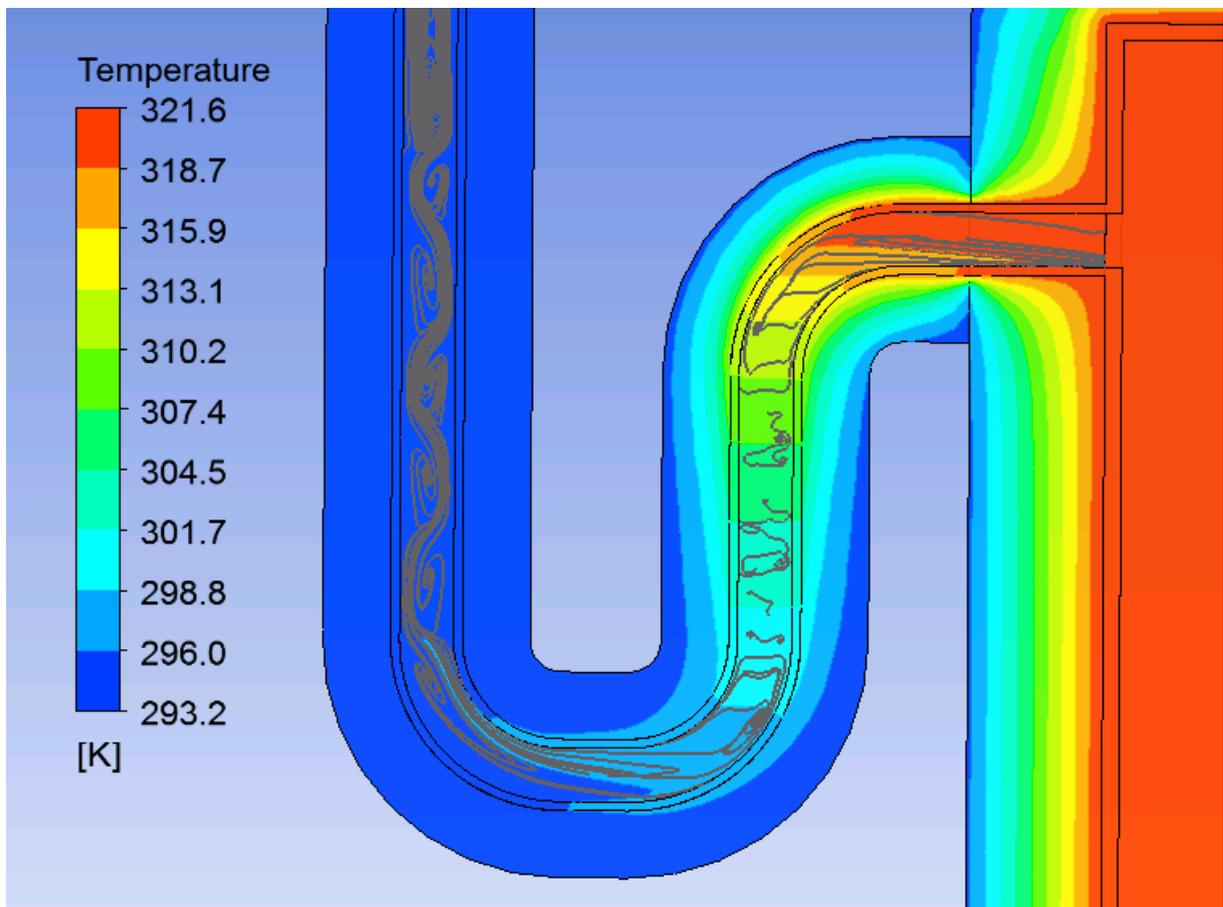




Schlussbericht 29. November 2017

applied Research

Korrekt siphonierte Wärmespeicher





Datum: 29. November 2017

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Solarwärme und Wärmespeicherung
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

SPF Institut für Solartechnik
Hochschule für Technik HSR
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

Autoren:

Michel Haller, michel.haller@spf.ch
Mattia Battaglia, mattia.battaglia@spf.ch

BFE-Bereichsleitung: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Elimar Frank, elimar.frank@frank-energy.com

BFE-Vertragsnummer: SI/500315-03

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Um Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation zu vermindern, werden Wärmespeicher gemäss SIA-Norm 385/1 siphoniert. In der Fachwelt herrschte Unklarheit darüber, ob der siphonierte Bereich zur besseren Unterbindung der Wärmebrücke und dem daraus folgenden besseren Abbau der Temperatur über den Siphon ohne Wärmedämmung ausgeführt werden sollte. Zur Überprüfung dieser Fragestellung wurden strömungsmechanische Simulationen mit ANSYS CFX durchgeführt. Die Simulationsresultate wurden mit Messungen aus früheren Laborstudien validiert.

Die Resultate zeigen, dass ein Weglassen der Wärmedämmung in allen untersuchten Fällen die Anschlussverluste erhöht. Die zusätzlichen Verluste am nicht wärmegeprägten Teil übertreffen in jedem Fall die positiven Effekte durch geringere Temperaturen im Rohr nach dem Siphon. Ob ein Weglassen der Wärmedämmung am Siphonbogen bei defektem Rückschlagventil die Schwerkraftzirkulation über die Vor- und Rücklaufleitung von Solaranlagen bremsen oder gar stoppen kann, wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

Zusätzlich wurde der Effekt nicht wärmegeprägter Rohrabschnitte, wie z.B. bei eingebauten Armaturen, in 0.5 m und 1.5 m Entfernung des Speicheranschlusses untersucht. Bei fehlender Siphonierung erhöhen sich die Verluste durch Einrohrzirkulation durch nicht wärmegeprägte Armaturen oder Komponenten in Speichernähe um bis zu 100 %. Dieser Effekt ist naturgemäss grösser für kürzere Rohrstücke zwischen Wärmebrücke und Speicher.

Die aus den Simulationen ableitbaren Empfehlungen zur Siphontiefe entsprechen weitestgehend den bisherigen Standards in der Schweiz. Für Speicheranschlüsse mit Siphons aus Kunststoff, Edelstahl und unlegiertem Stahl kann eine Siphontiefe die dem 4, 8, respektive 12-fachen des Innendurchmessers entspricht empfohlen werden. Bei Rohren mit sehr geringem Durchmesser (< 10 mm) sowie bei permanent durchflossenen Anschlüssen wird keine Siphonierung empfohlen.

Résumé

Les réservoirs de stockage de chaleur sont siphonnés selon la norme 285/1 de la SIA afin de limiter les pertes thermiques par recirculation à l'intérieur des canalisations. Parmi les professionnels règne une certaine confusion quant à la nécessité de ne pas isoler thermiquement le siphon de façon à maximiser le gradient de température du fluide qu'il contient et de fait, de mieux couper le pont thermique. Afin de clarifier ce point, des simulations de mécanique du fluide ont été effectuées avec ANSYS CFX. Les résultats des simulations ont été validés par des résultats expérimentaux d'études antérieures.

Les résultats montrent que dans tous les cas étudiés, la suppression de l'isolation augmente les pertes thermiques. Les déperditions thermiques supplémentaires au niveau de la partie non isolée supplantent dans tous les cas les effets bénéfiques apportés par une température plus faible dans le tube après le siphon. L'objet de ce travail n'a par contre pas été de vérifier si la suppression de l'isolation au niveau du coude du siphon permettait de limiter voir de stopper la circulation gravitaire à

travers les canalisations d'amenée et de retour en cas de dysfonctionnement du clapet anti-retour de l'installation solaire.

Complémentairement, des investigations ont été menées sur les effets occasionnés par la non-isolation de sections de canalisation éloignées de 0.5 et 1.5 m des connexions du réservoir de stockage. En cas d'absence de siphon, les pertes par recirculation à l'intérieur des canalisations peuvent s'élever à 100 %. L'effet est naturellement plus important si la longueur de canalisation entre le pont de chaleur et le réservoir est courte.

Les recommandations concernant les dimensions des siphons dérivant de ces simulations correspondent très largement aux standards actuels prévalant en Suisse. Pour les raccordements d'accumulateurs avec siphons en plastique, acier inoxydable et acier non allié, une profondeur de siphon de 4, 8 ou 12 fois le diamètre intérieur peut être recommandée. Aucun siphon n'est recommandé pour les tuyaux de très petit diamètre (< 10 mm) ainsi que pour les raccords à passage permanent.

Summary

In order to reduce pipe connection losses that are induced by single pipe circulation, thermal storages should be installed with heat traps according to the standard SIA 385/1. Experts argued whether a part of these heat traps should be uninsulated in order to increase the temperature difference between both legs of the trap and thus improve the suppression of the heat bridge. Simulations were performed using computational fluid dynamics with ANSYS CFX. The results of the simulations were validated with measurement results from previous laboratory work.

The results showed that omitting insulation for part of the heat trap lead to increased thermal losses for all cases that were analyzed. Increased heat losses at the uninsulated part always exceeded the effect of reduced temperatures after the heat trap. Whether the uninsulated part reduces unwanted buoyancy induced circulation over the supply and return line of solar thermal collectors was not analyzed.

In addition, the effect of uninsulated valves or pipe sections at 0.5 m and 1.5 m distance from the storage connection was analyzed. If the heat trap is missing, single pipe losses may be increased by 100% because of uninsulated valves or components near to the storage connection. Naturally, this effect is higher, the shorter the pipe between the storage and the thermal bridge.

Recommendations that can be derived for the geometry and depth of heat traps are in general agreement with existing standards and rules in Switzerland.

For siphons made of plastic, stainless steel and non-alloyed steel, a siphon depth of four, eight and twelve times the internal diameter can be recommended. For pipes with a very small diameter (< 10 mm) as well as for pipes with permanent flow no siphoning is recommended.



Inhalt

Zusammenfassung	4
Résumé	4
Summary	5
Abkürzungsverzeichnis und Definitionen	7
1 Einleitung und Ausgangslage	8
2 Ziele und Methoden	11
2.1 Aufbau der CFD Simulationen	11
2.2 Validierung der CFD-Simulationen	12
3 Resultate	14
3.1 Mit und ohne Wärmedämmung am Rohrbogen.....	14
3.2 Spezialfall Kupfer-Siphon	15
3.3 Armaturen und Wärmebrücken in Speichernähe.....	17
3.4 Siphontiefen in Abhängigkeit von Durchmesser und Material	18
4 Diskussion und Ausblick	20
5 Publikationen aus diesem Projekt	21
6 Literatur	21
Anhang A: Wahl des Gitters für CFD-Simulationen	23
Anhang B: Vereinfachung des geometrischen Modells	24
Anhang B: Mehrknotenmodell	26

Abkürzungsverzeichnis und Definitionen

CFD	Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics)
ERZ	Einrohrzirkulation
Kombispeicher	Wärmespeicher, in welchem Wärme für Raumheizung und für Warmwasser unter Ausnützung der thermischen Speicherschichtung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus gespeichert wird.
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SST SAS	Shear Stress Transport – Scale Adaptive Simulation



1 Einleitung und Ausgangslage

Um eine möglichst hohe Energieeffizienz zu erreichen, müssen die Energieverluste von Wärmespeichern so tief wie möglich gehalten werden. Bei kleinen Warmwasserboilern bis ca. 400l können diese Wärmeverluste, bei Objekten mit geringem Warmwasserbedarf, bis zu 50% und mehr des Energieaufwandes ausmachen und mit 500 – 800 kWh pro Speicher und Jahr zu Buche schlagen. Bei 1.6 Mio. Wohngebäuden in der Schweiz muss man davon ausgehen, dass mindestens 3% des schweizerischen Endenergieverbrauchs durch Verluste von Warmwasser-Wärmespeichern verursacht sind. Dabei sind die Verluste von Speichern die anderweitig zum Einsatz kommen noch nicht mit eingerechnet.

Verluste durch die Speicherwand können mit Hilfe von guter Wärmedämmung stark reduziert werden. An den verschiedenen Rohranschlüssen des Speichers entstehen durch Wärmebrücken zusätzliche Anschlussverluste. Diese werden durch interne Gegenstromzirkulation in den angeschlossenen Rohren verstärkt. Ursache für dieses Phänomen ist die natürliche Konvektion im Rohr, die ein Resultat der Temperaturunterschiede zwischen dem abkühlenden Fluid im Rohr und dem wärmeren Fluid im Speicher ist. Dieser Temperaturunterschied führt dazu, dass kälteres Fluid aus dem Rohr absinkt und in den Speicher fließt, während wärmeres Fluid aus dem Speicher in das Rohr steigt. Somit bleibt dieses auch bei längeren Perioden ohne Durchfluss relativ warm. Diese Einrohrzirkulation, die über den Rohrquerschnitt bilanziert zu keinem „Netto“ Fluidstrom führt, wurde bereits in verschiedenen experimentellen Studien untersucht (Weber u. a. 1983; Lauber 2007; Huhn 2007; Steinweg u. a. 2013; Steinweg u. a. 2015; Kliem u. a. 2014).

Auf Grund der verfügbaren Literatur ist bekannt, dass Einrohrzirkulation bei Speicheranschlüssen ohne Siphonierung die Wärmeverluste pro Anschluss je nach Rohrdurchmesser und Temperaturdifferenz des Speichers zur Umgebung um 0.1-0.6 W/K erhöhen.

Abbildung 1: Wärmeverlustkoeffizienten unsiphonierter wärmegeprägter Rohre in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers und der Temperaturdifferenz (Quelle: Kliem u. a. 2014).



Eine Erhöhung des Wärmeverlustes um 0.3 W/K pro Anschluss kann, bei einem solaren Kombispeicher von 800 L Grösse und 6 Anschlüssen auf unterschiedlichen Höhen des Speichers, die Gesamt-Wärmeverluste um 50 % erhöhen. In den Experimenten wurde ebenfalls gezeigt, dass eine Siphonierung des Speicheranschlusses eine wirkungsvolle Konvektionsbremse darstellt, Rückschlagventile als Konvektionsbremsen jedoch ungeeignet sind (Abbildung 2).

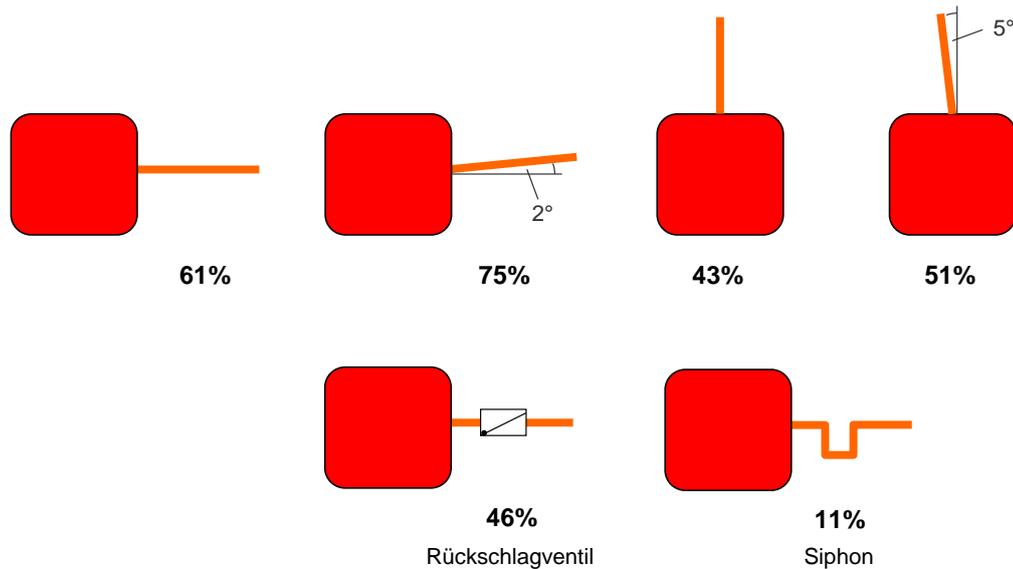


Abbildung 2: Darstellung der Wärmeverluste eines am Speicher angeschlossenen Rohres ohne Durchfluss als Prozentwert des theoretischen „worst case“, wobei dieser worst case einem Rohr entspricht, welches auch im Stillstand die Temperatur des Speichers aufweist. Basierend auf Daten aus Lauber (2007).

Bei Siphonierung des Speicheranschlussrohres reduzieren sich die gemessenen Wärmeverluste um über 90% auf unter 0.05 W/K pro Anschluss. Die Siphonierung von Speicheranschlüssen wird deshalb zur Effizienzsteigerung von Warmwasser und Heizungsanlagen im Allgemeinen empfohlen. Diese Empfehlungen haben inzwischen auch Eingang in einschlägige Normen gefunden, wie zum Beispiel die SIA 385/1 (2011), und können somit nach Ansicht der Autoren als Stand der Technik betrachtet werden, auch wenn die Ausführung im Feld diesbezüglich oft noch mangelhaft ist.

Mehrere Quellen geben Empfehlungen zur Mindesttiefe des Siphons in Abhängigkeit des Rohrmaterials und des Rohrdurchmessers an (Tabelle 1). Grössere Rohrdurchmesser begünstigen die Einrohrzirkulation und erhöhen zusätzlich auch die Wärmeleitung entlang des Rohres. Gleichzeitig ist die Wahl des Materials für den Siphon von Bedeutung. Weil Kupfer eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit hat, müssen wirksame Siphons aus Kupfer deutlich tiefer ausgeführt werden als Siphons aus anderen Materialien wie Edelstahl oder Kunststoff. Diese längeren Rohrstrecken führen zu erhöhten Wärmeverlusten im Betrieb, was die Vorteile des Siphons in diesem Falle vollständig kompensieren kann. Deshalb kommen Vogelsanger u.a. (2008) zum Schluss, dass Kupfer als Material für einen Siphon prinzipiell nicht geeignet ist.



Tabelle 1 Empfehlungen zur Tiefe des Siphons in Abhängigkeit des Materials und der Quelle.

Quelle	Kupfer ½"	Edelstahl ½"	Kupfer 1"	Edelstahl 1"
Kliem u. a. 2014	170 mm	70 mm	340 mm	140 mm
Vogelsanger u. a. 2008	nicht empfohlen	85 mm	nicht empfohlen	100 mm
National Institute of Building Sciences 2016	>600 mm	>600 mm	>600 mm	>600 mm
SIA 385/1 2011	nicht empfohlen	> 150 mm	nicht empfohlen	> 178 mm

Die bisher gemachten Abschätzungen zu Wärmeverlusten, welche durch Einrohrzirkulation hervorgerufen werden, basieren auf der Annahme, dass die angeschlossenen Rohre durchgängig inklusive Siphon lückenlos wärmegeämmt sind. Dabei blieben bisher zwei Fragen unbeantwortet:

1. Die Fachwelt war sich bisher nicht einig darüber, ob der Siphonbogen wärmegeämmt werden muss oder nicht. Manche Experten vertraten die Meinung, dass es besser sei, den Rohrbogen nicht mit Wärmedämmung zu versehen, weil er wirksamer sei, wenn er auskühlen kann und nicht dauernd über Wärmeleitung vom Speicher warm gehalten wird. Andere Experten waren der Meinung, dass der Verzicht auf Wärmedämmung am Siphonbogen prinzipiell nur zu erhöhten Wärmeverlusten führen kann.
2. Die bisher ermittelten Wärmeverluste von nicht siphonierten Speicheranschlüssen basieren auf der Annahme von lückenlos wärmegeämmtten Rohren. Die Praxis zeigt jedoch, dass auch in einiger Entfernung des Speichers nicht wärmegeämmtte Armaturen oder Wärmebrücken vorhanden sein können. Auch das Vorhandensein von Radiatoren, Fussbodenheizungen oder Wärmetauschern von Wärmeerzeugern wie wandmontierten Gaskesseln in Reichweite der Einrohrzirkulation, können zu erheblich höheren Verlusten führen als dies bei Annahme von lückenlos wärmegeämmtten Rohren der Fall wäre. Dieser Sachverhalt wurde in den bisherigen CFD-Studien und Labormessungen nicht berücksichtigt.



2 Ziele und Methoden

Mit der vorliegenden Arbeit sollen zwei Fragen beantwortet werden:

1. Führt ein nicht wärmegeämmter Siphonbogen insgesamt zu mehr oder zu weniger Verlusten durch Einrohrzirkulation in den Anschlüssen des Speichers?
2. In welchem Ausmass erhöhen nicht wärmegeämmter Armaturen oder Rohrstücke in wenigen Metern Entfernung vom Speicher bei fehlender Siphonierung die Anschlussverluste?

Um diese Fragen zu beantworten, wurde das Phänomen der Einrohrzirkulation mit Strömungssimulationen (CFD, Computational Fluid Dynamics) untersucht und die Resultate mit Messungen aus früheren Studien validiert. Zusätzlich wurden weitere Simulationen durchgeführt.

2.1 Aufbau der CFD Simulationen

Für die Berechnungen wurde die CFD-Software CFX (ANSYS 17.2) verwendet. Die 3D Konstruktionszeichnungen wurden in ANSYS DesignModeler (Release 17.2) erstellt (ANSYS 2016). Die Wahl der Gitterabstände erfolgte auf Grund einer Gitterstudie, welche in „Anhang A: Wahl des Gitters für CFD-Simulationen“ beschrieben ist.

Für die transienten Simulationen wurde ein variabler Zeitschritt zwischen 0.5 s und 5 s gewählt. Die Wahl des Zeitschrittes wurde mit einer zusätzlichen Simulation mit einem minimalen Zeitschritt von 0.25 s validiert. Diese Verkleinerung des Zeitschrittes führte zu keiner signifikanten Veränderung der Resultate. Als Solver wurde das implizite Euler-Verfahren zweiter Ordnung gewählt und zur Abbildung der Turbulenzen wurde das Scale Adaptive Shear-Stress-Transport (SST-SAS) Modell verwendet. Der statische Auftrieb von Wasser wurde in CFX mit der Boussinesq-Approximation modelliert mit einer Referenztemperatur für die Näherung von 35 °C.

Auf Grund der in Anhang B beschriebenen Vorstudie, konnte das rechenaufwändige 3D Modell für die Geometrie von Anschlussrohr und Wärmespeicher reduziert werden auf das eigentliche Anschlussrohr mit einem 10 cm breiten und 20 cm hohen Stück der Speicherwand. Zudem konnte die vertikale Symmetrieebene des Problems ausgenützt werden. Somit musste nur der halbe Rohrquerschnitt simuliert werden. Durch diese Vereinfachungen des Problems konnte die Rechenzeit um einen Faktor 5 reduziert werden, ohne dass die Resultate dadurch signifikant beeinflusst wurden.

Die letztendlich verwendete Geometrie zur Definition des Problems ist in Abbildung 3 dargestellt. Sie besteht aus einem siphonierten oder nicht siphonierten Rohranschluss mit je nach Simulation unterschiedlichem Durchmesser und unterschiedlicher Siphontiefe. Die Dicke der Rohrwand wurde gemäss EN 10255 festgelegt. Die wichtigsten Längenmasse des Modells sind in Abbildung 3 eingezeichnet. Die Anschlussdistanz A wurde auf 17 cm festgelegt, von welchen 9 cm in der Wärmedämmungsschicht liegen. Als Siphonbreite B_s wurden 12 cm gewählt. Die Siphontiefe D_s misst sich von Rohrmitte bis Rohrmitte. Die Dicke der Wärmedämmung entspricht gemäss EnEV (2014) jeweils dem Innendurchmesser



des Rohres. Die Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmungsmaterials betrug $0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Der Wärmeübergangskoeffizient an der äusseren Wärmedämmungsfläche beziehungsweise am nicht wärmedämmten Teil des Rohres wurde auf $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ festgelegt. Die Simulationen des Edelstahlrohrs und des Kunststoffrohrs wurden mit einem U-Siphon und einem stark verkürzten Rohr durchgeführt. Aufgrund der sehr hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer ist eine ausgeprägte Wärmebrücke, und in der Folge auch ausgeprägten Einrohrzirkulation, zu rechnen. Aus diesem Grund wurden diese Simulationen mit einem Z-Profil und einem 2 m langen Rohr nach dem Siphon erstellt.

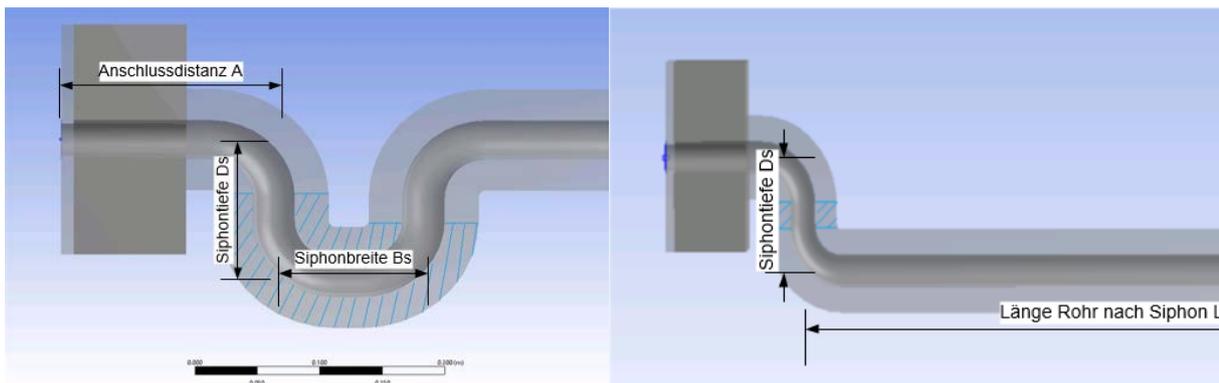


Abbildung 3: Verwendete Siphonmodelle mit Längenmassen. Links U-Siphon, rechts Z-Siphon. Der schraffierte Bereich markiert den im nicht wärmedämmten Falle freien Bereich am Siphon.

Als Anfangsbedingung wurde das gesamte Rohr auf die Umgebungstemperatur von 20 °C initialisiert. Die Fläche am Übergang zum Speicherinneren wurde konstant auf 50 °C fixiert, wodurch im Verlaufe der transienten Simulation eine Ausbreitung der Wärme entlang dem Rohr stattfindet. Standardmässig lief die Simulation 5 Stunden. Nach dieser Zeit erreichen die Verluste einen Quasi-Stationärzustand (siehe Anhang B).

2.2 Validierung der CFD-Simulationen

Die CFD-Simulationen wurden mit Messresultaten aus einer am SPF durchgeführten Laborstudie von Lauber (2007) validiert. Die Resultate eines Rohres mit und eines Rohres ohne Siphon sind in Abbildung 4 abgebildet. Bei einem 1"-Chromstalrohr mit einem Siphon von 0.35 m Tiefe wurde im Labor eine ERZ-Verlustrate von $0.05 \text{ W}/\text{K}$ gemessen. Eine korrespondierende Simulation in ANSYS mit der vereinfachten Geometrie, führte zu einem Ergebnis von $0.045 \text{ W}/\text{K}$ und somit einer relativen Abweichung von 10 % gegenüber der Labormessung. Die Anschlussverlustrate des nicht siphonierten Rohrs wurde im Labor mit $0.27 \text{ W}/\text{K}$ gemessen. Die entsprechende CFD-Simulation ergab $0.20 \text{ W}/\text{K}$, was einer relativen Abweichung von 26 % entspricht. Die Unsicherheit der Labormessung wurde mittels Wiederholungen des Experiments auf 3 % bestimmt.

Die Abweichungen der CFD-Simulationen können vielseitige Gründe haben. Einerseits können sowohl systematische Fehler bei der Labormessung oder der CFD-Simulation als Ursache in Betracht gezogen werden, andererseits können aber



auch fehlende Details bei der Nachstellung der Laboranordnung in der Simulation dafür verantwortlich sein. Grundsätzlich wurde durch die Validierung jedoch gezeigt, dass die mit CFD ermittelten Wärmeverlustraten in der Größenordnung mit den Laborresultaten gut übereinstimmen.

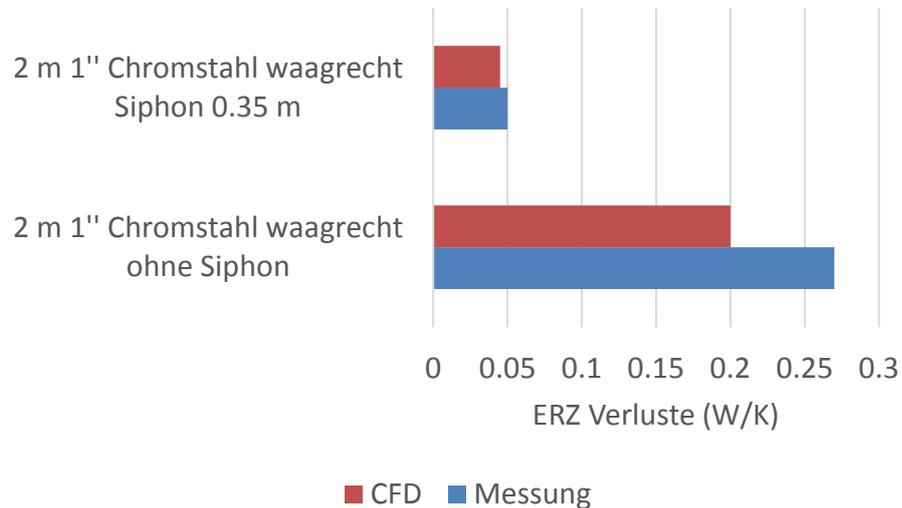


Abbildung 4: Vergleich von CFD-Simulationen mit Messresultaten identischer Geometrie des Anschlusses. Die Randbedingungen dieser Experimente unterscheiden sich in Speichertemperatur (60 °C anstatt 50 °C) und Wärmedämmung (32 mm, $\lambda = 0.035$ W/m) von den Simulationen welche in Abbildung 5 dargestellt sind, Messdaten aus Lauber (2007).

Ein Vergleich der Resultate des Z-Profiles mit denjenigen des U-Profiles in Abbildung 5 zeigt, dass die Wärmeverluste bei ausreichender Siphonierung mehrheitlich unabhängig sind von der Geometrie des Rohrs nach dem Siphon.

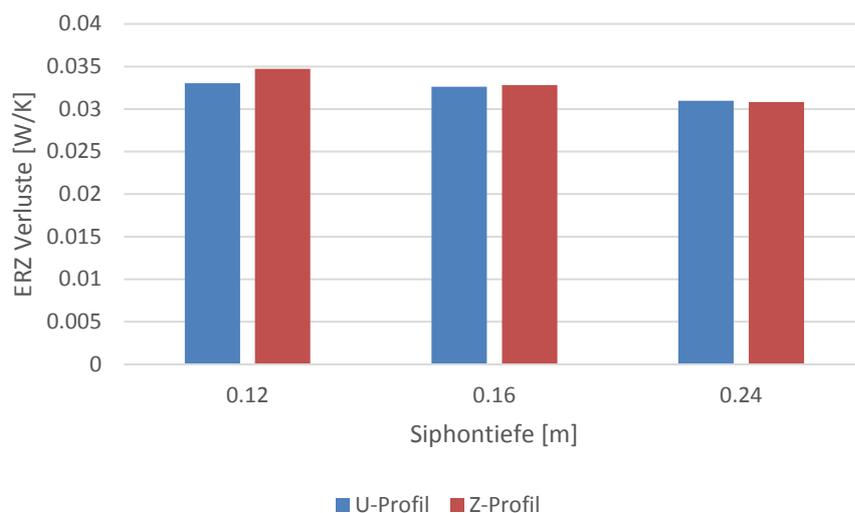


Abbildung 5: Vergleich von U-Profil und Z-Profil eines 1"-Edelstahlrohrs.



3 Resultate

3.1 Mit und ohne Wärmedämmung am Rohrbogen

In der Folge werden jeweils die gesamten Wärmeverluste des Rohres inkl. des nicht wärmedämmten Teils angegeben. Die gezeigten Werte entsprechen jeweils den Wärmeverlustwerten nach einer Einregelzeit von 5 Stunden. Sofern nicht anders vermerkt, basieren die Resultate auf Simulationen mit vereinfachter Geometrie (vgl. Abschnitt 2.1 und „Anhang B: Vereinfachung des geometrischen Modells“).

Abbildung 6 zeigt eine Übersicht verschiedener simulierten Rohrmaterialien und Rohrnenndweiten mit einem komplett wärmedämmten Siphon von 16 cm Tiefe. Die Resultate wurden mit einer Geometrie erzeugt, bei welcher die Länge der Steigleitung nach dem Siphon genau der Siphontiefe entspricht, und das Rohr danach für weitere 20 cm waagrecht weiterführt. Kupfer besitzt von den getesteten Materialien die höchste thermische Leitfähigkeit ($\lambda=401 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), gefolgt von Edelstahl ($\lambda=16 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), und Kunststoff ($\lambda=0.22 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Die Resultate zeigen wie erwartet, dass die Anschlussverluste mit höherer thermischer Leitfähigkeit zunehmen. Eine grössere Nennweite führt ebenfalls zu höheren Anschlussverlusten.

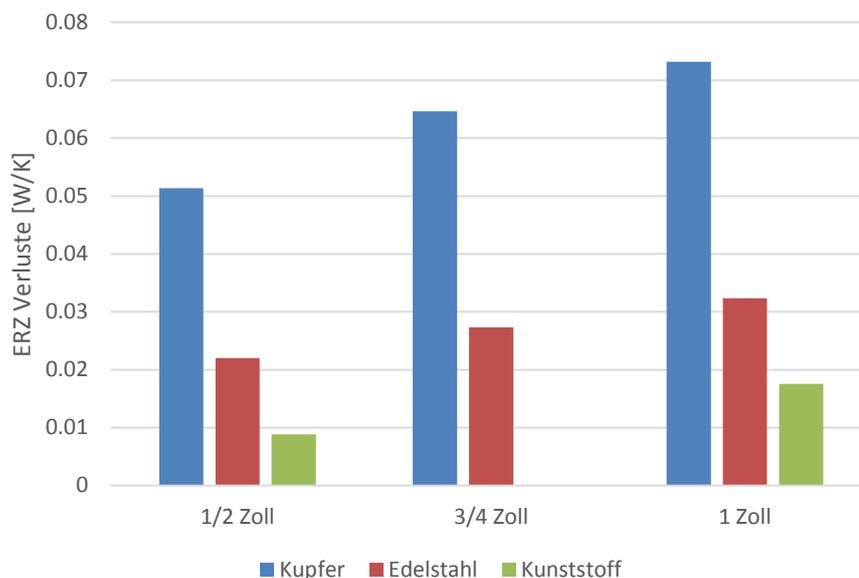


Abbildung 6 Vergleich verschiedener Materialien und Rohrnenndweiten mit 16 cm Siphon. Der Wert für $\frac{3}{4}$ " Kunststoff-Rohr fehlt, weil die entsprechende Simulation nicht erfolgreich beendet werden konnte.

Ein Vergleich verschiedener Siphontiefen bei einem Edelstahlrohr mit 1"-Nennweite ist in Abbildung 7 gezeigt. Es zeigt sich, dass für ein 1" Rohr bereits ein wärmedämmter Siphon von 12 cm den Anschluss im Vergleich zum nicht siphonierten Fall wirkungsvoll reduziert. Eine Verlängerung des Siphons auf 16 cm beziehungsweise 24 cm bringt keine nennenswerten Verbesserungen mehr. In Kunststoffrohren verhindert die tiefe Wärmeleitfähigkeit die Ausbreitung der Wärme entlang dem Siphon noch stärker, weshalb eine Siphontiefe von 12 cm



auch hier sicher ausreichend ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass für kleinere Nennweiten keine längere Siphonierung nötig ist. Ebenfalls in Abbildung 7 ist ein Vergleich zwischen Simulationen mit und ohne Wärmedämmung am Siphon dargestellt.

Ein Weglassen der Wärmedämmung am Siphonbogen führte in allen untersuchten Fällen zu erhöhten Verlusten.

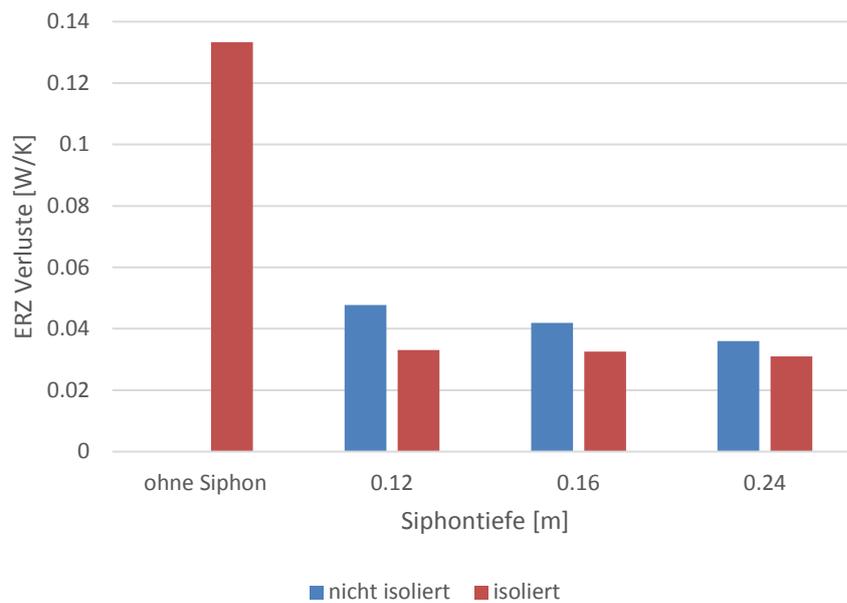


Abbildung 7 Vergleich verschiedener Siphontiefen an einem 1"-Edelstahlrohr (U-Profil).

3.2 Spezialfall Kupfer-Siphon

Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer führt dazu, dass sich auch bei sehr tiefen Siphons bis 24 cm noch eine Wärmebrücke über den Siphon hinweg bilden kann (Abbildung 8). In der Folge wird der Effekt der Siphonierung kompensiert durch die, auf Grund der Siphonierung, erhöhte Rohroberfläche und damit einhergehenden zusätzlichen Wärmeverluste im Betrieb. Abbildung 9 zeigt, dass mit grösserer Siphontiefe und in der Folge längerem Rohr, die Verluste im nicht wärmegeämmten Fall zunehmen. Ein nicht wärmegeämmter Siphon führt dazu, dass die Anschlussverluste für steigende Siphontiefen leicht abnehmen jedoch deutlich höher bleiben als gleich tiefe Siphons aus Edelstahl.

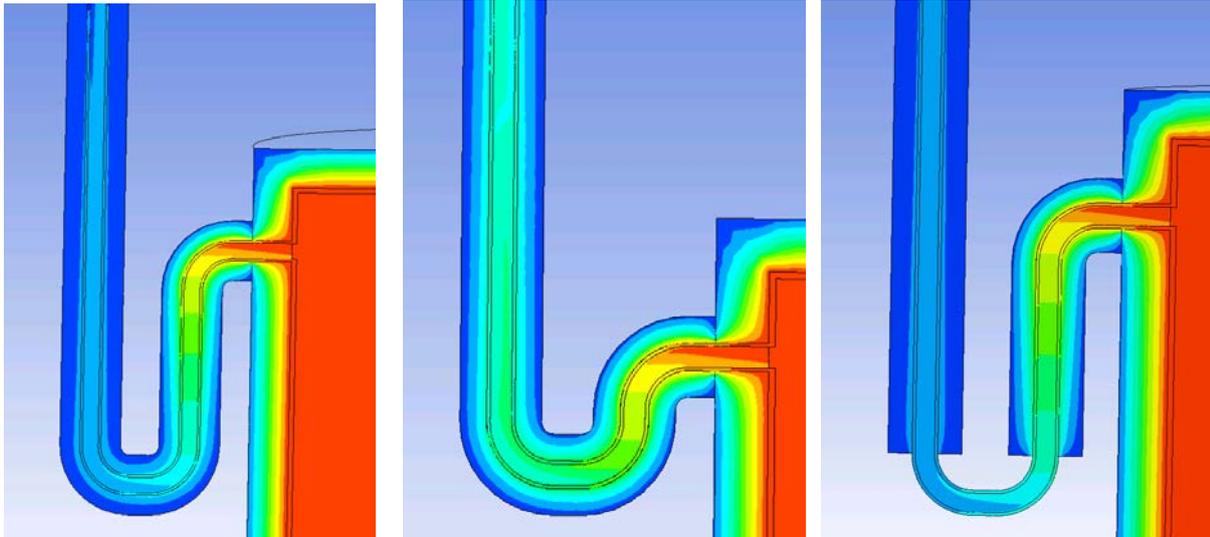


Abbildung 8: Temperaturverteilung eines Siphons aus ½" Kupferrohr im quasi-stationären Zustand. Links: Siphontiefe 24 cm, mitte: Siphontiefe 9 cm, rechts: Siphonbogen 24 cm ohne Isolierung, jeweils simuliert inklusive Wärmespeicher (50 °C).

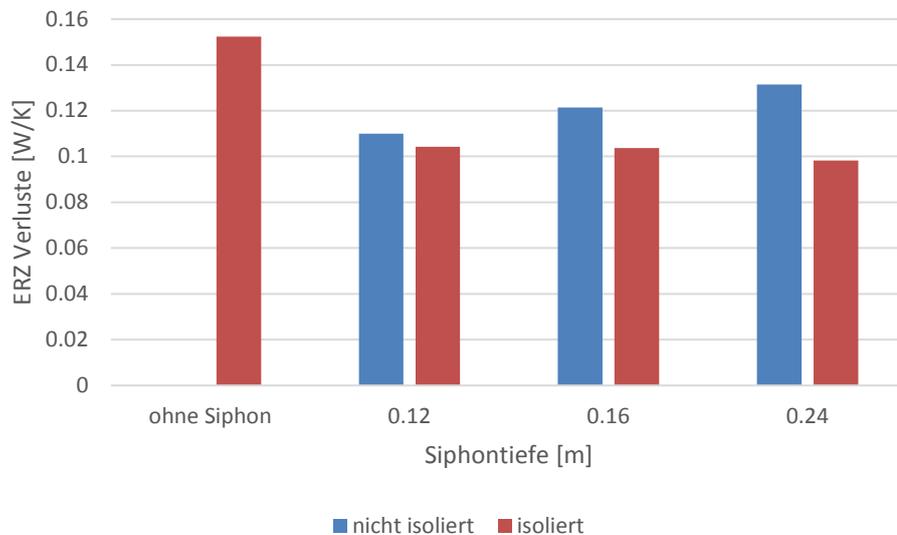


Abbildung 9 Vergleich verschiedener Siphontiefen eines 1"-Kupferrohrs (Z-Profil).

Bei einem Siphon aus Kupferrohr kann auch mit grossen Tiefen nicht verhindert werden, dass eine Wärmebrücke über den Siphon hinweg entsteht. Das Durchschlagen der Wärme auf die andere Seite des Siphons kann durch Weglassen eines Teils der Wärmedämmung am Siphon verringert werden. In diesem Falle sinkt die Temperatur im Siphon bereits nach kurzer Stillstandsphase fast bis auf Umgebungstemperatur. Dies geschieht jedoch auf Kosten erhöhter Verluste am nicht wärmedämmten Teil des Rohres. Die Simulation eines 10 m langen Steigrohrs nach dem Siphon zeigte, dass auch in diesem Falle die erhöhten Verluste am nicht wärmedämmten Rohrbogen die Reduktion der Verluste in



Folge reduzierter Temperaturen nach dem Siphon übertreffen. Eine Konstellation, bei welcher ein Weglassen der Wärmedämmung am Siphon zu weniger Anschlussverlusten im quasistationären Stillstand geführt hätte, konnte nicht gefunden werden.

Um dieses Resultat allgemein zu verifizieren, wurde ein einfaches eindimensionales Mehrknotenmodell nach dem Prinzip der Finiten Differenzen erstellt, welches aufzeigen soll, dass die zusätzlichen Verluste am nicht wärmedämmten Teil des Siphons prinzipiell die zusätzlich entstehenden Verluste übertreffen, die durch den höheren Wärmetransport durch Konvektion nach dem Siphon entstehen. Dieses Mehrknotenmodell ist in Anhang C beschrieben.

Es zeigte sich, dass auch auf Grund der einfacheren Betrachtung des Problems mit einem Mehrknotenmodell eine Reduktion der ERZ-Stillstandsverluste durch Weglassen der Isolierung nicht plausibel erscheint.

3.3 Armaturen und Wärmebrücken in Speichernähe

Der Effekt eines Rohrabschnitts ohne Wärmedämmung oder eines Luft- oder Abgas-Wärmetauschers in Speichernähe bei fehlender Siphonierung, ist in Abbildung 10 dargestellt.

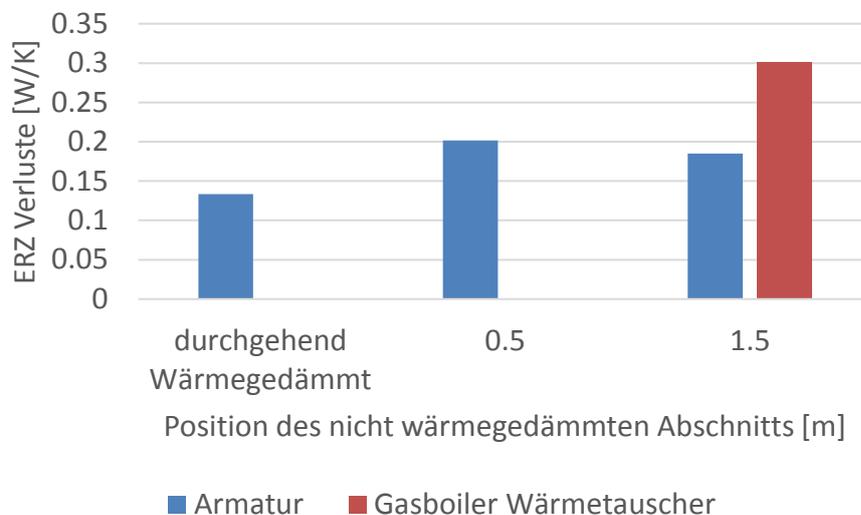


Abbildung 10 Effekt von fehlender Wärmedämmung in 0.5 m und 1.5 m Abstand vom Speicheranschluss, Speichertemperatur 50 °C.

Es wurde beispielhaft ein Edelstahlrohr mit 2 m Länge simuliert. Dabei wurde ein komplett wärmedämmtes Rohr verglichen mit einer Situation, in welcher Teile des Rohres einen stark erhöhten Wärmeübergangskoeffizient aufweisen. Eine nicht wärmedämmte Armatur wurde mit einem 20 cm langen, nicht wärmedämmten, Abschnitt (U-Wert 8 W/(m²K)) in 0.5 m Entfernung zum Speicher dargestellt. Zusätzlich wurde der Effekt eines Wärmetauschers eines Gasboilers mit einem UA-Wert von 4.9 W/K (Haller u. a. 2011) in 1.5 m Entfernung untersucht. Naturgemäß erhöhen fehlende Wärmedämmungen und



Wärmebrücken die Verluste durch Einrohrzirkulation umso stärker, je näher sich die betreffende Stelle am Speicher befindet. Die Verluste erhöhen sich hierbei um ca. 50% für die vereinfacht simulierte nicht wärmegeämmte Armatur in 50 cm Abstand. Ein grösserer Abstand von 1.5 m führt dagegen nur zu geringfügig weniger Verlusten. Der Abgas-Wärmetauscher einer Gastherme kann auch in 1.5 m Entfernung die Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation um mehr als 100 % steigern.

3.4 Siphontiefen in Abhängigkeit von Durchmesser und Material

Ergänzend zu den CFD-Simulationsresultaten wurden Berechnungen zur Auslegung des Siphons durchgeführt. In Anlehnung an das von Kliem u. a. 2014 vorgeschlagene Berechnungsverfahren über Rippengleichungen wurde berechnet, wie lange eine Rippe, respektive ein abwärts gerichtetes Rohr, sein muss, damit die Temperaturdifferenz zur Umgebung um 85% reduziert wird. Zum Beispiel würde so bei 90 °C im Speicher und 20 °C Umgebungstemperatur am Ende des Rohres noch 30.5 °C und damit - in Anlehnung an Abbildung 1 - eine Reduktion der Erhöhung der Verluste durch Einrohrzirkulation um einen Faktor 10 resultieren.

Im Unterschied zu Kliem u. a. gehen wir nicht davon aus, dass die Wärmeleitung in Rippenrichtung am Ende der Rippe, respektive des Rohres, Null ist, und verwenden deshalb die Gleichung für die Temperatur entlang einer unendlich langen Rippe:

$$\frac{T - T_u}{T_{x=0} - T_u} = \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha \cdot U}{\lambda_w \cdot A_w + \lambda_r \cdot A_r}} \cdot x\right) \quad (1)$$

Wobei λ die Wärmeleitfähigkeit des Wassers (w) ohne Konvektionsströmungen, respektive des Rohres (r), A die Querschnittsfläche des Wassers, respektive des Rohres, U der Umfang des Rohres, und α der Wärmeverlustkoeffizient des Rohres, bezogen auf die Rohr-Oberfläche, ist.

Die verwendeten Dimensionen und die dazugehörigen Resultate für das Verhältnis von Siphontiefe d_s und Innendurchmesser d_i sind in Tabelle 2 und Abbildung 11 dargestellt.

Tabelle 2: Dimensionen der berechneten Rohre.

	DN 16	DN 26	DN 50	DN 100
Innendurchmesser, mm	16	26	50	100
Wandstärke, mm	1.5	1.5	1.5	2
Aussendurchmesser, mm	19	29	53	104
Dämmstärke, mm ($\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$)	20	30	50	100

Mit der Annahme von Kunststoff ($\lambda = 0.22 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), Edelstahl ($\lambda = 16 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) und unlegiertem Stahl ($\lambda = 48 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) als Rohrmaterial resultieren dabei die in Abbildung 11 gezeigten Siphontiefen für eine Reduktion der Temperaturdifferenz gegenüber der Umgebung um 85%.

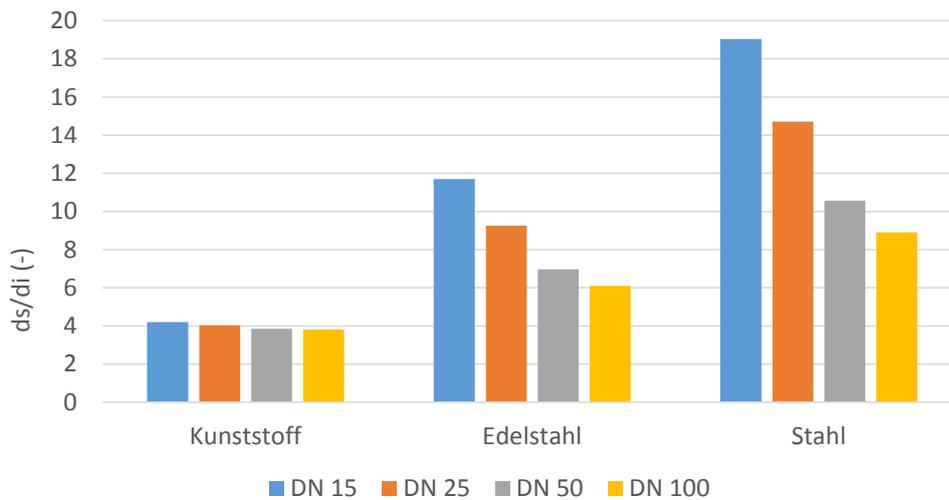


Abbildung 11 Siphontiefe zur Reduktion der Temperaturdifferenz um 85% als Vielfaches der Rohr-Nennweite (ID) für verschiedene Materialien und Nennweiten.

Daraus können folgende vorläufigen Empfehlungen für die Siphontiefen angenommen werden:

- 4 x ID für Kunststoff
- 8 x ID für Edelstahl
- 12 x ID für unlegierten Stahl

Wobei die Siphontiefe von Rohrmitte zu Rohrmitte gerechnet wurde.

Genau genommen müsste die durch die Siphonierung erreichte Reduktion der Wärmeverluste im Stillstand den zusätzlichen Verlusten durch die zusätzliche Rohroberfläche im Betrieb gegenüber gestellt werden. Dies wiederum ist jedoch abhängig vom Verhältnis der Stillstandszeiten zu den Betriebszeiten, sowie von der Anzahl Übergänge von Betrieb zu Stillstand und den Verlusten, die ohne Siphonierung resultieren würden. So sollten zum Beispiel Rohre, die immer oder fast immer durchströmt sind, nicht siphoniert werden. Insgesamt war es in diesem Projekt jedoch nicht möglich, Richtlinien oder Nomogramme unter Berücksichtigung aller Parameter auszuarbeiten.



4 Diskussion und Ausblick

Die Siphonierung der Anschlüsse von Wärmespeicher, die nicht permanent durchströmt werden, ist zur Verhinderung von Wärmeverlusten essenziell. Ohne Siphonierung kann Einrohrzirkulation die Anschlussverluste pro Anschluss bei 1"-Rohren (25 mm Durchmesser) und 40 K Temperaturdifferenz (60 °C im Speicher) auf bis zu 0.35 W/K (vgl. Abbildung 1) ansteigen lassen, was einer Verlustrate von 14 W entspricht. Bei einem Warmwasserspeicher mit vier Anschlüssen, in einer entsprechend warmen Zone des Speichers, entspricht dies ca. 490 kWh pro Jahr.

Der Anschlussverlust-Koeffizient steigt mit zunehmender Temperatur im Speicher, mit zunehmender Temperaturdifferenz zur Umgebung, und mit zunehmendem Durchmesser des Anschlusses, so dass bei 90 °C im Speicher und Rohrdurchmessern grösser als 1" auch deutlich höhere Verluste resultieren können. Eine deutliche Steigerung der Wärmeverluste resultiert auch bei nicht wärmegeprägten Rohrabschnitten oder Anlagenkomponenten mit Wärmetauschern oder höheren Verlustkoeffizienten in Reichweite der Einrohrzirkulation. Hierzu zählen jegliche Armaturen, Verbrennungskessel, Sonnenkollektoren, und anderes.

Die korrekte Siphonierung von Wärmespeichern wurde mittels CFD-Simulationen und einem einfachen Mehrknotenmodell untersucht. Es wurde gezeigt, dass für Edelstahlrohre und Kunststoffrohre bis zu einer Nennweite von 1" ein Siphon mit 12 cm Tiefe die Einrohrzirkulation bereits effektiv unterbinden kann. Eine Siphonierung von Kupferrohren bietet hingegen auch für tiefe Siphons keinen vergleichbaren Schutz. Rohrabschnitte aus Kunststoff können eine effektive Lösung zur Siphonierung von Kupferrohrsystemen sein. Die Resultate der in diesem Projekt durchgeführten Simulationen liegen in guter Übereinstimmung mit bisherigen Labormessungen und Richtlinien.

Sowohl CFD-Simulationen als auch Mehrknoten-Berechnungen nach dem Verfahren der Finiten Differenzen zeigen, dass das Weglassen der Isolierung am Siphonbogen die Wärmeverluste in allen untersuchten Fällen erhöht. Für ausreichend tiefe Siphons aus Edelstahl- oder Kunststoffrohren unterscheiden sich die Wärmeverluste im Stillstand mit und ohne Isolierung des Siphonbogens nur geringfügig. Voraussetzung dafür ist, dass der Siphon genügend tief ist, und somit im Bereich der fehlenden Wärmedämmung die Temperaturdifferenz zwischen Rohr und Umgebung bereits weitgehend abgebaut ist. Die Verluste im Betrieb sind jedoch bei nicht wärmegeprägtem Siphonbogen zweifellos höher, und die Auskühlung aus dem warmen Zustand erfolgt schneller, was insgesamt über das Jahr gesehen höhere Verluste zur Folge hat.

Ein nicht wärmegeprägter Rohrabschnitt, oder Komponenten mit erhöhtem Wärmeaustausch mit der Umgebung in 0.5 bis 1.5 m Entfernung zum Speicheranschluss, führen zu einer Erhöhung der Verluste durch Einrohrzirkulation. Komponenten mit erhöhtem Wärmetausch beinhalten zum Beispiel auch Verbrennungskessel, in welchen im Betrieb Wärmeübertragung vom Rauchgas auf das Wasser, im Stillstand jedoch auch vom Wasser an die stehende oder zirkulierende Luft im Kessel, erfolgt. Entsprechend hat eine Siphonierung in diesen Fällen eine noch höhere Energieeinsparung zur Folge.

Nicht untersucht wurde, ob ein Weglassen der Wärmedämmung am Siphon zur Unterbindung einer Schwerkraftzirkulation über Vor- und Rücklauf von



thermischen Solarsystemen beitragen kann. Diese kann auftreten, wenn Rückschlagventile oder andere Massnahmen zur Verhinderung dieser Schwerkraftzirkulation nicht funktionstüchtig sind oder fehlen. Es wird argumentiert, dass mit der Entfernung der Wärmedämmung am Siphon in diesem Fall der ausgekühlte Siphon als Konvektionsbremse wirkt.

Vorläufige Empfehlungen zur Reduktion der Anschlussverluste durch Siphonierung können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Siphonierung von mindestens
 - 4 mal den Rohrinne Durchmesser bei Kunststoff
 - 8 mal dem Rohrinne Durchmesser bei Edelstahl
 - 12 mal dem Rohrinne Durchmesser bei unlegiertem Stahl
 - Kupfer ist als Material für den Siphon ungeeignet
- Anschlüsse die permanent durchströmt sind sollten nicht siphoniert werden
- Rohre mit sehr geringen Durchmessern (< 10 mm) müssen nicht siphoniert werden, da sich in diesen keine ausgeprägte Einrohrzirkulation ausbildet.
- Komplette Isolierung des Siphons nach den gängigen Normen.
- Installation eines Rückschlagventils oder besser – weil zuverlässiger - eines stromlos dicht schliessenden Ventils zur Unterbindung der Schwerkraftzirkulation über Vor- und Rücklauf im Solarkreislauf. Dies war nicht Gegenstand der Untersuchungen in diesem Projekt, soll jedoch dennoch explizit erwähnt sein.

Um die Empfehlungen zu generalisieren, für grössere Durchmesser zu validieren, und auch in Abhängigkeit der Betriebsweisen zu stellen, wären weitere Untersuchungen und Berechnungen notwendig.

5 Publikationen aus diesem Projekt

Battaglia, M. & Haller, M.Y., 2017. *Effekt der Isolation am Siphon auf die Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation: eine CFD-Studie*. In: 27. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany.

6 Literatur

ANSYS, 2016. *ANSYS® Academic Research, Release 17.2*.

EnEV, 2014. *EnEV 2014: Anlage 5: Anforderungen zur Begrenzung der Wärmeabgabe von Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen sowie Armaturen*. Available at: http://www.enev-online.com/enev_2014_volltext/anlage_05_anforderungen_waermedaemung_rohrleitungen_armaturen.htm [Zugegriffen April 20, 2017].



- Haller, M.Y., Paavilainen, J., Konersmann, L., Haberl, R., Dröscher, A., Frank, E., Bales, C. & Streicher, W., 2011. *A unified model for the simulation of oil, gas and biomass space heating boilers for energy estimating purposes. Part I: Model development.* Journal of Building Performance Simulation, 4(1), S.1–18.
- Huhn, R., 2007. *Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energieumwandlungsketten.* PhD Thesis, Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, Dresden, Germany.
- Kliem, F., Steinweg, J. & Rockendorf, G., 2014. *Wärmeverluste und Einrohrzirkulation: Bewerten und Vermindern.* Institut für Solarenergieforschung.
- Lauber, A., 2007. *Wärmeverluste durch rohrinterne Gegenstromzirkulation in Speicheranschlussleitungen, und deren Verminderung mittels Konvektionsbremsen, Konvektionssperren und Wärmesiphons - Quantifizierung der Effekte mittels Messung.* SPF Solartechnik Prüfung Forschung - Hochschule für Technik HSR, Rapperswil.
- National Institute of Building Sciences, 2016. *UNIFIED FACILITIES GUIDE SPECIFICATIONS - Plumbing.* Available at: <http://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFGS/UFGS%2022%2000%2000.pdf> [Zugegriffen November 21, 2016].
- SIA 385/1, 2011. *Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden.*
- Steinweg, J., Kliem, F., Littwin, M. & Rockendorf, G., 2015. *Pipe Internal Recirculation in Storage Connections – An Unseen Efficiency Barrier.* Energy Procedia, 73, S.341–349.
- Steinweg, J., Kliem, F., Maitanova, N. & Rockendorf, G., 2013. *Einrohrzirkulation in Speicheranschlussrohren - Einflussgrößen und Gegenmassnahmen.* In: 23. Symposium Thermische Solarenergie, 24.-26. April 2013, OTTI e. V., Regensburg, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany.
- Vogelsanger, P., Geisshüsler, S., Lauber, A., Daguene, X. & Marty, H., 2008. *Wärmeverluste durch Gegenstromzirkulation (rohrinterne Zirkulation) in an Speichern angeschlossenen Rohrleitungen.*
- Weber, H., Brack, M. & Suter, J.-M., 1983. *Ein Wildbach unter Wasser / Zur freien Konvektion in Warmwassertanks.* In: 4. Symposium Forschung und Entwicklung von Sonnenenergie in der Schweiz, ETH Lausanne.



Anhang A: Wahl des Gitters für CFD-Simulationen

Die Wahl eines geeigneten Berechnungsgitters ist bei CFD-Simulationen entscheidend. Im mit Wasser gefüllten Teil des Rohres wurde ein Gitteraufbau gewählt, bei welchem der Abstand der Gitterpunkte in der Nähe der Rohrwand verkleinert wird (Prismenschichtstruktur). Die für das Problem erforderliche Dichte des verwendeten Berechnungsgitters wurde mit einer Gitterkonvergenzstudie mit dem Simulationsmodell ohne Abbildung des Speicherinhalts bestimmt. Dabei wurden die Gitterabstände verkleinert und die dadurch entstehende Veränderung der Resultate untersucht. In der Konvergenzstudie wurden lediglich die Gitterpunktabstände im Fluidvolumen variiert, da in den festen Materialien nur die berechnungstechnisch unproblematischere Wärmeleitung stattfindet. Die Resultate von Berechnungen mit verschiedenen Gittermassen sind in Tabelle 3 und Abbildung 12 dargestellt.

Tabelle 3: Gewählter Gitterabstand, Höhe der ersten Prismenschicht, und Rechenzeit.

Gitterabstand Wasser [m]	Totale Anzahl Gitterpunkte	Verluste durch ERZ [W/K]	Rechenzeit CPU [sec]
0.0030	37458	0.0324	310'100
0.0025	48164	0.0420	417'500
0.0020	91550	0.0435	563'200
0.0015	160854	0.0450	973'900
0.0013	227184	0.0454	1'331'000

Es zeigte sich, dass bis zu einer Verkleinerung auf 1.5 mm noch signifikante Verbesserungen erreicht werden konnten. Eine weitere Erhöhung der Anzahl Gitterpunkte führte noch zu einer geringfügigen Veränderung von 1 %. Die Simulationen wurden aus diesem Grund mit 1.5 mm Gitterabstand durchgeführt.

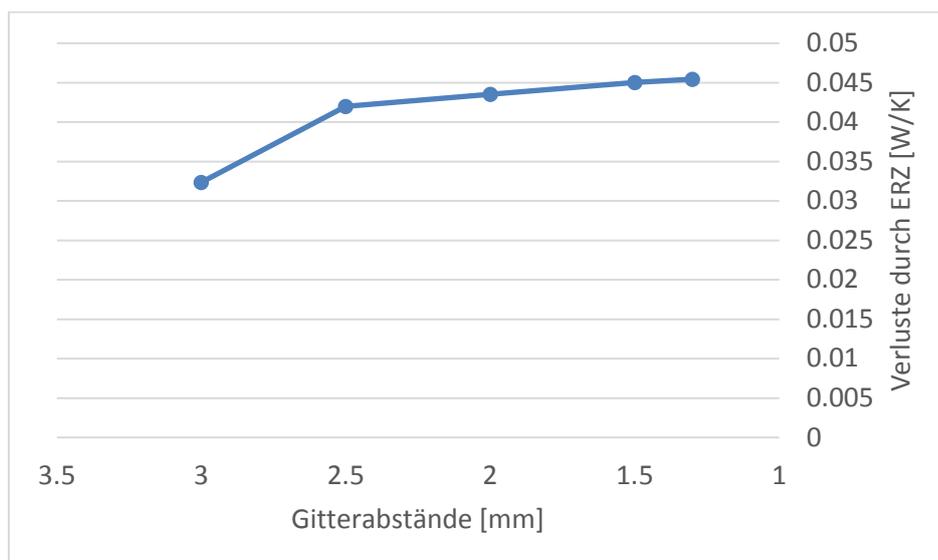


Abbildung 12: Studie zur Bestimmung der ausreichen kleinen Gitterabstände.



Anhang B: Vereinfachung des geometrischen Modells

Für die Simulationsstudien wurde mit zwei unterschiedlichen Detaillierungsgraden des geometrischen Problems gearbeitet. Zu Beginn des Projektes wurde jeweils ein kompletter 150 Liter Warmwasserspeicher mit 50 cm Durchmesser und 80 cm Höhe inklusive Dämmung (5 cm mit Wärmeleitkoeffizient $\lambda=0.03 \text{ W/(mK)}$) in der Simulation abgebildet (Ausschnitt in Abbildung 13, links). Der Wärmeübergang von Speicheraussenhülle zur Umgebung wurde auf $8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ festgesetzt.

Auf Grund der mit diesem Detaillierungsgrad verbundenen hohen Rechenzeiten wurde später überprüft, ob die Simulation des Speichers selber einen signifikanten Einfluss auf die Resultate hat. Hierzu wurden die Ergebnisse mit den Resultaten verglichen, welche erhalten wurden, wenn vom Speicher nur ein 10 cm breites und 20 cm hohes Stück der Speicherwand inklusive Wärmedämmung modelliert wurde, und für die Querschnittsfläche des Anschlussrohres von einer konstanten Temperatur von $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgegangen wird (Abbildung 13, rechts). Durch diese Abstraktion des Modells konnte die Rechenzeit deutlich reduziert werden. Der in Abbildung 14 dargestellte Vergleich zwischen einer Simulation mit dem 150 Liter Speicher und dem reduzierten Modell zeigt, dass die Rohranschlussverluste bei anfangs kaltem ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) Rohrinhalt und warmem ($50 \text{ }^\circ\text{C}$) Speicher zwar anfangs unterschiedlich sind, diese Unterschiede jedoch mit fortschreitender Simulationsdauer verschwinden, so dass die Resultate der Simulationen ohne Speichervolumen als genügend gute Näherung für den quasi-stationären Fall betrachtet werden können.

In den dargestellten Simulationen ändern sich die ERZ-Verluste in der letzten halben Stunde der Simulation nur noch um 1.7 %. Es kann deshalb angenommen werden, dass sich bei längeren Simulationszeiten keine wesentlichen Änderungen und insbesondere keine neuen Erkenntnisse mehr ergeben würden.

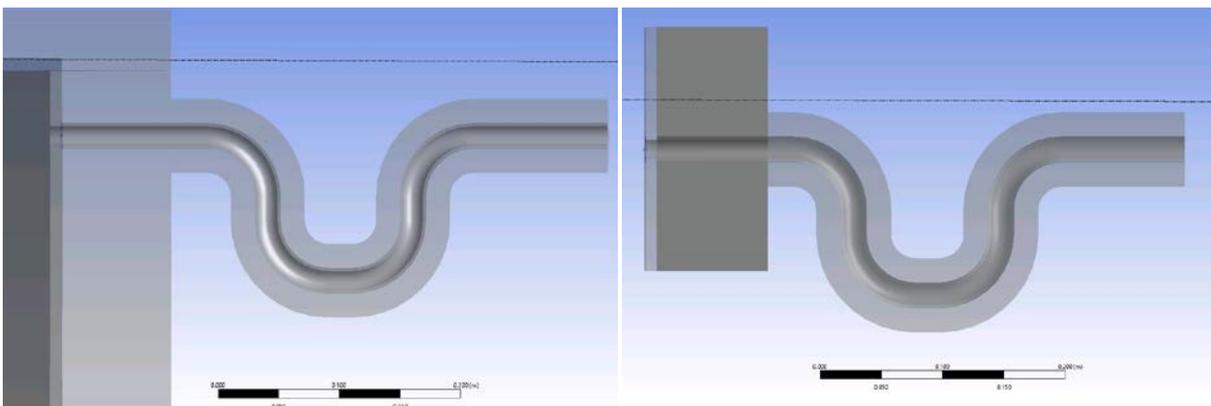


Abbildung 13: Modell inklusive Speicher (links) und ohne Speicher (rechts).

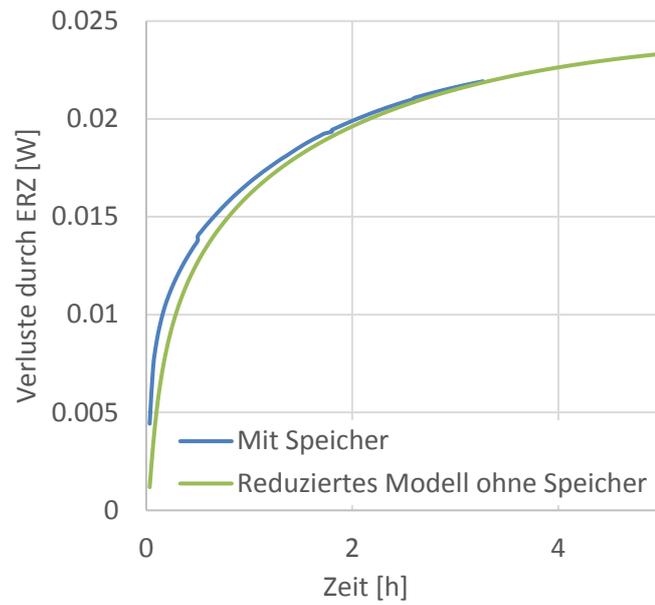


Abbildung 14: Vergleich der Einrohrzirkulationsverluste (ERZ) der Simulationen mit und ohne Speichervolumen bei anfangs kaltem Rohr (20 °C) und warmem Speicher (50 °C), respektive entsprechend isothermer Randbedingung am Rohrquerschnitt zum Speicher.



Anhang B: Mehrknotenmodell

Die Verwendeten Knoten des Modells sind in Abbildung 15 dargestellt.

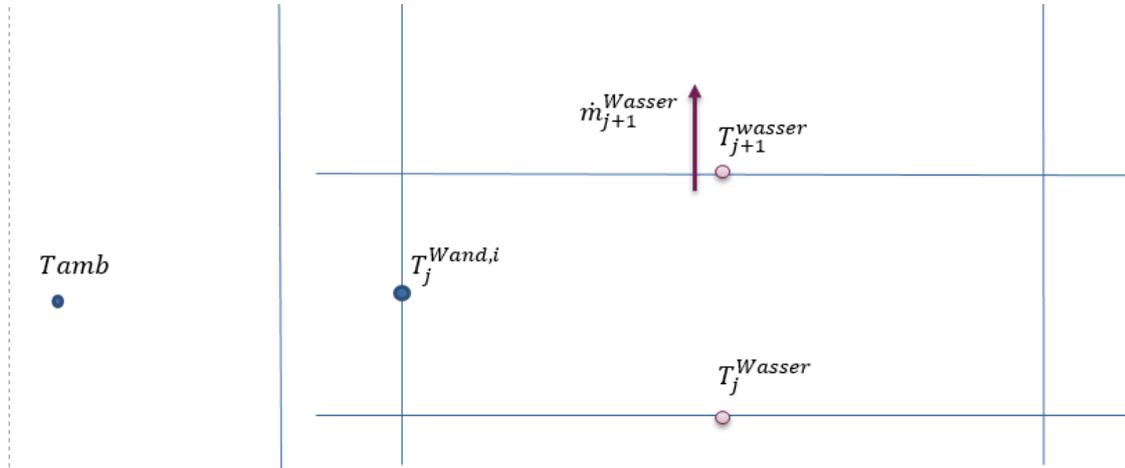


Abbildung 15: Knoten des Mehrknoten Modells:

Die Wärmetransportgleichungen im Gleichgewichtszustand sind:

$$\frac{\dot{m}_j c_p + \lambda_{Wasser}}{\Delta z} (T_{j+1}^{Wasser} - T_j^{Wasser}) = UA_j^{conv} (\bar{T}_{j+1}^{Wand} - \bar{T}_j^{Wand}) \quad (2)$$

$$\frac{\lambda_{Wand}}{\Delta z} (T_{j+1}^{Wand} - T_j^{Wand}) = -UA_j^{conv} (\bar{T}_{j+1}^{Wand} - \bar{T}_j^{Wand}) + UA_j^{Wand,Isol,Amb} (\bar{T}^{Amb} - \bar{T}_j^{Wand}) \quad (3)$$

Wobei \dot{m}_j der in beide Richtungen fließende Massenstrom, c_p die Spezifische Wärme von Wasser, und λ die Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Materials ist. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Rohrwandtemperatur und Umgebungsluft wird berechnet als:

$$UA_j^{wall,insulation,amb} = \frac{1}{\left(\frac{\ln\left(\frac{r_{Rohr,a}}{r_{Rohr,i}}\right)}{\lambda_{Rohr} l_{Rohr} 2\pi} \right) + \left(\frac{\ln\left(\frac{r_{Rohr,a} + d_{Isol}}{r_{Rohr,a}}\right)}{\lambda_{Isol} l_{Rohr} 2\pi} \right) + \frac{1}{UA_{conv,amb}}} \quad (4)$$

Die verwendeten Variablen sind n Anzahl Knoten entlang des Rohrs, l_{Rohr} totale Länge des Rohrs, $r_{Rohr,a}/r_{Rohr,i}$ Aussen-, beziehungsweise Innenradius des Rohrs und $U_{conv,amb} = 8 \frac{W}{Km^2}$ der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zur Umgebungsluft.

Für ein Edelstahlrohr mit 1" Nennweite und einem 24 cm Siphon ergab das Mehrknotenmodell eine Wärmeverlustrate von 0.031 W/K mit Isolierung und 0.036 W/K ohne Isolierung. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den Resultaten der CFD-Simulation, welche für diesen Fall bei 0.031 W/K mit Isolierung und 0.039 W/K ohne Isolierung liegen. Die maximale relative Abweichung der beiden Methoden liegt demnach bei 8 %. Die Temperaturkurve sowie der Energieverlust entlang des Rohrs ist in Abbildung 16 dargestellt. Der Effekt des Siphons wurde



abgebildet, in dem der Massenstrom \dot{m}_j im Bereich des Siphons gleich Null gesetzt wurde.

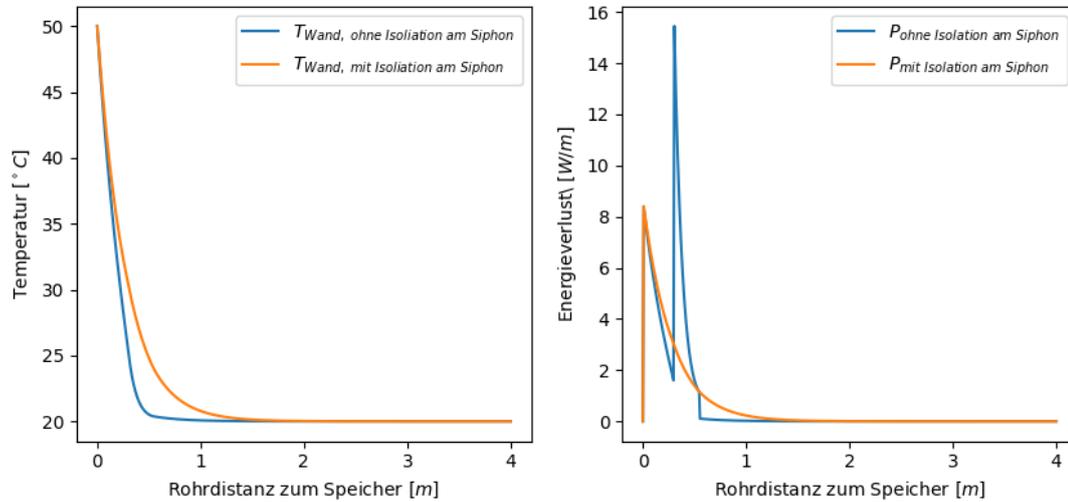


Abbildung 16: Temperaturkurve und Energieverlust aus dem Mehrknoten Modell.

Mit dem Mehrknotenmodell kann abgeschätzt werden, ob ein sehr langes und weites Rohr nach dem Siphon eventuell zu einer Variante führen kann, in welcher sich das Weglassen der Wärmedämmung am Siphon nachteilig auf die Verluste im Stillstand auswirken kann. Die Abbildung eines solchen Rohres mit CFD würde zu sehr langen Rechenzeiten führen. Für den Massengegenstrom wurde dabei angenommen, dass dieser durch den Druckunterschied als Resultat der Temperatur-, respektive Dichteunterschiede $(\rho_{Wasser}(20^{\circ}C) - \rho_{Wasser}(50^{\circ}C)) * 9.81 \frac{[m]}{[s^2]} * 10[m] \sim 10 \text{ mbar}$ in Kombination mit dem Reibungswiderstand des Rohres, respektive des gegenströmenden Fluides, limitiert ist. Druckverlustkurven von 1" Rohren zeigen, dass mit den vorliegenden Druckunterschieden maximal ein Massenstrom von 0.1 kg/s erwartet werden kann. Da sich bei Einrohrzirkulation die entgegengesetzten Strömungen gegenseitig behindern, wird der reale Massenstrom um ein vielfaches kleiner sein. Wird dieser maximale Massenstrom im Mehrknotenmodell für den Rohrabschnitt nach dem Siphon eingeführt, so ergeben sich für ein 1"-Kupferrohr Wärmeverluststraten von 0.175 W/K mit Isolierung und 0.236 W/K ohne Isolierung. Es zeigt sich also auch hier, dass eine Reduktion der ERZ-Stillstandsverluste durch Weglassen der Isolierung nicht plausibel erscheint.