



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Quasistationäre Simulation eines Fernwärmenetzes mit Berücksichtigung des Falles der dezentralen Einspeisung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Werner

und

Projektass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dietrich Wertz

eingereicht an der Technischen Universität Wien

E302 Institut für Thermodynamik und Energietechnik

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Martina Kepplinger

Matr. Nr.: 1228214

Linz, im Juni 2018

Vorwort

Diese Arbeit wäre ohne einige Weggefährten nicht zustande gekommen:

Da wären zunächst Prof. Dr. Andreas Werner und Dr. Dietrich Wertz, die mir das Themengebiet rund um die Diplomarbeit schmackhaft gemacht haben. Ihr unermüdlicher Enthusiasmus war regelrecht ansteckend. Auch bei Herrn DI Johannes Nagler möchte ich mich für die Unterstützung an dieser Stelle bedanken.

Nicht ganz unbeteiligt am Überlegungs-, Ideenfindungs- und Ausarbeitungsprozess waren meine Schwester Kristina und mein Mann Martin. Die beiden und einige Freunde und Verwandte wissen nun mehr über Fernwärmenetze als es ihnen vielleicht lieb ist. Deren beharrliche Fragen rund um die Thematik haben das Nicht-Voranschreiten der Arbeit unmöglich gemacht.

Flapsige Sprüche und beherztes necken seitens meiner Brüder Valentin und Stjepan waren ein nicht unwesentlicher Ansporn diese Arbeit abzuschließen. Danke.

Ein aufrechter Dank gilt natürlich auch der Studienbeihilfebehörde ohne deren finanzielle Unterstützung mein Studium und somit auch diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

In frustrierenden und schreibschwachen Momenten standen mir meine Mutter Milka und mein Vater Andrija zur Seite und haben meinen geplagten Geist mit Witz und Humor gefüttert. Auch dafür ein herzlicher Dank.

Zusammenfassung

Dezentrale Einspeisung in Fernwärmenetze ist eine Idee, deren technische, wirtschaftliche und energetische Durchführung viel diskutiert wird.

Hier soll ein schnell und unkompliziert zu bedienendes Tool vorgestellt werden, das mit Hilfe quasistationärer Modellierung das Netzverhalten für zahlreiche Lastfälle wiedergibt. Der herkömmliche Verbrauchsfall, sowie der Fall der dezentralen und auch zentralen Einspeisung in ein Fernwärmenetz können damit simuliert und veranschaulicht werden.

Das Ziel war ein Tool zu erhalten, welches durch minimale Einstellungen maximale Variation ermöglicht. So können die Netzstruktur selbst, die Leitungsgeometrie, das Verbraucherverhalten und diverse Anfangsbedingungen mit wenigen Handgriffen variiert werden. Der Haken ist bereits im Titel genannt: quasistationär. Die Flexibilität wird mit der Genauigkeit der Ergebnisse bezahlt. Microsoft Excel ermöglicht es, alle Eingaben und Änderungen zügig durchzuführen. Jedoch muss die Simulation auf algebraischen Gleichungen basieren und ist somit nicht so akkurat wie dynamische Betrachtungen.

Anhand der Simulation eines Beispielnetzes wird, unter den getroffenen Vereinfachungen, festgestellt, dass die Abweichungen zwischen quasistationärer und dynamischer Simulation [1] überschaubar sind. Die relativen Fehler zwischen den beiden Simulationen liegen für alle berechneten Werte (Leistung, Massenstrom, Temperaturen) bei unter 2 Prozent. Dieses Ergebnis lässt sich nur mit einer deutlich erhöhten Rechenzeit erreichen. Die Rechendauer des VBA-Tools liegt hierbei im höheren, einstelligen Stundenbereich und die der dynamischen Simulation im zweistelligen Sekundenbereich.

Für den Fall einer Massenstromumkehr in den Fernwärmeleitungen sind die Ergebnisse des Tools ebenfalls brauchbar. Speisen mehrere oder auch nur ein Anschluss ins Fernwärmenetz ein, so kehren diese die Flussrichtung in den Vor- und Rücklaufleitungen um. Das Tool erlaubt es, jeden Einspeisefall zu berechnen.

Abstract

The idea of local households feeding energy into a district heating network is broadly discussed in terms of technical, economical and energetical feasibility.

A tool is being presented, that allows to simulate the behaviour of a district heating network using a quasi-stationary model. This includes the simulation of usual usage, which means all connected households are consuming energy from the district heating network, as well as centralized and local feeding-in of energy.

One major aim is to have a Visual Basic for Application (VBA) tool that allows lots of variations with little necessary settings. It is possible to change the structure of a district heating system, the geometric values of the pipelines, the consumption data and various initial conditions with little configuration only. This work's title already suggests the limitation: quasi stationary. The high amount of flexibility comes at the cost of low accuracy of the solutions. This means, with Microsoft Excel it is possible to create and change input data quickly, but the calculation allows algebraic equations only. Compared to dynamic calculus the solution is imprecise.

This paper includes the calculation of a district heating network of which a dynamic simulation result already exists. By comparing both solutions one can see that they are quite similar. Calculated values such as power, mass flux and temperature show a relative error lower than two percent. In order to get this accurate solution the program uses a long time for the calculation. In case of the district heating network calculated in this paper the tool takes a larger one-digit number of hours for the simulation, while a dynamic simulation is finished in a few seconds.

Even in case of reversal of the mass flux the solutions are useable. If one or more connected households are feeding into the district heating network, the mass flux in both, the flow and return flow pipes can be reversed. This reversal is supported by the tool.

Inhalt

| | |
|---|-----|
| Vorwort..... | I |
| Zusammenfassung..... | III |
| Abstract..... | V |
| Symbolverzeichnis..... | 1 |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 1.1 Grundlegendes..... | 1 |
| 1.2 Netzformen..... | 1 |
| 1.3 Wärmegewinnung..... | 3 |
| 1.4 Wärmetransport..... | 3 |
| 1.5 Wärmebedarf..... | 4 |
| 1.6 Möglichkeiten der dezentralen Einspeisung..... | 4 |
| 2 Werkstoffeigenschaften..... | 8 |
| 2.1 Einfluss der Wärmeleitfähigkeiten auf den Wärmedurchgangskoeffizienten..... | 8 |
| 2.2 Energiespeicherkapazität..... | 11 |
| 3 Erläuterung der Rechenmethodik des VBA-Tools..... | 13 |
| 3.1 Vorhandene Netzdaten..... | 13 |
| 3.2 Grundkonzept..... | 17 |
| 3.3 Berechnung..... | 18 |
| 3.3.1 Massenbilanz..... | 19 |
| 3.3.2 Leistungsbilanz..... | 20 |
| 3.3.3 Temperaturen in Vor- und Rücklauf..... | 23 |
| 3.3.3.1 Vorlauf..... | 25 |
| 3.3.3.2 Rücklauf..... | 26 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4 | Aufbau der Bedienumgebung | 28 |
| 4.1 | Tabellenblätter | 28 |
| 4.1.1 | „Fixe Werte“ | 28 |
| 4.1.2 | Eingabe | 29 |
| 4.1.3 | Verbindungen | 31 |
| 4.1.4 | Daten | 32 |
| 4.1.5 | Simulation | 33 |
| 4.1.6 | Auswertung | 34 |
| 4.1.7 | Plot | 35 |
| 4.1.8 | Stoffwerte | 36 |
| 5 | Das Makro | 37 |
| 5.1 | Struktur des Makros | 37 |
| 5.2 | Aufgaben der einzelnen Funktionen innerhalb des Makros | 38 |
| 5.2.1 | Fix Values | 39 |
| 5.2.2 | Material Values | 41 |
| 5.2.3 | Calc | 42 |
| 5.3 | Validierung des VBA-Tools | 45 |
| 5.3.1 | Validierung der Modellierung | 45 |
| 5.3.2 | Validierung des Makro-Codes | 48 |
| 6 | Das Beispielnetz – Struktur und Angaben | 49 |
| 6.1 | Struktur des Fernwärmenetzes | 49 |
| 6.2 | Datensätze der Anschlüsse | 50 |
| 7 | Vergleich zwischen dynamischer und quasistationärer Simulation | 53 |
| 7.1 | Auswirkung der Zeitschrittweite auf die errechneten Größen | 53 |
| 7.1.1 | Temperaturen des Vor- und Rücklaufs | 54 |
| 7.1.2 | Massenstrom | 56 |
| 7.1.3 | Leistung | 58 |
| 7.1.4 | Abweichung zwischen dynamischer und quasistationärer Simulation | 59 |

| | | |
|---------|--|----|
| 7.2 | Auswirkung von Netzgröße und Zeitschrittweite auf die Rechendauer | 61 |
| 7.3 | Vor- und Nachteile des VBA Modells gegenüber der dynamischen Betrachtung | 62 |
| 8 | Einspeisung ins Fernwärmenetz..... | 63 |
| 8.1 | Auswirkung der Einspeisung ins Fernwärmenetz betrachtet anhand eines kleinen, geradlinigen Versuchsnetzes..... | 63 |
| 8.1.1 | Auswirkung auf die Leistungen | 64 |
| 8.1.2 | Auswirkung auf die Leitungsverluste | 65 |
| 8.1.3 | Auswirkung auf die Vor- und Rücklauftemperaturen | 66 |
| 8.1.4 | Auswirkung auf den Massenstrom | 69 |
| 8.2 | Vergleich Einspeisungs- zu Verbrauchsfall anhand des Versuchsnetzes aus Abschnitt 6 | 70 |
| 8.2.1 | Auswertung des Hauptstranges | 71 |
| 8.2.1.1 | Flächendiagramm der Leistungen..... | 71 |
| 8.2.1.2 | Flächendiagramm der Massenströme | 72 |
| 8.2.1.3 | Flächendiagramme der Temperaturen..... | 74 |
| 8.3 | Auswirkung auf das Heizwerk..... | 77 |
| 9 | Diskussion..... | 80 |
| 10 | Ausblick..... | 81 |
| 11 | Abbildungsverzeichnis..... | 82 |
| 12 | Tabellenverzeichnis..... | 86 |
| 13 | Quellenverzeichnis | 87 |
| 14 | Anhang A - VBA Code..... | 89 |

Symbolverzeichnis

| Symbol | Beschreibung | | Einheit |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------|
| A_W | Querschnittsfläche der Wassersäule | | m^2 |
| C_{pSt} | Wärmekapazität | Stahl | $J/(kg \cdot K)$ |
| C_{pW} | | Wasser | |
| c | Fließgeschwindigkeit | | m/s |
| d_{PE} | Durchmesser | Polyethylen | m |
| d_{PU} | | Polyurethan | |
| d_{St} | | Stahl | |
| d_W | | Wasser | |
| h_m | Einbautiefe der Leitung | | m |
| k | Wärmedurchgangskoeffizient | | $W/(m \cdot K)$ |
| l | Länge des Rohrabschnitts | | m |
| \dot{m} | Massenstrom | | kg/s |
| P_n | Leistung | im Knoten n | W |
| P_{n-1} | | im Knoten $n-1$ | |
| P_{RL} | | im Rücklauf | |
| P_{VL} | | im Vorlauf | |
| $P_{RL,n}$ | | des Rücklaufs im Knoten n | |
| $P_{VL,n}$ | | des Vorlaufs im Knoten n | |
| $P_{RL,n-1}$ | | des Rücklaufs im Knoten $n-1$ | |
| $P_{VL,n-1}$ | | des Vorlaufs im Knoten $n-1$ | |
| $P_{Vb,n}$ | | des Verbrauchers n | |
| $P_{RL,Vb,n}$ | | des Verbrauchers n im Rücklauf | |
| $P_{VL,Vb,n}$ | | des Verbrauchers n im Vorlauf | |

| | | | |
|------------------|---|---|-----|
| $P_{V,n-1 n}$ | Verlustleistung | zwischen den Knoten $n-1$ und n | W |
| $P_{RL,V,n-1 n}$ | | des Rücklaufs zwischen den Knoten $n-1$ und n | |
| $P_{VL,V,n-1 n}$ | | des Vorlaufs zwischen den Knoten $n-1$ und n | |
| T_E | Temperatur | des Erdreichs | K |
| $T_{RL,n}$ | | des Rücklaufs im Knoten n | |
| $T_{VL,n}$ | | des Vorlaufs im Knoten n | |
| $T_{RL,n-1 n}$ | Innentemperatur | des Rücklaufs zwischen den Knoten $n-1$ und n | K |
| $T_{VL,n-1 n}$ | | des Vorlaufs zwischen den Knoten $n-1$ und n | |
| $T_{RL,n-2 n-1}$ | | des Rücklaufs zwischen den Knoten $n-2$ und $n-1$ | |
| $T_{VL,n-2 n-1}$ | | des Vorlaufs zwischen den Knoten $n-2$ und $n-1$ | |
| s_{PE} | Dicke | der Polyethylenschicht | m |
| s_{PU} | | der Polyurethanschicht | |
| s_{St} | | der Stahlschicht | |
| s_{VLRL} | Abstand zwischen Vor- und Rücklaufleitung | | m |
| Δt_M | Zeitschrittweite der Messwerte | | s |
| Δt_S | Zeitschrittweite der Simulation | | s |
| t_{SD} | Simulationsdauer | | s |
| $U_{RL,n-1 n}$ | innere Energie | des Rücklaufs zwischen den Knoten $n-1$ und n | J |
| $U_{VL,n-1 n}$ | | des Vorlaufs zwischen den Knoten $n-1$ und n | |

| | | | |
|--------------------|-------------------------------|---|-----------------|
| V_{ges} | Volumen | Gesamt | m^3 |
| V_{St} | | Stahlschicht | |
| V_W | | Wassersäule | |
| V_{zu} | | zugeführt | |
| ζ | Druckverlustbeiwert | | |
| $1/\Lambda_E$ | Wärmedurchlass- widerstand | Erdreich | $W/(m \cdot K)$ |
| $1/\Lambda_R$ | | Rohr | |
| $1/\Lambda_{VLRL}$ | | gegenseitiger Einfluss zwischen Vor- und Rücklauf | |
| λ_E | Wärmeleitfähigkeit | Erdreich | $W/(m \cdot K)$ |
| λ_{PE} | | Polyethylen | |
| λ_{PU} | | Polyurethan | |
| λ_{St} | | Stahl | |
| ρ_{St} | Dichte | Stahl | kg/m^3 |

1 Einleitung

1.1 Grundlegendes

Fernwärmenetze setzen sich im klassischen Sinne aus einem Heizwerk, das mit einer Vielzahl von Verbrauchern verbunden ist, zusammen. Die Verbindungen bilden die Vor- und Rücklaufleitungen. Über den Vorlauf wird das zuvor am Heizwerk erwärmte Wärmeträgermedium (in der Regel aufbereitetes Wasser) zu den Verbrauchern transportiert. Diese entnehmen die Wärme über Wärmetauscher. Das nun abgekühlte Wärmeträgermedium fließt über den Rücklauf zurück zum Heizwerk, wo es erneut erhitzt wird. Der Kreislauf ist somit geschlossen.

1.2 Netzformen

Grundsätzlich werden drei Netzstrukturen unterschieden, die je nach Anforderung der Nutzer eingesetzt werden.

Das **Strahlennetz** hat die geringste Trassenlänge unter den drei Netzformen und wird daher bei kleinen und mittleren Netzgrößen bevorzugt. Die Herstellungskosten werden somit möglichst niedrig gehalten. Allerdings ist die Versorgungssicherheit schwierig zu gewährleisten, da das Netz nur durch ein Heizwerk betrieben wird.

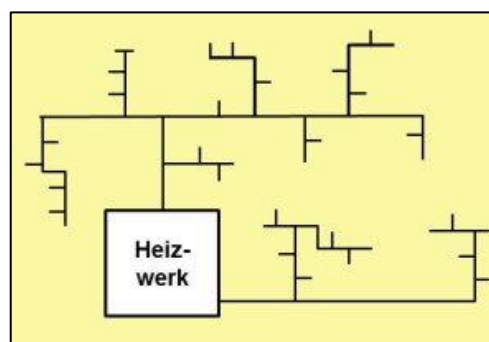


Abbildung 1 Schematische Darstellung eines Strahlennetzes. [2]

Bessere Versorgungssicherheit kann ein **Ringnetz** gewährleisten. Die Ringform erlaubt es, mehrere Energiezuspeiser im selben Netz einzugliedern, aber auch die nachträgliche Einbindung von Einspeisern und/oder Verbrauchern. Diese Netze sind also sehr flexibel. Die Herstellungskosten liegen jedoch deutlich über denen eines Strahlennetzes.

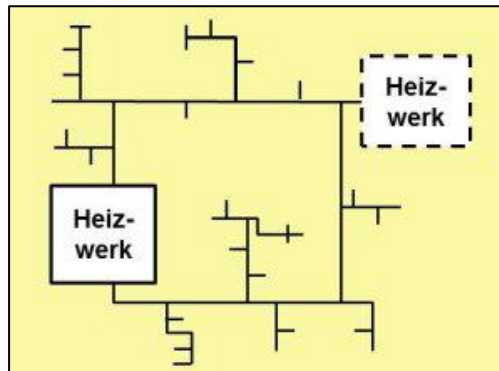


Abbildung 2 Schematische Darstellung eines Ringnetzes. [2]

Das **Maschennetz** lässt sich als optimierte Form des Ringnetzes bezeichnen. Es unterscheidet sich vom Ringnetz durch zusätzliche Querverbindungen und gewinnt dadurch an noch mehr Anschlussmöglichkeiten. Nachträgliches Einbinden von Energieerzeugern und Verbrauchern ist noch einfacher und flexibler möglich.

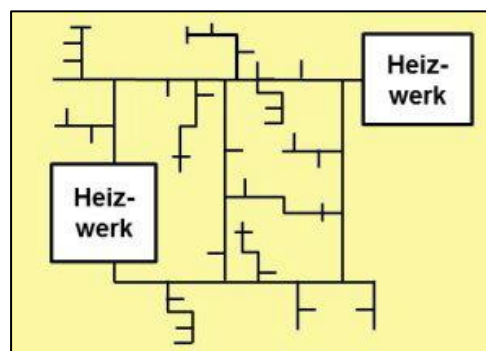


Abbildung 3 Schematische Darstellung eines Maschennetzes. [2]

1.3 Wärmegewinnung

Die Wärmegewinnung findet in Heizkraftwerken oder Kraft-Wärme-Kopplungs- (KWK) Anlagen statt. Aus *Abbildung 4* lässt sich ein Verhältnis von 1:1 zwischen erneuerbaren und konventionellen Energieträgern für ganz Österreich ablesen. Somit stammt ungefähr die Hälfte des Brennstoffes zur Wärmegewinnung aus regenerativen Quellen.

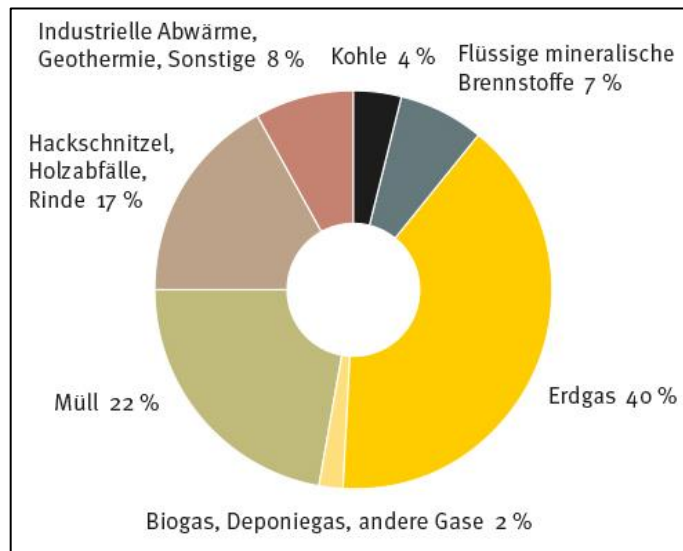


Abbildung 4 Prozentuelle Anteile der Brennstoffe zur Wärmeerzeugung in Österreich. Stand: 2014 [3]

Weitere Gewinnungsmöglichkeiten bieten solarthermische Kraftwerke, geothermische Kraftwerke, Elektrodenheizkessel (Power-To-Heat) oder das Auskoppeln der Fernwärme aus Kernkraftwerken (z.B.: Schweiz).

Grundsätzlich wird angestrebt, den fossilen Anteil der Brennstoffe zu minimieren.

1.4 Wärmetransport

Der Wärmetransport erfolgt, wie bereits erwähnt, in den Vor- und Rücklaufleitungen. Diese haben im Wesentlichen den selben Aufbau. Sie bestehen aus einem Stahlinnenrohr, einer Isolierschicht aus Polyurethan (PU) und einer Außenschicht aus Polyethylen (PE), einem Hartkunststoff. Es gibt auch diverse flexiblere Leitungsbauweisen, die selten vorkommen und auf die nicht näher eingegangen wird.

1.5 Wärmebedarf

Bei Betrachtung des Wärmebedarfs ist zwischen privaten und industriellen Verbrauchern zu unterscheiden. Auch die Tages- und Jahreszeit muss berücksichtigt werden. Das Netz muss alle Spitzen im Tages-, Wochen- und Jahresverlauf abdecken. Unter der Annahme, dass es keinen oder nur einen sehr kleinen Speicher gibt müssen globale Spitzen vorhersehbar sein.

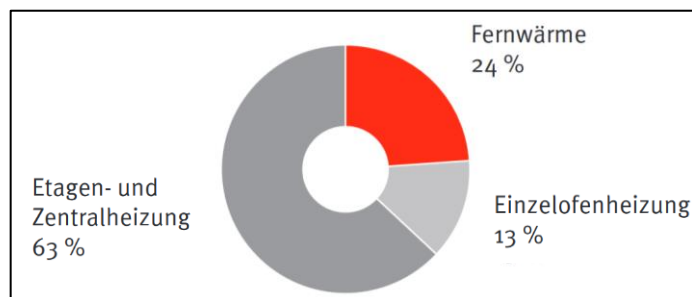


Abbildung 5 Prozentuelle Anteile der Heizungsarten in österreichischen Haushalten. [4]

Eine Form der Flexibilisierung von Strahlennetzen ist durch dezentrale Einspeisung realisierbar. Auf diese Weise ist das Fernwärmenetz nicht nur von einem Heizwerk abhängig. Viele, kleine, dezentrale Einspeiser erhöhen die Versorgungssicherheit und senken den Brennstoffbedarf des Kraftwerks. Gleichzeitig wird das Fernwärmenetz als Speicher genutzt. Erzeugt ein Verbraucher solarthermische Energie, die er zum Erzeugungszeitpunkt nicht benötigt, muss er diese speichern. Speist er jedoch den Überschuss ins Fernwärmenetz ein, so übernimmt dieses die Speicherfunktion aus Sicht des Verbrauchers. Der Verbraucher wird somit zum Produzenten. Das Heizwerk wird durch die neuen Produzenten entlastet und diese wiederum gewinnen eine Speichermöglichkeit außerhalb ihrer baulichen Gegebenheiten.

1.6 Möglichkeiten der dezentralen Einspeisung

Es stellt sich nun die Frage, wie die dezentrale Einspeisung erfolgen kann. Hierzu finden sich drei Arten und deren Bewertung im Abschlussbericht zum Projekt „AEE Erneuerbare Energie NOW“ von Reiterer [4].

Eine Möglichkeit wäre die **Vorlaufanhebung**. Das heißt der dezentrale Produzent entnimmt das Wärmeträgermedium aus dem Vorlauf und erhöht dessen Temperatur mittels solarthermischer Energie über jene des Vorlaufs. Anschließend wird das Wärmeträgermedium in den Vorlauf zurückgeführt.

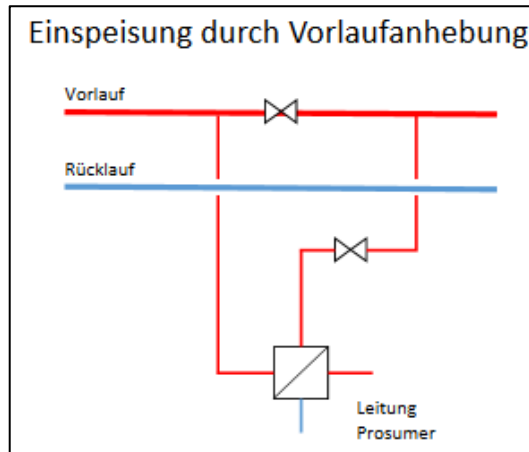


Abbildung 6 Schematische Darstellung der Funktionsweise der Einspeisung durch Vorlaufanhebung. [4]

Aus Sicht des Netzbetreibers ergeben sich folgende Nachteile. Zum einen muss er einen Strömungswiderstand in die Vorlaufleitung einbauen um den Durchfluss im Wärmetauscher des Produzenten zu regeln. Zum anderen wird die Pumpenergie durch die Netzpumpe aufgebracht. Also hat der Netzbetreiber die Druckverluste der Komponenten des Produzenten (Wärmetauscher, Verbindungselemente) zu überbrücken. Klarerweise ist genau das ein Vorteil für den Produzenten. Der Produzent wiederum muss unbedingt eine höhere Temperatur, als die im Vorlauf vorhandene, bereitstellen.

Analog zur Vorlaufanhebung ist eine **Rücklaufanhebung** denkbar. Der Produzent entnimmt das Wärmeträgermedium aus dem Rücklauf und speist es mit erhöhter Temperatur wieder ein.

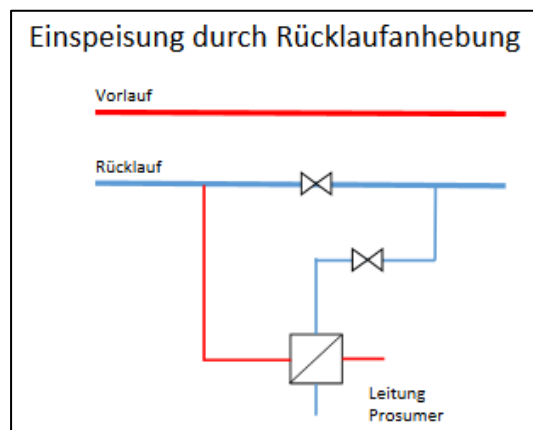


Abbildung 7 Schematische Darstellung der Funktionsweise der Einspeisung durch Rücklaufanhebung. [4]

Auch hier muss der Netzbetreiber die Pumpenergie aufbringen. Die Netzpumpe gleicht also die Druckverluste der Produzentenkomponenten (Wärmetauscher, Verbindungselemente) aus. Wie auch bei der Vorlaufanhebung muss der Netzbetreiber Strömungswiderstände einbauen um die Durchflussrichtung zu regeln. Die Erhöhung der Rücklaufftemperatur bewirkt einen verschlechterten Wirkungsgrad des Netzes, da die Temperaturspreizung (zwischen Vor- und Rücklauf) sinkt. Im Endeffekt wird dem Netz zusätzlich Energie hinzugefügt, jedoch wird das Heizwerk nicht ersetzt oder entlastet.

Eine weitere Möglichkeit ist es, das Wärmeträgermedium aus dem Rücklauf zu entnehmen, die Temperatur zu erhöhen und in den Vorlauf einzuspeisen.

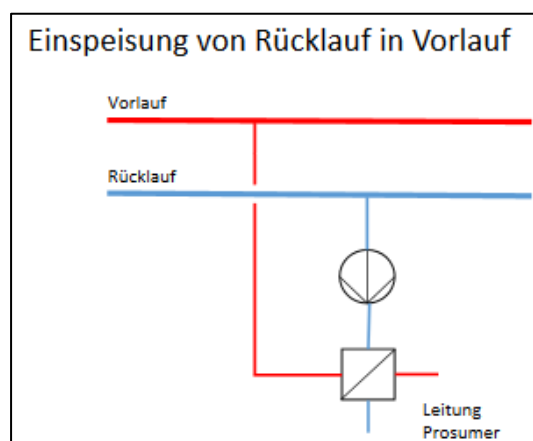


Abbildung 8 Schematische Darstellung der Funktionsweise der Einspeisung vom Rück- in den Vorlauf [4]

Für diese Variante benötigt der dezentrale Produzent eine Pumpe, um die Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf zu überwinden. Außerdem ist der Produzent verpflichtet auf dem Temperaturniveau der Vorlaufleitung oder höher einzuspeisen, da der Fernwärmenetzbetreiber allen Abnehmern eine minimale Vorlauftemperatur garantieren muss. Die vom Heizwerk zu erbringende Leistung kann durch diese Variante der Einspeisung jedoch reduziert werden. Es ergeben sich also für den Netzbetreiber die geringsten Nachteile und die größtmöglichen Vorteile.

2 Werkstoffeigenschaften

Große Schwierigkeiten bei der Umsetzung von Simulationen mittels *Visual Basic for Application* (VBA) macht die nicht unerhebliche Rechenzeit, die diese Skriptsprache im Vergleich zu anderen Programmiersprachen in Anspruch nimmt. Um die Rechenzeit möglichst gering zu halten, werden unter anderem Formeln möglichst stark vereinfacht. Die erste Gelegenheit, Vereinfachungen zu treffen (selbstverständlich ohne signifikante Einbußen bei der Rechengenauigkeit hinnehmen zu müssen) bietet sich bereits bei den Berechnungen der Energiespeicherkapazität und des Wärmedurchgangskoeffizienten.

Die Vor- und Rücklaufleitung eines Fernwärmenetzes besteht im Allgemeinen aus einer äußersten Hartkunststoffschicht (PE), einer isolierenden Polyurethanschicht (PU) und einem Stahlinnenrohr. Die Werkstoffe der einzelnen Schichten haben verschiedene Eigenschaften. Vor allem die thermischen Eigenschaften der Werkstoffe sind bei einem Fernwärmenetz relevant. Von großem Interesse sind die Einflüsse der Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Leitungsschichten auf die Leistung, die Temperatur und den Massenstrom.

2.1 Einfluss der Wärmeleitfähigkeiten auf den Wärmedurchgangskoeffizienten

Zur Berechnung der Verluste der Vor- und Rücklaufleitung wird ein Wärmedurchgangskoeffizient benötigt. Dieser soll die verschiedenen Werkstoffschichten der Leitungen, den Einfluss der Einbautiefe der Leitungen bzw. des Erdreichs und den gegenseitigen Einfluss von Vor- und Rücklaufleitung berücksichtigen.

In *Tabelle 1* sind Abmessungen eines Fernwärmerohres sowie Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Werkstoffschichten angeführt. Damit sollen die Überlegungen zur Vereinfachung der Formeln erfolgen.

| | Schichtdicke s in mm | Außen- durchmesser d in mm | Wärme- kapazität C _p in J/(kg K) | Volumenanteil in m ³ /m | Wärme- leitfähigkeit λ in W/(m K) |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------------------|--|
| Wasser | - | 312,7 | 4187 | 0,0768 | 0,59 |
| Stahl | 5,6 | 323,9 | 490 | 0,0056 | 54,5 |
| Poly - urethan | 109,25 | 542,4 | 1400 | 0,1487 | 0,03 |
| Poly - ethylen | 8,8 | 560,0 | 1800 | 0,0152 | 0,03 |

Tabelle 1 Beispiel einer Fernwärmeleitung

Der Wärmedurchgangskoeffizient durch den Rohrmantel kann näherungsweise mit der Formel für die ebene Wand

$$k_{\text{ebeneW}} = \frac{1}{\frac{s_{\text{Stahl}}}{\lambda_{\text{Stahl}}} + \frac{s_{\text{PU}}}{\lambda_{\text{PU}}} + \frac{s_{\text{PE}}}{\lambda_{\text{PE}}}} = 0,2729413 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (1)$$

und exakt mit der Formel für eine Zylinderwand

$$k_{\text{zyl}} = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\lambda_{\text{Stahl}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{Stahl}}}{d_{\text{Wasser}}}\right) + \frac{1}{\lambda_{\text{PU}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{PU}}}{d_{\text{Stahl}}}\right) + \frac{1}{\lambda_{\text{PE}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{PE}}}{d_{\text{PU}}}\right)} = 0,3638999 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (2)$$

berechnet werden.

Die Näherungsformel, angewandt auf die gegebenen Werte aus *Tabelle 1*, liefert ein zu ungenaues Ergebnis, weshalb die Formel für eine Zylinderwand zu bevorzugen ist. Dennoch wird diese nicht vollständig übernommen, sondern noch etwas vereinfacht. Betrachtet man die Summe im Nenner der *Formel 2* näher so lassen sich zwei Summanden vernachlässigen. Zum einen ist die Wärmeleitfähigkeit von Stahl verhältnismäßig groß, daher der Kehrwert klein und somit vernachlässigbar. Der Quotient $\frac{d_{\text{PE}}}{d_{\text{PU}}}$ innerhalb der ln-Funktion ergibt circa 1 und folglich kann auch dieser Summand vernachlässigt werden.

Setzt man diese Überlegung in *Formel (2)* ein so erhält man einen vereinfachten Wärmedurchgangskoeffizienten

$$k_{\text{zyl}}^* = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\lambda_{\text{PU}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{PU}}}{d_{\text{Stahl}}}\right)} = 0,3656069 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (3)$$

Der relative Fehler zwischen dem vereinfachten und dem exakten Wärmedurchgangskoeffizienten beträgt

$$|f_k| = \left| \frac{k_{\text{zyl}} - k_{\text{zyl}}^*}{k_{\text{zyl}}} \right| = 0,004691 \triangleq 0,47 \% \quad (4)$$

und ist somit vernachlässigbar gering. Daher kann die vereinfachte Formulierung (3) für die Zylinderwand einer Fernwärmeleitung herangezogen werden.

Das Erdreich und der gegenseitige Einfluss von Vor- und Rücklauf leisten auch einen Beitrag zum Wärmeverlust. Der gesamte Wärmedurchgangskoeffizient

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\Lambda_{\text{zyl}}^*} + \frac{1}{\Lambda_E} + \frac{1}{\Lambda_{\text{VLR}}}} \quad (5)$$

setzt sich somit aus dem vereinfachten Wärmedurchlasswiderstand

$$\frac{1}{\Lambda_{\text{zyl}}^*} = \frac{1}{\lambda_{\text{PU}}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{PU}}}{d_{\text{St}}}\right) \quad (6)$$

für eine Zylinderwand, dem Wärmedurchlasswiderstand

$$\frac{1}{\Lambda_E} = \frac{1}{\lambda_E} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot h_m}{d_{\text{PE}}}\right) \quad (7)$$

des Erdreichs und dem Wärmedurchlasswiderstand

$$\frac{1}{\Lambda_{VL/RL}} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_E} \cdot \ln \left(1 + \frac{(2 \cdot h_m)^2}{s_{VLRL}^2} \right) \quad (8)$$

aufgrund des gegenseitigen Einflusses der Vor- und Rücklaufleitung zusammen.

Der gesamte Wärmedurchgangskoeffizient sieht somit wie folgt aus

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\lambda_{PU}} \cdot \ln \left(\frac{d_{PU}}{d_{St}} \right) + \frac{1}{\lambda_E} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot h_m}{d_{PE}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_E} \cdot \ln \left(1 + \frac{(2 \cdot h_m)^2}{s_{VLRL}^2} \right)} \quad (9)$$

Eine weitere Vereinfachung ist nicht möglich, da jede Änderung der *Formel (9)* einen zu großen Einfluss auf das Ergebnis hätte.

2.2 Energiespeicherkapazität

Aufgrund der unterschiedlichen Wärmekapazitäten werden ungleich große Mengen an Energie von den jeweiligen Werkstoffen gespeichert.

Selbstverständlich spielt für die Speichermenge auch der Volumenanteil der einzelnen Schichten am Gesamtvolumen eine Rolle. Zur Abschätzung, ob eine Schicht bei der Berechnung der inneren Energie vernachlässigt werden kann wird die gespeicherte Energie in jeder Werkstoffschicht der Vorlaufleitung beispielhaft betrachtet. Die Erkenntnisse lassen sich direkt auf die Rücklaufleitung übertragen, da lediglich die Innentemperatur geringer ist und diese für die Überlegung keine Rolle spielt.

Die in der Rohrleitung gespeicherte innere Energie pro Rohrvolumen

$$Q_{\text{gespeichert}} = \sum C_{p,i} \cdot \rho_i \cdot (T - T_{\text{abs}}) \quad (10)$$

wird für alle Werkstoffschichten berechnet, wobei C_p der Wärmekapazität und ρ , der Dichte des jeweiligen Stoffes i (=Wasser, Stahl, PU, PE) entspricht.*

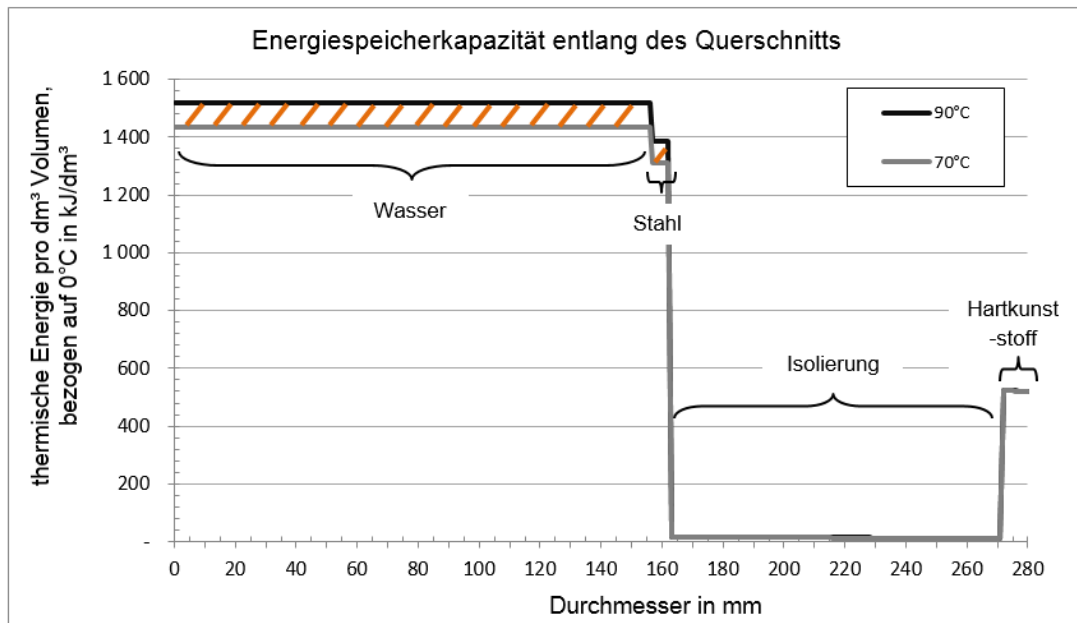


Abbildung 9 gespeicherte Energiemenge entlang des Querschnitts einer Fernwärmeleitung

Abbildung 9 zeigt die in den einzelnen Schichten des Rohrleitungsquerschnitts gespeicherte thermische Energie bei einer Temperatur von 90°C und 70°C . Aufgrund der Abweichungen der beiden Funktionen für die zwei betrachteten Temperaturen ist festzustellen, dass die Wärmekapazitäten des Wassers und des Stahls für die Speicherung der inneren Energie eine merkbare Rolle spielen, wohingegen die PU- und PE-Schicht kaum Wärme speichern. Daher werden ausschließlich die Stahl- und Wasserschicht bei der Berechnung der inneren Energie berücksichtigt.

3 Erläuterung der Rechenmethodik des VBA-Tools

Die Abmessungen der Fernwärmeleitungen, die Netzstruktur sowie das Verbraucherverhalten (zu- bzw. abgeführte Leistungen und die zugehörigen Temperaturen) sind bekannt. Daraus sollen für das gesamte Netz die Massenströme, Leistungen und Temperaturen errechnet werden. In den folgenden Abschnitten werden diese Berechnungen und die zugehörigen Voraussetzungen erläutert.

3.1 Vorhandene Netzdaten

Vom Fernwärmenetz sind für alle Rohrabschnitte zwischen den Verbrauchern die jeweiligen Durchmesser d_W des Innenrohrs, d_{St} der Stahlschicht, d_{PU} der Isolierschicht, d_{PE} der Hartkunststoffschicht, die Längen l und die Druckverlustbeiwerte ζ bekannt.

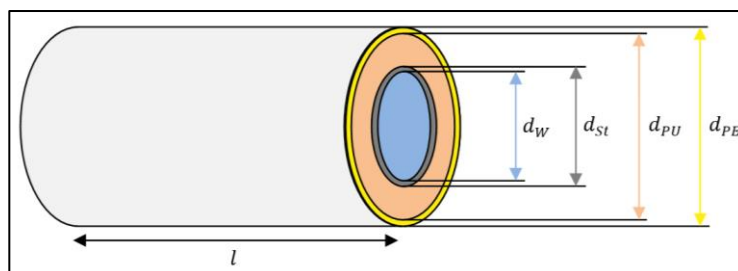


Abbildung 10 schematische Darstellung eines Rohrabschnitts, inkl. Bezeichnungen der Maße

Die Anschlussseite liefert Informationen über Leistungen und Temperaturen, wobei folgende zwei Fälle betrachtet werden: Einerseits die Situation, dass der Anschluss verbraucht und andererseits, dass der Anschluss ins Fernwärmenetz einspeist. *Abbildung 11* zeigt eine schematische Darstellung dieser beiden Situationen.

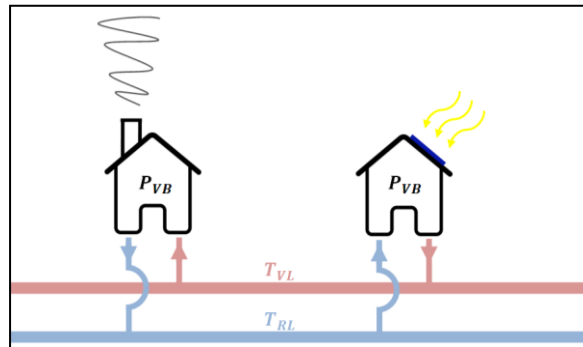


Abbildung 11 links: Verbraucher entnimmt Leistung aus dem Fernwärmenetz, rechts: Verbraucher speist Leistung ins Fernwärmenetz ein

Erster Fall: Verbraucher: Leistung wird aus dem Fernwärmenetz entnommen

Gegeben sind die Leistungen $P_{VL,n}$, die jeder Verbraucher aus der Vorlaufleitung des Fernwärmenetzes entnimmt und die Temperaturen $T_{RL,n}$ mit denen das Wärmeträgermedium im Knoten n in den Rücklauf zurückgeführt wird. Diese Werte liegen in tabellarischer Form in konstanten Zeitintervallen Δt_{VB} vor.

Zweiter Fall: Produzent: Leistung wird ins Fernwärmenetz eingespeist

Die Produzenten führen der Vorlaufleitung die Leistungen $P_{VL,n}$ zu. Hierzu entnehmen sie dem Rücklauf das Wärmeträgermedium, mit einer vom Netz vorgegebenen Temperatur. Diese wird auf eine Temperatur $T_{VL,n}$ angehoben und dem Vorlauf zugeführt. Aus der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf und der Einspeiseleistung $P_{VL,n}$ errechnet sich der Massenstrom.

Tabelle 2 veranschaulicht, in welcher Form die gegebenen Datensätze vorliegen können. Ob der Anschluss verbraucht oder einspeist lässt sich hier am Vorzeichen der Leistung P erkennen. Im Fall der Einspeisung ist diese Leistung negativ. Außerdem sind Werte für die Temperatur $T_{VL,n}$ eingetragen, da sie von der Haustechnik des Produzenten vorgegeben wird und daher bekannt sein muss. Wird dem Fernwärmenetz Energie entnommen, so hat die Leistung $P_{VL,n}$ ein positives Vorzeichen. Für die Temperatur $T_{VL,n}$ ist in diesem Fall kein Wert gegeben, da das Wärmeträgermedium diese Temperatur vorgibt.

Jedoch ist die Rücklauftemperatur $T_{RL,n}$, mit der das Wärmeträgermedium in den Rücklauf zurückfließt bekannt, da diese Temperatur vom Verbraucher bestimmt wird.

Der Knoten null stellt das Heizwerk dar und hat keinerlei Angaben zu Leistungen und Temperaturen. Das gesamte System wird also über die Verbraucher gesteuert bzw. beeinflusst und liefert unter anderem Informationen über das Heizwerk, beispielsweise die Leistung, die das Heizwerk zur Verfügung stellen muss.

| Knoten | Datum | Zeit in s | Länge in m | Durchmesser innen in m | Durchmesser Stahl in m | Durchmesser Polyurethan PU in m | Durchmesser Poethylen in m | Zeta | Leistung des Verbrauchers in W | eingespeiste Temp. VL in °C | eingespeiste Temp. RL in °C |
|--------|------------|--------------|---------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| K | date | t | l | d _w | d _{st} | d _{PU} | d _{PE} | z | P | T_VL | T_RL |
| 0 | 01.01.2014 | 100 | 0 | 0,2 | 0,005 | 0,1 | 0,0002 | 0 | - | - | - |
| | 01.01.2014 | 200 | | | | | | | - | - | - |
| | 01.01.2014 | 300 | | | | | | | - | - | - |
| ... | ... | ... | | | | | | | - | - | - |
| 1 | 01.01.2014 | 100 | 10 | 0,3 | 0,004 | 0,15 | 0,003 | 4,75 | 10000 | - | 34,5 |
| | 01.01.2014 | 200 | | | | | | | -5000 | 70 | - |
| | 01.01.2014 | 300 | | | | | | | 20000 | 73 | - |
| ... | ... | ... | | | | | | | ... | ... | ... |
| 2 | 01.01.2014 | 100 | 20 | 0,3 | 0,005 | 0,1 | 0,002 | 3,5 | 2000 | - | 30 |
| | 01.01.2014 | 200 | | | | | | | 3000 | - | 30,2 |
| | 01.01.2014 | 300 | | | | | | | 3000 | - | 32,3 |
| ... | ... | ... | | | | | | | ... | ... | ... |
| 3 | 01.01.2014 | 100 | 30 | 0,03 | 0,003 | 0,1 | 0,0015 | 4,75 | 1000 | - | 35,3 |
| | 01.01.2014 | 200 | | | | | | | -200 | 65 | - |
| ... | ... | ... | | | | | | | ... | ... | ... |

Tabelle 2 Mögliche Form der Angabe von Messwerten eines thermischen Netzes

Alle notwendigen Stoffwerte der verschiedenen Werkstoffe sind bekannt und in *Tabelle 3* zusammengefasst.

| | Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K) | Wärmekapazität in J/(kg*K) | Dichte in kg/m ³ |
|--------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Wasser | 0,59 | 4187 | 970 |
| Stahl | 54 | 490 | 7870 |
| PU | 0,03 | 1400 | 35 |

Tabelle 3 Stoffwerte von Wasser, Stahl und Polyurethan

Neben den Netzdaten und Stoffwerten gibt der Benutzer auch noch die Zeitschrittweite Δt_s der Simulation, die Dauer der Simulation t_{SD} sowie die Anfangstemperatur der Vor- und Rücklaufleitung an.

Die Zeitschrittweite ist die Spanne zwischen zwei Zeitschritten und hat einen erheblichen Einfluss auf die Rechenzeit und -genauigkeit. Sie darf außerdem nicht beliebig groß gewählt werden. Denn für die Berechnung der Temperaturen wird ein Mischungsansatz verwendet, der ein bestimmtes Verhältnis zwischen Rohrlänge l , Fließgeschwindigkeit c und der Zeitschrittweite Δt_s fordert. Aus diesem Mischungsansatz folgt eine obere Schranke für die Zeitschrittweite, die in Abschnitt 3.3.3.1 näher erläutert wird. Eine untere Schranke gibt es nicht. Je kleiner die Zeitschrittweite, desto genauer die Berechnung. Jedoch erhöht sich, wie bereits erwähnt, die Rechenzeit. Die ideale Einstellung der Zeitschrittweite wird ausführlich in Abschnitt 7 besprochen.

3.2 Grundkonzept

Um auf Differentialgleichungen während der Modellierung einer Strömung und des Wärmetransportes, wie hier angestrebt, verzichten zu können ist eine Unterteilung der Abläufe erforderlich.

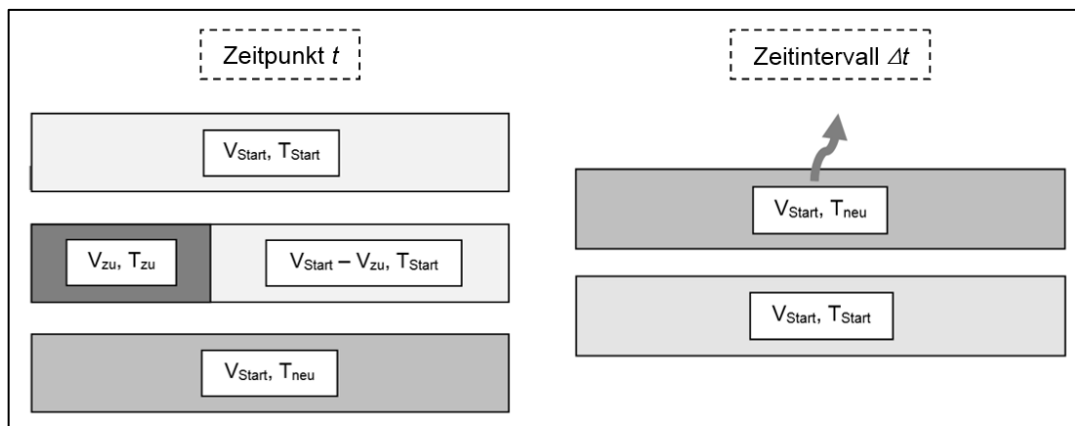


Abbildung 12 Segmentierung des Masse- und Wärmetransportes in zwei Abläufe

Abbildung 12 veranschaulicht die zwei Abfolgen, die während einer Iteration für ein Rohrvolumen stattfinden. Zu einem Zeitpunkt t strömen Volumen und Leistungen über die Systemgrenze. Das vorhandene und zugeströmte Volumen vermischen ihre Temperaturen zu einer Einheitstemperatur die homogen im gesamten, betrachteten Volumen vorherrscht. Es folgt eine Zeitspanne Δt , in der kein Volums- oder Leistungsaustausch stattfindet. Das Rohrvolumen steht im Wärmeaustausch mit der Umgebung. Es stellt sich eine neue Innentemperatur ein, die ebenfalls homogen verteilt vorherrscht. Diese beiden Abläufe wechseln einander ab, bis die vorgegebene Simulationsdauer erreicht ist.

Das Modell beruht also auf einem quasistationären Ansatz, der benutzerseitig durch die Eingabe der Zeitschrittweite stark beeinflussbar ist. Durch Minimierung der Zeitschrittweite nähern sich die Ergebnisse sehr stark an jene an, die bei dynamischer Betrachtung erhalten werden. Um dies zu verifizieren wird in dieser Arbeit als dynamisches Vergleichsmodell das Matlab Modell von Johannes Nagler [1] herangezogen. Durch Minimierung der Zeitschrittweite bei gleichbleibender Simulationsdauer nimmt die Zahl der Iterationen und somit die Rechendauer zu.

Daher ist ein ausreichend kleiner Wert für die Zeitschrittweite erstrebenswert, also ein guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und -genauigkeit.

3.3 Berechnung

Zunächst wird eine einheitliche Nummerierungsvorschrift eingeführt. Der Verbraucher 1 entspricht dem ersten Anschluss an einem Fernwärmestrang. Dem Verbraucher 1 folgt der Verbraucher 2 und so weiter. Im Falle einer Verzweigung wird entlang des rechten Stangs bis zu seinem Ende fortlaufend nummeriert. Am letzten Knoten angelangt wird ab dem letzten Verzweigungspunkt die Nummerierung fortgesetzt.

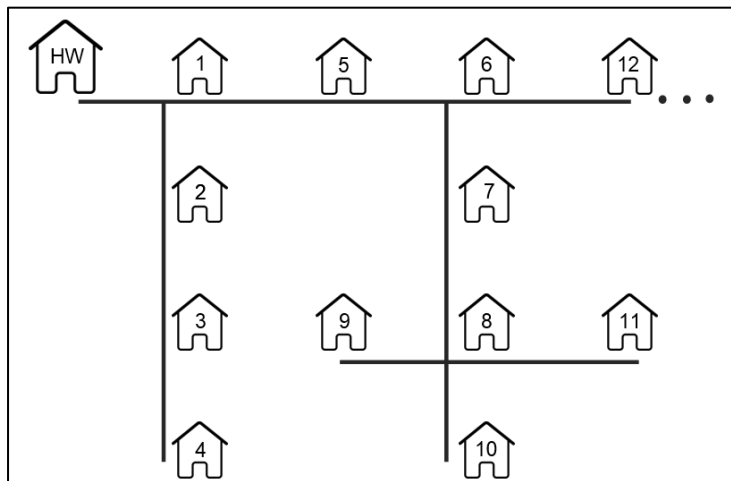


Abbildung 13 Erläuterung der Nummerierungsvorschrift für die Knoten in einem Fernwärmenetz anhand eines Schemas

Berechnet wird der Zustand des Netzes, also die Temperaturen in Vor- und Rücklauf, die in jedem Knoten übertragenen Leistungen, die Verluste und Massenströme aller Leitungssegmente. Die Ergebnisse werden in Form einer Tabelle wie *Tabelle 4* für jeden Zeitschritt und jeden Knoten ausgegeben.

| Knoten | 0 zu 1 | | | | | | | | | 1 zu 2 | | | | | | | | |
|--------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|
| Zeit in s | VL | | | | RL | | | | m_{01} in kg/s | VL | | | | RL | | | | m_{12} in kg/s |
| | T_{01} in °C | P_0 in J | P_V in J | P_1 in J | T_{01} in °C | P_0 in J | P_V in J | P_1 in J | | T_{12} in °C | P_1 in J | P_V in J | P_2 in J | T_{12} in °C | P_1 in J | P_V in J | P_2 in J | |
| 0 | 80,12 | 512 | 100 | 235 | 32,36 | 52 | 18 | 52 | 1,1 | 80,21 | 235 | 89 | 216 | 29,5 | 52 | -9 | 49 | 1,5 |
| 50 | 80,2 | 523 | 135 | 215 | 33,46 | 53 | 17 | 53 | 1,2 | 81,2 | 215 | 91 | 232 | 28,9 | 53 | -8 | 48 | 1,8 |
| 100 | 80,13 | 565 | 118 | 296 | 33,12 | 50 | 17 | 56 | 1 | 81,3 | 296 | 95 | 251 | 28,8 | 56 | 11 | 48 | 1,7 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Tabelle 4 Ausgabe eines Simulationslaufs

3.3.1 Massenbilanz

Die Massenströme in den Netzleitungen werden mittels Massenbilanz um den betreffenden Leitungsabschnitt ermittelt. Ein Leitungsabschnitt entspricht der Rohrleitung zwischen zwei Anschlüssen oder zwischen dem Heizwerk und dem ersten Anschluss. Die Länge der einzelnen Rohrabschnitte sowie deren Querschnitte können variieren. Diese sind vor Anwendung des Tools bekannt, d.h. sie werden Bestandsplänen entnommen.

Der Massenstrom in Vor- und Rücklauf des betrachteten Leitungsabschnitts ist stets gleich groß, da das vorhandene Volumen des Wärmeträgermediums im Fernwärmenetz konstant ist.

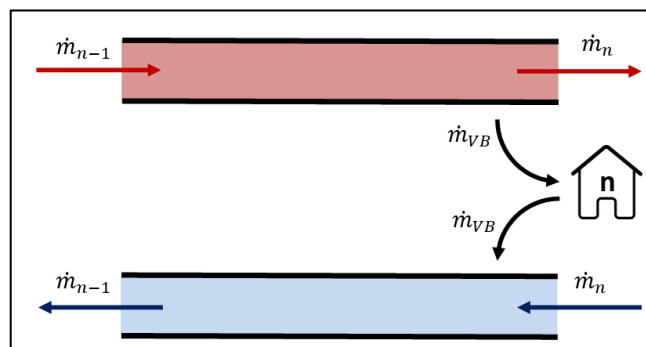


Abbildung 14 Massenbilanz bezüglich der Vor- (rot) und Rücklaufleistung (blau)

Die Bilanzierung der in *Abbildung 14* dargestellten Massenströme

$$\dot{m}_{n-1} = \dot{m}_n + \dot{m}_{VB} \quad (11)$$

ergibt um den Vor- und Rücklauf den gleichen Zusammenhang.

Aus der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf und der Verbraucherleistung $P_{Vb,n}$ lässt sich der Massenstrom des Verbrauchers

$$\dot{m}_{VB} = \frac{P_{Vb,n}}{c_{pW} \cdot (T_{VL,n} - T_{RL,n})} \quad (12)$$

ermitteln.

Beginnend bei den letzten Leitungsabschnitten, also jenen auf die keine weiteren folgen, können nun alle Massenströme entlang des Fernwärmenetzes berechnet werden.

Abbildung 14 zeigt den Abnahmefall, das heißt der Verbraucher entnimmt Leistung aus dem Fernwärmenetz. Die dargestellten Massenströme sind alle positiv. Sollte der Verbraucher dem Fernwärmenetz Leistung zuführen erhält der Massenstrom ein negatives Vorzeichen. Die *Gleichung 11* bleibt gültig und somit können auch die Massenströme in der Fernwärmeleitung ihr Vorzeichen ändern. Das heißt, die Strömung im Vorlauf kann Richtung Heizwerk erfolgen und gleichzeitig die Strömung im Rücklauf in die entgegengesetzte Richtung. Die *Gleichung 11* gilt also für den Verbrauchs- und Einspeisefall.

3.3.2 Leistungsbilanz

Die Bilanzierung der Leistungen erfolgt um die Vor- und Rücklaufleitung eines Rohrabschnitts.

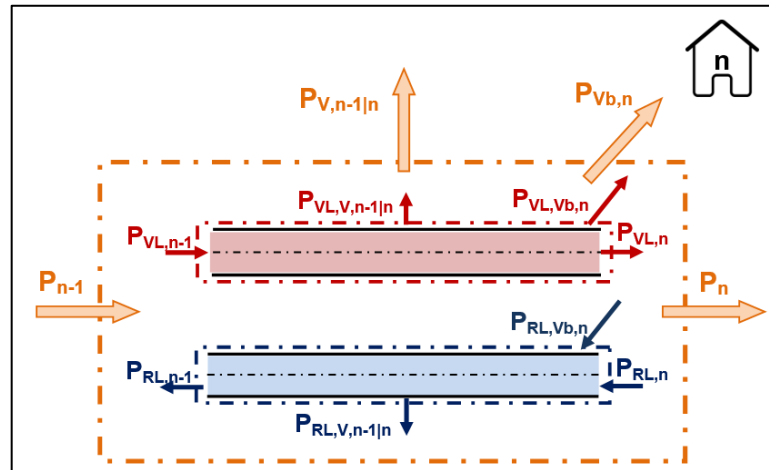


Abbildung 15 Energiebilanz bezüglich des Vor- (rot) und Rücklaufs (blau) für den Fall, dass der Verbraucher Leistungsabnehmer ist

In *Abbildung 15* ist die Bilanzierung der Leistungen für den Fall, dass der Verbraucher als Abnehmer fungiert, dargestellt.

Die Leistungsbilanz um den Vorlauf

$$P_{VL,n-1} = P_{VL,V,n-1|n} + P_{VL,Vb,n} + P_{VL,n} \quad (13)$$

und um den Rücklauf

$$P_{RL,n-1} = -P_{RL,V,n-1|n} + P_{RL,Vb,n} + P_{RL,n} \quad (14)$$

lassen sich zu einer Gesamtbilanz

$$P_{VL,n-1} - P_{RL,n-1} = P_{VL,V,n-1|n} + P_{RL,V,n-1|n} + P_{VL,Vb,n} - P_{RL,Vb,n} + P_{VL,n} - P_{RL,n} \quad (15)$$

$$\underbrace{P_{VL,n-1} - P_{RL,n-1}}_{P_{n-1}} = \underbrace{P_{VL,V,n-1|n} + P_{RL,V,n-1|n}}_{P_{V,n-1|n}} + \underbrace{P_{VL,Vb,n} - P_{RL,Vb,n}}_{P_{Vb,n}} + \underbrace{P_{VL,n} - P_{RL,n}}_{P_n} \quad (16)$$

zusammenfassen.

Speist der Verbraucher Energie ins Fernwärmenetz ein, so bleibt die Gleichung 15 gültig. Die Leistung $P_{Vb,n}$, wie bereits in *Abschnitt 3.1* erwähnt, ist negativ. Die anderen Leistungen aus Gleichung 15 können dann ihre Vorzeichen ändern.

Die vom Verbraucher zu- oder abgeführte Leistung $P_{Vb,n}$ ist in bestimmten Zeitabständen Δt_{VB} gegeben.

Die Verlustleistung, die an das umliegende Erdreich abgegeben wird, errechnet sich unabhängig davon, ob der Verbraucher ins Netz einspeist oder Leistung aus dem Netz entnimmt mit

$$P_{V,n-1|n} = k \cdot (T_{VL,n-1|n} + T_{RL,n-1|n} - 2 \cdot T_E) \cdot l \quad (17)$$

Die Leistung P_n des letzten Rohrabschnitts eines Strangs ist 0, da keine weiteren Verbraucher folgen und somit keine Leistung weitergeleitet wird. Die Leistung des Verbrauchers $P_{VB,n}$ ist bekannt. Die Leistung P_{n-1} lässt sich mit Gleichung (16) berechnen. Somit ist der letzte Rohrabschnitt leistungstechnisch vollständig berechnet. Der vorletzte Leitungsabschnitt lässt sich nun bestimmen und so weiter. Die Bilanzierung der Leistungen erfolgt also vom Netze zur Richtung Heizwerk.

Die Berechnung der übrigen Leitungsabschnitte erfolgt nach demselben Schema. Ist das gesamte thermische Netz berechnet, wird der nächste Zeitschritt Δt_S betrachtet usw.

Die dem Rohrabschnitt vom Verbraucher ab- bzw. zugeführten Leistungen sind oder können in einem anderen Zeitintervall Δt_{VB} als die vorgegebene Zeitschrittweite Δt_S gegeben sein. Beispielsweise kann ein Leistungswert für jede volle Stunde gegeben sein. Beträgt die Zeitschrittweite Δt_S beispielsweise eine Minute, so wird derselbe Wert der zu- oder abgeführten Leistung für mehrere Zeitschritte ($\Delta t_S + \Delta t_S + \dots + \Delta t_S = \Delta t_{VB}$) verwendet. Anschließend wird der nächste gegebene Wert für die Leistung des Verbrauchers herangezogen. Dies erfolgt so lange, bis die vorgegebene Simulationsdauer t_{SD} erreicht ist oder für den betrachteten Zeitschritt keine weiteren Verbraucherdaten gegeben sind.

3.3.3 *Temperaturen in Vor- und Rücklauf*

Zu Beginn der Simulation herrschen in den Vor- und Rücklaufleitungen konstante Anfangstemperaturen, die vorgegeben werden. In Abbildung 16 ist beispielhaft ein Fernwärmestrang mit den Knoten n , $n-1$ und $n-2$ bestehend aus zwei Leitungsabschnitten dargestellt. Die Anfangstemperatur des Vorlaufs entspricht 90°C und des Rücklaufs 30°C . Die zwei Anschlüsse fungieren als Verbraucher. Im Falle, dass die Anschlüsse Produzenten sind, werden die Prozeduren des Vor- und Rücklaufs vertauscht.

Das heißt, es wird dem Rücklauf das Wärmeträgermedium entnommen und dem Vorlauf zugeführt. Betrachtet man *Abbildung 16* würde das bedeuten, dass die obere Leitung dem Rücklauf und die untere Leitung dem Vorlauf entspricht. Selbstverständlich wären die Temperaturen entsprechend zu adaptieren.

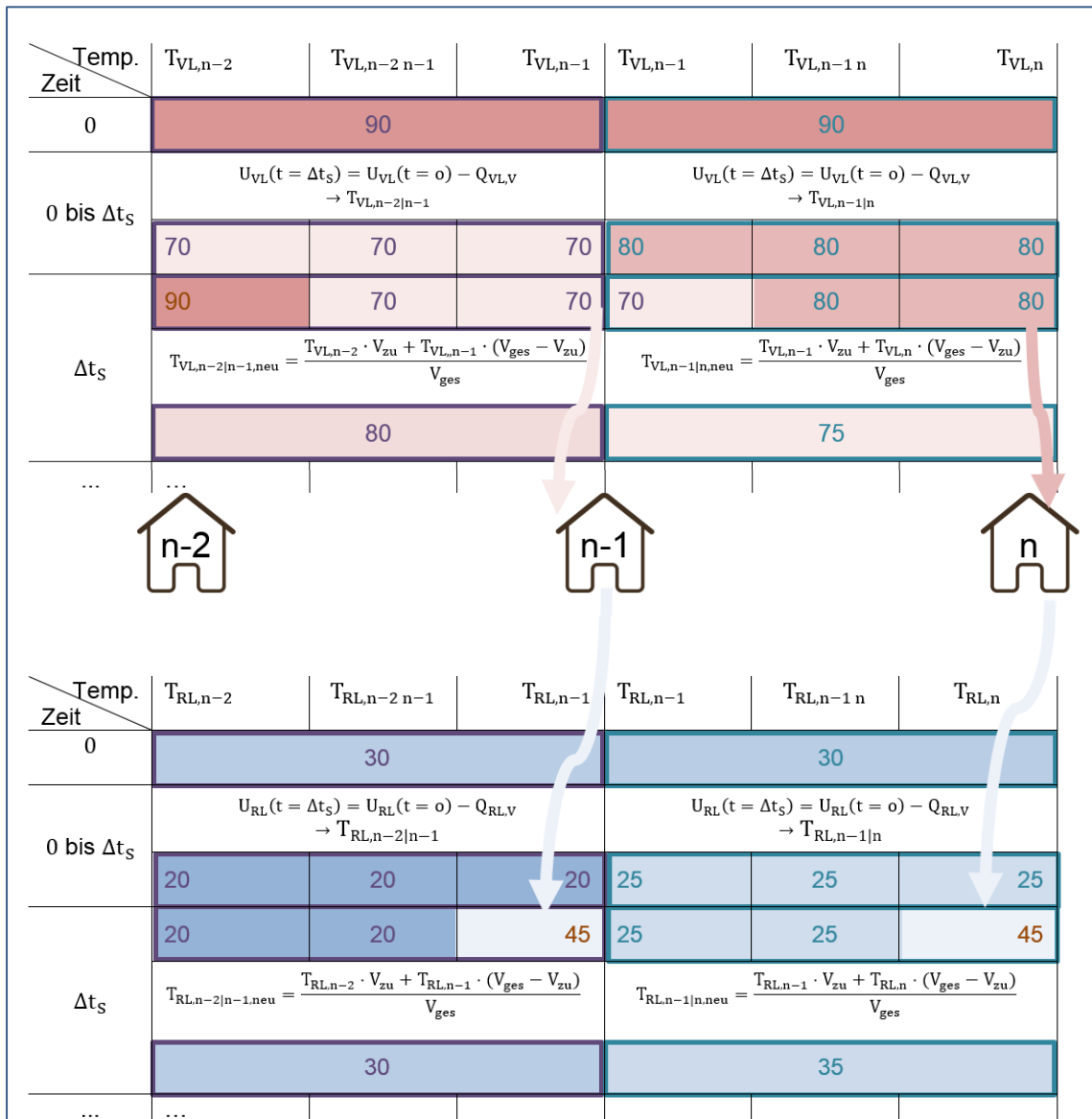


Abbildung 16 Schematische Darstellung der Temperaturberechnung entlang eines Fernwärmestrangs

3.3.3.1 Vorlauf

Betrachtet man die Temperaturen des Rohrabschnitts zwischen den Knoten $n-1$ und n für den Zeitraum 0 bis Δt_S in *Abbildung 16*, so lässt sich besser nachvollziehen, wie die Temperaturverteilung generiert wird.

Zum Zeitpunkt 0 ist die gespeicherte Energie im Vorlauf

$$U_{VL,n-1|n}(t = 0) = (C_{pW} \cdot \rho_W \cdot V_W + C_{pSt} \cdot \rho_{St} \cdot V_{St}) \cdot T_{VL,n-1|n} \quad (18)$$

bekannt.

Während des vorgegebenen Simulationszeitschritts Δt_S wird die Verlustleistung

$$P_{VL,V,n-1|n} = k \cdot (T_{VL,n-1|n} - T_E) \cdot l \quad (19)$$

an die Umgebung abgegeben. Dadurch ändert sich die innere Energie des Rohrabschnitts

$$U_{VL,n-1|n}(t = \Delta t_S) = U_{VL,n-1|n}(t = 0) - P_{VL,V,n-1|n} \cdot \Delta t_S \quad (20)$$

und somit auch die Innentemperatur

$$T'_{VL,n-1|n}(t = \Delta t_S) = \frac{U_{VL,n-1|n}(t = \Delta t_S)}{C_{pW} \cdot \rho_W \cdot V_W + C_{pSt} \cdot \rho_{St} \cdot V_{St}} \quad (21)$$

Die mit Hilfe der inneren Energie errechnete Innentemperatur $T'_{VL,n-1|n}$ vermischt sich nun mit den Temperaturen $T'_{VL,i}$ der zuströmenden Volumina V_i :

$$T_{VL,n-1|n} = \frac{\sum T'_{VL,i} \cdot V_i + T'_{VL,n-1|n} \cdot (V_{ges} - \sum V_i)}{V_{ges}} \quad (22)$$

Die zuströmenden Volumina sind Volumen von benachbarten Leitungsabschnitten, sowie Volumen, die der Verbraucher oder Produzent den Leitungsabschnitt zu- oder abführt.

Abbildung 17 zeigt schematisch eine Möglichkeit wie diese zuströmenden Volumina zu verstehen sind. Sie werden mit

$$V_i = \frac{|\dot{m}_i|}{\rho_i} \cdot \Delta t_S \quad (23)$$

berechnet. Zu beachten ist, dass der Massenstrom betragsmäßig in die Formel eingeht. Sein Vorzeichen ist nur für die Flussrichtung relevant und wird einem Leitungsabschnitt entsprechend zu- oder abgeführt.

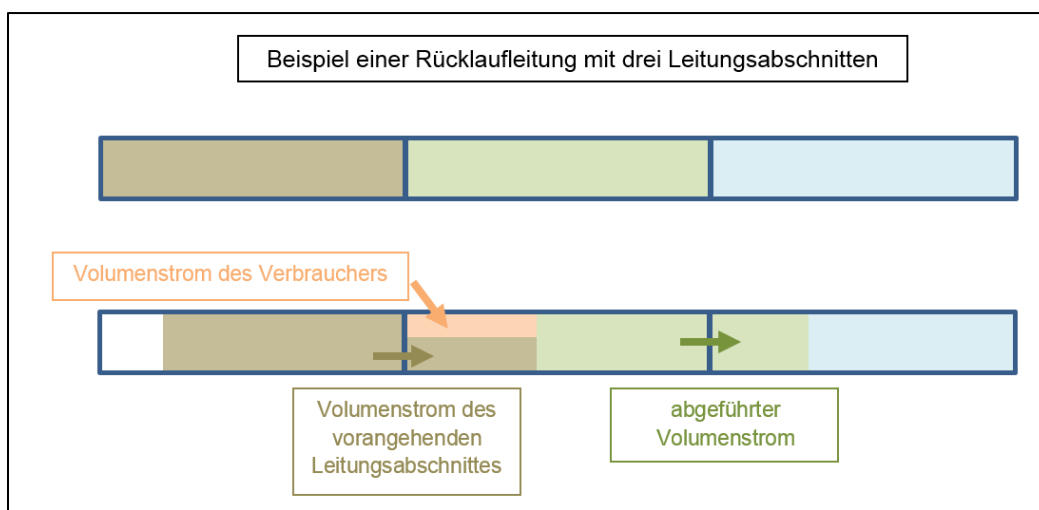


Abbildung 17 Schematische Darstellung der in ein Leitungselement strömenden Volumina

Das zugeführte Volumen V_i muss zu jedem Zeitpunkt in jedem Leitungsabschnitt kleiner als das im Leitungsabschnitt vorhandene Volumen

$$V_{ges} = A_W \cdot l \quad (24)$$

sein. Sollte dies nicht der Fall sein wird die Berechnung unterbrochen, da ein Leitungsabschnitt vollständig durchströmt wird und somit keine Mischung stattfinden kann.

3.3.3.2 Rücklauf

Auch für die Berechnung der Temperaturverteilung des Rücklaufs empfiehlt es sich, *Abbildung 16* zu betrachten. Wie zuvor für den Vorlauf wird hier ebenfalls der Rohrabschnitt zwischen den Knoten $n-1$ und n für den Zeitraum 0 bis Δt_S betrachtet.

Zum Zeitpunkt 0 ist die gespeicherte Energie im Rücklauf

$$U_{RL,n-1|n}(t = 0) = (C_{pW} \cdot \rho_W \cdot V_W + C_{pSt} \cdot \rho_{St} \cdot V_{St}) \cdot T_{RL,n-1|n} \quad (25)$$

bekannt.

Während des vorgegebenen Simulationszeitschritts Δt_S wird die Verlustleistung

$$P_{RL,V,n-1|n} = k \cdot (T_{RL,n-1|n} - T_E) \cdot l \quad (26)$$

an die Umgebung abgegeben. Dadurch ändert sich die innere Energie des Rohrabschnitts

$$U_{RL,n-1|n}(t = \Delta t_S) = U_{RL,n-1|n}(t = 0) - P_{RL,V,n-1|n} \cdot \Delta t_S \quad (27)$$

und somit auch die Innentemperatur

$$T'_{RL,n-1|n}(t = \Delta t_S) = \frac{U_{RL,n-1|n}(t = \Delta t_S)}{C_{pW} \cdot \rho_W \cdot V_W + C_{pSt} \cdot \rho_{St} \cdot V_{St}} \quad (28)$$

Die Innentemperatur $T'_{RL,n-1|n}$ vermischt sich nun mit den Temperaturen $T'_{RL,i}$ der in den Rücklauf zuströmenden Volumen V_i :

$$T_{RL,n-1|n} = \frac{\sum T'_{RL,i} \cdot V_i + T'_{RL,n-1|n} \cdot (V_{ges} - \sum V_i)}{V_{ges}} \quad (29)$$

Analog zum Vorlauf handelt es sich auch hier bei den zuströmenden Volumina um Volumina der benachbarten Leitungsabschnitte und des Verbrauchers.

4 Aufbau der Bedienungsumgebung

Im Folgenden wird die Bedienungsumgebung, also das Excel-File, besprochen, um eine möglichst fehlerfreie Handhabung zu gewährleisten.

4.1 Tabellenblätter

Das VBA-Tool benötigt zur Bedienung und Auswertung sieben Tabellenblätter, deren Benennung und weitere Eckparameter in einem achten Tabellenblatt (=„Fixe Werte“) gesteuert werden.

4.1.1 „Fixe Werte“

Abbildung 18 zeigt den Aufbau des Tabellenblattes „Fixe Werte“. Werden Änderungen in den anderen Tabellenblättern vorgenommen so sind diese auch hier vorzunehmen, da das VBA-Tool hier alle Konstanten herausliest. Ändert man beispielsweise den Namen eines Tabellenblattes, so ist dieser auch in „Fixe Werte“ zu ändern. Das Tabellenblatt selbst darf nicht geändert werden ohne diese Änderung im Code anzupassen.

Die farblich markierten Zellen liest das Makro ein. Sollte in den Tabellenblättern etwas geändert werden, so muss dies auch hier geändert werden!

| Tabellenblätter | erste beschriebene Zeile | erste beschriebene Spalte |
|-----------------|--------------------------|---------------------------|
| Eingabe | 6 | 3 |
| Verbindungen | 4 | 2 |
| Daten | 6 | 3 |
| Auswertung | 3 | 2 |
| Simulation | 3 | 2 |
| Plot | | |
| Stoffwerte | 4 | 3 |

| | |
|---|------|
| Anzahl der Wert, die in Simulation geschrieben werden | 5000 |
|---|------|

Abbildung 18 Aufbau des Tabellenblatts Fixe Werte

Die rot markierten Zellen in *Abbildung 18* sind besonders wichtig, da hier die Anzahl der Werte, die ins Tabellenblatt „Simulation“ geschrieben werden, variiert werden kann.

Das heißt bei einem Wert von z.B. 100 werden 100 Zeilen in „Simulation“ beschrieben. Werden also 24 Stunden mit einer Zeitschrittweite von 1 Sekunde simuliert¹ so wird in diesem Beispiel die 1., 865., 1729. Sekunde usw. in „Simulation“ eingetragen. Dies hat den Vorteil, dass das Programm erheblich schneller rechnet, da das Beschreiben von Tabellenblättern sehr zeitaufwendig ist. Außerdem benötigt das Excel-File weniger Speicherplatz, da die Datenmenge stark reduziert wird. Zu beachten ist, dass tatsächlich jede Sekunde simuliert wird, es wird lediglich jede 864. in „Simulation“ geschrieben. Somit wird die Rechengenauigkeit nicht beeinflusst, sondern nur die Ausgabe der Datenmenge.

4.1.2 Eingabe

Über das Tabellenblatt „Eingabe“ steuert der Benutzer die wesentlichen Berechnungseinstellungen. In *Abbildung 19* sind die einstellbaren Werte aufgezeigt und können hier beliebig gewählt werden.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|---|--------------------------|-------|---------|---|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | Wert | Einheit | | |
| 6 | | Zeitschrittweite | 10 | s | | |
| 7 | | Dauer | 61200 | s | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | Starttemperatur des VL | 96,85 | °C | | |
| 10 | | Starttemperatur des RL | 46,85 | °C | | |
| 11 | | Temperatur des Erdreichs | 10 | °C | | |
| 12 | | | | | | |
| 13 | | Abstand zw VL-RL Leitung | 1 | m | | |
| 14 | | Einbautiefe der Leitung | 1 | m | | |
| 15 | | | | | | |

Calculate

Abbildung 19 Aufbau des Tabellenblatts Eingabe

- Die Zeitschrittweite entspricht jener Dauer, während der die Leitungen Wärme abstrahlen. Hier ist jede erdenkliche Eingabe möglich, auch nicht ganzzahlige Werte.

¹ $24 \cdot 60 \cdot 60 : 100 = 864$

- Für die Dauer kann jeder beliebige Wert, der größer als die Zeitschrittweite ist, eingegeben werden. Wird hier beispielsweise fünf Jahre gewählt und die Anschlussdaten sind nur für ein Jahr vorhanden, so bricht das VBA-Tool die Berechnung nach der Simulation eines Jahres ab.
- Die Starttemperaturen für Vor- und Rücklauf gelten für das gesamte Netz.
- Das Erdreich wird mit einer immer gleichbleibenden, homogen verteilten Temperatur berücksichtigt.
- Der Abstand zwischen Vor- und Rücklaufleitung und die Einbautiefe dürfen jeden Wert annehmen. So kann beispielsweise der Einfluss zwischen Vor- und Rücklaufleitung aus der Verlustformel „entfernt“ werden, indem der Abstand sehr groß gewählt wird.

Durch Klick auf den Button „Calculate“ öffnet sich das in *Abbildung 20* dargestellte Fenster. Das VBA-Tool schätzt aufgrund der Anzahl der Knoten, der Simulationsdauer und der Zeitschrittweite die notwendige Rechenzeit ab. Hier kann nun fortgefahren werden oder das „Eingabe“ Tabellenblatt noch einmal bearbeitet und die Zeitschrittweite vergrößert werden, um die Rechenzeit zu reduzieren.

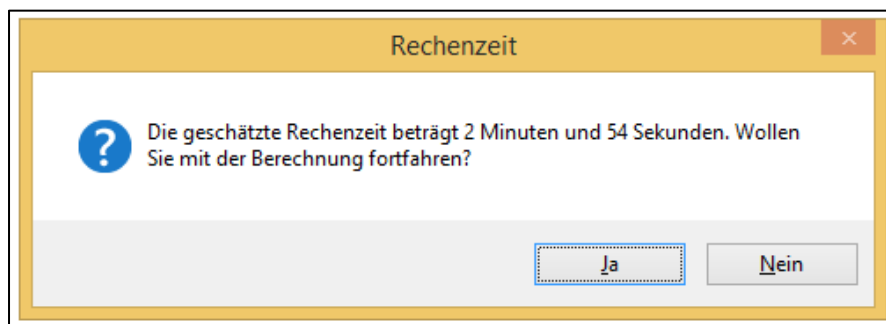


Abbildung 20 Fenster mit Abschätzung der Rechendauer, wird nach Betätigung der „Calculate“-Schaltfläche geöffnet

4.1.3 Verbindungen

In diesem Tabellenblatt wird die Netzstruktur nach dem Schema aus *Abbildung 21* angegeben.

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|---|--------------|----|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | Verbindungen | | |
| 3 | | von | zu | |
| 4 | | 0 | 1 | |
| 5 | | 1 | 2 | |
| 6 | | 1 | 3 | |
| 7 | | 3 | 4 | |
| 8 | | 4 | 5 | |
| 9 | | 3 | 6 | |
| 10 | | 6 | 7 | |
| 11 | | 7 | 8 | |
| 12 | | 7 | 9 | |
| 13 | | 6 | 10 | |
| 14 | | 10 | 11 | |
| 15 | | | | |

Abbildung 21 Aufbau des Tabellenblatts Verbindungen

Begonnen wird mit dem Heizwerk (= Knoten 0), der wird als von-Knoten eingetragen und verläuft zum Knoten 1, der Knoten 1 wiederum ist mit den beiden Knoten 2 und 3 verbunden, also handelt es sich beim Knoten 1 um eine Verzweigung. Nach diesem Schema ist das Netz zu lesen bzw. einzugeben. Wird dies eingehalten, enthält die „zu“-Spalte alle Knoten in aufsteigender Reihenfolge. In der „von“-Spalte lassen sich Verzweigungen daran erkennen, dass die Knotennummer mehrfach vorkommt und alle letzten Knoten (also Knoten, auf die kein weiterer mehr folgt) nicht in der Liste vorkommen. Sind all diese Kriterien erfüllt, ist sicher, dass die Geometrie ordnungsgemäß eingetragen wurde. Es wurde bereits in *Abschnitt 3.3* die Nummerierungsvorschrift eines Fernwärmenetzes beschrieben. Diese muss unbedingt eingehalten werden, damit das VBA-Tool die Netzstruktur ordnungsgemäß aufnimmt. Fehlerhafte Eingaben im Tabellenblatt „Verbindungen“ führen zum Abbruch der Berechnung.

4.1.4 Daten

Abbildung 22 zeigt den Aufbau des „Daten“-Tabellenblatts. Es enthält die Leitungsabmessungen und die energetischen- bzw. thermischen Werte aller Anschlüsse. Alle Knoten bzw. Anschlüsse sind in aufsteigender Reihenfolge untereinander gelistet. Dazwischen darf keine leere Zeile sein.

| 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|--------|-----------|-------------|------------|------------------|------------------|---------------|---------------|------|---------------|----------------|----------------|
| Knoten | Datum | Zeit in sek | Länge in m | Durchmesser in m | Dicke Stahl in m | Dicke PU in m | Dicke PE in m | Zeta | Leistung in W | Temp. VL in °C | Temp. RL in °C |
| K | D | t | l | d | s_St | s_PU | s_PE | z | P | T_VL | T_RL |
| 0 | 01.1.2014 | 0 | 20 | 0,2 | 0,0045 | 0,000001 | 0,0001 | 10 | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 36000 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 36100 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 36200 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 36300 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 36400 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 36500 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 36600 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 36700 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 36800 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 36900 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 37000 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 37100 | | | | | | | 0 | | 46,85 |
| | 01.1.2014 | 37200 | | | | | | | 0 | | 46,85 |


Abbildung 22 Aufbau des Tabellenblatts Daten

Die Knotennummer ist nur einmal und in einer Zeile mit den Leitungsabmessungen einzutragen. Die Zeitwerte müssen keine konstante Differenz aufweisen. Das heißt, wie in *Abbildung 22*, können die Zeitwerte von 0 auf 36.000 und von 36.000 auf 36.100 springen. Diese Eingabe bedeutet, dass die Leistung, die dem Zeitpunkt null zugeordnet ist zur Berechnung der ersten zehn Stunden (=36.000 Sekunden) herangezogen wird. Erst ab Sekunde 36.001 wird der Leistungswert des Zeitpunktes 36.000 herangezogen.

Jeder Datensatz eines Knotens hat mindestens aus 2 Zeilen zu bestehen. Dies liegt an der Art der im Code verwendeten Leseroutine. Will man also einen Tag lang jeden Knoten 1000 W entnehmen lassen, so hat dies in der Form wie in *Abbildung 23* unten dargestellt zu erfolgen. Obwohl es bei diesem Beispiel keine Rolle spielt, welchen Wert der zweite Zeitpunkt hat, muss er dennoch vorhanden sein.

Zu beachten ist, dass die Zeilen zwischen den Knoten nicht variieren dürfen. Hat beispielsweise der Knoten 0 Werte für drei Zeitpunkte, also sind drei Zeilen in Daten beschrieben, so müssen alle Knoten über drei Zeilen gehen, also Werte für drei Zeitpunkte aufweisen.

| Knoten | Datum | Zeit in sek | Länge in m | Durchmesser in m | Dicke Stahl in m | Dicke PU in m | Dicke PE in m | Zeta | Leistung in W | Temp. VL in °C | Temp. RL in °C |
|--------|------------|-------------|------------|------------------|------------------|---------------|---------------|------|---------------|----------------|----------------|
| K | D | t | l | d | s_St | s_PU | s_PE | z | P | T_VL | T_RL |
| 0 | 03.02.2015 | 0 | 20 | 0,2 | 0,0045 | 0,000001 | 0,0001 | 10 | 1000 | | 46,85 |
| 1 | 03.02.2015 | 0 | 30 | 0,15 | 0,005 | 0,000001 | 0,002 | 7 | 1000 | | 46,85 |
| 2 | 03.02.2015 | 0 | 15 | 0,25 | 0,004 | 0,0001 | 0,0001 | 4,5 | 1000 | | 46,85 |



| Knoten | Datum | Zeit in sek | Länge in m | Durchmesser in m | Dicke Stahl in m | Dicke PU in m | Dicke PE in m | Zeta | Leistung in W | Temp. VL in °C | Temp. RL in °C |
|--------|------------|-------------|------------|------------------|------------------|---------------|---------------|------|---------------|----------------|----------------|
| K | D | t | l | d | s_St | s_PU | s_PE | z | P | T_VL | T_RL |
| 0 | 03.02.2015 | 0 | 20 | 0,2 | 0,0045 | 0,000001 | 0,0001 | 10 | 1000 | | 46,85 |
| | 03.02.2015 | 100 | | | | | | | 1000 | | 46,85 |
| 1 | 03.02.2015 | 0 | 30 | 0,15 | 0,005 | 0,000001 | 0,002 | 7 | 1000 | | 46,85 |
| | 03.02.2015 | 36000 | | | | | | | 1000 | | 46,85 |
| 2 | 03.02.2015 | 0 | 15 | 0,25 | 0,004 | 0,0001 | 0,0001 | 4,5 | 1000 | | 46,85 |
| | 03.02.2015 | 12345 | | | | | | | 1000 | | 46,85 |




Abbildung 23 Schema für die Eintragung von Verbraucherdaten, oben (falsch) und unten (richtig)

4.1.5 Simulation

In das Tabellenblatt Simulation werden die errechneten Werte für jeden Zeitschritt und alle Anschlüsse bzw. Knoten vom Makro eingetragen. Die grafische Veranschaulichung dieser Werte kann über das Tabellenblatt „Auswertung“ erfolgen.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|------------|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|
| 1 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | 0 zu 1 | | | | | | | | | 1 zu 2 |
| | | | Vorlauf | | | | Rücklauf | | | | | Vorlauf |
| 5 | Datum | Zeit | T_VL_innen | P_VL_0 | P_VL_V_0 1 | P_VL_1 | T_RL_innen | P_RL_0 | P_RL_V_0 1 | P_RL_1 | mDot_0 1 | T_VL_innen_P_VL |
| 6 | 01.01.2014 | 10,00 | 96,8472952 | 1739749,66 | 751,918459 | 1738997,74 | 46,8488471 | 1490809,04 | 319,035063 | 1491128,08 | 1,11608328 | 96,8432055 1738 |
| 7 | 01.01.2014 | 20,00 | 96,8445954 | 1739952,56 | 751,895042 | 1739200,66 | 46,8476912 | 1491012,44 | 319,025082 | 1491331,46 | 1,11623498 | 96,8364714 1739 |
| 8 | 01.01.2014 | 30,00 | 96,8419006 | 1740153,7 | 751,871668 | 1739401,83 | 46,8465323 | 1491214,08 | 319,015074 | 1491533,09 | 1,11638536 | 96,8297969 1739 |
| 9 | 01.01.2014 | 40,00 | 96,8392109 | 1740353,12 | 751,848338 | 1739601,27 | 46,8453706 | 1491413,98 | 319,005041 | 1491732,99 | 1,11653446 | 96,8231814 1739 |
| 10 | 01.01.2014 | 50,00 | 96,8365262 | 1740550,82 | 751,825051 | 1739799 | 46,8442061 | 1491612,18 | 318,994983 | 1491931,18 | 1,11668227 | 96,8166239 1 |
| 11 | 01.01.2014 | 60,00 | 96,8338465 | 1740746,84 | 751,801808 | 1739995,04 | 46,8430389 | 1491808,7 | 318,984901 | 1492127,68 | 1,11682883 | 96,8101238 1739 |
| 12 | 01.01.2014 | 70,00 | 96,8311717 | 1740941,19 | 751,778607 | 1740189,42 | 46,841869 | 1492003,54 | 318,974796 | 1492322,52 | 1,11697415 | 96,8036802 1740 |
| 13 | 01.01.2014 | 80,00 | 96,828502 | 1741133,9 | 751,755451 | 1740382,15 | 46,8406966 | 1492196,74 | 318,964668 | 1492515,71 | 1,11711824 | 96,7972924 1740 |
| 14 | 01.01.2014 | 90,00 | 96,8258373 | 1741324,99 | 751,732337 | 1740573,26 | 46,8395217 | 1492388,32 | 318,954518 | 1492707,28 | 1,11726111 | 96,7909598 1740 |
| 15 | 01.01.2014 | 100,00 | 96,8231775 | 1741514,47 | 751,709267 | 1740762,76 | 46,8383444 | 1492578,3 | 318,944346 | 1492897,24 | 1,11740279 | 96,7846815 1740 |
| 16 | 01.01.2014 | 110,00 | 96,8205227 | 1741702,38 | 751,686239 | 1740950,69 | 46,8371648 | 1492766,69 | 318,934153 | 1493085,63 | 1,11754329 | 96,7784568 1740 |

Abbildung 24 Aufbau des Tabellenblatts Simulation

Die Auflistung erfolgt in der Reihenfolge vom ersten bis zum letzten Leitungselement.

- Zeilen
 - Die dritte Zeile enthält die Nummer der Knotenverbindungen des Leitungsabschnitts
 - Die vierte Zeile unterscheidet zwischen Vor- und Rücklauf innerhalb des jeweiligen Leitungsabschnitts.

- Spalten
 - In der ersten Spalte wird das Datum eingetragen und daneben die Zeit, für die die Angaben der entsprechenden Zeile gelten.
 - Für den Leitungsabschnitt xy wird ausgegeben:

| | |
|----------------------|---|
| $T_{VL_innen_x/y}$ | Innentemperatur der Vorlaufleitung des betrachteten Leitungsabschnitts |
| P_{VL_x} | Leistung des Knotens x |
| $P_{VL_V_x/y}$ | Verlustleistung des Vorlaufs |
| P_{VL_y} | Leistung des Knotens y |
| $T_{RL_innen_x/y}$ | Innentemperatur der Rücklaufleitung des betrachteten Leitungsabschnitts |
| P_{VL_x} | Leistung des Knotens x |
| $P_{VL_V_x/y}$ | Verlustleistung des Rücklaufs |
| P_{VL_y} | Leistung des Knotens y |
| $mDot_x/y$ | Massenstrom des betrachteten Leitungsabschnitts |

Zu beachten ist, dass die Leistungen der Knoten nicht mit den Leistungen der Verbraucher zu verwechseln sind. Die Leistung des Knotens 0 (Heizwerk) beispielsweise enthält alle zu- und abgeführten Leistungen aller angeschlossenen Verbraucher sowie alle Leitungsverluste.

4.1.6 Auswertung

Nach Abschluss der Simulation lassen sich über dieses Tabellenblatt die Ergebnisse grafisch auswerten. Hierzu werden die auszuwertenden Knotennummern wie in *Abbildung 25* gezeigt untereinander eingetragen.

| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|--------|-------------|---------|---------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|-------------|----|-----------------------------|----|----|---------------------|----|----|
| Knoten | Massenstrom | Temp VL | Temp RL | Leistung VL | Leistung RL | Leistung ges | Verlust VL | Verlust RL | Verlust ges | | | | | | | |
| 0 | | | | | | | | | | | Kontrollkästchen löschen | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | Diagramme erstellen | | |
| 3 | | | | | | | | | | | Kontrollkästchen hinzufügen | | | | | |

Abbildung 25 Aufbau des Tabellenblatts Auswertung; ohne Kontrollkästchen

Anschließend werden nach Anklicken der „Kontrollkästchen erstellen“-Schaltfläche eben diese hinzugefügt. Nun wird nur noch abgehakt welche Daten von welchem Knoten dargestellt werden sollen (siehe *Abbildung 26*). Ein Klick auf „Diagramme erstellen“ löst den Algorithmus aus, der die ausgewählten Datensätze ins Tabellenblatt „Plot“ zeichnet.

| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----|-----------------------------|----|----|---------------------|----|----|
| Knoten | Massenstrom | Temp VL | Temp RL | Leistung VL | Leistung RL | Leistung ges | Verlust VL | Verlust RL | Verlust ges | | | | | | | |
| 0 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | Kontrollkästchen löschen | | | | | |
| 1 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | | | | | Diagramme erstellen | | |
| 3 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | Kontrollkästchen hinzufügen | | | | | |

Abbildung 26 Aufbau des Tabellenblatts Auswertung; mit Kontrollkästchen

Um eine neue Auswahl an Knoten darzustellen, wird auf „Kontrollkästchen löschen“ geklickt. Die neuen Knoten müssen, wie zuvor, untereinander geschrieben und die Erstellung der Kontrollkästchen wieder angefordert werden.

4.1.7 Plot

Dieses Tabellenblatt enthält die Diagramme, die über das Tabellenblatt „Auswertung“ angefordert wurden. Die Plots werden untereinander gereiht und bleiben so lange erhalten, bis erneut auf „Diagramme erstellen“ geklickt wird. Durch Umbenennen des Tabellenblatts lässt sich die Löschung/Überschreibung der Plots verhindern. Grundsätzlich ist das „Plot“-Tabellenblatt mit keinem anderen verknüpft, das heißt, es ist nicht mit dem Tabellenblatt „Simulation“ verbunden. Alle Werte die in Plot dargestellt sind, werden als Zahlenliste direkt ins Diagramm geschrieben.

Jedes „Plot“ Tabellenblatt kann problemlos gesichert bzw. kopiert werden, ohne ein anderes Tabellenblatt auch sichern zu müssen.

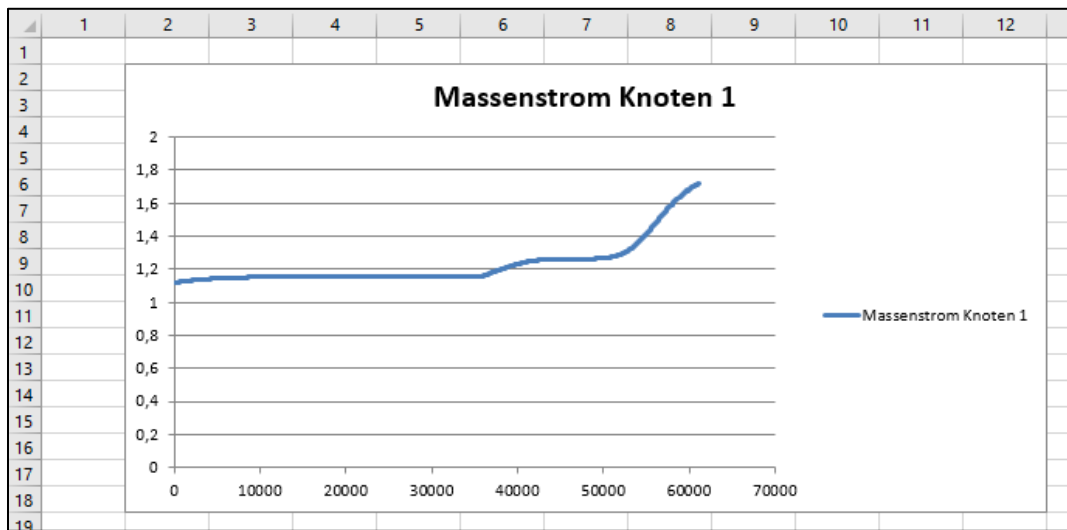


Abbildung 27 Aufbau des Tabellenblatts Plot

4.1.8 Stoffwerte

Hier können die Stoffwerte gegebenenfalls geändert werden, da diese ja temperaturabhängig marginal variieren. Das VBA-Tool liest diese hier aus um deren Anpassung zu ermöglichen (beispielsweise, wenn sich das Wärmeträgermedium ändert). Die Einführung zusätzlicher Werkstoffschichten ist nicht möglich, ohne dies im Code zu ändern. Es müsste beispielsweise die *Formel 9* für die k-Wert Ermittlung im Code abgewandelt werden.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|----------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K) | Wärmekapazität in J/(kg*K) | Dichte in kg/m ³ | |
| 4 | | Wasser | 0,03 | 4187 | 970 | |
| 5 | | Stahl | 54,5 | 490 | 7870 | |
| 6 | | PU | 0,029 | 1400 | 35 | |
| 7 | | Erdreich | 1,4 | | | |
| 8 | | | | | | |

Abbildung 28 Aufbau des Tabellenblatts Stoffwerte

Es lassen sich jedoch Werkstoffschichten entfernen, indem für die Wärmeleitfähigkeit sehr kleine Werte gewählt werden und die Wärmekapazität null gesetzt wird. Die Wärmeleitfähigkeit darf nicht null gesetzt werden, da diese in der *Formel 17* für die Verlustleistung im Nenner vorkommt. Die Verlustformel würde somit kein Ergebnis liefern.

5 Das Makro

An dieser Stelle soll das Makro vorgestellt und erläutert werden. Der Aufbau und die Systematik dahinter, sowie die Validierung des Makros werden behandelt.

5.1 Struktur des Makros

Der grobe Aufbau des Makros ist in *Abbildung 29* dargestellt.

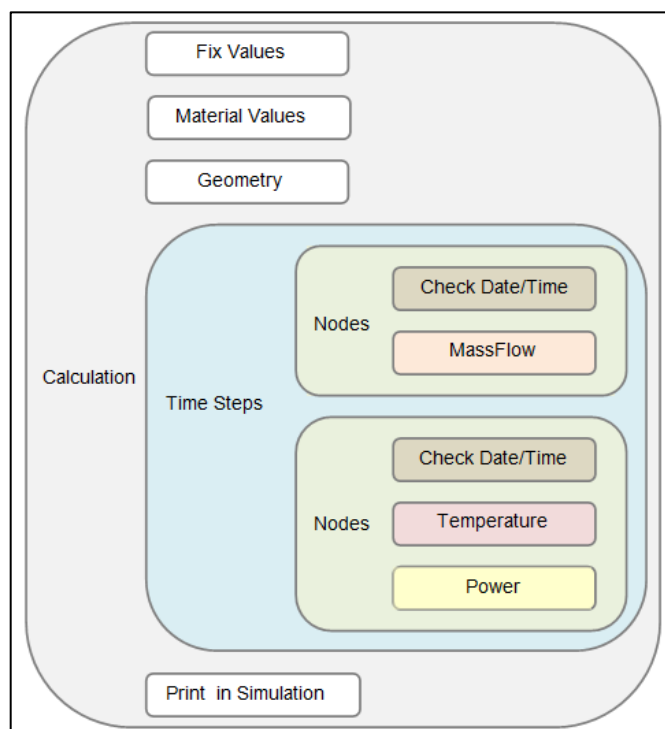


Abbildung 29 Schematische Darstellung des Makro-Aufbaus

Zunächst werden fixe Werte wie Tabellennamen und Zeilen- sowie Spaltennummern usw. eingelesen. Diese Werte sind im Tabellenblatt „Fixe Werte“ eingetragen und können dort bei Bedarf geändert werden. Anschließend werden die Stoffwerte aus dem Tabellenblatt „Stoffwerte“ eingelesen. Aus dem Tabellenblatt „Daten“ werden die benötigten Geometrien (z.B. Querschnittsflächen, Rohrvolumen, usw.) errechnet. Anschließend erfolgt die eigentliche Berechnung, die im Abschnitt 3.3 ausführlich erläutert wurde. Hierbei werden zunächst alle Massenströme für alle Leitungselemente und einen

Zeitschritt berechnet. Erst dann erfolgt die Berechnung der Temperaturen sowie der Leistungen für den selben Zeitschritt und alle Leitungselemente. Anschließend wird der nächste Zeitschritt betrachtet und so weiter, bis die Simulationsdauer erreicht ist. Die Massenbilanzen errechnen sich ausschließlich aus den Verbraucherleistungen und den aktuell in den Leitungen vorhandenen Temperaturen. Daher werden die Massenströme zunächst separat für einen Zeitschritt und das gesamte Netz errechnet. Die Berechnung der Leistungen und Temperaturen setzen die Kenntnis der Massenströme in jedem Leitungselement voraus. Zur Berechnung der Leistungen wiederum werden die Temperaturen nicht benötigt, jedoch werden zur Berechnung der Temperaturen die Leistungen benötigt. Daraus resultiert die Reihenfolge der Berechnung wie sie in *Abbildung 29* schematisch dargestellt ist.

Nun werden alle berechneten Werte in das Tabellenblatt „Simulation“ eingetragen. Sollte die Anzahl der Daten, die maximal zulässige Zeilen- oder Spaltenzahl², die von Excel vorgegeben ist überschreiten, so werden nicht alle Werte in das Tabellenblatt geschrieben. Das Makro errechnet intern einen Faktor, mit dem einige Datensätze übersprungen werden. Sind beispielsweise 2.000.000 Zeitschritte vorhanden, so wird nur jeder Zweite in „Simulation“ eingetragen, also nur 1, 3, 5, usw. Dieser Überspring – Faktor wird, wenn nötig vom Makro errechnet, er lässt sich aber auch, wenn erwünscht in „Fixe Werte“ festlegen. Hier kann jeder beliebige Wert gewählt werden, um die Datenmenge zu reduzieren. Die Rechengenauigkeit wird dadurch nicht beeinflusst, da die Zeitschrittweite weiterhin berücksichtigt bleibt. Es wird also jeder Zeitpunkt berechnet, jedoch nicht jeder errechnete Wert ausgegeben, sondern lediglich, wie gefordert, jeder x-te.

5.2 Aufgaben der einzelnen Funktionen innerhalb des Makros

Das Makro besteht teilweise zur besseren Übersicht und größtenteils aus Programmablaufsgründen aus mehreren Funktionen. Diese werden in einer bestimmten Reihenfolge abgerufen, wobei sich die Abfolge aus der Modellierung bzw. Berechnung der Parameter ergibt.

² Maximale Anzahl der Zeilen (Office 365): 1.048.576; maximale Anzahl der Spalten: 16.384

5.2.1 Fix Values

Das Makro startet mit der Überprüfung, ob alle notwendigen Werte, Tabellenblätter und so weiter vorhanden sind. Diese wird von der Funktion „Fix Values“ durchgeführt. Zunächst wird kontrolliert, ob alle, für die Berechnung erforderlichen, Tabellenblätter vorhanden sind und diese eingelesen.

| Bezeichnung in Excel | Bezeichnung im Makro | Typ |
|----------------------|----------------------|-----------|
| Eingabe | eing | Worksheet |
| Verbindungen | verb | Worksheet |
| Daten | daten | Worksheet |
| Simulation | sim | Worksheet |
| Plot | plot | Worksheet |
| Stoffwerte | stoff | Worksheet |
| Auswertung | aus | Worksheet |
| Fixe Werte | fixVal | Worksheet |

Tabelle 5 Auflistung der Tabellenblätter, die vom VBA Makro eingelesen werden.

Alle in *Tabelle 5* erwähnten Tabellenblätter beinhalten Informationen, die das Makro im Laufe der Iterationen benötigt. Die auf „Fix Values“ folgenden Funktionen benötigen nur die Zeilen- bzw. Spaltennummern, ab denen Werte zu lesen sind. Die Reihenfolge der Angaben in den Tabellenblättern darf nicht geändert werden. Zum Beispiel ist im Tabellenblatt „Daten“ die erste Spalte die Spalte Nummer 3, dies darf verändert werden, jedoch nicht, dass in der ersten beschrifteten Spalte die Knotennummer angeführt ist.

| Tabellenblatt | Bezeichnung im Makro | Beschreibung | Typ |
|---------------------|----------------------|----------------------------------|---------|
| Eingabe | firstReing | erste beschriebene Zeile | Integer |
| | firstCeing | erste beschriebene Spalte | Integer |
| Verbindungen | firstRverb | erste beschriebene Zeile | Integer |
| | lastRverb | letzte beschriebene Zeile | Integer |
| | firstCverb | erste beschriebene Spalte | Integer |
| | colFrom | Spalte, die „von“-Knoten enthält | Integer |
| | colTo | Spalte, die „zu“-Knoten enthält | Integer |
| Daten | firstRdaten | erste beschriebene Zeile | Integer |
| | lastRdaten | letzte beschriebene Zeile | Long |
| | firstCdaten | erste beschriebene Spalte | Integer |
| | lastCdaten | letzte beschriebene Spalte | Integer |
| Simulation | firstRsim | erste beschriebene Zeile | Integer |
| | firstCsim | erste beschriebene Spalte | Integer |
| Stoffwerte | firstRstoff | erste beschriebene Zeile | Integer |
| | firstCstoff | erste beschriebene Spalte | Integer |
| Auswertung | firstRaus | erste beschriebene Zeile | Integer |
| | lastRaus | letzte beschriebene Zeile | Integer |
| | firstCaus | erste beschriebene Spalte | Integer |
| | lastCaus | letzte beschriebene Spalte | Integer |

Tabelle 6 Weitere konstante Werte, die „Fix Values“ einliest.

5.2.2 Material Values

Anschließend wird die Funktion „Material Values“ durchlaufen. Diese liest die Stoffwerte der verwendeten Werkstoffe aus dem gleichnamigen Tabellenblatt aus.

| Bezeichnung im Makro | Beschreibung | Typ |
|----------------------|---|--------|
| CpSt | Wärmekapazität des Stahls | Single |
| CpW | Wärmekapazität des Wassers | Single |
| rhoSt | Dichte des Stahls | Single |
| rhoW | Dichte des Wassers | Single |
| lambdaE | Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs | Single |
| lambdaPU | Wärmeleitfähigkeit der Isolierschicht | Single |
| gapVLRL | Abstand zwischen Vor- und Rücklaufleitung | Single |
| hm | Einbautiefe der Leitungen | Single |

Tabelle 7 Auflistung der Stoffwerte.

Die Leitungsabmessungen sind im Tabellenblatt „Daten“ zwar gegeben, jedoch nicht in der Form, in der sie für die Berechnung benötigt werden. Die Funktion „Geometry“ errechnet aus Innendurchmessern und Schichtdicken die einzelnen Durchmesser der Schichten sowie Querschnittsflächen und Rohrvolumen. Diese Ergebnisse werden ins Tabellenblatt „Daten“ zum jeweiligen Knoten geschrieben und im Zuge der Iterationen gelesen. Nach Durchlauf des Makros werden sie wieder gelöscht, weshalb die Eintragungen für den Benutzer des Tools nie sichtbar sind.

| Bezeichnung im Makro | Beschreibung | Typ |
|-----------------------|--|---------|
| NumberOfNodes | Anzahl der Knoten des Netzes | Integer |
| RbetNodesDaten | Anzahl der Zeilen zwischen 2 Knoten im Tabellenblatt <i>Daten</i> | Long |
| lastNode | allerletzter Knoten des Netzes (höchste Knotennummer) | Integer |
| SimDuration | Simulationsdauer | Long |
| StepSize | Zeitschrittweite | Single |
| DataFactorSim | Faktor, um die zulässige Zeilenanzahl in Simulation nicht zu überschreiten | Integer |

Tabelle 8 Konstanten, die zur Durchführung der Iterationen benötigt werden.

5.2.3 Calc

Die Hauptprozedur heißt *Calc*. Von dieser aus werden zu Beginn alle oben genannten Funktionen aufgerufen. Somit hat die Prozedur sämtliche Informationen über die Leitungsabmessungen, die Datensätze und diverse Anfangsbedingungen.

Die Prozedur schätzt die Rechenzeit ab und gibt sie dem Benutzer aus. Anschließend liest sie die Netzstruktur aus dem Tabellenblatt Verbindungen. Erst jetzt startet die eigentliche Berechnung. Das Makro erstellt für alle zu errechnenden Werte (Massenstrom, Temperatur, ...) ein Array um das ständige beschreiben des Excel-Files zu vermeiden und dadurch merklich die Rechenzeit zu reduzieren.

Es folgt der Sprung in die drei wesentlichen Funktionen: *CalcMassFlows_Loss_TemporaryTemp*, *CalcTemp* und *CalcPower*. Die Trennung dieser Berechnungsschritte ist zwingend notwendig, wie bereits in Abschnitt 5.1 erläutert.

- *CalcMassFlows_Loss_TemporaryTemp*

Die Massenströme werden mittels Bilanzen zu Beginn errechnet, und zwar von den letzten Anschlüssen bis zum Heizwerk. Gleichzeitig werden die Verluste der einzelnen Leitungen berechnet und mit deren Hilfe die veränderte, innere Energie. Diese wird zur Berechnung der Innentemperatur, die sich nach Wärmeabstrahlung an die Umgebung einstellt, benötigt. Alle diese Werte werden für das gesamte Netz, für den einen, aktuell betrachteten Zeitschritt errechnet und in den zugehörigen Arrays gespeichert.

- *CalcTemp*

Nun erst kann die Berechnung der Temperaturen erfolgen, denn mit dem Wissen der vorläufigen Temperaturen (= jene nach Wärmeabstrahlung) und der Massenströme, kann die Pfropfenströmung „fließen“ und die Mischtemperatur für Vor- und Rücklauf berechnet werden.

- *CalcPower*

Abschließend erfolgt noch die Bilanzierung der Leistungen für jedes Leitungselement. Erst jetzt wird der nächste Zeitschritt betrachtet. Also die ganze Prozedur startet erneut mit der Berechnung des Massenstroms.

| Bezeichnung im Makro | Beschreibung | Typ |
|-----------------------|---|---------|
| NextTimeStep | zählt die Schleifendurchläufe | Long |
| ActualTimeStep | aktuell betrachteter Zeitschritt | Long |
| RTimeStepDaten | Zeile im Tabellenblatt <i>Daten</i> , die die Werte des betrachteten Zeitschritts enthält | Long |
| RToNodeDaten | Zeile im Tabellenblatt <i>Daten</i> , die die Werte des „zu“-Knotens enthält | Long |
| FromNode | aktuell betrachteter „von“-Knoten | Integer |
| ToNode | aktuell betrachteter „zu“-Knoten | Integer |
| mDotUser | Massenstrom des aktuell betrachteten Verbrauchers (= „zu“-Knoten) | Double |
| powerUser | Leistung des aktuell betrachteten Verbrauchers (= „zu“-Knoten) | Double |

Tabelle 9 Zählvariablen, die während der Iterationen benötigt werden

| Bezeichnung im Makro | Beschreibung | Typ |
|--------------------------|--|---------|
| lastNode() | enthält alle letzten Verbraucher (= Verbraucher auf die kein weiterer mehr folgt) | Variant |
| RowNode() | enthält die Zeilennummern aller Knoten, die im Tabellenblatt Daten eingetragen sind | Variant |
| UserMassFlows() | enthält die Massenströme aller Verbraucher | Variant |
| TempVLtemporary() | enthält die vorläufig errechneten Vorlauftemperaturen aller Knoten | Variant |
| TempRLtemporary() | enthält die vorläufig errechneten Rücklauftemperaturen aller Knoten | Variant |
| ChBoxes() | speichert den Status aller Kontrollkästchen, die sich im Tabellenblatt Auswertung befinden | Variant |
| data() | speichert das gesamte Tabellenblatt Daten | Variant |

Tabelle 10 In Arrays gespeicherte Daten

Der gesamte VBA-Code befindet sich im *Anhang A*.

5.3 Validierung des VBA-Tools

5.3.1 Validierung der Modellierung

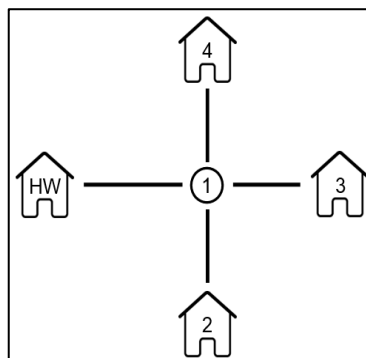


Abbildung 30 Versuchsnetz mit vier Knoten und drei Verbrauchern

Anhand einfacher Tests wird die Plausibilität des Modells überprüft. Es gilt, die Temperaturen, die Leistungen, die Verluste und die Massenströme zu überprüfen. Hierzu wird das Testmodell, das in *Abbildung 30* dargestellt ist, erstellt und mit dem VBA-Tool simuliert.

Die folgenden Plausibilitätstests werden betrachtet:

- I. Zunächst wird eine sehr große Isolierschicht angenommen. Die Verbraucher verhalten sich neutral, das heißt, sie nehmen weder Leistung aus dem Fernwärmenetz auf, noch geben sie welche ab. Erwartet wird folgendes Ergebnis:
 - an keiner Stelle des Vor- und Rücklaufstrangs fließt ein Massenstrom.
 - es treten sehr geringe bzw. ideal betrachtet keine Verluste auf.
 - die Leistung des Heizwerks entspricht der Summe der Verluste aller Rohrleitungen.
 - die Vor- und Rücklauftemperaturen entsprechen zu jedem Zeitpunkt näherungsweise den Ausgangstemperaturen.

- II. Es gelten alle Annahmen von (I). Zusätzlich wird nun eine übliche Isolierschicht angenommen. Damit ist zu erwarten, dass
- deutliche Verluste auftreten
 - die am Heizwerk gemessenen Leistungen der Summe der abgegebenen Wärme aller Rohrleitungen (= Verluste) pro Sekunde entsprechen.
 - die Vor- und Rücklauftemperaturen, aufgrund der Wärmeverluste, sinken.
- III. Es gelten alle Annahmen von (II). Wenn zusätzlich die Temperatur des Erdreichs der Temperatur des Vorlaufs entspricht, so ist
- der Verlust des Vorlaufs gleich 0 und die Temperatur des Vorlaufs bleibt konstant
 - der Verlust des Rücklaufs ungleich 0 (Anm.: < 0 , da dem Rücklauf Wärme hinzugefügt wird) und die Temperatur des Rücklaufs steigt.
- IV. Es gelten wiederum alle Annahmen von (II). Wenn zusätzlich die Temperatur des Erdreichs die Temperatur des Rücklaufs annimmt, so ist
- der Verlust des Rücklaufs gleich 0 und die Temperatur des Rücklaufs bleibt konstant.
 - der Verlust des Vorlaufs ungleich 0 (Anm.: > 0 , da dem Vorlauf Wärme entzogen wird) und die Temperatur des Vorlaufs sinkt.
- V. Es gelten alle Annahmen von (II). Die Erdreichtemperatur nimmt einen realistischen Wert an und die Verbraucher entnehmen nun alle irgendeine Leistung, so sollte
- die Leistung des Heizwerks der Summe dieser Abnahmeleistungen aller Verbraucher einschließlich der Summe der Verluste entsprechen.
- VI. Es gelten alle Annahmen von (V). Führen die Verbraucher, die unter V erwähnten Abnahmeleistungen dem Fernwärmenetz zu, so sollte
- die Leistung des Heizwerks der negativen Summe der Abnahmeleistungen aller Verbraucher abzüglich der Summe der Verluste entsprechen.

Die Beträge der Heizwerkleistungen für den Abnahme- und Einspeisefall sind somit keinesfalls gleich. Sie unterscheiden sich jedoch exakt um die doppelte Summe der Verluste.

Tabelle 11 listet die zahlenmäßigen Ergebnisse der sechs Testläufe am Heizwerk nach einer Stunde auf.

| am Heizwerk ermittelte Werte | | Testlauf Nr. | | | | | |
|------------------------------------|--------|--------------|------|-------|-------|--------|----------|
| | | I | II | III | IV | V | VI |
| Massenstrom | gesamt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,086 | - 0,086 |
| Verlust | VL | 3 | 104 | 0 | 60 | 104 | 104 |
| | RL | 1 | 44 | - 60 | 0 | 44 | 44 |
| | gesamt | 4 | 148 | - 60 | 60 | 148 | 148 |
| Leistung | VL | 3 | 104 | 0 | 60 | 141480 | - 140090 |
| | RL | - 1 | - 44 | 60 | 0 | 123332 | - 122238 |
| | gesamt | 4 | 148 | 60 | 60 | 18148 | - 17852 |
| Temperatur | VL | 96,8 | 96,2 | 96,85 | 96,5 | 96,8 | 96,6 |
| | RL | 46,8 | 46,6 | 47,2 | 46,85 | 46,8 | 46,8 |

Tabelle 11 Simulationsergebnisse der 6 Testläufe für das Heizwerk

Das prognostizierte Verhalten entspricht den Ergebnissen der Simulation. Im Detail lässt sich Folgendes über die einzelnen Simulationsergebnisse sagen:

- Massenstrom

Wenn keine Leistung vom oder zum Verbraucher fließt, ist der Massenstrom 0 (I – IV). Entnehmen Verbraucher bestimmte Leistungen (V) oder speisen diese ein (VI) so ist der Massenstrom am Heizwerk entgegengesetzt gleich groß.

- Verluste

Die Verluste sind unabhängig von Verbraucherleistungsmenge und –richtung (II, V, VI), jedoch abhängig von den Abmessungen der Leitungen (I) sowie der Temperatur des Erdreichs. Entspricht diese der Anfangstemperatur des Vor (III)- oder Rücklaufs (IV) so ist der jeweilige Verlust 0. Der Testlauf III sieht für die Erdreichtemperatur die

Vorlaufleitungstemperatur vor und ist somit größer als die Rücklaufstemperatur. Daher nimmt die Rücklaufleitung Energie auf, das heißt der Verlustwert ist negativ.

- Leistungen

Sind die Verbraucherleistungen gleich null, so entspricht die Leistung am Heizwerk den Verlusten (I – IV). Die Rücklaufleistung ist im Testlauf II negativ, da der Rücklauf zum Ausgleich der Verluste Leistung vom Heizwerk beziehen muss. Speisen die Anschlüsse Leistung ins Fernwärmenetz ein (VI) so kehren sich Vor- und Rücklaufleistungen, im Vergleich zum Verbrauchsfall (V), um (Leistung im Vorlauf fließt vom Netz ins Heizwerk, Leistung im Rücklauf fließt vom Rücklauf ins Netz).

- Temperaturen

Die Temperatur des Vorlaufs (zu Beginn z.B.: 96,85°C) sinkt, wenn das Erdreich kühler ist und bleibt unverändert, wenn die Erdreichtemperatur der Vorlaufstemperatur entspricht (III). Die Temperatur des Rücklaufs (zu Beginn z.B.: 46,85°C) sinkt ebenfalls bei kühlerer Erdreichtemperatur, bleibt gleich für den Fall, dass die Erdreichtemperatur der Rücklaufstemperatur (IV) entspricht und steigt, wenn die Erdreichtemperatur größer als diese ist (III).

5.3.2 Validierung des Makro-Codes

Die im Makro hinterlegten Formeln wurden zur besseren Veranschaulichung, sowie zur Validierung in Mathcad eingegeben. Für beliebig gewählte Netzparameter liefern Mathcad und das VBA -Tool exakt dieselben Ergebnisse. Somit kann ein Tippfehler oder eine fehlerhafte Formel im VBA-Tool ausgeschlossen werden.

6 Das Beispielnetz – Struktur und Angaben

Zur Beurteilung des VBA-Tools und somit der Modellierung und des quasistationären Ansatzes wird ein fiktives Fernwärmenetz herangezogen. Dieses wird dynamisch mit Matlab simuliert und mit den Ergebnissen des in dieser Arbeit präsentierten Tools verglichen.

6.1 Struktur des Fernwärmenetzes

Abbildung 31 zeigt die Struktur des Fernwärmenetzes sowie die über einen Tag gemittelten Verbraucherleistungen. Diese können sowohl entnommen als auch eingespeist werden. Das heißt, jeder Anschluss kann verbrauchen und produzieren.

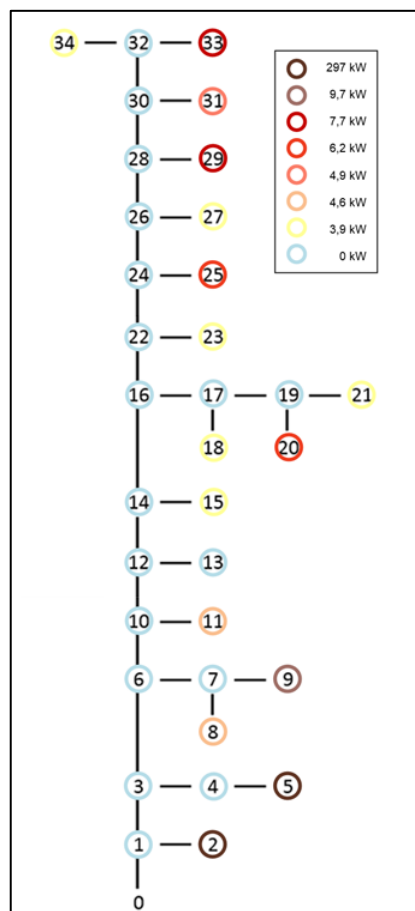


Abbildung 31 Struktur eines Beispielnetzes mit Verbraucherdaten

Der Knoten 0 stellt das Heizwerk dar. Der Hauptstrang, in *Abbildung 31* vertikal dargestellt, besteht aus Anschlüssen, die weder Leistung entnehmen, noch einspeisen. Solche Knoten kommen häufig vor. Sie sind notwendig, wenn sich die Abmessungen der Leitungen ändern oder wie im Hauptstrang, wenn eine Verzweigung auftritt. Der Hauptstrang lässt sich somit als Straße deuten, um die Häuser aufgereiht sind.

6.2 Datensätze der Anschlüsse

Die aktiven Anschlüsse enthalten diverse Arten von Verbrauchern. Sehr auffällig sind die Knoten 2 und 5, da sie sehr viel Leistung aus dem Netz entnehmen. Diese sollen einen Betrieb, ein Hotel, eine Produktion oder dergleichen darstellen. Ihr Verbrauch ist dem eines herkömmlichen Verbrauchers über 24 Stunden in *Abbildung 32* gegenübergestellt.

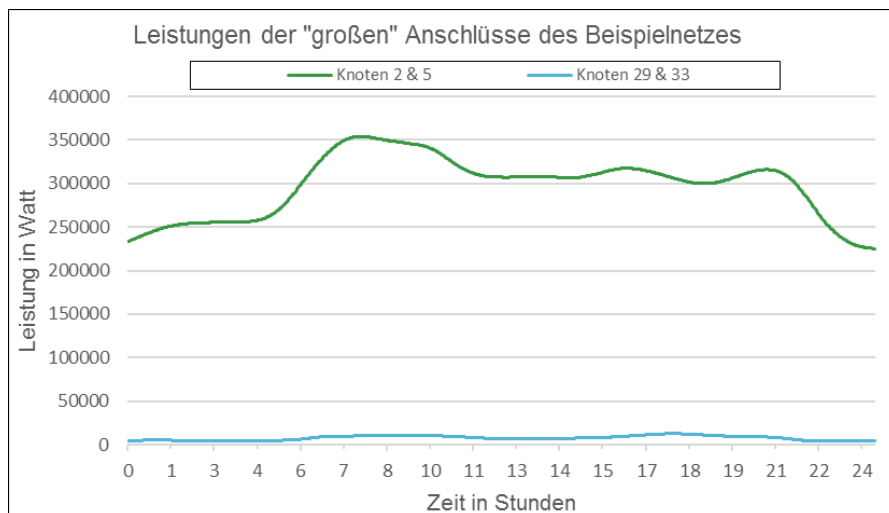


Abbildung 32 Leistungsstrake Verbraucher im Vergleich zu leistungsschwachen Anschluss

Alle weiteren Verbraucher sind Durchschnittshaushalte. Betrachtet man in *Abbildung 33* die Leistungsabnahme des Knotens 9, so fällt auf, dass dieser um die Morgen- und Abendstunden große Energiemengen entnimmt. Während des übrigen Tagesverlaufs ist der Energieverbrauch geringer. Vergleichsweise dazu verhalten sich die anderen Anschlüsse moderater. Die Knoten 15, 18, 21, 32, 27 und 34 haben alle eine zeitlich beinahe konstante Lastkurve. Insgesamt betrachtet ist das Fernwärmenetz morgens und abends am stärksten belastet.

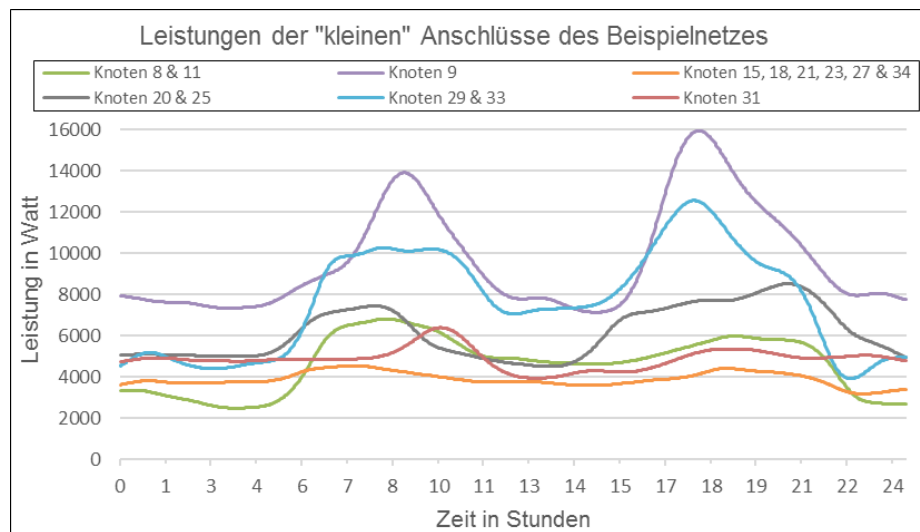


Abbildung 33 Leistungen der ‚kleinen‘ Verbraucher über 34 Stunden

Welchen Bedarf das Heizwerk den Verbrauchern ungefähr zur Verfügung stellen muss, lässt sich einfach visualisieren, indem alle Verbraucherkurven überlagert werden. Diese Superposition ist in *Abbildung 34* dargestellt.

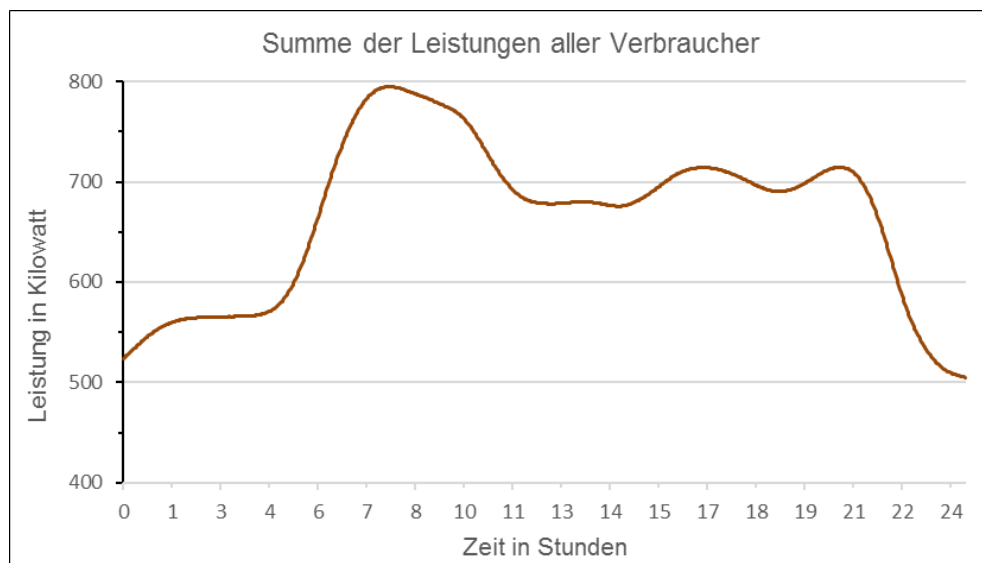


Abbildung 34 Verlauf der aufsummierten Leistungen aller aktiven Anschlüsse des Versuchsnetzes

Betrachtet man die Summe, so bestätigt sich, dass die größten Lasten morgens und abends auftreten. So ähnlich wie die überlagerten Leistungskurven sollte in etwa die Leistungskurve des Heizwerks aussehen. Selbstverständlich wird diese insgesamt über der in *Abbildung 34* liegen, da die Verluste kompensiert werden müssen.

Im Verbrauchsfall führen alle Anschlüsse das Wärmeträgermedium dem Rücklauf mit 46,85°C zu. Im Einspeisefall wird mit 96,85°C in den Vorlauf eingespeist.

Die Leitungslängen variieren sehr stark. Die Leitungsdurchmesser und Isolierschichtdicken variieren etwas moderater. Die Durchmesser sind, wie erforderlich, in der Nähe des Heizwerks am größten und nehmen mit zunehmender Entfernung ab. Sie sind in *Abbildung 35* in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

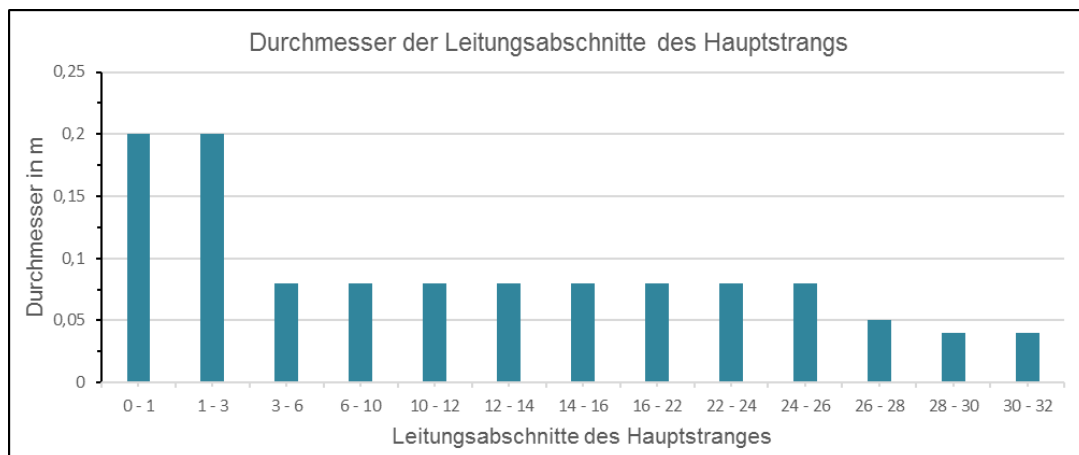


Abbildung 35 Durchmesser aller Leitungsabschnitte entlang des Hauptstrangs

Die zwei ersten, im Vergleich zu den anderen, erheblich erhöhten Werte begründen sich mit den leistungsstarken Verbrauchern. Um große Leistungen übertragen zu können sind große Massenströme erforderlich. Um diese wiederum gewährleisten zu können, werden große Querschnitte benötigt.

7 Vergleich zwischen dynamischer und quasistationärer Simulation

Das Modell beruht auf einem quasistationären Ansatz, der von der Benutzerseite aus durch die Eingabe der Zeitschrittweite stark beeinflussbar ist. Durch Minimierung der Zeitschrittweite nähern sich die Ergebnisse stark an jene an, die bei dynamischer Betrachtung erhalten werden. Um dies zu verifizieren, wird als dynamisches Vergleichsmodell das Matlab Modell von Johannes Nagler [1] herangezogen. Zunächst ist noch zu erwähnen, dass durch Minimierung der Zeitschrittweite bei gleichbleibender Simulationsdauer die Zahl der Iterationen und somit die Rechendauer zunimmt. Daher ist ein ausreichend kleiner Wert für die Zeitschrittweite erstrebenswert, also ein guter Kompromiss zwischen Rechenzeit und -genauigkeit.

Das Augenmerk liegt hier gänzlich auf der Abweichung der Ergebnisse zwischen der dynamischen und der, in dieser Arbeit hergeleiteten, quasistationären Herangehensweise. Hierzu werden für die Zeitschrittweite verschiedene Werte gewählt und der auftretende relative Fehler zwischen den beiden Modellen betrachtet.

Nun wird das in *Abbildung 31* dargestellte Netz mit beiden Modellen simuliert und die erhaltenen Leistungen, Temperaturen und der Massenstrom im ersten Knoten (= 0, bzw. Heizwerk) verglichen. Der Verbrauchsfall - also alle Verbraucher entnehmen Leistungen aus dem Fernwärmenetz - wird betrachtet.

7.1 Auswirkung der Zeitschrittweite auf die errechneten Größen

Das Matlab Modell rechnet die ersten 10 Stunden mit konstanten Verbraucherleistungen und -temperaturen, damit die zu Beginn konstanten Zustandsgrößen des thermischen Netzes einschwingen können. Als Startwert haben alle Vorlaufleitungen eine Temperatur von 90°C und alle Rücklaufleitungen eine Starttemperatur von 30°C. Dieses Einschwingen soll auch mit dem VBA-Tool berücksichtigt werden.

Es werden also 34 Stunden mit Matlab und mit dem VBA-Tool simuliert, wobei die Zeitschrittweite im VBA-Tool variiert wird, um eine Abschätzung des Einflusses auf die Abweichungen zum dynamischen Modell zu erhalten.

7.1.1 Temperaturen des Vor- und Rücklaufs

Die Vorlauftemperatur ist für eine Zeitschrittweite von 0,1 und 1 Sekunde etwas höher als jene der Matlab Simulation. Mit fortan steigenden Zeitschrittweiten sinkt die Vorlauftemperatur unter jene der Matlab Simulation. Dieser Zusammenhang lässt sich aus *Abbildung 36* herauslesen.

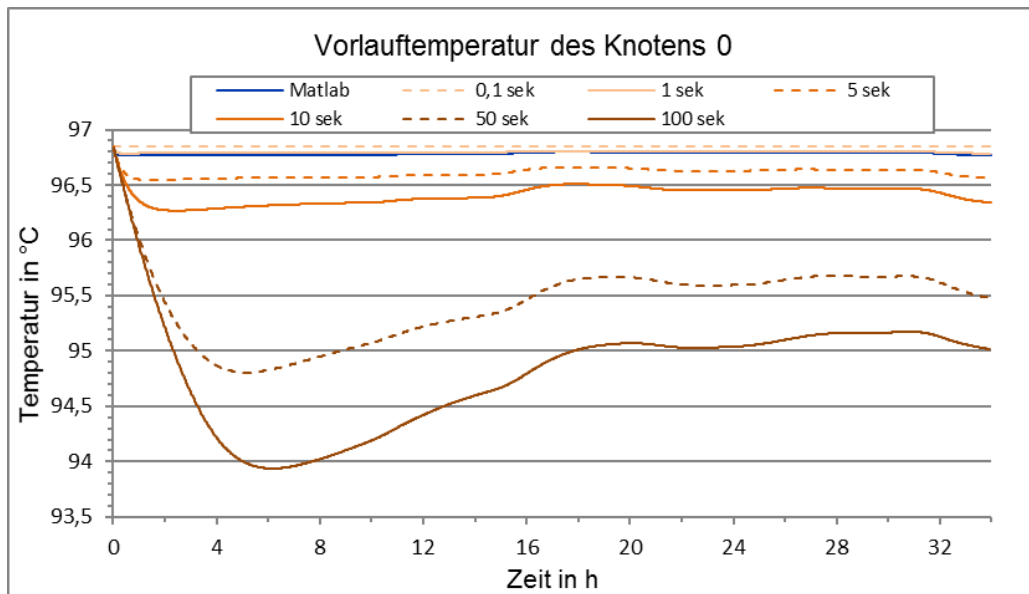


Abbildung 36 Verläufe der Vorlauftemperatur am Heizwerk für verschiedene Zeitschrittweiten

Je größer die Zeitschrittweite, desto größer der Gradient zu Beginn der Simulation, sprich desto rapider fällt die Vorlauftemperaturkurve. Mit steigender Zeitschrittweite erhöht sich das zugeführte Volumen für jeden Rohrabschnitt. Dieses beeinflusst die Temperaturen sehr stark. Da die Verluste mit größer werdender Zeitschrittweite zunehmen, nimmt die innere Energie eines Leitungsabschnitts ab. Dadurch sinkt die Temperatur. Daher haben bei größer werdender Zeitschrittweite die Temperaturkurven einen Abwärtstrend.

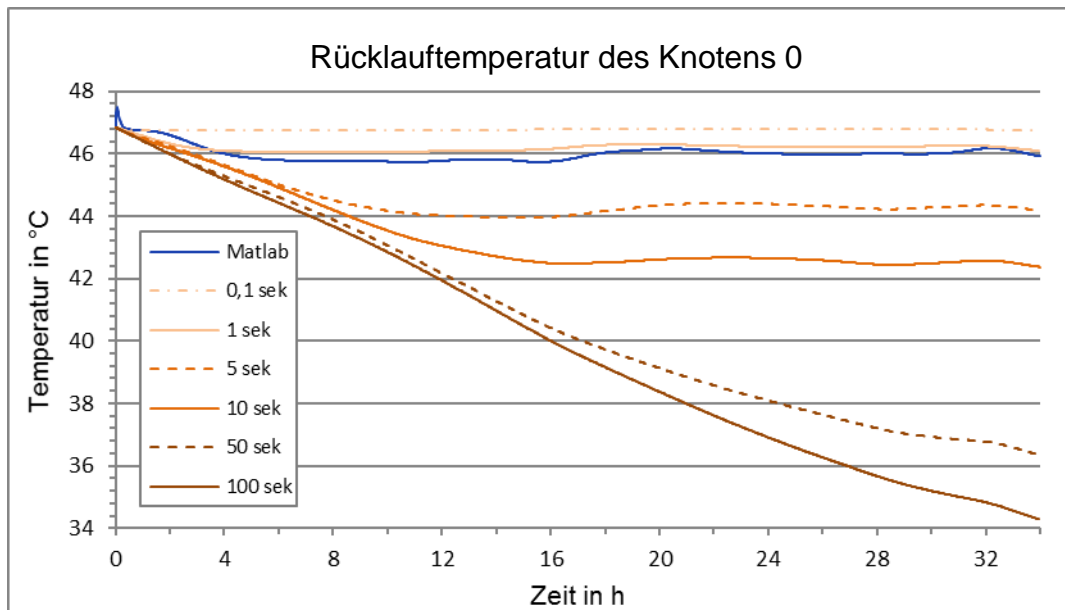


Abbildung 37 Verläufe der Rücklauftemperatur am Heizwerk für verschiedene Zeitschrittweiten

Die Temperaturkurven des Rücklaufs für verschiedene Zeitschrittweiten sind in *Abbildung 37* dargestellt. Auch hier zeigt sich derselbe Trend wie bei den Vorlaufkurven. Je größer die Zeitschrittweite ist desto tiefer fallen die Temperaturen. Das Verhalten begründet sich, wie auch beim Vorlauf, mit dem größeren zuströmenden Volumen. Nimmt dieses zu, so steigen die Verluste und somit sinken die Temperaturen. Es fällt auf, dass der Rücklauf viel stärker abkühlt. Der Abstand zwischen größtem und kleinstem Zeitschrittwert am Ende der Simulation beträgt ca. 10 Grad, wohingegen derselbe Abstand der Vorlaufkurven lediglich 2 Grad beträgt. Da hier der Verbrauchsfall dargestellt ist, ist der Massenstrom am Heizwerk am größten. Dieser fließt in den Vorlauf und gibt das Wärmeträgermedium mit 96,85°C ab, wodurch die Vorlauftemperatur des ersten Rohrabschnitts nicht stark sinken kann. Der Rücklauf des ersten Rohrabschnitts enthält das Wärmeträgermedium, nachdem es alle anderen Leitungsabschnitte durchlaufen ist (mit entsprechenden Verlusten). Daher kühlt dieser viel stärker ab. Wird die Zeitschrittweite größer, so nehmen die Verluste zu und die Rücklauftemperatur nimmt stärker ab.

7.1.2 Massenstrom

Der Massenstrom, der am Heizwerk (=Knoten 0) ankommt ist in *Abbildung 38* dargestellt. Es fällt auf, dass die Formen der einzelnen Massenstromkurven sehr ähnlich sind. Je größer die Zeitschrittweite desto größer werden die Massenströme, also desto höher liegen die Kurven der quasistationären Simulation über der Kurve der Matlab Simulation.

Der Massenstrom errechnet sich aus der Abnahmeleistung der Verbraucher und der Spreizung zwischen Vorlauftemperatur und jener Temperatur mit der der Verbraucher das Wärmeträgermedium dem Rücklauf zuführt. Diese Temperaturspreizung geht in der *Formel 12* für den Massenstrom umgekehrt proportional ein. Mit Zunahme dieser Temperaturspreizung nimmt also der Massenstrom ab. Da für größere Zeitschrittweiten die Vorlauftemperatur sinkt und die Temperatur, mit der in den Rücklauf gespeist wird, konstant ist, sinkt die Temperaturspreizung. Mit abnehmender Temperaturspreizung steigt der Massenstrom.

Es fällt auch noch auf, dass konstante Massenstromverläufe der Matlab Simulation (siehe die ersten zehn Stunden bzw. von Stunde 23 bis 24 in *Abbildung 38*) bei großer Zeitschrittweite stärker ansteigen. Auch dieser Effekt lässt sich mit der Temperaturspreizung erklären denn diese ist in den genannten Bereichen nicht konstant, sondern nimmt ab. Mit steigender Zeitschrittweite steigen die Verluste. Mit steigenden Verlusten nimmt die Temperatur ab. Die Temperaturspreizung nimmt also mit steigender Zeitschrittweite ab und folgedessen nimmt der Massenstrom zu.

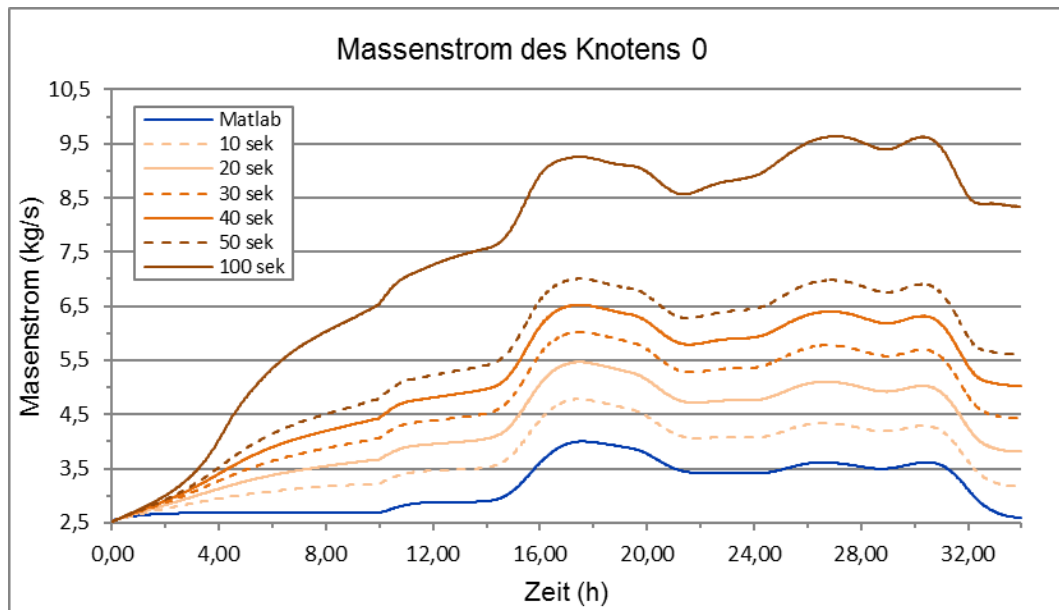


Abbildung 38 Vergleich des Massenstromverlaufs über 34 Stunden am Heizwerk zwischen verschiedenen (gröberen) Zeitschrittweiten (VBA) und Matlab.

Erst bei deutlich geringeren Zeitschrittweiten, wie in *Abbildung 39* dargestellt zeigt der Massenstromverlauf auch konstante Bereiche auf und nähert sich somit an die dynamische Simulation an.

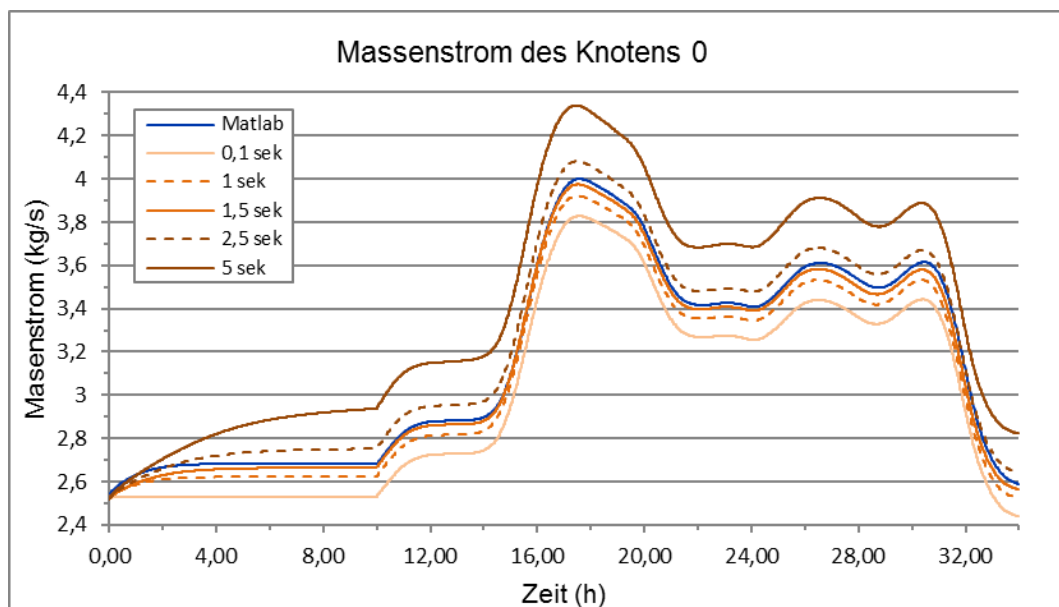


Abbildung 39 Vergleich des Massenstromverlaufs über 34 Stunden am Heizwerk zwischen verschiedenen (feineren) Zeitschrittweiten (VBA) und Matlab.

Mit einer Zeitschrittweite von 1,5 Sekunden sind die Kurven der VBA sowie Matlab Simulation nahezu deckungsgleich. Nimmt die Zeitschrittweite ab so fällt der Massenstrom noch etwas geringer aus als bei der dynamischen Simulation. Für diese Zeitschrittweiten steigt auch die Vorlauftemperatur über jene der Matlab Simulation.

7.1.3 Leistung

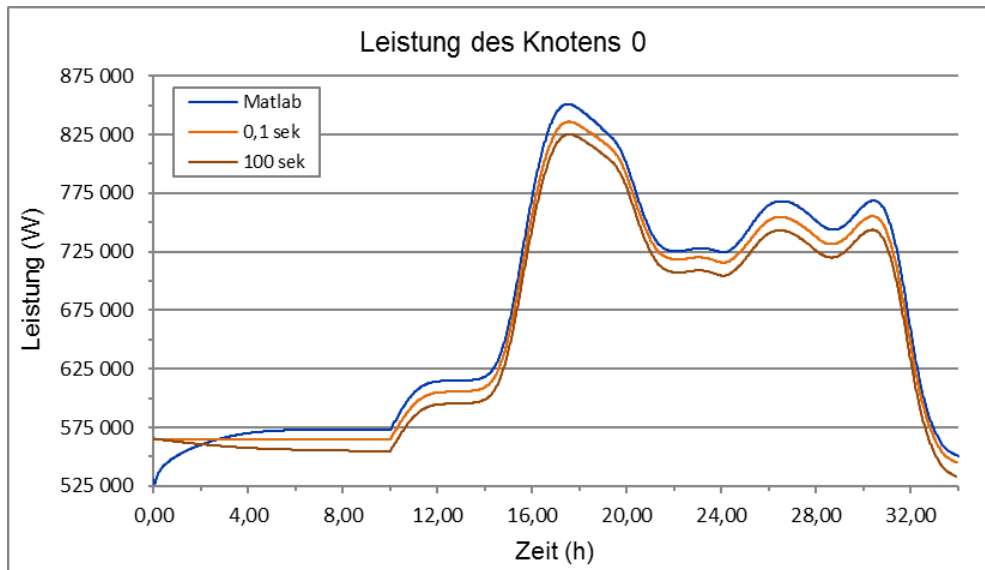


Abbildung 40 Verläufe der Leistung am Heizwerk bei Variation der Zeitschrittweite

Abbildung 40 zeigt, dass die Abweichung der Leistungen zwischen quasistationärer und dynamischer Simulation mit steigender Zeitschrittweite nur gering zunimmt. Es ist jeder Wert zwischen 0,1 und 100 Sekunden für die Zeitschrittweite geeignet um die dynamische Simulation ausreichend akkurat zu ersetzen. Die Leistungsbilanzen sind von den Verbraucherleistungen und den Verlusten abhängig. Die Verluste sind im Vergleich zu den Verbraucherleistungen jedoch so gering, dass sie kaum Einfluss auf die Bilanzen haben. Da die Zeitschrittweite aber hauptsächlich die Verluste beeinflusst und die Leistungen der Verbraucher vorgegeben sind und somit unabhängig von der Zeitschrittweite, hat diese auf die Leistungsverläufe kaum Einfluss.

Wären die Abnahmeleistungen der Verbraucher viel geringer, so würde der Effekt der Zeitschrittweite auf die Leistungen deutlich steigen.

7.1.4 Abweichung zwischen dynamischer und quasistationärer Simulation

Tabelle 12 enthält die relativen Fehler zwischen dem dynamischen und dem quasistationären Modell für alle in den vorangehenden Abschnitten 7.1.1– 7.1.3, besprochenen Größen und Zeitschrittweiten.

| Abweichung zw. dynamischen und quasistat. Modell in % für verschiedene Zeitschrittweiten in Sekunden | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 0,1 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 100 |
| Massen - strom | 4,87 | 3,62 | 2,10 | 0,76 | 0,57 | 1,84 | 7,68 | 17,65 | 34,28 | 48,86 | 62,41 | 75,36 | 136,47 |
| Temp. VL | 0,06 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,06 | 0,18 | 0,39 | 0,72 | 0,99 | 1,21 | 1,40 | 2,03 |
| Temp. RL | 1,68 | 1,08 | 0,42 | 0,17 | 0,70 | 1,19 | 3,14 | 5,66 | 8,39 | 9,87 | 10,81 | 11,47 | 13,10 |
| Leistung | 1,19 | 1,31 | 1,38 | 1,52 | 1,60 | 1,66 | 1,89 | 2,13 | 2,35 | 2,45 | 2,51 | 2,55 | 2,65 |

Tabelle 12 Abweichung zwischen den Ergebnissen der dynamischen und quasistationären Simulation für verschiedene Zeitschrittweite

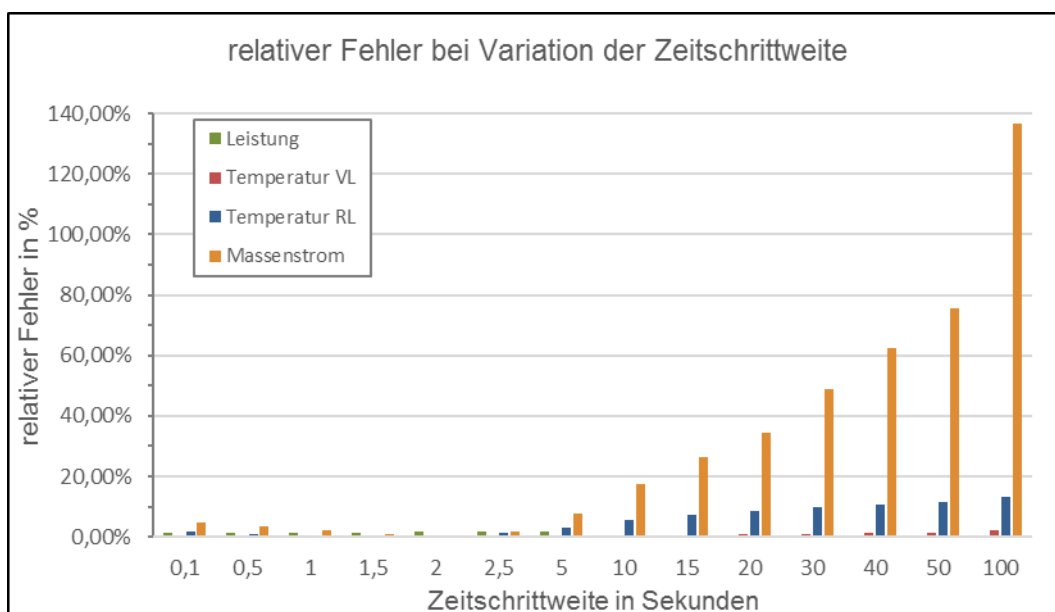


Abbildung 41 Vergleich zwischen dynamischen und quasistationären Ergebnisse für verschiedene, grobe Einstellungen der Zeitschrittweite

Es verwundert nicht, dass die Abweichung zwischen dynamischer und quasistationärer Simulation mit abnehmender Zeitschrittweite abnimmt.

Die Zeitschrittweite taucht in der Modellierung bei der Berechnung des zuströmenden Volumens sowie der inneren Energie auf. Die Mischtemperatur errechnet sich nach *Formel 18* bzw. *30* und wird mit zunehmender Zeitschrittweite kleiner. Der Massenstrom, den der Verbraucher entnimmt oder einspeist, wird laut *Formel 12* mithilfe der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf errechnet. Je geringer diese Temperaturspreizung, desto größer ist der Massenstrom.

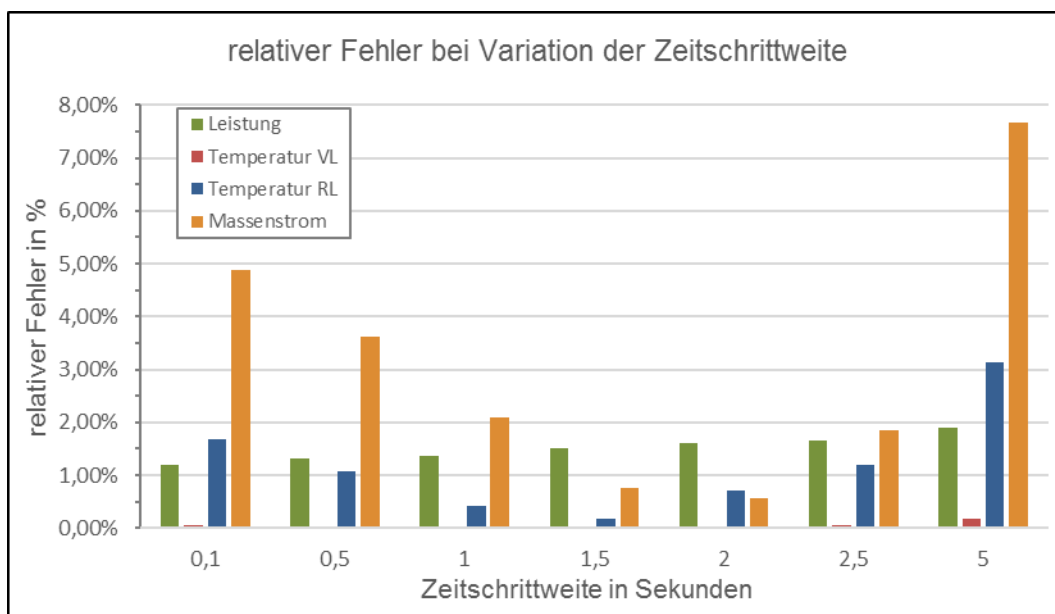


Abbildung 42 Vergleich zwischen dynamischen und quasistationären Ergebnisse für verschiedene, feinere Einstellungen der Zeitschrittweite

Abbildung 42 zeigt die relative Abweichung der errechneten Werte bei einer größeren Auflösung. Hier wird deutlich, dass bei einer zu kleinen Wahl der Zeitschrittweite die Fehler erneut zunehmen. Es ist also nicht automatisch der kleinste Wert für die Zeitschrittweite der Beste.

7.2 Auswirkung von Netzgröße und Zeitschrittweite auf die Rechendauer

Das VBA-Tool ist nach dem Schema in *Abbildung 29* programmiert. Jeder zusätzliche Knoten sowie jeder zusätzliche Zeitschritt erfordert einen erneuten Durchlauf durch die jeweiligen Schleifen. Somit lässt sich eine grobe Rechenzeitabschätzung mit der folgenden Formel ermitteln:

$$\text{Rechenzeit (in Stunden)} = \frac{\text{Anzahl der Knoten} \cdot \text{Simulationsdauer}}{\text{Zeitschrittweite} \cdot 1000}$$

Zu beachten ist, dass diese Abschätzung für einen Computer mit Vierkernprozessor gilt. Bei mehr oder weniger Kernen ist der Rechenzeitwert mit einem Faktor anzupassen. Beispielsweise bei 8 Kernen ist der Wert zu halbieren, bei 2 Kernen zu verdoppeln und so weiter.

Die Rechendauer des in *Abbildung 31* dargestellten Netzes sind in *Tabelle 13* für verschiedene Zeitschrittweiten zusammengefasst.

| Zeitschrittweite in Sekunden | 0,1 | 1 | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|-------------------------------------|------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|------------|
| Rechendauer | 13 Std. | 1 Std. | 33 Min. | 13 Min. | 7 Min. | 1,5 Min. | 1 Min. |

Tabelle 13 Rechendauer bei verschiedenen Zeitschrittweite-Einstellungen für die Simulation eines Tages bei einem 34-Knoten Netz

Es zeigt sich, dass die Zeitschrittweite einen erheblichen Einfluss auf die Dauer der Simulation hat. Daher sind die in *Abschnitt 7.1.4* betrachteten Abweichungen zwischen dynamischer und VBA Simulation abzuwägen um einen Mittelweg zwischen Simulationsdauer und –genauigkeit einschlagen zu können.

Die Netzgröße wirkt sich auf die Rechendauer so aus, dass bei doppelter Anzahl an Verbindungen sich die Rechendauer verdoppelt. Das heißt, es spielt für die Rechenzeit die Art der Knotenverbindungen (verzweigt, geradlinig) keine Rolle, sondern lediglich die Anzahl der Knoten/Verbindungen. Betrachtet man erneut *Abbildung 31* und durchtrennt das Netz nach dem Knoten 17 (= Halbierung des Netzes), so halbieren sich die Simulationszeiten aus *Tabelle 13*.

Bei längeren Leitungssträngen, die sich in ihrer Geometrie kaum unterscheiden und keinen Verbraucheranschluss haben, bietet es sich an, diese zu einer Verbindung zusammenzufassen um die Anzahl der Knoten zu reduzieren und somit auch die Rechendauer.

7.3 Vor- und Nachteile des VBA Modells gegenüber der dynamischen Betrachtung

Als großer Nachteil ist die erhebliche Simulationsdauer im Vergleich zur dynamischen Simulation zu erwähnen. Je nach Prozessorleistung des Computers kann diese aber merkbar gesenkt werden.

Einen großen Vorteil stellt die einfache Eingabe des Netzes dar. Die Bedienung des VBA-Tools ist in *Abschnitt 4* beschrieben. Die Verbraucherdaten werden in Form von Knoten ins „Daten“-Tabellenblatt eingegeben, Anfangswerte für das gesamte Netz sind im „Eingabe“-Tabellenblatt einzutragen und die Netzstruktur wird im „Verbindungen“-Tabellenblatt vorgegeben. Es lässt sich also ein neues Netz zügig eingeben aber auch große Änderungen lassen sich sehr rasch tätigen, wie zum Beispiel Veränderung der Netzstruktur, Änderung der Verbraucherleistungen etc. Daher ist die Bedienung erheblich vereinfacht. Die Eingabe eines neuen Netzes kann in einigen Minuten erfolgen, die Simulation hingegen kann auch Stunden beanspruchen. Im Großen und Ganzen ist der Gesamtzeitaufwand überschaubar.

Alle errechneten Werte werden in ein Tabellenblatt (=“Simulation“) geschrieben, wodurch die weitere Verarbeitung der Daten sehr einfach wird. Auch das stellt einen riesigen Vorteil zur dynamischen Simulation dar, denn jeder Laie kann die Daten auswerten. Außerdem ist noch ein Auswertungs-Tool implementiert, dass nach Auswahl der gewünschten Datensätze diese grafisch aufbereitet (Vergleich *Abschnitt 4.1.6*).

8 Einspeisung ins Fernwärmenetz

Jeder Verbraucher kann auch als Produzent fungieren. Aus Sicht des VBA-Tools sollten lediglich die eingespeisten Leistungen mit einem negativen Vorzeichen versehen werden, damit das VBA Programm erkennt, dass es sich um eine zugeführte Leistung handelt. Zusätzlich ist eine Einspeisetemperatur anzugeben. Grundsätzlich speist dann der Produzent in den Vorlauf ein und entnimmt das Wärmeträgermedium aus dem Rücklauf. Folglich kann es zu einer Massenstromumkehr in den Leitungen kommen. Dieser Effekt ist in der Realität, vor allem am Heizwerk, unerwünscht und soll vermieden werden. Hier zeigt sich eine große Stärke des VBA-Tools. Es lassen sich zügig alle Verbraucher in Produzenten umwandeln und umgekehrt. Somit kann schnell eruiert werden, welcher Anschluss sich wie verhalten darf oder muss um eine Massenstromumkehr am Heizwerk zu vermeiden.

8.1 Auswirkung der Einspeisung ins Fernwärmenetz betrachtet anhand eines kleinen, geradlinigen Versuchsnetzes

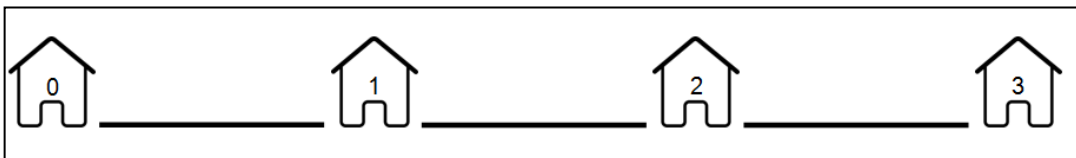


Abbildung 43 Skizze eines unverzweigten Fernwärmenetzes mit 3 Anschlüssen

Das Verhalten eines Fernwärmenetzes im Falle einer dezentralen Einspeisung lässt sich anhand des übersichtlichen Netzes aus *Abbildung 43* besser nachvollziehen. Alle Leitungsabschnitte sind geometrisch und thermisch gleich. Im Verbrauchsfall entnehmen alle Verbraucher dieselbe Energiemenge und führen den Massenstrom mit derselben Temperatur dem Rücklauf wieder zu. Im Einspeisefall wird die zuvor abgeführte Energiemenge dem Vorlauf zugeführt. Alle Anschlüsse speisen nun ein, und zwar mit derselben Einspeisetemperatur. Die ab- und zugeführte Energiemenge eines jeden Anschlusses ist exakt gleich und variiert während der Simulationsdauer der beiden Fälle nicht.

Dasselbe gilt für die jeweiligen Einspeisetemperaturen. Sinn dieses Modells ist eine deutlichere Nachvollziehbarkeit und Unterscheidung der Ereignisse im Falle einer dezentralen Einspeisung oder einer herkömmlichen Nutzung. Die drei Fälle sind in *Abbildung 44* veranschaulicht.

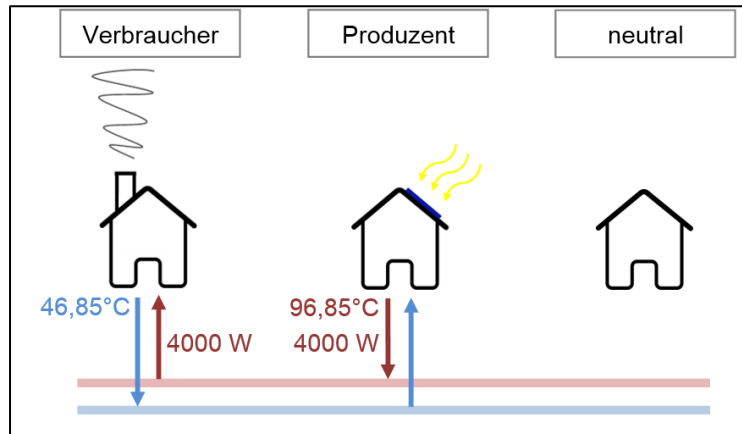


Abbildung 44 Skizze der drei möglichen Anschlussarten eines Knotens ans Fernwärmenetz

Da die Leistungen und Temperaturen der einzelnen Anschlüsse in allen 3 Fällen konstant sind konvergieren alle Werte des Fernwärmenetzes. Massenstrom, Temperaturen und Leistungen nähern sich also einem Wert an und bleiben unverändert.

8.1.1 Auswirkung auf die Leistungen

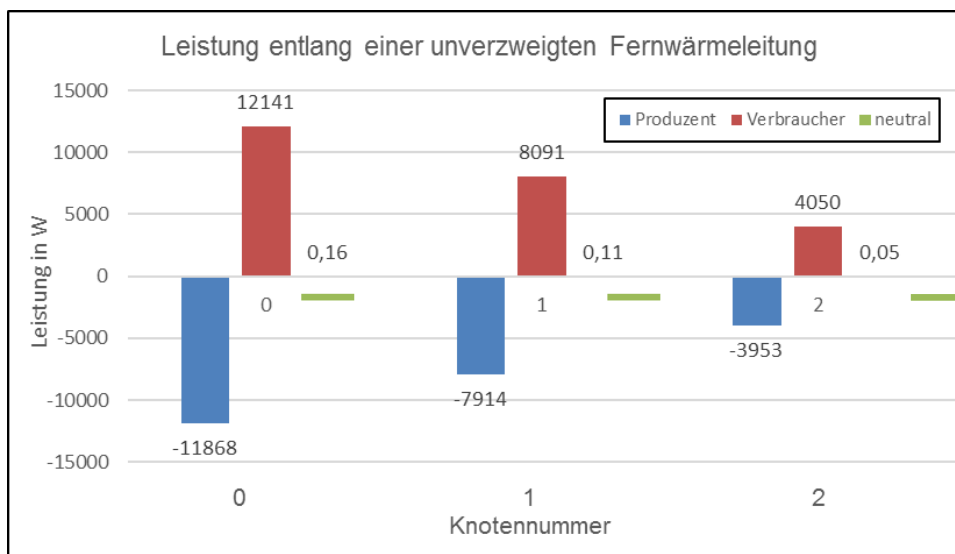


Abbildung 45 Vergleich der Leistungen für verschiedene Verbrauchsfälle entlang eines unverzweigten Fernwärmenetzes

Speisen alle drei Verbraucher 4.000 Watt ein so kommt am Heizwerk etwas weniger als 12.000 Watt an (siehe *Abbildung 45*). Verbrauchen alle Anschlüsse 4.000 Watt so muss das Heizwerk etwas mehr als 12.000 Watt zur Verfügung stellen. Diese kleinen Abweichungen ergeben sich durch die Wärmeverluste der Fernwärmeleitungen. Die Produzenten speisen ein, doch die Energiemenge kommt nicht am Heizwerk an, da die Temperaturen der Vor- und Rücklaufleitung über der des Erdreichs liegen. Die Rohre geben also Wärme ab. Wirkt hingegen ein Anschluss als Verbraucher, so muss das Heizwerk die Energiemenge zur Verfügung stellen, die der Verbraucher vor Ort braucht. Folglich muss das Heizwerk ‚zu viel‘ Energie bereitstellen, um die Verluste auch abzudecken.

Der letzte Knoten (= 3) ist in *Abbildung 45* nicht dargestellt, da dort für alle Fälle die Leistung den Wert null hat. Dies ist mit der zu Grunde liegenden Modellierung (siehe *Abschnitt 3.3.2*) zu erklären: Die Leistung eines Knotens $n-1$ setzt sich zusammen aus der Summe der Leistungen des Verbrauchers n und des Knotens n . Ist n also der letzte Knoten so berechnet er sich mit der Summe aus nichts, folglich null, unabhängig vom Verhalten des Verbrauchers n .

8.1.2 Auswirkung auf die Leitungsverluste

Aus *Abbildung 45* lassen sich, sofern man die zu- bzw. abgeführten Leistungen der Verbraucher kennt, die Verluste ablesen. Betrachtet man den Knoten 2, so lässt sich ablesen, dass der Leitungsabschnitt 2-3 50 Watt in Form von Wärme verliert. Für den Leitungsabschnitt 1-2 ist eventuell bereits ein Taschenrechner notwendig, dieser verliert $8091-4050-4000=41$ Watt an die Umgebung. Es fällt auf, dass die Verluste nicht gleich sind obwohl die Rohrabschnitte geometrisch ident sind, alle Verbraucher dieselbe Energie entnehmen und diese den Massenstrom mit derselben Rücklaufemperatur zurückführen. Die ungleichen Verluste resultieren aus der ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Fernwärmestrang. Auf diesen Sachverhalt wird detailliert im anschließenden Kapitel (*Abschnitt 8.1.3*) eingegangen. Ein erneuter Blick auf *Abbildung 45* zeigt, dass die Verluste im Falle einer Einspeisung geringer sind als jene im Verbrauchsfall.

Gibt es anstelle eines zentralen, viele dezentral verteilte Produzenten und setzt man voraus (so wie hier), dass das Heizwerk und die dezentralen Produzenten dieselbe Vorlauftemperatur zur Verfügung stellen, so wird die Temperaturverteilung gleichmäßiger. Es ist auch an dieser Stelle auf *Abschnitt 8.1.3* zu verweisen, da die Fragestellung nur mit Kenntnis der Temperaturverteilung zufriedenstellend zu beantworten ist. Abschließend ist hier noch der neutrale Anschluss zu betrachten. Die Leistung im Knoten 2 entspricht dem Verlust des Leitungsabschnitts 2-3, die Leistung des Knotens 1 entspricht der Summe der Verluste der Leitungselemente 1-2 und 2-3. Somit entspricht die Leistung des Knotens 0 der Summe aller Verluste. Hier zeigt sich ein eleganter Weg, die Leitungsverluste zu ermitteln.

8.1.3 Auswirkung auf die Vor- und Rücklauftemperaturen

Das Verhalten der Temperaturen für den Fall der Energieabnahme bzw. -zufuhr ist relativ ähnlich im Vergleich mit den neutralen Anschlüssen. Hier fallen Vorlauf- sowie Rücklauftemperatur auf Umgebungstemperatur (Erdreich). Betrachtet man *Abbildung 46* und *Abbildung 48* fällt auf, dass die Temperaturverteilung homogen ist. Dies liegt natürlich an der Annahme das alle Rohre geometrisch gleich sind. Die Vorlauftemperatur der Produzenten ist geringer als jene der Verbraucher. Dies stimmt auch überein mit den zuvor (*Abschnitt 8.1.2*) betrachteten Verlusten. Da die Temperatur niedriger ist und somit auch die Temperaturdifferenz zum Erdreich, ist auch die abgestrahlte Wärme geringer.

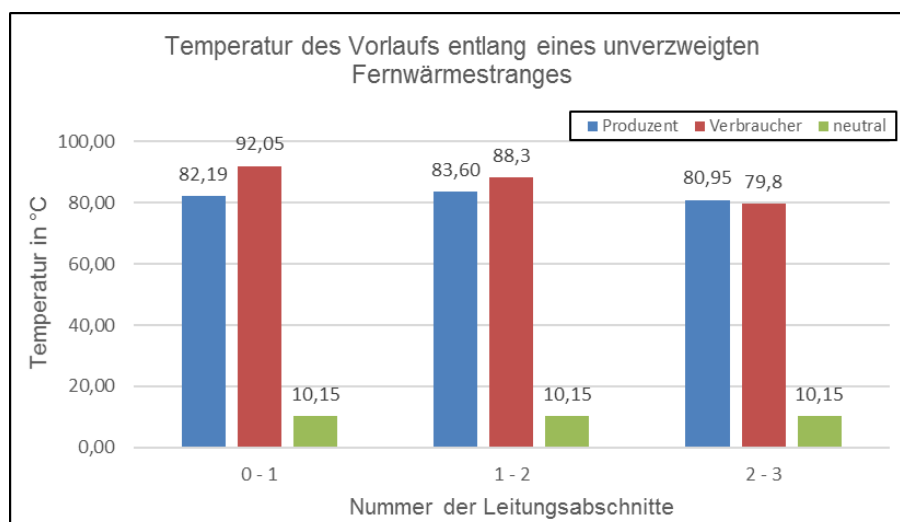


Abbildung 46 Vergleich der Vorlauftemperaturen für verschiedene Verbrauchsfälle entlang eines unverzweigten Fernwärmenetzes

Der Grund für die niedrigere Vorlauftemperatur lässt sich mit der Verteilung der Massenströme bzw. zugeführten Volumina erklären. *Abbildung 47* stellt die beiden Fälle gegenüber.

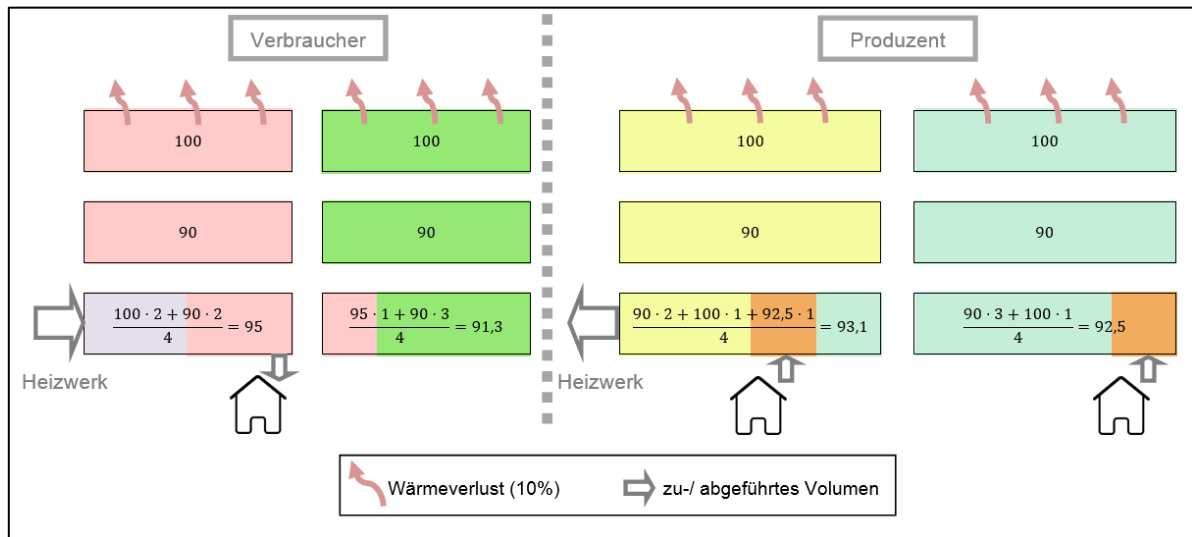


Abbildung 47 Schematische Darstellung der Vorlauftemperaturberechnung im Verbrauchs- und Einspeisefall

Zunächst tauschen in beiden Fällen die Leitungen einen Wärmestrom mit der Umgebung aus. Dadurch sinken die Temperaturen bei beiden gleich stark. Erst wenn Volumina zugeführt werden wird deutlich, dass im Fall des Produzenten die Temperatur stärker abnimmt. Dies lässt sich damit erklären, dass pro Rohrabschnitt nur eine kleine Volumenmenge, die wärmer ist als die vorhandene hinzukommt. Folglich ist nach der Durchmischung die Gesamttemperatur eines Rohrabschnitts geringer. Gibt das Heizwerk dieselbe Menge mit derselben Temperatur ans System ab, so kommt das Volumen lediglich in den ersten Rohrabschnitt. Seine Mischtemperatur ist dadurch erheblich höher. Diese fließt weiter zum benachbarten Leitungsabschnitt und durchmischt sich erneut. Es lässt sich folglich erahnen, dass die Temperatur mit größerer Distanz zum Heizwerk abnimmt. Im Gegensatz dazu wird im Falle des Produzenten die Vorlauftemperatur des gesamten Netzes relativ konstant bleiben, wenn an vielen Stellen ein Massenstrom mit gleicher Temperatur zugeführt wird. *Abbildung 48* bestätigt diesen Zusammenhang.

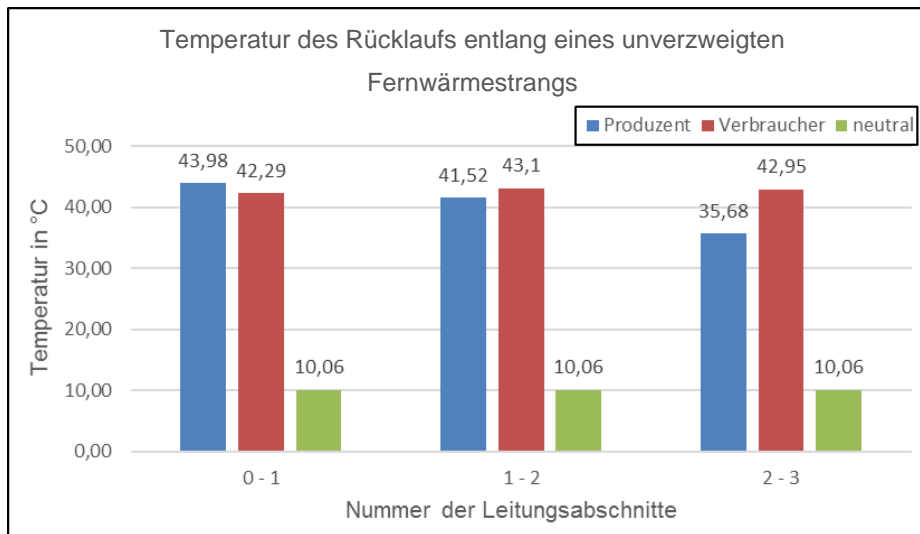


Abbildung 48 Vergleich der Rücklauftemperaturen für verschiedene Verbrauchsfälle entlang eines unverzweigten Fernwärmenetzes

Aus Sicht der Rücklaufleitung findet ein gegenteiliger Prozess statt. Verbrauchen einerseits alle Anschlüsse Leistung, so fügt jeder der Rücklaufleitung einen Massenstrom mit immer derselben Temperatur zu. Andererseits wird im Einspeisefall heizwerkseitig ständig ein Massenstrom an das erste Leitungselement zugeführt. Folglich lässt sich *Abbildung 47*, wenn man die Namensschilder „Verbraucher“ und „Produzent“ vertauscht, als Skizzierung des Vorgangs aus der Sicht der Rücklaufleitung betrachten. In *Abbildung 48* sieht man, dass für den Rücklauf gilt: Produzieren die Anschlüsse und speisen ein so fällt die Rücklauftemperatur von Heizwerk in Richtung der letzten Produzenten ab. Im Falle, dass es sich bei allen Anschlüssen um Verbraucher handelt, bleiben die Rücklauftemperaturen nahezu konstant.

8.1.4 Auswirkung auf den Massenstrom

Abbildung 49 zeigt die Werte für den Massenstrom für alle drei in Abbildung 44 skizzierten Fälle.

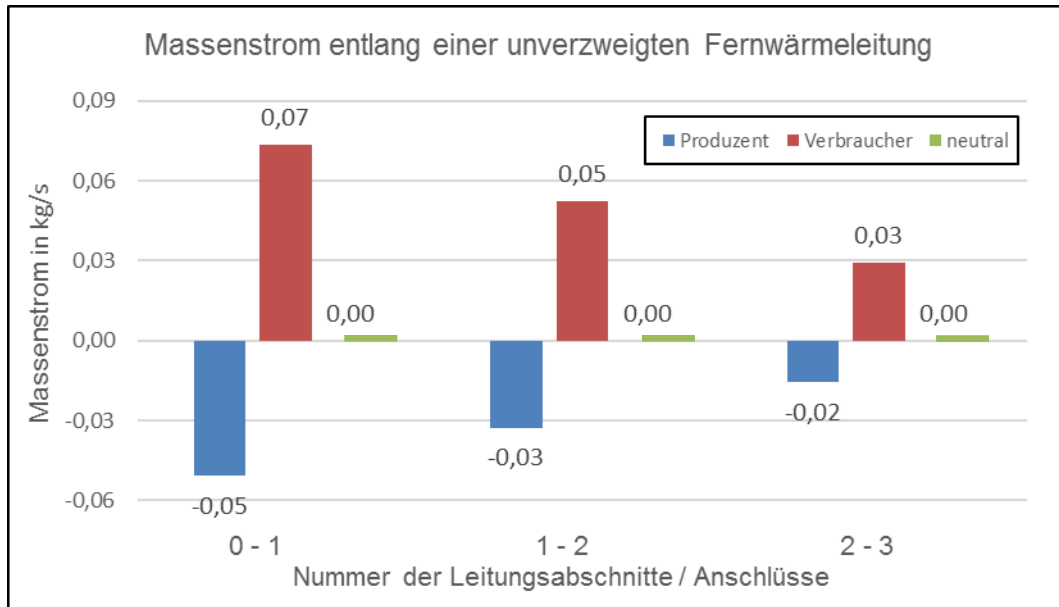


Abbildung 49 Vergleich der Massenströme für verschiedene Verbrauchsfälle entlang eines unverzweigten Fernwärmenetzes

Obwohl betragsmäßig gleich große Energiemengen eingespeist und dem Fernwärmenetz entnommen werden, ist der Massenstrom des Verbrauchsfalls betragsmäßig größer. Wie bereits besprochen sind die Leistungen, wenn alle Anschlüsse als Produzenten fungieren, geringer und somit auch die Massenströme. Denn wie bereits in der Modellierung ersichtlich, sind Massenstrom und Leistung direkt proportional.

Die Massenströme nehmen in beiden Fällen, wie erwartet, linear ab. Würde man eine Regressionskurve an beide anlegen, sähe man deutlich, dass deren Abnahmefaktoren entgegengesetzt gleich groß sind. Den Größenunterschied gibt das letzte Leitungselement vor, denn im Verbrauchsfall muss durch den Eintritt mehr Leistung eingespeist werden als im Produktionsfall hinaus fließt, da bei Ersterem auch die Verluste kompensiert werden müssen. Ist der letzte Anschluss ein Produzent, so tritt am Rohrende seine produzierte Leistung abzüglich der Verluste aus. Folglich ist am vorletzten Knoten der Betrag der Leistung für den Verbrauchsfall größer als der Betrag der Leistung für den Fall, dass dezentral eingespeist wird. Daher ist auch der Massenstrom im Verbrauchsfall größer als im Einspeisefall.

8.2 Vergleich zwischen Einspeisungs- und Verbrauchsfall anhand des Versuchsnetzes aus *Abschnitt 6*

Das in *Abschnitt 6* vorgestellte Versuchsnetz soll hier verwendet werden, um einen möglichst realistischen Einspeisefall zu demonstrieren. Hierzu werden jene Anschlüsse mit kleiner Entnahmeleistung (Annahme: Privathaushalte) in das Fernwärmenetz einspeisen. Es soll beobachtet werden, ob deren Beitrag den Verbrauch der zwei Anschlüsse, die große Energiemengen benötigen (Knoten 2 und 5) ausgleichen und wenn ja wieviel Leistung das Heizwerk noch zusätzlich bereitstellen muss. Es wird angenommen, dass dieselben Leistungen, die entnommen wurden, nun eingespeist werden. Alle einspeisenden Anschlüsse führen das Wärmeträgermedium mit einer Temperatur von 96,85°C dem Vorlauf zu.

Diese Simulationsergebnisse werden dem Abnahmefall, in dem alle Anschlüsse Verbraucher sind, gegenübergestellt.

In *Abbildung 50* ist das Fernwärmenetz aus *Abbildung 31* noch einmal dargestellt, wobei hier alle Verbraucher und Produzenten markiert sind. Die zu bzw. abgeführten Leistungsmengen bleiben unverändert.

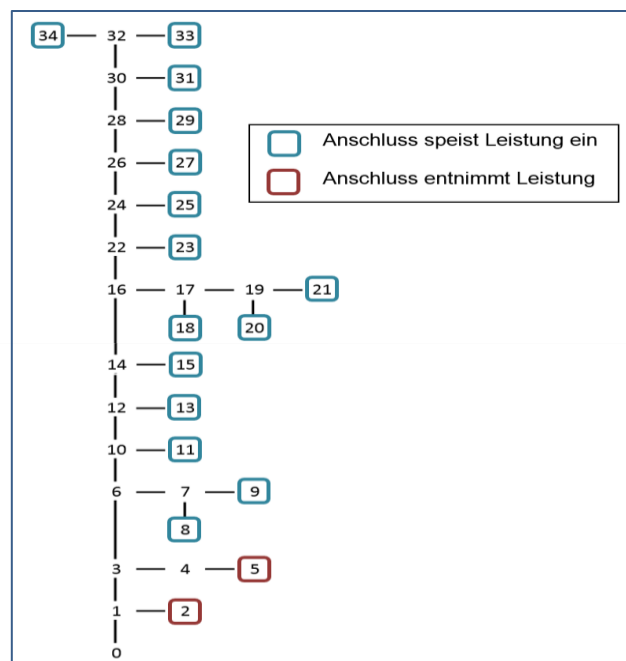


Abbildung 50 Versuchsnetz mit Markierung der einspeisenden und verbrauchenden Anschlüsse

8.2.1 Auswertung des Hauptstrangs

Einen ausgezeichneten Überblick über das Fernwärmenetz während der gesamten Simulationsdauer bieten Flächendiagramme. Da das Netz verzweigt und die Darstellung in einem Flächendiagramm nur entlang einer Achse möglich ist, wird der Hauptstrang betrachtet.

Es folgen also Flächendiagramme, die das Verhalten des Hauptstrangs über alle Zeitschritte veranschaulichen. Dieser ist in *Abbildung 50* vertikal eingezeichnet, führt also vom Heizwerk zum Knoten 1, 3, 6, 10 und so weiter.

8.2.1.1 Flächendiagramm der Leistungen

Auf den ersten Blick scheinen sich der Verbrauchs- und Einspeisefall kaum zu unterscheiden.

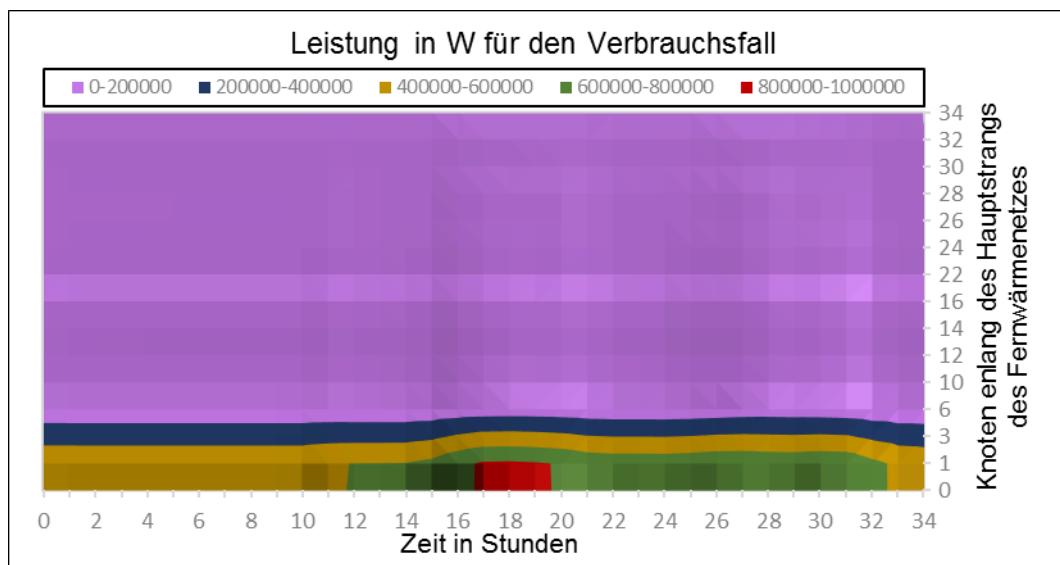


Abbildung 51 Flächendiagramm der Leistungen entlang des Hauptstrangs des Versuchsnetzes für den Verbrauchsfall

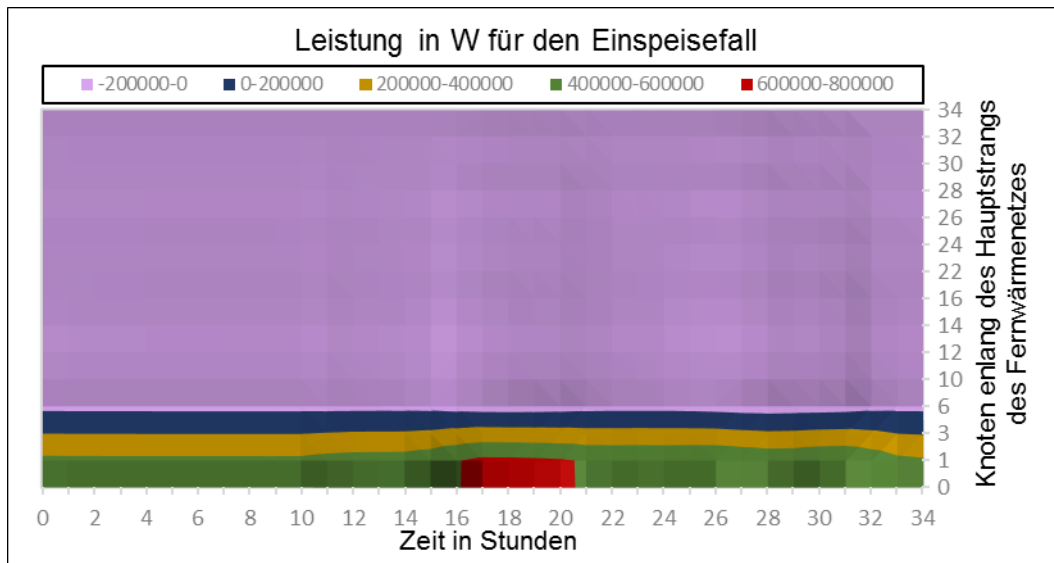


Abbildung 52 Flächendiagramm der Leistungen entlang des Hauptstrangs des Versuchsnetzes für den Einspeisefall

Erst bei genauerem Hinsehen bemerkt man Unterschiede zwischen dem Verbrauchsfall, der in *Abbildung 51* und dem Einspeisefall, der in *Abbildung 52* dargestellt ist. Im Laufe der Einschwingzeit, also der ersten 10 Stunden, bleiben für beide Fälle alle Werte nahezu gleich. Dass die Einschwingzeit für die Berechnung der Leistung nicht erforderlich ist, konnte bereits in *Abbildung 40* gezeigt werden.

Betrachtet man den Leitungsabschnitt 0-6 in beiden Abbildungen näher, wird sofort ersichtlich, dass sich die Leistung des Heizwerks reduziert hat. Diese Reduktion ist natürlich nur sehr schwach, da die „kleinen“ Produzenten bei Weitem nicht den Bedarf der zwei großen Verbraucher (Knoten 2 & 5) decken können.

Für beide Fälle ist die maximale Leistung nach 17-20 Stunden erreicht. Abzüglich der 10 Stunden Einschwingzeit entspricht dies einer Tageszeit von 7 bis 10 Uhr. Angesichts der Summenkurve aller Verbraucherleistungen in *Abbildung 32* ist dieses Ergebnis auch sinnvoll, da zu dieser Tageszeit der Verbrauch am größten ist.

8.2.1.2 Flächendiagramm der Massenströme

Bereits in *Abschnitt 7* kristallisierte sich heraus, wie eng der Massenstrom und die Leistungen eines Fernwärmenetzes verknüpft sind. Die Flächendiagramme bestätigen dies erneut. *Abbildung 52* zeigt den Verbrauchs- und *Abbildung 54* den Einspeisefall.

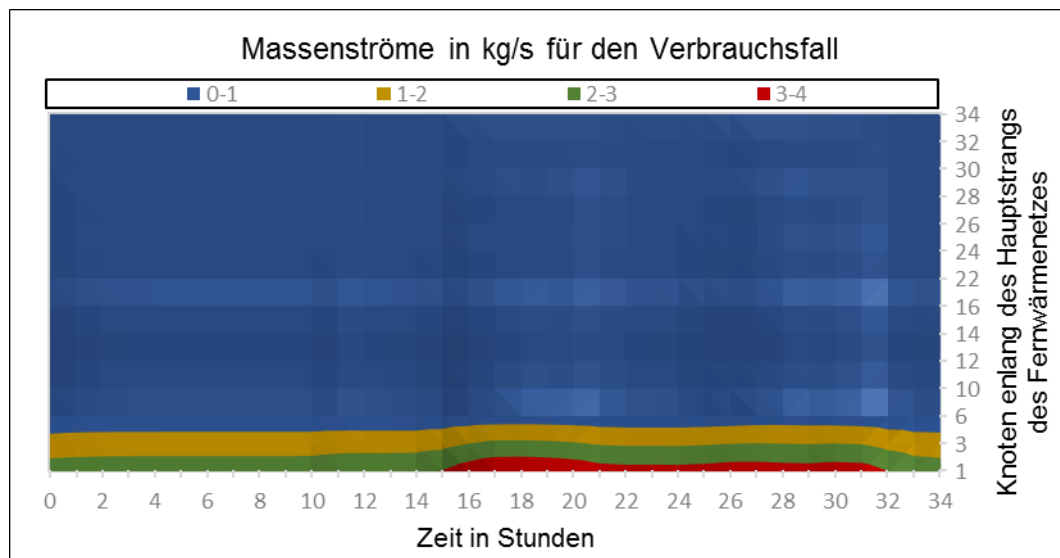


Abbildung 53 Flächendiagramm der Massenströme entlang des Hauptstrangs des Versuchsnetzes für den Einspeisefall

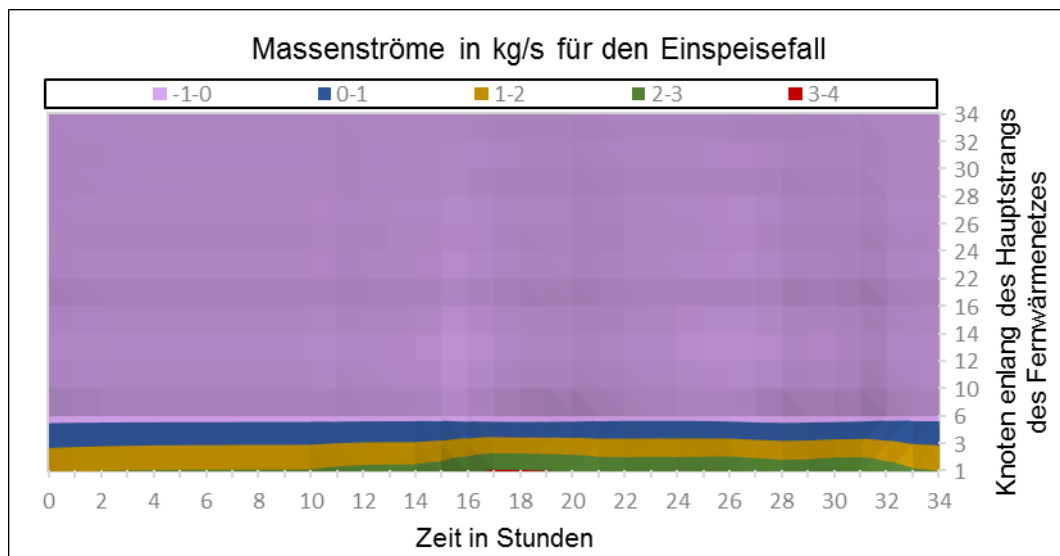


Abbildung 54 Flächendiagramm der Massenströme entlang des Hauptstrangs des Versuchsnetzes für den Einspeisefall

Analog zur Leistung sinkt der Massenstrom in den Leitungsabschnitten 1-6 für den Einspeisefall. Außerdem ist der Massenstrom der übrigen Knoten negativ, da diese in den Vorlauf einspeisen und somit die Flussrichtung ändern.

Alle Massenströme sind vom Netzende bis zum Knoten 5 negativ, da all diese Knoten einspeisen und daher das Wärmeträgermedium im Vorlauf Richtung Heizwerk fließt. Der Knoten 5 „schluckt“ den gesamten Massenstrom der Einspeiser. Das Heizwerk muss also im Einspeisefall einen geringeren Massenstrom zur Verfügung stellen. Dieser fällt jedoch geringer aus als im Verbrauchsfall.

Analog zur Leistung sind auch die Massenströme am Heizwerk morgens (zwischen der 17. und 20. Simulationsstunde) am größten.

8.2.1.3 Flächendiagramme der Temperaturen

Die Temperaturen verhalten sich wesentlich unvorhersehbarer als die Leistungen und Massenströme. Zunächst wird der Verbrauchsfall betrachtet. In *Abbildung 55* sind die Vorlauftemperaturen für alle Knoten des Hauptstrangs und alle Simulationszeitpunkte abgebildet. Hier haben die zehn Stunden Einschwingzeit durchaus ihren Sinn, dennoch nicht in vollem Ausmaß. Es ist ersichtlich, dass während der ersten drei Stunden ein nahezu konstanter Zustand für alle Leitungen eintritt und 7 Stunden anhält. Also wäre eine Einschwingzeit ab drei Stunden ausreichend.

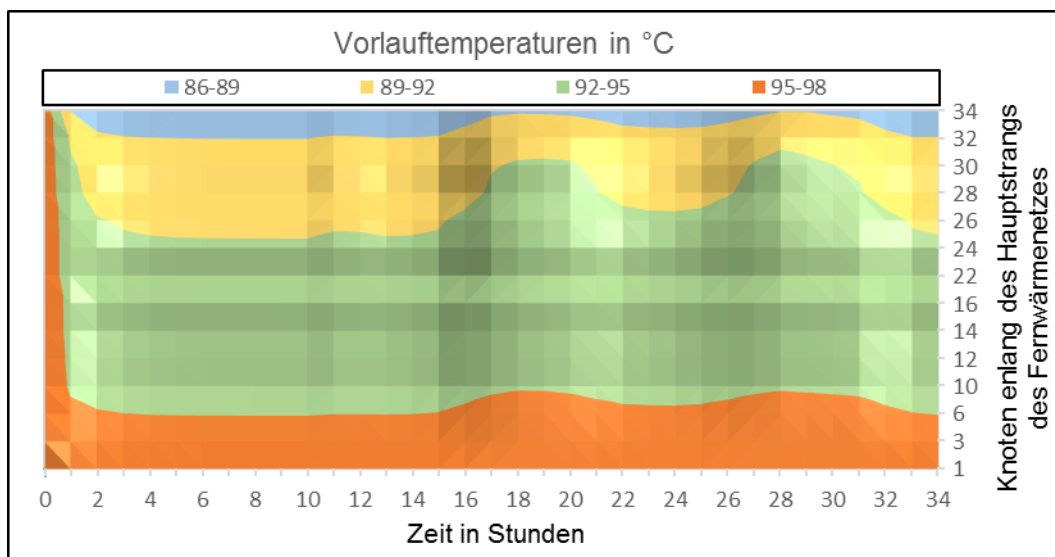


Abbildung 55 Flächendiagramm der Vorlauftemperaturen entlang des Hauptstrangs des Versuchsnetzes für den Verbrauchsfall

Außerdem lässt sich aus *Abbildung 55* die Anfangstemperatur der Vorlaufleitung erkennen. Diese ist zu Beginn und einige Augenblicke danach einheitlich rot eingefärbt.

Die erhöhte Abnahmeleistung zur Mittags- und Abendzeit ist auch bei den Vorlauftemperaturen erkennbar. Diese steigt, da der Volumenstrom des Heizwerks, der mit einer Temperatur von $96,85^{\circ}\text{C}$ dem Netz zugeführt wird, zunimmt.

Abbildung 56 zeigt, ebenfalls für den Verbrauchsfall, das Verhalten des Rücklaufs. Auch hier ist eine Einschwingzeit sinnvoll, sie ist jedoch auch hier mit zehn Stunden überdimensioniert. Zu den Tageszeiten mit erhöhtem Energiebedarf der 2 großen Verbraucher, erwärmt sich der Rücklauf in deren Nähe. Laut Datensatz der bereits in *Abschnitt 6* vorgestellt wurde, führen alle Anschlüsse das Wärmeträgermedium mit $46,85^{\circ}\text{C}$ dem Rücklauf zu. Erhöht sich deren Energiebedarf, so steigt der Massenstrom vom Vorlauf zum Verbraucher wie auch vom Verbraucher zum Rücklauf. Daher wird mehr Volumen mit einer Temperatur von $46,85^{\circ}\text{C}$ von den Verbrauchern den Rücklaufleitungen zugeführt.

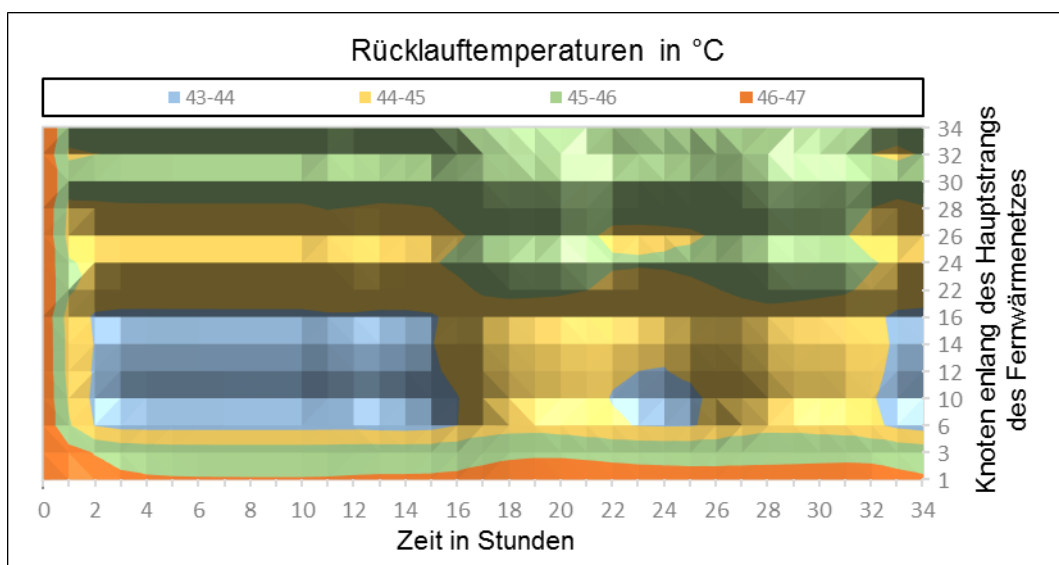


Abbildung 56 Flächendiagramm der Rücklauftemperaturen entlang des Hauptstrangs des Versuchsnetzes für den Verbrauchsfall

Wie wirkt sich nun der Einspeisefall auf die Temperaturen in Vor- und Rücklauf aus? *Abbildung 57* zeigt die Temperaturverteilung im Vorlauf. Die Abkühlung des Hauptstrangs erfolgt nun vom letzten Knoten (=34) zum Knoten Nummer 6. Das entspricht auch der Flussrichtung des Wärmeträgermediums. Da das Heizwerk immer noch in das Fernwärmenetz einspeist, ist der Bereich rund ums Heizwerk stark erwärmt.

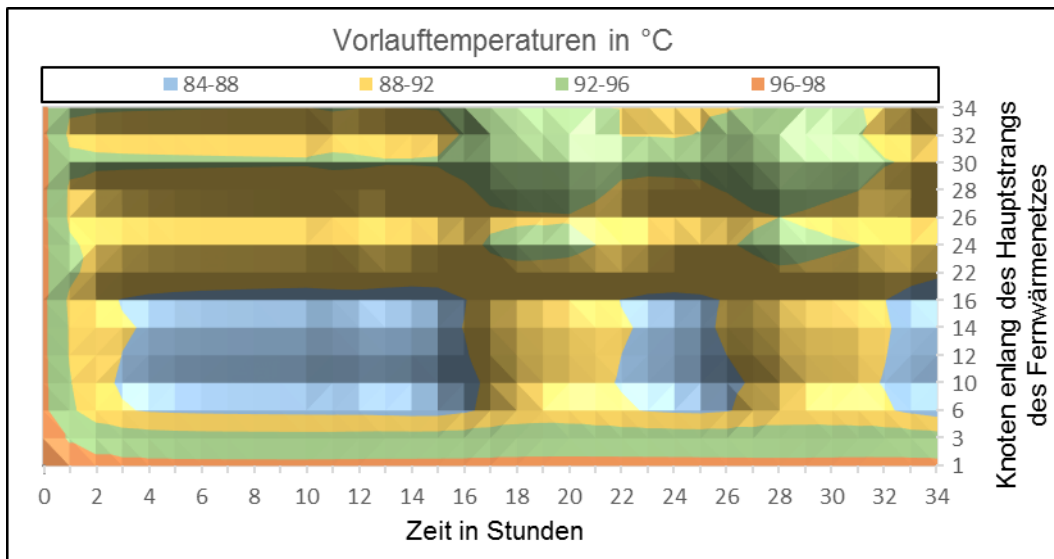


Abbildung 57 Flächendiagramm der Vorlauftemperaturen entlang des Hauptstrangs des Versuchsnetzes für den Einspeisefall

Augenscheinlich ist, dass die Rücklauftemperaturen für den Einspeisefall wesentlich höher ist als im Verbrauchsfall. Wie auch die Vorlaufleitungen kühlen die Rücklaufleitungen vom letzten Verbraucher bis zum Heizwerk ab.

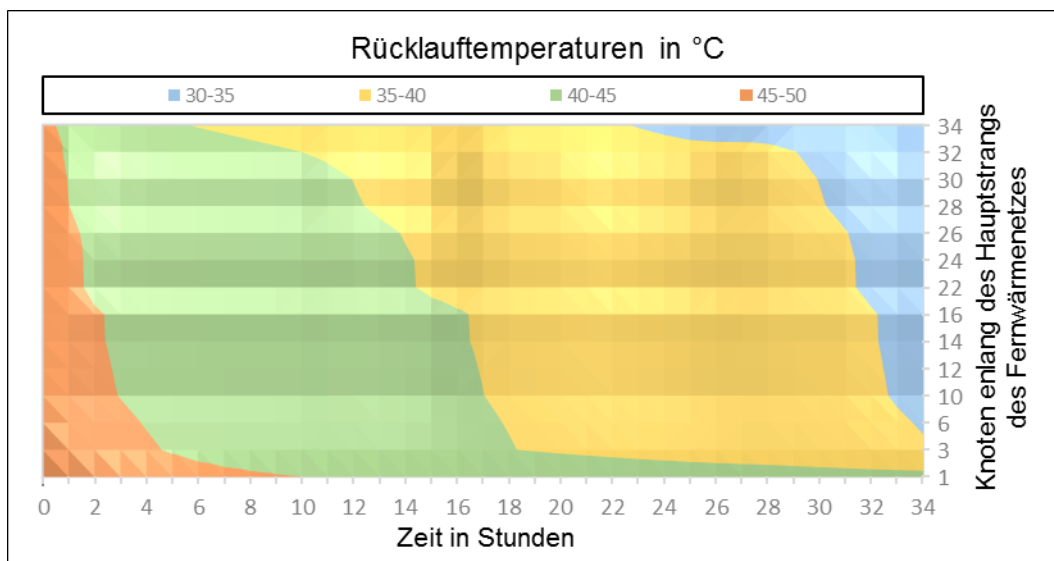


Abbildung 58 Flächendiagramm der Rücklauftemperaturen entlang des Hauptstrangs des Versuchsnetzes für den Einspeisefall

8.3 Auswirkung auf das Heizwerk

Wie sich die Bedingungen aus Sicht des Heizwerks ändern, wenn bestimmte Anschlüsse einspeisen oder verbrauchen, ist von besonderem Interesse. Daher sollen die auftretenden Temperaturen, Massenströme und Leistungen am Heizwerk für den Verbrauchsfall und den Einspeisefall gegenübergestellt werden.

Der Massenstromverlauf, den das Heizwerk zur Verfügung stellen muss, sinkt im Einspeisefall. Die Kurvenverläufe des Einspeise- und Verbrauchsfalls sind nahezu parallel, weisen also einen beinahe konstanten Abstand zueinander auf. Da dieselbe Leistungsmenge und somit Masse, die im Verbrauchsfall entnommen wird, im Einspeisefall zugeführt wird, ist der Verlauf plausibel. Die Massenströme in *Abbildung 59* und die Leistung in *Abbildung 60* verhalten sich wie erwartet. Für den Einspeisefall wird weniger Leistung und Massenstrom vom Heizwerk benötigt. Da Einspeise- und Verbrauchsfall die gleichen Leistungsmengen einmal zu- und einmal abführen, ähneln sich die Kurven.

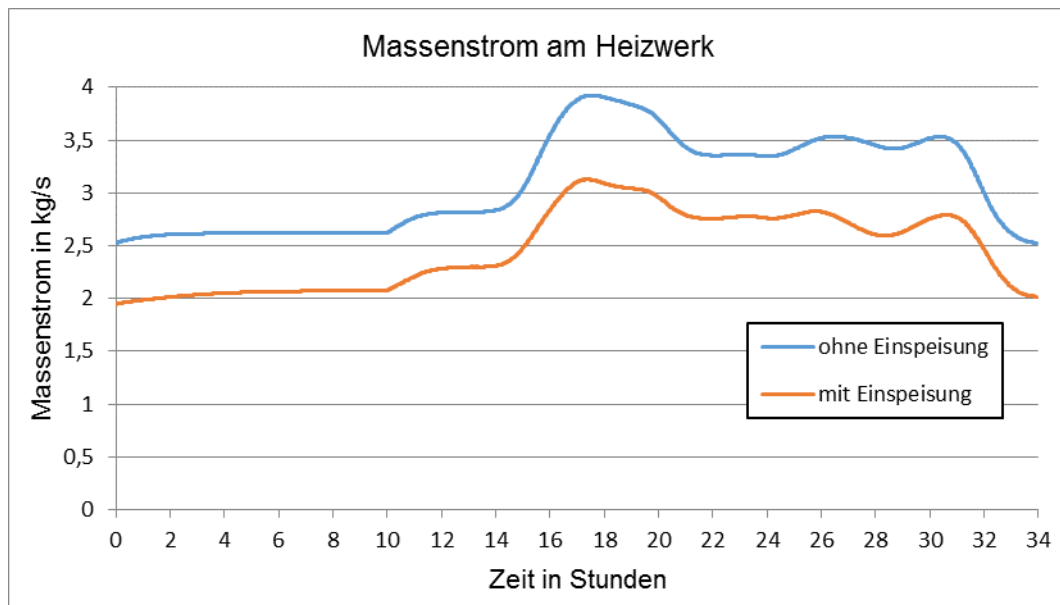


Abbildung 59 Massenstromverlauf am Heizwerk für den Einspeise- und Verbrauchsfall

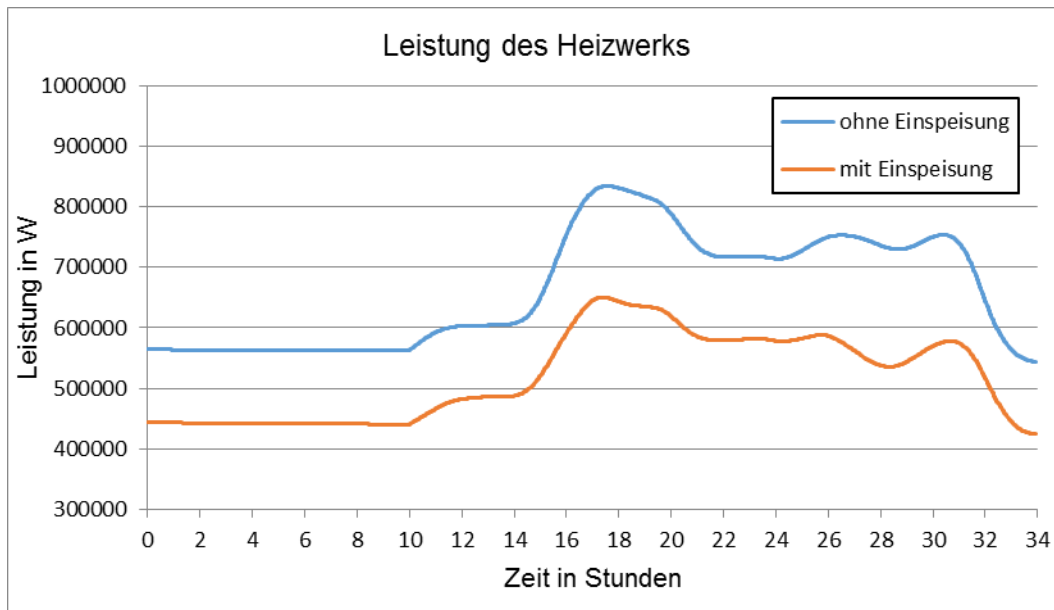


Abbildung 60 Leistungsverlauf am Heizwerk für den Einspeise- und Verbrauchsfall

Abbildung 61 zeigt die Vorlauftemperaturen am Heizwerk für beide Fälle.

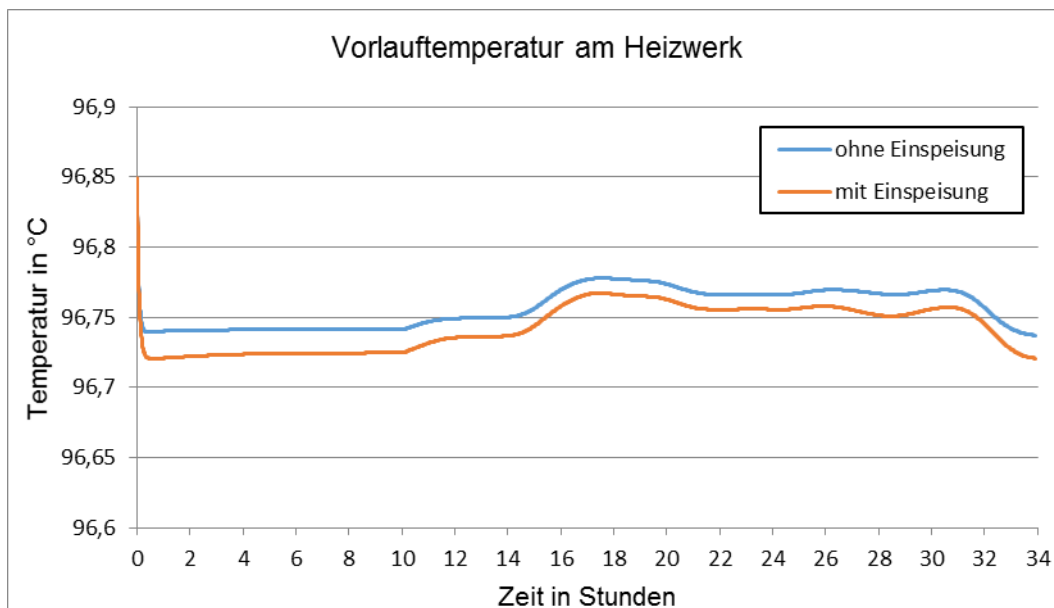


Abbildung 61 Verlauf der Vorlauftemperaturen am Heizwerk für den Einspeise- und Verbrauchsfall

Hier zeigt sich eine geringe Senkung der Vorlauftemperatur im Falle der Einspeisung. Für beide Fälle muss das Heizwerk dem Fernwärmenetz Massenströme zuführen. Das Heizwerk liefert immer eine Temperatur von 96,85°C, also jene Anfangstemperatur, die zu Beginn der Simulation für das ganze Netz gewählt wurde.

Sinkt nun der Massenstrom wie im Falle der Einspeisung, so sinkt auch der Volumenanteil des Wärmeträgermediums mit $96,85^{\circ}\text{C}$. Folglich sinkt die Gesamttemperatur in dem Leitungsabschnitt vor dem Heizwerk.

Der Verlauf der Rücklauftemperatur in Heizwerknähe unterscheidet sich drastischer für beide Fälle (siehe *Abbildung 62*)

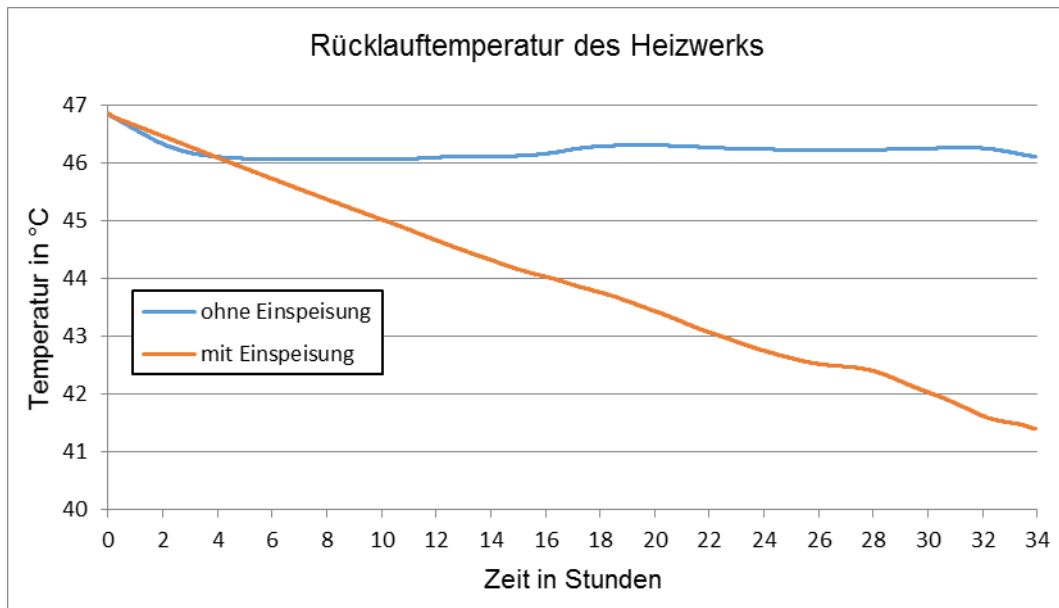


Abbildung 62 Verlauf der Rücklauftemperaturen am Heizwerk für den Einspeise- und Verbrauchsfall

Während für den Verbrauchsfall die Temperatur nahezu konstant bleibt ($\sim 46^{\circ}\text{C}$) fällt sie im Einspeisefall in Heizwerknähe stark ab. Die einspeisenden Anschlüsse entnehmen dem Rücklauf Leistung und somit Volumen, wobei die Entnahmetemperatur jener Temperatur entspricht, die der Rücklauf aktuell aufweist. Im Verbrauchsfall führen die Anschlüsse dem Rücklauf einen Volumenstrom mit $46,85^{\circ}\text{C}$ zu. Somit sorgen sie dafür, dass das Fernwärmerücklaufsystem nicht zu stark abkühlt.

9 Diskussion

Die quasistationäre Simulation erzielt nahezu dieselben Ergebnisse wie die dynamische [1], die hier als Vergleich herangezogen wurde. Es wurden die Ergebnisse eines Fernwärmenetzes (*Abbildung 31*), das ausschließlich verbrauchende Anschlüsse aufweist, validiert. Dabei ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung aller Ergebnisse für kleine Zeitschrittweiten. Bei größeren Zeitschrittweiten weichen die Ergebnisse der Massenströme zunehmend ab. Die Vor- und Rücklauftemperaturen zeigen verhältnismäßig geringere Abweichungen zwischen dynamischer und quasistationärer Simulation. Die Leistungen hingegen werden nur minimal von der Zeitschrittweite beeinflusst, sie kommen also auch bei sehr groß gewählter Zeitschrittweite ausreichend nahe an die dynamischen Ergebnisse heran. Diese Zusammenhänge können *Abbildung 41* und *Abbildung 42* entnommen werden.

Für das eben erwähnte Netz wird auch der Fall betrachtet, dass einige Anschlüsse als Einspeiser fungieren. Für den Einspeisefall sind keine dynamisch simulierten Ergebnisse vorhanden und daher ist kein Vergleich möglich. Die Verifikation des Tools für den Einspeisefall erfolgt also ausschließlich anhand eines kleinen Beispielnetzes (*Abbildung 43*). Da die Simulationsergebnisse dieser kleinen Plausibilitätsstudie wie erwartet ausfallen und die Ergebnisse des Netzes aus *Abbildung 31* für den Verbrauchsfall mit der dynamischen Simulation beinahe übereinstimmen, wird davon ausgegangen, dass auch die Ergebnisse des Einspeisefalles vertrauenswürdig sind. Außerdem scheint das Verhalten des Netzes im Einspeisefall schlüssig. Kurzfassend heißt das, dass der Einspeisefall hier simuliert und analysiert wurde, die Ergebnisse wurden jedoch nicht mit denen aus anderen Simulationen verglichen.

10 Ausblick

Eine wesentliche Verbesserung und Erweiterung des Tools wäre das Hinzufügen der Drücke. Diese wurden hier nicht berücksichtigt. Die Leitungsdrücke beziehungsweise die notwendige Druckspreizung zwischen Vor- und Rücklaufleitung würde das quasistationäre Tool vervollständigen. Auch die Druckverluste sollten zusammen mit den Wärmeverlusten zu einem Gesamtverlust der Leitung vereint werden.

Außerdem gibt es noch Verbesserungspotential bei der Eintragung der Verbraucherdaten ins Tabellenblatt „Daten“. Benutzerseitig ist dieses Tabellenblatt am aufwendigsten zu bedienen. Je nachdem, in welcher Form Verbraucherdatensätze vorliegen, lässt sich dies in „Daten“ anpassen. Am optimalsten wäre eine Einlese-Routine, die durch Eingabe eines Dateipfads selbstständig alle Daten ins Tabellenblatt schreibt.

Selbstverständlich lässt sich wie bei jedem Code nach Schwachstellen und aufwendigen Routinen suchen, die die Rechendauer unnötig verlängern. Natürlich wurde im Zuge dieser Arbeit darauf geachtet, die Rechendauer möglichst kurz zu halten, jedoch kann nicht gesagt werden, ob das auch gelungen ist. Eine erneute Durchsicht der Programmschleifen könnte also die Berechnungen beschleunigen und somit den Zeitaufwand verkürzen.

Es hat sich während der Anwendung des VBA-Tools auch gezeigt, dass die Datenmengen sehr rasch ansteigen. Eine nicht unwesentliche Verbesserung wäre es, die Simulationsergebnisse in ein anderes Excel-File auszulagern.

Der Vergleich zwischen der dynamischen und quasistationären Simulation weist geringe Fehler auf. Vor allem bei optimaler Wahl der Zeitschrittweite. Hier wurden einfach einige Zeitschrittweiten ausprobiert und jene mit dem geringsten Fehler für optimal befunden. Dass dies ohne die dynamischen Vergleichswerte nicht möglich ist liegt auf der Hand. Daher wäre es interessant zu wissen, ob es eine Möglichkeit gibt einen idealen Zeitschrittweite-Wert für ein beliebiges Netz zu finden, von dem die Abweichungen zum dynamisch simulierten Netz nicht bekannt sind.

11 Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| ABBILDUNG 1 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES STRAHLENNETZES. [2] | 1 |
| ABBILDUNG 2 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES RINGNETZES. [2] | 2 |
| ABBILDUNG 3 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES MASCHENNETZES. [2] | 2 |
| ABBILDUNG 4 | PROZENTUELLE ANTEILE DER BRENNSTOFFE ZUR WÄRMEERZEUGUNG IN ÖSTERREICH. STAND: 2014 [3] | 3 |
| ABBILDUNG 5 | PROZENTUELLE ANTEILE DER HEIZUNGSARTEN IN ÖSTERREICHISCHEN HAUSHALTEN. [4] . | 4 |
| ABBILDUNG 6 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER FUNKTIONSWEISE DER EINSPEISUNG DURCH VORLAUFANHEBUNG. [4] | 5 |
| ABBILDUNG 7 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER FUNKTIONSWEISE DER EINSPEISUNG DURCH RÜCKLAUFANHEBUNG. [4] | 6 |
| ABBILDUNG 8 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER FUNKTIONSWEISE DER EINSPEISUNG VOM RÜCK- IN DEN VORLAUF..... | 6 |
| ABBILDUNG 9 | GESPEICHERTE ENERGIEMENGE ENTLANG DES QUERSCHNITTS EINER FERNWÄRMELEITUNG | 12 |
| ABBILDUNG 10 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES ROHRABSCHNITTS, INKL. BEZEICHNUNGEN DER MAÑE | 13 |
| ABBILDUNG 11 | LINKS: VERBRAUCHER ENTNIMMT LEISTUNG AUS DEM FERNWÄRMENETZ, RECHTS: VERBRAUCHER SPEIST LEISTUNG INS FERNWÄRMENETZ EIN..... | 14 |
| ABBILDUNG 12 | SEGMENTIERUNG DES MASSE- UND WÄRMETRANSPORTES IN ZWEI ABLÄUFE..... | 17 |
| ABBILDUNG 13 | ERLÄUTERUNG DER NUMMERIERUNGSVORSCHRIFT FÜR DIE KNOTEN IN EINEM FERNWÄRMENETZ ANHAND EINES SCHEMAS | 18 |
| ABBILDUNG 14 | MASSENBILANZ BEZÜGLICH DER VOR- (ROT) UND RÜCKLAUFLEISTUNG (BLAU) | 19 |
| ABBILDUNG 15 | ENERGIEBILANZ BEZÜGLICH DES VOR- (ROT) UND RÜCKLAUFS (BLAU) FÜR DEN FALL, DASS DER VERBRAUCHER LEISTUNGSABNEHMER IST | 21 |

| | | |
|--------------|---|----|
| ABBILDUNG 16 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER TEMPERATURBERECHNUNG ENTLANG EINES FERNWÄRMESTRANGS | 24 |
| ABBILDUNG 17 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER IN EIN LEITUNGSELEMENT STRÖMENDEN VOLUMINA | 26 |
| ABBILDUNG 18 | AUFBAU DES TABELLENBLATTS FIXE WERTE | 28 |
| ABBILDUNG 19 | AUFBAU DES TABELLENBLATTS EINGABE | 29 |
| ABBILDUNG 20 | FENSTER MIT ABSCHÄTZUNG DER RECHENDAUER, WIRD NACH BETÄTIGUNG DER „CALCULATE“-SCHALTFLÄCHE GEÖFFNET | 30 |
| ABBILDUNG 21 | AUFBAU DES TABELLENBLATTS VERBINDUNGEN | 31 |
| ABBILDUNG 22 | AUFBAU DES TABELLENBLATTS DATEN | 32 |
| ABBILDUNG 23 | SCHEMA FÜR DIE EINTRAGUNG VON VERBRAUCHERDATEN, OBEN (FALSCH) UND UNTEN (RICHTIG) | 33 |
| ABBILDUNG 24 | AUFBAU DES TABELLENBLATTS SIMULATION | 33 |
| ABBILDUNG 25 | AUFBAU DES TABELLENBLATTS AUSWERTUNG; OHNE KONTROLLKÄSTCHEN | 35 |
| ABBILDUNG 26 | AUFBAU DES TABELLENBLATTS AUSWERTUNG; MIT KONTROLLKÄSTCHEN | 35 |
| ABBILDUNG 27 | AUFBAU DES TABELLENBLATTS PLOT | 36 |
| ABBILDUNG 28 | AUFBAU DES TABELLENBLATTS STOFFWERTE | 36 |
| ABBILDUNG 29 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES MAKRO-AUFBAUS | 37 |
| ABBILDUNG 30 | VERSUCHSNETZ MIT VIER KNOTEN UND DREI VERBRAUCHERN | 45 |
| ABBILDUNG 31 | STRUKTUR EINES BEISPIELNETZES MIT VERBRAUCHERDATEN | 49 |
| ABBILDUNG 32 | LEISTUNGSSTRAKE VERBRAUCHER IM VERGLEICH ZU LEISTUNGSSCHWACHEN ANSCHLUSS | 50 |
| ABBILDUNG 33 | LEISTUNGEN DER ‚KLEINEN‘ VERBRAUCHER ÜBER 34 STUNDEN | 51 |
| ABBILDUNG 34 | VERLAUF DER AUFSUMMIERTEN LEISTUNGEN ALLER AKTIVEN ANSCHLÜSSE DES VERSUCHSNETZES | 51 |
| ABBILDUNG 35 | DURCHMESSER ALLER LEITUNGSABSCHNITTE ENTLANG DES HAUPTSTRANGS | 52 |

| | | |
|--------------|---|----|
| ABBILDUNG 36 | VERLÄUFE DER VORLAUFTEMPERATUR AM HEIZWERK FÜR VERSCHIEDENE ZEITSCHRITTWEITEN..... | 54 |
| ABBILDUNG 37 | VERLÄUFE DER RÜCKLAUFTEMPERATUR AM HEIZWERK FÜR VERSCHIEDENE ZEITSCHRITTWEITEN..... | 55 |
| ABBILDUNG 38 | VERGLEICH DES MASSENSTROMVERLAUFS ÜBER 34 STUNDEN AM HEIZWERK ZWISCHEN VERSCHIEDENEN (GRÖßEREN) ZEITSCHRITTWEITEN (VBA) UND MATLAB..... | 57 |
| ABBILDUNG 39 | VERGLEICH DES MASSENSTROMVERLAUFS ÜBER 34 STUNDEN AM HEIZWERK ZWISCHEN VERSCHIEDENEN (FEINEREN) ZEITSCHRITTWEITEN (VBA) UND MATLAB..... | 57 |
| ABBILDUNG 40 | VERLÄUFE DER LEISTUNG AM HEIZWERK BEI VARIATION DER ZEITSCHRITTWEITE | 58 |
| ABBILDUNG 41 | VERGLEICH ZWISCHEN DYNAMISCHEN UND QUASISTATIONÄREN ERGEBNISSE FÜR VERSCHIEDENE, GROBE EINSTELLUNGEN DER ZEITSCHRITTWEITE | 59 |
| ABBILDUNG 42 | VERGLEICH ZWISCHEN DYNAMISCHEN UND QUASISTATIONÄREN ERGEBNISSE FÜR VERSCHIEDENE, FEINERE EINSTELLUNGEN DER ZEITSCHRITTWEITE | 60 |
| ABBILDUNG 43 | SKIZZE EINES UNVERZWEIGTEN FERNWÄRMENETZES MIT 3 ANSCHLÜSSEN | 63 |
| ABBILDUNG 44 | SKIZZE DER DREI MÖGLICHEN ANSCHLUSSARTEN EINES KNOTENS ANS FERNWÄRMENETZ..... | 64 |
| ABBILDUNG 45 | VERGLEICH DER LEISTUNGEN FÜR VERSCHIEDENE VERBRAUCHSFÄLLE ENTLANG EINES UNVERZWEIGTEN FERNWÄRMENETZES..... | 64 |
| ABBILDUNG 46 | VERGLEICH DER VORLAUFTEMPERATUREN FÜR VERSCHIEDENE VERBRAUCHSFÄLLE ENTLANG EINES UNVERZWEIGTEN FERNWÄRMENETZES | 66 |
| ABBILDUNG 47 | SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER VORLAUFTEMPERATURBERECHNUNG IM VERBRAUCHS- UND EINSPEISEFALL..... | 67 |
| ABBILDUNG 48 | VERGLEICH DER RÜCKLAUFTEMPERATUREN FÜR VERSCHIEDENE VERBRAUCHSFÄLLE ENTLANG EINES UNVERZWEIGTEN FERNWÄRMENETZES | 68 |
| ABBILDUNG 49 | VERGLEICH DER MASSENSTRÖME FÜR VERSCHIEDENE VERBRAUCHSFÄLLE ENTLANG EINES UNVERZWEIGTEN FERNWÄRMENETZES..... | 69 |
| ABBILDUNG 50 | VERSUCHSNETZ MIT MARKIERUNG DER EINSPEISENDEN UND VERBRAUCHENDEN ANSCHLÜSSE | 70 |

| | | |
|--------------|--|----|
| ABBILDUNG 51 | FLÄCHENDIAGRAMM DER LEISTUNGEN ENTLANG DES HAUPTSTRANGS DES VERSUCHSNETZES FÜR DEN VERBRAUCHSFALL..... | 71 |
| ABBILDUNG 52 | FLÄCHENDIAGRAMM DER LEISTUNGEN ENTLANG DES HAUPTSTRANGS DES VERSUCHSNETZES FÜR DEN EINSPEISEFALL | 72 |
| ABBILDUNG 53 | FLÄCHENDIAGRAMM DER MASSENSTRÖME ENTLANG DES HAUPTSTRANGS DES VERSUCHSNETZES FÜR DEN EINSPEISEFALL | 73 |
| ABBILDUNG 54 | FLÄCHENDIAGRAMM DER MASSENSTRÖME ENTLANG DES HAUPTSTRANGS DES VERSUCHSNETZES FÜR DEN EINSPEISEFALL | 73 |
| ABBILDUNG 55 | FLÄCHENDIAGRAMM DER VORLAUFTEMPERATUREN ENTLANG DES HAUPTSTRANGS DES VERSUCHSNETZES FÜR DEN VERBRAUCHSFALL..... | 74 |
| ABBILDUNG 56 | FLÄCHENDIAGRAMM DER RÜCKLAUFTEMPERATUREN ENTLANG DES HAUPTSTRANGS DES VERSUCHSNETZES FÜR DEN VERBRAUCHSFALL..... | 75 |
| ABBILDUNG 57 | FLÄCHENDIAGRAMM DER VORLAUFTEMPERATUREN ENTLANG DES HAUPTSTRANGS DES VERSUCHSNETZES FÜR DEN EINSPEISEFALL | 76 |
| ABBILDUNG 58 | FLÄCHENDIAGRAMM DER RÜCKLAUFTEMPERATUREN ENTLANG DES HAUPTSTRANGS DES VERSUCHSNETZES FÜR DEN EINSPEISEFALL | 76 |
| ABBILDUNG 59 | MASSENSTROMVERLAUF AM HEIZWERK FÜR DEN EINSPEISE- UND VERBRAUCHSFALL ... | 77 |
| ABBILDUNG 60 | LEISTUNGSVERLAUF AM HEIZWERK FÜR DEN EINSPEISE- UND VERBRAUCHSFALL | 78 |
| ABBILDUNG 61 | VERLAUF DER VORLAUFTEMPERATUREN AM HEIZWERK FÜR DEN EINSPEISE- UND VERBRAUCHSFALL | 78 |
| ABBILDUNG 62 | VERLAUF DER RÜCKLAUFTEMPERATUREN AM HEIZWERK FÜR DEN EINSPEISE- UND VERBRAUCHSFALL | 79 |

12 Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| TABELLE 1 | BEISPIEL EINER FERNWÄRMELEITUNG | 9 |
| TABELLE 2 | MÖGLICHE FORM DER ANGABE VON MESSWERTEN EINES THERMISCHEN NETZES | 15 |
| TABELLE 3 | STOFFWERTE VON WASSER, STAHL UND POLYURETHAN..... | 16 |
| TABELLE 4 | AUSGABE EINES SIMULATIONSLAUFS | 19 |
| TABELLE 5 | AUFLISTUNG DER TABELLENBLÄTTER, DIE VOM VBA MAKRO EINGELESEN WERDEN..... | 39 |
| TABELLE 6 | WEITERE KONSTANTE WERTE, DIE „FIX VALUES“ EINLIEST..... | 40 |
| TABELLE 7 | AUFLISTUNG DER STOFFWERTE. | 41 |
| TABELLE 8 | KONSTANTEN, DIE ZUR DURCHFÜHRUNG DER ITERATIONEN BENÖTIGT WERDEN. | 42 |
| TABELLE 9 | ZÄHLVARIABLEN, DIE WÄHREND DER ITERATIONEN BENÖTIGT WERDEN | 43 |
| TABELLE 10 | IN ARRAYS GESPEICHORTE DATEN..... | 44 |
| TABELLE 11 | SIMULATIONSERGEBNISSE DER 6 TESTLÄUFE FÜR DAS HEIZWERK | 47 |
| TABELLE 12 | ABWEICHUNG ZWISCHEN DEN ERGEBNISSEN DER DYNAMISCHEN UND QUASISTATIONÄREN SIMULATION FÜR VERSCHIEDENE ZEITSCHRITTWERTE | 59 |
| TABELLE 13 | RECHENDAUER BEI VERSCHIEDENEN ZEITSCHRITTWEITE-EINSTELLUNGEN FÜR DIE SIMULATION EINES TAGES BEI EINEM 34-KNOTEN NETZ..... | 61 |

13 Quellenverzeichnis

- [1] J. Nagler, *Dynamische Simulation eines bestehenden Fernwärmenetzes mit Matlab/Simscape*, Wien, 2014.
- [2] „Ingenieurbüro Junge,“ Mai 2016. [Online]. Available: <http://www.ing-buero-junge.de/html/fern-nahwaerme.html>.
- [3] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, „Energienstatus Österreich 2015,“ 2015.
- [4] D. Reiterer, „AEE Erneuerbare Energie NOW,“ Mai 2014. [Online]. Available: <http://www.aee-now.at/cms/fileadmin/downloads/projekte/bine/Endbericht%20BiNe.pdf>.
- [5] „Fernwärme,“ Juni 2016. [Online]. Available: <http://www.fernwaerme.at/zukunft/23/>.
- [6] „Fernwärme,“ Jänner 2016. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Fernw%C3%A4rme>.
- [7] „Isoplus,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.isoplus.at/tags/nah-fernwaerme>.
- [8] Wärmeversorgungsunternehmen, FGW- Fachverband der Gas- und, „Erdgas und Fernwärme in Österreich, Zahlenspiegel 2015,“ Wien, 2015.
- [9] Wärmeversorgungsunternehmen, FGW Fachverband der Gas- und, „Erdgas und Fernwärme in Österreich, Zahlenspiegel 2015,“ Wien, 2015.

- [10] S. K. Hans Dieter Baehr, Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendung, Berlin: Springer, 2006.
- [11] T. W. Peter Böckh, Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis, Berlin: Springer, 2009.
- [12] Isoplus Fernwärmetechnik GmbH, „Projektierung,“ 2005.

14 Anhang A - VBA Code

```
'Tabellenblätter
Public eing As Worksheet
Public verb As Worksheet
Public daten As Worksheet
Public sim As Worksheet
Public plot As Worksheet
Public stoff As Worksheet
Public aus As Worksheet
Public fixVal As Worksheet

' "Eingabe"
Public firstReing As Integer
Public firstCeing As Integer

' "Verbindungen"
Public firstRverb As Integer
Public lastRverb As Integer
Public firstCverb As Integer
Public colFrom As Integer
Public colTo As Integer

' "Daten"
Public firstRdaten As Integer
Public lastRdaten As Long
Public firstCdaten As Integer
Public lastCdaten As Integer
```

```
' "Simulation"
Public firstRsim As Integer
Public firstCsim As Integer

' "Stoffwerte"
Public firstRstoff As Integer
Public firstCstoff As Integer

' "Auswertung"
Public firstRaus As Integer
Public lastRaus As Integer
Public firstCaus As Integer
Public lastCaus As Integer

' Stoffwerte, Einbautiefe, Abstand VL-RL
Public CpSt As Double
Public CpW As Double
Public rhoSt As Double
Public rhoW As Double
Public lambdaE As Double
Public lambdaPU As Double
Public gapVLRl As Single
Public hm As Single

' Konstanten
Public RbetNodesDaten As Long
Public lastNode As Integer
Public SimDuration As Long
Public StepSize As Single
Public DataFactorSim As Integer

' Zählvariablen
```



```
Public NextTimeStep As Long
Public ActualTimeStep As Long
Public RTimeStepDaten As Long
Public RToNodeDaten As Long
Public FromNode As Integer
Public ToNode As Integer
Public mDotUser As Double
Public powerUser As Double

' weitere
Public NoMoreData As Boolean
Public FunctionFailed As Boolean
Public start As Long

' Arrays
Dim lastNodes() As Variant
Dim RowNode() As Variant
Dim UserMassFlows() As Variant
Dim TempVLtemporary() As Variant
Dim TempRLtemporary() As Variant
Dim ChBoxes() As Variant
Dim data() As Variant
```

```
Public Sub FixValues()
```

```
' #####
#####
' #####
#####
' #####
#####
```

' FIXE WERTE - Bezeichnungen der Tabellenblätter, Startwerte, etc.

On Error GoTo fehler 'Errorhandler

Set fixVal = Sheets("Fixe Werte")

nameEing = fixVal.Cells(8, 3).Value

nameVerb = fixVal.Cells(9, 3).Value

nameDaten = fixVal.Cells(10, 3).Value

nameAus = fixVal.Cells(11, 3).Value

nameSim = fixVal.Cells(12, 3).Value

namePlot = fixVal.Cells(13, 3).Value

nameStoff = fixVal.Cells(14, 3).Value

'Bezeichnungen der Tabellenblätter

Set daten = Sheets(nameDaten)

Set eing = Sheets(nameEing)

Set sim = Sheets(nameSim)

Set verb = Sheets(nameVerb)

Set stoff = Sheets(nameStoff)

Set plot = Sheets(namePlot)

Set aus = Sheets(nameAus)

'Formatierung der Zeitspalte in "Simulation"

sim.Columns("B").NumberFormat = "#,##0.00"

'erste beschriebene Zeile/Spalte im Tabellenblatt "Daten"

firstRdaten = fixVal.Cells(10, 4).Value 'erste beschriebene Zeile

firstCdaten = fixVal.Cells(10, 5).Value 'erste beschriebene Spalte

'erste beschriebene Zeile/Spalte im Tabellenblatt "Eingabe"

```
firstReing = fixVal.Cells(8, 4).Value 'erste beschriebene Zeile
firstCeing = fixVal.Cells(8, 5).Value 'erste beschriebene Spalte

'erste beschriebene Zeile/Spalte im Tabellenblatt "Verbindungen"
firstRverb = fixVal.Cells(9, 4).Value 'erste beschrieben Zeile
firstCverb = fixVal.Cells(9, 5).Value 'erste beschrieben Spalte

'erste beschriebene Zeile/Spalte im Tabellenblatt "Simulation"
firstRsim = fixVal.Cells(12, 4).Value 'erste zu beschreibende
Zeile
firstCsim = fixVal.Cells(12, 5).Value 'erste zu beschreibende
Spalte

'erste beschriebene Zeile/Spalte im Tabellenblatt "Stoffwerte"
firstRstoff = fixVal.Cells(14, 4).Value 'erste beschriebene Zeile
firstCstoff = fixVal.Cells(14, 5).Value 'erste beschriebene Spalte

'erste beschriebn Zeile/Spalte im Tabellenblatt "Auswertung"
firstRaus = fixVal.Cells(11, 4).Value 'erste beschriebene Zeile
firstCaus = fixVal.Cells(11, 5).Value 'erste beschriebene Spalte

'letzte beschriebene Zeile/Spalte im Tabellenblatt "Daten"
lastRdaten = daten.Cells(Rows.Count, firstCdaten +
2).End(xlUp).Row 'letzte beschrieben Zeile
lastCdaten = daten.Cells(firstRdaten, 256).End(xlToLeft).Column
'letzte beschrieben Spalte

colFrom = firstCverb 'Spalte in der "von" Knoten in
"Verbindungen" eingetragen sind
colTo = firstCverb + 1 'Spalte in der "zu" Knoten in
"Verbindungen" eingetragen sind
lastRverb = verb.Cells(firstRverb, colFrom).End(xlDown).Row
'letzte beschrieben Zeile der Spalte
```

```

                                                                    '"von"
in "Verbindungen"

SimDuration = eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value
'Simulationsdauer

StepSize = eing.Cells(firstReing, firstCeing).Value
'Zeitschrittweite

'### Anzahl der Knoten & Zeilenabstand zwischen 2 Knoten in
"Daten" lesen ###

Row = firstRdaten + 3 'markiert in welcher Zeile der erste Knoten
eingetragen ist
                        '= erste beschriebene Zeile + 2

RbetNodesDaten = 1 'Startwert

For i = Row To lastRdaten + 1
    If daten.Cells(i, firstCdaten).Value <> "" And daten.Cells(i,
firstCdaten).Value <> "0" Then
        Exit For
    Else
        RbetNodesDaten = RbetNodesDaten + 1 'Abstand (Zeilen)
zwischen 2 Knoten im Tabellenblatt
                                                                    '"Daten"
    End If
Next i

Exit Sub

fehler:
```

```
MsgBox "Ein Tabellenblatt fehlt. Kontrollieren Sie ob die in  
'Fixe Werte' erwähnten " & _
```

```
    "Tabellenblätter tatsächlich vorhanden sind."
```

```
End
```

```
End Sub
```

```
Public Sub MatValues()
```

```
'#####  
#####
```

```
'#####  
#####
```

```
'#####  
#####
```

```
'### "Stoffwerte" lesen ###
```

```
'Wärmeleitfähigkeit
```

```
lambdaE = stoff.Cells(firstRstoff + 3, firstCstoff).Value
```

```
'Erdreich
```

```
lambdaPU = stoff.Cells(firstRstoff + 2, firstCstoff).Value 'PU
```

```
'Wärmekapazität
```

```
CpW = stoff.Cells(firstRstoff, firstCstoff + 1).Value 'Wasser
```

```
CpSt = stoff.Cells(firstRstoff + 1, firstCstoff + 1).Value 'Stahl
```

```
'Dichte
```

```
rhoW = stoff.Cells(firstRstoff, firstCstoff + 2).Value 'Wasser
```

```
rhoSt = stoff.Cells(firstRstoff + 1, firstCstoff + 2).Value 'Stahl
```

```
hm = eing.Cells(firstReing + 8, firstCeing).Value 'Einbautiefe der  
Rohrleitung lesen
```

```
gapVLRL = eing.Cells(firstReing + 7, firstCeing).Value 'Abstand
zw. Vor- und Rücklaufleitung lesen
```

```
End Sub
```

```
Public Sub PreCalc()
```

```
'#####
#####
```

```
'#####
#####
```

```
'#####
#####
```

```
'### Tabellenblatt "Eingabe" kontrollieren ###
```

```
'Zeitschrittweite gegebenenfalls auf Sekunden umrechnen.
```

```
If eing.Cells(firstReing, firstCeing + 1).Value = "min" Then
```

```
    eing.Cells(firstReing, firstCeing).Value =
eing.Cells(firstReing, firstCeing).Value * 60
```

```
ElseIf eing.Cells(firstReing, firstCeing + 1).Value = "h" Then
```

```
    eing.Cells(firstReing, firstCeing).Value =
eing.Cells(firstReing, firstCeing).Value * 60 * 60
```

```
End If
```

```
'Simulationsdauer gegebenenfalls auf Sekunden umrechnen.
```

```
If eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing + 1).Value = "min" Then
```

```
    eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value =
eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value _
    * 60
```

```
ElseIf eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing + 1).Value = "h" Then
```

```
    eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value =  
eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value _  
    * 60 * 60  
ElseIf eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing + 1).Value = "days"  
Then  
    eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value =  
eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value _  
    * 60 * 60 * 24  
ElseIf eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing + 1).Value = "weeks"  
Then  
    eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value =  
eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value _  
    * 60 * 60 * 24 * 7  
ElseIf eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing + 1).Value = "months"  
Then  
    eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value =  
eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing).Value _  
    * 60 * 60 * 24 * 30  
End If  
  
'Einheiten eintragen  
eing.Cells(firstReing, firstCeing + 1).Value = "s"  
eing.Cells(firstReing + 1, firstCeing + 1).Value = "s"  
  
'### Tabllenblatt "Daten" ergänzen (Querschnittsflächen,  
Durchmesser, etc...) ###  
  
Pi = Application.WorksheetFunction.Pi()  
  
'Startwerte  
StartCol = lastCdaten + 1 'Spalte in "Daten" die gerade  
beschrieben wird
```

```

StartRow = firstRdaten + 2 'ab dieser Zeile in "Daten" Werte
eintragen
dCol = firstCdaten + 4 'Spalte in der die Innendurchmesser stehen

'# Querschnittsfläche der Wassersäule #
daten.Cells(firstRdaten, StartCol).Value = "Querschnittsfl v.
Wasser in m²" 'Beschriftung

'berechnen: A_W = d_innen^2*pi/4
For i = StartRow To lastRdaten Step RbetNodesDaten
    daten.Cells(i, StartCol).Value = daten.Cells(i, dCol).Value ^
2 * Pi / 4
Next i

StartCol = StartCol + 1 'nächste Spalte

'# Außendurchmesser v. Stahl #
daten.Cells(firstRdaten, StartCol).Value = "Außendurchmesser Stahl
in m" 'Beschriftung

'berechnen: d_St = d_innen + 2 * s_St
For i = StartRow To lastRdaten Step RbetNodesDaten
    daten.Cells(i, StartCol).Value = (daten.Cells(i, dCol).Value +
2 _
                                     * daten.Cells(i, dCol +
1).Value)
Next i

StartCol = StartCol + 1 'nächste Spalte

```



```
'# Querschnittsfläche der Stahlschicht (Hohlzylinder) #
daten.Cells(firstRdaten, StartCol).Value = "Querschnittsfl v.
Stahl in m²" 'Beschriftung

'berechnen: A_St = d_St^2 * pi / 4 - A_W
For i = StartRow To lastRdaten Step RbetNodesDaten
    daten.Cells(i, StartCol).Value = daten.Cells(i, StartCol -
1).Value ^ 2 _
                                * Pi / 4 - daten.Cells(i,
StartCol - 2).Value
Next i

StartCol = StartCol + 1 'nächste Spalte

'# Außendurchmesser der PU-Schicht #
daten.Cells(firstRdaten, StartCol).Value = "Außendurchmesser PU in
m" 'Beschriftung

'berechnen: d_PU = d_St + 2 * s_PU
For i = StartRow To lastRdaten Step RbetNodesDaten
    daten.Cells(i, StartCol).Value = daten.Cells(i, StartCol -
2).Value + 2 _
                                * daten.Cells(i, dCol +
2).Value
Next i

StartCol = StartCol + 1 'nächste Spalte

'# Außendurchmesser der PE-Schicht #
daten.Cells(firstRdaten, StartCol).Value = "Außendurchmesser PE in
m" 'Beschriftung
```

```

'berechnen: d_PE = d_PU + 2 * s_PU
For i = StartRow To lastRdaten Step RbetNodesDaten
    daten.Cells(i, StartCol).Value = daten.Cells(i, StartCol -
1).Value + 2 _
                                * daten.Cells(i, dCol +
3).Value
Next i

StartCol = StartCol + 1 'nächste Spalte

'# Volumen des Innenrohres (=Wassersäule) #
daten.Cells(firstRdaten, StartCol).Value = "Wasservol. im Rohr in
m³" 'Beschriftung

'berechnen: V_W = d_innen^2 * PI / 4 * l_rohr
For i = StartRow To lastRdaten Step RbetNodesDaten
    daten.Cells(i, StartCol).Value = daten.Cells(i, dCol).Value ^
2 _
                                * Pi / 4 * daten.Cells(i, dCol
- 1).Value
Next i

StartCol = StartCol + 1 'nächste Spalte

'# Volumen der Stahlschicht #
daten.Cells(firstRdaten, StartCol).Value = "Vol. der Stahlschicht
in m³" 'Beschriftung

'berechnen: V_St = d_Stahl^2 * PI / 4 * l_rohr - V_Wasser
For i = StartRow To lastRdaten Step RbetNodesDaten
    daten.Cells(i, StartCol).Value = daten.Cells(i, dCol +
9).Value ^ 2 * Pi / 4 _

```

```

1).Value _
                                * daten.Cells(i, dCol -
                                - daten.Cells(i, StartCol -
1).Value
Next i

End Sub

```

```

Sub Calc()

'#####
#####

'#####
#####

'#####
#####

'### Berechnung
#####
#####

With Application
    .ScreenUpdating = False
    .EnableEvents = False
    .Calculation = xlCalculationManual
End With

start = Timer ' Stoppuhr starten - damit die Berechnungsdauer zum
Schluss ausgegeben werden kann

```

```
Call FixValues
```

```
Call MatValues
```

```
Call PreCalc
```

```
lastNode = verb.Cells(lastRverb, colTo).Value 'allerletzter Knoten  
des Netzes = Anzahl der Knoten
```

```
ApproxCalcFactor = 0.001 'Berechnungsfaktor -> zur  
Rechenzeitabschätzung,
```

```
                                'gilt für 4-Kern Prozessor (eventl  
anpassen)
```

```
'### Meldung zur geschätzten Rechenzeit ###
```

```
DurationSek = WorksheetFunction.RoundDown(SimDuration / StepSize *  
lastNode * ApproxCalcFactor, 0)
```

```
DurationMin = WorksheetFunction.RoundDown(DurationSek / 60, 0)
```

```
DurationH = WorksheetFunction.RoundDown(DurationMin / 60, 0)
```

```
DurationMin = DurationMin - DurationH * 60
```

```
DurationSek = DurationSek - DurationMin * 60 - DurationH * 60 * 60
```

```
'variabler Text der Meldung
```

```
If DurationH = 0 Then
```

```
    If DurationMin = 0 Then
```

```
        WriteThis = DurationSek & " Sekunden."
```

```
    Else
```

```
        WriteThis = DurationMin & " Minuten und " & DurationSek &  
" Sekunden."
```

```
    End If
```

```
Else
```

```
        WriteThis = DurationH & " Stunden und " & DurationMin & "
Minuten."
End If

'Meldung wird ausgegeben - User kann "Ja" oder "Nein" klicken
Mldg = MsgBox("Die geschätzte Rechenzeit beträgt " & WriteThis & _
        " Wollen Sie mit der Berechnung fortfahren?", vbYesNo +
vbQuestion, "Rechenzeit", "", 0)

'Meldung auswerten: Wenn "nein" ausgewählt wird -> Makro beenden
If Mldg <> 6 Then
    End
End If

'### letzte Knoten/Verbraucher finden & in lastNodes() - Array
eintragen ###
    'Hint: kommen in "von"-Tabelle nicht vor

ReDim Preserve lastNodes(lastNode) 'Array enthält alle letzten
Knoten,

                                'also Knoten auf die kein
weiterer mehr folgt
Dim Von As Range "'von"-Spalte in "Verbindungen"

verb.Activate 'Verbindungs-Tabellenblatt muss Active sein für die
folgende Routine
counter = 0 'Startwert
For i = 1 To lastRverb - firstRverb + 1
    Set Von = Range(Cells(firstRverb, colFrom), Cells(lastRverb,
colFrom)).Find(i, LookAt:=xlWhole)

    If Von Is Nothing Then 'wenn Zahl in "von"-Tabelle nicht
vorkommt = letzter Knoten
        lastNodes(i) = i
```

```

        Row = firstRverb 'Umbenennung, damit firstRverb nicht
überschrieben wird

        Do Until verb.Cells(Row, colTo).Value = i 'Zeile in
Tabellenblatt "Verbindungen" suchen

                                                    'in der der
"von" Verbraucher steht
            Row = Row + 1
            If Row > lastRverb Then
                MsgBox "Der Knoten " & i & " konnte im
Tabellenblatt 'Verbindungen' in der" & _
                    "'von'-Spalte nicht gefunden werden. Die
Berechnung wird nicht fortgesetzt."
                GoTo Finish
            End If
        Loop
    End If
Next i

' ### Tabellenblatt "Simulation" beschreiben ###

sim.Cells.ClearContents '"Simulation"-Tabellenblatt Inhalt löschen

sim.Cells(firstRsim + 2, firstCsim).Value = "Zeit" 'Beschriftung
der Zeitspalte

sim.Cells(firstRsim + 2, firstCsim - 1).Value = "Datum"
'Beschriftung der Datumsspalte

'weitere Beschriftung (VL, RL, T_VL_innen, usw.)
Col = firstCsim + 1 'eine Spalte nach den Zeit-Einträgen
For i = firstRverb To lastRverb
    sim.Cells(firstRsim + 1, Col).Value = "Vorlauf"

```

```
    sim.Cells(firstRsim + 2, Col).Value = "T_VL_innen_" &
verb.Cells(i, colFrom).Value & "|" & _
                                verb.Cells(i,
colTo).Value 'Temp im Inneren des VL
    sim.Cells(firstRsim + 2, Col + 1).Value = "P_VL_" &
verb.Cells(i, colFrom).Value
                                'therm. Energie am Eintritt in den VL
    sim.Cells(firstRsim + 2, Col + 2).Value = "P_VL_V_" &
verb.Cells(i, colFrom).Value & "|" & _
                                verb.Cells(i,
colTo).Value 'Verlust im VL
    sim.Cells(firstRsim + 2, Col + 3).Value = "P_VL_" &
verb.Cells(i, colTo).Value
                                'therm. Energie am Austritt aus dem VL
    sim.Cells(firstRsim + 1, Col + 4).Value = "Rücklauf"
    sim.Cells(firstRsim + 2, Col + 4).Value = "T_RL_innen_" &
verb.Cells(i, colFrom).Value & "|" & _
                                & verb.Cells(i,
colTo).Value 'Temp im Inneren des RL
    sim.Cells(firstRsim + 2, Col + 5).Value = "P_RL_" &
verb.Cells(i, colFrom).Value
                                'therm. Energie am Eintritt in den RL
    sim.Cells(firstRsim + 2, Col + 6).Value = "P_RL_V_" &
verb.Cells(i, colFrom).Value & "|" & _
                                verb.Cells(i,
colTo).Value 'Verlust im RL
    sim.Cells(firstRsim + 2, Col + 7).Value = "P_RL_" &
verb.Cells(i, colTo).Value
                                'therm. Energie am Austritt aus dem RL
    sim.Cells(firstRsim + 2, Col + 8).Value = "mDot_" &
verb.Cells(i, colFrom).Value & "|" & _
                                verb.Cells(i,
colTo).Value 'Fließgeschwindigkeit
    Col = Col + 9
Next i
```

```

'### Erstellung, Dimensionierung und Befüllung des connections()
Arrays ###

Dim connections() As Variant
ReDim Preserve connections(lastNode, 1 To lastNode) 'Array, das
den Verbindungen (zB 1 zu 2) die
                                                    'Spaltennummer
aus "Simulation" zuweist

'connections() Array befüllen
Col = 1 'Startwert
For i = firstRverb To lastRverb
    sim.Cells(3, firstCsim + Col).Value = verb.Cells(i,
colFrom).Value & " zu " & _
                                                    verb.Cells(i,
colTo).Value
    connections(verb.Cells(i, colFrom).Value, verb.Cells(i,
colTo).Value) = Col
    Col = Col + 9 '9 = Abstand (Spalten) zwischen 2 Knoten
Next i

'# Dimensionierung und Befüllung des RowNode() Arrays #

ReDim Preserve RowNode(lastNode) As Variant 'Array, das zum
jeweiligen Knoten die Zeilennummer aus "Daten" ausgibt
                                                    'zB RowNode(1)=8

daten.Activate
data = Range(Cells(1, 1), Cells(lastRdaten, lastCdaten + 7))
'"Daten"-Tabellenblatt in Array

```



```
counter = firstRdaten + 2 - RbetNodesDaten 'Startwert für Zähler,
der die Zeilen zählt
For i = 0 To lastNode 'erster bis letzter Knoten
    counter = counter + RbetNodesDaten 'weiter zählen:
Schrittweite = Zeilenabstand zw. 2 Knoten
    If data(counter, firstCdaten) = i Then 'wenn Knoten-Nummer
eingetragen
        RowNode(i) = counter 'in Array speichern
    Else
        MsgBox "Es ist ein Fehler beim Einlesen des Knotens '" &
i & "'" aufgetreten. Bitte " & _
        "diesen Knoten in den Tabellenblättern '"Daten'" und
'"Verbindungen'" kontrollieren."
        GoTo Finish
    End If
Next i

'Dimensionierung der Arrays mit den Temperaturen der einzelnen
Rohrabschnitte
'nach Abzug der Verluste
ReDim Preserve TempVLtemporary((lastNode - 1), 1 To lastNode) 'VL
ReDim Preserve TempRLtemporary((lastNode - 1), 1 To lastNode) 'RL

'### Berechnung: Temperaturen, Massenströme, Leistungen ###

'maximale Zeilen in Excel 1048576 - kann nie überschritten
werden!!!
'Daher werden bei großen Datenmengen nicht alle in "Simulation"
geschrieben.
AmountSimData = fixVal.Cells(16, 4).Value ' Anzahl der in
"Simulation" geschriebenen Werte;
```

```

' gibt der User in "Fixe
Werte" an.
If (SimDuration / StepSize) / AmountSimData > 1 Then
    DataFactorSim = Int((SimDuration / StepSize) / AmountSimData)
Else
    DataFactorSim = 1
End If

Dim printFactor As Integer
printFactor = 5000 ' -> nach dieser Anzahl an berechneten
Zeitschritten,
'werden die Arrays ins Tabellenblatt
'Simulation' abgelegt und gelöscht.
'Grund: Ansonsten wird der benutzte Speicher
zu groß -> Error!

'notwendige Arrays erstellen
Dim MassFlows() As Variant
Dim TempVL() As Variant
Dim TempRL() As Variant
Dim LossVL() As Variant
Dim LossRL() As Variant
Dim PowerVLin() As Variant
Dim PowerVLout() As Variant
Dim PowerRLin() As Variant
Dim PowerRLout() As Variant
Dim Time() As Variant
Dim Dates() As Variant
Dim TempVLbefore() As Variant
Dim TempRLbefore() As Variant

' Dimensionierung der Arrays
ReDim Preserve MassFlows(1 To lastNode, printFactor)
```

```
ReDim Preserve TempVL(1 To lastNode, printFactor)
ReDim Preserve TempRL(1 To lastNode, printFactor)
ReDim Preserve LossVL(1 To lastNode, printFactor)
ReDim Preserve LossRL(1 To lastNode, printFactor)
ReDim Preserve PowerVLin(1 To lastNode, printFactor)
ReDim Preserve PowerVLout(1 To lastNode, printFactor)
ReDim Preserve PowerRLin(1 To lastNode, printFactor)
ReDim Preserve PowerRLout(1 To lastNode, printFactor)
ReDim Preserve Time(SimDuration / StepSize)
ReDim Preserve Dates(printFactor)

'# Befüllung des Time() Arrays #
For i = 0 To SimDuration / StepSize
    Time(i) = StepSize * (i + 1) 'enthält alle Zeitpunkte die
gerechnet werden müssen,
        ' z.B. Simulationsdauer=1000 Zeitschrittweite=10 -
> Time(0)=10, Time(1)=20, usw.
Next i

'# Stueerelemente für die Schreibroutine ins "Simulation"-
Tabellenblatt #
Dim beenHere As Boolean
Dim counter2 As Integer
beenHere = False 'Startwert für 'Sensor'
        '(überprüft ob bereits Werte in "Simulation"
geschrieben wurden
counter2 = 1

FunctionFailed = False 'kontrolliert ob alle Funktionen
ordnungsgemäß durchlaufen werden
        '(falls nicht wird der Wert True)
NoMoreData = False 'wird auf 'True' geschaltet wenn für den zu
betrachtenden Zeitschritt
```

```
'keine Daten vorhanden sind.

NextTimeStep = 0 'Startwert für Zähler
TimeErased = True 'Startwert für Sensor

rowSim = firstRsim + 3
colSim = firstCsim - 1

NextTime: 'Dauerschleife -> Abbruchkriterien vorhanden
           'Abbruch > wenn für den Zeitschritt keine "Daten"-
Werte mehr vorhanden sind
           '           > wenn die Simulationsdauer erreicht ist

' Abbruchkriterium:
If TimeErased = False Then ' zu Beginn ist Time(0) immer gleich
SimDuration
                               ' -> hier soll aber nicht auf die If-
Abfrage reagiert werden
                               ' daher zuerst die Abfrage ob das
Time() Array gelöscht wurde
    If SimDuration <= Time(NextTimeStep) Then 'wenn
Simulationsdauer erreicht wird -> Abbruch
        GoTo DoLastNodes
    End If
End If

If NextTimeStep = 2157 Then
    Pause = Pause
End If

On Error GoTo Finish 'ErrorHandler

'# Massenströme und Verluste berechnen #
```

```
For j = lastRverb To firstRverb Step -1
    FromNode = verb.Cells(j, colFrom)
    ToNode = verb.Cells(j, colTo)

    Call CheckDateTime(RowNode(), Time(), Dates())

    If RTimeStepDaten = lastRdaten + 1 Then
        GoTo DoLastNodes
    End If

    If NoMoreData = True Then
        GoTo DoLastNodes
    End If

    Call CalcMassFlows_Loss_TemporaryTemp(connections(),
TempVLtemporary(), TempRLtemporary(), _
                                                MassFlows(), RowNode(),
LossVL(), LossRL(), TempVL(), _
                                                TempRL(), Time(),
TempVLbefore(), TempRLbefore(), _
                                                printFactor)

    'wenn eine der Funktionen nicht ordnungsgemäß durchlaufen wird
-> Abbruch

    If FunctionFailed = True Then
        MsgBox "Es ist ein Fehler bei der Berechnung des " & _
            "Leitungsabschnitts " & FromNode & " - " &
ToNode & " aufgetreten."
        GoTo DoLastNodes
    End If

Next j
```

```
'# Leistungen und Temperaturen berechnen #

For j = lastRverb To firstRverb Step -1
    FromNode = verb.Cells(j, colFrom)
    ToNode = verb.Cells(j, colTo)

    Call CheckDateTime(RowNode(), Time(), Dates())

    If RTimeStepDaten = lastRdaten + 1 Then
        GoTo DoLastNodes
    End If
    If NoMoreData = True Then
        GoTo DoLastNodes
    End If

    Call CalcTemp(TempVLtemporary(), TempRLtemporary(),
connections(), RowNode(), MassFlows(), _
                TempVL(), TempRL())

    Call CalcPower(connections(), TempVLtemporary(),
TempRLtemporary(), RowNode(), MassFlows(), _
                PowerVLin(), PowerVLout(), PowerRLin(),
PowerRLout(), LossVL(), LossRL)

Next j

' Daten in 'Simulation' schreiben
If ((NextTimeStep + 1) / printFactor) - Int((NextTimeStep + 1) /
printFactor) = 0 Then
    If beenHere = True Then 'es wurden bereits Werte in
'Simulation' geschrieben
```

```
        If Time(NextTimeStep - 1) < SimDuration Then 'nicht
letzte Werte
            Till = NextTimeStep
            Delta = Till - From
        Else 'letzte Werte
DoLastNodes:
            Till = NextTimeStep
            If From = "" Then
                From = 0
                Delta = Till - From
            Else
                Delta = Till - From
            End If

            Call PrintInSimulation(From, Till, TempVL(), TempRL(),
PowerVLin(), PowerVLout(), _
                                PowerRLin(), PowerRLout(),
LossVL(), LossRL(), MassFlows(), _
                                Time(), Dates(), rowSim,
colSim, counter2, TempVLbefore(), _
                                TempRLbefore(), Delta)

            GoTo Finish
        End If
        counter2 = counter2 + 1
    Else 'schreibt die ersten Werte in 'Simulation'
        From = 0
        Till = NextTimeStep 'Anzahl der Werte
        Delta = Till
        beenHere = True
    End If

    Call PrintInSimulation(From, Till, TempVL(), TempRL(),
PowerVLin(), PowerVLout(), _
```

```
                PowerRLin(), PowerRLout(), LossVL(),
LossRL(), MassFlows(), Time(), _
                Dates(), rowSim, colSim, counter2,
TempVLbefore(), TempRLbefore(), _
                Delta)

        TimeErased = True
Else
        TimeErased = False
End If

NextTimeStep = NextTimeStep + 1

GoTo NextTime

' Ende der Dauerschleife -> entweder weil die Berechnungen
abgeschlossen sind, _
                oder weil ein Fehler aufgetreten ist

Finish:

' alle Arrays löschen (Arbeitsspeicher leeren)
Erase MassFlows
Erase TempVL
Erase TempRL
Erase LossVL
Erase LossRL
Erase PowerVLin
Erase PowerVLout
Erase PowerRLin
Erase PowerRLout
Erase Time
Erase Dates
Erase lastNodes
```

```
Erase UserMassFlows
Erase RowNode
Erase TempVLtemporary
Erase TempRLtemporary
Erase data

'Hilfswerte wieder löschen
daten.Activate

daten.Range(Cells(firstRdaten, lastCdaten + 1), Cells(lastRdaten,
lastCdaten + 10)).Delete

sim.Activate ' Tabellenblatt "Simulation" aktivieren

MsgBox "Rechenzeit in Sekunden: " & Int(Timer) - Int(start)
'Ausgabe der Berechnungsdauer

With Application
    .ScreenUpdating = True
    .EnableEvents = True
    .Calculation = xlCalculationAutomatic
End With

End Sub
```

```
Function PrintInSimulation(From, Till, TempVL(), TempRL(),
PowerVLin(), PowerVLout(), _
    PowerRLin(), PowerRLout(), LossVL(),
LossRL(), MassFlows(), Time(), _
    Dates(), rowSim, colSim, counter2,
TempVLbefore(), TempRLbefore(), Delta)
```

```
On Error GoTo Fehlerbehandlung
```

```
sim.Activate
```

```
Dim ALL() As Variant
```

```
ReDim Preserve ALL(lastNode * 9 + 1, From To Till)
```

```
counter = 0
```

```
counter3 = From
```

```
For j = From To Till Step DataFactorSim 'Zeilen in Simulation
```

```
    ALL(0, counter3) = Dates(j)
```

```
    ALL(1, counter3) = Time(j)
```

```
    For i = 2 To lastNode * 9 Step 9 'Spalten in Simulation
```

```
        counter = counter + 1
```

```
        zaehli = zaehli + 1
```

```
        ALL(i, counter3) = TempVL(counter, j)
```

```
        ALL(i + 1, counter3) = PowerVLin(counter, j)
```

```
        ALL(i + 2, counter3) = LossVL(counter, j)
```

```
        ALL(i + 3, counter3) = PowerVLout(counter, j)
```

```
        ALL(i + 4, counter3) = TempRL(counter, j)
```

```
        ALL(i + 5, counter3) = PowerRLout(counter, j)
```

```
        ALL(i + 6, counter3) = LossRL(counter, j)
```

```
        ALL(i + 7, counter3) = PowerRLin(counter, j)
```

```
        ALL(i + 8, counter3) = MassFlows(counter, j)
```

```
    Next i
```

```
    counter = 0
```

```
    counter3 = counter3 + 1
```

```
    zaehlj = zaehlj + 1
```

```
Next j
```

```
Range(Cells(rowSim, colSim), Cells(rowSim + Delta, colSim + 1 +
lastNode * 9)) = _
Application.WorksheetFunction.Transpose(ALL)

rowSim = sim.Cells(Rows.Count, firstCsim + 2).End(xlUp).Row + 1
'letzte beschriebene Zeile in

'"Simulation"
From = Till + 1

ReDim Preserve TempVLbefore(1 To lastNode, 1 To counter2)
ReDim Preserve TempRLbefore(1 To lastNode, 1 To counter2)

For i = 1 To lastNode
    TempVLbefore(i, counter2) = TempVL(i, NextTimeStep)
    TempRLbefore(i, counter2) = TempRL(i, NextTimeStep)
Next i

Erase MassFlows
Erase TempVL
Erase TempRL
Erase LossVL
Erase LossRL
Erase PowerVLin
Erase PowerVLout
Erase PowerRLin
Erase PowerRLout
Erase Dates
Erase ALL

ReDim Preserve MassFlows(1 To lastNode, (NextTimeStep + 1) To
(NextTimeStep + 1 + Delta))
```

```
ReDim Preserve TempVL(1 To lastNode, (NextTimeStep + 1) To
(NextTimeStep + 1 + Delta))
ReDim Preserve TempRL(1 To lastNode, (NextTimeStep + 1) To
(NextTimeStep + 1 + Delta))
ReDim Preserve LossVL(1 To lastNode, (NextTimeStep + 1) To
(NextTimeStep + 1 + Delta))
ReDim Preserve LossRL(1 To lastNode, (NextTimeStep + 1) To
(NextTimeStep + 1 + Delta))
ReDim Preserve PowerVLin(1 To lastNode, (NextTimeStep + 1) To
(NextTimeStep + 1 + Delta))
ReDim Preserve PowerVLout(1 To lastNode, (NextTimeStep + 1) To
(NextTimeStep + 1 + Delta))
ReDim Preserve PowerRLin(1 To lastNode, (NextTimeStep + 1) To
(NextTimeStep + 1 + Delta))
ReDim Preserve PowerRLout(1 To lastNode, (NextTimeStep + 1) To
(NextTimeStep + 1 + Delta))
ReDim Preserve Dates(NextTimeStep To (NextTimeStep + 1 + Delta))
```

Exit Function

Fehlerbehandlung:

```
MsgBox "Fehler in der Zeile " & Erl & ":" & vbCrLf &
Err.Description & _
    ". Rechenzeit in Sekunden: " & Int(Timer) - Int(start)
End
```

End Function

```
Function CheckDateTime(RowNode(), Time() As Variant, Dates())
```

```
On Error GoTo Fehlerbehandlung
```

```
Dim RNextDate As Long
```

```
RToNodeDaten = RowNode(ToNode) ' Zeile des 'zu'-Knotens im
Tabellenblatt "Daten"

ActualDay = Int(Time(NextTimeStep) / 86400) 'aktueller Tag

' Zeile im Tabellenblatt "Daten" für gesuchten Knoten und
richtigen Tag (Datum)

If ActualDay <> 0 Then 'wenn nicht erster Tag = gesuchte Zeile ist
jene wo sich das Datum ändert
    ActualTimeStep = Time(NextTimeStep) - ActualDay * 86400 '+
StepSize
    For i = RToNodeDaten To RToNodeDaten + RbetNodesDaten
        If data(i, firstCdaten + 1) - data(RToNodeDaten,
firstCdaten + 1) = ActualDay Then
            RData = i
            Exit For
        End If
        If i = RToNodeDaten + RbetNodesDaten - 1 Then
            NoMoreData = True
            Exit Function
        End If
    Next i
Else ' wenn erster Tag = gesuchte Zeile ist jene in der die
Knotennummer steht
    ActualTimeStep = Time(NextTimeStep)
    RData = RToNodeDaten
End If

'ab wann beginnt der Datensatz des Folgeknotens bzw. Datensatz
nach Datumswechsel

'= Ende des Datensatzts für diesen Knoten / Tag
For i = RData To RbetNodesDaten + RToNodeDaten
```

```

    If i = RowNode(ToNode) + RbetNodesDaten - 1 Then 'nächster
Knoten
        RNextDate = i + 1
        Exit For
    Else
        If data(i + 1, firstCdaten + 1) <> data(i, firstCdaten +
1) Then 'nächster Tag
            RNextDate = i + 1
            Exit For
        End If
    End If
End If
Next i

```

```

'Ermittlung der Zeile im Tabellenblatt "Daten" in der sich
'der Datensatz für den benötigten Zeitschritt befindet
For i = RData To RNextDate
    If i = lastRdaten + 1 Then 'wenn allerletzte Zeile im
Tabellenblatt "Daten" erreicht
        '(löst Error aus, wird seperat
behandelt)
        RTimeStepDaten = i - 1 'Zeile, in der die Werte für den
benötigten Zeitschritt stehen
        Dates(NextTimeStep) = data(i - 1, firstCdaten + 1)
        Exit For
    Else
        If ActualTimeStep < data(i, firstCdaten + 2) Then
            RTimeStepDaten = i - 1
            Dates(NextTimeStep) = data(i - 1, firstCdaten + 1)
            Exit For
        End If
        If ActualTimeStep = data(i, firstCdaten + 2) Then
            RTimeStepDaten = i

```

```
        Dates(NextTimeStep) = data(i, firstCdaten + 1)
        Exit For
    End If
    If i = RNextDate Then
        RTimeStepDaten = i - 1
        Dates(NextTimeStep) = data(i - 1, firstCdaten + 1)
        Exit For
    End If
End If
Next i
```

```
Exit Function
```

Fehlerbehandlung:

```
    MsgBox "Rechenzeit in Sekunden: " & Int(Timer) - Int(start)
```

```
End Function
```

```
Function CalcMassFlows_Loss_TemporaryTemp(connections(),
TempVLtemporary(), TempRLtemporary(), _
    MassFlows() As Variant, RowNode(), LossVL() As Variant,
LossRL() As Variant, _
    TempVL() As Variant, TempRL() As Variant, Time() As
Variant, TempVLbefore(), _
    TempRLbefore(), printFactor)
```

```
On Error GoTo Fehlerbehandlung
```

```
VW = data(RToNodeDaten, firstCdaten + 17) 'Volumen der Wassersäule
im Rohr
```

```
VSt = data(RToNodeDaten, firstCdaten + 18) 'Volumen des Stahls
```

```

AW = data(RToNodeDaten, firstCdaten + 12) 'Querschnittsfläche des
Innenrohrs (nur Wasser)
l = data(RToNodeDaten, firstCdaten + 3) 'Länge des Rohrabschnitts

'Wärmedurchgangskoeffizient
Pi = Application.WorksheetFunction.Pi() 'pi laden

k = 2 * Pi / (1 / lambdaE * Application.WorksheetFunction.Ln(4 *
hm / _
    data(RToNodeDaten, firstCdaten + 16)) + 1 / (2 * lambdaE) * _
    Application.WorksheetFunction.Ln(1 + (2 * hm) ^ 2 / gapVLRL ^
2) + 1 / lambdaPU * _
    Application.WorksheetFunction.Ln(data(RToNodeDaten,
firstCdaten + 15) / _
    data(RToNodeDaten, firstCdaten + 13)))

'### Innentemperaturen VL / RL lesen ###
If NextTimeStep = 0 Then 'erster Zeitschritt
    '-> Innentemperatur entspricht
Starttemperatur aus "Eingabe"
    TVL = eing.Cells(firstReing + 3, firstCeing).Value + 273.15
    TRL = eing.Cells(firstReing + 4, firstCeing).Value + 273.15
Else 'nicht erster Zeitschritt -> 'Innentemperatur aus dem
vornagegangenen Zeitschritt lesen
    If (NextTimeStep / printFactor) - Int(NextTimeStep /
printFactor) = 0 Then 'wenn ganzzahlig
        TVL = TempVLbefore(ToNode, NextTimeStep / printFactor) +
273.15
        TRL = TempRLbefore(ToNode, NextTimeStep / printFactor) +
273.15
    Else
        TVL = TempVL(ToNode, NextTimeStep - 1) + 273.15
        TRL = TempRL(ToNode, NextTimeStep - 1) + 273.15

```



```

    End If
End If

TE = eing.Cells(firstReing + 5, firstCeing).Value + 273.15
'Temperatur des Erdreichs lesen

'### Berechnung der (Zwischen-)Temperatur ###

' Verlustleistung in [W]
LossVL(ToNode, NextTimeStep) = k * (TVL - TE) * l 'Vorlauf
LossRL(ToNode, NextTimeStep) = k * (TRL - TE) * l 'Rücklauf

'innere Energie in [J]
intEnergyVL = (CpW * rhoW * VW + CpSt * rhoSt * VSt) * (TVL - TE)
'Vorlauf
intEnergyRL = (CpW * rhoW * VW + CpSt * rhoSt * VSt) * (TRL - TE)
'Rücklauf

'innere Energie abzüglich des Wärmeverlustes in [J]
intEnergyVL = intEnergyVL - LossVL(ToNode, NextTimeStep) *
StepSize 'Vorlauf
intEnergyRL = intEnergyRL - LossRL(ToNode, NextTimeStep) *
StepSize 'Rücklauf

'(Zwischen-)Temperatur - stellt sich aufgrund des Verlustes ein
TempVLtemporary(FromNode, ToNode) = intEnergyVL / (CpW * rhoW * VW
+ CpSt * rhoSt * VSt) + TE _
                                - 273.15 'Vorlauf
TempRLtemporary(FromNode, ToNode) = intEnergyRL / (CpW * rhoW * VW
+ CpSt * rhoSt * VSt) + TE _
                                - 273.15 'Rücklauf

```

```

'Leistung die der Verbraucher dem Fernwärmenetz zu- oder abführt
powerUser = data(RTimeStepDaten, firstCdaten + 9) 'wenn (-):
Verbraucher speist ins Netz ein,
                                                    'wenn (+):
Verbraucher entnimmt Leistung
                                                    'aus dem Netz

'Massenstrom vom/zum Verbraucher zum/vom Vorlauf
If powerUser > 0 Then 'Leistung des Verbrauchers > 0 => dem VL
wird ein Massenstrom entnommen
    TUserRL = data(RTimeStepDaten, firstCdaten + 11) 'Temperatur,
vom Verbraucher in den RL
    mDotUser = Abs(powerUser / (CpW * (TempVLtemporary(FromNode,
ToNode) - TUserRL)))
                                                    'Massenstrom, der durch den
Verbrauche zu- oder abgeführt wird
Else 'Leistung des Verbrauchers < 0 => dem VL wird ein Massenstrom
hinzugefügt
    TUserVL = data(RTimeStepDaten, firstCdaten + 10) 'Temperatur,
vom Verbraucher in den VL
    mDotUser = powerUser / (CpW * Abs(TUserVL -
TempRLtemporary(FromNode, ToNode)))
                                                    'Massenstrom, der durch den
Verbrauche zu- oder abgeführt wird
End If

mDot = mDotUser 'Massenstrom des Verbraucher strömt auf jeden Fall
zu oder ab

'Massenstrom im Rohrabschnitt in [kg/s]
If lastNodes(ToNode) = "" Then '"zu"-Knoten ist nicht letzter
Knoten; es können Massenstöße

```

```

'von vorangehenden
Leitungsabschnitten zuströmen
    For i = ToNode To lastNode
        If connections(ToNode, i) <> "" Then
            mDot = mDot + MassFlows(i, NextTimeStep)
        End If
    Next i
End If

MassFlows(ToNode, NextTimeStep) = mDot 'Massenstrom in Array
speichern

'
'-----
'##### Limit für Vzu: Vzu < Vges
'#####

Vin = Abs(mDot / rhoW) * StepSize 'zuströmendes Volumen

If Vin > VW Or VDotIn = VW Then
    MsgBox "Der zuströmende Volumenstrom ist größer als das
vorhandene Rohrvolumen " & _
        "im Rohrabschnitt " & FromNode & "-" & ToNode & ". Die
Berechnung wird nun abgebrochen."
    FunctionFailed = True
End If

ReDim Preserve UserMassFlows(lastNode, lastNode)
UserMassFlows(FromNode, ToNode) = mDotUser 'Massenstrom, den der
Verbraucher zu oder
'abführt in Array
speichern

```

Exit Function

Fehlerbehandlung:

```
MsgBox "Fehler in der Zeile " & Erl & ":" & vbCrLf &
Err.Description & _
    ". Rechenzeit in Sekunden: " & Int(Timer) - Int(start)
```

End Function

```
Function CalcPower(connections(), TempVLtemporary(),
TempRLtemporary(), RowNode(), MassFlows(), _
    PowerVLin() As Variant, PowerVLout() As
Variant, PowerRLin() As Variant, _
    PowerRLout() As Variant, LossVL() As Variant,
LossRL() As Variant)
```

On Error GoTo Fehlerbehandlung

```
VW = data(RToNodeDaten, firstCdaten + 17) 'Volumen der Wassersäule
im Rohr
```

```
VSt = data(RToNodeDaten, firstCdaten + 18) 'Volumen des Stahls
```

```
AW = data(RToNodeDaten, firstCdaten + 12) 'Querschnittsfläche des
Innenrohrs (nur Wasser)
```

```
TE = eing.Cells(firstReing + 5, firstCeing).Value 'Temperatur des
Erdreichs lesen
```

```
mDotIn = MassFlows(ToNode, NextTimeStep) 'zu-/abströmender
Massenstrom
```

```
'Leistung die der Verbraucher dem Fernwärmenetz zu- oder abführt
```

```
powerUser = data(RTimeStepDaten, firstCdaten + 9) 'wenn (-):
Verbraucher speist ins Netz ein,

                                                                    'wenn (+):
Verbraucher entnimmt Leistung

                                                                    'aus dem Netz

' ### Berechnung ###

If UserMassFlows(FromNode, ToNode) > 0 Then 'Verbraucher
'verbraucht'

                                                                    '-> entnimmt Leistung
aus der VL-Leitung

    'Leistung die der Verbraucher in den RL speist (gibt Wasser
mit zB 40° in den RL

    '-> entspricht einer Leistung) in [W]
    powerRLUser = CpW * UserMassFlows(FromNode, ToNode) *
(data(RTimeStepDaten, firstCdaten + 11) _
        + 273.15)

    'Leistung die der Verbraucher aus dem VL entnimmt =
    'gewünschte Leistung + Leistung die in den RL zurückströmt in
[W]
    powerVLUser = powerUser + powerRLUser

ElseIf UserMassFlows(FromNode, ToNode) < 0 Then 'Verbraucher
'speist ein'

                                                                    '-> speist in die
VL-Leitung ein

    'Leistung die der Verbraucher in den VL speist (gibt Wasser
mit zB 80° in den VL

    '-> entspricht einer Leistung) in [W]
    powerVLUser = CpW * UserMassFlows(FromNode, ToNode) *
(data(RTimeStepDaten, firstCdaten + 10) _
        + 273.15)
```

```

'Leistung die der Verbraucher aus dem RL entnimmt =
'gewünschte Leistung + Leistung die in den VL zurückströmt in
[W]
powerRLUser = powerVLUser - powerUser

ElseIf UserMassFlows(FromNode, ToNode) = 0 Then 'der Verbraucher
verbraucht nicht und
                                                    'speist nicht ein
-> es fließt kein Massenstrom
    powerVLUser = 0
    powerRLUser = 0
End If

'Falls letzter Knoten P_RL_in = 0 und P_VL_out = 0
If lastNodes(ToNode) <> "" Then 'wenn letzter Knoten
    PowerRLin(ToNode, NextTimeStep) = 0
    PowerVLout(ToNode, NextTimeStep) = 0
Else 'falls nicht letzter Knoten
    For i = ToNode To lastNode
        If connections(ToNode, i) <> "" Then 'wenn 'zu'-Knoten als
'von'-Knoten in "Simulation"
                                                    'vorkommt
                PowerRLin(ToNode, NextTimeStep) = PowerRLin(ToNode,
NextTimeStep) + _
                                                    PowerRLout(i,
NextTimeStep)
                'dem RL zugeführte Leistung lesen/addieren -> RL
wird jene Leistung zugeführt,
                'die dem RL des/der folgenden Rohrabschnitte/s
abgeführt wird
                PowerVLout(ToNode, NextTimeStep) = PowerVLout(ToNode,
NextTimeStep) + _
                                                    PowerVLin(i,
NextTimeStep)

```

```
'dem VL abgeführte Leistung lesen/addieren -> VL
wird jene Leistung entnommen,
' die dem VL des/der folgenden Rohrabschnitte/s
zugeführt wird
    End If
Next i
End If

'Leistung am Austritt des Rücklaufs;  $P_1 = P_2 - P_{\text{Verlust}} + P_{\text{Verbraucher}}$ 
PowerRLout(ToNode, NextTimeStep) = -LossRL(ToNode, NextTimeStep) +
powerRLUser + PowerRLin(ToNode, NextTimeStep)

'Leistung am Eintirtt des Vorlaufs;  $P_1 = P_2 + P_{\text{Verlust}} + P_{\text{Verbraucher}}$ 
PowerVLin(ToNode, NextTimeStep) = LossVL(ToNode, NextTimeStep) + _
    powerVLUser + PowerVLout(ToNode,
NextTimeStep)

' neu berechnete Leistungen überall eintragen;
' zB P_1 wurde berechnet, P_1 in "1 zu 2" und "1 zu 3" usw ändern
For i = ToNode To lastNode
    If connections(ToNode, i) <> "" Then 'wenn 'zu'-Knoten als
'von'-Knoten in "Simulation" steht
        PowerRLout(i, NextTimeStep) = PowerRLin(ToNode,
NextTimeStep)
        PowerVLin(i, NextTimeStep) = PowerVLout(ToNode,
NextTimeStep)
    End If
Next i

Exit Function
```

Fehlerbehandlung:

```
MsgBox "Fehler in der Zeile " & Erl & ":" & vbCrLf &
Err.Description & _
    ". Rechenzeit in Sekunden: " & Int(Timer) - Int(start)
```

End Function

```
Function CalcTemp(TempVLtemporary(), TempRLtemporary(),
connections(), RowNode(), _
    MassFlows() As Variant, TempVL() As Variant,
TempRL() As Variant)
```

On Error GoTo Fehlerbehandlung

```
Dim mDotNext()
```

```
Dim TempNextVL()
```

```
Dim TempNextRL()
```

```
Dim VNext()
```

```
VW = data(RToNodeDaten, firstCdaten + 17) 'Volumen der Wassersäule
im Rohr
```

```
'vorangehender Leitungsabschnitt
```

```
If FromNode = 0 Then 'falls es sich um den allerersten
Leitungsabschnitt handelt;
```

```
    'zugführte Temp=HeizwerkTemp
```

```
    TPrevVL = eing.Cells(firstReing + 3, firstCeing).Value
```

```
    TPrevRL = eing.Cells(firstReing + 4, firstCeing).Value
```

```
Else
```

```
    For i = 0 To FromNode
```

```
        If connections(i, FromNode) <> "" Then
```



```
        TPrevVL = TempVLtemporary(i, FromNode)
        TPrevRL = TempRLtemporary(i, FromNode)
    End If
Next i
End If

'aktueller Leitungsabschnitt
mDotAct = MassFlows(ToNode, NextTimeStep) 'Massenstrom
TActVL = TempVLtemporary(FromNode, ToNode) 'VL-Temperatur
TActRL = TempRLtemporary(FromNode, ToNode) 'RL-Temperatur

'darauffolgender Leitungsabschnitt
counter = 0 'Counter reset
If lastNodes(ToNode) = "" Then
    For i = ToNode To lastNode
        If connections(ToNode, i) <> "" Then
            counter = counter + 1
            ReDim Preserve mDotNext(counter)
            mDotNext(counter) = MassFlows(i, NextTimeStep) '
Massenstrom
            ReDim Preserve VNext(counter)
            VNext(counter) = Abs(mDotNext(counter) / rhoW)
            ReDim Preserve TempNextVL(counter)
            TempNextVL(counter) = TempVL(i, NextTimeStep) 'VL-
Temperatur
            ReDim Preserve TempNextRL(counter)
            TempNextRL(counter) = TempRL(i, NextTimeStep) 'RL-
Temperatur
        End If
    Next i
End If
```

```
HowManyNextMassFlows = counter

'# Fallunterscheidung #
If UserMassFlows(FromNode, ToNode) < 0 Then 'User speist
Massenstrom ein = mDotUser < 0
    VUserVL = Abs(UserMassFlows(FromNode, ToNode) / rhoW) 'in den
VL eingespeistes Volumen
    VUserRL = 0 'in den RL eingespeistes Volumen
    TUserVL = data(RTimeStepDaten, firstCdaten + 10) ' Temperatur
des zuströmenden Massenstroms
    TUserRL = 0
ElseIf UserMassFlows(FromNode, ToNode) > 0 Then 'User entnimmt
Massenstrom = mDotUser > 0
    VUserVL = 0 'in den VL eingespeistes Volumen
    VUserRL = Abs(UserMassFlows(FromNode, ToNode) / rhoW) 'in den
RL eingespeistes Volumen
    TUserVL = 0
    TUserRL = data(RTimeStepDaten, firstCdaten + 11) ' Temperatur
des zuströmenden Massenstroms
ElseIf UserMassFlows(FromNode, ToNode) = 0 Then 'User entnimmt
nicht und speist nicht einmDotUser=0
    VUserVL = 0 'in den VL eingespeistes Volumen
    VUserRL = 0 'in den RL eingespeistes Volumen
    TUserVL = 0
    TUserRL = 0
End If

If mDotAct > 0 Then 'aktueller Massenstrom fließt in den VL
rein/aus dem RL raus = mDotAct > 0
    VActVL = Abs(mDotAct / rhoW)
    VActRL = 0
```

```
ElseIf mDotAct < 0 Then 'aktueller Massenstrom fließt aus dem VL
raus/in den RL rein = mDotAct < 0
    VActVL = 0
    VActRL = Abs(mDotAct / rhoW)
End If

'# Berechnung #

'Summe nachfolgende Temperatur * Volumen -> Zähler
For i = 1 To HowManyNextMassFlows
    If mDotNext(i) > 0 Then
        NumeratorVL = 0
        NumeratorRL = NumeratorRL + VNext(i) * TempNextRL(i)
        VNextAllRL = VNextAllRL + VNext(i)
        VNextAllVL = 0
    ElseIf mDotNext(i) < 0 Then
        NumeratorVL = NumeratorVL + VNext(i) * TempNextVL(i)
        NumeratorRL = 0
        VNextAllRL = 0
        VNextAllVL = VNextAllVL + VNext(i)
    End If
Next i

'+ Temperatur des vorangehenden Rohrabschnitts + Temp des
Verbrauches + vorhandene Temp
NumeratorVL = NumeratorVL + VActVL * TPrevVL + VUserVL * TUserVL +
TActVL * _
                (VW - VActVL - VNextAllVL - VUserVL)
NumeratorRL = NumeratorRL + VActRL * TPrevRL + VUserRL * TUserRL +
TActRL * _
                (VW - VActRL - VNextAllRL - VUserRL)
```

```
'in "Simualtion" eintragen
TempVL(ToNode, NextTimeStep) = NumeratorVL / VW 'Mischtemperatur =
Innentemperatur des VL
TempRL(ToNode, NextTimeStep) = NumeratorRL / VW 'Mischtemperatur =
Innentemperatur des RL
```

```
Exit Function
```

```
Fehlerbehandlung:
```

```
MsgBox "Fehler in der Zeile " & Erl & ":" & vbCrLf &
Err.Description & "Rechenzeit in Sekunden: " & Int(Timer) -
Int(start)
```

```
End Function
```

```
Sub CreateCheckBoxes() 'erstellt Kontrollkästchen dort wo ein
Knoten eingetragen ist
```

```
Call FixValues
```

```
lastRaus = aus.Cells(Rows.Count, firstCaus).End(xlUp).Row 'letzte
beschrieben Zeile in "Auswertung"
```

```
counter = 0 'Startwert
```

```
For i = 0 To 100
```

```
ReDim Preserve ChBoxes(counter + 9)
```

```
If Cells(firstRaus + i, 2).Value <> "" Then
```

```
        Set ChBoxes(counter + 1) =
aus.CheckBoxes.Add(Cells(firstRaus + i, 3).Left + 20, _
Cells(firstRaus + i, 3).Top, 24, 10)
        ChBoxes(counter + 1).Text = ""

        Set ChBoxes(counter + 2) =
aus.CheckBoxes.Add(Cells(firstRaus + i, 4).Left + 20, _
Cells(firstRaus + i, 3).Top, 24, 10)
        ChBoxes(counter + 2).Text = ""

        Set ChBoxes(counter + 3) =
aus.CheckBoxes.Add(Cells(firstRaus + i, 5).Left + 20, _
Cells(firstRaus + i, 3).Top, 24, 10)
        ChBoxes(counter + 3).Text = ""

        Set ChBoxes(counter + 4) =
aus.CheckBoxes.Add(Cells(firstRaus + i, 6).Left + 20, _
Cells(firstRaus + i, 3).Top, 24, 10)
        ChBoxes(counter + 4).Text = ""

        Set ChBoxes(counter + 5) =
aus.CheckBoxes.Add(Cells(firstRaus + i, 7).Left + 20, _
Cells(firstRaus + i, 3).Top, 24, 10)
        ChBoxes(counter + 5).Text = ""

        Set ChBoxes(counter + 6) =
aus.CheckBoxes.Add(Cells(firstRaus + i, 8).Left + 20, _
Cells(firstRaus + i, 3).Top, 24, 10)
```

```
ChBoxes(counter + 6).Text = ""

Set ChBoxes(counter + 7) =
aus.CheckBoxes.Add(Cells(firstRaus + i, 9).Left + 20, _
Cells(firstRaus + i, 3).Top, 24, 10)
ChBoxes(counter + 7).Text = ""

Set ChBoxes(counter + 8) =
aus.CheckBoxes.Add(Cells(firstRaus + i, 10).Left + 20, _
Cells(firstRaus + i, 3).Top, 24, 10)
ChBoxes(counter + 8).Text = ""

Set ChBoxes(counter + 9) =
aus.CheckBoxes.Add(Cells(firstRaus + i, 11).Left + 20, _
Cells(firstRaus + i, 3).Top, 24, 10)
ChBoxes(counter + 9).Text = ""

counter = counter + 9

End If

Next i

End Sub
```

```
Sub DeleteCheckBoxes() 'löscht alle Kontrollkästchen die vorhanden
sind
```

```
Call FixValues
```

```
Dim chbo As CheckBox
```

```
For Each chbo In aus.CheckBoxes
```

```
    chbo.Delete
```

```
Next
```

```
End Sub
```

```
Sub CreateDiagrams() 'wird nach Klick auf "Diagramme erstellen" in  
"Auswertung" ausgeführt
```

```
Call FixValues
```

```
Dim lastRsim As Long
```

```
Dim lastCsim As Integer
```

```
Dim lastRaus As Integer
```

```
'letzte beschriebene Zeile in "Simulation"
```

```
lastRsim = sim.Cells(Rows.Count, firstCsim + 2).End(xlUp).Row
```

```
'letzte beschriebene Spalte der Zeile 5 in "Simulation"
```

```
lastCsim = sim.Cells(firstRsim + 2,  
firstCsim).End(xlToRight).Column
```

```
'letzte beschriebene Zeile in "Auswertung"
```

```
lastRaus = aus.Cells(Rows.Count, firstCaus).End(xlUp).Row
```

```
Dim NumbCharts As Integer
```

```
Dim plt As ChartObject
```

```
'Diagramme löschen
```

```
If plot.ChartObjects.Count <> 0 Then
    For Each plt In plot.ChartObjects
        plt.Delete
    Next
End If

Dim WantedCol As Integer
Dim WantedNode As Integer
Dim LenWantedNode As Integer
Dim counter As Integer

counter = 0 'startwert
For j = 0 To lastRaus - firstRaus
    WantedNode = aus.Cells(firstRaus + j, firstCaus).Value
    LenWantedNode = Len(WantedNode)
    If WantedNode = 0 Then 'Ausnahme für HW
        WantedCol = 3
        Call CreatePlots(WantedNode, WantedCol, counter, plot,
            NumbCharts, lastRaus, lastCsim, _
                lastRsim)
    End If
    For i = firstCsim To lastCsim
        If Right(sim.Cells(firstRsim, i).Value, LenWantedNode) =
            WantedNode Then
            WantedCol = i
            counter = counter + 1
            Call CreatePlots(WantedNode, WantedCol, counter, plot,
                NumbCharts, lastRaus, _
                    lastCsim, lastRsim)
        End If
    Next i

```



```
Next j
```

```
End Sub
```

```
Function CreatePlots(WantedNode As Integer, WantedCol As Integer,  
counter As Integer, _
```

```
    plot As Worksheet, NumbCharts As Integer,  
lastRaus As Integer, _  
    lastCsim As Integer, lastRsim As Long)
```

```
'#####  
#####
```

```
'#####  
#####
```

```
'#####  
#####
```

```
'### Plot erstellen ###
```

```
'letzte beschriebene Zeile in "Simulation"
```

```
lastRsim = sim.Cells(Rows.Count, firstCsim + 2).End(xlUp).Row
```

```
'letzte beschriebene Spalte der Zeile 5 in "Simulation"
```

```
lastCsim = sim.Cells(firstRsim + 2,  
firstCsim).End(xlToRight).Column
```

```
sim.Activate
```

```
Dim gap As Integer
```

```
Dim amountVal As Integer
```

```
' ### geforderte Daten in Array schreiben ###
```

```
'falls Anzahl der Werte > 30000 (Diagramm Erstellung durch Excel  
nicht möglich)
```

```
'-> nur jeden x-ten Datensatz nehmen (=gap)
```

```
If SimDuration / StepSize > 15000 Then
```

```
    gap = SimDuration / StepSize / 15000 + 1
```

```
    amountVal = Round((lastRsim / gap), [0])
```

```
Else
```

```
    gap = 1
```

```
    amountVal = (lastRsim - firstRsim - 2)
```

```
End If
```

```
'Arrays erstellen und Dimensionieren
```

```
Dim plotmDot()
```

```
ReDim Preserve plotmDot(amountVal)
```

```
Dim plotTempVL()
```

```
ReDim Preserve plotTempVL(amountVal)
```

```
Dim plotTempRL()
```

```
ReDim Preserve plotTempRL(amountVal)
```

```
Dim plotPowerVL()
```

```
ReDim Preserve plotPowerVL(amountVal)
```

```
Dim plotPowerRL()
```

```
ReDim Preserve plotPowerRL(amountVal)
```

```
Dim plotPower()
```

```
ReDim Preserve plotPower(amountVal)
```

```
Dim plotLossVL()
```

```
ReDim Preserve plotLossVL(amountVal)
```

```
Dim plotLossRL()
```

```
ReDim Preserve plotLossRL(amountVal)
```

```
Dim plotLoss()
```

```
ReDim Preserve plotLoss(amountVal)
```

```
Dim TimeAxis()
```

```
ReDim Preserve TimeAxis(amountVal)
```

```
'# Daten in die Arrays aufnehmen #

If WantedCol = 3 Then ' Ausnahe für Heizwerk
    For i = 0 To amountVal - 1
        plotmDot(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap, WantedCol
+ 8).Value 'Massenstrom
        plotTempVL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol).Value 'Temp VL
        plotTempRL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 4).Value 'Temp RL
        plotPowerVL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 1).Value 'Leistung VL
        plotPowerRL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 5).Value 'Leistung RL
        plotPower(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 1).Value _
            - sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 5).Value 'Leistung GES
        plotLossVL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 2).Value 'Verlust VL
        plotLossRL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 6).Value 'Verlust RL
        plotLoss(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap, WantedCol
+ 2).Value _
            + sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 6).Value 'Verlust GES
        TimeAxis(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
firstCsim).Value
    Next i
Else
    For i = 0 To amountVal - 1
        plotmDot(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap, WantedCol
+ 8).Value 'Massenstrom
        plotTempVL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol).Value 'Temp VL
```

```
        plotTempRL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 4).Value 'Temp RL
        plotPowerVL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 3).Value 'Leistung VL
        plotPowerRL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 7).Value 'Leistung RL
        plotPower(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 3).Value _
                                - sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 7).Value 'Leistung GES
        plotLossVL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 2).Value 'Verlust VL
        plotLossRL(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 6).Value 'Verlust RL
        plotLoss(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap, WantedCol
+ 2).Value _
                                + sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
WantedCol + 6).Value 'Verlust GES
        TimeAxis(i) = sim.Cells(firstRsim + 3 + i * gap,
firstCsim).Value
        Next i
End If

counter = 1
Dim ch As CheckBox
Dim ChBoxes() As Variant

For Each ch In aus.CheckBoxes
    ReDim Preserve ChBoxes(counter)
    If ch.Value = 1 Then
        ChBoxes(counter) = counter
    End If
    counter = counter + 1
Next ch
```

```
counter = 1

Height = 16
Length = 10
startC = 2

'### Kontrolle welches Kontrollkästchen abgehakt ist & die
entsprechenden Plots erstellen ###

plot.Activate

If ChBoxes(counter) = counter Then 'wenn Massenstrom-Kästchen
abgehakt

    startR = 2 + (Height + 2) * NumbCharts

    Set groesse = Range(Cells(startR, startC), Cells(startR +
Height, startC + Length))

    Set diagramm = plot.ChartObjects.Add(groesse.Left,
groesse.Top, groesse.Width, groesse.Height)

    diagramm.Name = "Massenstrom Knoten " & WantedNode
    With diagramm.Chart
        .ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
        .SeriesCollection.NewSeries
        .SeriesCollection(1).XValues = TimeAxis
        .SeriesCollection(1).Values = plotmDot
        .SeriesCollection(1).Name = "Massenstrom Knoten " &
WantedNode
    End With

    NumbCharts = NumbCharts + 1
```

End If

If ChBoxes(counter + 1) = counter + 1 Then 'wenn TempVL-Kästchen
abgehakt

startR = 2 + (Height + 2) * NumbCharts

Set groesse2 = Range(Cells(startR, startC), Cells(startR +
Height, startC + Length))

Set diagramm2 = plot.ChartObjects.Add(groesse2.Left,
groesse2.Top, groesse2.Width, _
groesse2.Height)

diagramm2.Name = "Temp VL Knoten " & WantedNode

With diagramm2.Chart

.ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers

.SeriesCollection.NewSeries

.SeriesCollection(1).XValues = TimeAxis

.SeriesCollection(1).Values = plotTempVL

.SeriesCollection(1).Name = "Temp VL Knoten " & WantedNode

End With

NumbCharts = NumbCharts + 1

End If

If ChBoxes(counter + 2) = counter + 2 Then 'wenn TempRL-Kästchen
abgehakt

startR = 2 + (Height + 2) * NumbCharts

```
Set groesse3 = Range(Cells(startR, startC), Cells(startR + Height, startC + Length))

Set diagramm3 = plot.ChartObjects.Add(groesse3.Left, groesse3.Top, groesse3.Width, _
    groesse3.Height)
diagramm3.Name = "Temp RL Knoten " & WantedNode
With diagramm3.Chart
    .ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
    .SeriesCollection.NewSeries
    .SeriesCollection(1).XValues = TimeAxis
    .SeriesCollection(1).Values = plotTempRL
    .SeriesCollection(1).Name = "Temp RL Knoten " & WantedNode
End With

NumbCharts = NumbCharts + 1

End If

If ChBoxes(counter + 3) = counter + 3 Then 'wenn LeistungVL-Kästchen abgehakt

    startR = 2 + (Height + 2) * NumbCharts

    Set groesse4 = Range(Cells(startR, startC), Cells(startR + Height, startC + Length))

    Set diagramm4 = plot.ChartObjects.Add(groesse4.Left, groesse4.Top, groesse4.Width, _
        groesse4.Height)
    diagramm4.Name = "Leistung Knoten " & WantedNode
    With diagramm4.Chart
        .ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
        .SeriesCollection.NewSeries
```

```
.SeriesCollection(1).XValues = TimeAxis
.SeriesCollection(1).Values = plotPowerVL
.SeriesCollection(1).Name = "Leistung VL Knoten " &
WantedNode
End With

NumbCharts = NumbCharts + 1

End If

If ChBoxes(counter + 4) = counter + 4 Then 'wenn LeistungRL-
Kästchen abgehakt

    startR = 2 + (Height + 2) * NumbCharts

    Set groesse5 = Range(Cells(startR, startC), Cells(startR +
Height, startC + Length))

    Set diagramm5 = plot.ChartObjects.Add(groesse5.Left,
groesse5.Top, groesse5.Width, _
        groesse5.Height)

    diagramm5.Name = "Leistung RL Knoten " & WantedNode
    With diagramm5.Chart
        .ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
        .SeriesCollection.NewSeries
        .SeriesCollection(1).XValues = TimeAxis
        .SeriesCollection(1).Values = plotPowerRL
        .SeriesCollection(1).Name = "Leistung RL Knoten " &
WantedNode
    End With

    NumbCharts = NumbCharts + 1
```


End If

If ChBoxes(counter + 5) = counter + 5 Then 'wenn Leistung GES -
Kästchen abgehakt

startR = 2 + (Height + 2) * NumbCharts

Set groesse6 = Range(Cells(startR, startC), Cells(startR +
Height, startC + Length))

Set diagramm6 = plot.ChartObjects.Add(groesse6.Left,
groesse6.Top, groesse6.Width, _

groesse6.Height)

diagramm6.Name = "Leistung RL Knoten " & WantedNode

With diagramm6.Chart

.ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers

.SeriesCollection.NewSeries

.SeriesCollection(1).XValues = TimeAxis

.SeriesCollection(1).Values = plotPower

.SeriesCollection(1).Name = "Leistung ges Knoten " &
WantedNode

End With

NumbCharts = NumbCharts + 1

End If

If ChBoxes(counter + 6) = counter + 6 Then 'wenn VerlustVL-
Kästchen abgehakt

startR = 2 + (Height + 2) * NumbCharts

```
Set groesse7 = Range(Cells(startR, startC), Cells(startR + Height, startC + Length))
```

```
Set diagramm7 = plot.ChartObjects.Add(groesse7.Left, groesse7.Top, groesse7.Width, _ groesse7.Height)
```

```
diagramm7.Name = "Verlust VL Knoten " & WantedNode
```

```
With diagramm7.Chart
```

```
.ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
```

```
.SeriesCollection.NewSeries
```

```
.SeriesCollection(1).XValues = TimeAxis
```

```
.SeriesCollection(1).Values = plotLossVL
```

```
.SeriesCollection(1).Name = "Verlust VL Knoten " & WantedNode
```

```
End With
```

```
NumbCharts = NumbCharts + 1
```

```
End If
```

```
If ChBoxes(counter + 7) = counter + 7 Then 'wenn VerlustRL-Kästchen abgehakt
```

```
startR = 2 + (Height + 2) * NumbCharts
```

```
Set groesse8 = Range(Cells(startR, startC), Cells(startR + Height, startC + Length))
```

```
Set diagramm8 = plot.ChartObjects.Add(groesse8.Left, groesse8.Top, groesse8.Width, _ groesse8.Height)
```

```
diagramm8.Name = "Verlust RL Knoten " & WantedNode
```

```
With diagramm8.Chart
```

```
.ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
```

```
.SeriesCollection.NewSeries
.SeriesCollection(1).XValues = TimeAxis
.SeriesCollection(1).Values = plotLossRL
.SeriesCollection(1).Name = "Verlust RL Knoten " &
WantedNode
End With

NumbCharts = NumbCharts + 1

End If

If ChBoxes(counter + 8) = counter + 8 Then 'wenn VerlustRL-
Kästchen abgehakt

    startR = 2 + (Height + 2) * NumbCharts

    Set groesse9 = Range(Cells(startR, startC), Cells(startR +
Height, startC + Length))
    Set diagramm9 = plot.ChartObjects.Add(groesse9.Left,
groesse9.Top, groesse9.Width, _
        groesse9.Height)
    diagramm9.Name = "Verlust ges Knoten " & WantedNode
    With diagramm9.Chart
        .ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers
        .SeriesCollection.NewSeries
        .SeriesCollection(1).XValues = TimeAxis
        .SeriesCollection(1).Values = plotLoss
        .SeriesCollection(1).Name = "Verlust ges Knoten " &
WantedNode
    End With

    NumbCharts = NumbCharts + 1
```

End If

End Function