0{,}07}{0{,}71} = 0{,}25$$

neue Zeitverschiebungen, bezogen auf die ursprünglichen Werte

$$\tau''_{t,2} = 0{,}05\,\frac{1}{0{,}5}\,\text{h} = 0{,}1\,\text{h};\quad \Delta\tau''_{N,2} = 0{,}5\,\frac{1}{0{,}5}\,\text{h} = 1\,\text{h}$$

$$\mu_2'' = \frac{0{,}25 - 0{,}07}{0{,}71} + \frac{\tau'' - 0{,}25}{1} = \tau''.$$

Die Reaktion auf den zweiten Temperatursprung ist somit nach einer Stunde beendet, d. h. 13.30 Uhr.

Die dimensionslosen Massenstromfunktionen sind im Bild 14 eingetragen. Um die Änderungen zu verdeutlichen, wurden die Kurven über ihren Geltungsbereich hinaus verlängert. Es sei auch darauf hingewiesen, daß μ_2' und μ_1'' wegen des gleichen Anstiegs parallel verlaufen müssen.

Im weiteren wird aus dem μ, τ_U-Diagramm der Temperaturverlauf t_R am Eintritt des Wärmelieferers entwickelt. Dies ist rein rechnerisch nach Gl. (17) möglich. Die Größen μ', μ'' und $\mu°$ sind im Bild 14 eingetragen. Sie ergibt sich beispielsweise um 12.37 Uhr

$$t_R = (0{,}85 \cdot 60 + 0{,}075 \cdot 50 + 0{,}075 \cdot 70)\ °\text{C} = 60\ °\text{C}.$$

Der Temperaturverlauf kann aber auch grafisch in sehr anschaulicher Weise ermittelt werden. Bis zur Zeit τ'_t macht sich die Änderung der Abnehmer-Austrittstemperaturen am Ende des Netzrücklaufs noch nicht bemerkbar. Von der Stelle A bis B würde der Temperaturverlauf führen, wenn die Funktion μ_1' durchgängig gültig wäre. Infolge der Massenstromänderung liegt jedoch an der Stelle C ein Knickpunkt. Der neue Endpunkt wäre D, wenn sowohl der Massenstrom als auch die Abnehmertemperaturen konstant blieben. Da aber zum Zeitpunkt τ_t'' der neue Temperatursprung auf 50 °C am Netzende bemerkbar wird, gilt die eingetragene Kurve nur bis zum Punkt E. Weiterhin liegt ab Punkt F die endgültige Rücklauftemperatur von 50 °C an. Unter durchgängig konstanten Bedingungen ergäbe sich die Gerade von G nach F, wegen der Massenstromänderung existiert jedoch bei H ein Knickpunkt. Der weitere Verlauf liegt — entsprechend der Kurve μ_1'' — zwischen I und J. Er hat aber nur bis K Gültigkeit, da von dort an rückwirkend noch der Einfluß der ersten Temperaturänderung vorhanden ist. Wegen der Linearitäten kann dann zwischen den Punkten E und K der Polygonzug durch eine Gerade geschlossen werden. Es ist deutlich sichtbar, wie die sprunghaften Temperaturänderungen durch die Transportvorgänge im Wärmenetz ausgeglichen werden.

Literatur

/1/ *Dittmann / Haziak:* Der Einfluß der Heiznetzausdehnung und der Abnehmerverteilung auf die Auslegung und Betriebsführung von Fernwärmenetzen.
„Stadt- und Gebäudetechnik" 33 (1979) H. 12

/2/ *Meichsner:* Optimale Größe von Wärmeübertragerstationen.
Forschungsbericht des Instituts TGA, 1980, (unveröffentlicht)

/3/ Rechenprogramm „Fernwärmeverteilungsanlagen", Institut TGA