



Josef Bärnthaler; Katharina Karner; Matthias Theissing; Melanie Horn

# Dynamische Simulation von Abkühlvorgängen in Nahwärmenetzen

116 – Energy, Environment & Transportation

## Abstract

Um die Netzverluste in einem Nahwärmenetz zu reduzieren, wird ein temperaturflexibler Betrieb, bei dem es in Schwachlastzeiten zu einer Netzabschaltung kommt, analysiert. In diesen Zeiträumen mit Netzabschaltung werden die Kunden durch zuvor geladene dezentrale Speicher versorgt. Um konkrete Aussagen über das Betriebsverhalten tätigen zu können, ist die Kenntnis über die Wärmeverluste und das Speicherverhalten des Netzes essentiell. Da metallische Werkstoffe ein temperaturabhängiges Ausdehnungsverhalten zeigen, ist somit auch eine Betrachtung der thermischen Beanspruchungssituation notwendig. Hierzu wurde ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem das dynamische Temperaturverhalten des Netzes und einzelner Leitungsabschnitte untersucht wurden. Im Zuge der Arbeiten wurden verschiedene typische Rohrleitungskonfigurationen (Einzelrohre, Doppelrohre, verschiedene Verlegesituationen etc.) untersucht. Die errechneten Temperaturverläufe dienen in weiterer Folge zur Auswertung der thermischen Spannungen in den Rohrleitungen. Es konnte nachgewiesen werden, dass es auch bei direkten erdverlegten Rohrleitungen unter Voraussetzung der Einhaltung von branchenrelevanten Normen und Richtlinien zu keiner Überschreitung der zulässigen Festigkeitswerte in einem temperaturflexiblen Betrieb kommt.

## Keywords:

Dynamische Simulation, Nahwärme, Fernwärme, Wärmeverteilnetze, Rohrstatik, Wärmeverluste, Temperaturflexibilisierung, Abkühlvorgänge

## Einleitung

Im Zuge des aktuellen Projektes TFlex (Temperaturflexibilisierung im Schwachlastbereich des Betriebs von Nahwärmenetzen, FFG Projektnummer: 850060) wird untersucht, ob sich die Netzverluste bestehender Nahwärmenetze in Schwachlastzeiten dadurch verringern lassen, indem das Netz abgeschaltet und der Wärmebedarf der Kunden aus zuvor geladenen dezentralen Speichern bedient wird. Eine 100% Wärmeversorgung der Kunden soll dabei natürlich gewährleistet werden.

Im Zuge dieser Untersuchung werden unter anderem folgende Fragestellungen beantwortet:

- Wie lässt sich der Wärmeverlust von Nahwärmerohrleitungen darstellen?
- Wie groß ist die Speicherfähigkeit des Netzes?

- Welchen thermischen Beanspruchungen ist das Netz ausgesetzt?

## Wärmeverlust

### Modell Wärmeverlust

Mit Hilfe der Simulationsumgebung IPSEpro wurde ein Modell entwickelt, das den Wärmeverlust von Wärmeverteilmrohren und deren Längenänderung aufgrund von Temperaturänderungen darstellt. Dadurch können das Aufheiz- und Abkühlverhalten von Wärmeverteilmrohren bzw. einzelnen Abschnitten simuliert werden, sowie die Netzverluste und Speicherefähigkeit des Netzes bewertet werden.

Grundlage der Modellentwicklung war eine ausgiebige Literaturrecherche, um das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten zu verstehen und mittels Gleichungen darstellen zu können. Als Hauptliteraturquelle diente in diesem Stadium der VDI-Wärmeatlas [1]. Das Modell bildet nun mit Hilfe von Differentialgleichungen den zweidimensionalen Wärmeübergang eines (instationär) durchströmten Rohrleitungsabschnitts ab.

### Generelle Modellkonzeption

Die Entwicklung des Modells erfolgte in mehreren Schritten. Ausgangspunkt war ein einfaches Modell mit ebenen Wärmeübergang und ohne Durchfluss, darauf aufbauend wurde die Komplexität immer weiter gesteigert, bis das finale Modell erreicht wurde.

Basierend auf der Literaturrecherche konnte ein Grundkonzept des geplanten Modells entworfen werden. Abbildung 1 zeigt den Wärmefluss im Modells und stellt das aus der Wirklichkeit abstrahierte Modell aus Abbildung 2 dar. Dieses besteht aus konzentrischen Kreisringen bzw. Zylinderringen mit einem axialen Durchfluss durch das Rohr und einen radialen Wärmeverlust über die Ringe.

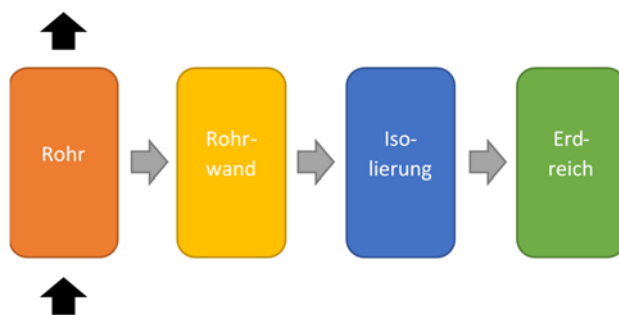


Abbildung 1: Informationsfluss im Einzelrohr-Modell

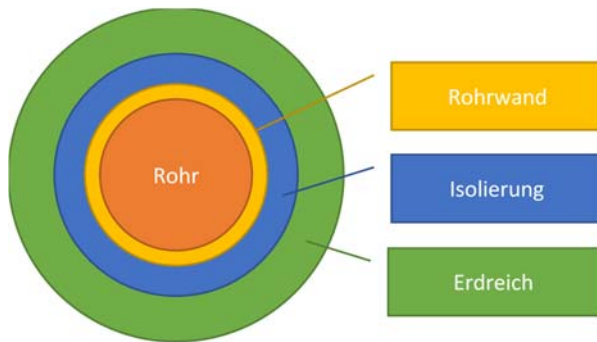


Abbildung 2: Aufbau eines Einzelrohres

Die Kreis- bzw. Zylinderringe werden mittels Komponentenmodelle (Rohr, Rohrwand, Isolierung, Erdreich) im Simulationsmodell dargestellt. Die Komponentenmodelle werden validiert und verifiziert und in einem iterativen Verbesserungsprozess gegebenenfalls adaptiert. Anschließend werden nach dem Prinzip des „Piecemeal Engineerings“ die Komponentenmodelle einzeln miteinander verbunden, um so die Wechselwirkungen der Komponenten miteinander besser beurteilen zu können. Auch hier erfolgt wieder eine Validierung und Adaptierung. Während der Evaluierungsprozesse ist die passende Parametrisierung des Modells besonders wichtig.

### Einzelrohr

Bei erdverlegten Einzelrohrleitungen bestehen keine Wechselwirkungen mit Nachbarrohrleitungen. Aufgrund dessen wird das Modell „Einzelrohr“ anhand des in Abbildung 1 dargestellten Schemas aus den Komponentenmodellen aufgebaut. Der Aufbau der Komponentenmodelle erlaubt einen (instationären) Durchfluss des Rohres bzw. auch eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit auf 0.

### Doppelrohr

Für die Abbildung von Doppelrohren wird die generelle Modellkonzeption abgeändert, um die gegenseitige Beeinflussung von Vorlauf- und Rücklaufleitungen darstellen zu können. Der Aufbau der Komponentenmodelle erlaubt einen (instationären) Durchfluss des Rohres bzw. auch eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit auf 0. Abbildung 3 zeigt den Wärmefluss des Modells und stellt das aus der Wirklichkeit abstrahierte Modell aus Abbildung 4 dar. Dieses besteht aus konzentrischen Kreisringen bzw. Zylinderringen mit einem axialen Durchfluss durch das Rohr und einen radialen Wärmeverlust über die Ringe.

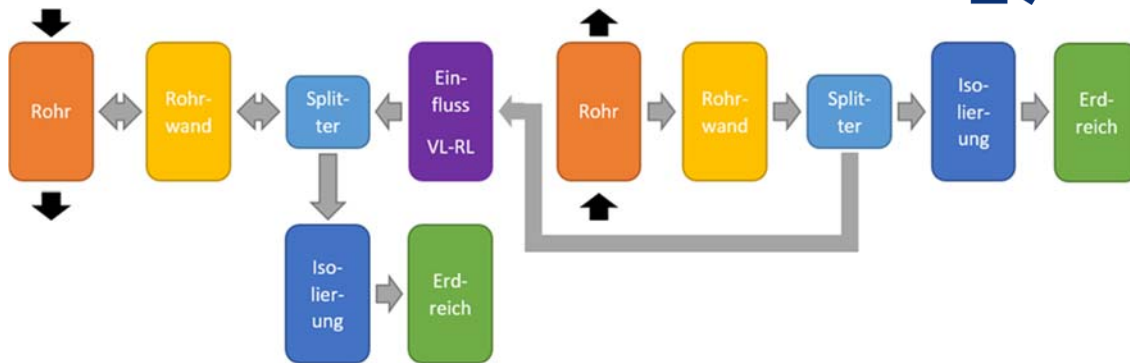


Abbildung 3: Informationsfluss in einem Doppelrohr

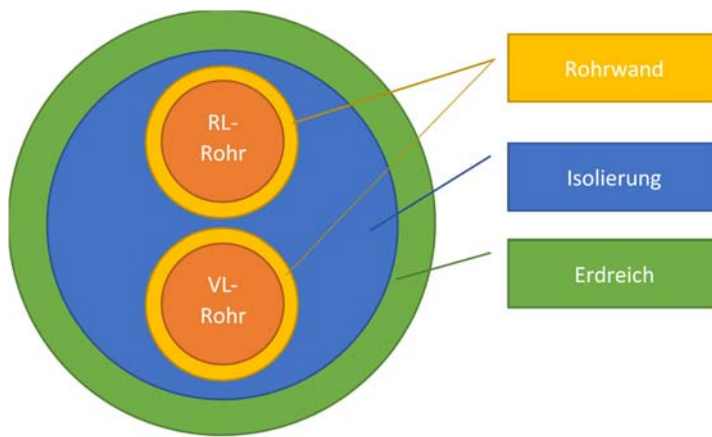


Abbildung 4: Aufbau eines Doppelrohres

### Parametrierung und Simulation

Die Parametrierung erfolgt anhand der Produktdatenblätter von ISOPLUS [2] Datenlücken werden mit Hilfe des Taschenbuchs für Heizung und Klimatechnik [3] vervollständigt.

Für die Simulation stehen zusätzlich folgende Realdaten auf Stundenbasis zur Verfügung: Vorlauf- und Rücklauf-temperatur, Massenstrom in den Rohrleitungen und Außentemperatur. Anhand dieser Daten kann der normale Netzbetrieb simuliert werden.

Der T-Flex Betrieb ist charakterisiert durch oftmaliges Ausschalten des Netzes, um die Netzverluste zu reduzieren. In dieser Zeit kühlt das Netz aus und für das Wiederaufheizen des Netzes wird zusätzlich Energie benötigt. Im Simulationsmodell wird dafür der Durchfluss im Rohr auf „null“ gesetzt und die Temperaturabsenkung stündlich aufgezeichnet, bis sich die Vorlauf- bzw. Rücklauf-temperatur an die Umgebungstemperatur angepasst haben. Die erhaltenen Abkühlkurven dienen zur Aussage über die Speicherfähigkeit des Netzes sowie zur Ermittlung des Energiebedarfs zum Wiederaufheizen des Netzes.

## Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt das Abkühlverhalten zweier Rohrleitungen mit unterschiedlichen Durchmessern für eine typische Woche im Jänner. Man kann deutlich erkennen, dass die Rohrleitung mit dem kleineren Durchmesser bereits nach bereits 6 Stunden auf ca. 50°C abgekühlt ist, wobei die Leitung mit dem größeren Durchmesser erst nach ca. 45 Stunden auf das genannte Temperaturniveau abgekühlt ist.

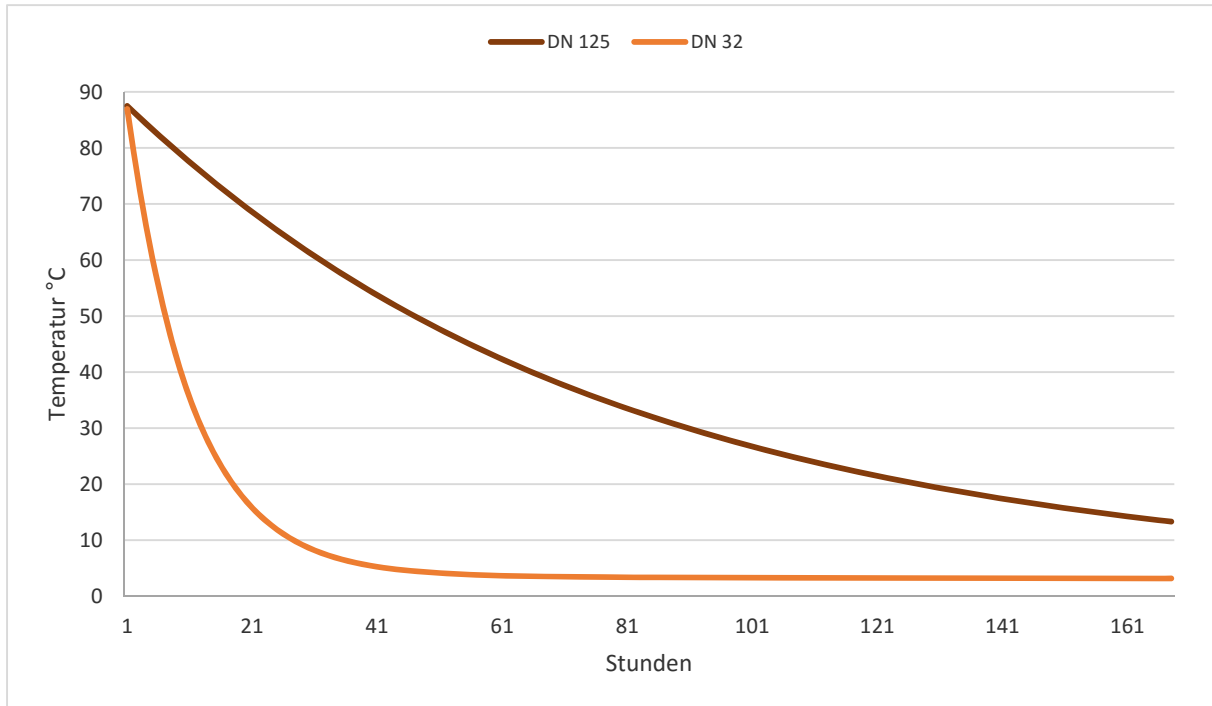


Abbildung 5: Abkühlverhalten von Rohrleitungen mit unterschiedlichen Durchmessern (Jänner), VL-Temperatur 87°C, Verlegetiefe 0,80m, Außentemperatur: Realdaten im Bereich von -4,1 bis 3,5°C

Abbildung 6 zeigt das Abkühlverhalten zweier Rohrleitungen mit unterschiedlichen Durchmessern für eine typische Woche im August. Im Vergleich Jänner zu August wird das Abkühlverhalten auf Grund der unterschiedlichen Außentemperaturen und Temperaturen im Rohr beeinflusst und es kommt zu einem leicht verzögerten Erreichen der 50°C Marke.

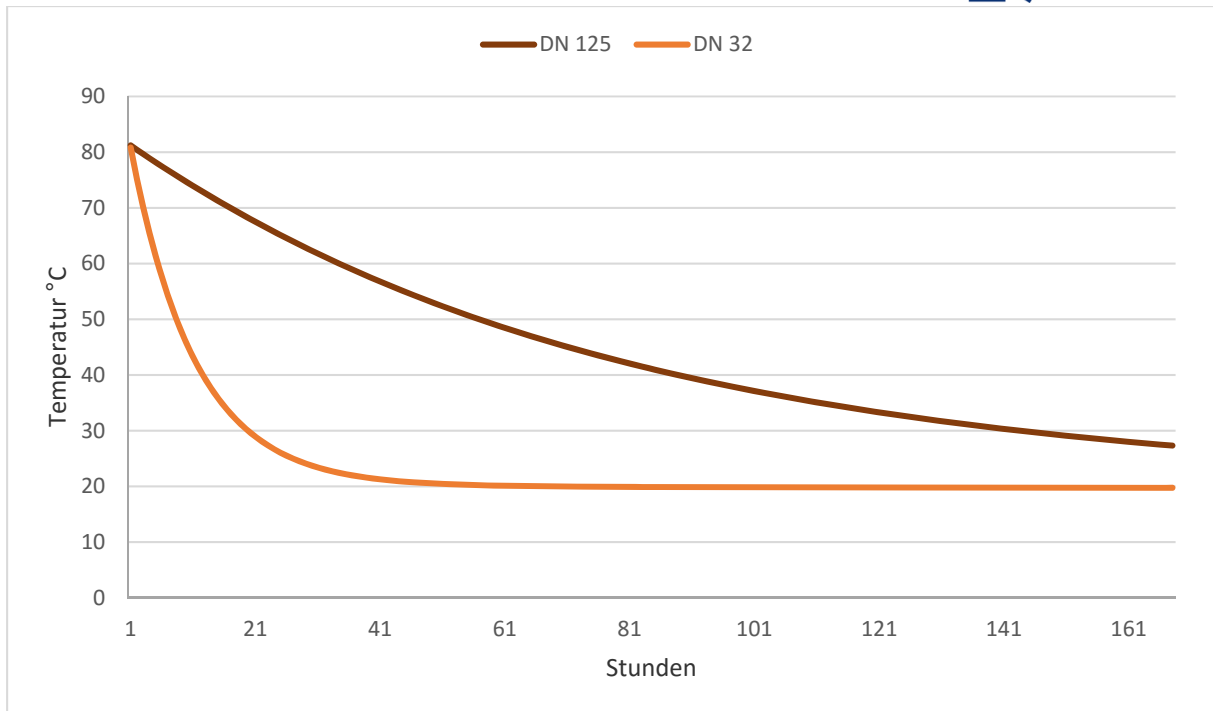


Abbildung 6: Abkühlverhalten von Rohrleitungen mit unterschiedlichen Durchmessern (August), VL-Temperatur 80°C, Verlegetiefe 0,80m, Außentemperatur: Realdaten im Bereich von -4,1 bis 3,5°C

Abbildung 7 zeigt das Abkühlverhalten eines Doppelrohres mit Durchmesser 2x63 für eine typische Woche im April. Die Vorlaufleitung kühlt verhältnismäßig rascher ab, als das Rücklaufrohr. Durch die gemeinsame Isolierung des Doppelrohrs, erwärmt sich beim Abkühlvorgang die Rücklaufleitung zuerst und passt sich der Temperatur der Vorlaufleitung an, bevor beide gemeinsam abkühlen und sich die Temperaturen der Außentemperatur anpassen.

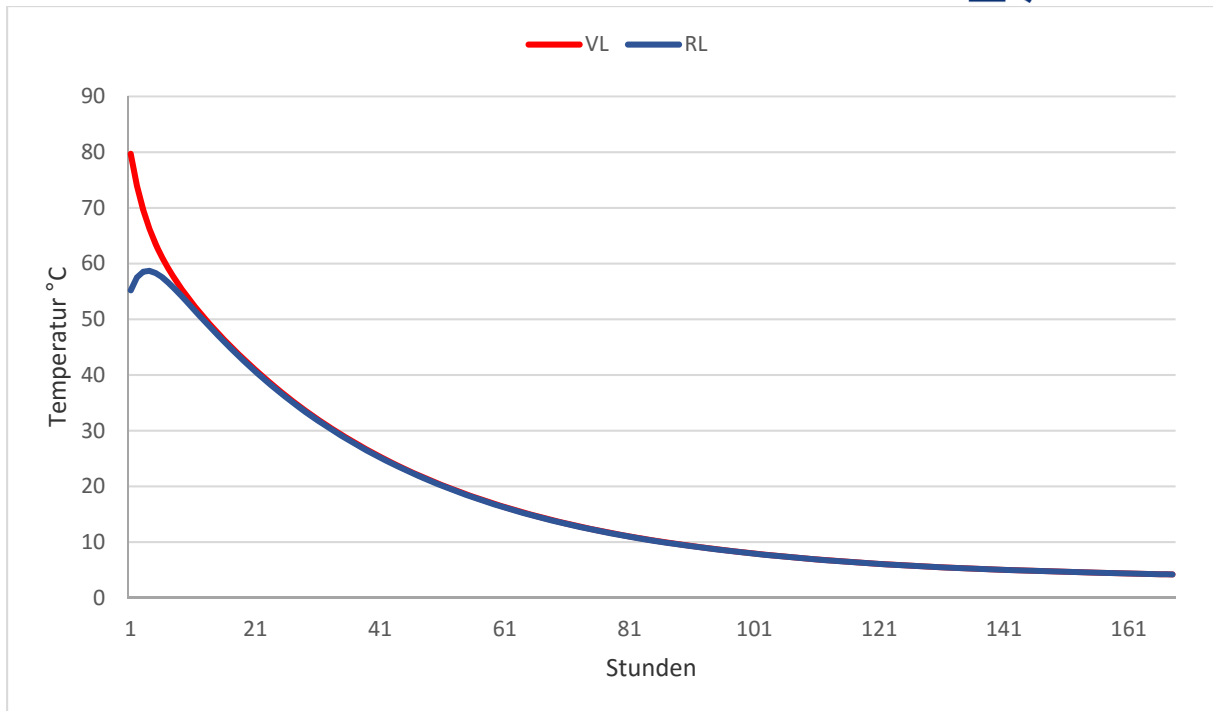


Abbildung 7: Abkühlverhalten eines Doppelrohres (Jänner), VL-Temperatur 80°C, RL-Temperatur 50°C, Verlegetiefe 0,80m, Außentemperatur: Realdaten im Bereich von 3,6 bis 26,2°C

### Schlussfolgerungen

Wie die Abbildungen 5-7 zeigen, hängt das Abkühlverhalten von der Art der Rohrleitungen, von deren Durchmesser, Material, Verlegetiefe sowie der Betriebs- und Außentemperatur ab. Der Durchmesser und die Art bzw. das Material der Rohrleitungen spielen eine signifikante Rolle bei der Entscheidung ob einzelne Nahwärmeleitungen / Äste oder gar das ganze Netz in einem T-Flex Betrieb zeitweise stillgelegt werden können.

Mit dem erarbeiteten Simulationsmodell lässt sich das Auskühlverhalten von Rohrleitungen in Wärmeverteilnetzen mit hinreichender Genauigkeit abbilden. Dadurch werden Parameterstudien zur Optimierung Betriebsweise möglich. Besonders hervorzuheben ist, dass sich auch die komplexen Wärmeübertragungs- und Wärmeverlustmechanismen in Doppelrohren abbilden lassen. Hier ist eine für den Betrieb wichtige Erkenntnis, dass ein Teil der Wärmeverluste im System bleibt, da es zu einer Wärmeverschiebung von der Vorlauf- zur Rücklaufleitung kommt. Diese im Sinne der Gesamtenergieverluste günstige Situation kann allerdings durch die Anhebung der Rücklauftemperatur (Wärmeverschiebung von der Vorlaufleitung) zu einer Einschränkung der Wärmeeinbindung in den Heizwerken (Stichwort: Rauchgaskondensation) führen.

### Rohrstatik

#### Modell

Metallwerkstoffe zeigen ein temperaturabhängiges Ausdehnungsverhalten. Gerade in Wärmeverteilnetzen mit deutlich höheren Temperaturniveaus muss dementsprechend Vorsorge getroffen werden, dass die dadurch auftretenden Wärmespannungen begrenzt werden. Diese Wärmespannungen können vor allem bei Betrieb mit veränderlichen Temperaturen oder auch schon bei der Verlegung der Rohrleitungen in Wärmeverteilnetzen entstehen.

Die klassische Form einer Auslegung der Leitungen mit definierten Fixpunkten, Loslagern und Kompensatoren vermeidet bzw. begrenzt Wärmespannungen von vorne herein. Bei der Verwendung von erdverlegten Kunststoffmantelrohren (KMR) wird aus Kostengründen zu meist darauf verzichtet. Durch thermisches Vorspannen kann der Maximalbereich der auftretenden Spannungen in den Rohrleitungen allerdings betragsmäßig reduziert werden. So kommt es nicht nur zu Druckspannungen ( $\sigma$  negativ) sondern auch zu Zugspannungen ( $\sigma$  positiv). Die auftretenden Spannungen können anhand folgender Formel 1 berechnet werden:

$$\sigma = E_S * \alpha * [(T_V - T_K) - (T_B - T_K)]$$

$E_s$  ... E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]

$\alpha$  ... Längenausdehnungskoeffizient [mm/mK]

$T_v$  ... Vorspanntemperatur [K]

$T_K$  ... Temperatur Erdreich [K]

$T_B$  ... Betriebstemperatur [K]

Je nach Quelle [4, 5] wird eine Dauerfestigkeit für Zug-Wechselbeanspruchung von 150 - 170 N/mm<sup>2</sup> für den in Fernwärmerohrleitungen vornehmlich eingesetzten Stahl ST37 angegeben. Dauerfestigkeit ist für Lastfälle größer 10<sup>7</sup> Lastspiele definiert. Bei einem T-Flex-Betrieb treten allerdings nur 10<sup>4</sup> Lastspiele auf. Somit besteht kein echtes Dauerfestigkeitsproblem und bei Berücksichtigung der Dauerfestigkeitswerte der Werkstoffe ist somit eine große Sicherheitsreserve einbezogen.

## Ergebnisse

Für Leitungen, die mit einer eindeutigen Auslegung Fixpunkt-Loslager-Kompensation ausgeführt sind, gibt es keine Einschränkungen hinsichtlich temperaturflexiblen Betriebs. Dieser Fall stellt ein best-case Szenario dar, da hier keine thermisch induzierten Spannungen auftreten. Derartige Leitungskonstruktionen sind allerdings eher im Bereich der Infrastrukturleitungen zu finden. Typischerweise als Ausführung in Kollektorgängen.

Kunststoffleitungen stellen einen speziellen Fall dar, auch hier treten keine thermisch induzierten Spannungen auf, da die Rohrwände durch ihre Strukturelastizität selbst die Verformungen aufnehmen können.

Für direkt erdverlegte Rohrleitungen wird eine worst-case Betrachtung gewählt, unter der Annahme, dass es zu einer vollständigen Dehnungsbehinderung kommt. In der Praxis werden Dehnpolster verwendet, die hier einen Teil der Belastung abfedern können. 60% der Werte befinden sich unter dem Grenzwert von 150 N/mm<sup>2</sup>, ein Drittel der Werte liegt im Schwankungsbereich der Grenzwerte 150-170 N/mm<sup>2</sup>. Lediglich bei einem Achtel kommt es zum Überschreiten des Grenzwertes von 170 N/mm<sup>2</sup>.

Analog zum Temperaturverlauf können auch die auftretenden Spannungen bei der Netzausschaltung aufgezeichnet werden. Exemplarisch ist das für den einen Netzstrang dargestellt.



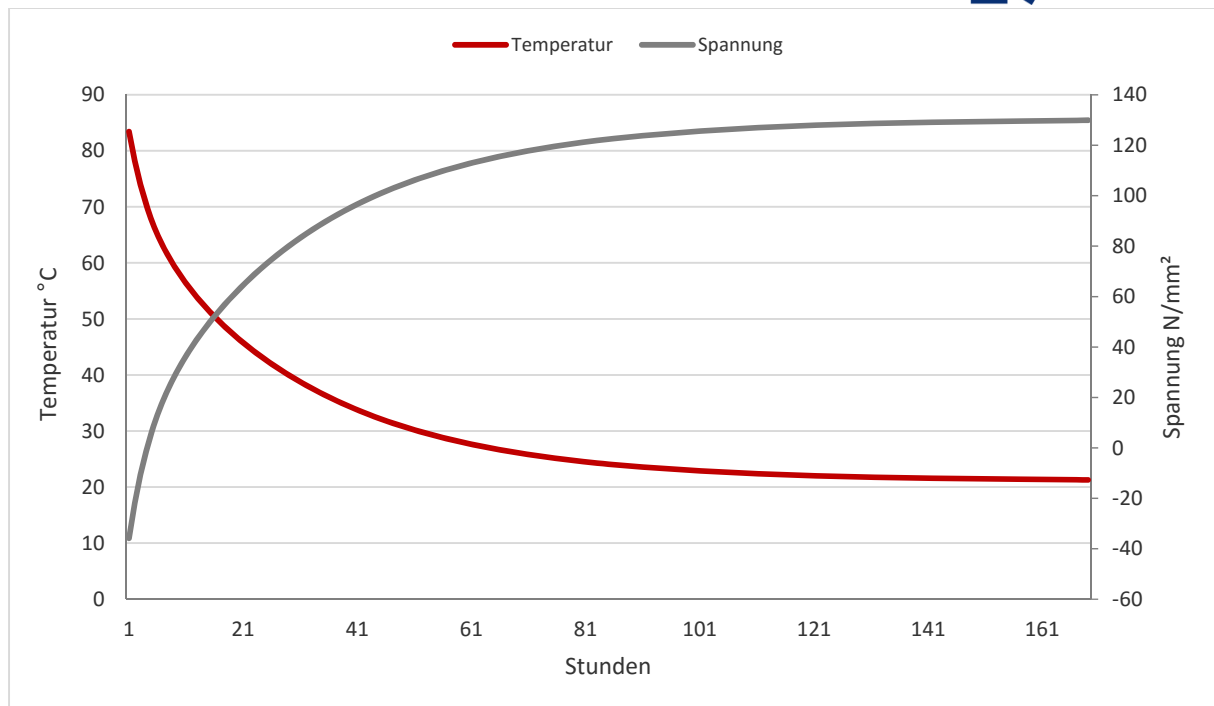


Abbildung 8: Spannungsverlauf eines Rohres während des Abkühlvorganges (August), Temperatur 80°C, Verlegetiefe 0,80m, Vorspanntemperatur 70°C, Außentemperatur: Realdaten im Bereich von 11,2 bis 24,8°C

Gemäß Formel 1 steigt die Spannung mit sinkender Temperatur an und nähert sich dem Wert 130 N/mm<sup>2</sup>. Zusätzlich zur Betriebstemperatur und der Außentemperatur hat besonders die Verlegetemperatur (Vorspanntemperatur) einen wesentlichen Einfluss auf die auftretenden Spannungen. Für den gewählten Netzstrang wurde in einer zweiten Simulationsrechnung die Vorspanntemperatur auf 52°C reduziert, wodurch sich der Bereich der auftretenden Spannungen verschiebt. Bei dieser gewählten Vorspanntemperatur kommt es zu Druck- und Zugspannungen in gleichen Größenordnungen.

Bei den betrachteten Netzabschnitten werden ganzseitig angebrachte Dehnpölster im Ausmaß von 40 mm verwendet. Bei den bestehenden Rahmenbedingungen (Stahlrohr ST 37, Temperaturdifferenz von 50K) können die Dehnpölster bei einer Rohrleitungslänge bis zu von 150 m die Längenänderung voll kompensieren.

### Schlussfolgerungen

Auf Grund der Simulationen zur Rohrstatik ist der T-Flex Betrieb grundsätzlich sowohl für vollkompensierte Rohrleitungen, Kunststoffrohrleitungen als auch direkt erdverlegte Rohrleitungen möglich. Zur Vermeidung von Problemen in Folge von Wärmespannungen muss allerdings die jeweilige Einbausituation der Rohrleitungen im Detail mitberücksichtigt werden.

Für Leitungen, die mit einer eindeutigen Auslegung Fixpunkt-Loslager-Kompensation ausgeführt sind, gibt es keine Einschränkungen hinsichtlich temperaturflexiblen Betriebs. Bei erdverlegten Kunststoffmantelrohren ist der wesentliche Einflussfaktor die Verlegetemperatur. Durch eine geschickte Wahl dieser Temperatur können die maximalen Spannungen in den Rohrleitungen signifikant unter den Dauerfestigkeitswerten gehalten werden. In diesem Zusammenhang scheint auch noch erwähnenswert, dass die Lastwechselanzahl in einem temperaturflexiblen Betrieb (je nach Rahmenbedingung ca. 70-200 Lastwechsel pro Jahr) aufsummiert auf die Lebensdauer der Leitungen um den Faktor 10<sup>3</sup> niedriger

sind als die den Dauerfestigkeitswerten zugrundeliegenden Lastspiele. Dies alles gilt unter der Voraussetzung, dass die Hausanschlussleitungen und Abzweigungen entsprechend der geltenden Verlegevorschriften und Normen ausgeführt sind.

### Literaturverzeichnis

Fachbuch: VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, editor (2002). VDI-Wärmeatlas. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Internet-Dokument: isoplus Fernwärmetechnik Vertriebsgesellschaft mbH (2017). isoplus Fernwärmetechnik n.d. <http://www.isoplus.at/> (accessed January 25, 2017).

Fachbuch: Recknagel H, Sprenger E (2011). Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 75. Auflag. München: Oldenbourg Industrieverlag.

Fachbuch: Beitz W, Küttner K-H, editors (1995). Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. 18. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-06774-1.

Fachbuch: Matek W, Muhs D, Wittel H, Becker M. Roloff/Matek (1994): Maschinenelemente. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. doi:10.1007/978-3-322-94343-9.