

# QUASI-DYNAMISCHE LASTFLUSSRECHNUNG VON WÄRMENETZEN

**Josef Steinegger, Matthias Greiml, Thomas Kienberger**

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Franz-Josef-Straße 18,  
8700 Leoben, +43 3842 4025401, evt@unileoben.ac.at, www.evt-unileoben.at

**Kurzfassung:** Um in Österreich einen weiteren Schritt näher zur Klimaneutralität bis hin zum Jahr 2040 [1] zu kommen, ist es nötig auch die Versorgung von Raumwärme und Warmwasser möglichst umweltfreundlich zu gestalten. Im Rahmen der Vorzeigeregion NEFI (New Energy for Industry) wird dazu im Projekt „Heat Highway“ die Möglichkeit der Abwärmenutzung aus industriellen Anlagen in überregionalen Wärmeübertragungsnetzen geprüft. Dazu muss eine Wärmelastflussrechnungsmethodik entwickelt werden, mit der es möglich ist, das zeitlich- und räumlich aufgelöste Übertragungsverhalten eines solchen Netzes möglichst umfassend abzubilden. Das Ziel ist es anhand der LFR (Lastflussrechnung) die techno-ökonomische Sinnhaftigkeit von möglichen Wärmeübertragungsnetzen zu ermitteln. Die Funktionsweise dieser quasi-dynamischen Lastflussrechnung wird in diesem Beitrag mithilfe eines Beispielnetzes näher beschrieben.

**Keywords:** Lastflussrechnung, Wärmenetz, Industrielle Abwärme

## 1 Einleitung

Bei der Verwendung von Abwärme aus der Industrie und deren Einspeisung in Wärmenetze, kann diese ansonsten oft ungenutzte Energie gewinnbringend verwertet werden. Zudem verringert sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Sektor Wärme. Um Abwärme möglichst umfassend in Wärmenetze einzubringen, ist es nötig weiter entfernte industrielle Anlagen mit dem Verbraucher zu verbinden. Die Integration von möglichen weiteren Elementen wie Wärmepumpen, Wärmespeicher oder Biomassekraftwerken kann erfolgen um Wärmeübertragungsverluste zu kompensieren oder die Temperatur des Wasserstroms zu erhöhen. Aufgrund der hohen Wärmekapazität von Wasser und des langsam fließenden Volumenstroms (0,5–2,0 m/s) [2] sind Wärmenetze auch in der Lage selbst als Wärmespeicher zu fungieren.

Um diese Netze techno-ökonomisch zu optimieren ist eine Berechnungsmethode nötig. In der Literatur finden sich dazu mehrere grundsätzlich Verfahren. Prinzipiell kann man zwischen steady-state, quasi-dynamischen und dynamischen Verfahren unterscheiden. Steady-state Verfahren berücksichtigen Temperaturänderungen im Wasser über mehrere Zeitschritte nicht. Das heißt jeder Zeitschritt wird unabhängig von den vorhergehenden Zeitschritten berechnet. Dynamische Verfahren berücksichtigen Veränderungen im System die über einen Zeitschritt hinaus gehen hingegen schon. [3] Jedoch weisen dynamische Berechnungsmethoden aufgrund ihrer Komplexität wesentlich höhere Rechenzeiten auf [23]. Um sowohl exakte Ergebnisse als auch vertretbare Rechenzeiten zu erhalten bieten sich daher quasi-dynamische Verfahren an, die sowohl die Temperaturänderungen über mehrere Zeitschritte

berücksichtigen, als auch aufgrund der Nutzung von vereinfachten Berechnungsfunktionen geringere Rechenlaufzeiten aufweisen.

Aus den genannten Gründen wird in diesem Beitrag eine quasi-dynamische Lastflussrechnung näher erläutert. Die vorgestellte LFR kann verschiedene Elemente in Wärmenetzen, wie klassische Versorger und Verbraucher, Wärmepumpen, Druckpumpen, Drosseln, Wärmespeicher und Verzweigungsknoten, sowohl im Vorlauf als auch im Rücklauf berücksichtigen.

## 2 Methode

Das quasi-dynamische Verfahren zur Lastflussrechnung in Wärmenetzen wird anhand des in Abbildung 1 gezeigten Beispiels näher beschreiben. Das Beispiel weist einen Erzeuger auf, welcher den Systemdruck im Vorlauf vorgibt. Zusätzlich dazu sind an das Netz 13 Verbraucher angeschlossen. Die Topologie entspricht einem verzweigten Ring

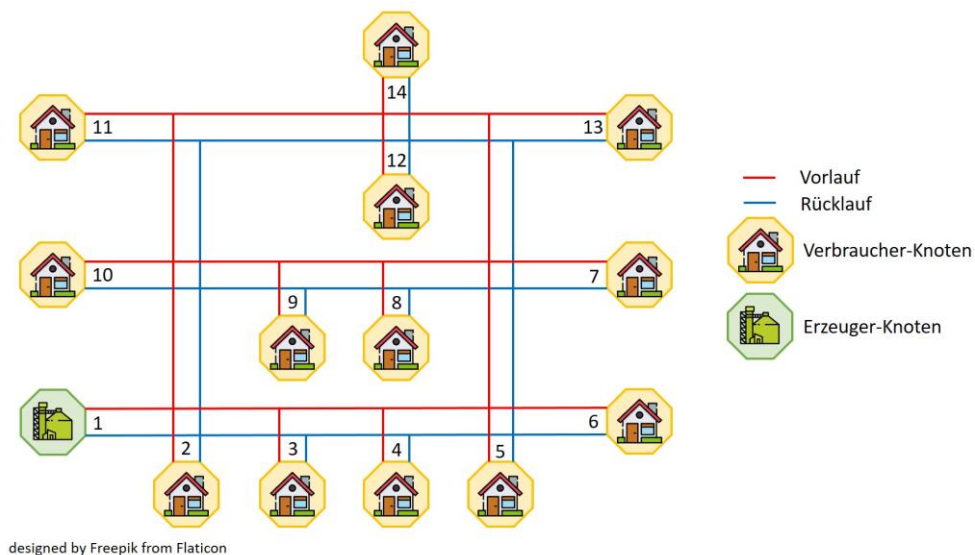


Abbildung 1 Beispiel Wärmenetz

Die Berechnungsmethode lässt sich in einen steady-state und in einen quasi-dynamischen Teil unterteilen. Die steady-state Methode wird dazu benötigt um die Änderungen des jeweiligen Zeitschrittes isoliert von den vorhergehenden Zeitschritten zu betrachten und die Grundlage für die quasi-dynamische Berechnung zu liefern. Diese berücksichtigt auch die vorhergehenden Temperaturänderungen im Wärmenetz auf Basis von „Temperaturwolken“ (siehe Kapitel 2.2).

### 2.1 Steady-state Berechnung

Die steady-state Methode beruht auf dem Ansatz von Rüdiger [4]. Dabei wurde das von ihm erstellte Knotenpotentialverfahren für Gasnetze auf das Wärmenetz umgelegt. Dieses Verfahren wurde ursprünglich dazu entwickelt um elektrische Netze zu berechnen. Dabei werden mithilfe der Zweigspannungen und den Leitwerten der Zweige, die Zweigströme bestimmt. [4] Um diese Methode auf das Wärmenetz umlegen zu können und gleichzeitig zeitlich und räumlich aufgelösten Druck- und Volumenstromberechnung durchführen zu können, musste eine weitere Iteration zur Temperaturberechnung hinzugefügt werden, um

Wärmeverluste entlang der Rohrleitungen berechnen zu können. Dazu wurde die Gleichung (2-1) basierend auf [5] in die Berechnung integriert, womit es möglich ist für jeden Knoten im Vor- und Rücklauf die Temperatur zu berechnen.

$$T_{EndKnoten} = (T_{StartKnoten} - T_{Umgebung}) * e^{\frac{-2*\pi*k*l}{c_p*\rho*\dot{V}}} + T_{Umgebung} \quad (2-1)$$

Ebenfalls wurde das Knotenpotentialverfahren dahingehend auf das Wärmenetz angepasst, dass sowohl Einspeise-, Ausspeise-, Einspeicher-, Ausspeichervorgänge wie auch Druckänderungen durch Pumpen oder Drosseln im Vorlauf wie auch im Rücklauf berücksichtigt werden können.

## 2.2 Quasi-dynamische Berechnung

Da das zuvor beschriebene Verfahren zunächst nur rein zur statischen Betrachtung des Wärmelastflusses, ohne Berücksichtigung der Zustände von vorhergehenden Zeitschritten verwendet werden kann, wurde zusätzlich zum Knotenpotentialverfahren, die Berechnung des Wärmelastflusses anhand von zeitschrittabhängigen „Temperaturwolken“ erweitert. Diese werden über das Knotenpotentialverfahren für den Zeitraum des betrachteten Zeitschrittes erstellt und für jeden weiteren Zeitschritt solange mitberücksichtigt bis diese am Ende des Wärmenetzes angekommen sind und über etwaige Verbraucher das betrachtete System verlassen. Abbildung 2 zeigt wie sich die temperaturabhängigen Wärmeströme in der verwendeten Berechnungsmethode ausbreiten. Der linke Teil der Abbildung beschreibt die Berechnung der steady-state Methode im Vorlauf des Beispielnetzes. Dabei werden in einem Zeitschritt, die Auswirkungen der Ein- und Ausspeiseleistungen, sowie die Wärmeverluste über das ganze Netzwerk hinweg berechnet. Dieses Ergebnis spielt insofern in die Berechnung der quasi-dynamischen Berechnung mit ein, sodass unter der Berücksichtigung der Fließgeschwindigkeit, „Temperaturwolken“ (rechts in Abbildung 2: grün) über den Zeitraum eines Zeitschrittes in den betreffenden Rohrabschnitten gebildet werden. Diese beinhalten die Eigenschaften (Standort in der Leitung, Anfangstemperatur, Endtemperatur, Volumenstrom) die in der steady-state Methode berechnet wurden. Ebenfalls werden die „Wolken“ aus den vorhergehenden Zeitschritten (rechts in Abbildung 2: gelb und rot) weitergeschoben. Die rechte Seite der Abbildung zeigt eine beispielhafte Situation nach drei Zeitschritten.

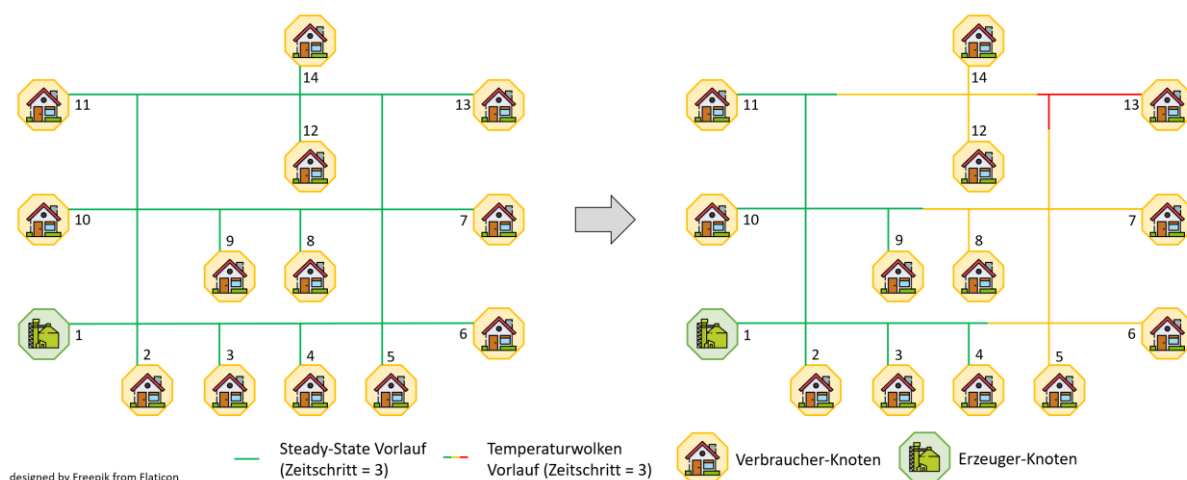


Abbildung 2 Berechnung eines Wärmenetzes mit dem quasi-dynamischen Verfahren

Die zuvor beschriebene Methode wurde mit Hilfe einer weiteren Iteration in die Programmierung der Lastflussrechnung integriert. Abbildung 3 zeigt dies: Zuerst werden die zufließenden und abfließenden Knotenvolumenströme über die Knotentemperaturen des vorherigen Zeitschrittes (erster Iterationsschritt) bzw. über den vorhergehenden Iterationsschritt berechnet. Die Druckänderungen, die Volumenströme in den Leitungen und die Temperaturen des Vorlaufs werden über das Knotenpotentialverfahren und über die Gleichung (2-1) berechnet. Mit Hilfe des Knotens mit dem geringsten Druck im Vorlauf, minus der Druckverluste im Wärmeübertrager, wird der Systemdruck des Rücklaufes bestimmt: Über das Knotenpotentialverfahren und der zuvor erwähnten Gleichung werden anschließend die Drücke, Volumenströme und Temperaturen des Rücklaufes berechnet. Anschließend erfolgt die Berechnung der „Temperaturwolken“. Diese Frequenz wird mit dem beschriebenen quasidynamischen Ansatz solange durchgeführt, bis die Veränderung der Temperaturen der vorhergehenden Iteration verglichen mit der betrachteten Iteration kleiner als die Fehlerschranke „ $x$ “ ist. Damit ist die Berechnung für diesen Zeitschritt abgeschlossen. Abschließend werden die Drücke in den Rohrleitungen mit den Belastungsgrenzen der jeweiligen Rohre verglichen und sichergestellt, dass das System den jeweiligen Belastungszuständen standhält. Anschließend wird der nächste Zeitschritt mit demselben Algorithmus berechnet.

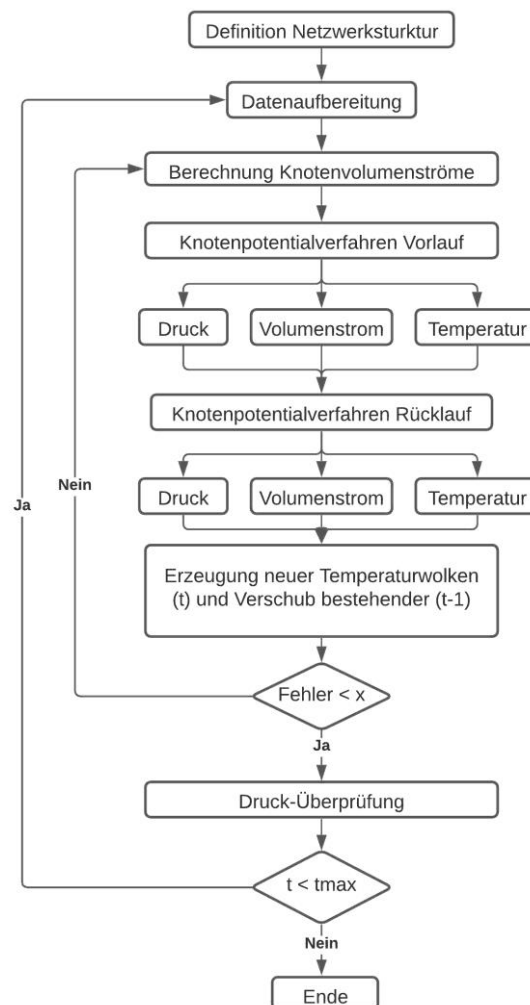


Abbildung 3 Ablauf LFR

### 3 Validierung

Zur Validierung des Programms wurden die Ergebnisse der Lastflussrechnung des beispielhaften Wärmenetzes (Abbildung 1) mit den Ergebnissen des kommerziell erhältlichen Programms PSS@SINCAL verglichen. Die Unterschiede in den Ergebnissen sind dabei vernachlässigbar gering (unter 0,012%).

### 4 Referenzen

- [1] Bundesministerium, Ed., "Klimaneutral bis 2040: Außenministerium stärkt Standort Österreich und Klimaschutz durch grüne Wirtschaftsdiplomatie", Bundesministerium, Wien, 21. Oktober 2021, <https://www.bmeia.gv.at/ministerium/presse/aktuelles/2021/10/klimaneutral-bis-2040-aussenministerium-staerkt-standort-oesterreich-und-klimaschutz-durch-gruene-wirtschaftsdiplomatie> (Abgerufen 23.November,2021)
- [2] Chen Dongwen, Li Yong, Abbas Zulkarnain, Li Dehong, Wang Ruzhu. Network flow calculation based on the directional nodal potential method for meshed heating networks. Energy 2021;Article in press. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122729>
- [3] Dancker, J., Wolter, M. Improved quasi-steady-state power flow calculation for district heating systems: A coupled Newton-Raphson approach. Applied Energy 2021;295:116930. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116930>
- [4] Rüdiger Jens. Enhancements of the numerical simulation algorithm for natural gas networks based on node potential analysis. IFAC-PapersOnLine 2020;53:13119–24. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2282>
- [5] Langeheincke Klaus, Jany Peter, Thieleke Gerd, Langeheincke Kay, Kaufmann Andre. Thermodynamik für Ingenieure. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2013. 978-3-658-03168-8