Wärmespeicherung in Wärmenetzen des Abnehmerbereiches (III) Speicherfähigkeit der Netze – Beispiele [1)]

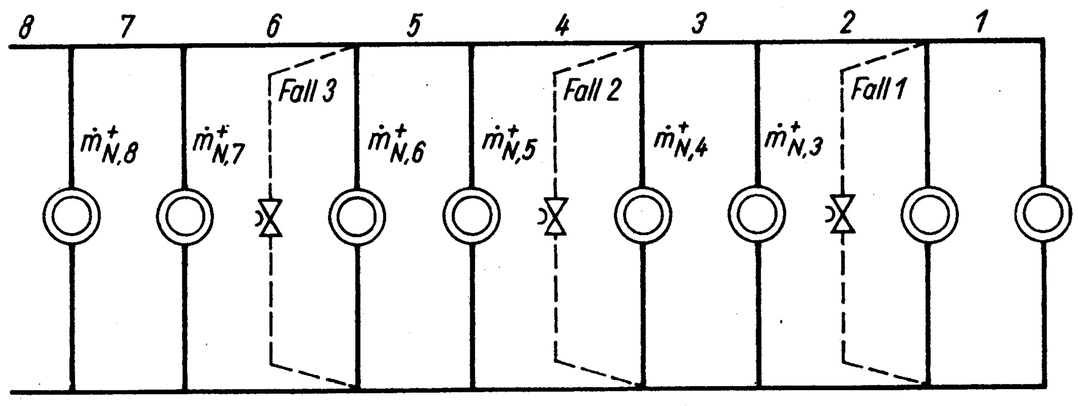
Dr. sc. techn. B. GLÜCK
VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung – Institut –

Beispiel 1

Ein Wärmenetz wird im Auslegungsfall mit $t^{+}_{V,N}$ = 125 °C und $t^{+}_{R,N}$ = 65 °C betrieben. Diese Werte gelten für alle Abnehmer. Zum Aufheizen steht eine Vorlauftemperatur von t^{++}_{VN} = 150 °C zur Verfügung. Die Abnehmer sind direkt über Beimischstationen angeschlossen. Die eingebaute Regelung bewirkt im Vollastfall stets konstante Rücklauftemperaturen. Die Netzgeometrie sowie die Druckverluste, Massenströme (Auslegungsfall) und die Wasserinhalte der Teilstrecken – zusammengefaßt für Vor- und Rücklauf – sind im Bild 1 vermerkt.

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

[1)] Alle Gleichungsnummern beziehen sich auf Teil II.



Netzmassenströme durch die Abnehmer im Auslegungsfall 1

$\dot{m}^+_{N,1} = \dot{m}^+_{N,2} = \dot{m}^+_{N,3} = \dot{m}^+_{N,4} = \dot{m}^+_{N,5} = \dot{m}^+_{N,6} =$
$\dot{m}^+_{N,7} = \dot{m}^+_{N,8} = 4{,}2$ kg/s

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

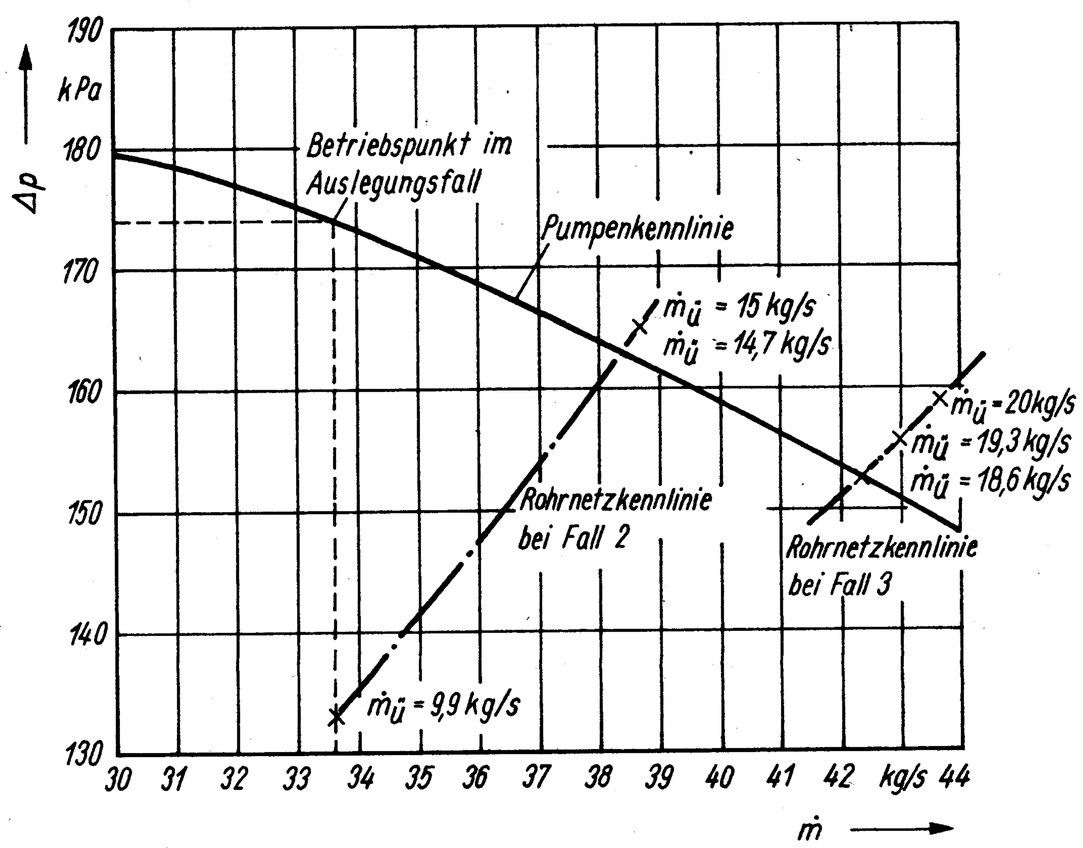
TS	8	7	6	5	4	3	2	1
NW in mm	200	150	150	150	150	150	100	80
m_W in kg	7200	1800	1700	1900	1800	1770	785	528
z			≈ 1,11				≈ 1,14	

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

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

Druckverlust des letzten Abnehmers im Auslegungsfall

$\Delta p^+_{A,1} = 80$ kPa



Temperatur t_{Rzul} = 110 °C. Als weitere Restriktionen sind anzunehmen:
Variante I
Massenstrombegrenzung und hydraulische Begrenzung
Variante II
Kennlinienbegrenzung.

Für diesen Fall gilt die im Bild 2 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 Prozent auf die Vor- und Rücklaufleitung verteilen. Somit gilt

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

$Q_{S,V} = 1045$ MWs.

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 Massenstromverhältnis für alle Abnehmer

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

Damit lassen sich alle Abnehmermassenströme 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

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

Fall 2

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

Fall 3

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

Weiter sind bei *Variante I* die Massenstrombegrenzung und die hydraulische Begrenzung zu beachten.
Aufgrund der erstgenannten Restriktion darf die maximale Überströmmenge nach Gl. (3)
$\dot{m}_Ü = 8 \cdot 4{,}2 \cdot (1 - 0{,}706)$ kg/s = 9,9 kg/s
betragen.
Die Ergebnisse sagen aus, daß bei Fall 1 der Massenstrom $\dot{m}_Ü$ = 6,7 kg/s und bei den Fällen 2 bzw. 3 der Massenstrom $\dot{m}_Ü$ = 9,9 kg/s nicht überschritten werden darf.
Die hydraulische Begrenzung ist an Hand der Gl. (7) zu überprüfen. Als Vergleichswert dient der Druckverlust im Auslegungszustand.
Er ergibt sich zu $\Delta p^+_E = 174$ kPa.
Zunächst werden die oben ermittelten, maximalen Überströmmengen in die Berechnungsgleichung eingesetzt:

Fall 1

$$\Delta p^{++}_E = \Bigg[(80 + 10) \cdot 0{,}706^2 + 14 \left(\frac{6{,}7 + 8{,}4 \cdot 0{,}706}{8{,}4} \right)^2 + 5 \left(\frac{6{,}7 + 12{,}6 \cdot 0{,}706}{12{,}6} \right)^2 + 5 \left(\frac{6{,}7 + 16{,}8 \cdot 0{,}706}{16{,}8} \right)^2 + 12 \left(\frac{6{,}7 + 21 \cdot 0{,}706}{21} \right)^2 + 17 \left(\frac{6{,}7 + 25{,}2 \cdot 0{,}706}{25{,}2} \right)^2 + 24 \left(\frac{6{,}7 + 29{,}4 \cdot 0{,}706}{29{,}4} \right)^2 + 7 \left(\frac{6{,}7 + 33{,}6 \cdot 0{,}706}{33{,}6} \right)^2 \Bigg]\ \text{kPa}$$

$\Delta p^{++}_E = 146$ kPa < 174 kPa.

Fall 2

$$\Delta p^{++}_E = \Bigg[(80 + 10 + 14 + 5)\, 0{,}706^2 + 5 \left(\frac{9{,}9 + 16{,}8 \cdot 0{,}706}{16{,}8} \right)^2 + 12 \left(\frac{9{,}9 + 21 \cdot 0{,}706}{21} \right)^2 + 17 \left(\frac{9{,}9 + 25{,}2 \cdot 0{,}706}{25{,}2} \right)^2 + 24 \left(\frac{9{,}9 + 29{,}4 \cdot 0{,}706}{29{,}4} \right)^2 + 7 \left(\frac{9{,}9 + 33{,}6 \cdot 0{,}706}{33{,}6} \right)^2 \Bigg]\ \text{kPa}$$

$\Delta p^{++}_E = 133$ kPa < 174 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 $t_{R\,i}^{++}$ gemäß Gl. (13) bestimmt und danach die gespeicherte Wärmemenge für diese Teilstrecke ermittelt. Die Addition liefert schließlich die gesamte Speicherwärme. Im einzelnen gelten für

Fall 1

TS 1: keine Wärmespeicherung möglich

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

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

$$Q_{S,R,2} = 4{,}2 \cdot 785 \cdot 0{,}5 \cdot 1{,}14\,(110 - 65)\ \text{kWs} = 84\,568\ \text{kWs}$$

TS 3: $t_{R,3}^{++} = 101{,}5$ °C; $Q_{S,R,3} = 150\,594$ kWs
TS 4: $t_{R,4}^{++} = 95{,}7$ °C; $Q_{S,R,4} = 128\,811$ kWs
TS 5: $t_{R,5}^{++} = 91{,}5$ °C; $Q_{S,R,5} = 117\,366$ kWs
TS 6: $t_{R,6}^{++} = 88{,}3$ °C; $Q_{S,R,6} = 92\,331$ kWs
TS 7: $t_{R,7}^{++} = 85{,}7$ °C; $Q_{S,R,7} = 86\,853$ kWs
TS 8: $t_{R,8}^{++} = 83{,}7$ °C; $Q_{S,R,8} = 313\,846$ kWs

Die in der Rücklaufleitung gespeicherte Wärmemenge beträgt somit bei der entferntesten Überströmung (Fall 1)
$Q_{S,R} = 974$ MWs.

Fall 2

In den Teilstrecken 1, 2 und 3 erfolgt keine Wärmespeicherung. Für die restlichen Teilstrecken ergibt sich nach Addition der Einzelwerte
$Q_{S,R} = 968$ MWs.

Fall 3

Bei dieser Lage der Überströmung reduziert sich die Speicherung auf die Teilstrecken 6, 7 und 8. Die im Rücklauf gespeicherte Gesamtwärmemenge beträgt
$Q_{S,R} = 655$ MWs.
Für die *Variante II* soll gemäß Aufgabenstellung die Kennlinienbegrenzung außer der thermischen Begrenzung charakteristisch sein.

Fall 1

Die Überströmung, die nahe dem Netzende liegt, ist mengenmäßig wie bei Variante I durch die maximale Rücklauftemperatur von 110 °C begrenzt. Somit gelten auch hier
$\dot{m}_U = 6{,}7$ kg/s und $Q_{S,R} = 974$ MWs.
Der von der Umwälzpumpe zu fördernde Massenstrom beträgt
$\dot{m}_E^{++} = \mu \dot{m}_E^{+} + \dot{m}_U = (33{,}6 \cdot 0{,}706 + 6{,}7)$ kg/s $= 30{,}4$ kg/s,
wozu gemäß Bild 2 ein Pumpendruck von $\Delta p_p = 179$ kPa gehört. Die erforderliche Druckdifferenz beträgt nach Variante I, Fall 1, $\Delta p_E^{++} = 146$ kPa. Der Restdruck ist wegzudrosseln, falls keine drehzahlgeregelten Pumpen eingesetzt werden.

Fall 2

Zunächst wird die Rohrnetzkennlinie 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 galten:
$\dot{m}_U = 9{,}9$ kg/s; $\dot{m}_E^{++} = 33{,}6$ kg/s; $\Delta p_E^{++} = 133$ kPa.
Die weitere Annahme
$\dot{m}_U = 15$ kg/s; $\dot{m}_E^{++} = 38{,}7$ kg/s
liefert

$$\Delta p_E^{++} = \Bigg[(80 + 10 + 14 + 5) \cdot 0{,}706^2 + 5\left(\frac{15 + 16{,}8 \cdot 0{,}706}{16{,}8}\right)^2$$

$$+ 12\left(\frac{15 + 21 \cdot 0{,}706}{21}\right)^2 \quad + 17\left(\frac{15 + 25{,}2 \cdot 0{,}706}{25{,}2}\right)^2$$

$$+ 24\left(\frac{15 + 29{,}4 \cdot 0{,}706}{29{,}4}\right)^2 \quad + 7\left(\frac{15 + 33{,}6 \cdot 0{,}706}{33{,}6}\right)^2 \Bigg]\ \text{kPa}$$

$\Delta p_E^{++} = 165$ kPa.
Mit diesen Daten kann im Bild 2 eine Kurve aufgezeichnet werden, die im Schnittpunkt mit der Pumpenkennlinie
$\dot{m}_U = 14{,}7$ kg/s; $\dot{m}_E^{++} = 38{,}4$ kg/s
ergibt. Die Nachrechnung bestätigt den Interpolationswert $\Delta p_E^{++} = 163$ kPa. Es zeigt sich, daß die thermische Begrenzung einen niedrigeren Wert $\dot{m}_U = 13{,}3$ 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 $\Delta p_E^{++} < \Delta p_p$ hierfür galt, hätte die Kennlinienberechnung entfallen können. Zur Komplettierung des Beispiels sollte dies aber ausführlich dargestellt werden). Zugehörig zur maximalen Überströmung gelten die Werte
$\dot{m}_E^{++} = 37{,}0$ kg/s; $\Delta p_p = 166$ kPa.
Mit den Gln. (13) und (12) sind die Teilstreckentemperaturen und partiellen Speicherwärmen berechenbar. Beispielsweise gilt für TS 4: $t_{R\,,4}^{++} = 109{,}9$ °C; $Q_{S,R,4} = 188\,391$ kWs.
Die Summation ergibt die gespeicherte Wärmemenge
$Q_{S,R} = 1\,162$ MWs.

Fall 3

Zur Ermittlung der Rohrnetzkennlinie wird mit dem Wert
$\dot{m}_U = 20$ kg/s bzw. $\dot{m}_E^{++} = 43{,}7$ kg/s
begonnen. Der erforderliche Druck an der Einspeisestelle beträgt dann

$$\Delta p_E^{++} = \Bigg[(80 + 10 + 14 + 5 + 5 + 12)\, 0{,}706^2$$

$$+ 17\left(\frac{20 + 25{,}2 \cdot 0{,}706}{25{,}2}\right)^2 \quad + 24\left(\frac{20 + 29{,}4 \cdot 0{,}706}{29{,}4}\right)^2$$

$$+ 7\left(\frac{20 + 25{,}2 \cdot 0{,}706}{33{,}6}\right)^2 \Bigg]\ \text{kPa} = 159\ \text{kPa}.$$

Weitere Werte der Rohrnetzkennlinie sind:
$\dot{m}_U = 19{,}3$ kg/s; $\dot{m}_E^{++} = 43{,}0$ kg/s; $\Delta p_E^{++} = 156$ kPa
$\dot{m}_U = 18{,}6$ kg/s; $\dot{m}_E^{++} = 42{,}3$ kg/s; $\Delta p_E^{++} = 152$ kPa.
Die letztgenannte Druckdifferenz ist mit dem Pumpendruck identisch. Entsprechend der Gln. (13) und (12) ergibt sich die gesamte im Rücklauf gespeicherte Wärmemenge zu
$Q_{S,R} = 968$ MWs.

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 (η = 100 %)! – gebildet aus $\left(\Delta p_p \frac{\dot{m}_E}{\varrho}\right)$ – angegeben. Bei Netzvolladung ergeben sich:

Variante	Fall	Speicherwärme im Vorlauf in MWs	Speicherwärme im Rücklauf in MWs	Pumpenenergie*) in kW
I	1		974	
	2		968	
	3	1 045	655	
II	1		974	5,55**)
	2		1 162	6,27**)
	3		968	6,56

*) Auslegungsleistung: 5,97 kW **) 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 Gesamtmassenstromes ist dabei sogar ein höherer Speicherwert als im Vorlauf zu erreichen. Der Energieaufwand für die Umwälzpumpen steigt allerdings um sieben Prozent.

Beispiel 2

Die im Beispiel 1 gegebene Aufgabe soll mit Hilfe der vereinfachten Maximierung der Speicherwärme gelöst werden. Die Daten des Bildes 1 gelten weiterhin. Als Restriktionen sind die thermische Begrenzung und die Kennlinienbegrenzung (Bild 2) zu beachten, wobei die Pumpenkennlinie bis $\dot{m} = 44$ 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)

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

Da die Nachrechnung der Drücke gemäß Gl. (19) erst nach Kenntnis aller ξ_i-Werte durchführbar ist, wird diese Ermittlung, ausgehend von ξ_j, nach Gl. (17) zunächst vorgenommen. Die Überströmstelle j sei dabei nacheinander den Abnehmern $i = 1 \ldots n$ zugeordnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 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 Überströmmengen entsprechend Gl. (16) nach erfolgter Umstellung berechnet. Der Gesamtmassenstrom an der Einspeisestelle ergibt sich dann weiter zu

$$\dot{m}_E^{++} = \mu \dot{m}_E^{+} + \dot{m}_Ü.$$

Alle Ergebnisse sind tabellarisch erfaßt. Der Vergleich mit den Grenzwerten zeigt, daß bei Anordnung der Überströmrichtung 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 Massenstrom $\dot{m}_Ü$ reduziert werden, da die Pumpe den erforderlichen Umtriebsdruck nicht bereitstellen kann (Kennlinienbegrenzung). Bei der Anordnung der Überströmeinrichtung am Abnehmer 7 bzw. 8 muß $\dot{m}_Ü$ ebenfalls verringert werden, da der Gesamtmassenstrom $\dot{m}_E^{++} > 44$ kg/s beträgt (seitliche Kennlinienbegrenzung gemäß Aufgabenstellung). Werden diese Restriktionen noch eingearbeitet, so verkleinert sich der Betrag der technisch möglichen Speicherwärme weiter.

Das Maximum bleibt jedoch mit $Q_{S,R} = 1\,164$ 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 Tabelle unter den entsprechenden Begrenzungen eingetragen. Es sei abschließend darauf hingewiesen, daß die Werte für den Fall 6** 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 Prozent des Maximalwertes 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 im Bild 3 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

angeordnet sind. Das Netz wird im Vollastfall mit den Temperaturen 130 °C/60 °C und während des Ladevorganges mit maximal $t_{VE}^{++} = 150$ °C betrieben. Alle Abnehmer sind direkt

Tabelle 1

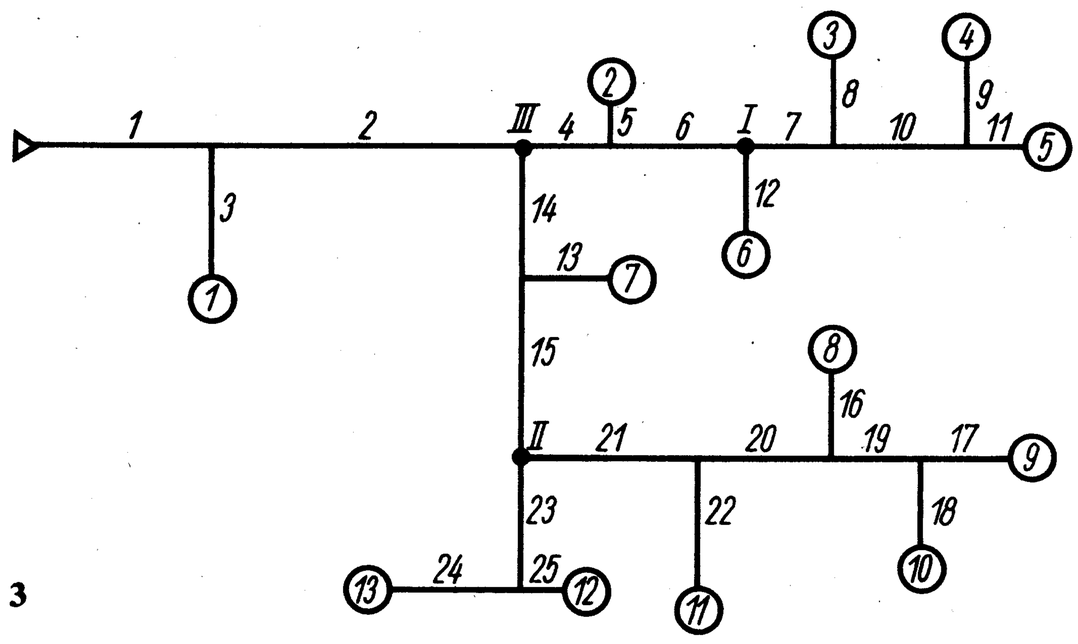
	j = Überströmung am Abnehmer											
	1	2	3	4	5		6		7		8	
	*	*	*	*	*	**	*	**	*	***	*	***
ξ_1	0,529											
ξ_2	0,360	0,529										
ξ_3	0,272	0,428	0,529									
ξ_4	0,219	0,360	0,457	0,529								
ξ_5	0,183	0,310	0,403	0,473	0,529	0,517						
ξ_6	0,158	0,272	0,360	0,428	0,483	0,471	0,529	0,511				
ξ_7	0,138	0,243	0,325	0,391	0,445	0,433	0,490	0,472	0,529	0,494		
ξ_8	0,123	0,219	0,296	0,360	0,412	0,401	0,457	0,439	0,496	0,461	0,529	0,461
$Q_{S,R}$ in MWs	635	970	1160	1164	1108	1080	1005	967	896	834	755	658
Δp_E^{++} in kPa	130	145	142	154	164	160	159	152	139	130	99	95
$\dot{m}_Ü$ in 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
$\dot{m}_E^{++}$ in 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

Zeichenerklärung: * thermische Begrenzung
** Kennlinienbegrenzung
*** seitliche Kennlinienbegrenzung

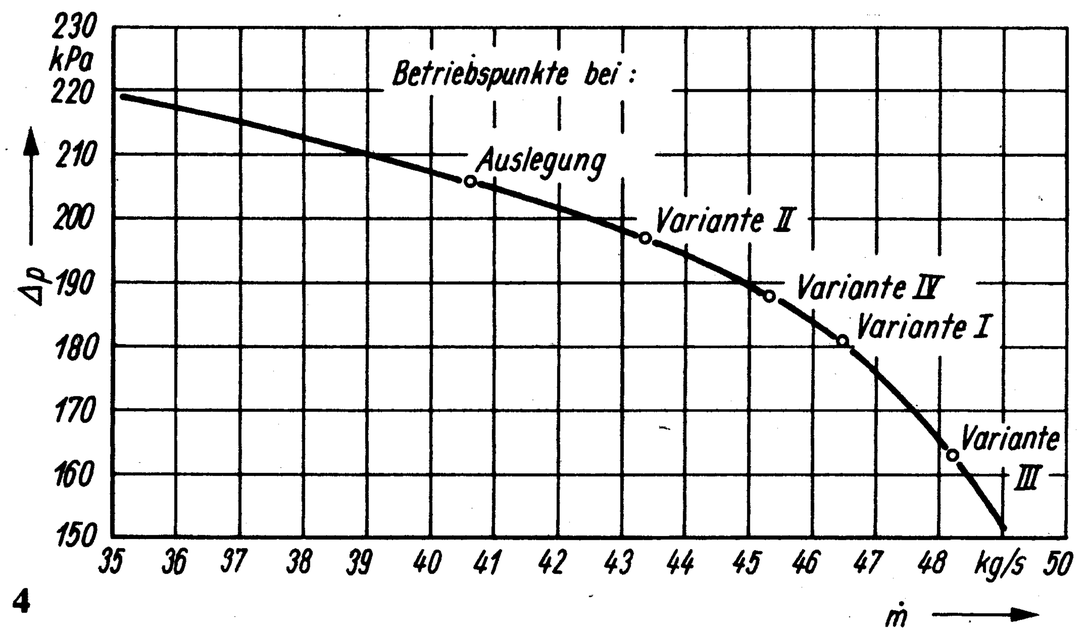
Tabelle 2

Teil-strecke	$\dot{m}^+$ kg/s	m kg	Δp^+ kPa
1	40,6	7 850	21
2	38,1	13 734	25
3	2,5	380	185
4	17,6	2 120	10
5	4,2	230	150
6	13,4	3 181	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	3 181	16
15	19,3	4 240	20
16	3,4	460	112
17	3,0	460	94
18	3,0	450	94
19	6,0	640	18
20	9,4	3 180	3
21	13,5	4 240	9
22	4,1	693	115
23	5,8	970	34
24	2,8	380	90
25	3,0	693	90

Die Masseninhalte m und die Druckverluste Δp gelten für die zusammengehörigen Vor- und Rücklaufleitungen. Bei den Abnehmerteilstrekken sind in den Δp-Werten auch die erforderlichen Abnehmer-Differenzdrücke enthalten.



3



4

angeschlossen und halten die Rücklauftemperatur in erster Näherung konstant. Die charakteristischen Netzdaten sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die Nennweiten der Rücklaufleitungen, die in Fließrichtung hinter den möglichen Überströmrichtungen liegen, betragen (150 . . . 200) mm.
Als Randbedingungen sind die Temperaturbegrenzung des Rücklaufs auf ≦ 130 °C und die im Bild 4 gegebene Pumpenkennlinie zu betrachten.

Lösung

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

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

Es gilt für alle zu untersuchenden Varianten.
Das Massenstromverhältnis 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 im Bild 5 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" ≡ 2), (2" ≡ 7) und (2 ≡ 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 Summenmassenstrom alle Verzweigungen zusammenfaßt. Wie die Berechnungen zeigen, ergeben relative Überströmmengen $\xi_{1'}$ 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:
$\xi_{1'} = 0{,}450$; $\xi_{1''} = 0{,}300$.

Nach Gl. (17) ergeben sich dann

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

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

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 ξ_1 nach Gl. (29) bestimmbar. Es gilt

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

Mit Gl. (17) folgt dann

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

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

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

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

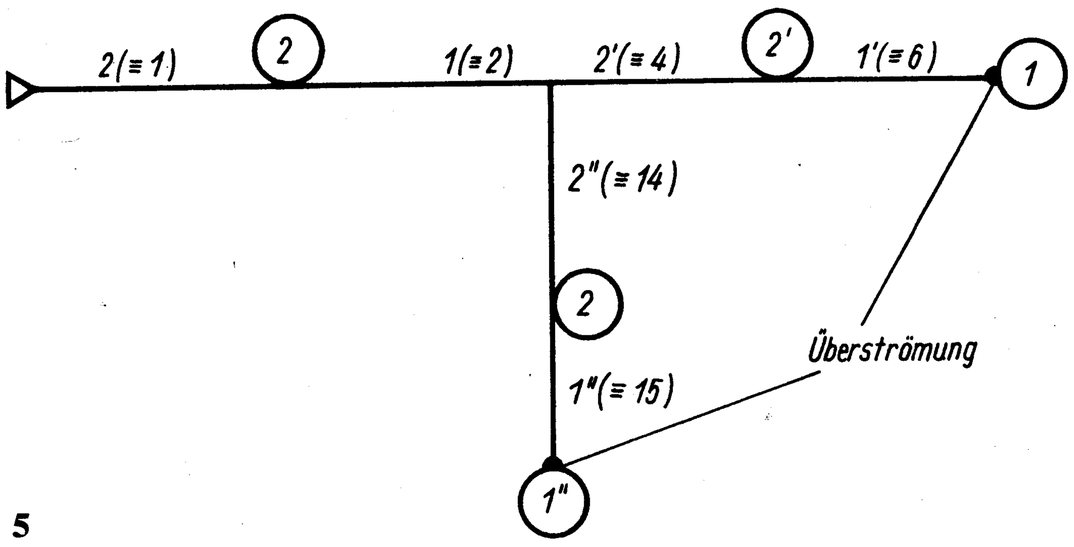
Um den Vergleich mit der Pumpenkennlinie zu führen, muß der Massenstrom an der Einspeisestelle bekannt sein. Aus Gl. (16) folgt die Überströmmenge

$$\dot{m}_Ü = \frac{\xi_n \mu}{1-\xi_n} \sum_{i=1}^{n} \dot{m}^+_{N,i} \equiv \frac{\xi_n \mu}{1-\xi_n} \dot{m}^+_E$$

und damit der Gesamtmassenstrom (*)

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

Dieser Punkt der Rohrnetzkennlinie liegt direkt auf der Pumpenkennlinie (Bild 4), d.h. die Wahl der Ausgangswerte $\xi_{1'}$ und $\xi_{2'}$ 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:



5

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

Variante II

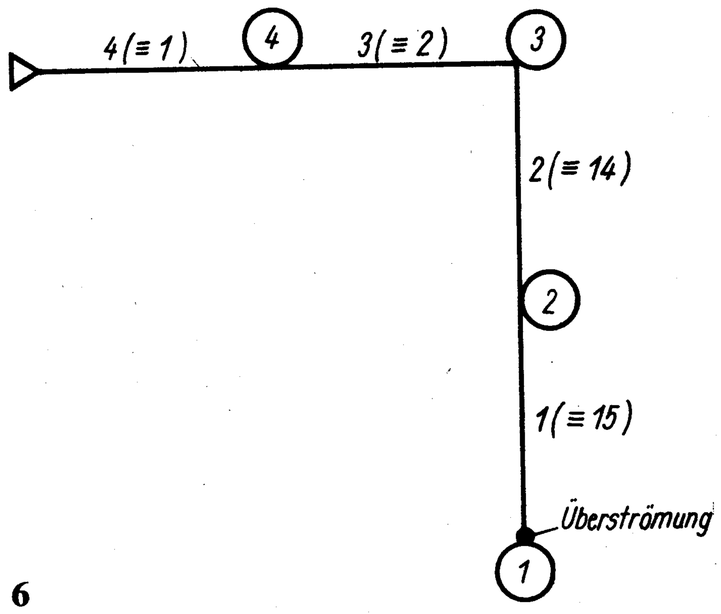
Im Bild 6 ist das Ersatznetz aufgezeichnet. Im Vergleich mit Bild 3 ergeben sich die den neuen Abnehmern und Teilstrecken zugeordneten Werte.

i	$\dot{m}_{N,i}^{+}$ kg/s	$\Sigma\dot{m}_{N,i}^{+}$ kg/s	$\Delta p_{A,i}^{+}$ kPa	$\Delta \bar{p}_i^{+}$ kPa	m_i kg
1	19,3	19,3	124	20	4 240
2	1,2	20,5	144	16	3 181
3	17,6	38,1	160	25	13 734
4	2,5	40,6	185	21	7 850

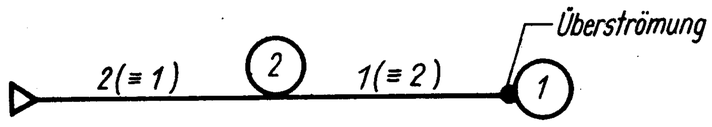
Der zu Beginn der Lösung ausgewiesene Grenzwert ξ_j ergibt nach kompletter Durchrechnung viel zu hohe Druckverluste. Der nach mehreren Proberechnungen zu verwendende Wert lautet $\zeta_1 = 0{,}440$. Das wiederholte Anwenden der Gl. (17) ergibt die relativen Überströmmengen

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

Der Druckverlust des Rohrnetzes berechnet sich nach Gl. (19) und der Massenstrom unter Verwendung von Gl. (*) zu
$\Delta \bar{p}_E^{++} = 197$ kPa; $\dot{m}_E^{++} = 43{,}4$ kg/s.
Das Eintragen des Punktes ($\dot{m}_E^{++}$, Δp_E^{++}) zeigt Übereinstimmung mit der Pumpenkennlinie, so daß eine weitere Rechnung entfällt.



6



7

Die gespeicherte Wärmemenge ergibt nach Gl. (22)
$Q_{S,R} = 1\,944$ MWs.

Variante III

Das Ersatznetz für diesen Fall ist im Bild 7 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	$\Delta \bar{p}_i^{+}$ kPa	m_i kg
1	38,1	38,1	160	25	13 734
2	2,5	40,6	185	21	7 850

Mehrere Iterationen ergaben als geeigneten Ausgangspunkt $\zeta_1 = 0{,}360$.
Mit den Gln. (17), (19) und (*) folgen
$\zeta_2 = 0{,}345$; $\Delta \bar{p}_E^{++} = 163$ kPa; $\dot{m}_E^{++} = 48{,}2$ kg/s.
Damit berechnet sich die Speicherwärme nach Gl. (22) zu
$Q_{S,R} = 1\,605$ MWs.

Variante IV

Der reduzierte Netzplan ist im Bild 8 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 α (Definitionsgleichung (25)). Die Netzdaten sind identisch mit denen der Variante II.
Die Varianten II und III stellen zwei Grenzwerte der Variante IV dar. So ist unter dem jetzigen Gesichtspunkt bei
Variante II : $\alpha = 0$
Variante III: $\alpha = \infty$.
Alle dazwischen liegenden Werte können Lösungen sein. Für die weiteren Untersuchungen werden $\alpha = 0{,}5;\ 1{,}0;\ 2{,}0$ gewählt. Durch Iteration ist die relative Überströmmenge ξ_1 so zu bestimmen, daß der Betriebspunkt auf der Pumpenkennlinie liegt. Im folgenden sind jeweils nur die letzten Iterationswerte wiedergegeben.
$\alpha = 0{,}5$
Ausgehend von $\xi_1 = 0{,}379$ folgen nach

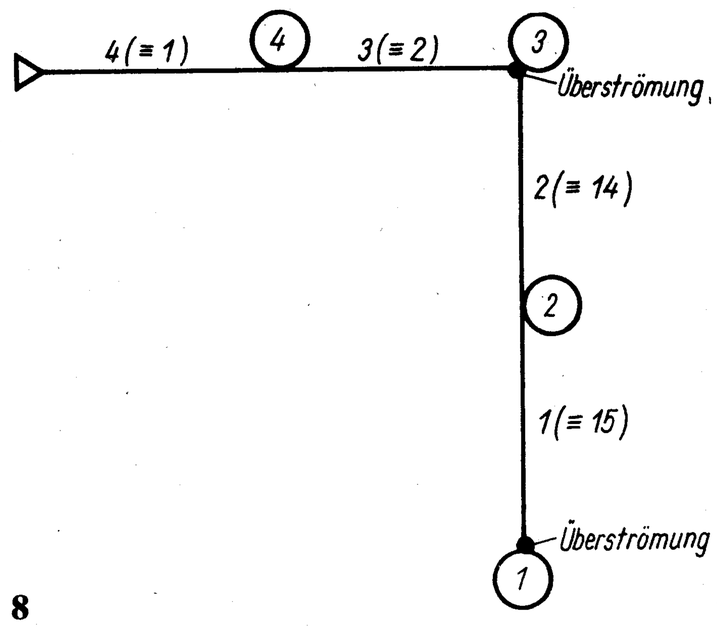
$$\text{Gl. (17)}\quad \xi_2 = \frac{0{,}379}{1+(1-0{,}379)\dfrac{1{,}2}{19{,}3}} = 0{,}365$$

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

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

Der Netzdruckverlust ergibt sich nach Gl. (19)

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



8

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

Der Massenstrom beträgt nach Gl. (*)

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

Entsprechend Gl. (22) berechnet sich

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

Für die veränderten Überströmmengen α werden die Endergebnisse nur tabellarisch mitgeteilt:

α	$Q_{S,R}$ MWs
0	1 944
0,5	1 993
1	1 971
2	1 909
∞	1 605

Der bei Variante I erreichte Wert $Q_{S,R}$ = 2 423 MWs liegt aber noch über den genannten Ergebnissen.

Zusammenfassung

Bei geregelten Abnehmerstationen kann infolge erhöhter Vorlauftemperatur im Netzvorlauf stets Wärmeenergie gespeichert werden. Im Netzrücklauf ist dies nur nach zusätzlichem Einbau von Überströmeinrichtungen möglich. Da der Massenstrom vom Vor- zum Rücklauf durch die Randbedingungen

- Massenstrombegrenzung
- hydraulische Begrenzung
- Kennlinienbegrenzung
- thermische Begrenzung

eingeschränkt sein kann, gibt es für das Speichervermögen im Netzrücklauf 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 Überströmeinrichtung und Peripherie als ein Ersatzabnehmer erfaßt, aufgestellt werden. Berechnungsgleichungen für den charakteristischen Parameter „relative Überströmmenge ξ" wurden für Teilstrecken mit einem dazwischen liegenden 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 Massenströme 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.