Wärme- und Massenströme in Wärmenetzen (III)

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

Wärme- und Massenströme an den Netzknoten und an der Einspeisung

Die Wärme- und Massenströme der einzelnen Abnehmer vereinigen sich an den Knotenpunkten des Rohrleitungssystems. Im Abschnitt 1. wurde auf die Abnehmercharakteristiken eingegangen. In der Regel sind die Wärmeströme an feste Zeitabläufe gekoppelt, z. B. bei technologischen Prozessen und bei der Nutzung von gesellschaftlichen Einrichtungen, oder ihre Größe ist an eine bestimmte Wahrscheinlichkeit gebunden, wie z. B. die Raumheizung oder der Warmwasserbedarf von Wohngebäuden.

Bei ganz exakter Erfassung müßte für jeden Netzknoten ein Belastungsdiagramm oder ein neuer Gleichzeitigkeitsfaktor $g_{N,k}$ bestimmt werden. Außerdem sind die Wärmeverluste des Rohrnetzes zu berücksichtigen. Dies geschieht nach rechnerisch ermittelten Werten oder pauschal unter Verwendung der Gl. (5) mit einem Verlustfaktor

$$\varphi_N = 1{,}02 \ldots 1{,}05 \,. \tag{44}$$

Die differenzierte, knotenpunktweise Ermittlung des Gleichzeitigkeitsfaktors $g_{N,k}$ ist sehr aufwendig und entspricht deshalb nicht der üblichen Bemessungspraxis. Andererseits muß aber auch darauf hingewiesen werden, daß das Aufsuchen von Reserven durch genauere Berechnungsalgorithmen stets mühevoll sein wird. Es ist deshalb zwischen Aufwand und möglicher Einsparung objektbezogen abzuwägen.

Die Problematik gestaltet sich besonders kompliziert, wenn die Belastungen Zeitfunktionen darstellen, da deren Wirken von den unterschiedlichen Transportzeiten des Heizmediums zu den Abnehmern überlagert wird. Die Transportzeiten sind weiterhin abhängig von den Massendurchsätzen. Bei Abnehmern mit massenvariabler Leistungsregelung sind die Massenströme und damit auch die Transportzeiten wiederum Funktionen der Wärmeströme. In diesen Fällen muß die Ermittlung der Massen- und Wärmeströme parallel verlaufen. Würde noch die Abkühlung des Heizmediums in den einzelnen Teilstrecken des Wärmenetzes einbezogen werden, die wiederum vom Massendurchsatz abhängig ist, so könnte die Ermittlung einer aktuellen Massenstromverteilung nur iterativ erfolgen. Die sich wiederholenden Berechnungen wären nur mit einer EDV-Anlage realisierbar. Der gezeigte Zusammenhang gilt für Knotenpunkte und für die Einspeisestelle am Netzanfang gleichermaßen.

Entfällt die Knotenpunktanalyse, wird das Netz möglicherweise überbemessen. Bei fehlender Reduzierung an der Einspeisestelle entstehen jedoch bedeutend größere volkswirtschaftliche Verluste infolge der Überbemessung der Erzeugerkapazität.

Für die praktische Bemessung wird folgender Kompromißvorschlag unterbreitet:

- Die Ermittlung der Massenströme erfolgt durch Addition der Abnehmerwerte. Es handelt sich dabei um die Massenströme $\dot{m}_N$, die im Abschnitt 1. definiert wurden. Sie sind entsprechend der technischen Ausführung der Abnehmeranlage dem im Heizungsprojekt ausgewiesenen Wert identisch oder aber unter Einbeziehung der Gleichzeitigkeit im Abnehmerbereich reduziert.
- Die ermittelte Massenstromverteilung stellt die Grundlage für die hydraulische Netzbemessung dar. Damit können alle Abnehmer bezüglich des Heizmediums gleichzeitig versorgt werden.

Dieses Vorgehen erscheint gerechtfertigt, da sonst die hydraulische Bemessung für eine mögliche Vielzahl von Belastungsvarianten durchgeführt werden müßte und der Betrieb bei evtl. veränderten Gleichzeitigkeitsbedingungen möglicherweise nicht in vollem Umfang durchführbar wäre.

— Die Gesamtwärmeleistung an der Einspeisestelle ist dagegen unter Beachtung der gleichzeitigen Belastung zu ermitteln. Sie setzt sich aus $\dot{Q}_{\max,N}$ und $\dot{Q}_{\text{verl.},N}$ additiv zusammen. Die einzelnen Summanden der Netzwärme-Höchstleistung werden mit $\dot{Q}^{*}{}_{N,k}$ bezeichnet und in den Abschnitten 2.1.1. und 2.2.1. näher betrachtet. Sofern diese Zeitfunktionen $\dot{Q}^{*}{}_{N,k}(\tau)$ darstellen, ist $\dot{Q}_{\max,N}$ mit Hilfe eines Belastungsdiagramms zu bestimmen.

Besondere Aufmerksamkeit muß auch der Überprüfung der verschiedenen Betriebsbedingungen gelten. Dies ist wichtig, damit die möglichen Teillastzustände auch technisch beherrscht und mit dem geringsten Energieaufwand realisiert werden können. Dies betrifft beispielsweise die Staffelung der Umwälzpumpen, der Wärmeübertrager, der Meßeinrichtungen u. a. m. Für die spezielle Ermittlung der Belastungsvarianten soll folgendes Vorgehen gelten:

— Einige typische Varianten einer gleichzeitigen Belastung sind zu untersuchen. Dabei müssen vor allem Abnehmerkombinationen, die in ihrer Gesamtheit oder zu einem großen Teil abschaltbar sind, berücksichtigt werden. Die Massenströme und die angeschlossenen Wärmeleistungen sind entsprechend den technischen Gegebenheiten zu reduzieren. Die Nachrechnung der Temperaturverteilung im Netz ist ohne weiteres möglich, da die dafür benötigten Daten der jeweiligen Belastungsvariante ($\dot{m}_j$; $\dot{Q}_j$; $t_{R,N,j}$) relativ genau ermittelt werden können.

— Bezieht sich die Reduzierung der gleichzeitigen Belastung auf eine Vielzahl von Abnehmern, ohne daß eine genaue örtliche und zeitliche Zuordnung vorliegt, wie z. B. bei den Wärmeströmen für die Warmwasserbereitung im Wohnungsbau, so sollte die tatsächliche Gesamtbelastung auf alle anteiligen Abnehmer als Mittelwert umgelegt werden. Für diese Verhältnisse ist dann auch die Temperaturverteilung zu bestimmen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bei einer Bemessung des Wärmenetzes einschließlich der Umwälzpumpen nach den vorgenannten Grundsätzen die Festlegung der Teilstreckendurchmesser relativ einfach möglich ist und daß im praktischen Betrieb stets hydraulische Reserven vorhanden sein dürften. Davon kann gegebenenfalls bei späteren geringfügigen Erweiterungen des Versorgungsbereiches ohne Neuverlegung von Haupttrassen gezehrt werden. Dies ist — wie die Praxis häufig zeigt — kein zu unterschätzender Vorteil.
Die Bemessung der Wärmebereitstellung (Erzeugeranlage, Wärmeübertragerstation usw.) wird für die voraussichtlich tatsächlich auftretende Gesamtwärmeleistung vorgenommen. Eine Reserve an Leistungskapazität ist ökonomisch nicht zu vertreten. Bei evtl. Erweiterungen müssen geeignete Kapazitäten errichtet werden.
Die Zusammenstellung der vorgeschlagenen Belastungsannahmen des Wärmenetzes ist im Komplexbeispiel (Abschn. 3.1.) verdeutlicht.

2.1. Gebäudeheizung und technologische Verbraucher

2.1.1. Wärmeleistung

Die Ermittlung der Netzwärmeleistung $\dot{Q}_{\max,N}$ baut sich auf den Wärmeleistungen der Abnehmer auf. Die Angaben sind jedoch differenziert zu werten. Als Hauptkriterien gelten, inwieweit im gegebenen Abwärmestrom ein Gleichzeitigkeitsfaktor eingerechnet wurde und ob die einzelnen Leistungsanteile rekonstruierbar sind. Weiter können der Einfachheit halber gleichgeartete Abnehmer zu Komplexabnehmern zusammengefaßt werden. Sie zeichnen sich durch gleiche Abnehmercharakteristiken und gleiche Transportzeiten zur Einspeisestelle aus, falls die Abnehmerleistungen Zeitfunktionen darstellen. Bei stets konstanten Belastungen ist das Zusammenfassen zu Abnehmerkomplexen beliebig. Nachfolgend werden die typischen Abnehmergruppen vorgestellt.

Abnehmer mit vorgegebener Norm-Wärmeleistung oder zeitabhängig vorgegebener Wärmeleistung

Hierzu gehören **Gebäudeheizungsanlagen,** deren Norm-Wärmeleistungen $\dot{Q}_{Norm}$ gemäß Gl. (1) gegeben sind und **Warmwasserspeicher,** deren Leistungsaufnahme $\dot{Q}(\tau)$ durch die Gln. (17) bzw. (19) definiert werden. Zusätzlich können natürlich Einschränkungen der Betriebszeit oder eine Leistungsreduzierung vorhanden sein, die bei Heizungssystemen, aufbauend auf $\dot{Q}_{Norm}$, zu berücksichtigen sind. Die ermittelten Belastungen $\dot{Q}^{*}{}_{N,k}$ stellen dann einen Summanden k der Netzwärmeleistung dar.

Abnehmer mit vorgegebener Wärme-Höchstleistung

Die Angabe eines solchen Wertes schließt nach Gl. (2) die Berücksichtigung eines Gleichzeitigkeitsfaktors ein. So werden bei **Industrie- und Gesellschaftsbauten** bzw. ganzen Komplexen die Wärme-Höchstleistungen üblicherweise mit Hilfe von Belastungsdiagrammen analog dem Beispiel 1.2.3. bestimmt. Die dort ermittelte Wärme-Höchstleistung des Abnehmers $\dot{Q}_{max}$, die meistens auch in den Wärmelieferverträgen gebunden wird, gilt dann als Belastungswert für das Netz. Dies kann natürlich zu einer Überbemessung führen, da die in Rechnung gestellte Wärme-Höchstleistung des Abnehmers sich nicht zwangsläufig mit der Belastungsspitze des Netzes überlagert. Da der Projektant des Wärmenetzes aber nicht tiefgründig die Abnehmercharakteristik analysieren kann und die vertraglich gebundene Anschlußleistung in der Regel zeitunabhängig ($g_A = 1$) bereitzustellen ist, wird die angegebene Wärme-Höchstlast $\dot{Q}_{max}$ als Summand der Netzwärme-Höchstlastleistung $\dot{Q}^{*}{}_{N,k}$ betrachtet. Ist im Ausnahmefall die Wärmeleistung des Komplexabnehmers als Zeitfunktion $\dot{Q}^{*}{}_{N,k}(\tau)$ gegeben, kann dies natürlich detailliert berücksichtigt werden (Belastungsdiagram zur Ermittlung von $\dot{Q}_{\max,N}$ aufstellen).

Es ist auch möglich, daß für die Raumheizung von **Wohngebäuden** die Wärme-Höchstleistung $\dot{Q}_{max}$ angegeben wird. Bei Kenntnis der Einschaltwahrscheinlichkeiten φ ergab sich nach Gl. (9) ein Gleichzeitigkeitsfaktor g_A, mit dem gemäß Gl. (2) die Norm-Wärmeleistung reduziert wurde (vgl. Beispiel 1 des Abschnitts 1.1.3.). Dieser Gleichzeitigkeitsfaktor ist für einen größeren Versorgungskomplex k neu zu ermitteln. Bei entsprechend größerer Heizkörperzahl H_k ergibt sich nach Gl. (9) der Faktor g_k.
Der Summand zur Berechnung der Netzwärme-Höchstleistung $\dot{Q}^{*}{}_{N,k}$ berechnet sich am genauesten als Produkt von g_k und der Summe der Norm-Wärmeleistungen der zum Komplex k gehörigen Wohnbauten.

Damit sind grundsätzlich alle Werte zur Bestimmung von $\dot{Q}_{\max,N}$ bereitgestellt. Sind die Wärmeleistungen der Komplexabnehmer Zeitfunktionen $\dot{Q}^{*}{}_{N,k}(\tau)$, müssen bei der Aufstellung des Belastungsdiagramms allerdings noch die unterschiedlichen Transportzeiten von der Einspeisestelle zu den Abnehmern $\Delta\tau_k$ Berücksichtigung finden. Soll beispielsweise die Belastung zu einem Zeitpunkt τ_1 errechnet werden, so sind die Leistungen der Komplexabnehmer k zur Zeit $\tau = \tau_1 - \Delta\tau_k$ zu summieren.
Die Beispiele 2.1.3. und 3.1. detaillieren die vorgestellten Zusammenhänge.

2.1.2. Massenstrom und Rücklauftemperatur

Die Massenströme der Abnehmer werden für den jeweiligen Belastungsfall addiert. Für die hydraulische Netzbemessung bzw. für volle Belastung gilt (Abnehmer $j = 1 \ldots n$)

$$\dot{m}_{ges,N} = \sum_{j=1}^{n} \dot{m}_{N,j} \,. \tag{45}$$

Die Massenströme entsprechen den Gln. (13), (14), (20) bzw. (23).

Bei Teillastzuständen infolge nicht gleichzeitiger Belastung verringern sich die Massenströme in Abhängigkeit der Abnehmersysteme. Die hauptsächlichen Einflußfaktoren sind in den Abschnitten 1.1.2. und 1.2.2. diskutiert. Für die zur Netzwärme-Höchstleistung $\dot{Q}_{\max,N}$ gehörigen Massenströme $\dot{m}'_{N,j}$ ergibt sich dann analog zu Gl. (45) der Gesamtmassenstrom zu

$$\dot{m}'_{ges,N} = \sum_{j=1}^{n} \dot{m}'_{N,j} \,. \tag{46}$$

Weiterhin gilt $\dot{m}'_{ges,N} \leqq \dot{m}_{ges,N}$.

Mit Kenntnis der zueinandergehörigen Größen $\dot{Q}_{ges,N}$ und $\dot{m}'_{ges,N}$ kann für stationäre Betriebsbedingungen die Rücklauftemperatur an der Einspeisestelle $t_{R,E}$ berechnet werden. Bei einer Vorlauftemperatur an der Einspeisestelle von $t_{V,E}$ folgt

$$t_{R,E} = t_{V,E} - \frac{\dot{Q}_{ges,N}}{c\,\dot{m}'_{ges,N}} \,. \tag{47}$$

2.1.3. *Beispiel*

Ein Wohngebiet mit 980 Wohnungen wird über ein Vierleitersystem versorgt. Für das Netz, das die Gebäudeheizungssysteme versorgt, ist das Belastungsdiagramm des Wärmestroms an der Einspeisestelle zu ermitteln. Im einzelnen sind sieben Wohngruppen mit je 140 Wohnungen sowie nachfolgende gesellschaftliche Einrichtungen mit folgenden charakteristischen Daten angeschlossen:

Nr.	Objekt	$\dot{Q}_{Norm}$ in kW	$\Delta\tau_j$ in min	Betriebszeit
1	Kinderkrippe und Kindergarten	240	5	5.00 bis 18.00
2	Schule	650	6	6.00 bis 13.00
3	Einkaufszentrum	50	3	8.00 bis 17.30
4	Dienstleistungszentrum	80	2	8.30 bis 18.00
5	Gaststätte	100	4	10.00 bis 23.00
6	Reparaturstützpunkt	240	1	14.00 bis 20.00
7	Sporthalle	40	5	15.00 bis 21.00
	Wohnungseinheit (Mittelwert)	5,3	1...5	0.00 bis 24.00

Während die Beheizung der Wohnungsbauten bei minimalen Außentemperaturen durchgehend erfolgt, werden die gesellschaftlichen Einrichtungen in den angegebenen Betriebszeiten voll und außerhalb dieser Zeiträume reduziert mit etwa 0,4 $\dot{Q}_{Norm}$ beheizt. Innerhalb der etwa einstündigen Anheizphase ist mit 1,2 $\dot{Q}_{Norm}$ zu rechnen.

Da in den Wohnbauten Einrohrheizungssysteme mit Umgehungsleitungen und in den übrigen Objekten nachgerüstete Bypaßregelungen installiert sind, bleiben im gleitend gefahrenen Netz die Massenströme annähernd konstant. Damit bleiben auch die angegebenen Transportzeiten unabhängig von der Wärmeenergieentnahme gleich. Bei der Aufstellung des Belastungsdiagramms sind die Netzwärmeverluste mit vier Prozent von $\dot{Q}_{max,N}$ in Rechnung zu stellen.

Lösung

Um das Belastungsdiagramm ermitteln zu können, werden zunächst die Wärmeleistungen der gesellschaftlichen Einrichtungen während der Betriebspausen und der Anheizphasen tabellarisch bestimmt.

Nr.	$\dot{Q}_{Norm}$ in kW	0,4 $\dot{Q}_{Norm}$ in kW	1,2 $\dot{Q}_{Norm}$ in kW
1	240	96	288
2	650	260	780
3	50	20	60
4	80	32	96
5	100	40	120
6	240	96	288
7	40	16	48

Für den Wohnungsbau ergibt sich eine Norm-Wärmeleistung von $\dot{Q}_{Norm} = 5194$ kW. Gemäß Aufgabenstellung ist hierfür ein Gleichzeitigkeitsfaktor nicht zu berücksichtigen. Die zeitliche Belastung soll im weiteren stundenweise errechnet werden. Dabei mögen folgende Vereinfachungen gelten:

— Die Transportzeiten $\Delta\tau_j$ werden wegen der vorhandenen Kleinheit nicht berücksichtigt.

— Die zur gegebenen Uhrzeit ermittelte Wärmeleistung gilt immer für die nachfolgenden Belastungen, oder mathematisch gesagt, „rechtsseitig".

— Die Lastveränderungen, die nicht zu vollen Stunden erfolgen, werden der Einfachheit halber nicht differenziert betrachtet.

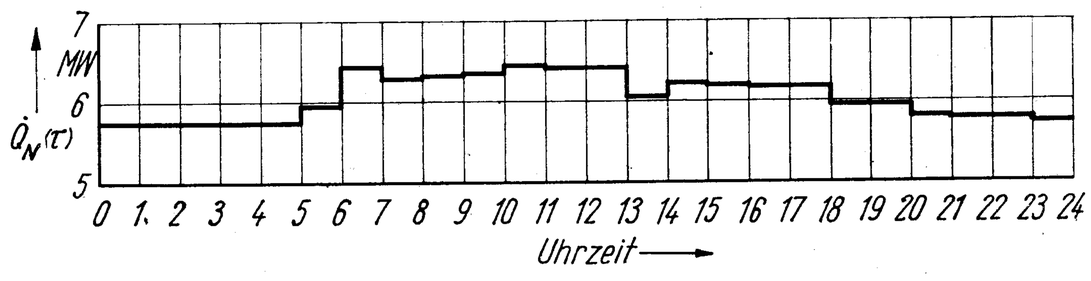
Die rechnerische Ermittlung wird bei einer Vielzahl von Abnehmern der grafischen Methode vorgezogen, da diese rationeller und genauer ist.

Wärmeleistungen der Objekte $\dot{Q}^*_{N,k}$

Uhrzeit τ_u	Wobau kW	1 kW	2 kW	3 kW	4 kW	5 kW	6 kW	7 kW	$\dot{Q}_N(\tau)$ kW
23...4	5194	96	260	20	32	40	96	16	5754
5	5194	288	260	20	32	40	96	16	5946
6	5194	240	780	20	32	40	96	16	6418
7	5194	240	650	20	32	40	96	16	6288
8	5194	240	650	60	32	40	96	16	6328
9	5194	240	650	50	96	40	96	16	6382
10	5194	240	650	50	80	120	96	16	6446
11	5194	240	650	50	80	100	96	16	6426
12	5194	240	650	50	80	100	96	16	6426
13	5194	240	260	50	80	100	96	16	6036
14	5194	240	260	50	80	100	288	16	6228
15	5194	240	260	50	80	100	240	48	6212
16	5194	240	260	50	80	100	240	40	6204
17	5194	240	260	50	80	100	240	40	6204
18	5194	96	260	20	32	100	240	40	5982
19	5194	96	260	20	32	100	240	40	5982
20	5194	96	260	20	32	100	96	40	5838
21	5194	96	260	20	32	100	96	16	5814
22	5194	96	260	20	32	100	96	16	5814

Der Kurvenverlauf ist im Bild 7 aufgezeichnet. Die Wärme-Höchstleistung des Netzes liegt zwischen 10.00 und 11.00 Uhr. Sie beträgt $\dot{Q}_{max,N} = 6{,}446$ MW. Die Gesamtwärmeleistung ergibt sich dann unter Beachtung der Netzwärmeverluste nach Gl. (5) zu

$$\dot{Q}_{ges,N} = 1{,}04 \cdot 6{,}446 \text{ MW} = 6{,}7 \text{ MW}.$$



7 Belastungsdiagramm zum Beispiel 2.1.3.

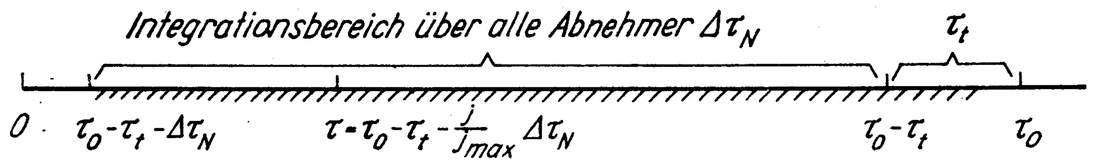
2.2. Warmwasserbereitung für Wohnbauten

2.2.1. *Wärmeleistung*

Die zeitlichen Verläufe der Warmwasserbereitung sind im Abschnitt 1.3.2. angegeben. Exakt beziehen sich diese Angaben auf die Gesamtheit aller Abnehmer, so daß beispielsweise Gl. (42) eigentlich nur in der Form $\dot{Q} = n\,\dot{q}(n, \tau)$ ohne Beachtung der Transportzeiten gilt. Um deren Einfluß bezüglich der Senkung der Maximallast abschätzen zu können, wird in Ermangelung einer exakten Theorie angenommen, daß die Wärmeströme zu gleichen Anteilen den einzelnen Verbrauchern j zugeordnet sind. Die besondere Problematik besteht darin, daß sich einerseits der Gleichzeitigkeitsfaktor auf den gesamten Versorgungskomplex k bezieht, andererseits aufgrund der unterschiedlichen Transportzeiten zu den einzelnen Abnehmern $\Delta\tau_j$ bei zeitabhängigen Belastungen $\dot{Q}_j(\tau)$ sich das Zusammenfassen zu Abnehmerkomplexen eigentlich verbietet. Da die Wärmeströme der Abnehmer, bezogen auf eine Wohnungseinheit, gemäß Definition (41) einen völlig gleichen Verlauf aufweisen und für Wohngebiete in erster Näherung die Transportzeiten zu den einzelnen Abnehmern durch eine lineare Gleichung beschrieben werden können, ist eine analytische Formulierung der beiden Komponenten möglich. Das heißt, es kann eine Zusammenfassung der Verbraucher zu einem Komplexabnehmer k vorgenommen und somit eine aufwendige Ermittlung unter Verwendung eines Belastungsdiagramms über alle Einzelverbraucher j umgangen werden.

Der Gesamtwärmestrom $\dot{Q}^*_{N,k}$ für den Versorgungskomplex k zur Zeit τ_0 ergibt sich durch Summation über alle gleichartigen Abnehmer j von $j = 1$ bis $j = j_{max}$ zu

$$\dot{Q}^*_{N,k}(\tau_0) = \int_0^{j_{max}} \dot{q}\,(\tau_0 - \Delta\tau_j)\,\mathrm{d}_j\,. \qquad (48)$$



8 Zeitkoordinate und deren Komponenten

Durch Substitution der Gl. (34) erhält man weiter

$$\dot{Q}^{\star}{}_{\mathrm{N,k}}(\tau_0) = \dot{q}_{\max} \int_0^{j_{\max}} \mathrm{e}^{-[a(\tau_0 - \Delta\tau_j)]^2} \, \mathrm{d}j \,. \tag{49}$$

Mit dem Übergang zu unendlich feiner Abnehmerstruktur kann eine Abnehmerfunktion in Abhängigkeit der Zeit aufgestellt werden:

$$j = \frac{j_{\max}}{\Delta\tau_{\mathrm{N}}} (\tau - \tau_{\mathrm{t}}) \,,$$

woraus die Zeitkoordinate nach Bild 8 folgt

$$\tau = \tau_0 - \tau_{\mathrm{t}} - \frac{j}{j_{\max}} \Delta\tau_{\mathrm{N}} = \tau_0 - \Delta\tau_{\mathrm{j}} \,. \tag{50}$$

Dabei entsprechen τ_{t} der Transportzeit bis zum ersten und $\tau_{\mathrm{t}} + \Delta\tau_{\mathrm{N}}$ der Zeit bis zum letzten Abnehmer.
Das Einsetzen in Gl. (49) liefert dann

$$\dot{Q}^{\star}{}_{\mathrm{N,k}}(\tau_0) = \dot{q}_{\max} \int_0^{j_{\max}} \mathrm{e}^{-\left[a\left(\tau_0 - \tau_{\mathrm{t}} - \Delta\tau_{\mathrm{N}} \frac{j}{j_{\max}}\right)\right]^2} \mathrm{d}j \,. \tag{51}$$

Zur Lösung des Integrals wird

$$\frac{\mu}{\sqrt{2}} = a \left(\tau_0 - \tau_{\mathrm{t}} - \Delta\tau_{\mathrm{N}} \frac{j}{j_{\max}}\right) \tag{52}$$

substituiert. Daraus ergeben sich der Differentialquotient

$$\frac{\mathrm{d}\mu}{\mathrm{d}j} = -a\sqrt{2} \frac{\Delta\tau_{\mathrm{N}}}{j_{\max}} \tag{53}$$

und die Grenzen

$$\mu_1 = \sqrt{2}\, a\, (\tau_0 - \tau_{\mathrm{t}}) \qquad \text{für } j = 0$$
$$\mu_2 = \sqrt{2}\, a\, (\tau_0 - \tau_{\mathrm{t}} - \Delta\tau_{\mathrm{N}}) \qquad \text{für } j = j_{\max} \,. \tag{54}$$

Die Gl. (51) erhält dann die Form

$$\dot{Q}^{\star}{}_{\mathrm{N,k}}(\tau_0) = -\dot{q}_{\max} \frac{j_{\max}}{\sqrt{2}\, a\, \Delta\tau_{\mathrm{N}}} \int_{\mu_1}^{\mu_2} \mathrm{e}^{-\frac{\mu^2}{2}} \, \mathrm{d}\mu \,. \tag{55}$$

Unter Verwendung der Verteilungsfunktion der Normalkurve [10]

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \mathrm{e}^{-\frac{t^2}{2}} \, \mathrm{d}t$$

ergibt sich die Lösung zu

$$\dot{Q}^{\star}{}_{\mathrm{N,k}}(\tau_0) = \dot{q}_{\max} \frac{j_{\max}}{a\, \Delta\tau_{\mathrm{N}}} \sqrt{\pi}\, [\Phi(\mu_1) - \Phi(\mu_2)] \,. \tag{56}$$

Die Aufteilung des Integrals zwischen den Grenzen μ_1 bis μ_2 in zwei Terme mit den Grenzen 0 bis μ_1 und 0 bis μ_2 ist im Bild 9 als Fläche A dargestellt. Es leuchtet sofort ein, daß diese Fläche ein Maximum wird, wenn bei gleicher Differenz $\Delta\mu = \mu_1 - \mu_2$ die beiden Grenzen μ_1' und μ_2' symmetrisch zur Achse $\mu = 0$ angeordnet sind. Es gelten damit

$$\mu_1' = \frac{\mu_1 - \mu_2}{2}$$

$$\mu_2' = -\frac{\mu_1 - \mu_2}{2} \,, \tag{57}$$

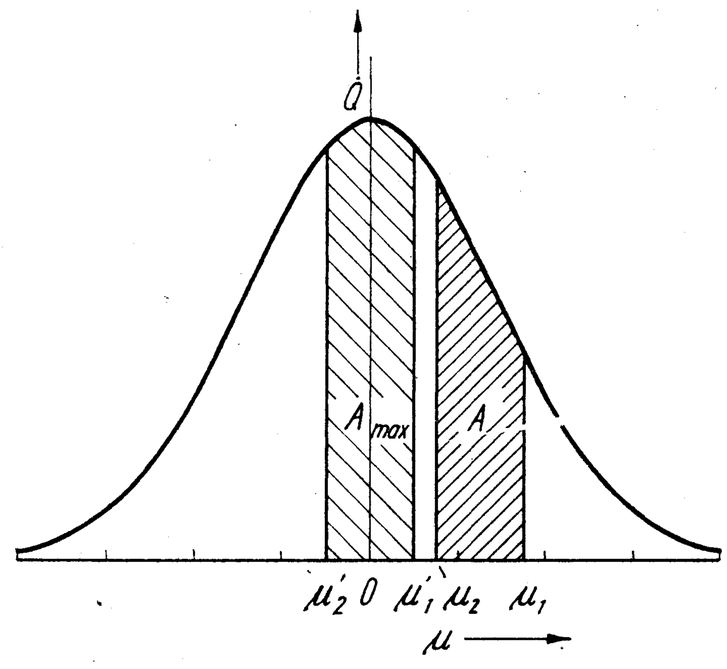
woraus entsprechend der Gl. (54)

$$\mu_1' = \frac{a\, \Delta\tau_{\mathrm{N}}}{\sqrt{2}}$$

$$\mu_2' = -\frac{a\, \Delta\tau_{\mathrm{N}}}{\sqrt{2}} \tag{58}$$

folgen. Aus Symmetriegründen ergibt Gl. (56) die maximale Wärmeleistung zu

$$\dot{Q}^{\star}{}_{\mathrm{N,k,max}} = \dot{q}_{\max} \frac{j_{\max}}{a\, \Delta\tau_{\mathrm{N}}} \, 2\sqrt{\pi}\, \Phi\left(\frac{a\, \Delta\tau_{\mathrm{N}}}{\sqrt{2}}\right) . \tag{59}$$



9 Integrationsgrenzen und zugehörige Flächen des Integrals

Unter Beachtung, daß die maximale Abnehmerzahl $j_{\max}$ der Wohnungsanzahl n entspricht, nimmt Gl. (59) bei Substitution der Gl. (30) im Bereich von $n = 1000 \ldots 10\,000$ WE die Form

$$\dot{Q}^{\star}{}_{\mathrm{N,k,max}} = \dot{q}_{\mathrm{S/D,max}}\, n\, v \tag{60}$$

an. Der Minderungsfaktor

$$v = \frac{2\sqrt{\pi}}{a\, \Delta\tau_{\mathrm{N}}} \Phi\left(\frac{a\, \Delta\tau_{\mathrm{N}}}{\sqrt{2}}\right) \tag{61}$$

ist in Abhängigkeit des Terms $(a\, \Delta\tau_{\mathrm{N}}/2)$ in Tabelle 4 angegeben. Die prozentuale Reduzierung des maximalen Wärmestroms infolge der Netz-Transportzeit berechnet sich zu

$$\Delta\dot{Q} = (1 - v)\ 100\,\% \,. \tag{62}$$

Tabelle 4 Minderungsfaktor v nach Definitionsgleichung (61)

$\frac{a\, \Delta\tau_{\mathrm{N}}}{\sqrt{2}}$	v
0,01	1,0000
0,1	0,998
0,2	0,994
0,3	0,985
0,4	0,974
0,5	0,960
0,6	0,943
0,7	0,924
0,8	0,903
0,9	0,880
1,0	0,856

Der Faktor a kann nach Gl. (40) oder Tabelle 2 ermittelt werden Die Zeitverschiebung im Wärmenetz $\Delta\tau_{\mathrm{N}}$ ist nach [11] zu errechnen. Die Auswertung zeigt, daß selbst bei sehr großen Wohngebieten lediglich eine Reduzierung von etwa ein Prozent erreichbar ist. Die Ursachen für die geringen rechnerischen Minderungen werden im Beispiel verdeutlicht.
Zusammenfassend ist festzustellen, daß der für die Netzwärme-Höchstleistung $\dot{Q}_{\max,\mathrm{N}}$ in Rechnung zu stellende Summand $\dot{Q}^{\star}{}_{\mathrm{N,k}}$ der Abnehmergruppe k (Gesamtheit der Warmwasserbereitungsanlagen des Wohnungsbaus) durch Gl. (56) als Zeitfunktion und mit Gl. (60) der Maximalwert gegeben ist. Die Größe $\dot{q}_{\mathrm{S/D,max}}$ stellt eine Funktion der zu versorgenden Wohnungszahlen n dar. Somit enthält $\dot{q}_{\mathrm{S/D,max}}(n)$ bereits den jeweiligen Gleichzeitigkeitsfaktor bei Vernachlässigung der Transportzeiten im Wärmenetz. Werden diese in Ansatz gebracht, so erfolgt eine durch den Faktor v bewirkte weitere Reduzierung. Diese ist jedoch in der Regel unbedeutend.

2.2.2. Massenstrom und Rücklauftemperatur

Die im Abschnitt 2.1.2. zu den vorgenannten Problemen dargelegten Ausführungen gelten auch hier. Für die hydraulische Netzbemessung sind die vollen Abnehmer-Massenströme $\dot{m}_{\mathrm{N,j}}$ einzusetzen, wenn eine spezielle Entnahme für das Warmwasserbereitungssystem vorhanden ist. Bei Systemen, die nur die Auskühlung des Rücklaufes der Gebäudeheizung nutzen, existiert kein zusätzlicher Massenstrom. Dies wurde auch bereits im Abschnitt 1.3.3. dargelegt.
Für die Berechnung der Rücklauftemperatur an der Einspeisestelle gelten die Gln. (46) und (47) allgemein. Falls die Warmwasser-

bereitungssysteme eine separate Heizmedienentnahme aufweisen, sind nur die zur anteiligen Netzwärme-Höchstleistung (Gl. (60)) gehörigen Massenströme $\dot{m}'_{N,j}$ einzusetzen. In erster Näherung ist dabei $\dot{Q}_{max}$ gleichmäßig auf alle angeschlossenen Abnehmer aufzuteilen.

2.2.3. Beispiel

Für die Wohnbauten eines Neubaugebietes ($n = 6500$ WE) sind der Wärmestrom für die Warmwasserbereitung als Zeitfunktion ohne Beachtung der Zeitverschiebung und der maximale Wärmestrom bei $\Delta\tau_N = 1500$ s überschläglich zu ermitteln.

Wie ändert sich der maximale Wärmestrom, wenn bei Sommerbetrieb sich $\Delta\tau_{N,S}$ auf 4900 s erhöht?

Lösung

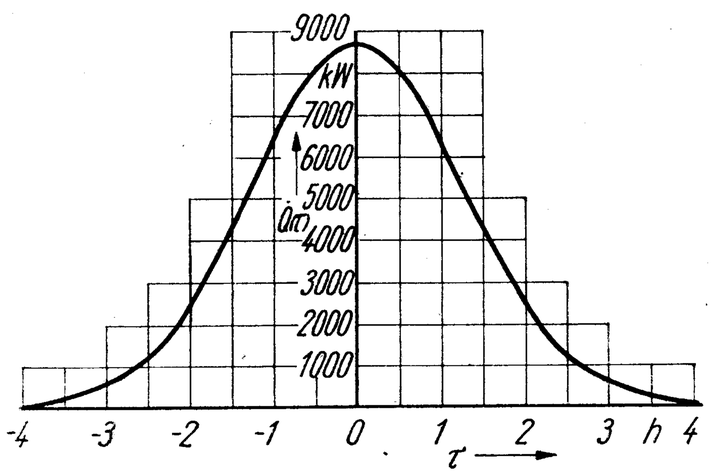
Die Berechnung des zeitlichen Wärmestroms, bezogen auf die gesamte Abnehmergruppe k, kann sofort nach Gln. (32) und (42) vorgenommen werden. Es gilt

$$\dot{Q}(\tau) = 2{,}69 \cdot 6500^{0{,}92}\ e^{-(0{,}947 \cdot 6500^{-0{,}06}\,\tau)^2}\ \text{kW}\,.$$

Die Auswertung ergibt

τ in h	0	±0,125	±0,25	±0,5	±1	±2	±3	±4
$\dot{Q}(\tau)$ in kW	8662	8620	8495	8011	6336	2480	519	58

Die Ergebnisse sind im Bild 10 aufgezeichnet.



10
Zeitlicher Wärmestrom für die Warmwasserbereitung

Der maximale Wärmestrom bei Berücksichtigung der Zeitverschiebung infolge des Transportvorgangs im Wärmenetz berechnet sich nach Gl. (60); der zugehörige Minderungsfaktor ist Tabelle 4 zu entnehmen. Um diese Tabelle benutzen zu können, muß der Term $(a\,\Delta\tau_N/\sqrt{2})$ berechnet werden. Die Konstante a ergibt sich aus Tabelle 2 durch Interpolation für 6500 WE zu $a = 0{,}154 \cdot 10^{-3}\ \text{s}^{-1}$.

Damit folgt weiter

$$\frac{a\,\Delta\tau_N}{\sqrt{2}} = \frac{0{,}154 \cdot 10^{-3} \cdot 1500}{\sqrt{2}} = 0{,}163\,,$$

und nach Tabelle 4 ist $\nu = 0{,}995$. Die maximale Wärmeleistung des Abnehmerkomplexes k liegt somit nur um 0,5 Prozent niedriger als der Wert $\dot{Q}(\tau)$ für $\tau = 0$, d. h.

$$\dot{Q}^*_{N,k,max} = 8662 \cdot 0{,}995\ \text{kW} = 8619\ \text{kW}\,.$$

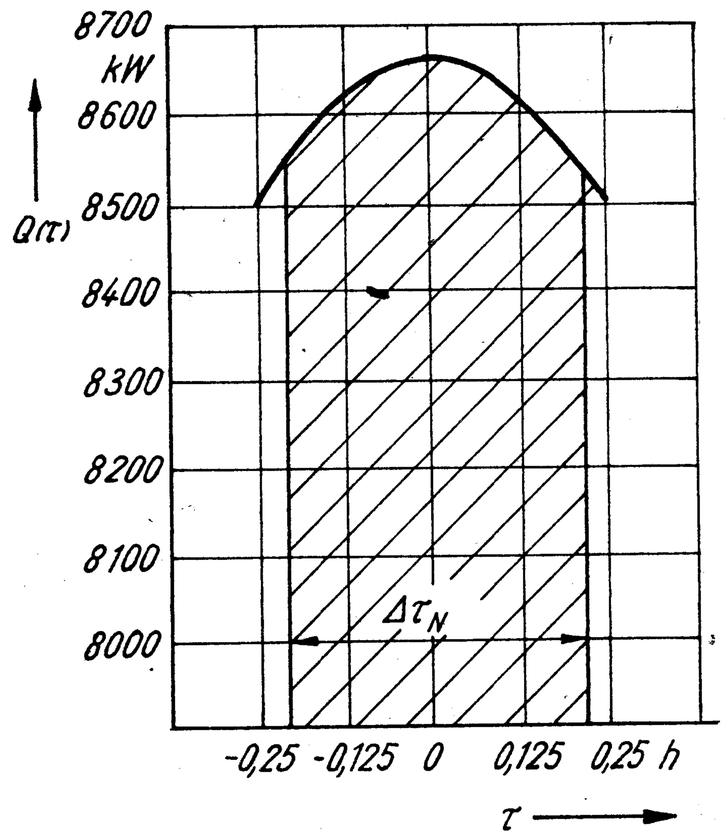
Die rechnerische Verkleinerung ist deshalb so gering, weil der Kurvenverlauf $\dot{Q}(\tau)$ im Bereich von $\tau = -0{,}5\,\Delta\tau_N \ldots +0{,}5\,\Delta\tau_N$ mit $\Delta\tau_N = 0{,}42$ h relativ flach verläuft.

Zur Veranschaulichung soll der maximale Wärmestrom bei Beachtung der Zeitverschiebung an Hand der Bedarfskurve $\dot{Q}(\tau)$ abgeleitet werden. Bild 11 zeigt diese Kurve im interessierenden Bereich stark vergrößert dargestellt. Unter der Voraussetzung, daß die Wärmeströme sich über alle Abnehmer und damit über alle vorhandenen Transportzeiten gleichmäßig verteilen, ist der Mittelwert von $\dot{Q}(\tau)$ im Bereich von −0,21 bis +0,21 h zu ermitteln. Näherungsweise gilt damit

$$\dot{Q}^*_{N,k,max} = [0{,}0625 \cdot (8662 + 8650) + 0{,}0625 \cdot (8650 + 8620) + 0{,}0625 \cdot (8620 + 8560) + 0{,}0225 \cdot (8560 + 8530)]\ \frac{1}{0{,}42}\ \text{kW}$$

$$= 8618\ \text{kW}\,.$$

11
Symmetrischer Ausschnitt aus dem zeitlichen Wärmestromverlauf



Für die Verhältnisse bei Sommerbetrieb ist der Rechengang zu wiederholen. Es gelten

$$\frac{a\,\Delta\tau_N}{\sqrt{2}} = \frac{0{,}154 \cdot 10^{-3} \cdot 4900}{\sqrt{2}} = 0{,}534$$

und nach Tabelle 4

$\nu = 0{,}95$.

Damit ergibt sich der maximale Wärmestrom für die Warmwasserbereitung im Sommer zu

$$\dot{Q}^*_{N,k,max,S} = 8229\ \text{kW}\,.$$