Wärmespeicherung in Wärmenetzen des Abnehmerbereichs (II) Speicherfähigkeit der Netze

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

Ein typisches Wärmenetz in Verästelungsform ist im Bild 1 wiedergegeben. Je nachdem, ob nur der Netzvorlauf oder auch der Netzrücklauf auf Temperaturen gebracht werden soll, die über dem Auslegungswert liegen, sind auch die technischen Maßnahmen unterschiedlich. Die Besonderheiten werden in den folgenden beiden Abschnitten vorgestellt.

Zur Definition der einzelnen Größen dient das im Bild 2 gezeigte einfache Netz. Es kann sich dabei auch um einen direkt am Einspeisepunkt angeschlossenen Teil eines Netzes handeln. Die mit „+" gekennzeichneten Werte stellen die Auslegungsdaten dar. Die mit „++" versehenen Größen gelten während der Netzaufladung mit erhöhter Vorlauftemperatur. Dabei wird jeweils ein quasistationärer Netzzustand vorausgesetzt. Im einzelnen bedeuten:

$t_{V,E}$	Vorlauftemperatur am Einspeisepunkt
$t_{V,N,i}$	Vorlauftemperatur am Abnehmer i
$t_{R,E}$	Rücklauftemperatur am Einspeisepunkt
$t_{R,N,i}$	Rücklauftemperatur am Abnehmer i
$t_{R,i}$	Rücklauftemperatur in der Teilstrecke i
Δp_E	Differenzdruck am Einspeisepunkt (evtl. einschließlich des Wärmebereitstellers)
$\Delta p_{A,i}$	Differenzdruck am Abnehmer i
Δp_i	Differenzdruck in der Teilstrecke i der Verteilungsleitung (Vor- und Rücklaufleitung)
$\dot{m}_E$	Massenstrom am Einspeisepunkt
$\dot{m}_{N,i}$	Massenstrom durch den Abnehmer i
$\dot{m}_Ü$	Massenstrom durch die Überströmeinrichtung (im Auslegungsfall gilt stets $\dot{m}_Ü = 0$)
m_i	Wassermasse in der Teilstrecke i (Vor- und Rücklauf); $m_i = m_{V,i} + m_{R,i}$
z_i	Faktor, der die Wärmespeicherkapazität der Rohrleitung berücksichtigt.

Bei den Untersuchungen zur Netzspeicherung ist es nicht erforderlich, den Temperaturabfall in den Verteilungsleitungen zu berücksichtigen. Somit gilt immer $t_{V,E} = t_{V,N,i}$.

Die Rücklauftemperatur an der Einspeisestelle $t_{R,E}$ ergibt sich aus der Enthalpiebilanz über alle Abnehmer-Austrittszustände. Sind alle $t_{R,N,i}$ gleich ($t_{R,N,1} = t_{R,N,2} = t_{R,N,n}$), dann entspricht $t_{R,E}$ ebenfalls diesem Wert.

1. Wärmespeicherung im Vorlauf-Netzteil

Um im Vorlauf Wärmeenergie zu speichern, wird an der Einspeisestelle Heißwasser mit einer erhöhten Vorlauftemperatur ($t^{++}_{V,E} > t^{+}_{V,E}$) ins Netz gefahren. Da die geregelten Abnehmer dann weniger Netzwasser entnehmen, verringert sich der umgewälzte Massenstrom. Um die Größenordnung abschätzen zu können, seien zwei Fälle betrachtet.

Für direkte Einspeisung ergibt sich ein Massenstromverhältnis

$$\mu_i = \frac{\dot{m}^{++}_{N,i}}{\dot{m}^{+}_{N,i}} = \frac{t^{+}_{V,N,i} - t^{+}_{R,N,i}}{t^{++}_{V,N,i} - t^{+}_{R,N,i}} = \frac{t^{+}_{V,E} - t^{+}_{R,N,i}}{t^{++}_{V,E} - t^{+}_{R,N,i}}, \qquad (1)$$

das bei einer Steigerung der Netz-Vorlauftemperatur von $t^{+}_{V,E}$ = 130 °C auf $t^{++}_{V,N}$ = 150 °C bei konstanter Rücklauftemperatur $t^{+}_{R,N,i}$ = 70 °C

$\mu_i = 0{,}75$

liefert.

Sollen Warmwasserspeicher i eingesetzt werden, ist zu bedenken, daß diese nach erfolgter Aufheizung abschalten. Es gilt

$\mu_i = 0.$

Werden beide Ergebnisse berücksichtigt, folgt, daß der mittlere Massenstrom, bezogen auf den Auslegungswert, bis auf durchschnittlich

$$\mu = \frac{\dot{m}^{++}}{\dot{m}^{+}} = 0{,}7$$

sinken kann. Damit verlängert sich auch die Transportzeit im Wärmenetz. Nach /1/ verhält sich die Zeitdifferenz umgekehrt proportional zum Massenstrom. In Auswertung der im Abnehmerbereich auftretenden Transportzeiten ergeben sich Verschiebungen von etwa 7 . . . 17 Minuten. Diese Zeitverschiebungen sind so klein, daß es für die Aufladung des Vorlaufs nicht erforderlich ist, den Defizitmassenstrom von maximal 30 Prozent durch zusätzliche Überströmeinrichtungen vom Netzvorlauf zum Netzrücklauf zu ergänzen.

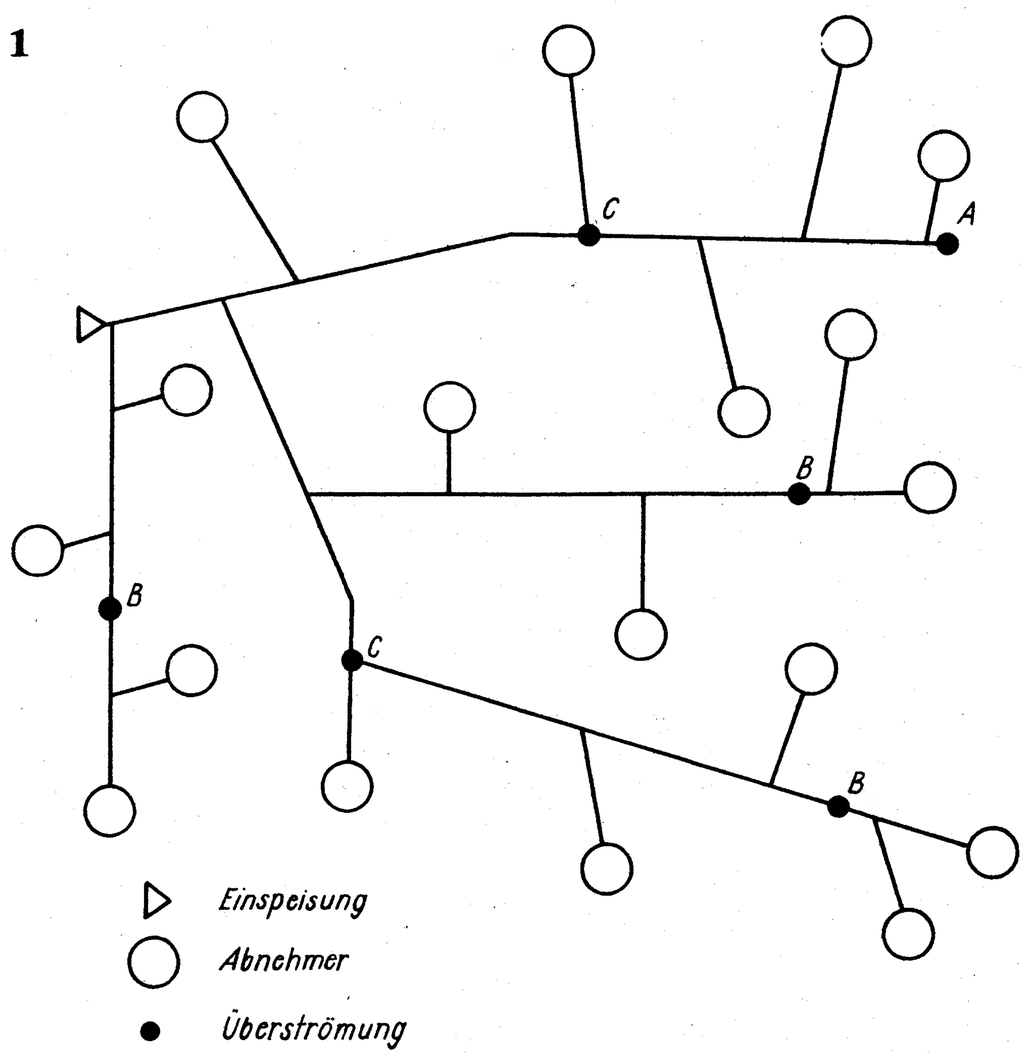
Speicherwärme

Die maximal im Netzvorlauf gespeicherte Wärmemenge berechnet sich zu

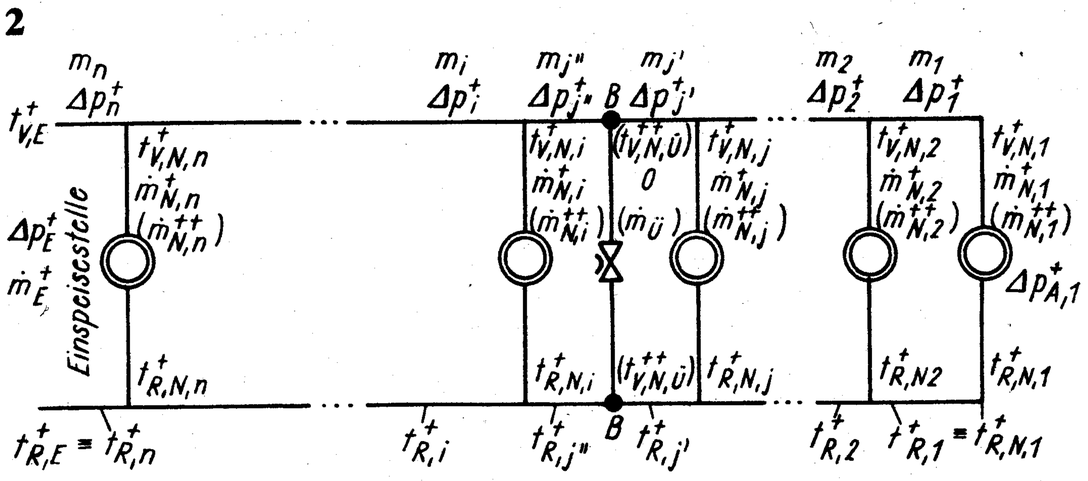
$$Q_{S,V} = c\,(t^{++}_{V,E} - t^{+}_{V,E}) \sum_{i=1}^{n} m_{V,i}\, z_i, \qquad (2)$$

wenn c die spezifische Wärmekapazität und $m_{V,i}$ die in den Vorlaufteilstrecken i gespeicherten Wassermassen darstellen. Der Faktor z_i berücksichtigt die Speicherwärme in den Wandungen der Stahlrohrleitungen. Er ist in Tabelle 1 angegeben.

1



2



2. Wärmespeicherung im Rücklauf-Netzteil

Wie in /2/ gezeigt, führt eine erhöhte Netz-Vorlauftemperatur bei geregelten Abnehmern nicht zu höheren Rücklauftemperaturen. In den meisten Fällen bleiben die Temperaturen des ins Netz zurückfließenden Wassers gleich (direkte Einspeisung mittels Beimischstation nach Variante 3) oder ergeben kleinere Werte (indirekte Einspeisung mittels Wärmeübertrager nach Variante 1). Nur bei Warmwasserspeichern (Variante 2) erhöhen sich mit steigenden Netz-Vorlauftemperaturen auch die Austrittstemperaturen geringfügig.
Um den Netzrücklauf aufzuheizen, ist es also erforderlich, Wasser aus dem Netzvorlauf direkt in die Rücklaufleitungen einzuspeisen. Mögliche Überströmeinrichtungen sind an den Netzpunkten A, B oder C vorzusehen (Bilder 1 und 2).
Bezüglich der Anordnung dieser Überströmungen und des dort transportierten Massenstroms können verschiedene Restriktionen gelten.

Massenstrombegrenzung

Der im Auslegungsfall umzuwälzende Gesamtmassenstrom $\dot{m}_E^+$ soll auch während des Aufladezustands nicht überschritten werden. Damit sind die installierten Pumpen auch für den Ladevorgang ausreichend, und die elektrische Leistung für den Pumpenbetrieb bedarf keiner Erhöhung.
Die maximale Überströmmenge berechnet sich als Differenz zwischen dem Massenstrom des Auslegungszustandes und dem Massenstrom, der sich bei erhöhter Vorlauftemperatur einstellen würde

$$\dot{m}_Ü \leqq \dot{m}_E^+ - \dot{m}_E^{++} = \dot{m}_E^+ (1 - \mu). \tag{3}$$

Weiterhin ergibt die Enthalpiebilanz des Gesamtmassenstroms bei direkter Einspeisung über Beimischstationen

$$\dot{m}_E^+ t_{R,E}^{++} = \dot{m}_Ü t_{V,E}^{++} + (\dot{m}_E^+ - \dot{m}_Ü)\, t_{R,E}^+. \tag{4}$$

Nach Substitution der Gln. (3) und (1) folgt

$$\dot{m}_E^+ t_{R,E}^{++} = \dot{m}_E^+ t_{V,E}^{++} + \dot{m}_E^+ \frac{t_{V,E}^+ - t_{R,N,i}^+}{t_{V,E}^{++} - t_{R,N,i}^+} (t_{R,E}^+ - t_{V,E}^{++}). \tag{5}$$

Unter Annahme, daß $t_{R,N,i}^+ = t_{R,E}^+$ gilt, ergibt sich die Rücklauftemperatur am Einspeisepunkt zu

$$t_{R,E}^{++} = t_{R,E}^+ + (t_{V,E}^{++} - t_{V,E}^+). \tag{6}$$

Dies bedeutet, daß die Temperatur des Rücklaufs maximal um dieselbe Differenz wie die des Vorlaufs angehoben werden kann. Das gleiche Ergebnis trifft zu, wenn von einer indirekten Einspeisung mit $t_{R,N,i}^{++} < t_{R,N,i}^+$ ausgegangen wird.

Tabelle 1

Rohr-Nennweite	z
500	1,081
400	1,089
350	1,080
300	1,087
250	1,091
200	1,105
150	1,107
125	1,114
100	1,134
80	1,143
65	1,156
50	1,195

Hydraulische Begrenzung

Um die hydraulische Netzauslegung nicht zu beeinflussen, wäre es zweckmäßig, wenn an den Abnehmern i, die infolge der erhöhten Vorlauftemperatur einen verringerten Massenstrom $\dot{m}_{N,i}^{++} < \dot{m}_{N,i}^+$ entnehmen, der entsprechende Differenzstrom zum Vollastwert $(\dot{m}_{N,i}^+ - \dot{m}_{N,i}^{++})$ überströmte. In der Summe ergäbe sich wiederum die in Gl. (3) berechnete Überströmmenge.
Üblicherweise wird sich die Überströmung auf einige Stellen beschränken, beispielsweise auf die Stelle B des im Bild 2 dargestellten Netzes. Bei Normalbetrieb ist die Überströmleitung geschlossen, während der Aufladung strömt der Massenstrom $\dot{m}_Ü$ vom Vor- zum Rücklauf.
Die hydraulische Nebenbedingung besagt, daß der Anschluß-Differenzdruck Δp_E^+ nicht überschritten werden soll. Formelmäßig bedeutet dies an Hand des genannten Bildes

$$\Delta p_E^{++} = (\Delta p_{A,1}^+ + \Delta p_1^+)\,\mu_1^2 + \Delta p_2^+ \left[\frac{\sum_{i=1}^{2} \mu_i \dot{m}_{N,i}^+}{\sum_{i=1}^{2} \dot{m}_{N,i}^+} \right]^2 + \ldots$$

$$+ \Delta p_{j'}^+ \left[\frac{\sum_{i=1}^{j} \mu_i \dot{m}_{N,i}^+}{\sum_{i=1}^{j} \dot{m}_{N,i}^+} \right]^2 + \Delta p_{j''}^+ \left[\frac{\dot{m}_Ü + \sum_{i=1}^{j} \mu_i \dot{m}_{N,i}^+}{\sum_{i=1}^{j} \dot{m}_{N,i}^+} \right]^2$$

$$+ \Delta p_i^+ \left[\frac{\dot{m}_Ü + \sum_{i=1}^{i} \mu_i \dot{m}_{N,i}^+}{\sum_{i=1}^{i} \dot{m}_{N,i}^+} \right]^2 + \ldots + \Delta p_n^+ \left[\frac{\dot{m}_Ü + \sum_{i=1}^{n} \mu_i \dot{m}_{N,1}^+}{\sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{N,i}^+} \right]^2$$

$$\leqq \Delta p_E^+, \tag{7}$$

wenn der entscheidende Abnehmer-Druckverlust durch $\Delta p_{A,1}^+$ gegeben ist.
Die im Gleichheitsfalle zulässige Überströmmenge $\dot{m}_Ü$ ist leider nicht explizit berechenbar.

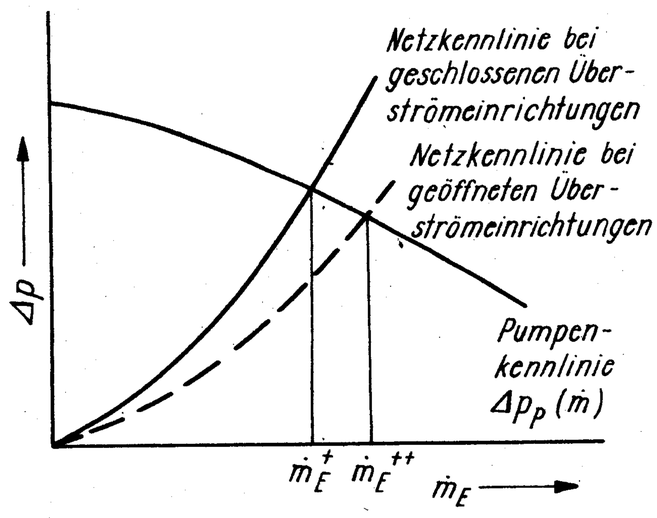
Kennlinienbegrenzung

Versorgt die Umwälzpumpe nur ein Netz, sollten die Kriterien Massenstrombegrenzung und hydraulische Begrenzung durch die von der Pumpenkennlinie gegebene Begrenzung ersetzt werden. Da die geöffneten Überströmeinrichtungen die Kennlinie des Netzes verändern, sind bei gleicher Pumpe größere Umwälzmengen $\dot{m}_E^{++} > \dot{m}_E^+$ realisierbar. Die Verhältnisse sind qualitativ im Bild 3 dargestellt. Die Antriebsleistung kann je nach Pumpenkennlinie allerdings ansteigen. Die Überströmmenge nimmt dann Werte an, die über denen der Gl. (3) liegen.

Als Berechnungsgrundlage für $\dot{m}_Ü$ dient weiterhin die Gl. (7), wobei für den Grenzwert Δp_E^+ der Pumpendruck gemäß Kennlinie $\Delta p_P\,(\dot{m})$ einzusetzen ist. In die Teilstrecke n ist der hydraulische Widerstand der Wärmelieferanlage einzurechnen.
Die Ermittlung des zulässigen $\dot{m}_Ü$ ist auch bei dieser Restriktion nur iterativ möglich.

Thermische Begrenzung

Da die Drücke in den Rücklaufleitungen vielfach unter dem zur Vorlauftemperatur gehörigen Sättigungsdruck liegen, ist die Rücklauftemperatur auf t_{Rzul} begrenzt. Liegt t_{Rzul} unter $t_{V,E}^{++}$, verbieten sich Überströmeinrichtungen am Netzende, z. B. die Verbindung A im Bild 1. An den Stellen B darf nur soviel Vorlaufwasser überströmen, bis t_{Rzul} erreicht ist. Die Temperaturermittlung folgt aus der Enthalpiebilanz. Nach Bild 2 gilt bei erhöhter Vorlauftemperatur an der Rücklaufeinbindung der Überströmleitung



3

$$\left(\dot{m}_U + \sum_{i=1}^{j} \dot{m}_{N,i}^{++}\right) t_{R,j}^{++} = \dot{m}_U t_{V,E}^{++} + \sum_{i=1}^{j} \dot{m}_{N,i}^{++} t_{R,N,i}^{++} \tag{8}$$

und mit $t_{R,j}^{++} = t_{Rzul}$ folgt:

$$\dot{m}_U \leqq \frac{\sum_{i=1}^{j} \dot{m}_i^{++} t_{R,N,i}^{++} - t_{R\,zul} \sum_{i=1}^{j} \dot{m}_{N,i}^{++}}{t_{R\,zul} - t_{V,E}^{++}}. \tag{9}$$

Für gleiche Abnehmer-Rücklauftemperaturen $t_{R,N,1}^{++} = t_{R,N,i}^{++} = t_{R,N,n}^{++} = t_{R,N}^{++}$ vereinfacht sich die Gl. (9) zu

$$\dot{m}_U \leqq \frac{t_{R,N}^{++} - t_{R\,zul}}{t_{R\,zul} - t_{V,E}^{++}} \sum_{i=1}^{j} \dot{m}_{N,i}^{++}. \tag{10}$$

Die Rücklauftemperatur an der Einspeisestelle würde unter diesen Bedingungen

$$t_{R,E}^{++} = \frac{\frac{t_{R,N}^{++} - t_{R\,zul}}{t_{R\,zul} - t_{V,E}^{++}} t_{V,E}^{++} \sum_{i=1}^{j} \dot{m}_{N,i}^{++} + t_{R,N}^{++} \sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{N,i}^{++}}{\frac{t_{R,N}^{++} - t_{R\,zul}}{t_{R\,zul} - t_{V,E}^{++}} \sum_{i=1}^{j} \dot{m}_{N,i}^{++} + \sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{N,i}^{++}} \tag{11}$$

betragen. Die Grenzwertbildung für $t_{Rzul} \rightarrow t_{V,E}^{++}$ ergibt $t_{R,E}^{++} = t_{V,E}^{++}$ und für $t_{Rzul} \rightarrow t_{R,N}^{++}$ folgt $t_{R,N}^{++} = t_{R,N}^{++}$. Beide Ergebnisse leuchten sofort ein. Wie die aufgeführten Restriktionen zeigen, hängt der zulässige Massenstrom $\dot{m}_U$ von zahlreichen Faktoren wie Einbauort, Temperatur- und Druckparameter ab. Der jeweils kleinste ermittelte Wert ist realisierbar.
Der für ein Liniennetz dargestellte Verfahrensweg kann ohne weiteres auf verzweigte Netze übertragen werden. Es ist lediglich am Netzknoten die hydraulische Abgeglichenheit durch Variation der Überströmmengen herzustellen oder bei Differenzen der Nachweis zu führen, daß die evtl. Drucküberschüsse an den betreffenden Abnehmern gedrosselt werden können. Die Mischtemperaturen sind über die Enthalpiebilanzen zu ermitteln.

Schaltungsmöglichkeiten

Im Bild 4 ist eine temperaturgeregelte Abnehmerstation dargestellt. Die Überströmung des Defizitbetrages ($\dot{m}_N^{+} - \dot{m}_N^{++}$) erfolgt mit Hilfe einer Mengenregelung, die den Gesamtmassenstrom des Abnehmers konstant hält. Damit würden die Restriktionen Massenstrombegrenzung und hydraulische Begrenzung verwirklicht (würde für das Einweg-Stellventil im Abnehmerstromkreis ein Zweiwege-Stellventil installiert, wäre damit in der Regel kein konstanter Massenstrom zu verwirklichen).
Üblicherweise werden spezielle – nicht an Abnehmer gebundene – Überströmeinrichtungen eingesetzt. Die technisch einfachste Lösung ist aus Bild 5 ersichtlich. Der zentrale Regler oder Mikroprozessor verarbeitet mehrere Meßgrößen, so daß die jeweils spezifischen Restriktionen eingehalten werden können. Im Bild sind dies beispielsweise der Differenzdruck des nachgeschalteten Netzteils, die Rücklauftemperatur und der Massenstrom. Die Regelgrößen werden markanten Netzstellen, der Einspeisestelle oder direkt dem Abnehmer entnommen. Die entsprechenden Soll-Werte können auch Funktionen von weiteren Führungsgrößen sein. Zum Beispiel ist der erforderliche Differenzdruck abhängig vom notwendigen Massendurchsatz und damit von der Vorlauftemperatur.
Strömt Vorlaufwasser bei Unterschreiten des Sättigungsdrucks in die Rücklaufleitung, sind besondere konstruktive Vorkehrungen erforderlich. Eine Variante besteht im Einleiten des Wassers hoher Temperatur über Düsen. Dabei sollte die Druckverteilung so gewählt werden, daß in den Düsenzuleitungen keine Kavitation erfolgen kann. Eine weitere – allerdings technisch sehr aufwendige – Lösung ist das Angleichen der Temperaturen in einem Wärmeübertrager, bevor die Medienströme gemischt werden.
Die Überströmeinrichtungen sind konstruktiv so auszubilden, daß die für den Betrieb erforderliche Druckdifferenz gleich der Differenz zwischen Vor- und Rücklaufdruck ist, die sich bei der rechnerischen Ermittlung, ausgehend vom Netzende, ergibt.
Die maximal im Rücklauf gespeicherte Wärmemenge berechnet sich analog Gl. (2). Dabei sind allerdings die infolge der Beimischung von Teilstrecke zu Teilstrecke unterschiedlichen Temperaturen $t_{R,i}^{++}$ zu beachten. Somit gilt

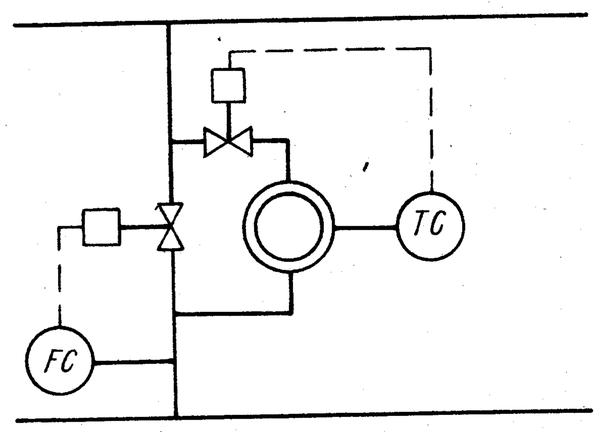
$$Q_{S,R} = c \sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{R,i}\, z_i\, (t_{R,i}^{++} - t_{R,i}^{+}). \tag{12}$$

Die Temperaturen für die Teilstrecken i, die hinter der Einbindung der Überströmeinrichtung liegen, folgen aus einer Enthalpiebilanz analog Gl. (8) zu

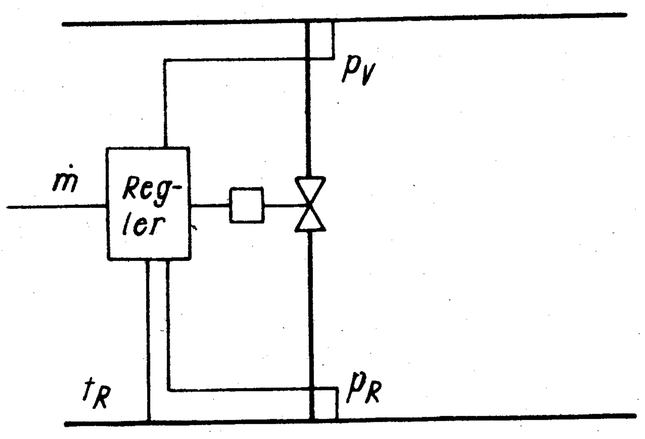
$$t_{R,i}^{++} = \frac{\dot{m}_U t_{V,E}^{++} + \sum_{i=1}^{i} \dot{m}_{N,i}^{++} t_{R,N,i}^{++}}{\dot{m}_U + \sum_{i=1}^{i} \dot{m}_{N,i}^{++}}. \tag{13}$$

3. Vereinfachte Maximierung der Speicherwärme im Rücklauf-Netzteil

Während der Netzvorlauf nach entsprechender Transportzeit bis zum letzten Abnehmer auf die höhere Netz-Vorlauftemperatur gebracht werden kann, ist eine Temperaturerhöhung im Netzrücklauf nur von einer Überströmeinrichtung bis zur Einspeisestelle hin möglich. Befindet sich die Überströmeinrichtung in der Nähe des Netzendes, dann ist der Massenstrom $\dot{m}_U$ wegen der hydraulischen und ggf. auch wegen der thermischen Begrenzung relativ gering, die Speichermasse aufgrund der langen Rücklaufleitung jedoch groß. Bei Überströmungen in der Nähe der Einspeisesstelle können große $\dot{m}_U$ realisiert werden, die aufheizbare Wassermenge ist aber verhältnismäßig klein.
Die Wahl, an welcher Stelle die Überströmeinrichtung innerhalb des Wärmenetzes anzuordnen ist, stellt ein Optimierungsproblem



4



5

dar. Eine rechnerische Lösung mit den klassischen Mitteln der Infinitesimalrechnung ist leider nicht möglich, weil die meisten Einflußgrößen nicht ohne weiteres in differenzierbare Funktionen überführbar sind. Durch Variantenvergleiche, die am zweckmäßigsten mit Hilfe eines EDV-Programms erarbeitet werden, könnte eine Lösung gefunden werden. Dagegen spricht der große Aufwand, die relativ geringe Anwendung und die Tatsache, daß die Anordnung der Überströmeinrichtung aus technischen Gründen immer nur auf bestimmte Stellen begrenzt bleibt.
Im folgenden wird ein numerisches Verfahren für die Ermittlung der maximalen Speicherwärme vorgestellt, das unter gewissen Randbedingungen anwendbar ist. Zuerst wird aus didaktischen Gründen ein Liniennetz, im weiteren dann ein verzweigtes Netz betrachtet.

3.1. Liniennetz mit einer Überströmung

Für direkt angeschlossene Beimischstationen, deren Netz-Rücklauftemperatur immer konstant und für alle Abnehmer gleich ist ($t^{++}_{R,N,1} = t^{++}_{R,N,n} = t^{+}_{R,N,1} = \ldots = t^{+}_{R,N,n}$), gilt, daß auch alle Teilstreckentemperaturen des Netzrücklaufs ($t^{+}_{R,1} = \ldots = t^{+}_{R,n}$) und die Rücklauftemperatur an der Einspeisestelle $t^{+}_{R,E}$ diesem Wert entsprechen. Damit ist auch das Massenstromverhältnis nach Gl. (1) für alle Abnehmer bei erhöhter Vorlauftemperatur gleich

$(\mu_1 = \ldots = \mu_n = \mu)$.

Aufgrund dieser Tatsache ergibt sich die in der Teilstrecke i des Netzrücklaufs speicherbare Wärmemenge zu

$$Q_{S,R,i} = m_{R,i} z_i c\,(t^{++}_{R,i} - t^{+}_{R,i})$$

$$= m_{R,i} z_i c \left[\frac{t^{++}_{V,E}\dot{m}_U + t^{+}_{R,E}\mu \sum_{i=1}^{i} \dot{m}^{+}_{N,i}}{\dot{m}_U + \mu \sum_{i=1}^{i} \dot{m}^{+}_{N,i}} - t^{+}_{R,E} \right] \tag{14}$$

Die Zuordnung der Größen sowie die Numerierung entsprechen den Angaben im Bild 2.
Für Teilstrecken i, die zwischen 1 und j liegen, gilt $\dot{m}_U = 0$, woraus sofort $Q_{S,R,i} = 0$ folgt. Das heißt, Gl. (14) ist formal auf alle Teilstrecken anwendbar. Die Umformung ergibt die einfachere Form

$$Q_{S,R,i} = m_{R,i} z_i c \frac{\dot{m}_U}{\dot{m}_U + \mu \sum_{i=1}^{i} \dot{m}^{+}_{N,i}} (t^{++}_{V,E} - t^{+}_{R,E}). \tag{15}$$

Während die Wassermasse in der jeweiligen Teilstrecke $m_{R,i}$ und die Temperaturdifferenz ($t^{++}_{V,E} - t^{+}_{R,E}$) vorgegebene Größen sind, kann die relative Überströmmenge

$$\xi_i = \frac{\dot{m}_U}{\dot{m}_U + \mu \sum_{i=1}^{i} \dot{m}^{+}_{N,i}} \tag{16}$$

in Abhängigkeit der Lage der Überströmeinrichtung (Teilstrecke j) variiert werden. Mit steigendem i wächst die Summe des Massenstroms $\sum_{i=1}^{i} \dot{m}^{+}_{N,i}$, wodurch das relative Massenstromverhältnis sinkt.
Ist der Wert ξ_i bekannt, so kann relativ einfach auf

$$\xi_{i+1} = \frac{\xi_i}{1 + (1 - \xi_i) \dfrac{\dot{m}^{+}_{N,i+1}}{\sum_{i=1}^{i} \dot{m}^{+}_{N,i}}} < \xi_i \tag{17}$$

geschlossen werden. Selbstverständlich gelten auch die zuvor fixierten Restriktionen, die lediglich auf den Parameter ξ umzurechnen sind.

Massenstrombegrenzung

Soll der Gesamtmassenstrom $\dot{m}^{+}_{E}$ an der Einspeisestelle nicht überschritten werden, entspricht dies, ausgehend von Gl. (3), der Beziehung

$$\xi_n = \frac{\dot{m}_U}{\dot{m}_U + \mu \sum_{i=1}^{n} \dot{m}^{+}_{N,i}} \leqq \frac{\dot{m}^{+}_{E}(1-\mu)}{\dot{m}^{+}_{E}(1-\mu) + \mu \dot{m}^{+}_{E}} = 1 - \mu. \tag{18}$$

Hydraulische Begrenzung

Die Randbedingung Gl. (7), die den Differenzdruck an der Einspeisestelle auf den Auslegungswert begrenzt ($\Delta p^{++}_{E} = \Delta p^{+}_{E}$), wird modifiziert dargestellt. Dabei ist die Überströmleitung im Bild 2 nicht innerhalb der Teilstrecke j, sondern direkt ab Abnehmer j angeordnet. Es gilt nach einigen Umrechnungen

$$\Delta p^{++}_{E} = \mu^2 \left[\Delta p^{+}_{A,1} + \sum_{i=1}^{j} \Delta p^{+}_{i} + \sum_{i=j}^{n} \Delta p^{+}_{i} \frac{1}{(1-\xi_i)^2} \right] \leqq \Delta p^{+}_{E}. \tag{19}$$

Ausgehend von $\xi_{i=j}$ an der Überströmstelle, sind schrittweise die Werte ξ_{i+1} usw. nach Gl. (17) zu berechnen. Die richtige Lösung für ξ_i kann nur durch wiederholende Annahmen ermittelt werden.

Kennlinienbegrenzung

Es gelten weiterhin die früheren Aussagen. Zur Berechnung der Rohrnetzkennlinie dient Gl. (19).

Thermische Begrenzung

Unter den hier vorliegenden Bedingungen kann Gl. (10)

$$\dot{m}_U \leqq \frac{t^{+}_{R,E} - t_{R\,zul}}{t_{R\,zul} - t^{++}_{V,E}} \mu \sum_{i=1}^{j} \dot{m}^{+}_{N,i} \tag{20}$$

geschrieben werden. Nach kurzer Zwischenrechnung folgt für die relative Überströmmenge an der Stelle j

$$\xi_j \leqq \frac{t_{R\,zul} - t^{+}_{R,E}}{t^{++}_{V,E} - t^{+}_{R,E}}. \tag{21}$$

Dieser Grenzwert gilt unabhängig von der Lage der Überströmstelle im Netz.

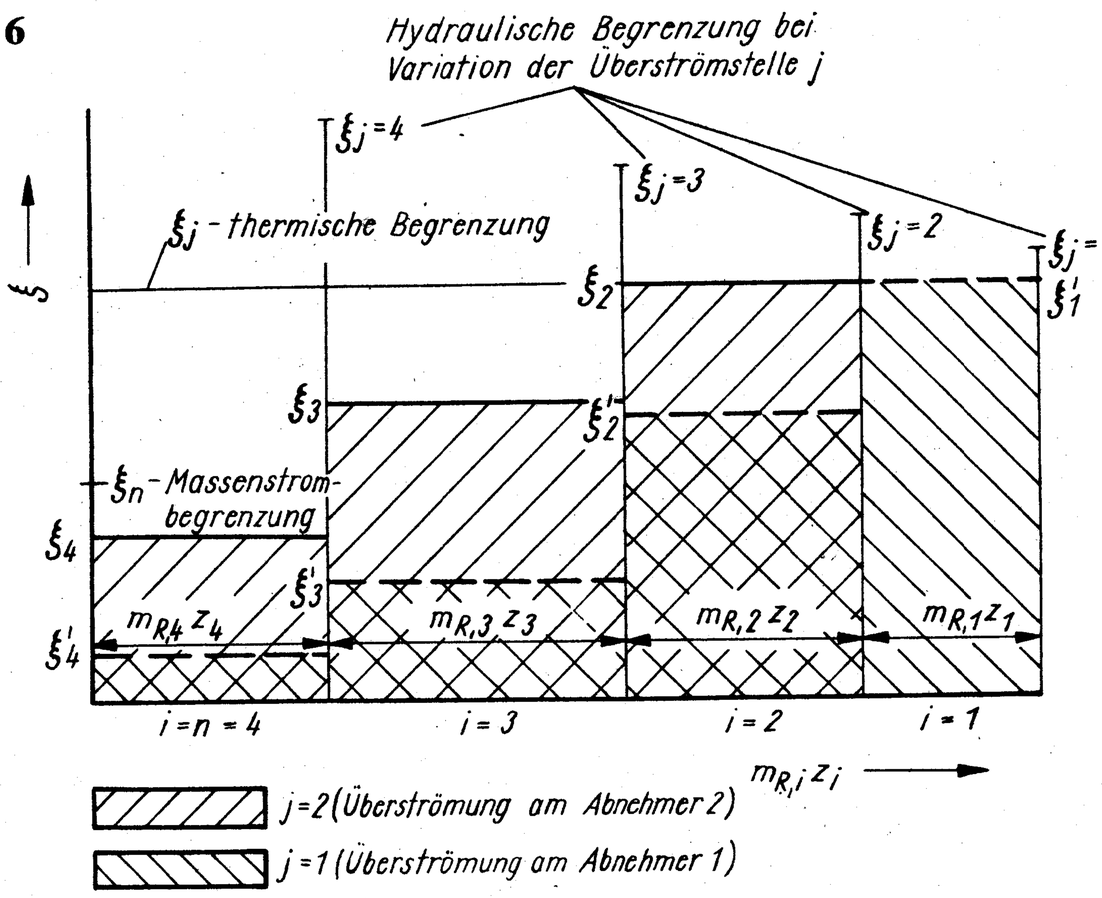
Speicherwärme

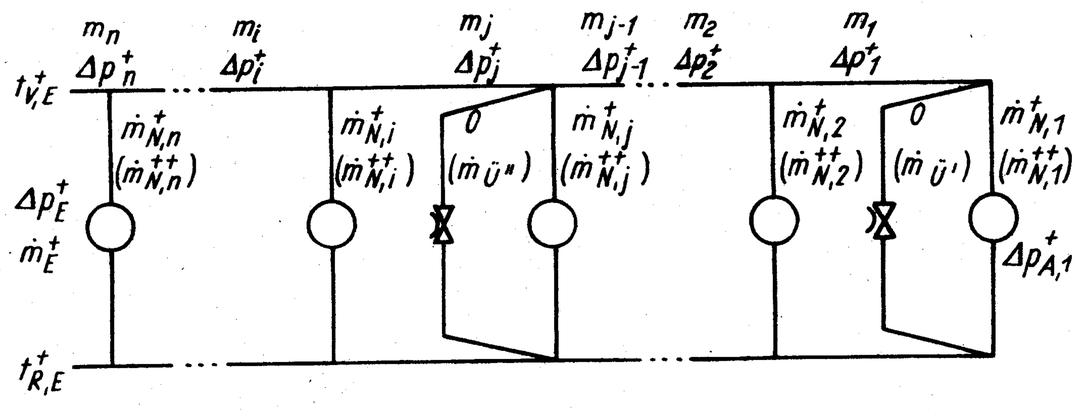
Ausgehend von Gl. (15) und der Definitionsgleichung (16), ergibt sich die im Rücklauf gespeicherte Wärmemenge zu

$$Q_{S,R} = c\,(t^{++}_{V,E} - t^{+}_{R,E}) \sum_{i=1}^{n} m_{R,i} z_i \xi_i. \tag{22}$$

In den Teilstrecken vor der Überströmstelle $i = 1 \ldots (j-1)$ ist $\xi_i = 0$, so daß physikalisch richtig die entsprechenden Summanden entfallen.
Der Summenausdruck kann grafisch veranschaulicht werden. So sind im Bild 6 auf der Abszisse die Teilstrecken-Werte ($m_{R,i} z_i$) und auf der Ordinate die ebenfalls teilstreckenbezogenen relativen

6





7

Überströmmengen ξ_i aufgetragen. Die Fläche unter der Treppenkurve ist der gespeicherten Wärme direkt proportional. Es steht somit die Aufgabe, diesen Flächeninhalt zu maximieren. Während die Abszissenwerte nur vom vorgegebenen Rohrdurchmesser abhängig sind, d. h. festliegen, können die Ordinatenwerte variiert werden. Ausgangspunkt ist dabei der erste Wert hinter der Vorlauf-Überströmung ξ_j, der aufgrund Gl. (17) alle weiteren Werte ξ_i beeinflußt. Weiterhin ist zu beachten, daß ξ_j und ξ_n infolge der Randbedingungen begrenzt sein können. Im Bild 6 sind zwei Beispiele mit typischen Restriktionen wiedergegeben. Die Merkmale sind:

- Die thermische Begrenzung ist der entscheidende Oberwert, sowohl bei einer Überströmung am Abnehmer 1 als auch am Abnehmer 2.
- Ausgehend von der Überströmung am Abnehmer 2 mit ξ_2, folgen ξ_3 und ξ_4 als Ordinatenwerte.
  Liegt die Überströmung beim Abnehmer 1, so ergeben sich
  ξ'_1, ξ'_2, ξ'_3 und ξ'_4.
- Für beide Varianten gilt: $\xi_4 < \xi_n$, $\xi'_4 < \xi_n$.
- Bei der Überströmung am Abnehmer 2 ist eine größere Wärmespeicherung als bei der Anordnung am Abnehmer 1 möglich:

$$\sum_{i=2}^{4} (m_{R,i} z_i)\, \xi_i > \sum_{i=1}^{4} (m_{R,i} z_i)\, \xi'_i .$$

3.2. *Verzweigte Netze mit mehreren Überströmungen*

Die bisher zugrunde gelegten Netze entsprechend Bild 2 stellen Sonderformen dar, die nur selten mit so einfacher Geometrie in der Praxis vorkommen. In der Regel ist von verzweigten Netzen – wie im Bild 1 dargestellt – auszugehen. Um die technischen und rechnerischen Aufwendungen in Grenzen zu halten, werden folgende Prämissen empfohlen:

- Die Überströmeinrichtungen sollten an Netzknoten angeordnet werden, da dort die Vor- und Rücklaufleitungen größere Durchmesser aufweisen als bei einem Abnehmer. Weiterhin sind an diesen Stellen in der Regel begehbare Bauwerke vorhanden (vgl. Bild 1, Punkt C).
- Die angeschlossenen Netzteile sollten, wenn keine Überströmeinrichtungen vorhanden sind, als ein Abnehmer betrachtet werden. Dadurch vereinfacht sich die Berechnung beträchtlich.
- Die Überströmstellen sind so festzulegen, daß bei minimaler Anzahl eine möglichst große Wärmemenge gespeichert werden kann.
- Die Randbedingungen sind auf ihren Geltungsbereich genau zu prüfen, beispielsweise ob eine Temperaturbegrenzung für das gesamte Netz gilt oder nur für höherliegende Netzabschnitte anzusetzen ist.
  Weiterhin sollte für Netze in der Regel die Kennlinienbegrenzung angenommen werden.

Nach Beachten der vorgenannten Empfehlungen entstehen Netze der in den Bildern 7 und 8 dargestellten Form.
Es mögen auch weiterhin die Vereinfachungen ($t_{R,N,i}^{++} = t_{R,N,i}^{+} = t_{R,i}^{+} = t_{R,E}^{+}$) und ($\mu_i = \mu$) für alle Abnehmer bzw. Teilstrecken gelten.
Die erste Variante zeigt ein Liniennetz mit zwei Überströmungen – zugeordnet zu den Abnehmern 1 und j. Für die Berechnung der relativen Überströmmenge ξ_i gilt weiterhin die Definitionsgleichung (16). Es ist zu beachten, daß im Bereich $i = 1 \ldots (j-1)$ $\dot m_Ü = \dot m_{Ü'}$ und im Bereich $i = j \ldots n$ $\dot m_Ü = \dot m_{Ü'} + \dot m_{Ü''}$ eingesetzt werden müssen. Für den Schluß von ξ_i auf ξ_{i+1} ist Gl. (17) zu verwenden, ausgenommen der Übergang von $(j-1)$ auf j. Ausgehend von

$$\xi_{j-1} = \frac{\dot m_{Ü'}}{\dot m_{Ü'} + \mu \sum\limits_{i=1}^{j-1} \dot m_{N,i}^{+}} \tag{23}$$

und

$$\xi_j = \frac{\dot m_{Ü'} + \dot m_{Ü''}}{\dot m_{Ü'} + \dot m_{Ü''} + \mu \sum\limits_{i=1}^{j-1} \dot m_{N,i}^{+} + \mu \dot m_{N,j}^{+}}, \tag{24}$$

folgt nach Einführung der Abkürzung

$$\alpha = \frac{\dot m_{Ü''}}{\dot m_{Ü'}} \tag{25}$$

$$\xi_j = \frac{\xi_{j-1}(\alpha + 1)}{\alpha \xi_{j-1} + 1 + (1 - \xi_{j-1}) \dfrac{\dot m_{N,j}^{+}}{\sum\limits_{i=1}^{j-1} \dot m_{N,i}^{+}}} . \tag{26}$$

Für $\alpha = 0$, d. h. bei Weglassen der Überströmung am Abnehmer j, geht diese Beziehung in die bekannte Gl. (17) über.
Solange die Randbedingungen nicht verletzt werden, ist der Quotient α frei wählbar.
Die im Bild 8 dargestellte Variante zeigt ein verzweigtes Netz mit zwei Überströmungen, wobei am Netzknoten kein Abnehmer vorhanden ist.
Für die Berechnung der Nebennetze $i' = 1' \ldots n'$ und $i'' = 1'' \ldots n''$ gelten die Gln. (16) und (17) in vollem Umfang, auch für das Hauptnetz $i = 1 \ldots n$ unter Beachtung von $\dot m_Ü = \dot m_{Ü'} + \dot m_{Ü''}$. Der Wert ξ_1 folgt aus der Definitionsgleichung

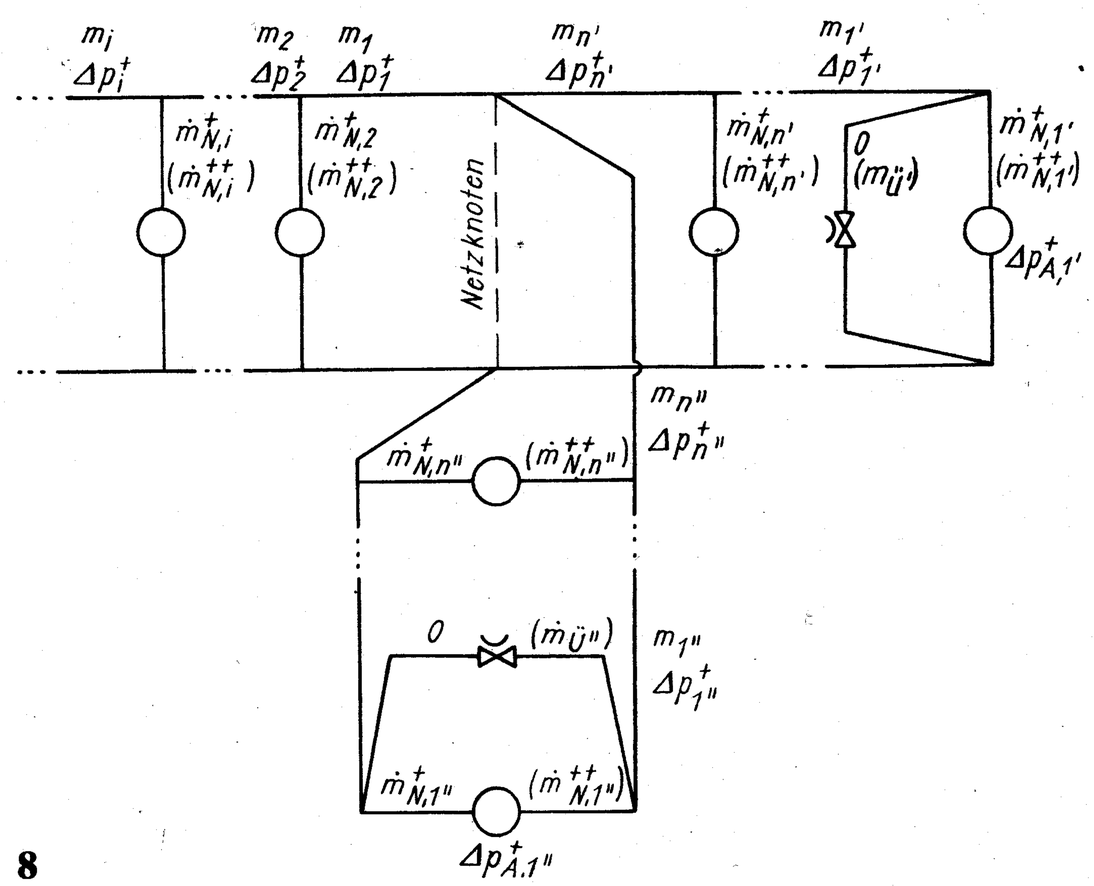
$$\xi_1 = \frac{\dot m_{Ü'} + \dot m_{Ü''}}{\dot m_{Ü'} + \mu \sum\limits_{i'=1}^{n'} \dot m_{N,i'}^{+} + \dot m_{Ü''} + \mu \sum\limits_{i''=1}^{n''} \dot m_{N,i''}^{+}} \tag{27}$$

und den bekannten Werten

$$\xi_{n'} = \frac{\dot m_{Ü'}}{\dot m_{Ü'} + \mu \sum\limits_{i'=1}^{n'} \dot m_{N,1'}^{+}}, \qquad \xi_{n''} = \frac{\dot m_{Ü''}}{\dot m_{Ü''} + \mu \sum\limits_{i''=1}^{n''} \dot m_{N,i''}^{+}} \tag{28}$$

zu

$$\xi_1 = \frac{\xi_{n'} \dfrac{\sum\limits_{i'=1}^{n'} \dot m_{N,i'}^{+}}{1 - \xi_{n'}} + \xi_{n''} \dfrac{\sum\limits_{i''=1}^{n''} \dot m_{N,i''}^{+}}{1 - \xi_{n''}}}{\dfrac{\sum\limits_{i'=1}^{n'} \dot m_{N,i'}^{+}}{1 - \xi_{n'}} + \dfrac{\sum\limits_{i''=1}^{n''} \dot m_{N,i''}^{+}}{1 - \xi_{n''}}} . \tag{29}$$



8

Die Darstellung der Restriktionen kann genau wie bei den einfachen Liniennetzen vorgenommen werden. Die Wahl der Überströmmengen $\dot{m}_{Ü'}$ und $\dot{m}_{Ü''}$ bzw. deren Relativwerte $\xi_{1'}$ und $\xi_{1''}$ sollte so erfolgen, daß am Netzknoten die Differenzdrücke der beiden Netzzweige gleich sind. Ist dies nicht realisierbar, ist nachzuweisen, daß die überschüssigen Differenzdrücke an den in Frage kommenden Abnehmern abgebaut werden können.
Die Berechnung der Speicherwärme ist in allen Fällen mit Hilfe der Gl. (22) vorzunehmen.
Ausführliche Beispiele folgen in einer weiteren Veröffentlichung.

Literatur

/1/ *Glück, B.:* Pauschale Ermittlung der Temperaturveränderungen in Wärmenetzen.
„Stadt- und Gebäudetechnik", **35** (1981) H. 8, S. 245 bis 249

/2/ *Glück, B.:* Wärmespeicherung in Wärmenetzen des Abnehmerbereichs (I).
„Stadt- und Gebäudetechnik", **36** (1982), Heft 5, S. 130 bis 135
Heft 6, S. 172 bis 174