Zur Anwendung empfohlen

Die Auslegung von Druckdiktieranlagen

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

(Fortsetzung von Heft 9/1973)

4. Anwendungen

Beispiel 1

Ein Heiznetz wird mit 110/70 °C im Vollastzustand betrieben. Die Abnehmer sind direkt in den Heizstromkreis eingebunden. Die Regelung erfolgt zentral vom Wärmeübertrager aus. Die Umwälzpumpen haben eine Leistung von 100 m³/h, das Füllvolumen beträgt 50 m³. Die Anlage wird mit 110 °C Vorlauftemperatur bei —15 °C Außentemperatur gefahren.

Wie groß ist der maximale Zuspeisestrom, wenn die Außentemperatur linear um 3 grd/h steigt und die Vorlauftemperatur sich ohne Zeitverzögerung auf den jeweils neuen Sollwert einstellt?

Nach Gl. (22) errechnet sich

$$\Delta\tau = \frac{50}{2 \cdot 100}\ \mathrm{h} = 0{,}25\ \mathrm{h}\,.$$

Durch Abpausen der Kurven v_{1V} und v_{2V} aus Bild 9 auf darübergelegtes Transparentpapier und Ergänzung der Zeitdifferenzen am Abszissenmaßstab erhält man das zeitliche Verhalten des Verbrauchers (Bild 11). Die am Verbraucher wirksam gewordene Vorlaufvolumenänderung muß jedoch 0,25 h vorher in gleicher Weise am Erzeugeraustritt erfolgt sein, d. h., die Kurve v_{1V} kann als Kurve v_{2E} um 0,25 h nach „vorn" verschoben, ebenfalls abgepaust werden. Analog ist mit der Änderung des Volumens am Erzeugereintritt zu verfahren, d. h., die Kurve v_{2V} wird um 0,25 h nach „hinten" verschoben als v_{1E} durchgezogen. Die Zeitkoordinate kann somit endgültig — von 0 beginnend — aufgetragen werden. Stellt man Gl. (21) geringfügig um, so erhält man

$$\dot{V}_{Zu} = \dot{m}\,[(v_{1V} - v_{2E}) + (v_{1E} - v_{2V})] = \dot{m}\,(a + b)\,.$$

Da der größte Zuspeisestrom ermittelt werden soll, ist die Strecke $(a + b)$ zur gleichen Zeit τ zu maximieren. Es ist sofort zu sehen, daß $(a + b)$ nach 0,5 h — von Beginn der Abkühlung an gerechnet — den größten Wert mit 0,003 dm³/kg annimmt. Der Massenstrom wird $\dot{m} = 100$ t/h gesetzt und als konstant betrachtet. Im Temperaturbereich kleiner als 70 °C führt dies zu einem maximalen Fehler von 2 Prozent.

Schließlich ergibt sich

$$\dot{V}_{Zu} = 100\,000 \cdot 0{,}003 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m^3/h} = 0{,}3\ \mathrm{m^3/h}\,.$$

Beispiel 2

Ein Wohngebiet mit 6000 Wohnungseinheiten und zahlreichen gesellschaftlichen Einrichtungen soll durch ein Netz 130/70 °C über Hausmischstationen von einer Umformerstation aus mit Heizenergie versorgt werden. Die Druckhaltung soll nach dem Prinzip der Druckdiktierung erfolgen (Bild 1).

Die Gebäudeheizungsanlagen sind für die Temperaturverhältnisse 110/70 °C im Vollastzustand (Außentemperatur —18 °C) bemessen und werden entsprechend der Außentemperatur gleitend gefahren. Das Außennetz wird im Bereich von 130 °C bis 100 °C so betrieben, daß die Vorlauftemperatur stets um 60 grd über der zur jeweiligen Außentemperatur gehörigen Rücklauftemperatur liegt. Die Füllvolumina, die Wärmeabgaben im Vollastzustand und die mittleren Temperaturen zwischen Vor- und Rücklauf sind nachfolgend zusammengestellt:

Fernleitung:

Gedämmte Rohre

NW 500 · · · 125
$V = 183\ \mathrm{m^3}$ $\dot{Q}^+ =$ 150 000 kcal/h $t = 100$ °C

NW 100 · · · 40
$V = 120\ \mathrm{m^3}$ $\dot{Q}^+ =$ 650 000 kcal/h $t = 100$ °C

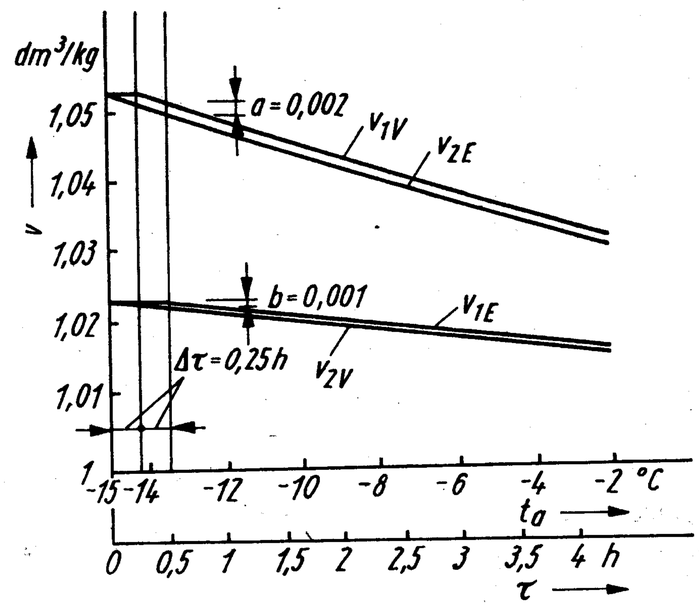
Gebäudeanlage:

Gedämmte Rohre

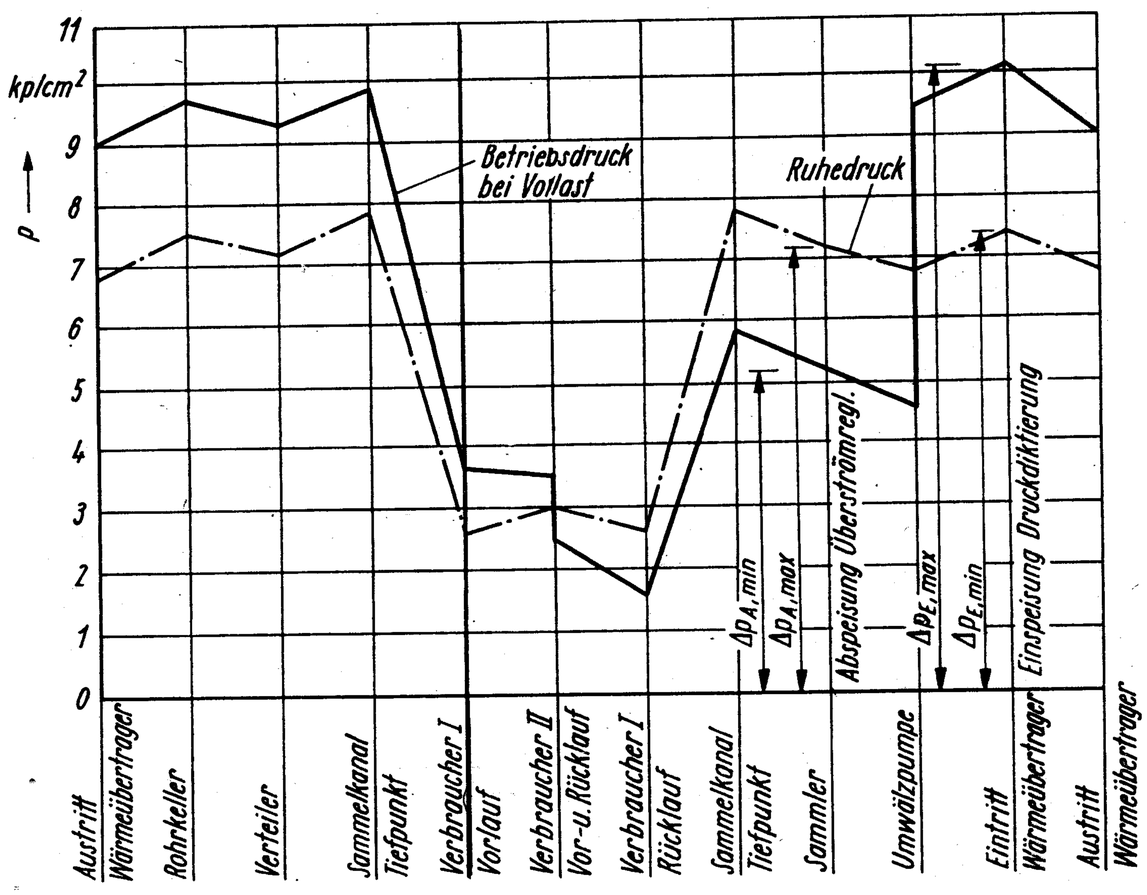
NW 100 · · · 40
$V = 80\ \mathrm{m^3}$ $\dot{Q}^+ =$ 430 000 kcal/h $t = 90$ °C

nackte Rohre

NW 32 · · · 10
$V = 40\ \mathrm{m^3}$ $\dot{Q}^+ =$ 4 800 000 kcal/h $t = 90$ °C



11



12

Plattenheizkörper

$V = 148\ \mathrm{m}^3\ \dot{Q}^+ = 47\,500\,000\ \mathrm{kcal/h}\ \ t = 90\ °\mathrm{C}$

Die Umgebungstemperatur der Anlagenteile betrage durchweg $tu = 20$ °C. Die Aufheizung des Warmwassers erfolgt in zwei Stufen von 70 °C auf 100 °C und von 100 °C auf 130 °C. Primärseitig steht Sattdampf zur Verfügung. Die vorhandenen Dampftemperaturen liegen auf Grund von Druckschwankungen in der ersten Stufe zwischen 127 °C und 151 °C, in der zweiten Stufe zwischen 179 °C und 200 °C. — Die Heizfläche der Wärmeübertrager erhielt nach Herstellerangaben einen Zuschlag von etwa 30 Prozent, um Unsicherheiten in der Berechnung der Wärmedurchgangszahlen zu begegnen. Die Auslegung erfolgte für die jeweils niedrigste Dampftemperatur. — Im Sekundärnetz werden maximal 800 m³/h Wasser umgewälzt. Für die Bemessung der Druckdiktierung sei vorausgesetzt, daß die beiden Aufheizstufen nacheinander in Betrieb genommen werden.

Die Druckverteilungen im Fernheiznetz und in den Anlagenteilen der U-Station sind im Bild 12 dargestellt. Der Druckverlauf ergibt sich aus der Summation von geodätischem Trassenverlauf und hydraulischem Druckverlauf. Es ist zu beachten, daß die Abspeiseleitung an den Rücklaufsammler angeschlossen wird und die Überströmung gegen Atmosphärendruck um +4,5 m höher liegt. Die Einspeiseleitung ist auf der Druckseite der Umwälzpumpen angeschlossen. Der Höhenunterschied zwischen Ausdehnungsgefäß und Einspeisestelle beträgt bei minimalem Wasserspiegel +2 m und bei maximalem Wasserspiegel +4 m.

Der zu haltende Druck, der identisch mit dem Ruhedruck ist, soll der arithmetische Mittelwert zwischen den Drücken am Verteiler und Sammler sein.

Die Aggregate für die Druckhaltung sollen bemessen werden. Abschließend ist unter Einsatz beider Druckdiktierpumpen die größte mögliche Vorlauftemperaturabsenkung je Zeiteinheit zu ermitteln. Der Einfachheit halber wird eine lineare Vorlauftemperatur-Zeit-Kurve beim Abheizvorgang angenommen.

Maximale Volumenkontraktion

Die Berechnung des notwendigen Zuspeisestromes bei Ausfall der Elektroenergie ergibt sich nach Gl. (12) und Tabelle 3 zu

$$\dot{V}_{\mathrm{Zu,max}} = \sum_{\mathrm{i}} \varepsilon_{\mathrm{i}}\, \dot{Q}_{\mathrm{i}}^{+}$$
$$= 0{,}00072 \cdot 150 + 0{,}00069 \cdot 650 + 0{,}00063 \cdot 430 + 0{,}00048 \cdot 4800 + 0{,}00045 \cdot 47500$$

$$\dot{V}_{\mathrm{Zu,max}} = (0{,}1 + 0{,}4 + 0{,}3 + 2{,}3 + 21{,}4)\ \mathrm{m^3/h} = 24{,}5\ \mathrm{m^3/h}\,.$$

Dieser Zuspeisestrom liegt natürlich nur zu Beginn der Betriebsunterbrechung vor. Er nimmt mit der Zeit rasch ab. Errechnet man die Temperaturen der einzelnen Anlagenteile nach fünf Minuten, so ergeben sich folgende Werte nach Gl. (13) bis (15):

Gedämmte Rohre NW 500 · · · 125

$$t = (100 - 20) \cdot e^{-\frac{150\,000 \cdot 5}{1{,}09 \cdot 183\,000 \cdot (100 - 20) \cdot 60}}\ \mathrm{grd} + 20\ °\mathrm{C} = 100\ °\mathrm{C}$$

gedämmte Rohre NW 100 · · · 40

$$t = (100 - 20) \cdot e^{-\frac{650\,000 \cdot 5}{1{,}15 \cdot 120\,000 \cdot (100 - 20) \cdot 60}}\ \mathrm{grd} + 20\ °\mathrm{C} = 100\ °\mathrm{C}$$

nackte Rohre NW 32 · · · 10

$$t = \left[(90 - 20)^{-0{,}25} + 0{,}25 \cdot \frac{4\,800\,000 \cdot 5}{1{,}5 \cdot 40\,000 \cdot (90 - 20)^{1{,}25} \cdot 60}\right]^{-4}\ \mathrm{grd} + 20\ °\mathrm{C} = 83\ °\mathrm{C}$$

Plattenheizkörper

$$t = \left[(90 - 20)^{-0{,}25} + 0{,}25 \cdot \frac{47\,500\,000 \cdot 5}{1{,}6 \cdot 148\,000 \cdot (90 - 20)^{1{,}25} \cdot 60}\right]^{-4}\ \mathrm{grd} + 20\ °\mathrm{C} = 75\ °\mathrm{C}\,.$$

Die Übersicht zeigt, daß es für dieses Zeitintervall ausreichend ist, nur die Abkühlung der Plattenheizkörper näher zu betrachten. Für die übrigen Anlagenteile sind auf Grund der geringen Abkühlungen während der ersten fünf Minuten die eingangs errechneten Zuspeisemengen in guter Näherung zu verwenden. Die Zuspeisemengen infolge Heizkörperabkühlung errechnen sich mittels der Gl. (12) bis (14). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefaßt. Aus den Werten ist die rasche Abnahme des erforderlichen Zuspeisestromes deutlich ersichtlich. Dies bedeutet, daß $\dot{V}_{\mathrm{Zu,max}}$ wegen der vorhandenen Kurzzeitigkeit genau ermittelt und ohne „Sicherheitszuschläge" versehen in der weiteren Rechnung verwendet werden sollte.

Maximale Volumenexpansion

Die Berechnung des größten Abspeisestromes beim Aufheizvorgang erfolgt nach den Gl. (16) bis (20). Es wird davon ausgegangen, daß die erste und zweite Aufheizstufe zeitlich nacheinander in Betrieb genommen werden. Die parallel geschalteten Wärmeübertrager einer Stufe können jedoch gleichzeitig in Betrieb gehen. Es ist zuerst festzustellen, bei Inbetriebnahme welcher Stufe die größte Volumenexpansion auftritt.

Für die erste Aufheizstufe gilt:

Die Betriebscharakteristik nach Gl. (17)

$$\Phi = \frac{100 - 70}{127 - 70} = 0{,}53$$

ergibt für $\dot{W}_{\mathrm{WW}}/\dot{W}_{\mathrm{HW}} = 0$ (Dampfbeaufschlagung) nach [4], Bild 2, $k \cdot A/\dot{W}_{\mathrm{WW}} = 0{,}77$. Dieser Wert wird mit 1,3 multipliziert, da von der Herstellerfirma die Heizfläche A um 30 Prozent größer als erforderlich gewählt wurde. Damit erhält man als vorhandenen Wert $k \cdot A/\dot{W}_{\mathrm{WW}} = 1{,}0$, woraus nach oben erwähntem Diagramm $\Phi = 0{,}63$ folgt. Für die weitere Berechnung ist nicht wie bei der Auslegung die minimale Dampftemperatur von 127 °C, sondern die maximal mögliche Dampftemperatur von 151 °C anzusetzen. Die Wassereintrittstemperatur, die zur größten Volumenexpansion führt, errechnet sich nach Gl. (20) bzw. Bild 5 zu

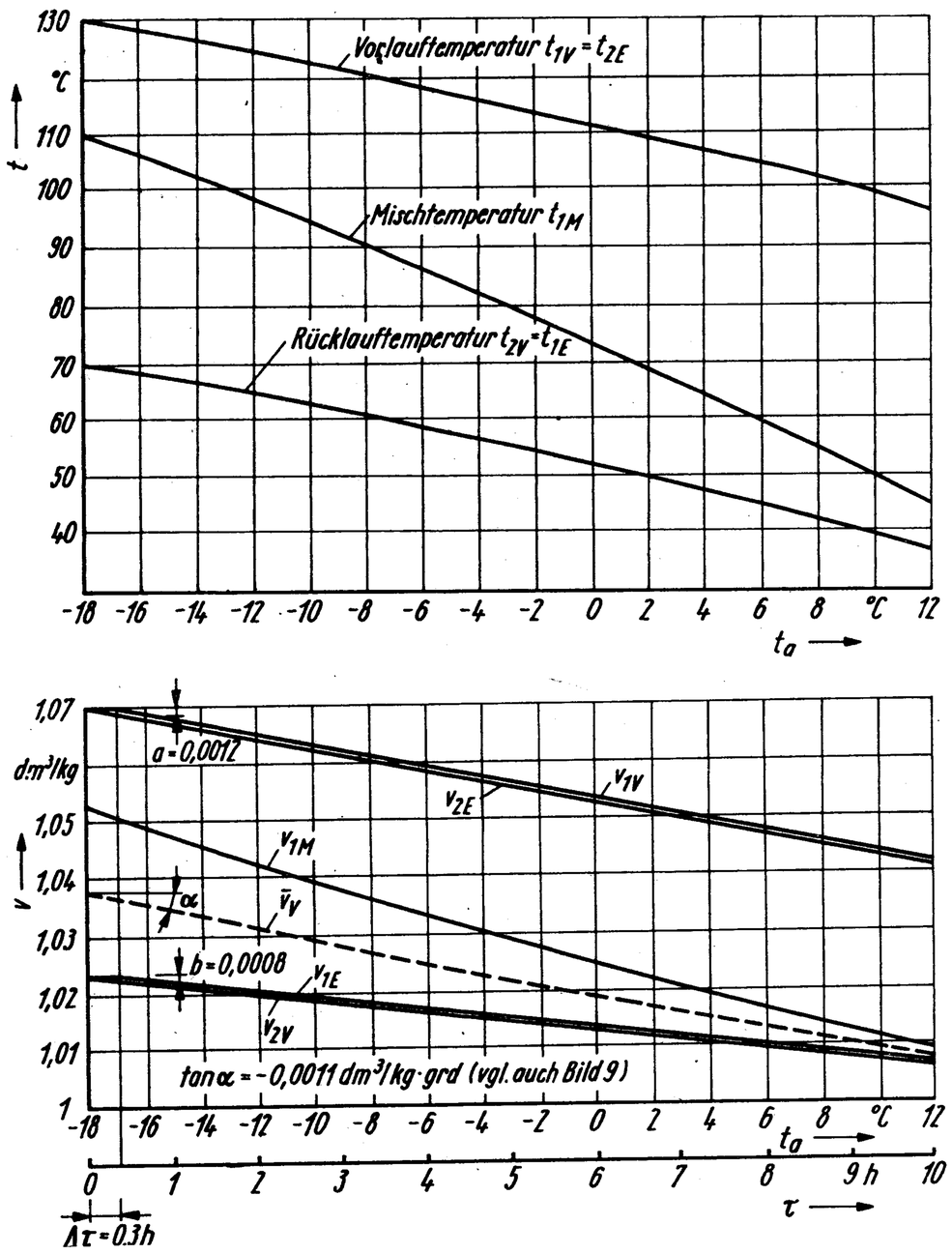
$$t'_{\mathrm{WW}} = [14{,}4 + (0{,}63 - 1) \cdot 151] \cdot \frac{1}{0{,}63 - 2} = 30\ °\mathrm{C}\,,$$

womit die Wasseraustrittstemperatur nach Gl. (17)

$$t''_{\mathrm{WW}} = 30\ °\mathrm{C} + 0{,}63 \cdot (151 - 30)\ \mathrm{grd} = 106\ °\mathrm{C}$$

Tabelle 4

τ [min]	t [°C]	$10^3 \cdot \varepsilon$ [m³/kcal]	$\dot{Q}$ [kcal/h]	$\varepsilon \cdot \dot{Q}$ [m³/h]	$\dot{V}_{\mathrm{Zu}}$ [m³/h]
2	83	0,00042	$41{,}7 \cdot 10^6$	17,5	20,6
4	77	0,00039	$36{,}7 \cdot 10^6$	14,4	17,5
6	72	0,00037	$32{,}8 \cdot 10^6$	12,2	15,3
8	68	0,00036	$29{,}6 \cdot 10^6$	10,5	13,6
10	64	0,00034	$26{,}6 \cdot 10^6$	9,0	12,1
12	60	0,00032	$23{,}6 \cdot 10^6$	7,6	10,7



13

errechenbar ist. Die zugehörigen spezifischen Volumina sind Bild 4 zu entnehmen. Damit ergibt sich die Abspeisemenge nach Gl. (16) zu

$$\dot{V}_{\mathrm{Ab,max}} = 800 \cdot (1{,}049 - 1{,}004)\ \mathrm{m^3/h} = 36\ \mathrm{m^3/h}\,.$$

Für die zweite Aufheizstufe gilt:

Analog zur vorstehenden Rechnung folgt nach Gl. (17)

$$\Phi = \frac{130 - 100}{179 - 100} = 0{,}38$$

und weiter mit $\dot{W}_{\mathrm{WW}}/\dot{W}_{\mathrm{HW}} = 0$ aus dem Diagramm $k \cdot A/\dot{W}_{\mathrm{WW}} = 0{,}48$. Die Erhöhung auf das 1,3fache liefert schließlich als neuen Wert $k \cdot A/\dot{W}_{\mathrm{WW}} = 0{,}62$, womit $\Phi = 0{,}45$ abgelesen werden kann. Unter der Voraussetzung, daß die maximale Dampftemperatur 200 °C beträgt, ergibt sich nach Gl. (20) die Wassereintrittstemperatur $t'_{\mathrm{WW}} = 62$ °C und nach Gl. (17) die Wasseraustrittstemperatur $t''_{\mathrm{WW}} = 124$ °C.

Mit den zugehörigen Werten aus Bild 4 folgt nach Gl. (16)

$$\dot{V}_{\mathrm{Ab,max}} = 800 \cdot (1{,}065 - 1{,}018)\ \mathrm{m^3/h} = 37{,}6\ \mathrm{m^3/h}\,.$$

Theoretisch kann somit beim Anfahren der zweiten Aufheizstufe die maximale Abspeisemenge — die bei den weiteren Rechnungen verwendet wird — auftreten. (Bei einwandfreier Funktion der BMSR-Anlage ist dieser Wert praktisch nicht zu erwarten, da erst bei Erreichen von 100 °C am Austritt der ersten Aufheizstufe die zweite Stufe zugeschaltet wird. Die Aufheizung würde dann von 100 °C auf 130 °C erfolgen, wobei sich eine Abspeisemenge von 21,6 m³/h ergibt.)

Volumenänderungen bei Laständerungen

Der Temperaturverlauf als Funktion der Außentemperatur ist in Bild 13 dargestellt. Zugehörig wurde unter Verwendung von Bild 4 und 9 der Verlauf des spezifischen Volumens aufgezeichnet.

Ausgehend vom Anlagenvolumen $V_{\mathrm{V}} = 268\ \mathrm{m^3}$ errechnen sich die Volumenanteile nach Gl. (25) und (26) zu

$$V_{\mathrm{B}} = 268 \cdot \left(1 - \frac{40}{60}\right)\ \mathrm{m^3} = 89\ \mathrm{m^3}$$

und

$$V_{\mathrm{P}} = 268 \cdot \frac{40}{60}\ \mathrm{m^3} = 179\ \mathrm{m^3}\,.$$

Das in Gl. (22) einzusetzende Volumen V ergibt sich als Summe aus dem Netzinhalt der Fernleitungen und dem Teilvolumen V_{P} der Gebäudeanlage. Es gilt

$$V = (183 + 120 + 179)\ \mathrm{m^3} = 482\ \mathrm{m^3}\,,$$

woraus

$$\Delta\tau = \frac{482}{2 \cdot 800}\ \mathrm{h} = 0{,}3\ \mathrm{h}$$

folgt.

Unter Beachtung, daß sich die Außentemperatur um 3 grd/h ändert und ein Kurvenverlauf nach Bild 10 entsteht, kann Bild 13 um die fehlenden v-Kurven und die Zeitkoordinate ergänzt werden. Da $v_{2\mathrm{E}}$ und $v_{2\mathrm{V}}$ in diesem Beispiel lineare Funktionen der Zeit sind, ergibt sich nach der Zeit $\Delta\tau$ — von Beginn des Vorgangs an gerechnet — $(a + b) = 0{,}002\ \mathrm{dm^3/kg} = \text{konst.}$ Der Differentialquotient nach Gl. (27) ist zu Beginn der Abkühlung am größten. Er beträgt $d\bar{v}_{\mathrm{V}}/dt_{\mathrm{a}} = -0{,}0011\ \mathrm{dm^3/kg \cdot grd}$ (vgl. Bild 9) und $dt_{\mathrm{a}}/d\tau = 3\ \mathrm{grd/h}$. Der größte witterungsbedingte Zuspeisestrom errechnet sich damit zu

$$\dot{V}_{\mathrm{Zu}} = 800\,000 \cdot 0{,}002 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m^3/h} + 89\,000 \cdot 0{,}0011 \cdot 10^{-3} \cdot 3\ \mathrm{m^3/h} = 1{,}9\ \mathrm{m^3/h}\,.$$

Dimensionierung der Analogiestrecke

Nach [2] sollten 0,3 Prozent der umgewälzten Wassermenge die Analogiestrecke durchströmen. Im vorliegenden Beispiel ergeben sich 2,4 m³/h. Die Leitungsdimension wird NW 25 gewählt. Die endgültige Einregulierung erfolgt mittels zweier Stellventile mit einem $k_{\mathrm{VS}} = 3{,}15\ \mathrm{m^3\,h^{-1}\,kp^{-0{,}5}\,cm}$.

Dimensionierung der Zu- und Abspeiseleitungen

Auf der Grundlage der maximalen Zu- und Abspeiseströme wurden die Leitungen dimensioniert und die Druckverluste

Zuspeiseleitung $\Delta p_{\mathrm{Zu}} = 0{,}3\ \mathrm{kp/cm^2}$

Abspeiseleitung $\Delta p_{\mathrm{Ab}} = 1{,}02\ \mathrm{kp/cm^2}$

berechnet. Für die weiteren Betrachtungen wird der auf den Förderstrom von 1 m³/h bezogene spezifische Druckabfall C nach Gl. (29) benötigt. Er beträgt:

Zuspeiseleitung

$$C_{\mathrm{Zu}} = \frac{0{,}3}{24{,}5^2}\ \mathrm{kp \cdot h^2/cm^2 \cdot m^6} = 5 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{kp \cdot h^2/cm^2 \cdot m^6}$$

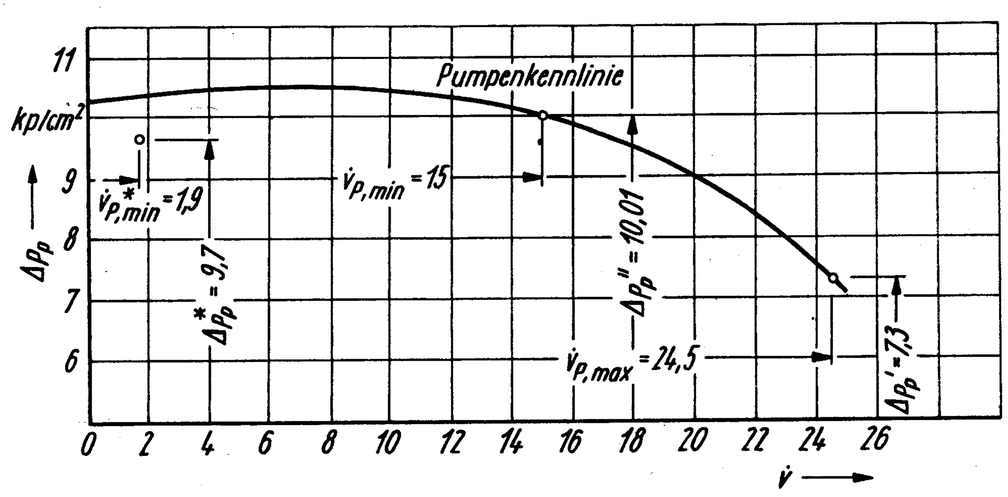
Abspeiseleitung

$$C_{\mathrm{Ab}} = \frac{1{,}02}{37{,}6^2}\ \mathrm{kp \cdot h^2/cm^2 \cdot m^6} = 7{,}2 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{kp \cdot h^2/cm^2 \cdot m^6}$$

Auswahl der Druckdiktierpumpe

Der maximale Förderstrom errechnet sich nach Gl. (30) zu

$$\dot{V}_{\mathrm{P,max}} = 24{,}5\ \mathrm{m^3/h}\,.$$



14

Der zur maximalen Einspeisemenge gehörige Gegendruck in der Leitung beträgt nach Bild 12

$$\Delta p_{E,min} = 7{,}4\ kp/cm^2\,,$$

womit sich nach Gl. (31) der notwendige Pumpendruck

$$\Delta p'_P = (5 \cdot 10^{-4} \cdot 24{,}5^2 - 0{,}4 + 7{,}4)\ kp/cm^2 = 7{,}3\ kp/cm^2$$

ergibt. Der zweite Betriebspunkt wird zunächst für $\dot{V}_{Ü,min} = 0$ nach Gl. (32) und (33) mit dem für die witterungsbedingte Lastanpassung errechneten Wert $\dot{V}_{Zu} = 1{,}9\ m^3/h$ und $\Delta p_{E,max} = 10{,}1\ kp/cm^2$ (vgl. Bild 12) abgeschätzt:

$$\dot{V}_{P,*min} = 1{,}9\ m^3/h$$
$$\Delta p^*_P = (5 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}9^2 - 0{,}4 + 10{,}1)\ kp/cm^2$$
$$= 9{,}7\ kp/cm^2\,.$$

Für diese Betriebsverhältnisse wird eine Pumpe vom Typ HG1K50B in dreistufiger Ausführung gewählt. Die in Bild 14 dargestellte Kennlinie deckt sich zufälligerweise exakt mit dem zu $\dot{V}_{P,max}$ gehörigen Betriebspunkt.

Auswahl des Überströmreglers

Gemäß Gl. (35) wird der minimale Pumpenförderstrom $\dot{V}_{P,min}$ zur Bemessung des Überströmreglers benötigt. Die Gl. (33) ist deshalb für die laufende Variable $\dot{V}_P$ auszuwerten. Hierbei wird $H_{Zu} = +2$ m gesetzt, da die Auslegung des Überströmreglers für die größte Menge $\dot{V}_{Ü,max}$ erfolgt. Diese liegt bei Aufheizung vor, wobei der Wasserstand im Ausdehnungsgefäß seinen niedrigsten Wert erreicht.
Es gilt

$$\Delta p''_P = (5 \cdot 10^{-4} \cdot \dot{V}^2 - 0{,}2 + 10{,}1)\ kp/cm^2$$

mit $\dot{V} = 10\ m^3/h$ und $15\ m^3/h$ folgen $\Delta p''_P = 9{,}95\ kp/cm^2$ und $10{,}01\ kp/cm^2$. Diese Werte in Bild 14 eingetragen, ergeben im Schnittpunkt mit der Pumpenkennlinie

$$\dot{V}_{P,min} = 15\ m^3/h\,.$$

Damit wird Gl. (35)

$$\dot{V}_{Ü,max} = (37{,}6 + 15)\ m^3/h = 52{,}6\ m^3/h\,.$$

Diesen Wert und $\Delta p_{A,min} = 5{,}2\ kp/cm^2$ in Gl. (36) eingesetzt, liefert

$$k_{V,max} = \frac{52{,}6}{\sqrt{5{,}2 - 7{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot 52{,}6^2 - 0{,}45}}\ \frac{m^3/h}{\sqrt{kp/cm^2}}$$

$$= 31{,}7\ \frac{m^3/h}{\sqrt{kp/cm^2}}\,,$$

woraus als standardisierter Wert $k_{VS,max} = 50\ m^3h^{-1}kp^{-0,5}\,cm$ ausgewählt wird. Das Stellverhältnis beträgt $r = 10$, woraus $k_{VS,min} = 5\ m^3h^{-1}kp^{-0,5}\,cm$ folgt.

Nachrechnung

Zuerst sei der k_V-Wert bei der witterungsbedingten Laständerung überprüft. Nach Gl. (32) folgt

$$\dot{V}_{Ü,min} = (15 - 1{,}9)\ m^3/h = 13{,}1\ m^3/h\,.$$

Durch Substitution von $\dot{V}_{Ü,min}$ in Gl. (34) errechnet sich

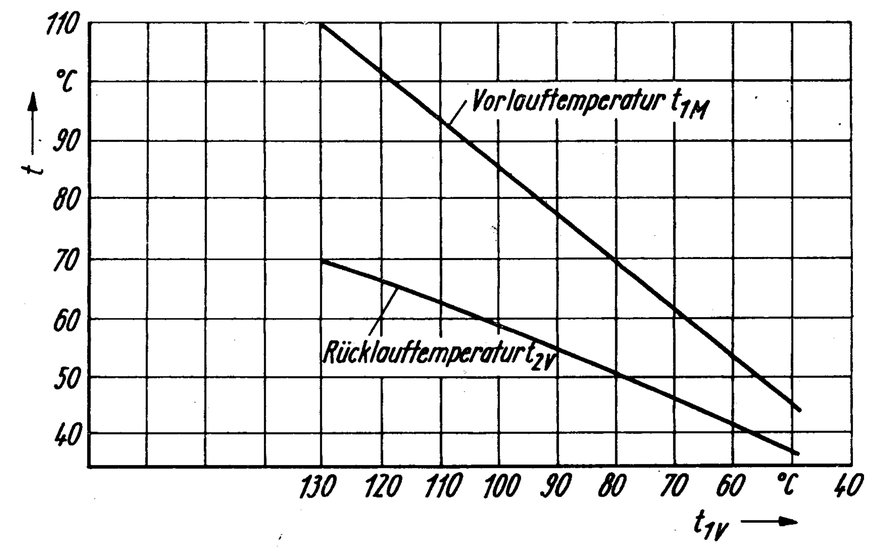
$$k_{V,min} = \frac{13{,}1}{\sqrt{5{,}2 - 7{,}2 \cdot 10^{-4} \cdot 13{,}1^2 - 0{,}45}}\ \frac{m^3/h}{\sqrt{kp/cm^2}}$$

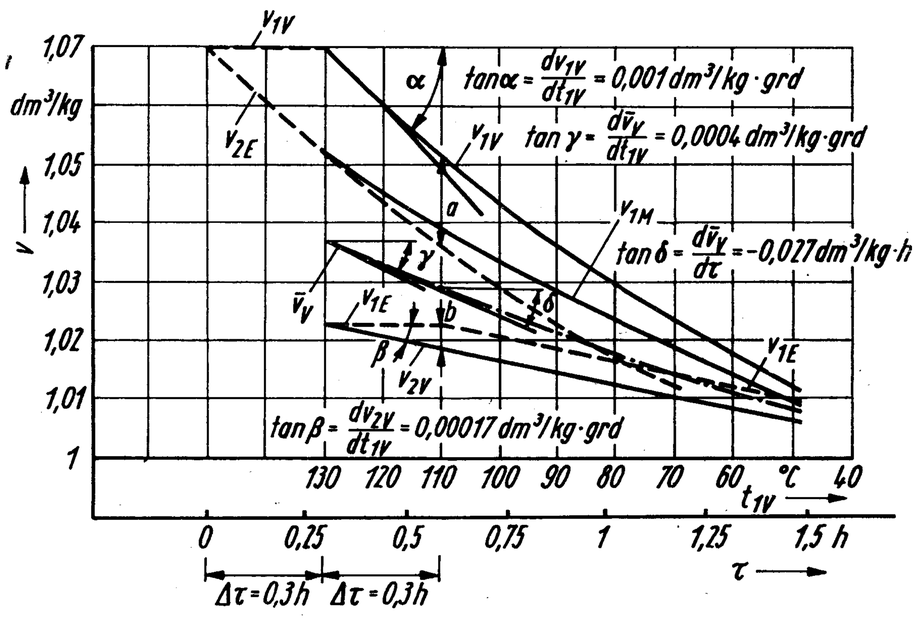
$$= 6{,}1\ \frac{m^3/h}{\sqrt{kp/cm^2}} > k_{VS,min}\,.$$

Die zweite Nachrechnung soll die Mindestüberströmmenge, die bei Stillstand der Umwälzpumpen und Einhaltung von $k_{VS,min}$ erforderlich ist, ergeben. Nach Gl. (34) gilt:

$$\dot{V}_{Ü,min} = \sqrt{\frac{7{,}2 - 0{,}45}{7{,}2 \cdot 10^{-4} + 5^{-2}}}\ m^3/h = 12{,}9\ m^3/h\,.$$

Bei einem maximalen Pumpenförderstrom von 24,5 m³/h errechnet sich unter Abzug der minimalen Überströmmenge von 12,9 m³/h ein Zuspeisestrom an das System von





15

11,6 m³/h. Ein Vergleich mit den Werten der Tabelle 4 zeigt, daß der Überströmregler bereits nach 11 min wieder im Normalbereich arbeiten kann, d. h., die vorgenommene Auslegung ist in Ordnung.

Die letzte Nachrechnung gibt Auskunft über das planmäßige Abheizen. Mit $\dot{m}_B/\dot{m}_V = 0{,}33$ und den in Bild 9 aufgezeichneten Vor- und Rücklauftemperaturen für ein 110/70 °C Netz errechnen sich nach Einsetzen in Gl. (28) die zugehörigen Vorlauftemperaturen t_{1V}. In Bild 15 sind diese Temperaturen in inverser Zuordnung aufgezeichnet. Darunter sind die spezifischen Volumina dargestellt. Die Verschiebung der einzelnen Kurven erfolgt qualitativ nach Bild 8. Um die maximal mögliche Abkühlungsgeschwindigkeit des Vorlaufs auszurechnen, sei von den Anstiegen dv_{1V}/dt_{1V} und dv_{2V}/dt_{1V} ausgegangen. Die Multiplikation mit der gesuchten Änderungsgeschwindigkeit $dt_{1V}/d\tau$ und der Verschiebung $\Delta\tau$ ergibt näherungsweise die in Gl. (23) aufgeführten Differenzen $(v_{1V} - v_{2E})$ und $(v_{1E} - v_{2V})$. Analog dazu ist bereits Gl. (27) vorbereitet worden. Exakt wäre die Rechnung, wenn $v_{1V} = v_{1V}(t_{1V})$, $\bar{v}_V = \bar{v}_V(t_{1V})$ und $v_{2V} = v_{2V}(t_{1V})$ Geraden sind. Da es sich jedoch — von unten betrachtet — um konvexe Kurven handelt, ergibt sich ein Sicherheitszuschlag. Es gilt:

$$\dot{V}_{Zu} = -\dot{m} \cdot \left(\frac{dv_{1V}}{dt_{1V}} \cdot \frac{dt_{1V}}{d\tau} \cdot \Delta\tau + \frac{dv_{2V}}{dt_{1V}} \cdot \frac{dt_{1V}}{d\tau} \cdot \Delta\tau \right)$$
$$- m_B \cdot \frac{d\bar{v}_V}{dt_{1V}} \cdot \frac{dt_{1V}}{d\tau}\,,$$

woraus die Temperaturabsenkungsgeschwindigkeit

$$\frac{dt_{1V}}{d\tau} = \frac{-\dot{V}_{Zu}}{\dot{m} \cdot \Delta\tau \cdot \left(\frac{dv_{1V}}{dt_{1V}} + \frac{dv_{2V}}{dt_{1V}} \right) + m_B \cdot \frac{d\bar{v}_V}{dt_{1V}}}$$

folgt. Die Differentialquotienten sind Bild 15 zu entnehmen. Die Auswertung der Gl. (33) unter Annahme von $H_{Zu} = +4$ m ergibt einen Schnittpunkt mit der Pumpenkennlinie bei $\dot{V}_P = 16\ m^3/h$ und

$$\Delta p'''_P = (5 \cdot 10^{-4} \cdot 16^2 - 0{,}4 + 10{,}1)\ kp/cm^2$$
$$= 9{,}8\ kp/cm^2\,.$$

Zwei parallel arbeitende Pumpen mit jeweils separaten Einspeiseleitungen liefern somit 32 m³/h. Die Mindestüberströmmenge bei Betrieb der Umwälzpumpen errechnet sich nach Gl. (34) zu

$$\dot{V}_{Ü,min} = \sqrt{\frac{5{,}2 - 0{,}45}{7{,}2 \cdot 10^{-4} + 5^{-2}}}\ \mathrm{m^3/h} = 10{,}8\ \mathrm{m^3/h}\,.$$

Es folgt

$$\dot{V}_{Zu} = (32 - 10{,}8)\ \mathrm{m^3/h} = 21{,}2\ \mathrm{m^3/h}\,,$$

womit sich Gl. (38) auswerten läßt:

$$\frac{dt_{1V}}{d\tau} = \frac{-21{,}2}{800 \cdot 10^3 \cdot 0{,}3 \cdot (0{,}001 + 0{,}00017) \cdot 10^{-3} + 89 \cdot 10^3 \cdot 0{,}0004 \cdot 10^{-3}}\ \frac{\mathrm{grd}}{\mathrm{h}}$$

$$= -67\ \frac{\mathrm{grd}}{\mathrm{h}}\,.$$

Da die Vorlauftemperatur linear mit der Zeit abnimmt, kann der Abszissenmaßstab in einen Zeitmaßstab überführt werden, wobei 67 grd ≙ 1 h gilt. Zu beachten ist des weiteren, daß die Temperaturabsenkung $\Delta\tau = 0{,}3$ h vorher am Erzeugeraustritt und 0,3 h nachher am Erzeugereintritt — jeweils vom Verbraucher aus betrachtet — auftritt.

Bild 15 kann nunmehr um die gestrichelten Kurvenzüge ergänzt werden. Dabei ist sofort zu sehen, daß $(a + b)_{max} = 0{,}02$ dm³/kg bei $\tau = 0{,}6$ h liegt. Es ist jedoch kleiner als der mit den Kurvenanstiegen errechnete Wert. Verursacht wurde dies durch den konvexen Kurvenverlauf. Rechnet man den notwendigen Zuspeisestrom für die ermittelte Absenkungsgeschwindigkeit der Vorlauftemperatur von 67 grd/h exakt nach, so folgt nach Gl. (23)

$$\dot{V}_{Zu} = [800 \cdot 10^3 \cdot (0{,}02 \cdot 10^{-3}) + 89 \cdot 10^3 \cdot 0{,}027 \cdot 10^{-3}]\ \mathrm{m^3/h} = 18{,}4\ \mathrm{m^3/h}\,.$$

Demgegenüber steht ein möglicher Förderstrom von 21,2 m³/h, d. h., eine Reserve ist noch vorhanden. Die mit Gl. (38) vorgeschlagene Näherung stellt damit ein Rechenverfahren dar, wie man ohne Iterationen zu einer sofortigen Aussage über die maximal mögliche Abkühlungsgeschwindigkeit, die den Betreiber interessiert, gelangt.

Literatur

[1] *Glück, B.*, Druckauflastung und Kompensation der Volumenschwankung bei geschlossenen Warmwasserheizungsanlagen, „StG" 1970, H. 12, S. 310 bis 313, und „StG" 1971, H. 4, S. 96

[2] *Goepfert, J.*, Die Druckhaltung geschlossener Heizwasser-Fernheizungsanlagen, Heizung-Lüftung-Haustechnik 1966, Bd. 17, Nr. 3, S. 73 bis 75

[3] *Wesing/Picker*, Industriell vorgefertigte Typen-Wärmeübertragerstation, „StG" 1971, H. 6, S. 148 bis 152

[4] *Glück, B.*, Berechnung der Heißwassermengen im Teillastbereich primärseitig geregelter Gegenstromwärmeübertrager, „StG" 1971, H. 10, S. 254 bis 259