Ein Konzept zur numerischen Simulation von Wärmenetzen

Michael Hinze[1], Ralf Köcher[2], Jens Pfafferott[3]

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Wärmeversorgungsunternehmen sind unter anderem an der Kenntnis der Massenstromverteilung in Nah- und Fernwärmenetzen interessiert, um die Versorgungssicherheit zu jedem Zeitpunkt gewährleisten zu können. Grundlage für eine energieoptimale Betriebsführung eines Wärmenetzes ist eine detaillierte Kenntnis über das thermo-hydraulische Betriebsverhalten des Netzes. Wegen der komplexen Abhängigkeit zwischen Massenstrom und Temperatur ist es unumgänglich, das Verhalten solcher Netze unter den verschiedensten Bedingungen (Witterungseinflüsse, variable Abnehmerleistungen, usw.) mit Hilfe von Simulationen zu untersuchen. Darüberhinaus bietet die numerische Simulation die Möglichkeit, sowohl Regelkriterien und -strategien, als auch Zuverlässigkeitsanalysen sowie Parameter- und Designstudien durchzuführen.

In der vorliegenden Arbeit stellen wir ein Modell zur Beschreibung beliebig vermaschter Wärmenetze mit mehreren Einspeisestellen und Pumpstationen vor, mit welchem sowohl stationäre als auch dynamische Betriebszustände simuliert und analysiert werden können. Grundlegend dabei ist, daß in Analogie zu den Kirchhoffschen Gesetzen der elektrischen Netzwerktheorie in Wärmenetzen Masse- und Energiebilanzgleichungen gelten, welche entsprechend der Komponenten im Netz von nichtlinearem Charakter sind. Aus den Bilanzgleichungen ergibt sich für jede Komponente ein Volumenstrom, dessen Kenntnis schließlich die Berechnung der Temperaturverteilung im Wärmenetz ermöglicht.

Die diesem Artikel zugrundeliegende Arbeit [2] entstand an der Technischen Universität Berlin im Rahmen des Universitären Forschungsschwerpunktes 4 *Entwicklung rechnergestützter Simulationshilfsmittel zur Beschreibung des Betriebsverhaltens komplexer energiewandelnder Systeme*, in welchem auch die von den Autoren benutzte Simulationsumgebung *Smile* [4] entwickelt wurde. Ähnliche Aufgabenstellungen werden in dem Forschungsverbundprojekt *Bessere Ausnutzung von Fernwärmeanlagen* unter der Leitung der Universität Dortmund bearbeitet. In Zusammenarbeit mit großen Fernwärmeversorgungsunternehmen wird dort das EDV-gestützte Simulationssystem BoFiT (siehe [3]) entwickelt.

2 Modellierung eines Wärmenetzes

Um eine numerische Simulation des thermo-hydraulischen Verhaltens eines Wärmenetzes durchführen zu können, wird die zu modellierende reale Anlage mit ihren einzelnen Komponenten durch ein Anlagenskript beschrieben und durch Verwendung graphentheoretischer Methoden auf ein Netzmodell abgebildet. Damit gelingt es, für hydraulische Systeme einfache und übersichtliche Gleichungsstrukturen zur Beschreibung des hydraulischen Betriebsverhaltens zu entwerfen, wobei aus theoretischer Sicht der Grad der Vermaschung des Wärmenetzes keine Rolle spielt.

Der Graph eines Wärmenetzes wird erhalten, indem alle Komponenten eines Netzes durch Kanten, und alle Verzweigungen bzw. Verbindungen durch Knoten dargestellt werden. Kanten, die nicht durch Verzweigungen verbunden sind, werden vom selben Volumenstrom durchflossen und können demzufolge zu einem Ersatzzweig zusammengefaßt werden. Der auf diese Weise entstehende Graph enthält alle Verzweigungen des Netzes, deren Anzahl gleich der Anzahl der Knoten des Graphen ist. Aus dem nun vorliegenden Graphen wird ein gerichteter Graph, indem jeder Kante genau eine Richtung zugeordnet wird. Diese Richtungen können beliebig gewählt werden. Von entscheidender Bedeutung für die hier vorgestellte Beschreibung von Wärmenetzen sind die spannenden Bäume des dem Netz zugrundeliegenden Graphen. Hat man einen solchen

[1]TU Berlin, Fachbereich Mathematik, Straße des 17. Juni 136, 10623 Berlin, email: hinze@math.tu-berlin.de
[2]TU Berlin, Fachbereich Mathematik, Straße des 17. Juni 136, 10623 Berlin, email: koecher@math.tu-berlin.de
[3]TU Berlin, Institut für Energietechnik, Marchstraße 18, 10623 Berlin, email: jp@buran.fb10.tu-berlin.de

Baum bestimmt, so wird durch Hinzufügen einer Kante des Graphen genau einen Kreis, genannt *Masche* oder *Fundamentalzyklus*, erhalten. Die Orientierung der Masche ist dann durch die Richtung dieser Kante, genannt *Verbindungskante*, festgelegt. Die Menge der Verbindungszweige entspricht in ihrer Mächtigkeit gerade der Anzahl der Maschen des Netzes.

Analog zu den Kirchhoffschen Gesetzen für elektrische Netzwerke gelten in geschlossenen Wärmenetzen zwei fundamentale Beziehungen:

1. **Masseerhaltung**: Die Summe der Volumenströme an jedem Knoten des Netzes verschwindet identisch. Für den zugrundeliegenden Graphen impliziert dieser Sachverhalt die Knotenbedingung

$$A\dot{V} \;=\; 0\,, \tag{1}$$

wobei $\dot{V} = \{\dot{V}_1, \ldots, \dot{V}_n\}$ den *Volumenstromvektor* und $A = (a_{i,j})$ mit

$$a_{i,j} \;:=\; \begin{cases} 1 & : \text{ Knoten } i \text{ inzident mit Kante } z_j \\ -1 & : \text{ Knoten } i \text{ adjazent mit Kante } z_j \\ 0 & : \text{ sonst} \end{cases}$$

die *Knoten-Kanten-Inzidenzmatrix* bezeichnen.

2. **Energieerhaltung**: Die Summe der Druckerhöhungen bzw. Druckabfälle in jeder Masche verschwindet identisch. In graphentheoretischer Formulierung bedeutet das

$$B\Delta p \;=\; 0\,, \tag{2}$$

wobei $B = (b_{i,j})$ mit

$$b_{i,j} \;:=\; \begin{cases} 1 & : \text{ Kante } z_j \in \text{ Masche } m_i \text{ bei gleicher Orientierung} \\ -1 & : \text{ Kante } z_j \in \text{ Masche } m_i \text{ bei gegensätzlicher Orientierung} \\ 0 & : \text{ sonst}\,. \end{cases}$$

die *Kreis-Kanten-Inzidenzmatrix* und$\Delta p = \{\Delta p_1, \ldots, \Delta p_n\}$ den *Druckdifferenzvektor* bezeichnen. Hier gibt $\Delta p_i = \Delta p_i(\dot{V})$ den Druckverlust bzw. die Druckerhöhung der i-ten hydraulischen Komponennte an, welcher von der Volumenstromverteilung im Gesamtnetz abhängt.

Wird jeder Masche der Volumenstrom zugeordnet, der durch den zu der Masche gehörenden Verbindungszweig fließt, so wird der *Maschenstromvektor* $\dot{V}_M = \{\dot{V}_{m_1}, \ldots \dot{V}_{m_r}\}$ erhalten. Bei bekanntem Maschenstromvektor $\dot{V}_M$ berechnet sich der Volumenstromvektor $\dot{V}$ mit Hilfe der Transponierten der Kreis-Kanten-Inzidenzmatrix durch

$$\dot{V} \;=\; B^T \dot{V}_M\,. \tag{3}$$

Aufgrund der fundamentalen Identität (siehe [1])

$$AB^T \;=\; 0$$

erfüllt ein aus (3) erhaltener Volumenstromvektor $\dot{V}$ die Masseerhaltungsgleichung (1).

3 Beschreibung der Gleichungssyteme

Die Bestimmung der Wärmeverteilung in einem Wärmenetz erfordert die Lösung eines Systems gekoppelter gewöhnlicher Differentialgleichngen (thermische Rechnung), dessen Koeffizienten von den Massenströmen in den einzelnen Komponennten abhängen (hydraulische Rechnung).

Hydraulische Rechnung: Grundlage für die hydraulische Rechnung ist die Energieerhaltung (2) im Wärmenetz. Sie besagt, daß die Differenz zwischen Druckabfällen und Druckerhöhungen im Netz verschwindet. Damit wird zur Berechnung des Maschenstromvektors $\dot{V}_M$ das nichtlineare Gleichungssystem

$$F(\dot{V}_M) := B\Delta p(\dot{V}) \stackrel{(3)}{=} B\Delta p(B^t\dot{V}_M) = 0$$

erhalten, welches numerisch mit einem gedämpften Newtonverfahren gelöst werden kann [2, 4.3]. Bei bekanntem Maschenstromvektor $\dot{V}_M$ liefert (3) die Volumenströme und damit auch, falls das Transportmedium (i.d.R. Wasser) als inkompressibel vorausgesetzt wird, die Massenströme in den einzelnen Komponennten.
Thermische Rechnung: Die hier betrachteten Wärmenetze bestehen aus verzweigten Rohrsystemen. Jeder Komponente des Netzes muß eine entsprechende Eintrittstemperatur zugewiesen werden. Diese ist jedoch davon abhängig, ob die entsprechende Komponente durch eine einfache Verbindung oder durch eine Stromverzweigung mit anderen Komponenten verbunden ist. Bei Rohrverzweigungen muß grundsätzlich zwischen einer Stromtrennung und einer Stromvereinigung unterschieden werden, wobei bei der Stromvereinigung die Eintrittstemperatur im abgehenden Rohr aus den Massenströmen und den dazugehörigen Austrittstemperaturen der ankommenden Rohre nach der Mischregel bestimmt wird [2, 4.4]. Dabei ist zu beachten, daß durch eine Änderung der Durchflußrichtung während des Betriebs eine Stromtrennung zu einer Stromvereinigung (und umgekehrt) werden kann.

Die Berechnung der Austrittstemperaturen der Rohrstücke erfolgt nach Zuweisung der Eintrittstemperaturen durch Lösen der Differentialgleichung

$$\frac{dT_{Mittel,i}}{dt} = \frac{\dot{m}c_p(T_{Ein,i} - T_{Aus,i}) - A_{Au}k(T_{Fluid,mittel} - T_U)}{mc}, \tag{4}$$

wobei k den Wärmedurchgangskoeffizienten, A_{Au} die Außenfläche des isolierten Rohres, $\dot{m}$ den Massenstrom, c die spezifische Wärme und c_p die spezifische Wärmekapazität des Fluids bezeichnet.

4 Simulation eines realen Nahwärmenetzes

Im Folgenden wird das in Abb. 1 dargestellte Nahwärmenetz unter Einbeziehung eines vereinfachten Regelkonzeptes simuliert.

Dieses Nahwärmenetz versorgt ein *Schwimmbad* (Sb), eine *Sporthalle* (Sh), ein *Rathaus* (Rh) und ein *Wohnhaus* (Wh) mit Wärme. Die Anlage wird wärmetechnisch durch die Auslegungsleistungen der *Kessel*, des *Blockheizkraftwerks* (BHKW) und den Wärmebedarf der *Gebäude* (siehe Abb. 1), die über *Wärmetauscher* (Wt) ins Netz eingebunden werden, beschrieben. Das BHKW hat eine thermische Solleistung von 318 kWth, die nur bei Überschreiten der maximalen Betriebstemperatur von $85°C$ abnimmt. Die beiden Kessel haben eine thermische Auslegungsleistung von je 1250 kWth. Das hydraulische System wird vor allem durch die Druckverluste auf den einzelnen Komponenten, die Dimensionierung des Rohrnetzes (in Abb. 1 sind die jeweiligen Rohrinnendurchmesser angegeben) und der Ventile sowie den Einsatz der Pumpen beschrieben. Die Anlage soll thermo-hydraulisch mit aufgeprägten jahrestypischen Temperaturverlauf (über 10 Tage verteilt, Abb. 2) und unter Einbeziehung einer Regelstrategie simuliert werden. Dabei bestimmt die Außentemperatur den Wärmebedarf der Gebäude, der durch das Netz zu decken ist.

Die Abb. 3 zeigt, wie die Pumpen in Abhängigkeit von der Außentemperatur geregelt werden. In den Heizperioden sind die Kesselventile mindestens zu 80% geöffnet. Nur während des Sommerbetriebs schließen sie weiter, damit sich die vorgegebene Vorlauftemperatur von $80°C$ einstellt. Die Volumenstromverteilung im Nahwärmenetz auf Seiten der Wärmeabnehmer stellt sich in in erster Linie in Abhängigkeit von den Pumpenleistungen ein. Die Abb. 4 zeigt, daß in den Zeitintervallen, in denen die Leistung der Pumpen zurückgenommen wird (Stunde 48 bis 96), auch der Einfluß der Kesselventile auf die Rohrhydraulik bemerkbar ist. Die Größenordnungen zwischen (Ventil-) Widerständen auf der Seite der Drucksenke und den

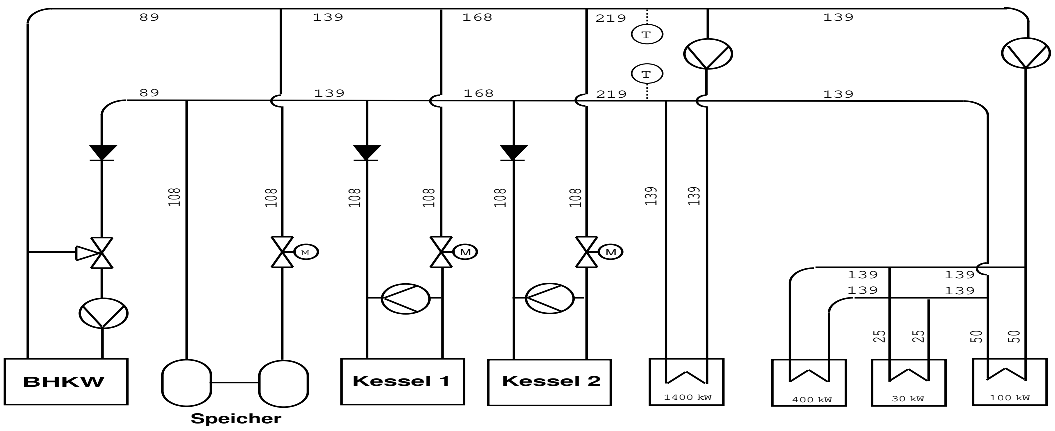

Abbildung 1: Reales Anlagenschema des Nahwärmenetzes

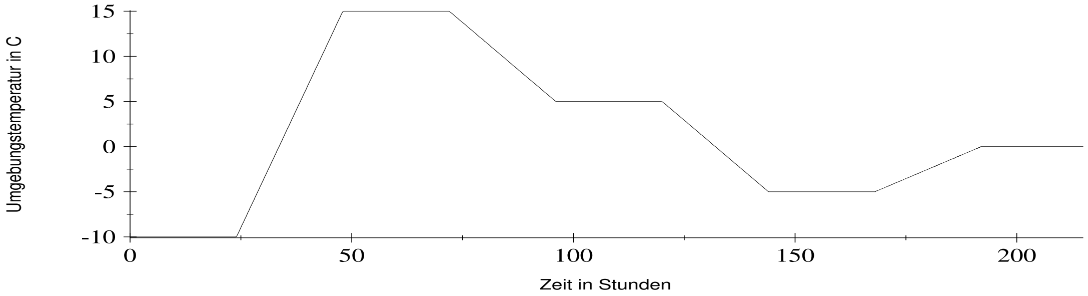

Abbildung 2: Außentemperatur

Pumpenkoeffizienten auf der Seite der Druckquellen sind in diesen Zeitintervallen ähnlich. Das Netz soll in Abhängigkeit von der Außentemperatur so gefahren werden, daß die vorgegebene Solltemperatur der Raumluft von $20°C$ (Regelbereich = 1 K) eingehalten wird. Der in Abb. 5 gezeigte Temperaturverlauf für ein Gebäude macht deutlich, daß diese Vorgabe gut eingehalten wird.

5 Zusammenfassung

Es wird ein Simulationswerkzeug zur Untersuchung des hydraulischen und thermischen Verhaltens von Wärmenetzen bereitgestellt. Die Abbildung der Netztopologie auf ein graphentheoretisches Modell minimiert die Dimension des der hydraulischen Rechnung zugrundeliegenden Gleichungssystems. Daher ist die hier vorgestellte Methode besonders gut zur Simulation von großen Netzen geeignet, wobei die Simulation ohne Vorkenntnisse über die zu erwartende Volumenstromverteilung im Wärmenetz auskommt. Anhand der

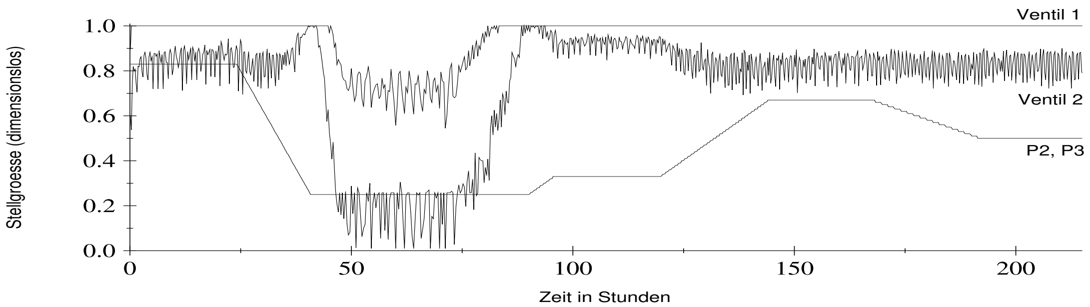

Abbildung 3: Stellgrößen

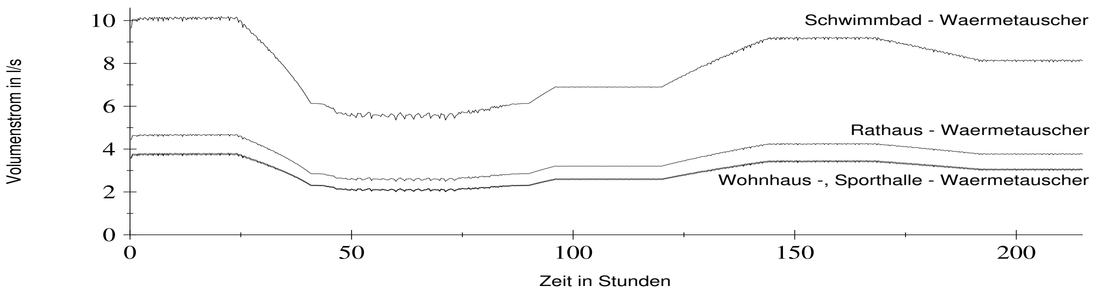

Abbildung 4: Volumenstrom auf Seite der Wärmeabnehmer

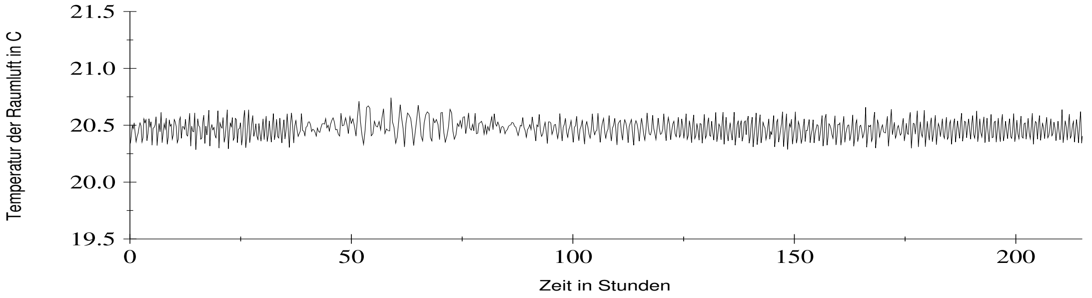

Abbildung 5: Raumlufttemperatur eines Gebäudes

Berechnung der Betriebspunkte eines realen Nahwärmenetzes wird die Anwendbarkeit der Methode deutlich aufgezeigt. Als Simulationsumgebung dient dabei *Smile*. Weitere Anwendungen des Simulationswerkzeuges liegen darin, Auswirkungen bestimmter Betriebszustände auf die Rohrhydraulik aufzuzeigen und so Schwachstellen im Netz darzustellen und zu analysieren, Regelkriterien und -strategien zu optimieren, Zuverlässigkeitsanalysen durchzuführen, sowie in der Durchführung von Parameter- und Designstudien.

Literatur

[1] Chen, W.K.: Applied Graph Theory. North-Holland Amsterdam, (1976).

[2] Hinze, M.; Köcher, R.; Pfafferott, J.: Zur numerischen Simulation von Wärmenetzen. Report No. 485/1995, Technische Universität Berlin, erscheint in der Zeitschrift Forschung im Ingenieurwesen.

[3] Icking, M.: Zur Modellierung des dynamischen Betriebs von Fernwärmesystemen. Dissertation, Hartung-Gorre Verlag Konstanz, 1994.

[4] Jochum, P.: Einsatz der Simulationsumgebung *Smile* zur Simulation solar unterstützter Heizsysteme. 5. Symposium Thermischer Solarenergie, Regensburg, Tagungsband (1995).

[5] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas. Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf (1984).