

Wärmespeicherung in Fernwärme-Heißwassernetzen

Von Bernd Glück, Leipzig*)

DK 061.3:697.34

Im Leitungssystem von Fernwärmenetzen ist eine Wärmespeicherung sowohl im Vor- als auch im Rücklauf möglich. Im ersten Fall kann dies durch Erhöhung der Vorlauf-Eintrittstemperatur vorgenommen werden. Im zweiten Fall sind Überströmeinrichtungen vom Vor- zum Rücklauf anzuordnen. Die Lage dieser Überströmungen ist ein Optimierungsproblem. Der Verfasser zeigt in Beispielen die Anwendung der theoretischen Zusammenhänge.

Summary of the report:

Heat storage in district heating warm water systems

The purpose of storing heat in district heating networks is to offset the duration of peak loads and consequently to reduce the investment needed for heat supply. This is technically feasible when, apart from peak periods, the network outgoing or return temperatures, or both, are maintained at a level higher than operationally necessary. This free energy (Enthalpie) increase can be utilized during maximum heat extraction. Further, a temporary undercooling of the return flow below the operating temperature is possible. Naturally to put these operational processes into practice several technical conditions must be fulfilled.

Fig. 1 shows a typical heating network in branched form. It is used to supply housing areas with district heat. Fig. 2, showing a simplified network, respectively a network section, serves to define the individual dimensions.

The values marked "+" represent the design specifications and those marked "++" apply during network charging with increased outgoing temperature, whereby it is accepted that the network is in a near to stationary condition. The symbols are as follows:

$t_{V,E}$	outgoing temperature at feed-in point
$t_{V,N,i}$	outgoing temperature at consumer i
$t_{R,E}$	return temperature at feed-in point
$t_{R,N,i}$	return temperature at consumer i
$t_{R,i}$	return temperature in section i
Δp_E	differential pressure at feed-in point (if necessary incl. heat supply source)
$\Delta p_{A,i}$	differential pressure at consumer i
Δp_i	differential pressure in section i of the distribution pipeline (outflow and return)
$\dot{m}_E$	mass flow at feed-in point
$\dot{m}_{N,i}$	mass flow through consumer i
$\dot{m}_U$	mass flow through overflow appliance (for design purposes $\dot{m}_U = 0$ is permanently valid)
m_i	water mass in section i (outflow and return) $m_i = m_{V,i} + m_{R,i}$
c	specific heat capacity
z_i	factor taking into account the heat storage capacity of the pipeline.

When investigating network storage it is not necessary to consider the temperature drop in the distribution pipelines. Therefore $t_{V,E} = t_{V,N,i}$ applies throughout. The return temperature at the feed-in point $t_{R,E}$ results from the free energy (Enthalpie) balance at all consumer exit conditions. When all $t_{R,N,i}$ are identical ($t_{R,N,1} = t_{R,N,2} = t_{R,N,i} = t_{R,N,n}$), then $t_{R,E}$ also corresponds to this value.

Heat storage in outflow

To store thermic energy in the outflow an increased outgoing temperature ($t_{V,E}^{++} > t_{V,E}^{+}$) must be introduced into the network at feed-in point. With direct feed-in to the building facilities the mass flow is reduced according to Gl. (1).

The maximum amount of the stored in the outflow is calculated according to Gl. (2).

Heat storage in return flow

With the majority of consumers an increased outgoing network temperature does not result in a higher return temperature. Therefore to heat up the

return system it is necessary to feed water directly from the outflow pipe into the return. Possible overflow appliances are shown at the network points A, B or C in Fig. 1 and 2.

Various restrictions may apply to the arrangement of these overflows in relation to the transported mass at these points.

Mass flow limitation

The total mass flow $\dot{m}_E^{+}$ designed for circulation should not be exceeded during charging. Gl. (3) applies for the overflow volume and for the return temperature at feed-in point Gl. (4) is valid.

Hydraulic limitation

If the hydraulic state of the network is to remain unaffected at each consumer i the differential volume ($\dot{m}_{N,i}^{+} - \dot{m}_{N,i}^{++}$) must overflow. In reality, however, the overflow is limited to several network joints (e.g. point B in Fig. 1). The hydraulic accessory factor limits the connected differential pressure to the designed value Δp_E^{+} (Gl. (7)).

Nominal curve limitation

When the circulation pump supplies only one network the two factors "massflow limitation" and "hydraulic limitation" should be replaced by the limitation resulting from the nominal pump curve. Due to the fact that the open overflow appliances alter the nominal curve of the network greater circulation volumes $\dot{m}_E^{++} > \dot{m}_E^{+}$ can be achieved with the same pump (compare Fig. 3).

The calculation basis for $\dot{m}_U$ remains Gl. (7) whereby the pump pressure according to nominal curve $\Delta p_p(\dot{m})$ is to be used for the border value Δp_E^{+} .

Thermal limitation

Because the pressures in the return pipeline are frequently below the saturation pressure relating to the outgoing temperature, the return temperature is limited to $t_{R,zul}$. At points B only that amount of water may overflow until $t_{R,zul}$ is reached. The temperature is determined from the free energy (Enthalpie) balance (Gl. (11)).

The stored heat is sectionally calculated according to Gl. (12) and added. The procedure described for a linear network can be equally applied to a branched network. Only at network junctions must the hydraulic balance be adjusted by varying the overflow volumes.

Maximizing the stored heat

The position of the overflow appliances within the heat network poses an optimization problem. A simplified solution is given. On the basis of the mass flow ratio μ (Gl. (1)) and the relative overflow volume ξ (Gl. (16)) the restrictions in Gl. (18) to (21) are given. The heat stored in the return flow is then calculated as Gl. (22). For networks with multiple overflows and branched networks the relative overflows amounts according to Gl. (26) and (29) at the characteristic points must be determined. The stored heat is likewise determined according to Gl. (22).

Practical calculations have shown that, with suitable positioning of the overflow appliances, the same amount of heat can be stored in the return flow as in the outflow.

*) Dr. sc. techn., Dr.-Ing. B. Glück ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut des VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung Leipzig/DDR.

Allgemeines

Die Wärmespeicherung in Fernwärmenetzen hat das Ziel, den zeitlichen Verlauf der Wärmehöchstleistung zu glätten und dadurch den Investitionsaufwand für die Bereitstellung von Wärme zu senken. Dies ist technisch möglich, wenn außerhalb der Spitzenbelastung die Temperaturen des Netzvorlaufs, des Netzurücklaufs oder beide über den für den stationären Betriebsfall üblichen bzw. erforderlichen Wert angehoben werden. Diese Enthalpieerhöhung des Netzwassers kann dann bei maximaler Wärmeentnahme genutzt werden. Bei speziellen Abnehmerschaltungen ist außerdem eine Unterkühlung des Rücklaufs unter die normale Betriebstemperatur möglich.

Um die Betriebsabläufe praktizieren zu können, sind einige technische Voraussetzungen beim Wärmelieferer, beim Abnehmer und vor allem im Netz selbst erforderlich. Die mögliche Vielfalt der Schaltungen soll allerdings von vornherein durch die Festlegung, daß keine merkliche Erhöhung der Investitionskosten auftreten darf, eingeschränkt werden. Somit sind beispielsweise Vergrößerungen der Rohrdurchmesser des Wärmenetzes, der Einsatz größerer Umwälzpumpen und anderes mehr ausgeschlossen. Zusätzlich existieren noch einige technische Restriktionen, die den Lösungsbereich weiter einengen.

Während die bisher bekanntgewordenen Untersuchungen sich auf große Fernwärmenetze oder Transitzuführungsleitungen bezogen, schließen die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen den Verbraucherbereich – z. B. die Fernwärmenetze in Wohnungsbaugebieten – mit ein. Die gerade für diese Bereiche beispielhaften Betrachtungen lassen Spitzenlastsenkungen von 5 bis 8 % erwarten. Bei Einbeziehung des Rücklauf-Netzteils in den Speicherbetrieb können sogar bis 12 % erreicht werden.

Ein typisches Fernwärmenetz in Verästelungsform ist in *Bild 1* wiedergegeben. Die eingetragenen Überströmeinrichtungen, auf die noch ausführlich eingegangen wird, sind zur Rücklaufspeicherung erforderlich.

Zur Definition der einzelnen Größen dient das in *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	°C
$t_{V,N,i}$	Vorlauftemperatur des Netzes am Abnehmer i	°C
$t_{R,E}$	Rücklauftemperatur am Einspeisepunkt	°C
$t_{R,N,i}$	Rücklauftemperatur des Netzes am Abnehmer i	°C

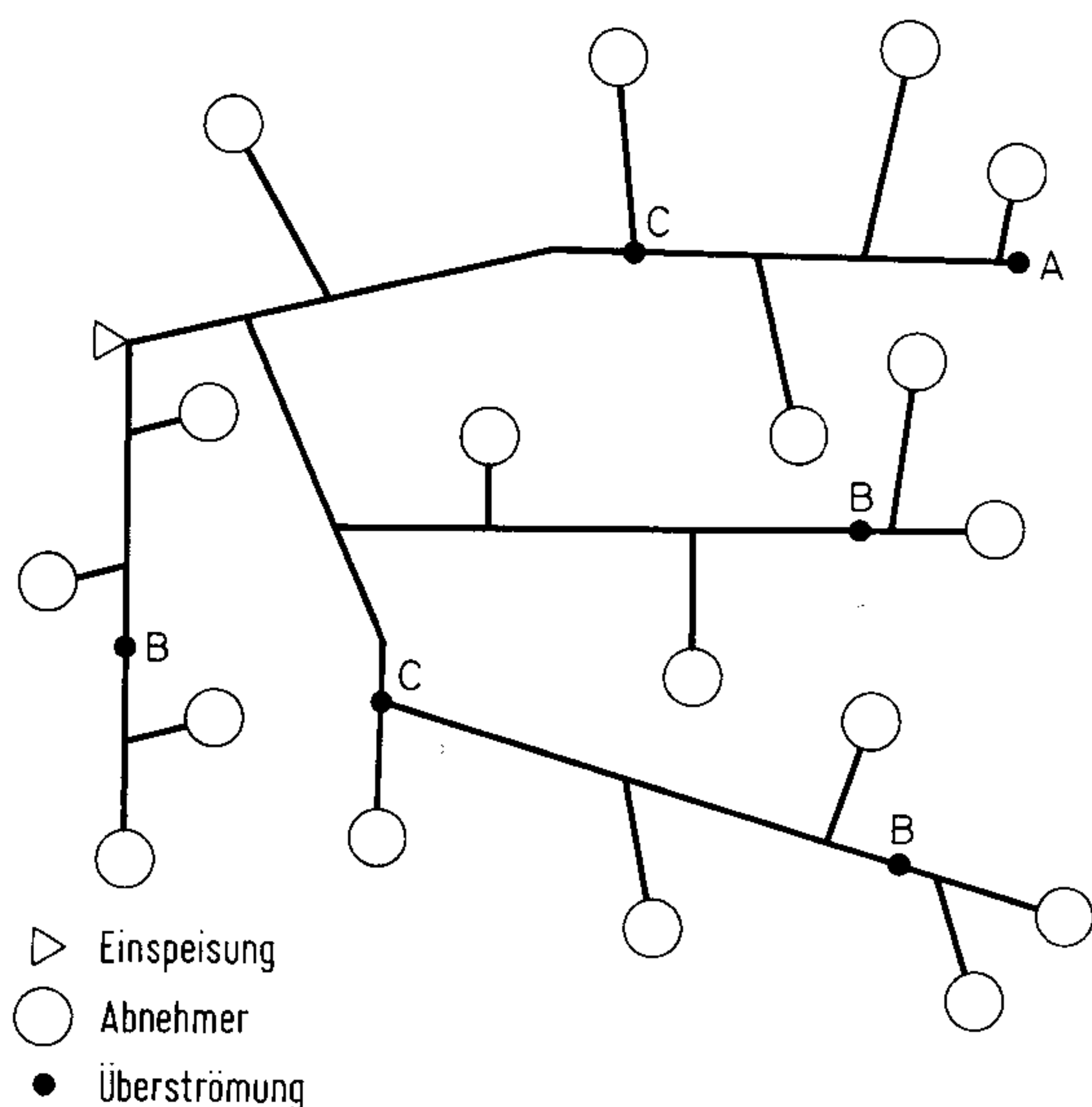


Bild 1. Fernwärmenetz in Verästelungsform mit einer Einspeisung und mehreren Überströmungen vom Vor- zum Rücklauf

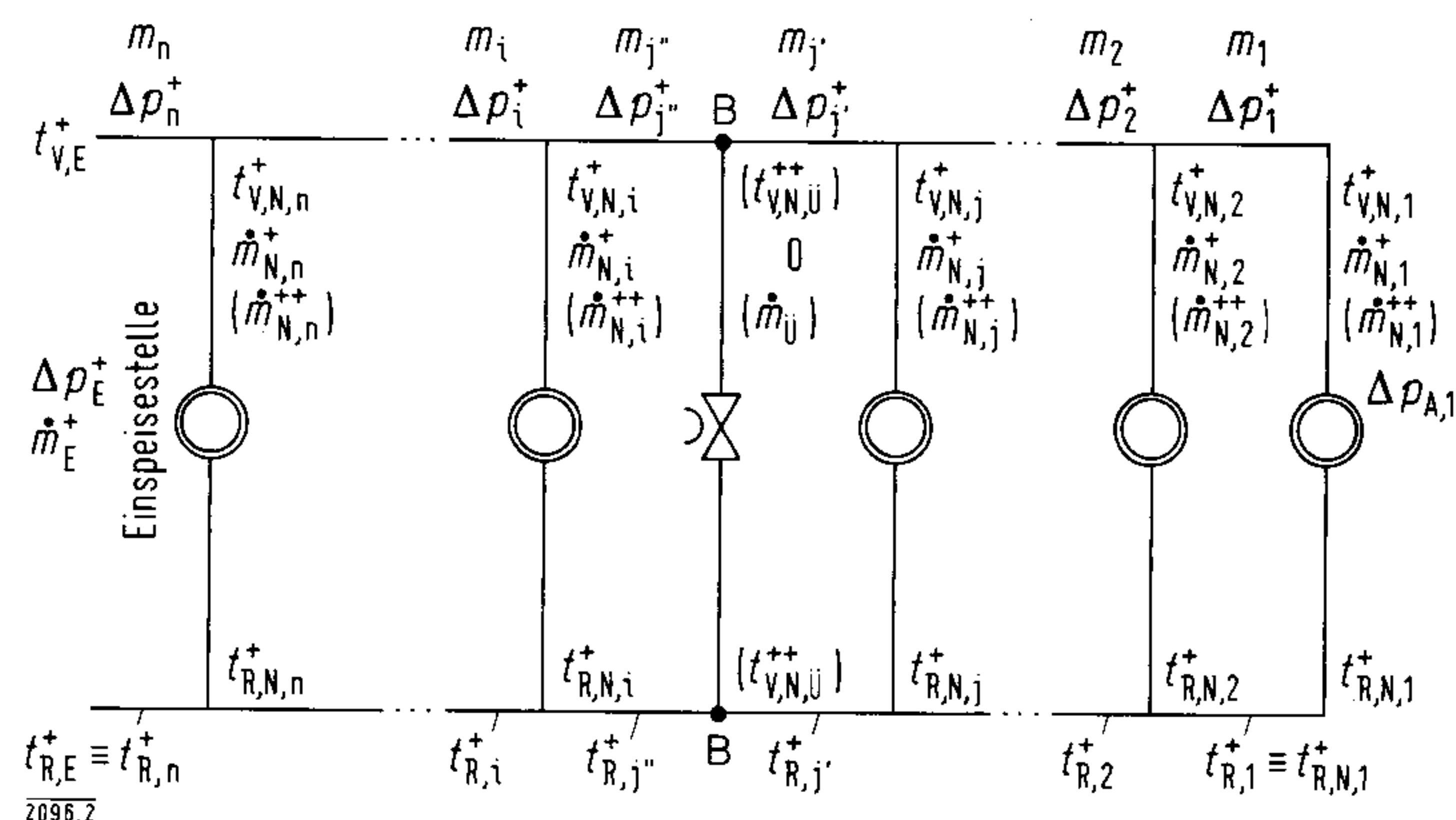


Bild 2. Einfaches Fernwärmenetz bzw. Teil eines Netzes mit einer Überströmung und Zusammenstellung der charakteristischen Netzgrößen (Die Betriebswerte bei erhöhter Vorlauftemperatur sind analog der Abnehmer-Masseströme mit dem Zeiger ++ zu verstehen.)

$t_{R,i}$	Rücklauftemperatur in der Teilstrecke i	°C
Δp_E	Differenzdruck am Einspeisepunkt (eventuell einschließlich des Wärmebereitstellers)	kPa
$\Delta p_{A,i}$	Differenzdruck am Abnehmer i	kPa
Δp_i	Differenzdruck in der Teilstrecke i der Verteilungsleitung (Vor- und Rücklaufleitung)	kPa
$\dot{m}_E$	Massestrom am Einspeisepunkt	kg/s
$\dot{m}_{N,i}$	Massestrom, der vom Abnehmer i aus dem Netz entnommen wird	kg/s
$\dot{m}_U$	Massestrom durch die Überströmeinrichtung (im Auslegungsfall gilt stets $\dot{m}_U = 0$)	kg/s
m_i	Wassermasse in der Teilstrecke i (Vor- und Rücklauf); $m_i = m_{V,i} + m_{R,i}$	kg
z_i	Faktor, der die Wärmespeicherkapazität der Rohrleitung einbezieht.	

Bei den Untersuchungen zur Netzspeicherung ist es in erster Näherung 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.

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 Massestrom. Um die Größenordnung abschätzen zu können, seien zwei Fälle betrachtet.

Für direkte Einspeisung ergibt sich bei konstanter Abnehmer-Wärmeleistung ein Massestromverhältnis

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

das beispielsweise bei einer Steigerung der Netz-Vorlauftemperatur von $t_{V,E}^+ = 130^\circ\text{C}$ auf $t_{V,N}^+ = 150^\circ\text{C}$ bei konstanter Rücklauftemperatur $t_{R,N,i}^+ = 70^\circ\text{C}$

$$\mu_i = 0,75$$

liefert.

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

$$\mu_i = 0.$$

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

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

sinken kann. Damit verlängert sich natürlich die Transportzeit im Wärmenetz. Diese Zeitverschiebungen (in der Größenordnung von 15 Minuten) sind so klein, daß es für die Aufladung des Vorlauf-Netzteils nicht erforderlich ist, den Defizitmassestrom von maximal 30 % durch zusätzliche Überströmeinrichtungen vom Netzvorlauf zum Netzzrücklauf zu ergänzen.

Speicherwärme

Die maximal im Netzvorlauf gespeicherte Wärmemenge berechnet sich zu

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

wenn c die spezifische Wärmekapazität und $m_{V,i}$ die in den Vorlauf-teilstrecken i gespeicherten Wassermassen darstellen. Der Faktor z_i berücksichtigt die Speicherwärme in den Wandungen der Stahlrohr-leitungen. Er ist in *Tafel 1* angegeben.

Tafel 1. Faktoren $z = [1 + (c m)_{\text{Stahl}} / (c m)_{\text{W}}]$

Rohr- Nenndurchmesser	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

Wärmespeicherung im Rücklauf-Netzteil

Eine erhöhte Vorlauftemperatur im Fernwärmenetz führt in der Regel nicht zu höheren Rücklauftemperaturen. Die Spezifika der Abnehmer werden in einem späteren Aufsatz untersucht.

In den meisten Fällen bleiben die Temperaturen des ins Netz zurückfließenden Wassers gleich (direkte Einspeisung mit Bei-mischstation) oder ergeben kleinere Werte (indirekte Einspeisung mit Wärmeübertrager). Nur bei Warmwasserspeichern erhöhen sich mit steigenden Netz-Vorlauftemperaturen auch die Austrittstempe-raturen geringfügig.

Um den Netzzrücklauf aufzuheizen, ist es also erforderlich, Was-ser aus dem Netzvorlauf direkt in die Rücklaufleitungen einzuspei-sen. Mögliche Überströmeinrichtungen sind an den Netzknoten A, B oder C vorzusehen (*Bild 1* und *2*).

Bezüglich der Anordnung dieser Überströmungen und des dort transportierten Massestroms können verschiedene Restriktionen gelten.

Massenstrombegrenzung

Der im Auslegungsfall umzuwälzende Gesamtmassestrom $\dot{m}_E^+$ soll auch während des Aufladezustands nicht überschritten werden. Damit sind die installierten Pumpen auch für den Ladevorgang aus-reichend, und die elektrische Leistung für den Pumpenbetrieb be-darf keiner Erhöhung.

Die maximale Überströmmenge berechnet sich als Differenz zwi-schen dem Massestrom des Auslegungszustandes und dem Masse-strom, der sich bei erhöhter Vorlauftemperatur einstellen würde

$$\dot{m}_U \leq \dot{m}_E^+ - \dot{m}_E^{++} = \dot{m}_E^+ (1 - \mu). \quad (3)$$

Weiterhin ergibt sich die Enthalpiebilanz des Gesamtmassestroms bei direkter Einspeisung über Beimischstationen ($t_{R,E}^+ \equiv t_{R,N,i}^+ \equiv t_{R,N,i}^{++}$)

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

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

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

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

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

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 Einspei-sung mit $t_{R,N,i}^+ < t_{R,N,i}^+$ ausgegangen wird.

Hydraulische Begrenzung

Um die hydraulische Netzauslegung nicht zu beeinflussen, wäre es zweckmäßig, wenn an den Abnehmern i , die infolge der erhöhten Vorlauftemperatur einen verringerten Massestrom $\dot{m}_{N,i}^{++} < \dot{m}_{N,i}^+$ ent-nehmen, der entsprechende Differenzstrom zum Vollastwert ($\dot{m}_{N,i}^+ - \dot{m}_{N,i}^{++}$) überströmt. In der Summe ergäbe sich wiederum die in Gl. (3) berechnete Überströmmenge.

Üblicherweise wird die Überströmung auf einige Stellen beschränkt, beispielsweise auf die Stelle B des in *Bild 2* dargestellten Netzes. Bei Normalbetrieb ist die Überströmleitung geschlossen, während der Aufladung strömt der Massestrom $\dot{m}_U$ 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

$$\begin{aligned} \Delta p_E^{++} &= (\Delta p_{A,1}^+ + \Delta p_1^+) \mu_1^2 + \Delta p_2^+ \left[\frac{\sum_{i=1}^2 \mu_i \dot{m}_{N,i}^+}{\sum_{i=1}^2 \dot{m}_{N,i}^+} \right]^2 + \dots \\ &+ \Delta p_j^+ \left[\frac{\sum_{i=1}^j \mu_i \dot{m}_{N,i}^+}{\sum_{i=1}^j \dot{m}_{N,i}^+} \right]^2 + \Delta p_{j+n}^+ \left[\frac{\dot{m}_U + \sum_{i=1}^j \mu_i \dot{m}_{N,i}^+}{\sum_{i=1}^j \dot{m}_{N,i}^+} \right]^2 \\ &+ \Delta p_i^+ \left[\frac{\dot{m}_U + \sum_{i=1}^i \mu_i \dot{m}_{N,i}^+}{\sum_{i=1}^i \dot{m}_{N,i}^+} \right]^2 + \dots + \Delta p_n^+ \left[\frac{\dot{m}_U + \sum_{i=1}^n \mu_i \dot{m}_{N,i}^+}{\sum_{i=1}^n \dot{m}_{N,i}^+} \right]^2 \\ &\leq \Delta p_E^+, \end{aligned} \quad (7)$$

wenn der entscheidende Abnehmer-Druckverlust durch $\Delta p_{A,1}^+$ gegeben ist.

Die im Gleichheitsfall zulässige Überströmmenge $\dot{m}_U$ ist leider nicht explizit berechenbar.

Kennlinienbegrenzung

Versorgt die Umwälzpumpe nur ein Netz, sollten die Kriterien Massestrombegrenzung 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 in *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 $\dot{m}_U$ 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 $\dot{m}_U$ ist auch bei dieser Restriktion nur iterativ möglich.

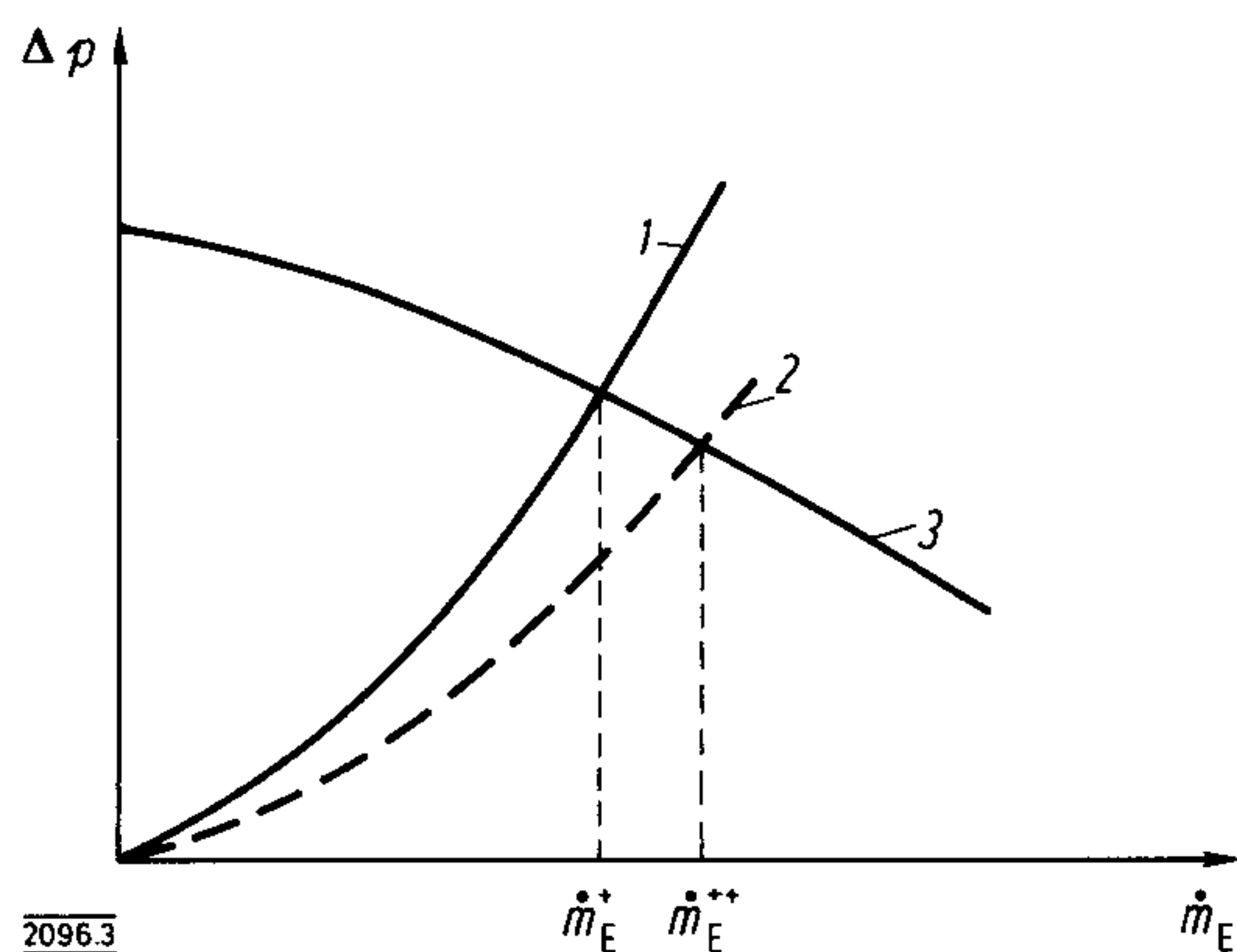


Bild 3. Ermittlung des Netzmassenstroms abhängig von der Öffnung der Überströmeinrichtung

- 1 Netzkennlinie bei geschlossenen Überströmeinrichtungen
- 2 Netzkennlinie bei geöffneten Überströmeinrichtungen
- 3 Pumpenkennlinie $\Delta p_p(\dot{m})$

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 Netzeende, z. B. die Verbindung A in *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

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

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

$$\dot{m}_U \leq \frac{\sum_{i=1}^j \dot{m}_{N,i}^+ t_{R,N,i}^+ - t_{Rzul} \sum_{i=1}^j \dot{m}_{N,i}^+}{t_{Rzul} - t_{V,E}^+} \quad (9)$$

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

$$\dot{m}_U \leq \frac{t_{R,N}^+ - t_{Rzul}}{t_{Rzul} - t_{V,E}^+} \sum_{i=1}^j \dot{m}_{N,i}^+ \quad (10)$$

Die Rücklauftemperatur an der Einspeisestelle würde unter diesen Bedingungen

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

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 $t_{R,E}^+ = t_{R,N}^+$. 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 Variationen der Überströmmungen herzustellen oder bei Differenzen der Nachweis zu führen, daß die eventuellen Drucküberschüsse an den betreffenden Abnehmern gedrosselt werden können. Die Mischtemperaturen sind über die Enthalpiebilanzen zu ermitteln.

Schaltungsmöglichkeiten

In *Bild 4* ist eine temperaturgeregelte Abnehmerstation dargestellt. Die Überströmung des Defizitbetrags $(\dot{m}_N^+ - \dot{m}_N^+)$ wird mit Hilfe der Mengenregelung durchgeführt, die den Gesamtmassestrom des Abnehmers konstant hält. Damit würden die Restriktionen Massestrombegrenzung und hydraulische Begrenzung verwirklicht (würde für das Einweg-Stellventil im Abnehmerstromkreis ein Zweiwege-Stellventil installiert, wäre damit in der Regel kein konstanter Massestrom 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. In *Bild 5* sind dies beispielsweise der Differenzdruck des nachgeschalteten Netzteils, die Rücklauftemperatur und der Massestrom. Die Regelgrößen werden markanten Netzstellen, der Einspeisestelle oder direkt dem Abnehmer entnommen. Die entsprechenden Sollwerte können auch Funktionen von weiteren Führungsgrößen sein. Zum Beispiel ist der erforderliche Differenzdruck abhängig vom notwendigen Massedurchsatz 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 sich in den Düsenzuleitungen keine Kavitation bilden kann. Eine weitere – allerdings technisch sehr aufwendige –

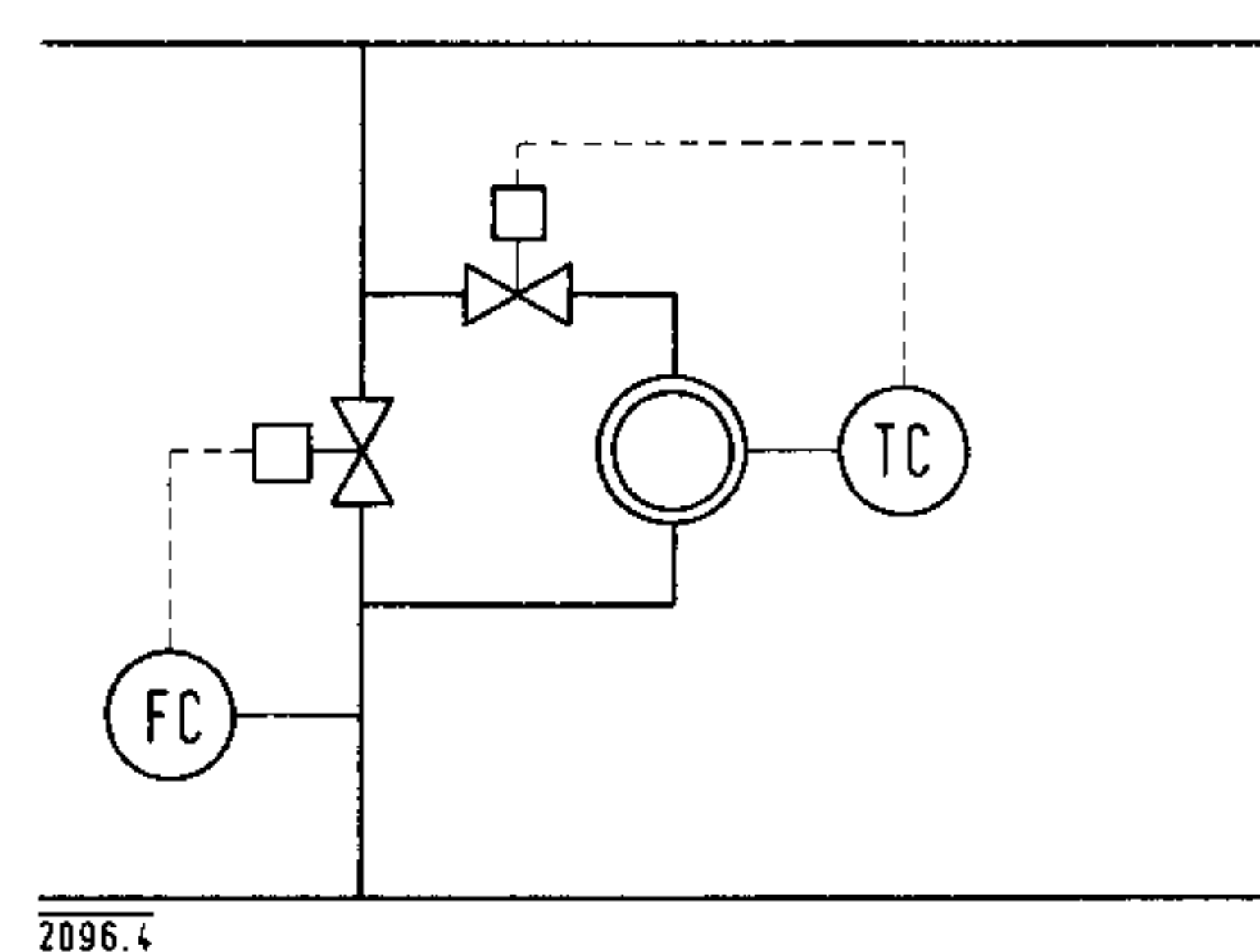


Bild 4. Schematische Schaltung einer Überströmeinrichtung, die den Abnehmer-Entnahmestrom konstant hält

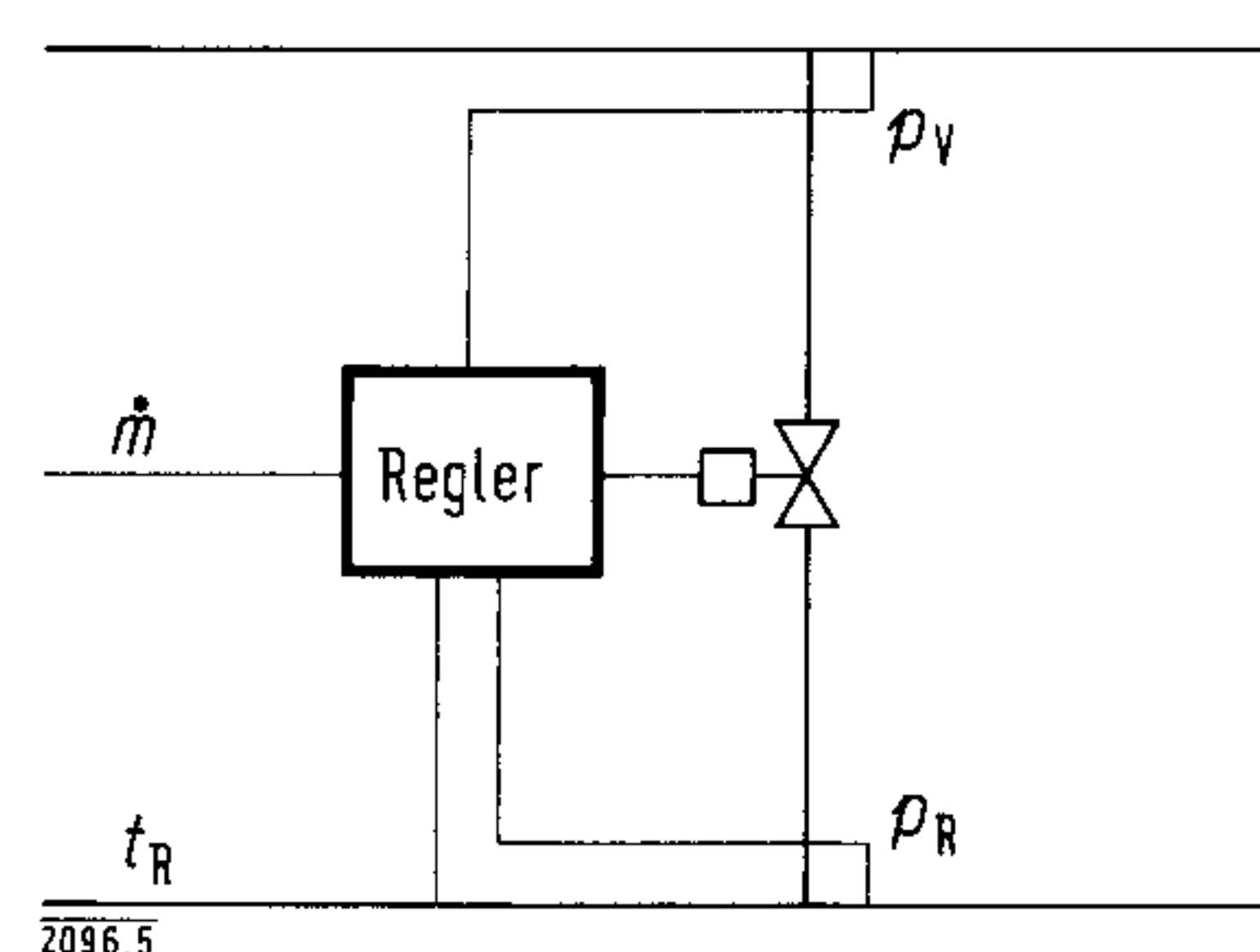


Bild 5. Schematische Schaltung einer Überströmeinrichtung, die die Überströmmenge in Funktion des Differenzdruckes, der Rücklauftemperatur und eines charakteristischen Massenstromes abhängig von vorgegebenen Prioritäten regelt

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

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

Beispiel 1

Ein Wärmenetz wird im Auslegungsfall mit $t_{V,N}^+ = 125^\circ\text{C}$ und $t_{R,N}^+ = 65^\circ\text{C}$ betrieben. Diese Werte gelten für alle Abnehmer. Zum Aufheizen steht eine Vorlauftemperatur von $t_{V,N}^{++} = 150^\circ\text{C}$ zur Verfügung. Die Abnehmer sind direkt über Beimischstationen angeschlossen. Die eingebaute Regelung bewirkt im Vollastfall stets konstante Rücklauftemperaturen. Die Netzgeometrie sowie die Druckverluste, Masseströme (Auslegungsfall) und die Wasserinhalte der Teilstrecken – zusammengefaßt für Vor- und Rücklauf – sind in Bild 6 vermerkt.

Die Wärmespeicherung in den Vorlaufleitungen der Abnehmer soll wegen der geringen Leitungslänge vernachlässigt werden. Zur

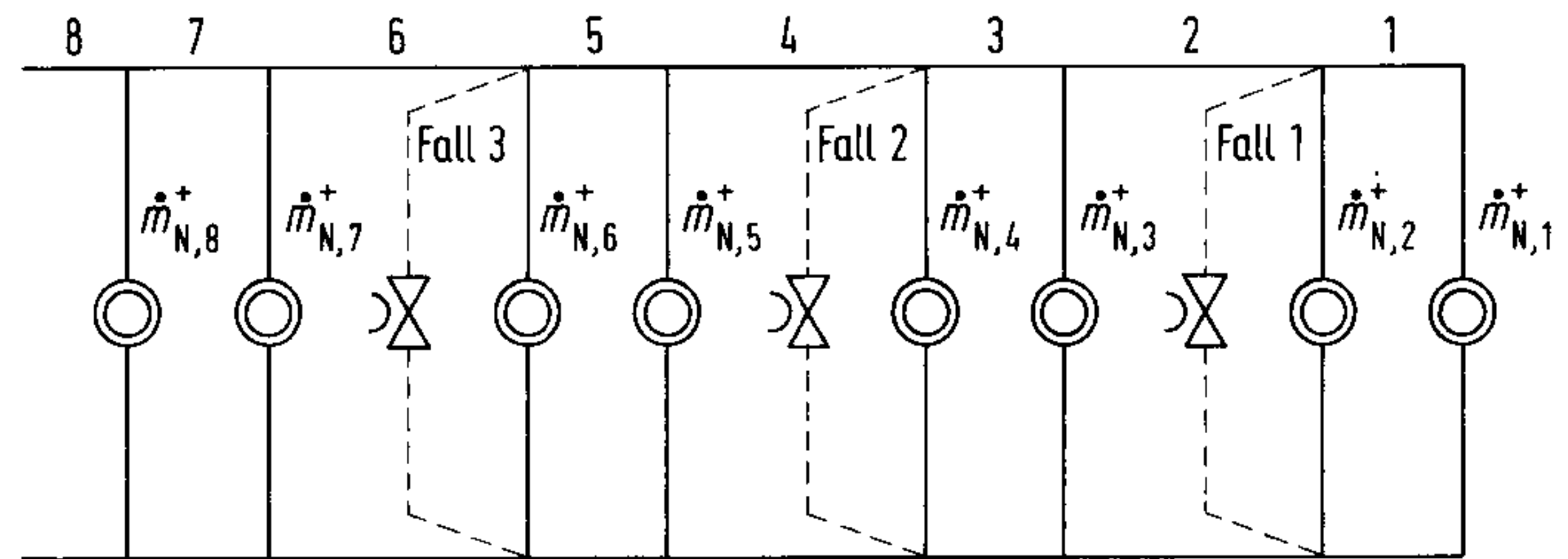


Bild 6. Linienförmiges Wärmenetz, das den Beispielen 1 und 2 als Grundlage dient. Es gelten die Daten:

Netzmasseströme durch die Abnehmer im Auslegungsfall
 $\dot{m}_{N,1}^+ = \dot{m}_{N,2}^+ = \dot{m}_{N,3}^+ = \dot{m}_{N,4}^+ = \dot{m}_{N,5}^+ = \dot{m}_{N,6}^+ = \dot{m}_{N,7}^+ = \dot{m}_{N,8}^+ = 4,2 \text{ kg/s}$

Nennweiten und Wassermasse in den Verteilungsleitungen (Vor- und Rücklauf)

TS	8	7	6	5	4	3	2	1
DN mm	200	150	150	150	150	150	100	80
m_w kg	7200	1800	1700	1900	1800	1770	785	528
z			$\approx 1,11$				$\approx 1,14$	

Druckverluste in den Verteilungsleitungen (Vor- und Rücklauf) im Auslegungsfall

TS	8	7	6	5	4	3	2	1
Δp_i kPa	7	24	17	12	5	5	14	10

Druckverlust des letzten Abnehmers im Auslegungsfall $\Delta p_{A,1}^+ = 80 \text{ kPa}$

Anhebung der Rücklauftemperatur sind Überströmeinrichtungen an mehreren Stellen denkbar. Unter Variationen von drei Einbauorten ist die Wirksamkeit der Rücklaufspeicherung zu überprüfen. Als thermische Begrenzung gilt für den Rücklauf die Temperatur $t_{Rzul} = 110^\circ\text{C}$. Als weitere Restriktionen sind anzunehmen:

Variante I

Massestrombegrenzung und hydraulische Begrenzung

Variante II

Kennlinienbegrenzung

Für diesen Fall gilt die in Bild 7 dargestellte Pumpencharakteristik.

Lösung

Zuerst kann die maximal im Netzvorlauf gespeicherte Wärmemenge nach Gl. (2) berechnet werden. Dabei sei angenommen, daß die in der Aufgabenstellung gegebenen Wasserinhalte sich zu je 50 % auf die Vor- und Rücklaufleitung verteilen. Somit gilt

$$Q_{S,V} = 4,3 \cdot (150 - 125) \cdot 0,5 (528 \cdot 1,14 + 785 \cdot 1,14 + 1770 \cdot 1,11 + 1800 \cdot 1,11 + 1900 \cdot 1,11 + 1700 \cdot 1,11 + 1800 \cdot 1,11 + 7200 \cdot 1,11) \text{ kW s}$$

$$Q_{S,V} = 1045 \text{ MW s.}$$

Bevor die Wärmespeicherung im Rücklauf für die einzelnen Varianten ermittelt werden kann, sind die Restriktionen näher zu betrachten. Grundsätzlich ergibt sich aus Gl. (1) das Massestromverhältnis für alle Abnehmer

$$\mu = \mu_1 = \dots = \mu_n = \frac{125 - 65}{150 - 65} = 0,706.$$

Damit lassen sich alle Abnehmermasseströme bei erhöhter Vorlauftemperatur berechnen ($\dot{m}_{N,i}^{++} = \mu \cdot \dot{m}_{N,i}^+$).

Aus der thermischen Begrenzung gemäß Gl. (10) folgt bei

Fall 1

$$\dot{m}_U \leq \frac{65 - 110}{110 - 150} 0,706 \cdot 8,4 \text{ kg/s} = 6,7 \text{ kg/s}$$

Fall 2

$$\dot{m}_U \leq \frac{65 - 110}{110 - 150} 0,706 \cdot 16,8 \text{ kg/s} = 13,3 \text{ kg/s}$$

Fall 3

$$\dot{m}_U \leq \frac{65 - 110}{110 - 150} 0,706 \cdot 25,2 \text{ kg/s} = 20,0 \text{ kg/s.}$$

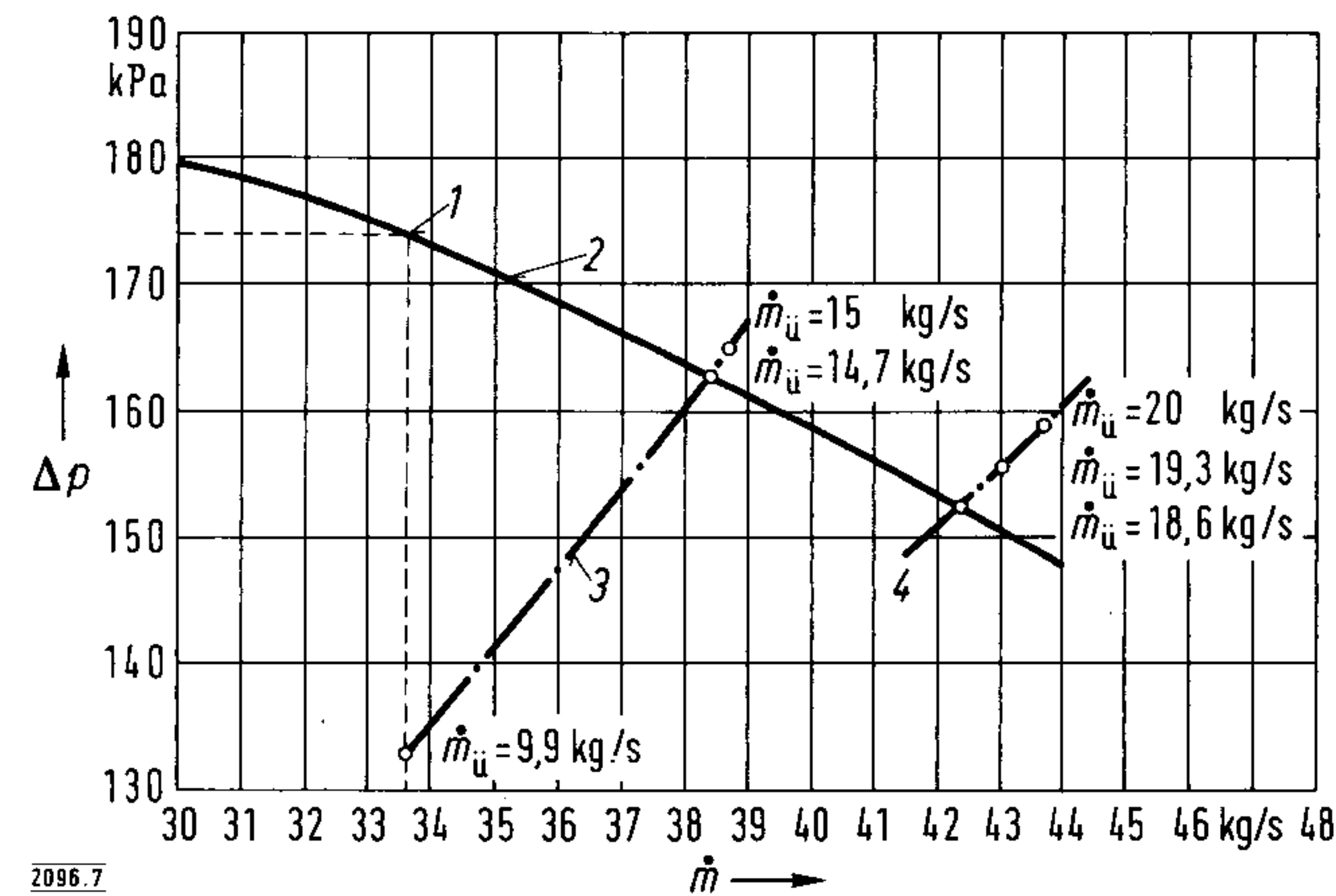


Bild 7. Kennlinie der im Netz gemäß Bild 6 installierten Pumpe

- 1 Betriebspunkt im Auslegungsfall
- 2 Pumpenkennlinie
- 3 Rohrnetzkenlinie bei Fall 2
- 4 Rohrnetzkenlinie bei Fall 3

Weiter sind bei Variante I die Massestrombegrenzung und die hydraulische Begrenzung zu beachten.

Aufgrund der erstgenannten Restriktion darf die maximale Überströmmenge nach Gl. (3)

$$\dot{m}_{\text{Ü}} = 8 \cdot 4,2 \cdot (1 - 0,706) \text{ kg/s} = 9,9 \text{ kg/s}$$

betragen.

Die Ergebnisse sagen aus, daß bei Fall 1 der Massestrom $\dot{m}_{\text{Ü}} = 6,7 \text{ kg/s}$ und bei den Fällen 2 bzw. 3 der Massestrom $\dot{m}_{\text{Ü}} = 9,9 \text{ kg/s}$ nicht überschritten werden darf.

Die hydraulische Begrenzung ist anhand der Gl. (7) zu überprüfen. Als Vergleichswert dient der Druckverlust im Auslegungszustand.

Er ergibt sich zu $\Delta p_{\text{E}}^+ = 174 \text{ kPa}$.

Zunächst werden die oben ermittelten, maximalen Überströmmungen in die Berechnungsgleichung eingesetzt:

Fall 1

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{E}}^{++} = & \left[(80 + 10) \cdot 0,703^2 + 14 \left(\frac{6,7 + 8,4 \cdot 0,706}{8,4} \right)^2 \right. \\ & + 5 \left(\frac{6,7 + 12,6 \cdot 0,706}{12,6} \right)^2 + 5 \left(\frac{6,7 + 16,8 \cdot 0,706}{16,8} \right)^2 \\ & + 12 \left(\frac{6,7 + 21 \cdot 0,706}{21} \right)^2 + 17 \left(\frac{6,7 + 25,2 \cdot 0,706}{25,2} \right)^2 \\ & \left. + 24 \left(\frac{6,7 + 29,4 \cdot 0,706}{29,4} \right)^2 + 7 \left(\frac{6,7 + 33,6 \cdot 0,706}{33,6} \right)^2 \right] \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\Delta p_{\text{E}}^{++} = 146 \text{ kPa} < 174 \text{ kPa}.$$

Fall 2

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{E}}^{++} = & \left[(80 + 10 + 14 + 5) \cdot 0,706^2 + 5 \left(\frac{9,9 + 16,8 \cdot 0,706}{16,8} \right)^2 \right. \\ & + 12 \left(\frac{9,9 + 21 \cdot 0,706}{21} \right)^2 + 17 \left(\frac{9,9 + 25,2 \cdot 0,706}{25,2} \right)^2 \\ & \left. + 24 \left(\frac{9,9 + 29,4 \cdot 0,706}{29,4} \right)^2 + 7 \left(\frac{9,9 + 33,6 \cdot 0,706}{33,6} \right)^2 \right] \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\Delta p_{\text{E}}^{++} = 133 \text{ kPa} < 174 \text{ kPa}.$$

Der Fall 3 bedarf keiner Untersuchung mehr, da der vorhandene Druckverlust noch kleiner als bei Fall 2 ist.

Die im Rücklauf gespeicherte Wärmemenge berechnet sich nach Gl. (12). Dabei wird zunächst die Teilstreckentemperatur $t_{\text{R},i}^{++}$ gemäß Gl. (13) bestimmt und danach die gespeicherte Wärmemenge für die Teilstrecke ermittelt. Die Addition liefert schließlich die gesamte Speicherwärme. Im einzelnen gelten für

Fall 1

TS 1: keine Wärmespeicherung möglich

$$\text{TS 2: } t_{\text{R},2}^{++} = \frac{6,7 \cdot 150 + 8,4 \cdot 0,706 \cdot 65}{6,7 + 8,4 \cdot 0,706} \text{ °C} = 110,1 \text{ °C}$$

Die geringfügige Abweichung von 110 °C ergibt sich infolge von Rundungsfehlern.

$$Q_{\text{S,R},2} = 4,2 \cdot 785 \cdot 0,5 \cdot 1,14 (110 - 65) \text{ kW} = 84568 \text{ kW}$$

$$\text{TS 3: } t_{\text{R},3}^{++} = 101,5 \text{ °C; } Q_{\text{S,R},3} = 150594 \text{ kW}$$

$$\text{TS 4: } t_{\text{R},4}^{++} = 95,7 \text{ °C; } Q_{\text{S,R},4} = 128811 \text{ kW}$$

$$\text{TS 5: } t_{\text{R},5}^{++} = 91,5 \text{ °C; } Q_{\text{S,R},5} = 117366 \text{ kW}$$

$$\text{TS 6: } t_{\text{R},6}^{++} = 88,3 \text{ °C; } Q_{\text{S,R},6} = 92331 \text{ kW}$$

$$\text{TS 7: } t_{\text{R},7}^{++} = 85,7 \text{ °C; } Q_{\text{S,R},7} = 86853 \text{ kW}$$

$$\text{TS 8: } t_{\text{R},8}^{++} = 83,7 \text{ °C; } Q_{\text{S,R},8} = 313846 \text{ kW}$$

Die in der Rücklaufleitung gespeicherte Wärmemenge beträgt somit bei der entferntesten Überströmung (Fall 1)

$$Q_{\text{S,R}} = 974 \text{ MWs}.$$

Fall 2

In den Teilstrecken 1, 2 und 3 gibt es keine Wärmespeicherung. Für die restlichen Teilstrecken ergibt sich nach Addition der Einzelwerte

$$Q_{\text{S,R}} = 968 \text{ MWs}.$$

Fall 2

Bei dieser Lage der Überströmung reduziert sich die Speicherung auf die Teilstrecken 6, 7 und 8. Die im Rücklauf gespeicherte Gesamtwärmemenge beträgt

$$Q_{\text{S,R}} = 655 \text{ MWs}.$$

Für die Variante II soll gemäß Aufgabenstellung die Kennlinienbegrenzung außer der thermischen Begrenzung charakteristisch sein.

Fall 1

Die Überströmung, die nahe dem Netzeende liegt, ist mengenmäßig wie bei Variante I durch die maximale Rücklauftemperatur von 110 °C begrenzt. Somit gelten auch hier

$$\dot{m}_{\text{Ü}} = 6,7 \text{ kg/s und } Q_{\text{S,R}} = 974 \text{ MWs}.$$

Der von der Umwälzpumpe zu fördernde Massestrom beträgt $\dot{m}_{\text{E}}^{++} = \mu \dot{m}_{\text{E}}^+ + \dot{m}_{\text{Ü}} = (33,6 \cdot 0,706 + 6,7) \text{ kg/s} = 30,4 \text{ kg/s}$, wozu gemäß Bild 7 ein Pumpendruck von $\Delta p_{\text{p}} = 179 \text{ kPa}$ gehört. Die erforderliche Druckdifferenz beträgt nach Variante I, Fall 1, $\Delta p_{\text{E}}^{++} = 146 \text{ kPa}$. Der Restdruck ist wegzudrosseln, falls keine drehzahlregelten Pumpen eingesetzt werden.

Fall 2

Zunächst wird die Rohrnetzkenlinie berechnet. Dabei wird angenommen, daß der größte Differenzdruck über dem entferntesten Abnehmer auftritt. Ein Punkt der Kennlinie war bereits unter Variante I, Fall 2, ermittelt worden. Es gelten:

$$\dot{m}_{\text{Ü}} = 9,9 \text{ kg/s; } \dot{m}_{\text{E}}^{++} = 33,6 \text{ kg/s; } \Delta p_{\text{E}}^{++} = 133 \text{ kPa}.$$

Die weitere Annahme

$$\dot{m}_{\text{Ü}} = 15 \text{ kg/s; } \dot{m}_{\text{E}}^{++} = 38,7 \text{ kg/s}$$

liefert

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{E}}^{++} = & \left[(80 + 10 + 14 + 5) \cdot 0,706^2 + 5 \left(\frac{15 + 16,8 \cdot 0,706}{16,8} \right)^2 \right. \\ & + 12 \left(\frac{15 + 21 \cdot 0,706}{21} \right)^2 + 17 \left(\frac{15 + 25,2 \cdot 0,706}{25,2} \right)^2 \\ & \left. + 24 \left(\frac{15 + 29,4 \cdot 0,706}{29,4} \right)^2 + 7 \left(\frac{15 + 33,6 \cdot 0,706}{33,6} \right)^2 \right] \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\Delta p_{\text{E}}^{++} = 165 \text{ kPa}.$$

Mit diesen Daten kann in Bild 7 eine Kurve aufgezeichnet werden, die im Schnittpunkt mit der Pumpenkenlinie

$$\dot{m}_{\text{Ü}} = 14,7 \text{ kg/s; } \dot{m}_{\text{E}}^{++} = 38,4 \text{ kg/s}$$

ergibt. Die Nachrechnung bestätigt den Interpolationswert $\Delta p_{\text{E}}^{++} = 163 \text{ kPa}$. Es zeigt sich, daß die thermische Begrenzung einen niedrigeren Wert $\dot{m}_{\text{Ü}} = 13,3 \text{ kg/s}$ liefert. Dieser ist für die Berechnung der Speicherwärme maßgebend (Es wäre kürzer gewesen, wenn von diesem Grenzwert ausgehend, zunächst der erforderliche Differenzdruck nachgerechnet worden wäre. Da $\Delta p_{\text{E}}^{++} < \Delta p_{\text{p}}$ hierfür galt, hätte die Kennlinienberechnung entfallen können. Zur Komplettierung des Beispiels sollte dies aber ausführlich dargestellt werden). Zugehörig zur maximalen Überströmung gelten die Werte

$$\dot{m}_{\text{E}}^{++} = 37,0 \text{ kg/s; } \Delta p_{\text{p}} = 166 \text{ kPa}.$$

Mit den Gln. (13) und (12) sind die Teilstreckentemperaturen und partiellen Speicherwärmen berechenbar. Beispielsweise gilt für

$$\text{TS 4: } t_{R,4}^{++} = 109,9^\circ\text{C}; \quad Q_{S,R,4} = 188391 \text{ kW}_s.$$

Die Summation ergibt die gespeicherte Wärmemenge

$$Q_{S,R} = 1162 \text{ MW}_s.$$

Fall 3

Zur Ermittlung der Rohrnetzkenlinie wird mit dem Wert

$$\dot{m}_{\dot{U}} = 20 \text{ kg/s bzw. } \dot{m}_{E^+}^{++} = 43,7 \text{ kg/s}$$

begonnen. Der erforderliche Druck an der Einspeisestelle beträgt dann

$$\Delta p_{E^+}^{++} = \left[(80 + 10 + 14 + 5 + 5 + 12) 0,706^2 + 17 \left(\frac{20 + 25,2 \cdot 0,706}{25,2} \right)^2 + 24 \left(\frac{20 + 29,4 \cdot 0,706}{29,4} \right)^2 + 7 \left(\frac{20 + 33,6 \cdot 0,706}{33,6} \right)^2 \right] \text{ kPa} = 159 \text{ kPa}.$$

Weitere Werte der Rohrnetzkenlinie sind:

$$\dot{m}_{\dot{U}} = 19,3 \text{ kg/s}; \quad \dot{m}_{E^+}^{++} = 43,0 \text{ kg/s}; \quad \Delta p_{E^+}^{++} = 156 \text{ kPa}$$

$$\dot{m}_{\dot{U}} = 18,6 \text{ kg/s}; \quad \dot{m}_{E^+}^{++} = 42,3 \text{ kg/s}; \quad \Delta p_{E^+}^{++} = 152 \text{ kPa}.$$

Die letztgenannte Druckdifferenz ist mit dem Pumpendruck identisch. Entsprechend der Gln. (13) und (12) ergibt sich die gesamte im Rücklauf gespeicherte Wärmemenge zu

$$Q_{S,R} = 968 \text{ MW}_s.$$

Zusammenfassung und Diskussion

Abschließend werden wegen der besseren Übersicht alle Ergebnisse tabellarisch zusammengefaßt. Bei der Variante II wird dazu der Energieaufwand für die Umwälzpumpe als äquivalenter Kennwert ($\eta = 100\%$)! – gebildet aus $\left(\Delta p_p \frac{\dot{m}_E}{\rho} \right)$ – angegeben. Bei Netzvoll- ladung ergeben sich:

Variante	Fall	Speicherwärme im Vorlauf MW _s	Speicherwärme im Rücklauf MW _s	Pumpen- energie kW ¹⁾
I	1	1045	974	
	2	1045	968	
	3	1045	655	
II	1	1045	974	5,55 ²⁾
	2	1045	1162	6,27 ²⁾
	3	1045	968	6,56

¹⁾ Auslegungsleistung: 5,97 kW

²⁾ Drosselregelung

Die Speicherwärme ist – wie deutlich erkennbar – eine Funktion des konstruktiven Netzaufbaus und der zu beachtenden Restriktionen. Unter den angegebenen Bedingungen liefert bei Variante I die Überströmung nahe dem Netzende den besten Speichereffekt. Bei Variante II wird die größte Wärmespeicherung im Rücklauf bei Anordnung der Überströmeinrichtung in Netzmitte erreicht. Aufgrund des gegenüber dem Auslegungsfall vergrößerten Gesamtmassestroms ist dabei sogar ein höherer Speicherwert als im Vorlauf zu erreichen. Der Energieaufwand für die Umwälzpumpen steigt allerdings um 7%.

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 Netzrück-

lauf nur von einer Überströmeinrichtung bis zur Einspeisestelle hin möglich. Befindet sich die Überströmeinrichtung in der Nähe des Netzendes, dann ist der Massestrom $\dot{m}_{\dot{U}}$ wegen der hydraulischen und gegebenenfalls auch wegen der thermischen Begrenzung relativ gering, die Speichermasse aufgrund der langen Rücklaufleitung jedoch groß. Bei Überströmungen in der Nähe der Einspeisestelle können große $\dot{m}_{\dot{U}}$ realisiert werden, die aufheizende Wassermenge ist aber verhältnismäßig klein.

Die Wahl, an welcher Stelle die Überströmeinrichtung innerhalb des Wärmenetzes anzuordnen ist, stellt ein Optimierungsproblem dar. Das vorangegangene Beispiel zeigte dies deutlich. Eine rechnerische Ermittlung des Maximums 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 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.

Liniennetz mit einer Überströmung

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

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

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

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

$$= m_{R,i} z_i c \left[\frac{t_{V,E}^{++} \dot{m}_{\dot{U}} + t_{R,E}^{+} \mu \sum_{i=1}^i \dot{m}_{N,i}^{+}}{\dot{m}_{\dot{U}} + \mu \sum_{i=1}^i \dot{m}_{N,i}^{+}} - t_{R,E}^{+} \right]. \quad (14)$$

Die Zuordnung der Größen sowie die Numerierung entsprechen den Angaben in Bild 2.

Für Teilstrecken i , die zwischen 1 und j liegen, gilt $\dot{m}_{\dot{U}} = 0$, woraus sofort $Q_{S,R,i} = 0$ folgt. Das heißt, Gl. (14) ist formal auf alle Teilstrecken anwendbar. Die Umformung ergibt die einfachere Form

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

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 Überströmung

$$\xi_i = \frac{\dot{m}_{\dot{U}}}{\dot{m}_{\dot{U}} + \mu \sum_{i=1}^i \dot{m}_{N,i}^{+}} \quad (16)$$

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

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

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

Massestrombegrenzung

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

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

Hydraulische Begrenzung

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

$$\Delta p_E^{++} = \mu^2 \left[\Delta p_{A,1}^+ + \sum_{i=1}^j \Delta p_i^+ + \sum_{i=j}^n \Delta p_i^+ \frac{1}{(1 - \xi_i)^2} \right] \leq \Delta p_E^+. \quad (19)$$

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_j kann nur durch wiederholende Annahmen ermittelt werden.

Kennlinienbegrenzung

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

Thermische Begrenzung

Unter den hier vorliegenden Bedingungen kann Gl. (10)

$$\dot{m}_U \leq \frac{t_{R,E}^+ - t_{R,zul}}{t_{R,zul} - t_{V,E}^+} \mu \sum_{i=1}^j \dot{m}_{N,i}^+ \quad (20)$$

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

$$\xi_j \leq \frac{t_{R,zul} - t_{R,E}^+}{t_{V,E}^+ - t_{R,E}^+}. \quad (21)$$

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

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

In den Teilstrecken vor der Überströmstelle $i = 1..(j-1)$ ist $\xi_i = 0$, so daß physikalisch richtig die entsprechenden Summanden entfallen.

Der Summenausdruck kann grafisch veranschaulicht werden. So sind in Bild 8 auf der Abszisse die Teilstrecken-Werte ($m_{R,i} z_i$) und auf der Ordinate die ebenfalls teilstreckenbezogenen relativen Überströmmungen ξ_i aufgetragen. Die Fläche unter der Treppenkurve

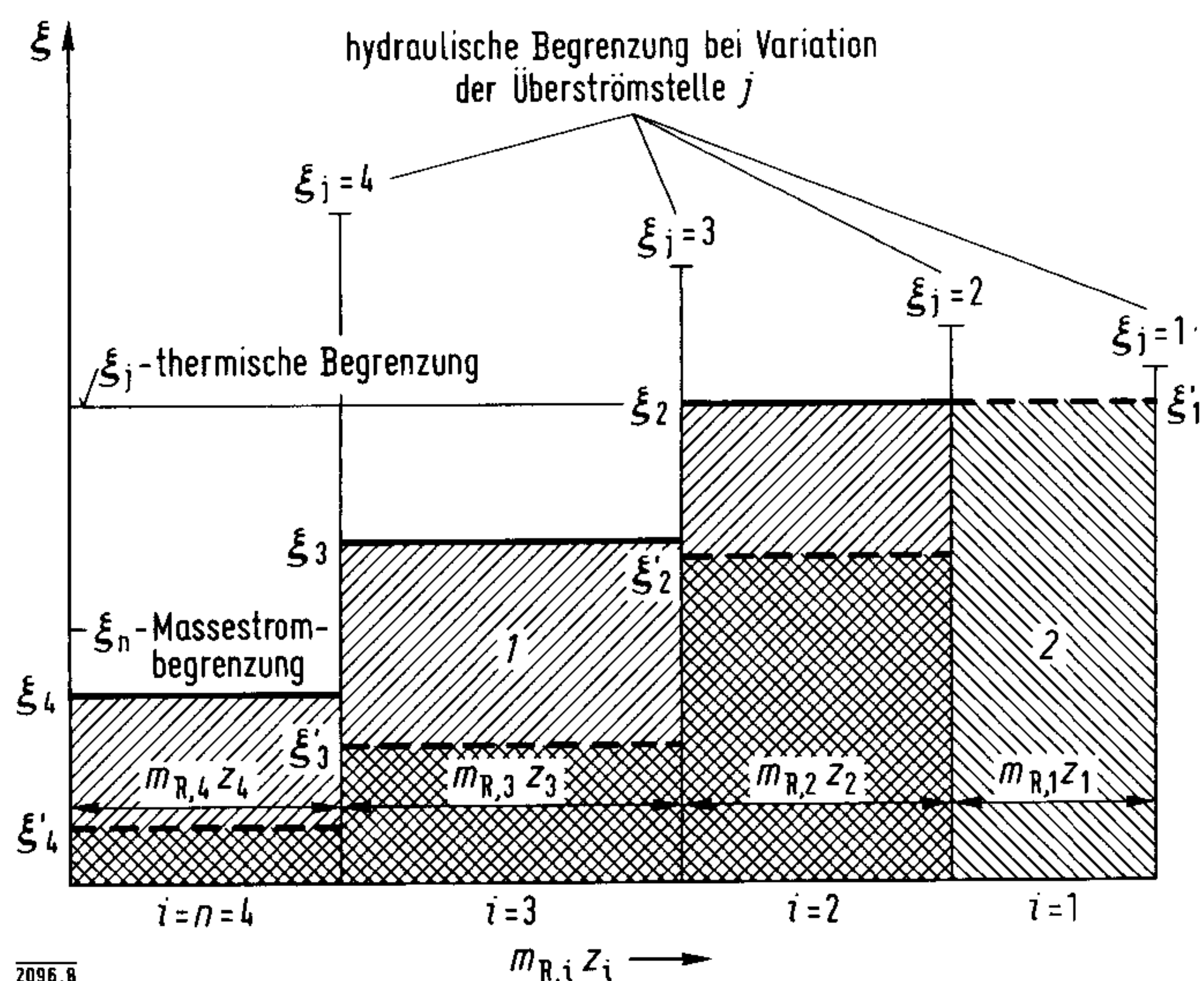


Bild 8. Schematische Darstellung möglicher Restriktionen bei der Rücklaufaufheizung und die Veranschaulichung der speicherbaren Wärmemengen

- 1 $j = 2$ (Überströmung am Abnehmer 2)
- 2 $j = 1$ (Überströmung am Abnehmer 1)

ist der gespeicherten Wärme 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_i , 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. In Bild 8 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 ergibt 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:

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

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 in 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 (Bild 1, 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 *Bild 9* und *10* 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.

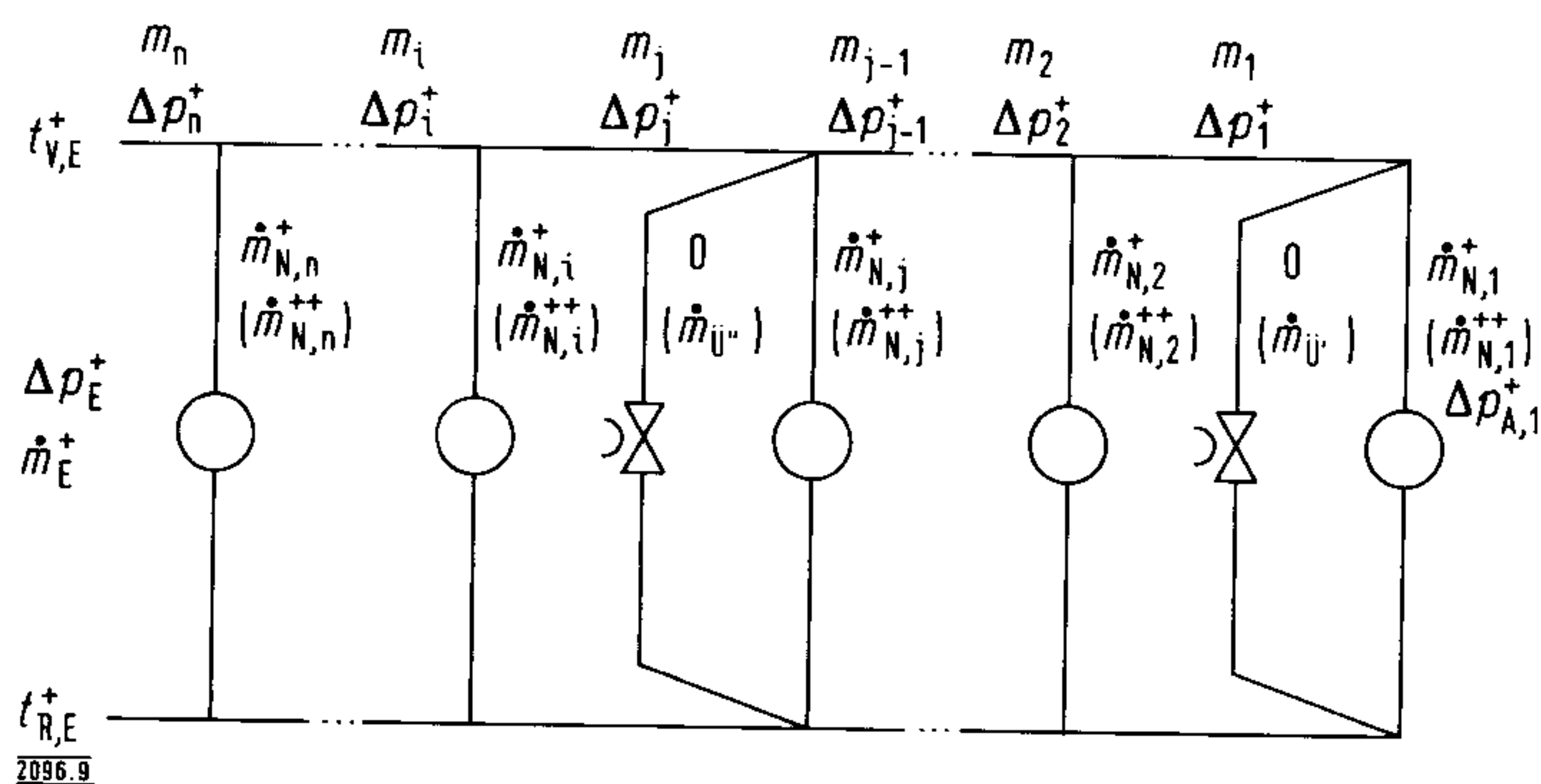


Bild 9. Schematische Darstellung eines Liniennetzes mit zwei Überströmeinrichtungen und Zusammenstellung der charakteristischen Größen

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 $i = 1 \dots (j - 1)$ $\dot{m}_{\bar{U}} = \dot{m}_{\bar{U}'}$ und im Bereich $i = j \dots n$ $\dot{m}_{\bar{U}'} = \dot{m}_{\bar{U}'} + \dot{m}_{\bar{U}''}$ 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

$$\xi_{j=1} = \frac{\dot{m}_{\dot{\mathcal{U}}'}}{\dot{m}_{\dot{\mathcal{U}}'} + \mu \sum_{i=1}^{j-1} \dot{m}_{\mathcal{N},i}^+} \quad (23)$$

und

$$\xi_j = \frac{\dot{m}_{\dot{U}'} + \dot{m}_{\dot{U}''}}{\dot{m}_{\dot{U}'} + \dot{m}_{\dot{U}''} + \mu \sum_{i=1}^{j-1} \dot{m}_{N,i}^+ + \mu \dot{m}_{N,j}^+} \quad (24)$$

folgt nach Einführung der Abkürzung

$$a = \frac{\dot{m}_{\dot{U}''}}{\dot{m}_{\dot{U}'}} \quad (25)$$

$$\xi_j = \frac{\xi_{j-1} (a+1)}{a \xi_{j-1} + 1 + (1 - \xi_{j-1}) \frac{\dot{m}_{N,j}^+}{\sum_{i=1}^{j-1} \dot{m}_{N,i}^+}}. \quad (26)$$

Für $a = 0$, d. h. bei Weglassen der Überströmung am Abnehmer j , geht diese Bezeichnung in die bekannte Gl. (17) über. Solange die Randbedingungen nicht verletzt werden, ist der Quotient a frei wählbar.

Die in *Bild 10* dargestellte Variante zeigt ein verzweigtes Netz mit zwei Überströmungen, wobei am Netzknoten kein Abnehmer vorhanden ist.

Für die Berechnung der Nebennetze $i' = 1' \dots n'$ und $i'' = 1'' \dots n''$ gelten die Gln. (16) und (17) in vollem Umfang, auch für das Hauptnetz $i = 1 \dots n$ unter Beachtung von $\dot{m}_{\dot{U}} = \dot{m}_{\dot{U}'} + \dot{m}_{\dot{U}''}$. Der Wert ξ_1 folgt aus der Definitionsgleichung

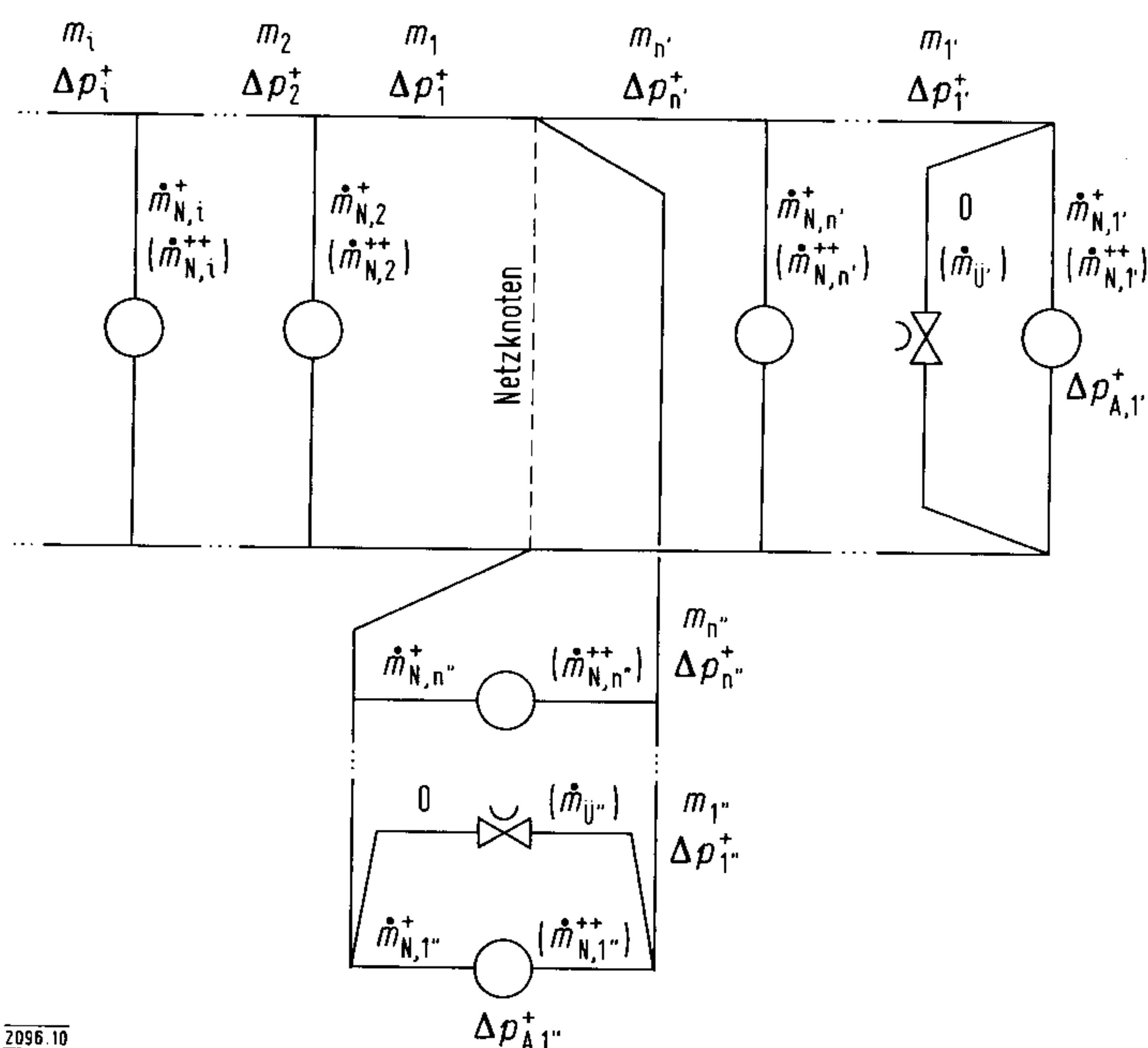


Bild 10. Schematische Darstellung der Verknüpfung von zwei Liniennetzen mit je einer Überströmeinrichtung an einem Netzknoten und Zusammenstellung der charakteristischen Größen

$$\xi_1 = \frac{\dot{m}_{\dot{U}'} + \dot{m}_{\dot{U}''}}{\dot{m}_{\dot{U}'} + \mu \sum_{i'=1}^{n'} \dot{m}_{N,i'}^+ + \dot{m}_{\dot{U}''} + \mu \sum_{i''=1}^{n''} \dot{m}_{N,i''}^+} \quad (27)$$

und den bekannten Werten

$$\xi_{n'} = \frac{\dot{m}_{\dot{U}'}}{\dot{m}_{\dot{U}'} + \mu \sum_{i'=1}^{n'} \dot{m}_{N,i'}^+}, \quad \xi_{n''} = \frac{\dot{m}_{\dot{U}''}}{\dot{m}_{\dot{U}''} + \mu \sum_{i''=1}^{n''} \dot{m}_{N,i''}^+} \quad (28)$$

zu

$$\xi_1 = \frac{\xi_{n'} \frac{\sum_{i'=1}^{n'} \dot{m}_{N,i'}^+}{1 - \xi_{n'}} + \xi_{n''} \frac{\sum_{i''=1}^{n''} \dot{m}_{N,i''}^+}{1 - \xi_{n''}}}{\frac{\sum_{i'=1}^{n'} \dot{m}_{N,i'}^+}{1 - \xi_{n'}} + \frac{\sum_{i''=1}^{n''} \dot{m}_{N,i''}^+}{1 - \xi_{n''}}}. \quad (29)$$

Die Darstellung der Restriktionen kann genau wie bei den einfachen Liniennetzen vorgenommen werden. Die Wahl der Überströmmungen $\dot{m}_{U'}$ und $\dot{m}_{U''}$ bzw. deren Relativwerte $\xi_{1'}$ und $\xi_{1''}$ sollte so vorgenommen werden, daß am Netzknoten die Differenz 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.

Beispiel 2

Die im Beispiel 1 gegebene Aufgabe soll mit Hilfe der vereinfachten Maximierung der Speicherwärme gelöst werden. Die Daten von *Bild 6* gelten weiterhin. Als Restriktionen sind die thermische Begrenzung und die Kennlinienbegrenzung (*Bild 7*) zu beachten, wobei die Pumpenkennlinie bis $\dot{m} = 44 \text{ kg/s}$ befahren werden darf. Es ist die Lage der Überströmeinrichtungen zu ermitteln, die die größte Wärmespeicherung im Rücklauf zulässt.

Lösung

Die thermische Begrenzung ergibt für die relative Überströmmenge nach Gl. (21)

Tafel 2. Ergebnisse des Beispiels 2
j = Überströmung am Abnehmer

	1	2	3	4	5		6		7		8	
	1) 1)	1) 1)	1) 1)	1) 1)	1) 1)	2) 2)	1) 1)	2) 2)	1) 1)	3) 3)	1) 1)	3) 3)
ξ_{11}	0,529											
ξ_{12}	0,360	0,529										
ξ_{13}	0,272	0,428	0,529									
ξ_{14}	0,219	0,360	0,457	0,529								
ξ_{15}	0,183	0,310	0,403	0,473	0,529	0,517						
ξ_{16}	0,158	0,272	0,360	0,428	0,483	0,471	0,529	0,511				
ξ_{17}	0,138	0,243	0,325	0,391	0,445	0,433	0,490	0,472	0,529	0,494		
ξ_{18}	0,123	0,219	0,296	0,360	0,412	0,401	0,457	0,439	0,496	0,461	0,529	0,461
$Q_{S,R}$ MWs	635	970	1160	1164	1108	1080	1005	967	896	834	755	658
Δp_{E+}^+ kPa	130	145	142	154	164	160	159	152	139	130	99	95
$\dot{m}_{\dot{U}}$ kg/s	3,33	6,66	9,99	13,32	16,65	15,87	19,98	18,59	23,31	20,26	26,64	20,29
$\dot{m}_{E+}^+$ kg/s	27,0	30,4	33,7	37,0	40,4	39,6	43,7	42,3	47,0	44,0	50,3	44,0

1) thermische Begrenzung
2) Kennlinienbegrenzung
3) seitliche Kennlinienbegrenzung

$\xi_j \leq \frac{110 - 65}{150 - 65} = 0,529.$

Da die Nachrechnung der Drücke gemäß Gl. (19) erst nach Kenntnis aller ξ_j -Werte durchführbar ist, wird diese Ermittlung, ausgehend von ξ_j , nach Gl. (17) zunächst vorgenommen. Die Überströmstelle j sei dabei nacheinander den Abnehmern $i = 1 \dots n$ zugeordnet. Die Ergebnisse sind in *Tafel 2* eingetragen. Weiterhin wurden nach Gl. (22) die Speicherwärmen $Q_{S,R}$ für die acht Überströmvarianten berechnet. Der Höchstwert ergibt sich bei einer Überströmung am Abnehmer 4. Das Ergebnis stimmt bis auf eine Rechenabweichung mit Variante II, Fall 2, des Beispiels 1 überein. Es würde genügen, die Verträglichkeit der Randbedingungen für diesen Wert zu prüfen. Der besseren Anschaulichkeit halber wurden jedoch die Druckverluste des Rohrnetzes nach Gl. (19) und die Überströmmen entsprechend Gl. (16) nach durchgeführter Umstellung berechnet. Der Gesamtmassestrom an der Einspeisestelle ergibt sich dann weiter zu

$\dot{m}_{E+}^+ = \mu \dot{m}_{E+}^+ + \dot{m}_{\dot{U}}.$

Alle Ergebnisse sind tabellarisch erfasst. Der Vergleich mit den Grenzwerten zeigt, daß bei Anordnung der Überströmeinrichtung an den Abnehmern 1, 2, 3 und 4 die thermische Begrenzung die eigentliche Restriktion darstellt und zur hydraulischen Anpassung gedrosselt werden muß. Bei der Überströmung in unmittelbarer Nähe der Abnehmer 5 und 6 muß der Massestrom $\dot{m}_{\dot{U}}$ reduziert werden, da die Pumpe den erforderlichen Umtriebsdruck nicht bereitstellen kann (Kennlinienbegrenzung). Bei der Anordnung der Überströmeinrichtung am Abnehmer 7 bzw. 8 muß $\dot{m}_{\dot{U}}$ ebenfalls verringert werden, da der Gesamtmassestrom $\dot{m}_{E+}^+ > 44 \text{ kg/s}$ beträgt (seitliche Kennlinienbegrenzung gemäß Aufgabenstellung). Werden diese Restriktionen noch eingearbeitet, so verkleinert sich der technisch mögliche Betrag der Speicherwärme weiter.

Das Maximum bleibt jedoch mit $Q_{S,R} = 1164 \text{ MWs}$ bei $j = 4$ erhalten; die Aufgabe ist gelöst.

Zur Komplettierung werden die ξ_j -Werte für die Überströmeinrichtungen bei den Abnehmern 5, 6, 7 und 8 bis zum Erreichen der technischen Randbedingungen verringert. Die Ergebnisse sind in der *Tafel* unter den entsprechenden Begrenzungen eingetragen. Es sei abschließend darauf hingewiesen, daß die Werte für den Fall 6²⁾ mit denen der Variante II, Fall 3 des Beispiels 1 übereinstimmen.

Wegen der unterschiedlichen Netzgeometrien und der Verschiedenartigkeit der Restriktionen ist ohne Rechnung keine Voraussage über die optimale Lage der Überströmeinrichtung möglich. Das Beispiel zeigt, daß bei ungünstiger Anordnung die speicherbare Wärmemenge auf 55 % des Maximalwerts sinken kann. Die tabellarische Ermittlung macht deutlich, daß der rechnerische Aufwand zur Bestimmung der optimalen Lage – vor allem bei Verwendung eines programmierbaren Taschenrechners – relativ gering ist.

Beispiel 3

Für das in *Bild 11* dargestellte Netz ist die maximal mögliche Wärmespeicherung im Rücklauf zu bestimmen, wenn Überströmeinrichtungen an den Stellen

- Variante I: I und II
- Variante II: II
- Variante III: III
- Variante IV: II und III

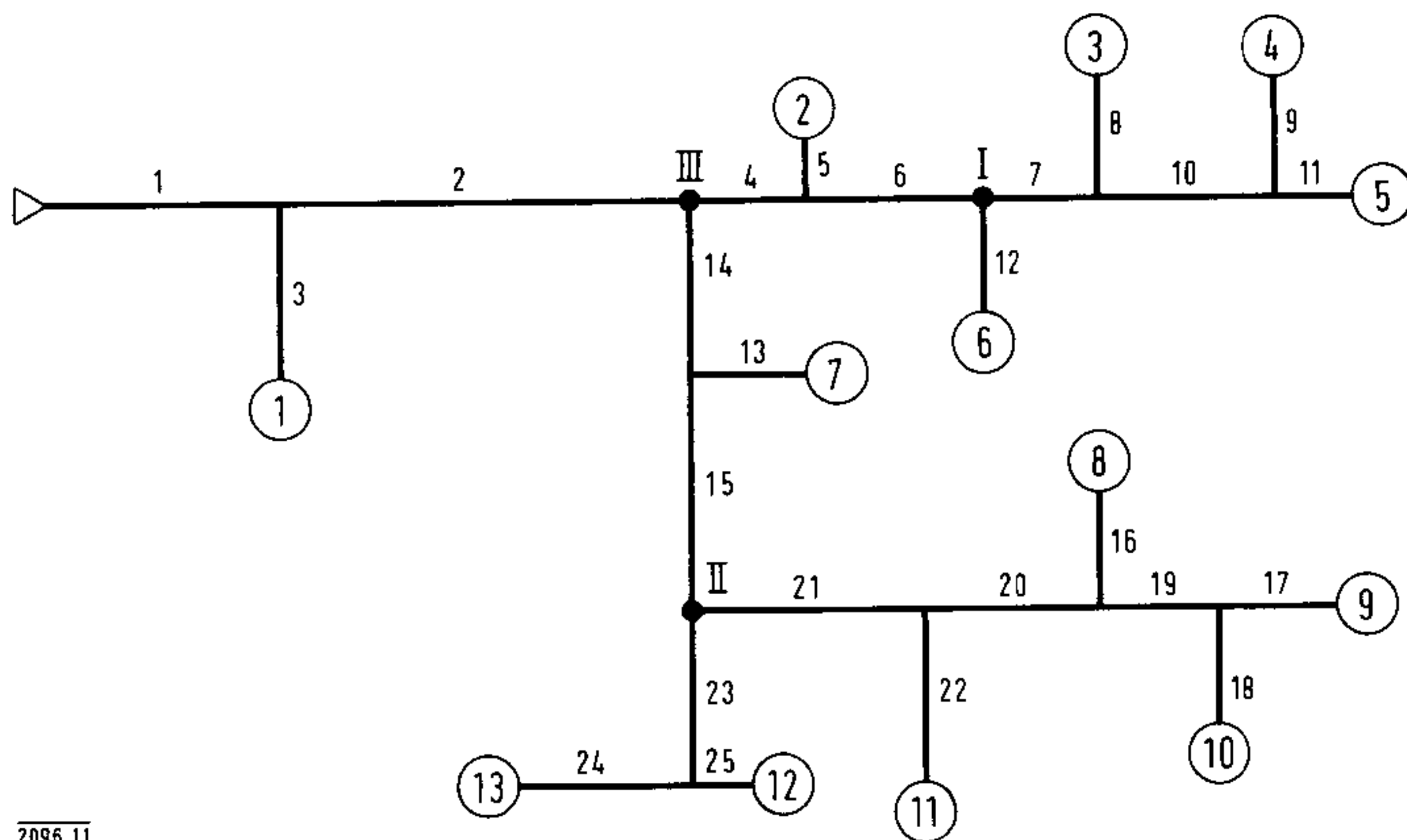


Bild 11. Wärmenetz mit drei möglichen Überströmeinrichtungen als Grundlage für Beispiel 3

Tafel 3. Netzwerte des Beispiels 3

Teilstrecke	$\dot{m}^+$ kg/s	m kg	Δp^+ kPa
1	40,6	7850	21
2	38,1	13734	25
3	2,5	380	185
4	17,6	2120	10
5	4,2	230	150
6	13,4	3181	9
7	9,0	952	16
8	3,0	460	125
9	3,0	460	94
10	6,0	970	31
11	3,0	308	94
12	4,4	460	141
13	1,2	70	144
14	20,5	3181	16
15	19,3	4240	20
16	3,4	460	112
17	3,0	460	94
18	3,0	450	94
19	6,0	640	18
20	9,4	3180	3
21	13,5	4240	9
22	4,1	693	115
23	5,8	970	34
24	2,8	380	90
25	3,0	693	90

Die Masseinhalte m und die Druckverluste Δp^+ gelten für die zusammengehörigen Vor- und Rücklaufleitungen. Bei den Abnehmerteilstrecken sind in den Δp -Werten auch die erforderlichen Abnehmer-Differenzdrücke enthalten.

angeordnet sind. Das Netz wird im Vollastfall mit den Temperaturen 130/60 °C und während des Ladevorgangs mit maximal $t_{V,E}^{++} = 150$ °C betrieben. Alle Abnehmer sind direkt angeschlossen und halten die Rücklauftemperatur in erster Näherung konstant. Die charakteristischen Netzdaten sind in *Tafel 3* zusammengestellt. Die Nenndurchmesser der Rücklaufleitungen, die in Fließrichtung hinter den möglichen Überströmrichtungen liegen, betragen 150 bis 200 mm.

Als Randbedingungen sind die Temperaturbegrenzung des Rücklaufs auf ≤ 130 °C und die in *Bild 12* gegebene Pumpenkennlinie zu betrachten.

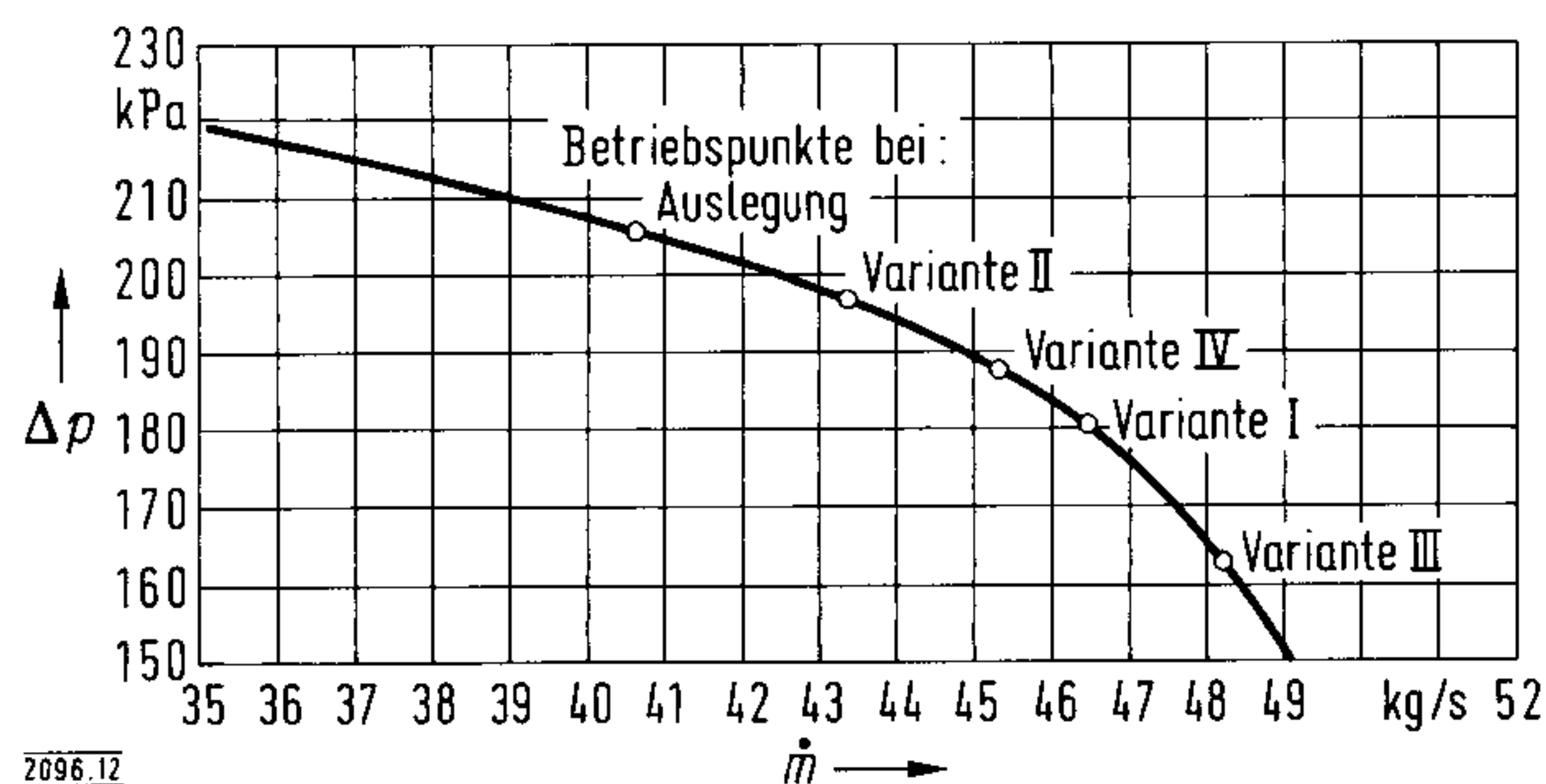


Bild 12. Kennlinie der im Netz gemäß Bild 11 installierten Pumpe

Lösung

Der aus der thermischen Begrenzung herrührende maximale ξ -Wert folgt nach Gl. (21) zu

$$\xi_j \leq \frac{130 - 60}{150 - 60} = 0,778.$$

Es gilt für alle zu untersuchenden Varianten. Das Massestromverhältnis berechnet sich gemäß Gl. (1)

$$\mu = \frac{130 - 60}{150 - 60} = 0,778$$

(Die Übereinstimmung mit dem ξ_j -Wert ist zufällig.)

Variante I

Ein reduzierter Netzplan ist in *Bild 13* aufgezeichnet. Dabei repräsentiert der Ersatzabnehmer 1' die Originalabnehmer 3, 4, 5 und 6. Der Abnehmer 1'' steht stellvertretend für die Abnehmer 8, 9, 10, 11, 12 und 13. Weiterhin gelten die Abnehmeridentitäten ($2' \equiv 2$), ($2'' \equiv 7$) und ($2 \equiv 1$).

Die den neuen Abnehmern und Teilstrecken zugeordneten Daten sind nachfolgend zusammengestellt:

i	$\dot{m}_{N,i}^+$ kg/s	$\Sigma \dot{m}_{N,i}^+$ kg/s	$\Delta p_{A,i}$ kPa	Δp_i^+ kPa	m_i kg
1'	13,4	13,4	141	9	3 181
2'	4,2	17,6	150	10	2 120
1''	19,3	19,3	124	20	4 240
2''	1,2	20,5	144	16	3 181
1	—	38,1	—	25	13 734
2	2,5	40,6	185	21	7 850

Zu beachten ist, daß es zu $i = 1$ keinen realen Abnehmer gibt und daß der Summenmassestrom alle Verzweigungen zusammenfaßt. Wie die Berechnungen zeigen, haben relative Überströmungen $\xi_{1'}$ und $\xi_{1''}$, die dem Grenzwert $\xi_j = 0,778$ entsprechen, viel zu große Druckverluste. Sie wurden schrittweise reduziert und so differenziert, daß am Knoten die Differenzdrücke für beide Netzzweige nahezu gleich sind. Der letzte Iterationswert soll ausführlich nachgerechnet werden. Es gelten die Annahmen:

$$\xi_{1'} = 0,450; \quad \xi_{1''} = 0,300.$$

Nach Gl. (17) ergeben sich dann

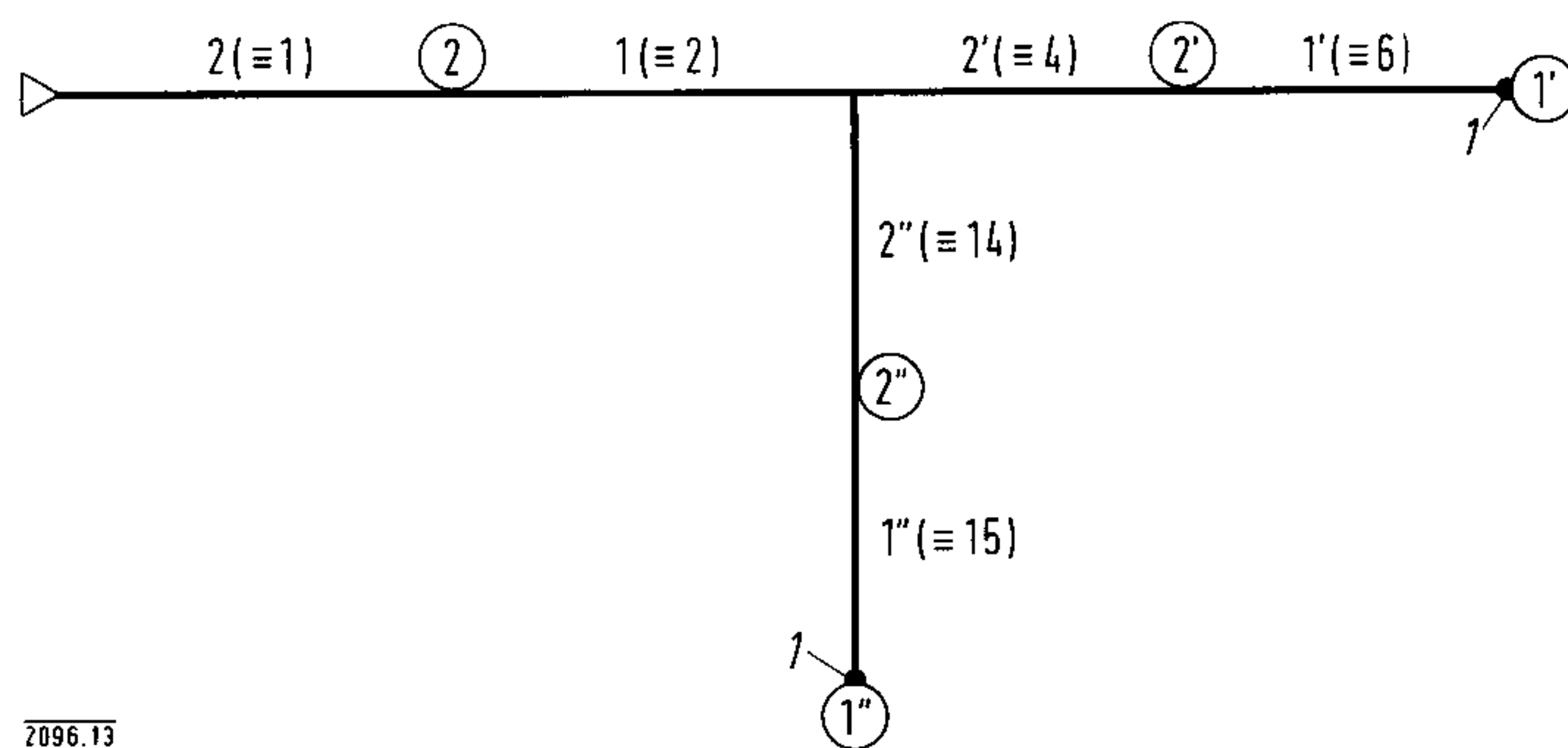


Bild 13. Ersatznetz gemäß Variante I

1 Überströmung

$$\xi_{2'} = \frac{0,450}{1 + (1 - 0,450) \frac{4,2}{13,4}} = 0,384;$$

$$\xi_{2''} = \frac{0,300}{1 + (1 - 0,300) \frac{1,2}{19,3}} = 0,287.$$

Die Druckverluste für diese beiden Netzzweige lassen sich analog Gl. (19), bezogen auf den Knoten K, ermitteln:

$$\Delta p_{K^+}^+ = 0,778^2 \left[141 + 9 \frac{1}{(1 - 0,450)^2} + 10 \frac{1}{(1 - 0,384)^2} \right] \text{ kPa} = 119,3 \text{ kPa}$$

$$\Delta p_{K^+}^+ = 0,778^2 \left[124 + 20 \frac{1}{(1 - 0,300)^2} + 16 \frac{1}{(1 - 0,287)^2} \right] \text{ kPa} = 118,8 \text{ kPa}.$$

Die Übereinstimmung ist ausreichend. Es wird mit $\Delta p_{K^+}^+ = 119$ kPa weitergerechnet. (Wäre der Abgleich nicht vorhanden, hätten $\xi_{1'}$ oder $\xi_{1''}$ verändert werden müssen.) Nunmehr ist nach Gl. (29) ξ_1 bestimmbar. Es gilt

$$\xi_1 = \frac{0,384 \frac{17,6}{1 - 0,384} + 0,287 \frac{20,5}{1 - 0,287}}{\frac{17,6}{1 - 0,384} + \frac{20,5}{1 - 0,287}} = 0,335.$$

Mit Gl. (17) folgt dann

$$\xi_2 = \frac{0,335}{1 + (1 - 0,335) \frac{2,5}{38,1}} = 0,321.$$

Damit kann entsprechend der modifizierten Gl. (19) der erforderliche Differenzdruck an der Einspeisestelle berechnet werden:

$$\Delta p_E^{++} = \Delta p_{K^+}^+ + \mu^2 \sum_{i=1}^n \Delta p_i^+ \frac{1}{(1 - \xi_i)^2}$$

$$\Delta p_E^{++} = 119 \text{ kPa} + 0,778^2 \left[25 \frac{1}{(1 - 0,335)^2} + 21 \frac{1}{(1 - 0,321)^2} \right] \text{ kPa} = 181 \text{ kPa}$$

Um den Vergleich mit der Pumpenkennlinie zu führen, muß der Massestrom an der Einspeisestelle bekannt sein. Aus Gl. (16) folgt die Überströmmenge

$$\dot{m}_U = \frac{\xi_n \mu}{1 - \xi_n} \sum_{i=1}^n \dot{m}_{N,i}^+ = \frac{\xi_n \mu}{1 - \xi_n} \dot{m}_E^+ \quad (30)$$

und damit der Gesamtmassestrom

$$\dot{m}_E^{++} = \mu \dot{m}_E^+ + \dot{m}_U = \frac{\mu}{1 - \xi_n} \dot{m}_E^+ \quad (31)$$

$$\dot{m}_E^{++} = \frac{0,778}{1 - 0,321} 40,6 \text{ kg/s} = 46,5 \text{ kg/s}.$$

Dieser Punkt der Rohrnetzkenlinie liegt direkt auf der Pumpenkenlinie (Bild 12), d. h. die Wahl der Ausgangswerte ξ_1 und ξ_2 war richtig.

Bei einer praktisch auszuführenden Anlage wäre noch die hydraulische Analyse über das gesamte Netz vorzunehmen. Die gespeicherte Wärmemenge ist nach Gl. (22) für $z = 1,11$ zu berechnen:

$$Q_{S,R} = 4,2 (150 - 60) \cdot 1,11 \cdot 0,5 (0,450 \cdot 3181 + 0,384 \cdot 2120 + 0,300 \cdot 4240 + 0,287 \cdot 3181 + 0,335 \cdot 13734 + 0,321 \cdot 7850) \text{ kW} = 2423 \text{ MWs.}$$

Variante II

In Bild 14 ist das Ersatznetz aufgezeichnet. Im Vergleich mit Bild 11 ergeben sich die den neuen Abnehmern und Teilstrecken zugeordneten Werte.

i	$\dot{m}_{N,i}^+$ kg/s	$\Sigma \dot{m}_{N,i}^+$ kg/s	$\Delta p_{A,i}^+$ kPa	Δp_i^+ kPa	m_i kg
1	19,3	19,3	124	20	4240
2	1,2	20,5	144	16	3181
3	17,6	38,1	160	25	13734
4	2,5	40,6	185	21	7850

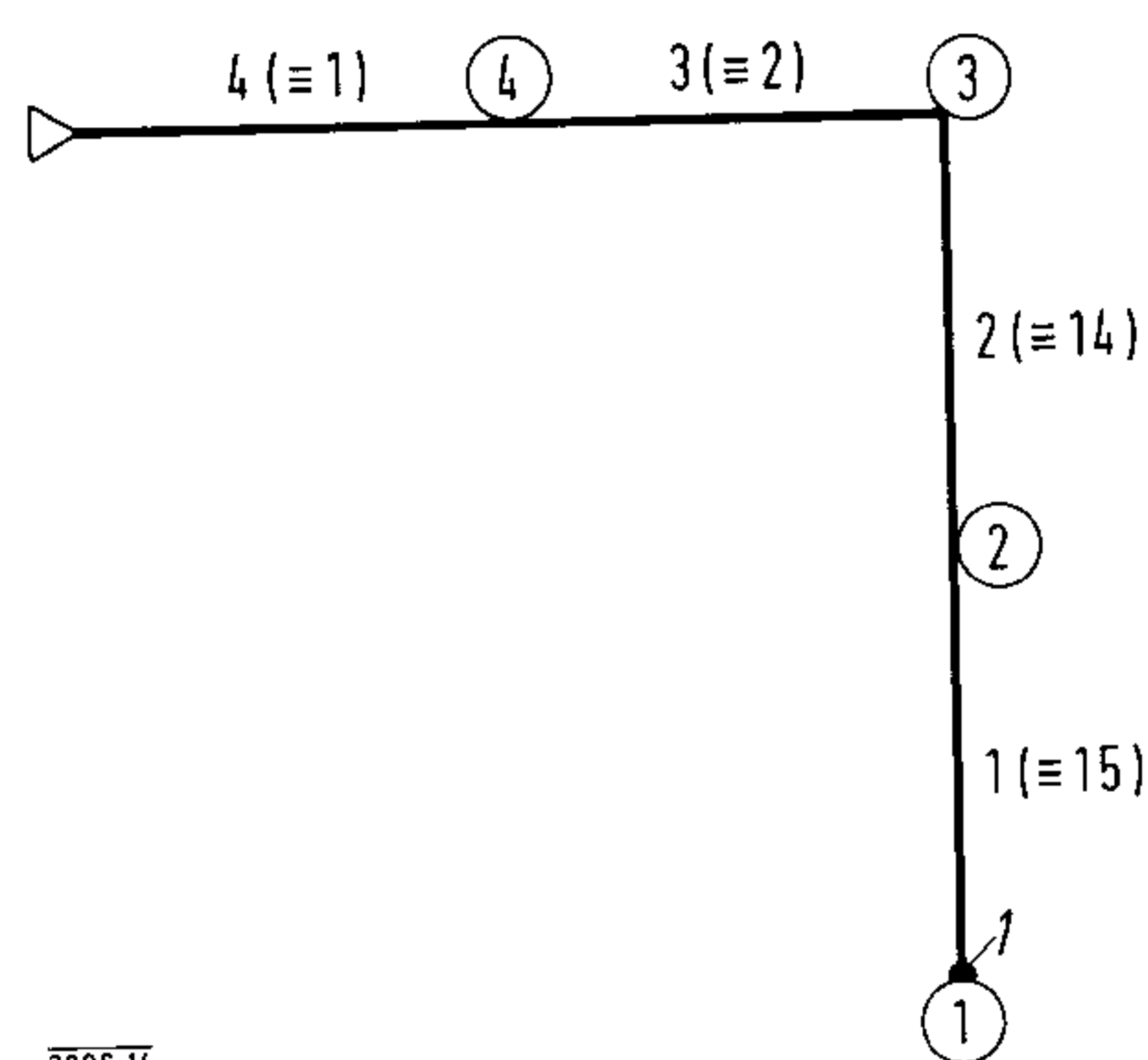


Bild 14. Ersatznetz gemäß Variante II

1 Überströmung

Der zu Beginn der Lösung ausgewiesene Grenzwert ξ_j ergibt nach kompletter Durchrechnung viel zu hohe Druckverluste. Der nach mehreren Proberechnungen zu verwendende Wert lautet $\xi_1 = 0,440$. Das wiederholte Anwenden der Gl. (17) ergibt die relativen Überströmmungen.

$$\xi_2 = \frac{0,440}{1 + (1 - 0,440) \frac{1,2}{19,3}} = 0,425; \xi_3 = 0,285; \xi_4 = 0,272.$$

Der Druckverlust des Rohrnetzes berechnet sich nach Gl. (19) und der Massestrom unter Verwendung von Gl. (31) zu

$$\Delta p_E^{++} = 197 \text{ kPa}; \dot{m}_E^{++} = 43,4 \text{ kg/s.}$$

Das Eintragen des Punktes $(\dot{m}_E^{++}, \Delta p_E^{++})$ zeigt Übereinstimmung mit der Pumpenkenlinie, so daß eine weitere Rechnung entfällt. Die gespeicherte Wärmemenge ergibt nach Gl. (22)

$$Q_{S,R} = 1944 \text{ MWs.}$$

Variante III

Das Ersatznetz für diesen Fall ist in Bild 15 dargestellt. Die hierauf zugeschnittenen Daten lauten:

i	$\dot{m}_{N,i}^+$ kg/s	$\Sigma \dot{m}_{N,i}^+$ kg/s	$\Delta p_{A,i}^+$ kPa	Δp_i^+ kPa	m_i kg
1	38,1	38,1	160	25	13734
2	2,5	40,6	185	21	7850

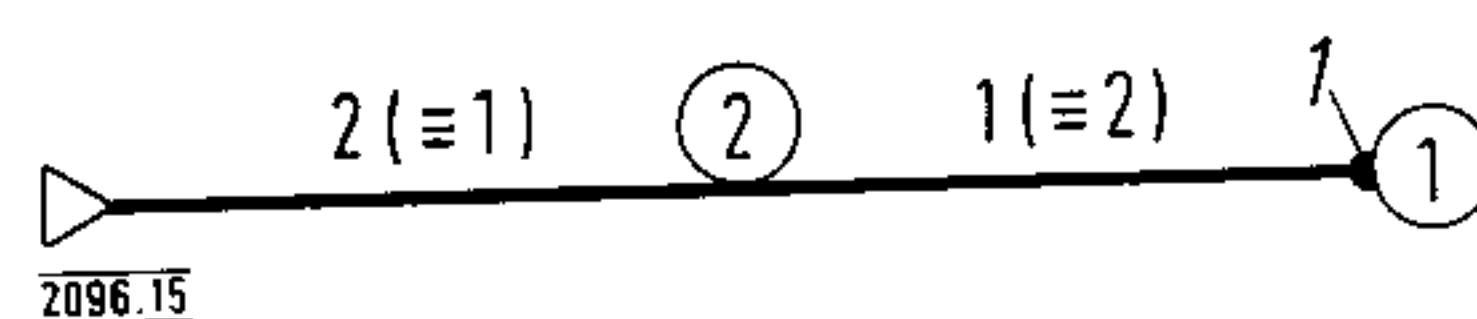


Bild 15. Ersatznetz gemäß Variante III

1 Überströmung

Mehrere Iterationen ergaben als geeigneten Ausgangspunkt $\xi_1 = 0,360$.

Mit Gl. (17), (19) und (31) folgen

$$\xi_2 = 0,345; \Delta p_E^{++} = 163 \text{ kPa}; \dot{m}_E^{++} = 48,2 \text{ kg/s.}$$

Damit berechnet sich die Speicherwärme nach Gl. (22) zu

$$Q_{S,R} = 1605 \text{ MWs.}$$

Variante IV

Der reduzierte Netzplan ist in Bild 16 vorgestellt. Die Besonderheit besteht darin, daß zwei Überströmungen (Ersatzabnehmer $j = 1$ und $j = 3$) in einem Liniennetz angeordnet sind. Damit existieren zunächst zwei freie Parameter, nämlich ξ_1 und a (Definitionsgleichung (25)). Die Netzdaten sind identisch mit denen der Variante II.

Die Variante II und III stellen zwei Grenzwerte der Variante IV dar. So ist unter dem jetzigen Gesichtspunkt bei

Variante II: $a = 0$

Variante III: $a = \infty$.

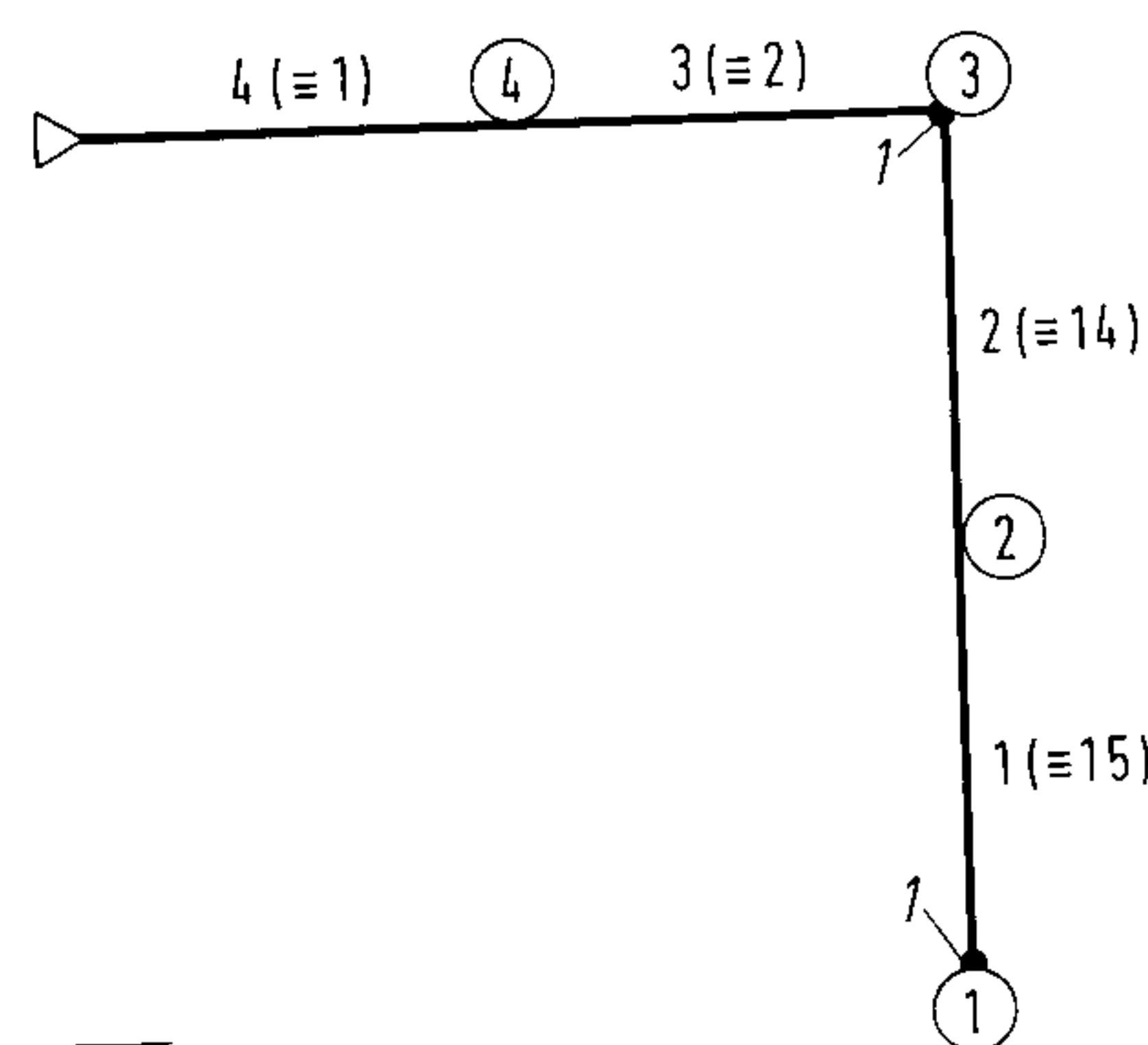


Bild 16. Ersatznetz gemäß Variante IV

1 Überströmung

Alle dazwischenliegenden Werte können Lösungen sein. Für die weiteren Untersuchungen werden $a = 0,5; 1,0; 2,0$ gewählt. Durch Iteration ist die relative Überströmmung ξ_1 so zu bestimmen, daß der Betriebspunkt auf der Pumpenkenlinie liegt. Im folgenden sind jeweils nur die letzten Iterationswerte wiedergegeben.

$a = 0,5$:

Ausgehend von $\xi_1 = 0,379$ folgen nach

$$\text{Gl. (17)} \xi_2 = \frac{0,379}{1 + (1 - 0,379) \frac{1,2}{19,3}} = 0,365$$

$$\text{Gl. (26)} \xi_3 = \frac{0,365 (0,5 + 1)}{0,5 \cdot 0,365 + 1 + (1 - 0,365) \frac{17,6}{20,5}} = 0,317$$

$$\text{Gl. (17)} \xi_4 = \frac{0,317}{1 + (1 - 0,317) \frac{2,5}{38,1}} = 0,303.$$

Der Netzdruckverlust ergibt sich nach Gl. (19)

$$\Delta p_E^{++} = 0,778^2 \left[124 + 20 \frac{1}{(1 - 0,379)^2} + 16 \frac{1}{(1 - 0,365)^2} \right]$$

$$+ 25 \frac{1}{(1 - 0,317)^2} + 21 \frac{1}{(1 - 0,303)^2} \Big] \text{ kPa} = 189 \text{ kPa}.$$

Der Massestrom beträgt nach Gl. (31)

$$\dot{m}_E^{++} = \frac{0,778}{1 - 0,303} 40,6 \text{ kg/s} = 45,3 \text{ kg/s}.$$

Entsprechend Gl. (22) berechnet sich

$$Q_{S,R} = 4,2 (150 - 60) \cdot 1,11 \cdot 0,5 (0,379 \cdot 4240 + 0,365 \cdot 3181 + 0,317 \cdot 13734 + 0,303 \cdot 7850) \text{ kW} = 1993 \text{ MWs}.$$

Für die veränderten Überströmmen a werden die Endergebnisse nur tabellarisch mitgeteilt:

a	$Q_{S,R}$ MWs
0	1944
0,5	1993
1	1971
2	1909
∞	1605

Der bei Variante I erreichte Wert $Q_{S,R} = 2423 \text{ MWs}$ liegt aber noch über den genannten Ergebnissen.

Zusammenfassung

Bei geregelten Abnehmerstationen kann infolge erhöhter Vorlauftemperatur im Netzvorlauf stets Wärmeenergie gespeichert werden. Im Netzurücklauf ist dies nur nach zusätzlichem Einbau von Überströmeinrichtungen möglich. Da der Massestrom vom Vorzum Rücklauf durch die Randbedingungen

- Massestrombegrenzung,
- hydraulische Begrenzung,

- Kennlinienbegrenzung und
- thermische Begrenzung

eingeschränkt sein kann, gibt es für das Speichervermögen im Netzurücklauf bei fest vorgegebenen Überströmungen einen technisch bedingten Maximalwert. Beeinflusst wird dieser Maximalwert in entscheidendem Maße noch von der Anzahl und der Lage der Überströmeinrichtungen. Da die Variationsmöglichkeiten sehr groß und netzspezifisch sind, können pauschale Aussagen über das Wärmespeichervermögen und die optimale Anordnung der Überströmeinrichtungen nicht getroffen werden. Vielmehr sind Variantenvergleiche erforderlich. Dabei ist zu beachten, daß sich die thermische und hydraulische Begrenzung oft nur auf einzelne Netzteile bezieht. Ausgehend von den gewählten Überströmeinrichtungen, sollte ein vereinfachter Netzplan, der die jeweiligen Netzteile zwischen Überströmeinrichtungen und Peripherie als ein Ersatzabnehmer erfaßt, aufgestellt werden. Berechnungsgleichungen für den charakteristischen Parameter »relative Überströmmenge« wurden für Teilstrecken mit einem dazwischenliegenden Abnehmer, einer zusätzlich angeordneten Überströmeinrichtung und für Netzknoten ausgearbeitet. Für die Anordnung von Überströmeinrichtungen gelten folgende Hinweise:

- Zu bevorzugen sind zentrale Netzknoten, da dort in der Regel begehbare Bauwerke vorhanden sind und relativ große Masseströme übergeleitet werden können.
- Die Teilstrecken mit großen Rohrdurchmessern sind in die Netzspeicherung einzubeziehen. Eine zusätzliche Vergrößerung der Teilstreckendurchmesser sollte allerdings unterbleiben.
- Es sind möglichst wenig Überströmeinrichtungen vorzusehen. Eine Überströmung an jedem Abnehmer in Verbindung mit einer Bypassregelung wäre sehr ungünstig, da dann auch in lastschwachen Zeiten der Rücklauf aufgeheizt würde.

Zahlreiche Berechnungen haben gezeigt, daß bei geeigneter Lage der Überströmeinrichtungen im Rücklauf durchaus die gleiche Wärmemenge wie im Vorlauf gespeichert werden kann.