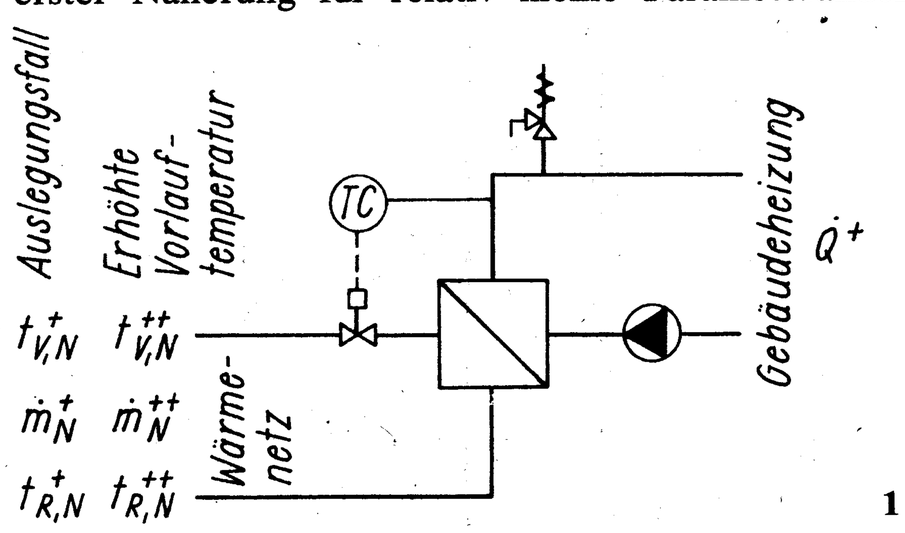
Wärmespeicherung in Wärmenetzen des Abnehmerbereichs (I) – Schaltungen der Abnehmer und thermodynamische Approximationen –

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

Nachfolgend werden die typischen Schaltungsvarianten der Abnehmer unter dem Aspekt des Lade- und Entladeverhaltens der Wärmenetze betrachtet. Es erfolgt eine Zusammenstellung der an sich bekannten Berechnungsgleichungen bzw. der entsprechenden Näherungen für den Auslegungszustand „+" und für den Lade- und Entladebetrieb „++". Eine Reihe von Beispielen gibt die quantitativen Verhältnisse wieder.

Variante 1: Wärmeübertrager mit konstanter $\dot{Q}$-Entnahme (Bild 1)

Eine Gebäudeheizungsanlage oder ein technologischer Verbraucher wird indirekt von einem Wärmenetz versorgt. Für den Auslegungsfall sind Massenstrom $\dot{m}_N^+$ und Netz-Rücklauftemperatur $t_{R,N}^+$ konstant. Mit steigender Netz-Vorlauftemperatur $t_{V,N}^{++}$ sinken $t_{R,N}^{++}$ und $\dot{m}_N^{++}$. Der genaue Zusammenhang ist nur durch eine Nachrechnung mittels Rechenprogramm [1] erfaßbar. Wird in erster Näherung für relativ kleine Parameteränderungen mit einem unveränderten Wärmedurchgangskoeffizienten k gegenüber dem Auslegungszustand gerechnet, so ist der Term $(kA/\dot{C}_s)^+$ ebenfalls konstant. Dabei bedeuten: A die Heizfläche des Wärmeübertragers und $\dot{C}_s$ die Wärmekapazität des Sekundärmediums $(\dot{m}_s c)$. Verändert haben sich bei der Erhöhung der Netz-Vorlauftemperatur das Verhältnis der Wärmekapazitätsströme $(\dot{C}_s/\dot{C}_p)^{++}$, bezogen auf den Auslegungsfall $(\dot{C}_s/\dot{C}_p)^+$, und die Betriebscharakteristik Φ. Für sie gelten im Auslegungsfall



1

$$\Phi^+ = \frac{t_s'' - t_s'}{(t_p')^+ - t_s'} \tag{1}$$

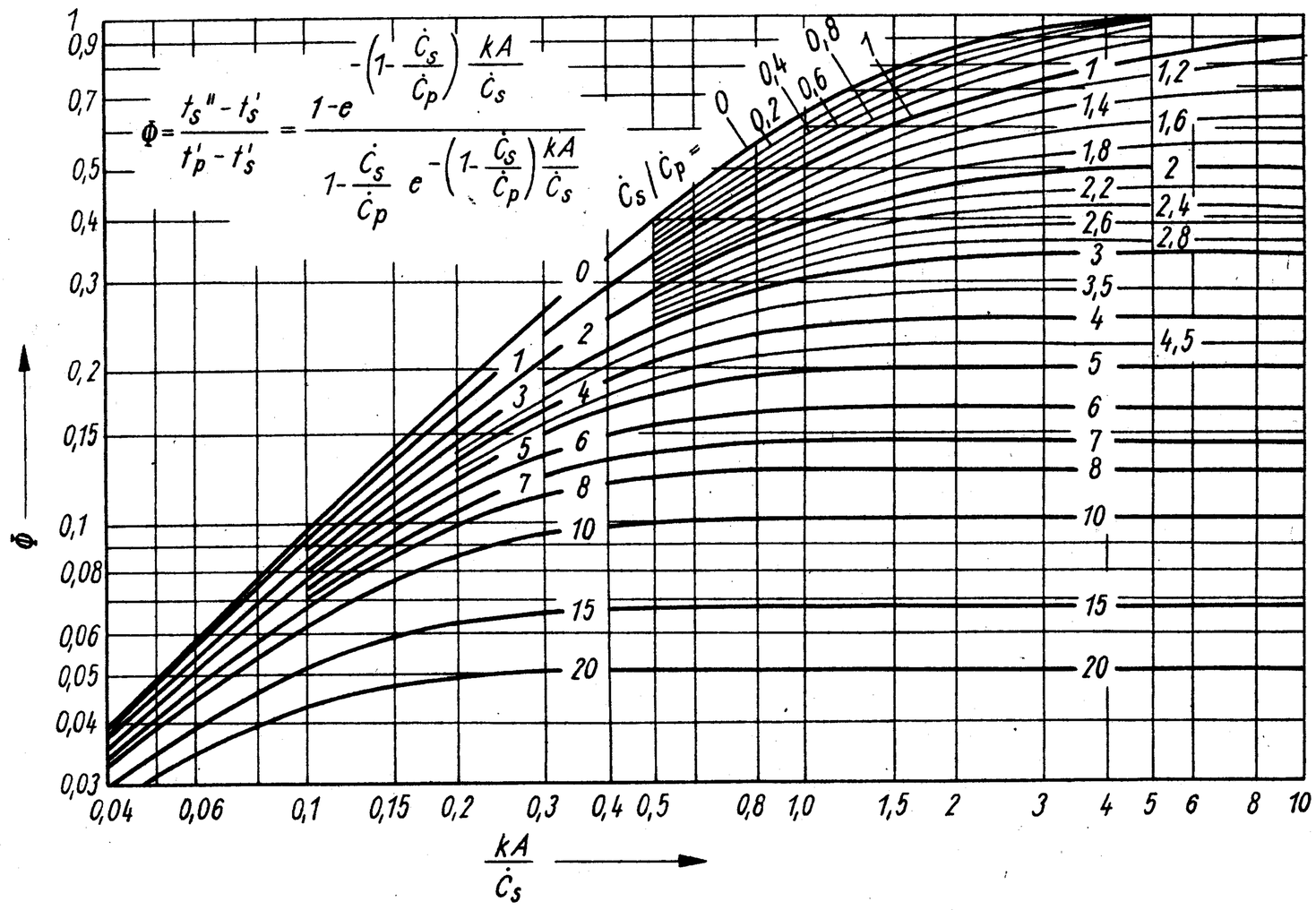
und im betrachteten Betriebsfall

$$\Phi^{++} = \frac{t_s'' - t_s'}{(t_p')^{++} - t_s'}; \tag{2}$$

wobei t_s'', t_s' die konstanten Sekundär-Aus- bzw. -Eintrittstemperaturen und $(t_p')^{++}$ die Primär-Eintrittstemperatur, die im Auslegungsfall $(t_p')^+$ beträgt, darstellen. Der funktionelle Zusammenhang $\Phi = \Phi\,[(kA/\dot{C}_s), (\dot{C}_s/\dot{C}_p)]$ ist im Bild 2 in Diagrammform gegeben.

Bei einer Erhöhung der Netz-Vorlauftemperatur $t_{V,N}^+ \equiv (t_p')^{++}$ stellt sich ein neues, berechenbares Φ^{++} ein. Das dazugehörige $(\dot{C}_s/\dot{C}_p)^{++}$ kann für das bekannte $(kA/\dot{C}_s)^+$ sofort abgelesen werden, so daß der neue – aus dem Netz entnommene – Massenstrom

$$\dot{m}_N^{++} = \dot{m}_p = \dot{m}_N^+ \frac{(\dot{C}_s/\dot{C}_p)^+}{(\dot{C}_s/\dot{C}_p)^{++}} \tag{3}$$



2

beträgt. Die Netz-Rücklauftemperatur folgt aus der Enthalpiebilanz zu

$$t_{R,N}^{++} = t_{V,N}^{++} - \frac{\dot Q^+}{\dot m_N^{++}\, c} = t_{V,N}^{++} - \frac{(\dot C_s/\dot C_p)^{++}}{(\dot C_s/\dot C_p)^{+}}\,(t_{V,N}^{+} - t_{R,N}^{+}). \qquad (4)$$

Im Beispiel 1 ist eine ausführliche quantitative Ermittlung durchgeführt.
Das thermodynamische Verhalten der Wärmeübertrager wirkt der gewünschten Netzspeicherung entgegen, da während des Betriebs mit hohen Vorlauftemperaturen der Vorlauf aufgeheizt und der Rücklauf infolge der niedrigen Austrittstemperaturen entspeichert wird. Bei sinkenden Vorlauftemperaturen (Entladung des Vorlauf-Netzteils) steigen bei konstanter Belastung die Rücklauftemperaturen an.

Variante 2: Warmwasserbereiter nach dem Speicherverfahren (Bild 3)

Ein konstanter Netzwasserstrom $\dot m_N^+$ heizt während einer vorgegebenen Zeitdauer $\Delta\tau$ das im Speicher befindliche Wasser m_{WW} von t_{WW}' auf t_{WW}'' auf. Die thermodynamischen Vorgänge sind in [1] detailliert beschrieben. Ein besonderes Merkmal ist die Zeitabhängigkeit des Wärmestroms infolge der Temperaturerhöhung im Speicher. Die Änderung der Temperaturdifferenz erfährt eine Überlagerung durch die zusätzliche Änderung der Netz-Vorlauftemperatur während der Netz-Lade- bzw. -entladevorgänge.
Für den jeweiligen Betrachtungszeitpunkt τ ergeben sich:

Wärmestrom

$$\dot Q_{WW}(\tau) = kA\,\frac{t_{HW}' - t_{HW}''}{\ln\dfrac{t_{HW}' - t_{WW}}{t_{HW}'' - t_{WW}}} = \dot C_{HW}\,(t_{HW}' - t_{HW}'') \qquad (5)$$

Heizmedien-Austrittstemperatur

$$t_{HW}'' = t_{WW} + (t_{HW}' - t_{WW})\, e^{-\frac{kA}{\dot C_{HW}}} \qquad (6)$$

Warmwassertemperatur

$$t_{WW} = t_{HW}' - (t_{HW}' - t_{WW}')\left[\frac{t_{HW}' - t_{WW}''}{t_{HW}' - t_{WW}'}\right]^{\frac{\tau}{\Delta\tau}} \qquad (7)$$

Für die gesamte Aufheizzeit $\Delta\tau$ gilt die Beziehung

$$\Delta\tau = \frac{C_{WW}}{\dot C_{HW}}\,\frac{\ln\dfrac{t_{HW}' - t_{WW}''}{t_{HW}' - t_{WW}'}}{1 - e^{-\frac{kA}{\dot C_{HW}}}}. \qquad (8)$$

Es gelten die Bezeichnungen und Identitäten:

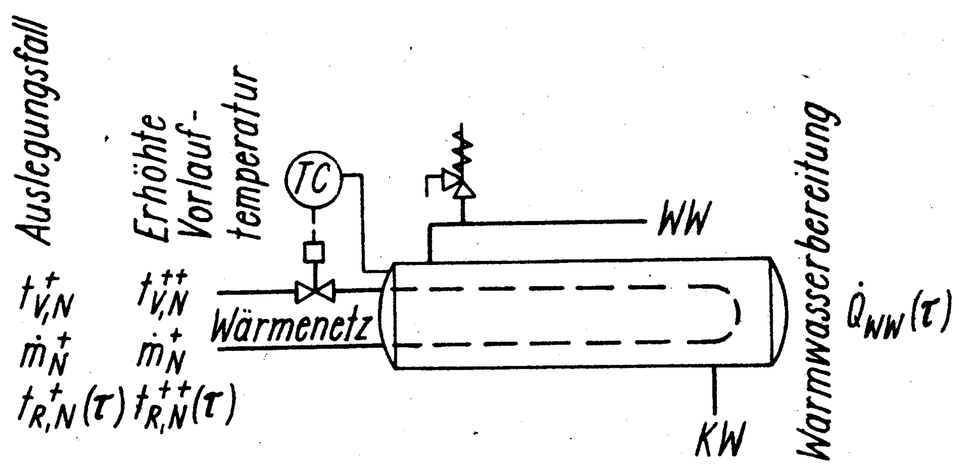
$t_{HW}' \equiv t_{V,N}$	Heizmedien-Eintrittstemperatur
$t_{HW}'' \equiv t_{R,N}$	Heizmedien-Austrittstemperatur
t_{WW}; t_{WW}'; t_{WW}''	Warmwassertemperatur; -Beginn der Aufheizung ($\tau = 0$); -Ende der Aufheizzeit ($\tau = \Delta\tau$)
k	Wärmedurchgangskoeffizient der Heizfläche
A	Heizfläche
C_{WW}	Wärmekapazität des aufzuwärmenden Warmwassers ($m_{WW}c$)
$\dot C_{HW}$	Wärmekapazitätsstrom des Heizmediums ($\dot m_{HW}c$).

Ändert sich die Netz-Vorlauftemperatur von $t_{V,N}^{+} \equiv (t_{HW}')^{+}$ auf $t_{V,N}^{++} \equiv (t_{HW}')^{++}$ sprungförmig, dann sind die angegebenen Gleichungen wiederholt anzusetzen. Dabei ist die am Ende der ersten Periode erreichte Warmwassertemperatur t_{WW} gleich der Anfangstemperatur t_{WW}' der zweiten Periode. Die Heizzeiten sind jeweils neu zu zählen. Bei einer kontinuierlichen Parameteränderung ist es ausreichend genau, diese in diskrete Schritte zu zerlegen und dazwischen die Ergebnisse linear zu interpolieren. Der Aufwand für eine exakte Integration erscheint für den vorliegenden Fall ungerechtfertigt hoch und müßte bei einem Netz-Temperaturverlauf mit singulären Punkten ohnehin in getrennten Geltungsbereichen erfolgen.
Eine Veränderung des Massenstromes $\dot m_N^+ \equiv \dot m_{HW}$ ist nicht zu betrachten, da dieser den Auslegungsfall verbindlich kennzeichnet. Eine praktische Bemessung wird im Beispiel 2 vorgestellt.

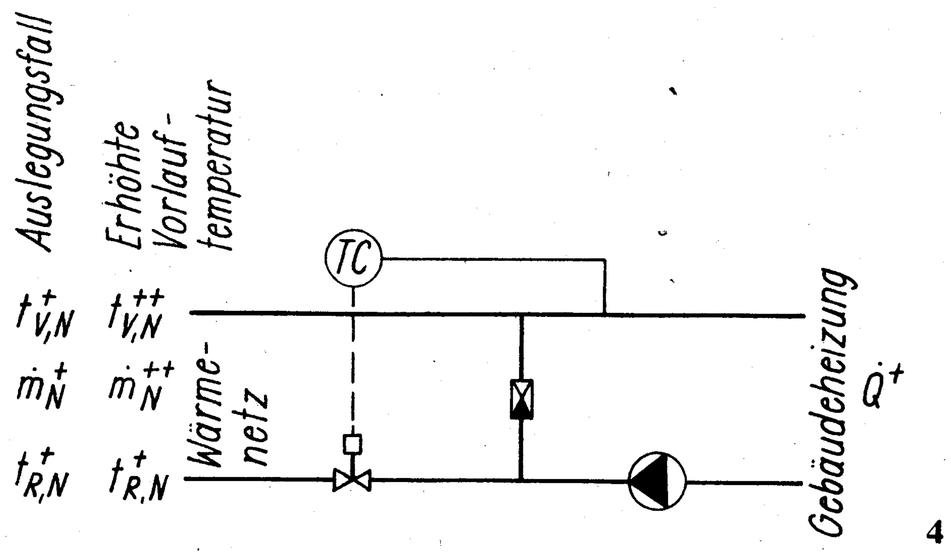
Variante 3: Beimischstation mit konstanter $\dot Q$-Entnahme (Bild 4)

Durch derartige Schaltungen können beispielsweise Gebäudeheizungsanlagen direkt an Wärmenetze angeschlossen werden. Beträgt der Wärmestrom im Auslegungsfall $\dot Q^+$, dann ergibt sich der aus dem Netz entnommene Massenstrom im Auslegungsfall zu

$$\dot m_N^+ = \frac{\dot Q^+}{c\,(t_{V,N}^{+} - t_{R,N}^{+})}, \qquad (9)$$



3



4

und bei erhöhter Netz-Vorlauftemperatur folgt

$$\dot m_N^{++} = \frac{\dot Q^+}{c\,(t_{V,N}^{++} - t_{R,N}^{+})}\,. \tag{10}$$

Bemerkenswert ist die bei konstanter Wärmeentnahme stets gleichbleibende Rücklauftemperatur, d. h., die Änderung der Vorlauftemperatur führt nur zur Veränderung des Massenstroms $\dot m_N^+$ auf $\dot m_N^{++}$.

Variante 4: Beimischstation mit konstanter $\dot Q$-Entnahme und zeitabhängiger Rücklaufabkühlung (Bild 5)

Obwohl bei direktem Anschluß der Heizungsanlage die niedrigsten Rücklauftemperaturen, die technisch möglich sind, erreicht werden, ist man bestrebt, zur hydraulischen Entlastung des Wärmenetzes die Temperatur des Netz-Rücklaufs durch Einschalten weiterer Niedertemperaturverbraucher zu senken. Besonders eignen sich dazu Vorwärmer der Warmwasserbereitung. Der aufzuwärmende Kaltwasserstrom stellt eine Zeitfunktion dar, so daß sich die Netz-Rücklauftemperatur schließlich belastungsabhängig ergibt. Die Charakteristik ist sehr vorteilhaft. Die Netzaufladung wird in den Zeiten geringer Warmwasserentnahme vorgenommen, d. h., der Rücklauf fließt mit relativ hoher Temperatur (fast $t_{R,N}^+$) zum Wärmebereitsteller zurück. Während der Warmwasser-Spitzenentnahme erfolgt die größte Abkühlung des Rücklaufs. Er kann somit zusätzlich entspeichert werden.
Der dem Netz entnommene Massenstrom ergibt sich lediglich aus den Forderungen des angeschlossenen Heizungssystems nach den Gln. (9) und (10). Dabei charakterisiert $t_{R,N}^+$ die Rücklauftemperatur der Gebäudeheizung im Auslegungsfall.
Wird im Vorwärmer ein Wärmestrom $\dot Q_{WW}^{o}(\tau)$ übertragen, so stellt sich schließlich die endgültige Netz-Rücklauftemperatur ein.

$$t_{R,N}^{*} = t_{R,N}^{+} - \frac{\dot Q_{WW}^{o}(\tau)}{c\,\dot m_N^{+}} \text{ bzw. } t_{R,N}^{*} = t_{R,N}^{+} - \frac{\dot Q_{WW}^{o}(\tau)}{c\,\dot m_N^{++}} \tag{11}$$

Problematisch ist das Bestimmen des Wärmestroms $Q_{WW}^{o}(\tau)$, da die Umrechnung der Wärmeübertragerleistung, ausgehend von einem definierten Bezugszustand bei verändertem primär- und sekundärseitigem Massenstrom, die Annahme eines konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten eigentlich verbietet. Da weiterhin zwischen $t_{V,N}(\tau)$ und $\dot Q_{WW}^{o}(\tau)$ nur ein sehr lockerer stochastischer Zusammenhang besteht, wäre eine exakte Leistungsberechnung des Wärmeübertragers jedoch auch unrealistisch. Im Beispiel 3 ist eine erste Näherung angegeben.

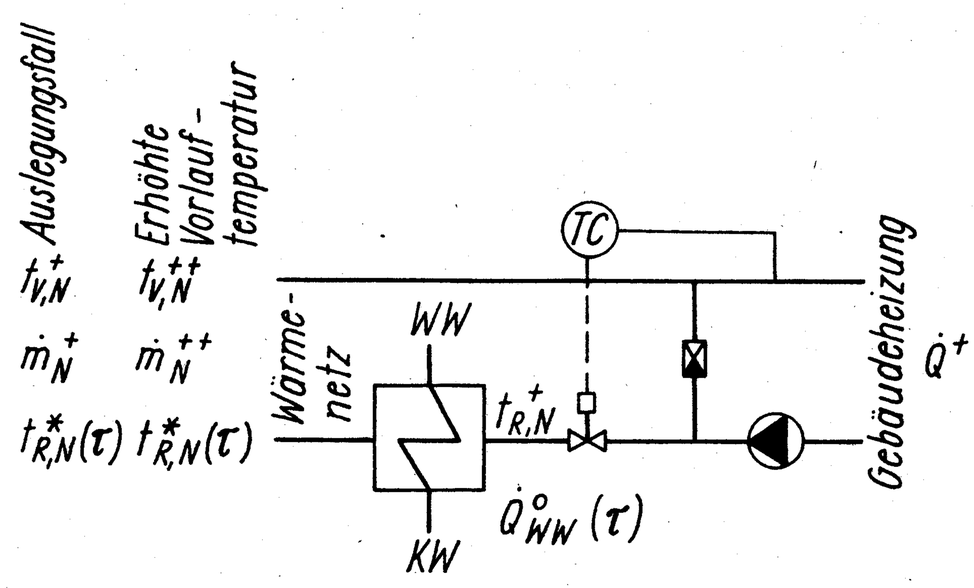
Variante 5: Beimischstation mit konstanter $\dot Q$-Entnahme und Warmwasserbereitung durch Rücklaufabkühlung und Vorlaufanzapfung nach dem Vorrangprinzip zur Nachwärmerbeheizung (Bild 6)

Die Besonderheit gegenüber Variante 4 besteht darin, daß das Warmwasser je nach Bedarf in den Gegenstrom-Wärmeübertragern auf die genau definierte Endtemperatur aufgewärmt wird. Dabei sind zwei grundsätzlich verschiedene Varianten zu unterscheiden:

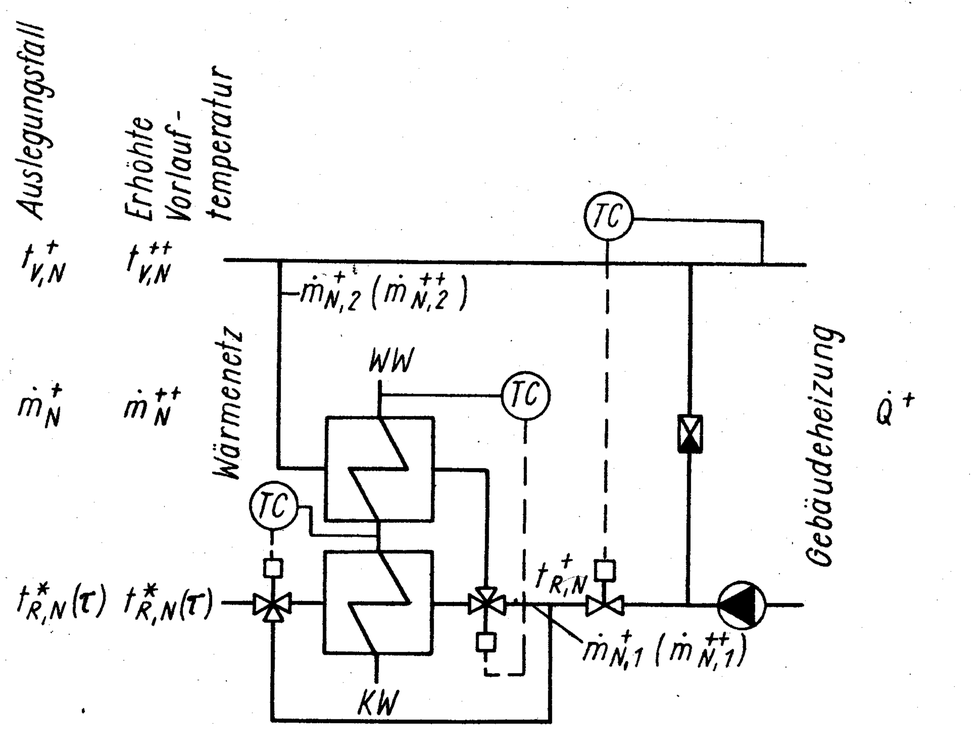
1. In der Regel ist der Vorwärmer so bemessen, daß er beim Heiz-Medienstrom $\dot m_N^+$ und der Temperatur $t_{R,N}^+$ den gesamten Warmwasserstrom $\dot m_{WW,\,max}$ aufheizt. Bei geringeren Wärmeströmen als $\dot Q^+$ verkleinert sich der dem Netz entnommene Massenstrom, und die Rücklauftemperatur aus der Gebäudeheizung sinkt. Die parallele Entnahme aus dem Vorlauf beginnt. Eine reduzierte Analogie gibt es auch während der Netz-Auf- und -entladungen, da infolge der erhöhten Netz-Vorlauftemperatur der Massenstrom $\dot m_N^{++} < \dot m_N^+$ ist.
Die Rücklauftemperatur beträgt jedoch weiterhin $t_{R,N}^+$.
Abhängig von der Auslegung treten unterschiedliche Reaktionen auf.
   - **Bei großem $\dot m_N^+$ und hohem $t_{R,N}^+$ ergibt sich eine relativ große mittlere logarithmische Temperaturdifferenz Δt_m zwischen Heizmedium und aufzuwärmendem Wasserstrom $\dot m_{WW,max}$. Das Anheben der Netz-Vorlauftemperatur $t_{V,N}^{++}$, die den Netz-Wasserstrom auf $\dot m_N^{++}$ reduziert, hat dann** keinen merklichen Einfluß auf Δt_m. Oft reichen die Reserven der Wärmeübertrager-Heizflächen aus, die beispielsweise durch die Sprünge in der Wärmeübertrager-Typenreihe gegeben sind, um die Verkleinerung von Δt_m zu kompensieren. Es führt deshalb in der Regel nicht zu einer Erhöhung der Investitionskosten, wenn dem Vorschlag – **den Vorwärmer für $t_{R,N}^+$ und $\dot m_N^{++}$ (nach Gl. (10) mit $t_{V,N}^{++}$) zu bemessen – Folge geleistet wird. Die rechnerischen Betrachtungen vereinfachen sich dadurch sehr, da außer den Gln. (9) und (10) für alle Warmwasser-Entnahmen $\dot m_{WW}(\tau)$**

$$t_{R,N}^{*} = t_{R,N}^{+} - \frac{\dot Q_{WW}(\tau)}{c\,\dot m_N^{++}} \tag{11 a}$$

gilt.



5



	Fall 1		Fall 2
	Untervariante a	Untervariante b	
Auslegungsfall	$\dot m^+_{N,1} = \dot m^+_N$ $\dot m^+_{N,2} = 0$		$\dot m^+_{N,1} > 0$ $\dot m^+_{N,2} > 0$ $\dot m^+_N = \dot m^+_{N,1} + \dot m^+_{N,2}$
Erhöhte Vorlauf-temperatur	$\dot m^{++}_{N,1} = \dot m^{++}_N$ $\dot m^{++}_{N,2} = 0$	$\dot m^{++}_{N,1} < \dot m^+_{N,1}$ $\dot m^{++}_{N,2} > 0$ $\dot m^{++}_N = \dot m^{++}_{N,1} + \dot m^{++}_{N,2}$ $\dot m^{++}_N < \dot m^+_N$	$\dot m^{++}_{N,1} > 0$ $\dot m^{++}_{N,2} > 0$ $\dot m^{++}_N = \dot m^{++}_{N,1} + \dot m^{++}_{N,2}$

6

Fall a:

$$t_{WW} = 130\ °C - (130-10)\,K \left[\frac{130-50}{130-10}\right]^{\frac{\tau}{1{,}84}}$$

$$(t''_{HW})^{+} \equiv t^{+}_{R,N} = t_{WW} + (130-t_{WW})e^{-\frac{350\cdot 6}{4200\cdot 0{,}2}}$$

$$\dot{Q}_{WW} = 4200 \cdot 0{,}2\,[130 - (t''_{HW})^{+}].$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 für die *Fälle a* bis *c* vermerkt und im Bild 9 grafisch dargestellt.
Zur Ermittlung des *Falles d* gibt es zwei Möglichkeiten; die schrittweise analytische Betrachtung und die aus den bisherigen Ergebnissen entwickelte grafische Lösung.
Die erste Phase der Beheizung wurde als *Fall a* bereits analytisch ermittelt, d. h. die Ergebnisse für $\tau = 0$; 0,3; 0,6 h gelten auch für den *Fall d*. Mit der am Ende vorliegenden Warmwassertemperatur $t_{WW} = 24{,}9$ °C und der neuen Heizmedien-Eintrittstemperatur ($t'_{HW} \equiv t^{++}_{R,N} = 140$ °C) ergibt Gl. (8) die neue Aufheizzeit, wenn wieder von $\tau = 0$ mit der Zählung begonnen wird und die Endtemperatur $t_{WW} = 50$ °C bei unverändeter Heizmedientemperatur erreicht werden soll:

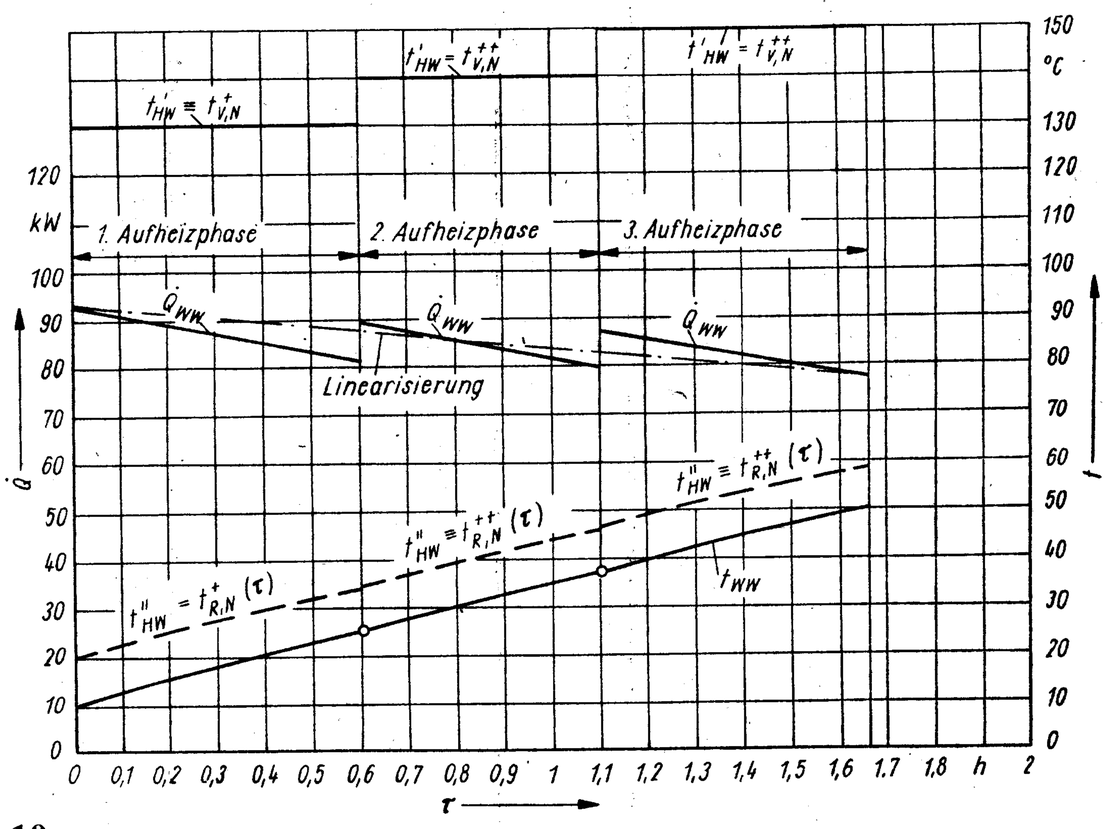
$$\Delta'\tau = \frac{4{,}2\cdot 3000}{4{,}2\cdot 0{,}2}\,\frac{\ln\frac{140-24{,}9}{140-50}}{1-e^{-\frac{350\cdot 6}{4200\cdot 0{,}2}}}\,s = 1{,}12\,h.$$

Diesen Wert kann man auch der Grafik entnehmen, indem für *Fall b* die zu $t_{WW} = 24{,}9$ °C gehörige Zeit $\tau = 0{,}55$ h aufgesucht und die Differenz zur Gesamt-Aufheizzeit $\Delta\tau = 1{,}67$ h gebildet wird. Es ergibt sich ebenfalls $\Delta\tau' = (1{,}67 - 0{,}55)$ h $= 1{,}12$ h. Die Kurven für t_{WW}, t'_{HW} und $\dot{Q}_{WW}$ entsprechen in der zweiten Aufheizphase [$(t'_{HW})^{++} = 140$ °C] dann den Werten des *Falles b* im früheren Zeitbereich von $\tau = (0{,}55 \ldots 1{,}05$ h). Die Endtemperatur beträgt schließlich $t_{WW} \approx 37$ °C.
Rechnerisch ergibt sich nach Gl. (7)

$$t_{WW} = 140\ °C - (140-24{,}9)\,K \left[\frac{140-50}{140-24{,}9}\right]^{\frac{0{,}5}{1{,}12}} = 36{,}9\ °C.$$

Weiterhin gelten entsprechend Gl. (6) und Gl. (5)

$$(t''_{HW})^{++} \equiv t^{++}_{R,N} = 36{,}9\ °C + (140-36{,}9)\,K\cdot e^{-\frac{350\cdot 6}{4200\cdot 0{,}2}} = 45{,}4\ °C$$



10

$$\dot{Q}_{WW} = 4200 \cdot 0{,}2\,(140-45{,}4)\ W = 79{,}5\ kW.$$

Beide Werte stimmen mit *Fall b* für $\tau = 1{,}05$ h überein.
Die Betrachtung der dritten Aufheizphase mit $t'_{HW} = 150$ °C verläuft völlig analog. Es ergibt sich nach Gl. (8)

$$\Delta\tau'' = \frac{4{,}2\cdot 3000}{4{,}2\cdot 0{,}2}\,\frac{\ln\frac{150-36{,}9}{150-50}}{1-e^{-\frac{350\cdot 6}{4200\cdot 0{,}2}}}\,s = 0{,}56\,h.$$

Diese Aufheizzeit kann wiederum durch Differenzbildung dem Bild 9 entnommen werden. Die Gesamt-Aufheizzeit für den abgestuften Betrieb – *Fall d* – beträgt

$$\Delta\tau = (0{,}6 + 0{,}5 + 0{,}56)\ h = 1{,}66\ h.$$

Die Temperatur- und Wärmestromverläufe der dritten Phase sind dem *Fall c* identisch, wobei vom Endpunkt des Aufheizvorganges ($t_{WW} = 50$ °C) auszugehen ist.
Die zum *Fall d* gehörigen Kurvenverläufe sind im Bild 10 dargestellt. Während die Kurve t_{WW} (τ) an den Heizgrenzen $\tau = 0{,}6$ h und $\tau = 1{,}1$ h Knickpunkte aufweist, haben die übrigen Kurven an den Grenzen deutliche Absätze, die durch die unterschiedlichen t'_{HW} verursacht wurden. Wie im Bild eingezeichnet, ist der Wärmestrom in erster Näherung linearisierbar.
(Wird fortgesetzt)