Wärmespeicherung in Wärmenetzen des Abnehmerbereiches (I) Schaltungen der Abnehmer und thermodynamische Approximationen

Dr. sc. techn. B. GLÜCK
VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung – Institut –
(Fortsetzung von Heft 5/1982)

Beispiel 3

Ein industrieller Wärmeverbraucher entnimmt über eine nach Bild 5 geschaltete Anschlußstation einen Wärmestrom von $\dot{Q}^+ = 1$ MW für die Raumheizung. Die technologisch benötigte Warmwassermenge schwankt zwischen $\dot{m}_{WW} = 2000$ kg/h und $\dot{m}_{WW} = 4000$ kg/h. Diese Wassermenge wird als Kaltwasser durch den im Rücklauf angeordneten Rohrbündel-Wärmeübertrager mit der Heizfläche $A = 6{,}9\ m^2$ gesetzt.
Im Auslegungsfall wurden folgende Werte gemessen:

$t^+_{V,N} = 130\ °C$; $t^+_{R,N} = 65\ °C$; $t'_{WW} = 10\ °C$; $t^*_{R,N} = 55\ °C$;

$\dot{m}_{WW} = 4000$ kg/h.

Der Wärmedurchgangskoeffizient ist sowohl von den Temperaturen als auch von den Massendurchsätzen abhängig. Dominierenden Einfluß zeigt die sekundärseitig durchgesetzte Wassermenge. Näherungsweise hat die Beziehung $k = k^+ (\dot{m}_{WW}/\dot{m}^+_{WW})^{0,72}$ Gültigkeit.
Es soll überprüft werden, welche Temperatur- und Leistungswerte sich bei einer Steigerung der Primärvorlauftemperatur auf 140 °C bzw. 150 °C einstellen, wenn im *Fall a* $\dot{m}_{WW} = 4000$ kg/h und im *Fall b* $\dot{m}_{WW} = 2000$ kg/h betragen.

Lösung

Zunächst werden für den Auslegungsfall die fehlenden Parameter ermittelt. Nach Gl. (9) ergibt sich für den Massenstrom

$$\dot{m}^+_N = \frac{10^6}{4200\,(130-65)}\,\frac{kg}{s} = 3{,}66\ kg/s.$$

Die im Wärmeübertrager getauschte Wärmemenge beträgt

$$\dot{Q}^o_{WW} = 3{,}66 \cdot 4200 \cdot (65-55)\ W = 153{,}7\ kW.$$

Am Austritt der Vorwärmestufe wird damit eine Temperatur

$$t_{WW} = t'_{WW} + \frac{\dot{Q}^o_{WW}}{c\dot{m}_{WW}} = 10\,°C + \frac{153\,700 \cdot 3\,600}{4\,200 \cdot 4\,000}\,K = 42{,}9\,°C$$

erreicht. Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz ergibt sich dann zu

$$\Delta t_m = \frac{45-22{,}1}{\ln\dfrac{45}{22{,}1}}\,K = 32{,}2\,K,$$

woraus ein Wärmedurchgangskoeffizient im Auslegungsfall von

$$k^+ = \frac{\dot{Q}^o_{WW}}{A \cdot \Delta t_m} = \frac{153\,700}{6{,}9 \cdot 32{,}2}\,\frac{W}{m^2K} = 692\ W/m^2K$$

folgt.
Die Steigerung der Vorlauftemperatur auf 140 °C bzw. 150 °C führt zur Reduzierung des Massenstroms

$$(\dot{m}^{++}_N)_1 = \frac{10^6}{4\,200\,(140-65)}\,\frac{kg}{s} = 3{,}17\ kg/s;\ (\dot{m}^{++}_N)_2 = 2{,}80\ kg/s.$$

Um eine iterative Ermittlung der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz zu umgehen, wird die Berechnung mittels der Betriebscharakteristik vorgenommen. Die Korrektur der Wärmedurchgangskoeffizienten berechnet sich nach der in der Aufgabenstellung gegebenen Formel. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der vier möglichen Varianten zusammengefaßt.

Tabelle 2

$t^{++}_{V,N}$ °C	$\dot{m}^{++}_N$ kg/s	$\dot{m}_{WW}$ kg/h	$(\dot{C}_s/\dot{C}_p)^{++}$	k W/m²K	$kA/\dot{C}_s$	Φ^{++}
140	3,17	4000	0,35	692	1,02	0,59
		2000	0,18	420	1,24	0,68
150	2,80	4000	0,40	692	1,02	0,58
		2000	0,20	420	1,24	0,68

Aufbauend auf der Definitionsgleichung (2) für Φ und unter Beachtung, daß die Primär-Eintrittstemperatur stets 65 °C und die Sekundär-Eintrittstemperatur immer 10 °C beträgt, ergibt sich für die Sekundär-Austrittstemperatur:

$$t_{WW} = \Phi^{++}\,(65-10)\ \mathrm{K} + 10\ °\mathrm{C}.$$

Damit gelten weiter für die

Betriebsfälle: $t^{++}_{V,N} = 140$ °C und $t^{++}_{V,N} = 150$ °C; $\dot{m}_{WW} = 4000$ kg/h

$t_{WW} = 42{,}5$ °C bzw. $t_{WW} = 41{,}9$ °C

Betriebsfälle: $t^{++}_{V,N} = 140$ °C und $t^{++}_{V,N} = 150$ °C; $\dot{m}_{WW} = 2000$ kg/h

$t_{WW} = 47{,}4$ °C.

Damit lassen sich die übertragenen Wärmeströme berechnen (Ergebnisse Tabelle 3).

In erster Näherung ist festzustellen, daß die Wärmeströme nur vom sekundärseitigen Massenstrom abhängig sind, d. h. von der Belastung des Wärmeübertragers und kaum von der Netz-Vorlauftemperatur.

Beispiel 4

An eine Hausanschlußstation, die nach Bild 6 geschaltet ist, sind $n = 200$ Wohnungen angeschlossen. Der spezifische Heizwärmestrom beträgt im *Fall a* $\dot{q} = 6$ kW/WE und im *Fall b* $\dot{q} = 5{,}1$ kW/WE. Die Spitzenleistung der Warmwasserbereitung beträgt $\dot{Q}_{WW} = 586$ kW. Die Temperaturparameter der Heizungsanlage liegen im *Fall a* mit 110 °C/70 °C und im *Fall b* mit 110 °C/60 °C fest. Die Primär-Vorlauftemperatur beträgt im Auslegungsfall $t^{+}_{V,N} = 130$ °C; sie wird zeitweise zur Netzaufladung bis auf 150 °C gesteigert. Die Warmwassertemperatur am Austritt der Station soll $t''_{WW} = 45$ °C betragen. Das Kaltwasser steht mit $t'_{WW} = 10$ °C an. Es sind die erforderlichen Werte (kA) für die Vorwärmer zu berechnen, wenn die Erwärmung des Wasserstroms $\dot{m}_{WW}$ nur durch die Rücklaufauskühlung des Netz-Rücklaufes erfolgen soll, wobei die Netz-Vorlauftemperaturen 130 °C, 140 °C und 150 °C gelten mögen. Weiterhin ist zu prüfen, bis zu welchem Wärmestrom $\dot{Q}_{WW}$ die für den Auslegungsfall $t^{+}_{V,N}$ bemessenen Vorwärmer ohne Primär-Vorlaufanzapfung bedarfsgerecht arbeiten, wenn der Wert (kA) konstant ist und eine Reserve von 25 Prozent enthält.

Lösung

Die dem Netz entnommene Wassermenge berechnet sich nach Gl. (10), die Netz-Rücklauftemperaturen nach den Gln. (11) bzw. (11a):

$t^{+}_{V,N}$ bzw. $t^{++}_{V,N}$ in ° C	*Fall a* 130	140	150	*Fall b* 130	140	150
$\dot{m}^{+}_N$ bzw. $\dot{m}^{++}_N$ in kg/s	4,76	4,08	3,57	3,47	3,04	2,70
$t^{*}_{R,N}$ in °C	40,7	35,8	30,9	19,8	14,1	8,30

Die Variante *Fall b* $t^{++}_{V,N} = 150$ °C ist technisch nicht realisierbar, da $t^{*}_{R,N} < t'_{WW}$ sein müßte.

Die mittleren logarithmischen Temperaturdifferenzen berechnen sich nach der Gleichung

$$\Delta t_m = \frac{(t^{+}_{R,N} - t''_{WW}) - (t^{*}_{R,N} - t'_{WW})}{\ln \dfrac{t^{+}_{R,N} - t''_{WW}}{t^{*}_{R,N} - t'_{WW}}}$$

Tabelle 3

$t^{+}_{V,N}$ bzw. $t^{++}_{V,N}$ °C	$\dot{m}_{WW}$ kg/h	$\dot{Q}^{o}_{WW}$ kW
130 °C	4000	153,7
140 °C	4000	151,7
150 °C	4000	148,9
140 °C	2000	87,3
150 °C	2000	87,3

woraus der Term

$$kA = \frac{\dot{Q}_{WW}}{\Delta t_m}$$

ermittelt wird. Es gelten die Werte

	Fall a			*Fall b*		
Δt_m in K	27,8	25,4	22,9	12,2	8,4	--
kA in kW/K	21,1	23,1	25,6	48,0	69,8	--

Wird von der vorhandenen Reserve ausgegangen, so folgt für den Wärmeübertrager als charakteristischer Wert:

Fall a
$kA' = 1{,}25 \cdot 21{,}1$ kW/K $= 26{,}4$ kW/K
Fall b
$kA' = 1{,}25 \cdot 48{,}0$ kW/K $= 60{,}0$ kW/K.

Dies bedeutet, daß im *Fall a* die Warmwasserspitze auch bei der zu $t^{++}_{V,N} = 150$ °C gehörigen geringen Heizmedienmenge nur durch die Vorwärmer gedeckt werden kann. Im *Fall b* ist dies schon bei $t^{++}_{V,N} = 140$ °C nicht mehr möglich. Um die tatsächliche Grenze zu erfassen, wird für $t^{++}_{V,N} = 140$ °C und $t^{++}_{V,N} = 150$ °C der Warmwasser-Massenstrom variiert und die Warmwasser-Austrittstemperatur ermittelt. Zur Berechnung wird wiederum die Betriebscharakteristik (Bild 2) verwendet (Ergebnisse Tabelle 4).

Ausgehend von der Warmwasser-Leistungsspitze $\dot{Q}_{WW} = 586$ kW, folgt der maximale Massenstrom

$$\dot{m}_{WW,max} = \frac{586}{4{,}2 \cdot 35}\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}} = 3{,}99\ \mathrm{kg/s}.$$

Nach [2] entspricht die zeitliche Verteilung näherungsweise der Gleichung

$$\dot{m}_{WW} = \dot{m}_{WW,max}\, e^{-(0{,}9\tau)^2}$$

mit τ in h. Die Zeit τ gibt die Hälfte des Zeitintervalls an, in dem die Bedarfswünsche nicht erfüllt werden können. Es ergeben sich für

$$t^{++}_{V,N} = 140\,°\mathrm{C} \quad \tau_1 = \frac{1}{0{,}9}\sqrt{\ln\frac{3{,}99}{3{,}8}}\,\mathrm{h} = 0{,}25\,\mathrm{h}$$

$$t^{++}_{V,N} = 150\,°\mathrm{C} \quad \tau_2 = \frac{1}{0{,}9}\sqrt{\ln\frac{3{,}99}{3{,}50}}\,\mathrm{h} = 0{,}40\,\mathrm{h}$$

Diese Ergebnisse besagen, daß während des Zeitraumes der Spitzenbelastung ($\Delta\tau_1 \approx 0{,}5$ h bzw. $\Delta\tau_2 \approx 0{,}8$ h) infolge der er-

Tabelle 4

$t^{++}_{V,N}$ °C	$\dot{m}^{++}_N$ kg/s	$\dot{m}_{WW}$ kg/s	$(\dot{C}_s/\dot{C}_p)^{++}$	$kA'/\dot{C}_s$	Φ^{++}	t'_{WW} °C
140	3,04	4,0	1,32	3,57	0,68	44,0
		3,8	1,25	3,76	0,71	45,5
		3,6	1,18	3,97	0,74	47,0
		3,4	1,12	4,20	0,77	48,5
150	2,70	4,0	1,48	3,57	0,63	41,5
		3,8	1,41	3,76	0,66	43,0
		3,6	1,33	3,97	0,69	44,5
		3,4	1,26	4,20	0,72	46,0

höhten Vorlauftemperatur und der gewählten Wärmeübertragerfläche die Aufheizung des Warmwasserstroms nicht allein durch die Rücklaufabkühlung möglich ist. Der Nachwärmer wird automatisch in Betrieb gehen und den Vorlauf zusätzlich anzapfen. Abschließend ist festzustellen, daß die Aussagen zu Variante 5, Fall 1, auch quantitativ voll bestätigt werden. Bei großen Netz-Entnahmeströmen $\dot{m}_N$ – verursacht durch hohe Rücklauftemperaturen aus dem Heizungssystem und großen Wärmebedarf – reichen die vorhandenen Reserven bei der Bemessung der Wärmeübertrager in der Regel aus, um auch die Warmwasser-Spitzenleistung bei erhöhter Netz-Vorlauftemperatur abzusichern. Dies ist bei niedrigen Werten $\dot{m}_N$, die künftig beim Einsatz von Niedertemperatur-Heizungssystemen und infolge besserer Wärmedämmung der Gebäude üblich sein werden, nicht mehr gegeben.

Zusammenfassung

Ausgehend von den Auslegungsparametern wurde untersucht, wie die Abnehmerstationen auf erhöhte Netz-Vorlauftemperaturen reagieren und welche Konsequenzen sich für den Betrieb des Wärmenetzes ergeben. Es gelten:

- Abnehmer mit indirektem Anschluß zeichnen sich bei Erhöhung der Vorlauftemperatur durch Senkung der Massenströme und Senkung der Rücklauftemperaturen aus. Unter Annahme eines konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten genügt es, in erster Näherung zwei Betriebspunkte (Auslegungsfall und Betrieb bei höchster Vorlauftemperatur) zu betrachten und die Massenströme linear zur Vorlauftemperatur zu interpolieren.
- Bei Warmwasserbereitern nach dem Speicherbetrieb führt die Erhöhung der Netz-Vorlauftemperatur zu einer Steigerung des Wärmestroms und damit zur Verkürzung der Aufheizzeit. Bei einer kontinuierlichen Temperaturerhöhung genügt es, die Wärmeströme zu Beginn und am Ende des Aufheizvorganges linear über die Zeit zu mitteln.
- Abnehmer mit direktem Anschluß und Rücklaufbeimischung lassen sich am einfachsten beurteilen, da eine Veränderung der Vorlauftemperatur nur zu einer Änderung des Massenstroms führt. Die Rücklauftemperatur wird nur von der Abnehmeranlage bestimmt und ändert sich bei konstanter Belastung nicht.
- Rücklauf-Beimischanlagen mit zusätzlicher Rücklaufauskühlung reagieren auf die Erhöhung der Netz-Vorlauftemperatur sehr gedämpft. Merklich veränderte Wärmeströme und Rücklauftemperaturen ergeben sich nur bei einer veränderten sekundärseitigen Beaufschlagung des Wärmeübertragers. Diese sind speziell zu berechnen.
- Bei direkt angeschlossenen Beimischstationen für die Beheizung von Wohnbauten mit gekoppelter Warmwasserbereitung nach dem Durchflußprinzip kann der dem Netz entnommene Massenstrom im Auslegungsfall die Warmwasserbereitung völlig gewährleisten aber auch eine ständige parallele Anzapfung des Netzvorlaufes erforderlich machen. In beiden Fällen gilt, daß bei erhöhter Netz-Vorlauftemperatur der im Auslegungsfall entnommene Gesamt-Massenstrom gleich bleibt oder geringfügig unterschritten wird.
- Direkt angeschlossene Beimischstationen mit einer gekoppelten Warmwasserbereitung nach dem kombinierten Durchfluß- und Speicherprinzip reagieren auf die Erhöhung der Netz-Vorlauftemperatur mit einer Verringerung des Netz-Wasserstroms. Diese kommt im Vollastfall allerdings nur durch die Reduzierung des durch die Heizungsanlage gesetzten Teilstroms zustande. Bei genügend großem Speicher besteht die Möglichkeit, die Beheizung des Speichers in der Spitzenzeit zu unterlassen.

Literatur

[1] *Glück, B.:* Bausteine zur rationellen Projektierung von Wasserheizungssystemen. Institut TGA, 1976

[2] *Glück, B.:* Wärme- und Massenströme in Wärmenetzen (II). *„Stadt- und Gebäudetechnik"*, **35** (1981) H. 4, S. 113 bis 116