Die Auslegung von Druckdiktieranlagen

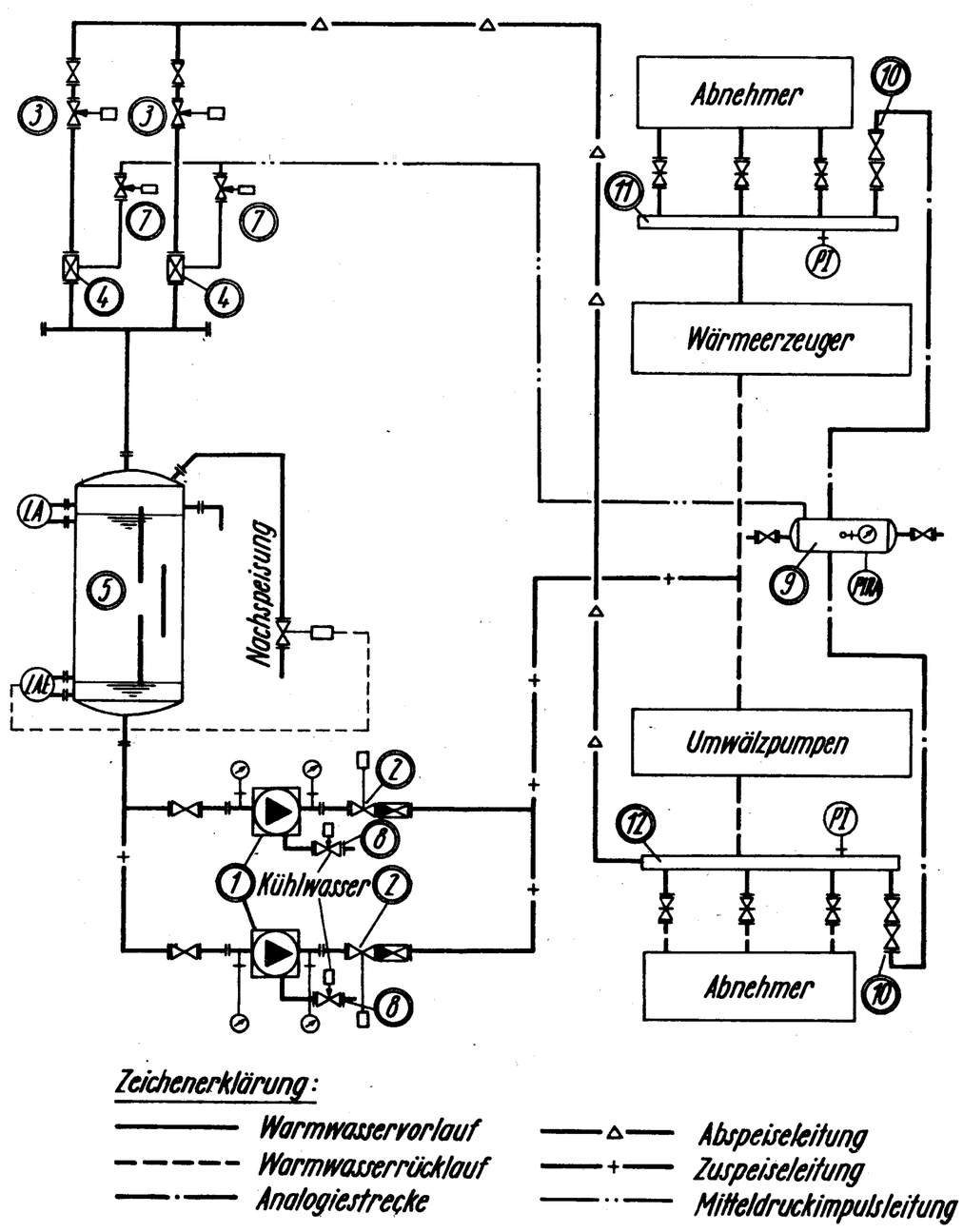
Dr.-Ing. B. GLUCK,
VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung – Institut

1. Einleitung

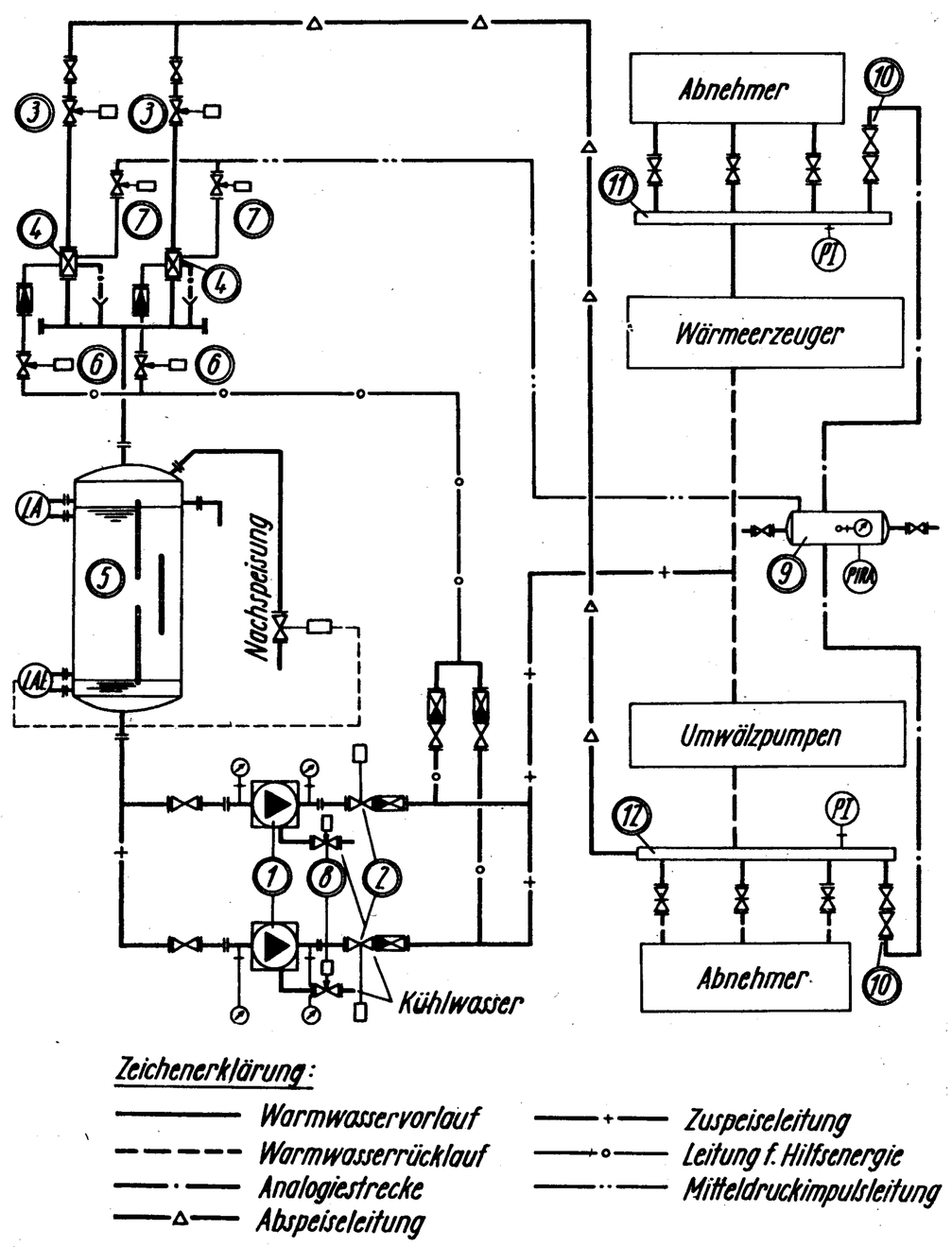
Die Druckhaltung und Volumenänderung in Warmwasserheizungsanlagen können mit Hilfe der sogenannten Druckdiktierung garantiert bzw. kompensiert werden [1]. In [2] ist eine interessante Schaltung vorgestellt, die nach [3] mit Armaturen aus der Inlandproduktion zur praxisbewährten Reife geführt wurde. Diese Schaltung wird nachstehend ergänzt, und es wird ein Rechenverfahren für die Auslegung des Druckdiktier- und Überströmsystems vorgeschlagen.

2. Aufbau

Zur größtmöglichen Sicherung der Funktionstüchtigkeit sollten das Druckdiktier- und das Überströmsystem in jeweils doppelter Ausführung installiert werden. Die vorgeschlagenen Schaltungen sind den Bildern 1 und 2 zu entnehmen. Die Druckdiktierpumpe 1 wird über eine vorgegebene Zulaufhöhe (etwa 3 m WS) vom Speicherinhalt des Ausdehnungsgefäßes 5 beaufschlagt. Sie fördert das Wasser in die Druckleitung der Netzumwälzpumpen. Zur Druckdiktierung werden Hochdruckkreiselpumpen vom Typ HG_1K vorgeschlagen, da diese als besonders standfest gelten und sich als Kesselspeisepumpen bewährt haben. Voraussetzung ist jedoch der Betrieb in den vom Hersteller vorgegebenen Einsatzgrenzen. Die Abspeisung aus dem Netz erfolgt über den Rücklaufsammler 12, ein Magnetventil 3, welches bei evtl. Netzausfall sofort schließt und den Überströmregler 4 ohne Gegendruck in das offene Ausdehnungsgefäß 5. Der Überströmregler arbeitet je nach Fabrikat ohne (Bild 1) und mit Hilfsenergie (Bild 2). Im letzteren Fall wird die Hilfsenergie Wasser druckseitig der Druckdiktierpumpe entnommen und über ein Magnetventil 6 und einen Druckminderer dem Regler 4 zugeleitet. Das verbrauchte Wasser fließt sichtbar ohne Gegendruck aus. Die Regelgröße — der konstante Netzmitteldruck — spiegelt sich in der sogenannten Mitteldruckflasche 9 wider (Bild 3). Letztere ist symmetrisch in einer zwischen Vorlaufverteiler 11 und Rücklaufsammler 12 dem Außennetz parallelgeschaltenen Analogiestrecke angeordnet. Um eine genaue Einstellung dieses Druckmittelwertes sowie spätere Korrekturen zu ermöglichen, sollten im Vor- und Rücklauf handbetätigte Regelventile 10 angeordnet werden. Von der Mitteldruckflasche 9 aus führt die Impulsleitung direkt zum Überströmregler 4. Die BMSR-Technik hat folgende Forderungen zu erfüllen: Jeweils eine Pumpe 1 muß ununterbrochen laufen. Fällt eine Pumpe aus, so ist die Reservepumpe sofort zu starten. Der Anlauf hat gegen geschlossenes Ventil 2 automatisch zu erfolgen. Ein Alarmsignal ist zu geben. Bei Ausfall des elektrischen Netzes müssen nach dem Start des Notstromaggregates unverzüglich die Einrichtungen zur Druckhaltung vollkommen automatisch anlaufen. Dazu gehört das Schließen des druckseitigen Ventils 2, das Anfahren der Pumpe 1, das anschließende Öffnen des Ventils 2 und des Magnet-



1



2

ventils 3 in der Abspeiseleitung sowie der Magnetventile 6 (Hilfsenergie) und 7 (Impulsleitung). Das Öffnen des Kühlwasserzuflusses für die Pumpenlager sollte durch ein Magnetventil 8 synchron zum Pumpenlauf erfolgen. Handschaltungen aller Aggregate müssen dominierend wirken.
Bei großen Anlagen sind folgende Fernanzeigen zu empfehlen:

— Druck am Vorlaufverteiler und Rücklaufsammler (PI),
— Druck in der Mitteldruckflasche evtl. mit Registrierung und Alarmsignal bei Abweichung des Druckes von größer als ± 5 m WS (PIRA), Anschluß des Druckwächters.

Die Sicherung der Warmwassererzeuger hat nach TGL 23 043 zu erfolgen. Unterliegen die Heiznetze z. B. auf Grund des statischen Druckes nicht dem Geltungsbereich der o. g. TGL, so sollte die Sicherung analog aufgebaut und der zuständigen TÜ vorgelegt werden.
Da das Netzwasser über das offene Ausdehnungsgefäß Verbindung mit der Atmosphäre hat und somit Sauerstoff aufnehmen kann, wird der Einbau einer Hydrazindosierung empfohlen. Dies darf jedoch nicht als zusätzlicher Aufwand gesehen werden, da zur Erfüllung der Forderungen der TGL 190-255 ohnehin eine Wasseraufbereitung erforderlich ist.

3. Bemessung

Das eigentliche Problem ist nicht die Bemessung der Pumpen oder Überströmeinrichtungen an sich, sondern die Ermittlung der maximalen Wassermengen, die auf Grund der Volumenänderung zu- oder abgespeist werden müssen. Dabei sind zwei grundlegende Betriebsfälle zu unterscheiden.

Umwälzpumpen außer Betrieb

In diesem Fall ist es nur interessant, die Volumenkontraktion zu betrachten, denn ein Aufheizen bei Pumpenstillstand könnte nur Folge eines groben Bedienungsfehlers sein. Praktisch tritt die größte Volumenkontraktion bei Ausfall der Umwälzpumpen — verursacht beispielsweise durch Ausfall der Elektroenergie — bei vorausgegangenem Vollastbetrieb auf. Das stagnierende Wasser kühlt gemeinsam mit den Anlagenteilen ab. Der zuzuspeisende Volumenstrom $\dot{V}_{Zu}$ stellt mathematisch gesehen die negative Volumenänderung des Netzinhaltswassers nach der Zeit dar. Es gilt

$$\dot{V}_{Zu} = -\frac{dV}{d\tau}\,, \tag{1}$$

wobei dieser Differentialquotient für die einzelnen Anlagenteile unterschiedlich ist. Demzufolge muß der Zuspeisestrom summativ über die Anlagenteile i ermittelt werden. Des weiteren ist es zweckmäßig, das Volumen als Produkt der Masse m und des spezifischen Volumens v in der Form

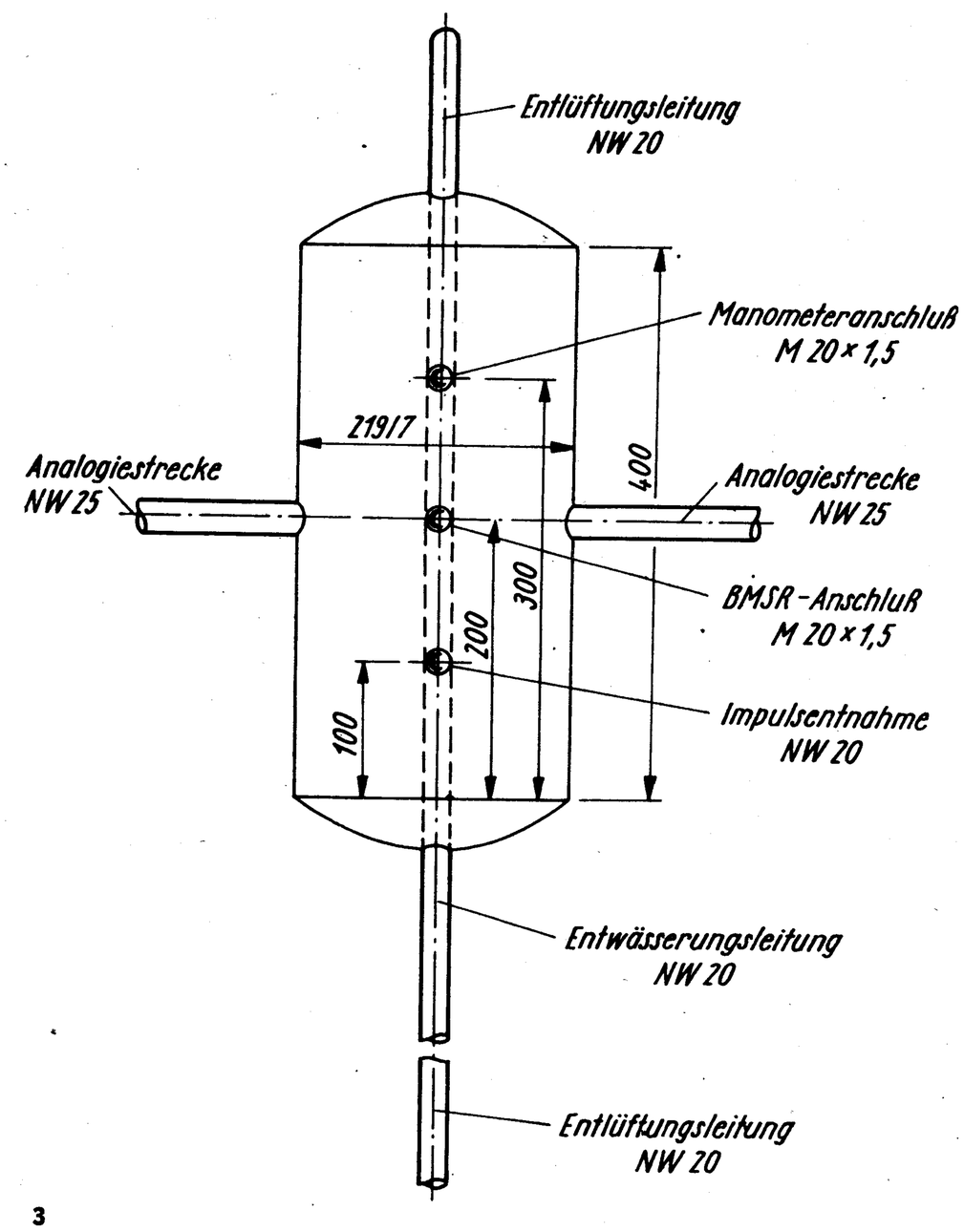
$$\dot{V}_{Zu} = -\sum_{i}\left(m\cdot\frac{dv}{d\tau}\right)_i \tag{2}$$

darzustellen. Die größte Volumenänderung tritt zu Beginn des Vorganges auf, da die Wärmeabgabe der Anlagenteile am größten ist. Die Zufuhr der Heizenergie muß sofort abgeschaltet werden, wenn die Temperatur des Primärmediums höher ist als die zum Sekundärdruck gehörige Verdampfungstemperatur bzw. die sekundärseitige Konzessionierung der Anlage.

Umwälzpumpen in Betrieb

Bei diesem Betriebsfall sind sowohl Volumenexpansionen als auch Volumenkontraktionen möglich. Verursacht werden diese durch planmäßiges Auf- und Abheizen der Anlage sowie durch Regelungsvorgänge zur Lastanpassung. Der zur Kompensation erforderliche Volumenstrom $\dot{V}$ ergibt sich mathematisch als die negative Summe aller Volumenstromänderungen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt längs des geschlossenen Heizkreislaufs auftreten. Es gilt

$$\dot{V} = -\sum_{i}(\dot{V}_2 - \dot{V}_1)_i\,, \tag{3}$$



3

wobei ebenfalls die Darstellung

$$\dot{V} = -\dot{m}\sum_{i}(v_2 - v_1)_i \tag{4}$$

zweckmäßiger ist. Im einzelnen sind alle Anlagenteile i, in welchen Temperatur- und damit Volumenänderungen des Heizmediums auftreten, zu betrachten. Der Index 1 bezeichnet den Eintritts- und der Index 2 den Austrittszustand am jeweiligen Anlagenteil.
Der Volumenstrom $\dot{V}$ ist positiv bei Zuspeisung und negativ bei Abspeisung. Es gilt

$$\dot{V} > 0\,,\ \dot{V}_{Zu} = \dot{V};\quad \dot{V} < 0\,,\ \dot{V}_{Ab} = |\dot{V}|\,. \tag{5}$$

Für die technischen Betrachtungen ist es ausreichend, nur die Wärmeerzeuger und -verbraucher zu bilanzieren. Die Rohrleitungen werden dagegen als adiabat betrachtet. Die größte Volumenexpansion tritt beim Aufheizen, d. h. beim Anfahren des Netzes auf. Der ungünstigste Fall liegt vor, wenn keine Wärmeabgabe stattfindet und die maximale Heizleistung an das Sekundärnetz übertragen wird. Diese maximale Heizleistung $\dot{Q}_{max}$ ist in der Regel größer als die projektierte Vollastleistung $\dot{Q}^{+}$.
Die größte Volumenkontraktion entsteht bei Ausfall der Heizenergie und gleichzeitiger Umwälzung des Sekundärmediums sowie vorausgegangenem Vollastbetrieb. Während die einzelnen Abnehmer volle Leistung abgeben, da der Vorlauf der Fern- und Anschlußleitungen noch entspeichert wird, fließt an der Wärmeübertragerstelle kaltes Rücklaufwasser in den ehemals warmen Vorlauf.

Festlegungen

Würde man das Druckhaltesystem so bemessen, daß die vorgenannten Extremwerte : Volumenexpansion beim Aufheizen und Volumenkontraktion bei Heizenergieausfall kompensiert werden können, dann sind auch alle übrigen Betriebsfälle ohne weiteres zu beherrschen. Die maximale Volumenkontraktion, die bei Stillstand der Umwälzpumpen möglich ist, führt — wie am späteren Zahlenbeispiel gezeigt wird — zu einem kleineren Zuspeisestrom als bei Ausfall der Heizenergie.

Um die Druckdiktieranlagen auf eine notwendige Minimalleistung zu beschränken, sollte bei Ausfall der Heizenergie auch die Wasserumwälzung unterbleiben. Unter diesen Voraussetzungen sind beide Havariefälle (Ausfall der Umwälzpumpen und der Heizenergie) bezüglich der eintretenden maximalen Volumenkontraktion gleichwertig. Ebenso sollte bei Einsatz von Hausmischstationen in diesen die Umwälzung bei Heizenergieausfall unterbleiben. Zur Bemessung des Druckhaltesystems werden deshalb folgende Festlegungen getroffen:

1. Der Förderstrom einer Druckdiktierpumpe muß die größte Volumenkontraktion, die bei plötzlichem Stillstand der Umwälzpumpen auftritt, kompensieren können.
Da es sich um einen Havariefall handelt, darf der Überströmregler kurzzeitig vollkommen geschlossen sein. (Aus Gründen der Regelgenauigkeit sollte dies beim Normalbetrieb nicht auftreten.)
Wird die Wasserumwälzung bei Heizenergieausfall nicht unterbunden, wie z. B. bei Hausanschlußstationen mit vorrangiger Warmwasserbereitung, so ist der Förderstrom der Druckdiktierpumpe mitunter höher festzulegen. Die dafür notwendigen Untersuchungen sind nach den jeweiligen Gegebenheiten in Anlehnung des Abschnittes 3.3. gesondert durchzuführen.

2. Die maximale Abströmmenge wird für den Fall der größten Volumenexpansion beim Aufheizen ermittelt. Dabei sind natürlich Bedienungsanleitungen, die z. B. ein stufenweises Aufheizen vorsehen, zu berücksichtigen. Zur theoretischen Abströmmenge ist bei der praktischen Auslegung noch der Mindestförderstrom der Druckdiktierpumpe zu addieren.

3. Es ist der Nachweis zu führen, daß die maximal möglichen Volumenänderungen infolge witterungsbedingter Laständerungen durch das Druckhaltesystem kompensierbar sind. Dabei ist ein maximaler Temperaturanstieg der Außentemperatur von 3 grd/h anzunehmen.

4. Für das planmäßige Abheizen ist ein Betriebsprogramm zu ermitteln, wobei gegebenenfalls die Förderleistung von beiden Druckdiktierpumpen in Rechnung gestellt werden kann.

3.1. Maximale Volumenkontraktion

Die Volumenkontraktion für den Havariefall „Stillstand des aufgeheizten Netzes" kann nach Gl. (2) errechnet werden. Auf Grund der kausalen Zusammenhänge $v = v\,(t)$ und $t = t\,(\tau)$ folgt die Form

$$\dot{V}_{Zu} = -\sum_i \left(m \cdot \frac{dv}{d\tau}\right)_i = -\sum_i \left(m \cdot \frac{dv}{dt} \cdot \frac{dt}{d\tau}\right)_i \qquad (6)$$

Nachfolgend seien auf möglichst einfache Art praktikable Näherungen für die beiden Differentialquotienten abgeleitet.

Tabelle 1

t [°C]	$\frac{dv}{dt} = 0{,}000099 + 0{,}00000689 \cdot t$ [dm³/grd]	t [°C]	$\frac{dv}{dt} = 0{,}000099 + 0{,}00000689 \cdot t$ [dm³/grd]
30	0,000306	110	0,000857
40	0,000375	120	0,000926
50	0,000443	130	0,000994
60	0,000512	140	0,001063
70	0,000581	150	0,001132
80	0,000650	160	0,001201
90	0,000719	170	0,001270
100	0,000788	180	0,001339

Differentialquotient dv/dt

In Bild 4 ist die Funktion $v = v\,(t)$ dargestellt, wobei die geringfügige Druckabhängigkeit vernachlässigt wurde. Die Funktion kann durch eine quadratische Parabel mit den Kollokationspunkten $(t,\ v)$: (10 °C, 1 dm³/kg); (100 °C, 1,043 dm³/kg); (150 °C, 1,091 dm³/kg) im Bereich von 10 °C bis 180 °C als gute Näherung

$$v = 0{,}9987 + 0{,}000099 \cdot t + 0{,}000003444 \cdot t^2 \text{ in dm}^3/\text{kg} \qquad (7)$$

mit t in °C geschrieben werden. Selbstverständlich gibt es bessere Approximationen, die jedoch auch größeren Rechenaufwand erfordern. Für den Differentialquotienten gilt damit

$$\frac{dv}{dt} = 0{,}000099 + 0{,}00000689 \cdot t \quad \text{in dm}^3/\text{kg} \cdot \text{grd}\,. \qquad (8)$$

Die Werte für einige praktisch vorkommende Temperaturen sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Differentialquotient $dt/d\tau$

Die während eines infinitesimal kleinen Zeitelementes $d\tau$ übertragene Wärmemenge

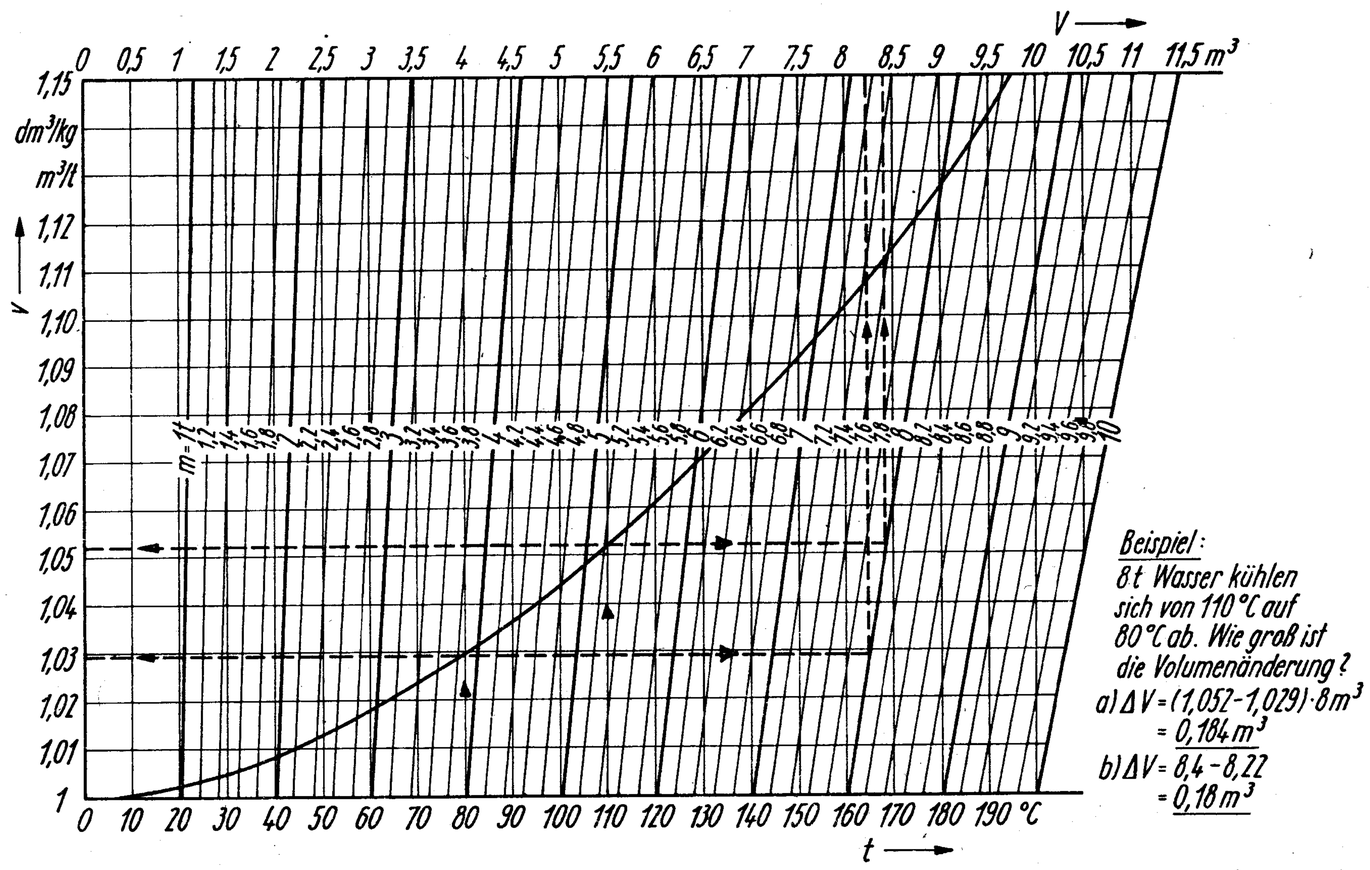
$$dQ = k \cdot A \cdot (t - tu) \cdot d\tau = -\sum m \cdot c \cdot dt \qquad (9)$$

führt zur Abkühlung des im jeweiligen Anlagenteil i stagnierenden Heizwassers und des Anlagenteiles selbst. Im einzelnen bedeuten: k — Wärmedurchgangszahl, A — Heizfläche, t — Medientemperatur, tu — Umgebungstemperatur und $m \cdot c$ — Wasserwert.

Der gesuchte Differentialquotient

$$\frac{dt}{d\tau} = -\frac{k \cdot A \cdot (t - tu)}{\sum m \cdot c} \qquad (10)$$

ergibt sich sofort aus Gl. (9), wenn vorausgesetzt wird, daß Anlagenteil und Inhaltwasser die gleiche Temperatur t aufweisen. Der Zähler des Bruches ist bei Beginn des Abkühlungsvorgangs am größten und ungefähr gleich der Wärme-



4

Tabelle 2

Anlagenteil		$1 + \frac{(m \cdot c)_{Stahl}}{(m \cdot c)_{Wasser}}$	Mittelwert
Rohre NW	500	1,081	
	400	1,089	
	350	1,080	
	300	1,087	1,09
	250	1,091	
	200	1,105	
	150	1,107	
	125	1,114	
	100	1,134	
	80	1,143	
	65	1,156	1,15
	50	1,195	
	40	1,238	
	32	1,345	
	25	1,471	
	20	1,483	1,50
	15	1,671	
	10	1,779	
Radiatoren	350/160	1,739	
	500/110	1,724	
	500/160	1,715	1,70
	900/160	2,008	
	500/220	1,823	
Flachheizkörper	F 600/4/1	2,51	
	7/1	2,47	
	11/1	2,43	2,40
	17/1	2,44	
	26/1	2,42	
Plattenheizkörper	390/60	1,56	
	590/60	1,61	1,60
	990/60	1,71	

abgabe des Anlagenteils im unmittelbar vorausgegangenen Lastfall. Daß dies der Fall ist, liegt im näherungsweise vernachlässigbaren inneren Wärmeübergangswiderstand $1/\alpha_i$ gegenüber den in Reihe liegenden Widerständen bei den meisten Heizflächen (z. B. Radiator, Platte) sowie den Rohrleitungen begründet. Beim Konvektor und Flachheizkörper trifft dies nicht ganz zu. Der dadurch entstehende geringe Fehler bedeutet inhaltlich einen Sicherheitszuschlag zum Volumenstrom $\dot{V}_{Zu}$. Die Gl. (10) kann somit

$$\frac{dt}{d\tau} = -\frac{\dot{Q}}{(m \cdot c)_{Wasser} + (m \cdot c)_{Stahl}}$$

$$= -\frac{\dot{Q} \cdot (m \cdot c)^{-1}_{Wasser}}{1 + \frac{(m \cdot c)_{Stahl}}{(m \cdot c)_{Wasser}}} \qquad (11)$$

geschrieben werden, wobei der Wasserwert der eventuell vorhandenen Rohrdämmung vernachlässigt wird, was einem weiteren Sicherheitszuschlag entspricht. Eine Auswertung des Nenners für die üblichen Anlagenteile ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Mit Kenntnis der Differentialquotienten lautet Gl. (6) zusammenfassend über alle Anlagenteile i

$$\dot{V}_{Zu} = \sum_i \left\{ m \cdot (0{,}000099 + 0{,}00000689 \cdot t) \times \frac{\dot{Q}}{1 + \frac{(m \cdot c)_{Stahl}}{(m \cdot c)_{Wasser}}} \cdot (m \cdot c)^{-1}_{Wasser} \right\}_i .$$

Für die praktische Berechnung gilt damit die Zahlenwertgleichung

$$\dot{V}_{Zu} = \sum_i \left\{ (0{,}000099 + 0{,}00000689 \cdot t) \times \frac{\dot{Q} \cdot 10^{-3}}{1 + \frac{(m \cdot c)_{Stahl}}{(m \cdot c)_{Wasser}}} \right\}_i = \sum_i \varepsilon_i \dot{Q}_i \text{ in m}^3/\text{h}, \qquad (12)$$

wobei $\dot{Q}$ — die Wärmemenge in kcal/h und t — die Temperatur in °C des jeweiligen Lastfalles darstellen. Der Volumenstrom ist positiv, d. h., er muß dem Netz zugeführt werden. Da die Temperaturen und der Nenner in Gl. (12) von den Anlagenteilen und deren Einsatzorten abhängig sind, muß die Ermittlung für jedes Teil i getrennt erfolgen. Der Gesamtzuspeisestrom ergibt sich schließlich additiv. Durch Kombination der Werte aus Tabelle 1 und 2 ergeben sich für typische Anlagenteile die in Tabelle 3 aufgeführten ε-Werte. Selbstverständlich sinkt mit zunehmender Komplexität die Genauigkeit der Rechnung, da beispielsweise der Anteil der einzelnen Rohrnennweiten innerhalb der drei Gruppen unberücksichtigt blieb. Würde man in ganz grober Näherung den Wasserwert $(m \cdot c)_{Stahl}$ der einzelnen Anlagenteile vernachlässigen, so ist ε mit den Werten in Tabelle 1 identisch. Der Volumenstrom $\dot{V}_{Zu}$ würde dabei einen erheblichen Zuschlag aufweisen.

Bei Auswertung der Gl. (12) ergibt sich der größte Volumenstrom $\dot{V}_{Zu,\,max}$, wenn die Vollastwerte t^+ und $\dot{Q}^+$ eingesetzt werden. Dieser erforderliche Zuspeisestrom $\dot{V}_{Zu}$ nimmt mit zunehmender Auskühlzeit rasch ab. Die nach der Zeit τ vorliegenden Parameter $\dot{Q}$ und t errechnen sich aus Gl. (11), wenn man die Beziehung

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}^+} = \left(\frac{t - tu}{t^+ - tu} \right)^M , \qquad (13)$$

die für Heizflächen und Rohre gültig ist, substituiert, die Trennung der Variablen sowie die Integration über τ und t durchführt, zu

$$t = \left[(t^+ - tu)^{1-M} - (1 - M) \cdot \frac{\dot{Q}^+ \cdot (m \cdot c)^{-1}_{Wasser}}{1 + \frac{(m \cdot c)_{Stahl}}{(m \cdot c)_{Wasser}}} \times \frac{\tau}{(t^+ - tu)^M} \right]^{\frac{1}{1-M}} + tu . \qquad (14)$$

(Fortsetzung Seite 209 unten)

Tabelle 3

Anlagenteil		mittlere Temperat. [°C]	$10^3 \cdot \varepsilon$ [m³/kcal]
Rohre NW	10···32	120	0,00062
		110	0,00057
		100	0,00053
		90	0,00048
		80	0,00043
	NW 40···100	120	0,00081
		110	0,00075
		100	0,00069
		90	0,00063
		80	0,00057
	NW 125···500	120	0,00085
		110	0,00079
		100	0,00072
		90	0,00066
		80	0,00060
Radiatoren		90	0,00042
		80	0,00038
Flachheizkörper		90	0,00030
		80	0,00027
Plattenheizkörper		90	0,00045
		80	0,00041

Näherungsweise betragen die Exponenten bei Heizflächen M = 1,20 bis 1,35 und bei nackten Rohren im Mittel M = 1,25.

Da für gedämmte Rohre M = 1 gilt, ergibt sich bei der Integration die von Gl. (14) abweichende Form

$$t = (t^{+} - tu) \cdot e^{-\frac{\dot{Q}^{+} \cdot (m \cdot c)^{-1}_{\text{Wasser}}}{1 + \frac{(m \cdot c)_{\text{Stahl}}}{(m \cdot c)_{\text{Wasser}}}} \cdot \frac{\tau}{t^{+} - tu}} + tu \,. \qquad (15)$$

Mit diesen nach der Zeit τ vorliegenden Temperaturen t, sind nach Gl. (13) die Wärmeabgabe $\dot{Q}$ und damit schließlich gemäß Gl. (12) der Volumenstrom $\dot{V}_{\text{Zu}}$ berechenbar.

Abschließend sei der Beweis erbracht, daß der notwendige Zuspeisestrom bei Stillstand der Umwälzpumpen kleiner ist als beim Betrieb der Umwälzpumpen und Heizenergieausfall. Im ersten Fall beträgt nach Gl. (12)

$$\dot{V}_{\text{Zu}} = \varepsilon \cdot \dot{Q} \,,$$

im letzteren nach Gl. (4) mit Index V — Wärmeverbraucher und E — Wärmeerzeuger

$$\dot{V}_{\text{Zu}} = -\dot{m} \cdot (\varphi_{2\text{V}} - \varphi_{1\text{V}}) \qquad da\ (\varphi_{1\text{E}} = \varphi_{2\text{E}})$$

$$\dot{V}_{\text{Zu}} = \frac{\dot{Q}}{\Delta t \cdot c} \cdot (\varphi_{1\text{V}} - \varphi_{2\text{V}}) = \frac{d\varphi}{dt} \cdot \dot{Q} \cdot c^{-1}$$

Der Vergleich der Tabellenwerte 3 mit 1 liefert: $\varepsilon < \frac{d\varphi}{dt} \cdot c^{-1}$,

was zu beweisen war.

(Wird fortgesetzt)