



Gernot Steindl

Thermohydraulische Simulation zur Untersuchung des Speicherpotentials von Fernwärmenetzen

116 – Energy, Environment & Transportation

Abstract

Zur Untersuchung der thermischen Speichervorgänge in einem Fernwärmenetz wurde ein thermohydraulisches Netzmodell in Matlab implementiert. Dabei kamen Methoden des klassischen Software Engineering zur Anwendung. Dadurch entstand eine modulare Softwarearchitektur, die den Einsatz in einer Co-Simulationsumgebung erleichtert. Die Validierung der Wärmenetzmodellimplementierung zeigte zufriedenstellende Ergebnisse, da die Abweichungen der Simulation von den Messdaten im Bereich der Messauflösung liegen. Durch eine Untersuchung eines vereinfachten Wärmenetzes mit aggregierten Verbrauchern konnten die grundlegenden, dynamischen Vorgänge im Wärmenetz und deren Einflussparameter dargelegt werden. Das Implementierte Netzmodell eignet sich zur weiteren Untersuchung neuer Regelstrategien, die eine gezielte Bewirtschaftung des thermischen Netzspeichers ermöglichen. In Kombination mit Power-to-Heat-Anlagen können neue Geschäftsmodelle für die Vermarktung erneuerbarer Energien entwickelt werden. So soll zukünftig nicht nur eine Teilnahme am Spot- und Regelenergiemarkt möglich sein, sondern auch eine Reduktion der Ausgleichsenergiekosten bei Prognoseabweichungen bewerkstelligt werden.

Keywords:

Fernwärmenetz, Speicher, Thermohydraulik, Simulation, Plug-Flow Modell, Smart Grid

Einleitung

Der Ausbau erneuerbarer Energieträger und die damit verbundene Reduktion des CO₂-Ausstoßes ist ein politisches Ziel auf europäischer Ebene (Europäisches Parlament 2009). Für Österreich bedeutet das konkret einen Ausbau der Windenergie um 2000 MW sowie einen Ausbau der Photovoltaik um 1200 MW bis zum Jahr 2020 (Österreichischer Nationalrat 2012).

Der Ausbau und die Integration dieser volatilen Energieträger führen zu neuen wirtschaftlichen und technischen Herausforderungen für Energieversorger und Stromnetzbetreiber.

Prinzipiell können zwei Ansätze gewählt werden, um den Ausbau erneuerbarer Energien besser in das bestehende Stromnetz zu integrieren. Die erste Möglichkeit ist, den Verbrauch an die Erzeugung anzupassen, indem ein sogenanntes Demand Side Management betrieben wird, das heißt Verbraucher im

Stromnetz gezielt zu steuern. Die zweite Möglichkeit stellen Speichertechnologien dar, die die Stromerzeugung vom Verbrauch zu einem gewissen Grad entkoppeln. Um die dabei auftretenden hohen Investitionskosten zu verringern, sollen bestehende Fernwärmenetze als thermische Speicher genutzt werden. Schnittstellen zum Stromnetz stellen dabei Blockheizkraftwerke und Power-to-Heat-Anlagen dar.

Die Nutzung des Fernwärmenetzes als Speicher verlangt eine genaue Kenntnis der thermohydraulischen Vorgänge, um neuer Regelstrategien für die Be- und Entladung zu entwickeln und die Speicherkapazität als Dienstleistung im Smart Grid wirtschaftlich zu integrieren.

Die Implementierung eines solchen thermohydraulischen Netzmodells sowie die ersten damit untersuchten Speichervorgänge werden hier vorgestellt.

Methodik

Für die Implementierung wurde ein geeignetes Modell für die thermohydraulische Berechnung ausgewählt. Die Softwareentwicklung des Wärmenetzmodells erfolgte nach einem vereinfachten Unified Software Development Process (Krutchten 2007), in dessen Zentrum eine Use-Case-Analyse steht. Die Implementierung wurde anschließend mit einem objektorientierten Ansatz in Matlab umgesetzt.

Diese Implementierung wurde mit analytischen Lösungen von einfachen thermohydraulischen Berechnungen verglichen, um darauffolgend eine Modellvalidierung mit realen Messdaten eines Fernwärmenetzes durchzuführen. Im Anschluss an die Modellvalidierung wurde das Wärmenetzmodell in einer Case-Study zur Untersuchung eines vereinfachten Fernwärmenetzes eingesetzt, um die grundlegenden thermohydraulischen Vorgänge bei der Ein- und Ausspeicherung von thermischer Energie im Fernwärmenetz darzulegen.

Simulationsmodell

Die Softwarearchitektur des Wärmenetzmodells ist modular konzipiert, sodass eine Implementierung der wesentlichen Komponenten wie Wärmeerzeugung, Wärmenetz und Wärmeverbraucher (Grosswindhager 2011) mit geringer Kopplung möglich ist. Der Datenaustausch erfolgt über definierte Software-Interfaces, welche es erlauben, das Wärmenetzmodell mit beliebigen Implementierungen von Erzeugungs- und Verbrauchermodellen zu verknüpfen. Diese können auch in anderen Simulationsumgebungen realisiert werden, was eine sogenannte Co-Simulation erleichtert. Dabei werden verschiedene Simulationsumgebungen synchron, unter gegenseitigem Datenaustausch ausgeführt, was vor allem im Kontext der Smart Grid Simulation Vorteile bietet.

Für die grundlegende Berechnung der thermohydraulischen Netzzustände werden die thermische und die hydraulische Berechnung entkoppelt. Da sich hydraulische Druckstöße im Wärmenetz mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten und diese Vorgänge um ein Vielfaches schneller ablaufen als die thermischen, kann für die hydraulische Berechnung ein quasi-stationärer Ansatz gewählt werden. Die Ergebnisse dieser quasi-stationären, hydraulischen Berechnung, welche im Wesentlichen die Massenflüsse im Fernwärmenetz sind, werden für den thermischen Berechnungsschritt herangezogen. Die thermische Berechnung bestimmt die Temperaturobreitung im Netz sowie die dabei auftretenden thermischen Verluste. Die Implementierung beschränkt sich dabei auf unvermaschte Wärmenetztopologien.

Nachfolgend werden die beiden gewählten Modellansätze für die hydraulische und die thermische Berechnung näher beschrieben.

Hydraulisches Netzberechnungsmodell

Die Netztopologie erfolgt wird mit Hilfe der Graphentheorie beschrieben. Rohre, Verbraucher und Erzeuger werden als Kanten eines gerichteten Graphen dargestellt. Die Kanten zeigen in Richtung des Massenflusses. Die Verbindungen der Kanten werden als Knoten im Graphen bezeichnet.

Diese Darstellung lässt sich in eine Knoten-Kanten-Inzidenzmatrix A überführen, die die Topologie des Wärmenetzes vollständig beschreibt. Die Dimension $n \times m$ der Matrix A wird durch die Anzahl der Knoten n und der Anzahl der Kanten m bestimmt. Die Einträge a_{ij} der Matrix A sind 1, wenn die Kante e_j mit dem Knoten i inzident ist und der Massenfluss vom Knoten i weg zeigt bzw. -1, wenn dieser zum Knoten zeigt. Sind der Knoten i und die Kante e_j nicht inzident, ist $a_{ij} = 0$. (Chen 1997)

Mit Hilfe dieser Inzidenzmatrix lassen sich die Massenströme im Wärmenetz berechnen. Hierzu werden zuerst die sogenannten externen Massenströme \dot{m}_{ext} aufgrund des aktuellen Wärmebedarfs der Fernwärmeübergabestationen bestimmt. Für Netztopologien ohne Maschen können dann sämtliche internen Massenströme in den Rohrleitungen mit der Gleichung 1 bestimmt werden, da es sich um ein vollständig bestimmtes, lineares Gleichungssystem handelt. (Strelow 2002) (Rothmann 2016)

$$A \cdot \dot{m}_{int}^T = \dot{m}_{ext} \quad (1)$$

Die aus Gleichung 1 errechneten internen Massenströme \dot{m}_{int} werden für die thermische Netzberechnung herangezogen. Aufgrund des quasi-stationären Ansatzes bleiben die hydraulischen Netzzustände während eines Berechnungsschrittes konstant.

Thermisches Netzberechnungsmodell

Der Temperaturtransport im Wärmenetz wird mit Hilfe des sogenannten Plug-Flow-Ansatzes modelliert. Abbildung 1 zeigt den Berechnungsvorgang der Temperaturlausbreitung während eines Simulationszeitschrittes. Die Farben in Abbildung 1 repräsentieren unterschiedliche Temperaturen des Mediums in der Rohrleitung.

In Abhängigkeit des aktuellen Massenstromes, welcher zuvor durch die hydraulische Netzberechnung bestimmt wurde, und der Rohrgeometrie tritt eine bestimmte Menge an Wasser in das Rohr ein. Diese Menge wird als Massenelement mit konstanter Temperatur modelliert und als Plug bezeichnet. Dieser Plug bewegt sich während jedes Simulationszeitschrittes weiter durch das Rohr. Am Ende der Rohrleitung wird über die austretenden Plugs eine Mischtemperatur gebildet. Diese Mischtemperatur ist die Eintrittstemperatur für den Plug der nachfolgenden Rohrleitung. Bei diesem Modellansatz erfolgt die Temperaturlausbreitung in Flussrichtung ausschließlich durch den Massentransport.

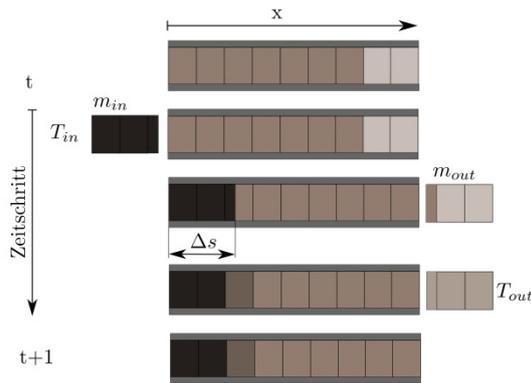


Abb. 1: Thermische Ausbreitung des Mediums im Rohr innerhalb eines Simulationszeitschrittes

Die thermischen Verluste des Mediums durch die Rohrwand zum Erdreich werden mit der finiten Volumenmethode berechnet. Dazu wird das Rohr in diskrete Teilstücke unterteilt und eine Energiebilanz gebildet, wobei ein Wärmeaustausch zwischen benachbarten Zellen nicht berücksichtigt wird. Abbildung 2 zeigt das diskretisierte Rohr. Da ca. 80-90 % der Temperaturdifferenz zwischen Medium und Erdreich in der Rohrisolierung abgebaut wird (Glück 1985), kann hierfür in guter Näherung ein thermisches Widerstandsmodell angesetzt werden. Die dynamischen Vorgänge im Rohr und im Erdreich werden dabei zu Gunsten einer vereinfachten Berechnung vernachlässigt. Der längenbezogenen Wärmeübergangswiderstandes U_L des Mediums zum Erdreich wird auf Grundlage von Herstellerangaben der Rohrleitungen ermittelt und kann mit Hilfe von Messdaten angepasst werden.

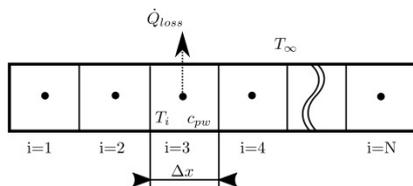


Abb. 2: Wärmeverlustrberechnung entlang einer Rohrleitung

Die Wärmeverluste lassen sich mit dem längenbezogenen Wärmedurchgangswiderstand U_L für jeden Simulationszeitschritt mit Gleichung 2 berechnen:

$$\dot{Q}_{loss} = U_L \cdot (T_{\infty} - T_i) \cdot \Delta x \quad (2)$$

Die Wärmeverluste führen zu einer Änderung der inneren Energie des bilanzierten Elements, was eine Änderung der Temperatur im betrachteten Volumenelement i bewirkt. Die Temperatur T_i^{t+1} des nachfolgenden Simulationszeitschrittes $t + 1$ kann somit explizit aus der aktuellen Temperatur des Volumenelements T_i^t mit Gleichung 3 berechnet werden:

$$T_i^{t+1} = T_i^t + \Delta T \quad (3)$$

Die Temperaturänderung ΔT hängt von der spezifischen Wärmekapazität des Mediums sowie der verwendeten Simulationsschrittweite ab. Je kleiner diese daher gewählt wird, umso mehr nähert sich das numerische Berechnungsverfahren der analytischen Lösung an.

Wird die Diskretisierungslänge der Rohrstücke zu groß gewählt, treten Effekte der numerischen Diffusion bei der Berechnung auf. Das heißt, dass in der Simulation die Information über die Ausbreitung einer Temperaturfront schneller an das Ende einer Rohrleitung gelangt, als es der tatsächliche Massenfluss ermöglichen würde. Um diesen Effekt zu vermeiden, sollte die Diskretisierungslänge eines Rohrstückes nicht größer als 1 m gewählt werden.

Modellvalidierung

Zur Validierung des Wärmenetzmodells werden Messdaten eines realen Wärmenetzes herangezogen. Die Topologie dieses Netzes ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Wärmeerzeugung bzw. Einspeisung erfolgt in der sogenannten Energiezentrale am Knoten A. Die Fernwärmeübergabestationen befinden sich an den Knoten G, I, J, K und L.

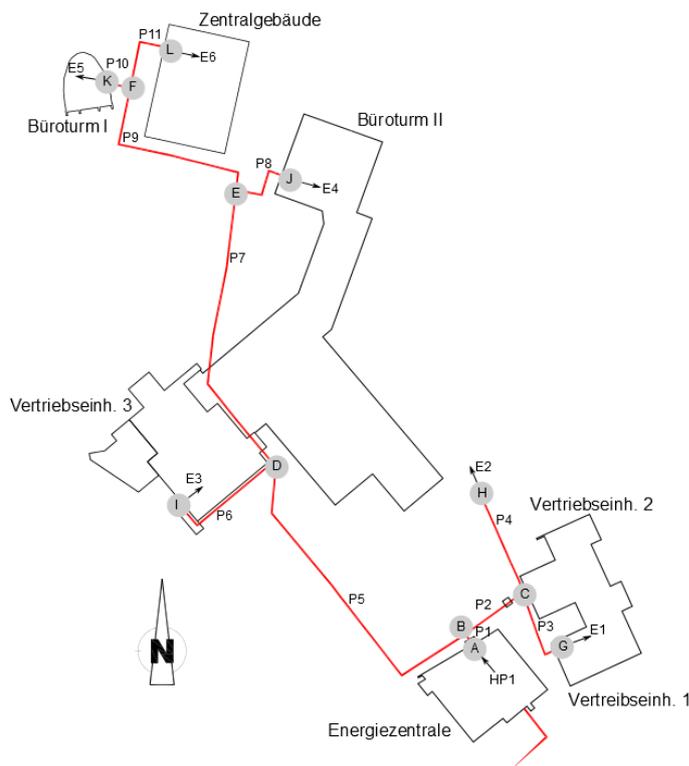


Abb. 3: Topologie des Wärmenetzes zur Modellvalidierung

Zur Validierung wurden die real gemessenen Leistungsabnahmeprofile der Wärmeübergabestationen sowie die eingespeiste Vorlauftemperatur auf das Simulationsmodell aufgeprägt und mit den im Netz gemessenen Temperaturen verglichen. Für die Simulation wurde ebenfalls ein regionaler Wetterdatensatz aus der Messperiode verwendet.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch ein Ergebnis der Simulation für den Knoten L. Dargestellt ist die eingespeiste Vorlauftemperatur am Knoten A über die Zeit, sowie die simulierten und gemessenen Temperaturverläufe am Knoten L. Man erkennt, dass die Simulation mit den Messwerten übereinstimmt. Die auftretenden Abweichung liegen innerhalb der Messauflösung von 1° K. Die Simulationsergebnisse der anderen Knoten zeigen ähnliche Resultate.

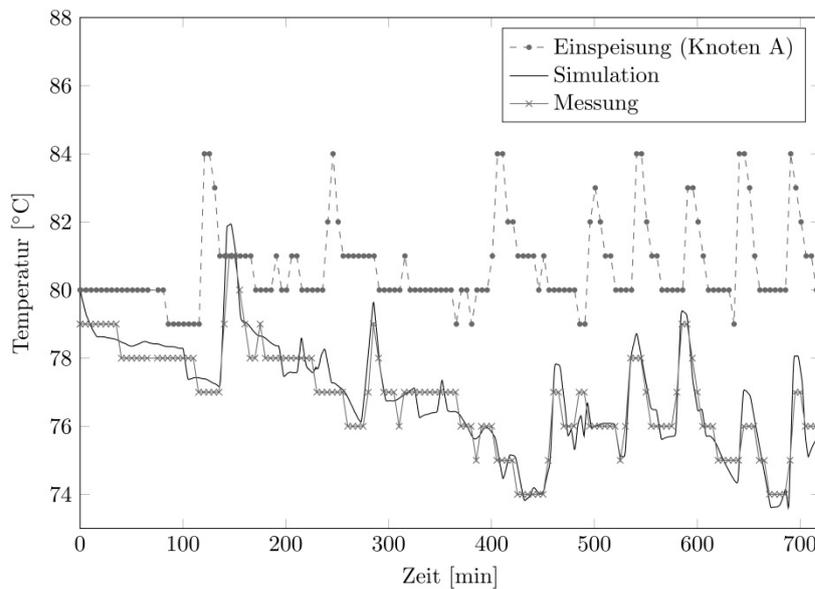


Abb. 4: Simulation und reale Messung des Wärmenetzes am Knoten L

Case Study

Mit dem validierten Wärmenetzmodell werden Untersuchungen zu den grundlegenden dynamischen Vorgängen der thermischen Ein- und Ausspeicherung im Fernwärmenetz durchgeführt. Dazu wird ein vereinfachtes Wärmenetz mit aggregierten Verbrauchern betrachtet.

Die Beladung eines Netzspeichers erfolgt prinzipiell durch eine Erhöhung der Temperatur im Wärmenetz. Dies kann grundsätzlich auf drei Arten erfolgen: 1. Temperaturerhöhung im Vorlauf, 2. Temperaturerhöhung im Rücklauf, 3. Eine Kombination aus Vor- und Rücklauf Temperaturerhöhung.

Eine hohe Rücklauftemperatur widerspricht einer effizienten Energieeinspeisung und führt zu erhöhtem Verschleiß bei den Einbauten im Rücklauf. Außerdem kann diese bei manchen Wärmeerzeugern wie z.B. Blockheizkraftwerken zu Störungen führen. Des Weiteren wird für eine gezielte Anhebung der Rücklauftemperatur ein steuerbarer Bypass zwischen Vor- und Rücklauf benötigt, der in den meisten Netzen üblicherweise nicht vorhanden ist. Aus diesen Gründen wird nachfolgend nur die Auswirkung einer Vorlauf Temperaturerhöhung in Bezug auf die Netzspeicherleistung untersucht. Hierzu wird der Fall eines Vorlauf Temperatursprunges sowie eines Lastsprunges betrachtet, unter der Annahme, dass das Netz keine zusätzlichen Einbauten wie einen steuerbaren Bypass besitzt.

Abbildung 5 zeigt das vereinfachte Fernwärmenetz mit einem aggregierten Verbraucher, der über eine Vor- und eine Rücklaufleitung (DN50) von jeweils 1000 m mit dem Wärmeerzeuger verbunden ist. Die Außentemperatur wurde mit 5° C während der Simulation konstant gehalten. Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient der Rohrleitung zur Erdoberfläche wurde mit 0,213 W/mK angenommen. Für die Wärmeübergabestation des Verbrauchers wurde ein vereinfachtes Modell gewählt, das ideal auf eine konstante Rücklauftemperatur von 50° C regelt.

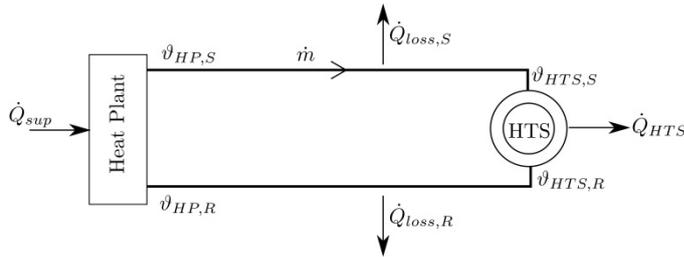


Abb. 5: Vereinfachtes Wärmenetz mit akkumulierten Verbrauchern

Die Speicherleistung des Netzes \dot{U}_{store} wurde mit Gleichung 4 definiert:

$$\dot{U}_{store}(t) = \dot{Q}_{sup}(t) - \dot{Q}_{HTS}(t) - \dot{Q}_{loss}(t) \quad (4)$$

- $\dot{U}_{store}(t)$... Netzspeicherleistung
- $\dot{Q}_{sup}(t)$... eingespeiste Leistung
- $\dot{Q}_{HTS}(t)$... abgenommene Leistung
- $\dot{Q}_{loss}(t)$... Wärmeverluste der Rohrleitungen

In Abbildung 6 ist das Simulationsergebnis eines Vorlauftemperatursprungs von 75° C auf 90° C dargestellt. Zu sehen sind die vier Netztemperaturen aus Abbildung 5 (Vorlauftemperatur Wärmeerzeuger $\vartheta_{HP,S}$, Vorlauftemperatur Fernwärmeübergabestation $\vartheta_{HTS,S}$, Rücklauftemperatur Fernwärmeübergabestation $\vartheta_{HTS,R}$, Rücklauftemperatur Wärmeerzeuger $\vartheta_{HP,R}$) sowie der resultierende Massenstrom \dot{m} .

Wenn die erhöhte Vorlauftemperatur die Wärmeübergabestation des Verbrauchers erreicht, reduziert diese sofort den Massenstrom, um die abgenommene Wärmeleistung konstant zu halten. Diese Reduzierung des Massenstroms führt zu erhöhten thermischen Verlusten des Mediums in der Rohrleitung. Dadurch erhöht sich der Massenstrom anschließend wieder leicht, um die abgegebene Leistung weiter konstant zu halten.

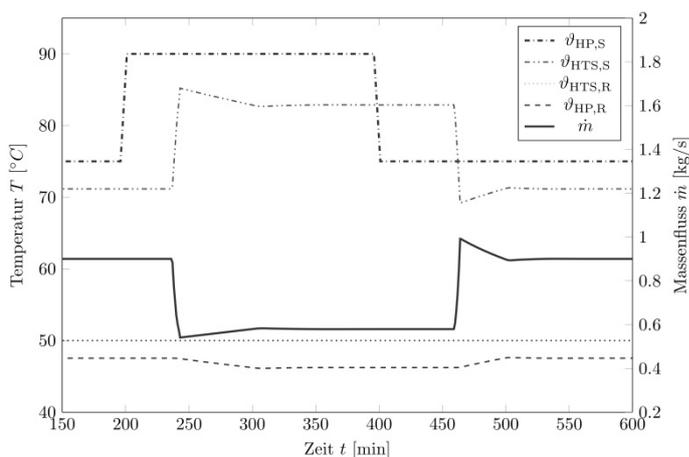


Abb. 6: Netztemperaturen und Massenfluss

Die zeitlichen Leistungsverläufe im Wärmenetz sind in Abbildung 7 dargestellt. Durch die Reduzierung des Massenflusses beim Eintreffen der Temperaturfront an der Fernwärmeübergabestation kommt es zu einer Begrenzung der Speicherleistung, welche kurzzeitig auch negativ wird. Die Erhöhung der Vorlauftemperatur führt zu einem erhöhten Wärmeverlust im Netz während des Speichervorganges.

Der Ausspeichervorgang läuft prinzipiell gleich ab, auch wenn die Dynamik wesentlich langsamer ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die reduzierte Einspeisetemperatur aufgrund des reduzierten Massenstroms mehr Zeit benötigt, um den Abnehmer zu erreichen.

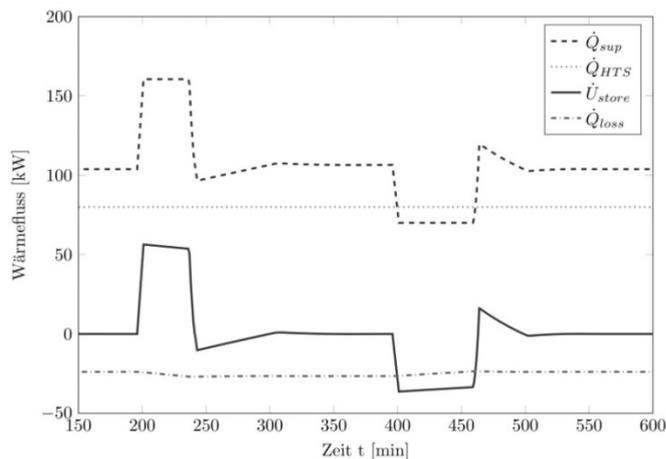


Abb. 7: Wärmeflüsse und Speicherleistung im Wärmenetz

Es zeigt sich somit, dass die Speicherleistung eines Fernwärmenetzes von unterschiedlichen Faktoren abhängt, die nur teilweise durch den Netzbetreiber beeinflusst werden können. Großen Einfluss haben die Netztopologie sowie die Lastverteilung im Wärmenetz. Sitten Verbraucher mit viel Wärmeleistungsabnahme nahe bei der Wärmeerzeugung hat dies negative Auswirkungen auf die Speicherkapazität, da die restlichen Rohrleitungen des Wärmenetzes nicht als Speichervolumen zur Verfügung stehen.

Auf die grafische Darstellung der Situation eines Lastsprunges wird hier verzichtet. Die prinzipiellen Abläufe sind an dieser Stelle dieselben, auch wenn die dabei auftretende Speicherleistung wesentlich geringer ausfallen. Anzumerken ist jedoch, dass diese Vorgänge vom Wärmenetzbetreiber nicht kontrollierbar sind, bzw. es in realen Netzen zu einer ständigen Überlagerung dieser Vorgänge von unterschiedlichen Abnehmern kommt. Eine gute Wärmelastprognose ist daher für eine gezielte Speicherbewirtschaftung notwendig.

Zusammenfassung und Ausblick

Zur Untersuchung der thermischen Speichervorgänge in einem Fernwärmenetz wurde ein

thermohydraulischen Netzmodell in Matlab implementiert. Dabei kamen Methoden des klassischen Software Engineering zur Anwendung. Dadurch entstand eine modulare Softwarearchitektur, die den Einsatz in einer Co-Simulationsumgebung erleichtert.

Die Validierung der Wärmenetzmodellimplementierung zeigte zufriedenstellende Ergebnisse, da die Abweichungen der Simulation von den Messdaten im Bereich der Messauflösung liegen.

Durch eine Untersuchung eines vereinfachten Wärmenetzes mit aggregierten Verbrauchern konnten die grundlegenden, dynamischen Vorgänge im Wärmenetz und deren Einflussparameter dargelegt werden.

Das Implementierte Netzmodell eignet sich zur weiteren Untersuchung neuer Regelstrategien, die eine gezielte Bewirtschaftung des thermischen Netzspeichers ermöglichen. In Kombination mit Power-to-Heat-Anlagen können neue Geschäftsmodelle für die Vermarktung erneuerbarer Energien entwickelt werden. So soll zukünftig nicht nur eine Teilnahme am Spot- und Regelenergiemarkt möglich sein, sondern auch eine Reduktion der Ausgleichsenergiekosten bei Prognoseabweichungen bewerkstelligt werden.

Literaturverzeichnis

Chen, W.K. (1997): Graph theory and its engineering applications. In: Advanced series in electrical and computer engineering Vol. 5, Singapore

Dahm, J. (2001): District Heating Pipelines in the Ground: Simulation Model, http://trnsys.de/download/de/ts_type_313_de.pdf, (19.12.2016)

Europäisches Parlament (2009): Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG

Glück, B. (1985): Heizwassernetze für Wohn- und Industriegebiete. Frankfurt, Germany: Verlags- und Wirtschaftsges. d. Elektrizitätswerke.

Grosswindhager, S./Voigt A./Kozek M. (2011): Efficient Physical Modelling of District Heating Networks. In: Modelling and Simulation

Kruchten, Ph. (2007): The rational unified process: An introduction. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley.

Österreichischer Nationalrat (2012): Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern: ÖSG 2012

Rothmann, R (2016): Thermohydraulischen Modellierung von Fernwärmenetzen, https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/forschung/forschungsprojekte/therm_hyd_mod_fw_netze, (19.12.2016)

Strelow, O. (2002): Das Matrix-Modell, ein neues Berechnungsverfahren für die thermohydraulische Berechnung und dynamische Simulation von Fernwärmenetzen, <http://www.eubstrelow.de/FernW01.htm>, (19.12.2016)