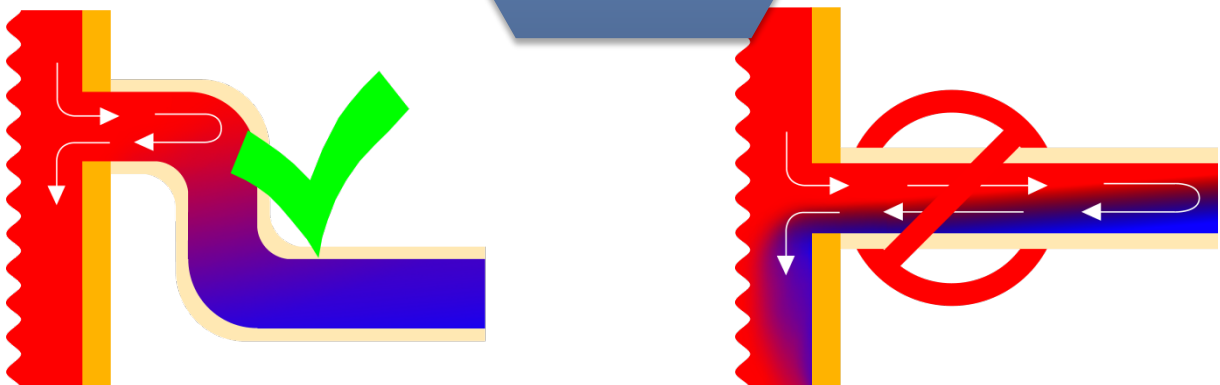


# Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation

Bewerten und Vermindern



F. Kliem  
J. Steinweg  
G. Rockendorf



# **Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation**

Bewerten und Vermindern

Institut für Solarenergieforschung GmbH (ISFH)

Dieses Buch wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Einrohrzirkulation an Speicheranschlüssen“ (Förderkennzeichen Az. 29647) erstellt, welches am Institut für Solarenergieforschung GmbH in den Jahren 2011 bis 2014 durchgeführt wurde.

Auftraggeber:  
Deutsche Bundestiftung Umwelt, Osnabrück

Autoren und Projektbearbeitung:  
Dipl.-Ing. (FH) Francis Kliem  
Dipl.-Ing. (FH) Jan Steinweg  
Dipl.-Ing. Gunter Rockendorf

Titel:  
Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation - Bewerten und Vermindern

ISBN 978-3-9816770-0-3  
1. Auflage: Juli 2014

Der Inhalt des Buches „Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation - Bewerten und Vermindern“ ist mit größtmöglicher Sorgfalt und nach bestem Wissen erarbeitet und zusammengestellt worden. Für fehlerhafte Angaben und alle möglicherweise daraus entstehenden Schäden können weder der Herausgeber noch die Autoren Haftung übernehmen.

Eigenverlag und Druck:  
Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln / Emmerthal  
Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal

## **Unser Anliegen: Kostengünstig die Effizienz von Heizungssystemen erhöhen**

*Wir sehen die Einrohrzirkulation als eine ungewollte Strömung, die in unzähligen Installationen auftritt und so enorme Energieverluste zur Folge hat. Daher ist uns die Verbreitung der Projektergebnisse wichtig. Wir haben während der Vorhaben mehrere Handwerker- und Planerschulungen sowie einen Workshop mit Speicherherstellern durchgeführt. Auf mehreren Messen und auf einigen Tagungen sind die Ergebnisse präsentiert worden. Die Leser mögen, sofern sie den Inhalten zustimmen, helfen, die Problematik der Einrohrzirkulation in der Installationspraxis den Herstellern und den Planern sowie den ausführenden Betrieben bewusst zu machen.*

## **Danksagung**

Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung des Projekts (Förderkennzeichen Az. 29647), das die Ermittlung der in dem vorliegenden Bericht enthaltenen Erkenntnisse ermöglichte. Ferner danken wir proKlima – Der enercity-Fonds, Hannover, für die Förderung des Vorprojekts, das bei uns die Notwendigkeit, dem Phänomen der Einrohrzirkulation vertiefend nachzugehen, ausgelöst hat.



Weiterer Dank gilt dem Kooperationspartner PAW GmbH & Co. KG, der uns mit Informationen über praxisübliche Fertigungsmöglichkeiten und Material unterstützte sowie den Partnern SolarZentrum Hamburg und Viessmann Werke GmbH & Co. KG.

Hameln, im Juli 2014

Francis Kliem, Gunter Rockendorf, Jan Steinweg

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Wärmeverluste von Warmwasserspeichern</b> .....	<b>9</b>
2.1. Bauformen .....	9
2.2. Wärmeverlustpfade .....	11
2.3. Ermittlung der Wärmeverluste .....	11
2.4. Übertragbarkeit auf reale Systeme .....	13
<b>3. Ursache und Charakterisierung der Einrohrzirkulation</b> .....	<b>14</b>
3.1. Erläuterung und Entstehung .....	14
3.2. Prüfstand und Messwertaufnahme .....	15
3.3. Auswerteverfahren .....	16
3.3.1. Instationär .....	16
3.3.2. Stationär .....	17
<b>4. Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation</b> .....	<b>19</b>
4.1. Einflussgrößen .....	19
4.1.1. Häufigkeit und Länge der Stand-By-Zeiten .....	19
4.1.2. Speichertemperatur und Rohrquerschnitt .....	21
4.1.3. Rohrausrichtung und -Material .....	22
4.2. Kombination von waag- und senkrecht ausgerichteten Rohrleitungen .....	27
4.3. Anschlussvarianten Wärmeübertrager und Dämmängel .....	29
4.3.1. Dämmängel im Anschlussbereich .....	29
4.3.2. Interner Wärmeübertrager .....	31
4.3.3. Externer Wärmeübertrager .....	32
4.4. Minderungsmaßnahmen .....	36
<b>5. Jährliche Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation</b> .....	<b>39</b>
5.1. Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung .....	39
5.2. Solaranlage zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung .....	43
<b>6. Empfehlungen für die Praxis</b> .....	<b>47</b>

---

Anhang A: Literatur .....	51
Anhang B: Formelzeichen und Abkürzungen .....	53
Anhang C: Wärmeverlustmessung an Warmwasserspeichern .....	55
Anhang D: Auslegung Siphons auf Basis der Rippengleichung .....	59
Anhang E: Visualisierung der ERZ mittels CFD-Simulation .....	63
Anhang F: Technische Daten des verwendeten Speichers .....	66
Anhang G: Weitere Messdaten .....	67

## Zusammenfassung

Die rohrinterne Gegenstromzirkulation oder kurz Einrohrzirkulation (ERZ) ist ein Vorgang, der an Anschlüssen von Warmwasserspeichern, externen Wärmeübertragern, Heizkesseln und Heizkreisverteilern zu erheblichen Wärmeverlusten im Stillstand führen kann. In einem von proKlima – Der enercity-Fonds, Hannover geförderten Vorprojekt sind erste Erkenntnisse zur ERZ und ihrer Bestimmung erarbeitet worden. Diese dienen als Basis für ein von der Deutschen Bundestiftung Umwelt (DBU) unterstütztes Vorhaben, das eine vertiefende Untersuchung der Problematik zum Inhalt hat. Der vorliegende Bericht fasst die wesentlichen Ergebnisse des DBU- Forschungsprojekts zusammen und gibt Empfehlungen, wie in der Praxis mit der Problematik umgegangen werden sollte.

Die wesentlichen Resultate der Vorhaben sind:

- \* Ein hochgenaues Prüfverfahren ist entwickelt worden und anhand eines praxisnahen Prüfstandsbaus zur Charakterisierung der ERZ und Bestimmung der Wärmeverluste umgesetzt worden. Durch Bezug der Verluste auf die Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Umgebung wird der Verlustkoeffizient einer Anschlusssituation bestimmt. Dessen typischer Messfehler beträgt 0,01 bis 0,02 W/K.
- \* Bereits ab Stillstandszeiten von einer Stunde kann von deutlich erhöhten Wärmeverlusten durch ERZ in der Anschlussleitung ausgegangen werden. Eine geringere Anschlussrohrdämmung als nach Energieeinsparverordnung (EnEV) gefordert führt zu einer noch früheren Ausbildung der ERZ.
- \* Die ERZ bedingten Wärmeverluste steigen mit zunehmender Speichertemperatur. Bei horizontalen Anschlüssen sind auch die Verlustkoeffizienten temperaturabhängig. Die Verluste und deren Temperaturabhängigkeit erhöhen sich mit größer werdendem Rohrdurchmesser erheblich.
- \* Bereits geringe Neigungswinkelveränderungen der Anschlussleitung haben einen erheblichen Einfluss auf die Reichweite der ERZ und somit auf die dadurch hervorgerufenen Wärmeverluste. Die ERZ-Verluste steigen bei horizontal geführten Rohrleitungen, wenn Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit verwendet werden. Ursache dafür ist eine bessere Ausprägung der gegenläufigen Strömungen innerhalb der Rohrleitung. Das bedeutet, dass es bei Rohren aus CrNi-Stahl oder Kunststoff noch wichtiger als bei Kupferrohren ist, ERZ- mindernde Maßnahmen vorzunehmen.

- \* Der im Fall von ausschließlich waag- oder senkrechter Rohrausrichtung entstehende charakteristische Temperaturverlauf im Rohr bleibt auch bei Kombination dieser Rohrstücke zu einer komplexeren Rohranordnung erhalten. Damit werden beliebige Rohranordnungen berechenbar.  
Anordnungen mit waagrechtem Speicherabgang erzeugen bei Speichertemperaturen über 60 °C eine höhere ERZ- Reichweite und stärkere Wärmeverluste als Anordnungen mit senkrechtem Abgang.
- \* Fehlende Dämmung im Bereich des Anschlussstutzens verringert die Reichweite der ERZ nicht, sondern führt lediglich zu einer Erhöhung der Wärmeverluste.
- \* Ebenso verringern sich die Wärmeverluste durch ERZ nicht, wenn die Rohrleitung an einem internen Wärmeübertrager angeschlossen ist. Dies gilt auch für speicherinterne abknickende Stutzen.
- \* Externe Wärmeübertrager, Heizkessel, Wärmeverteiler und andere hydraulisch mit dem Speicher verbundene Komponenten können durch ERZ eine deutliche Temperaturerhöhung im Stillstand erfahren. Die somit entstehenden Verluste liegen deutlich über den Wärmeverlusten, die bei ausschließlicher Betrachtung der ERZ in gut gedämmten Rohrleitungen entstehen.

Um die Auswirkungen von ERZ auf die Jahresbilanz zu untersuchen, ist ein Simulationsmodell für die dynamische Anlagensimulation (TRNSYS) erstellt worden. Die exemplarisch durchgeführten Anlagensimulationen mit und ohne Berücksichtigung von ERZ untermauern das eingangs angenommene Energieeinsparpotenzial. So zeigen sich bei einer solarthermischen Kombi-Anlage zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung ERZ bedingte Wärmeverluste von 340 bis 400 kWh pro Jahr. Diese Verluste werden durch höhere Taktraten und längere Laufzeiten des Wärmeerzeugers gedeckt. Da insbesondere im Nachheizbereich die Verluste durch ERZ am stärksten sind, müssen diese überwiegend durch die Nachheizung und auf einem hohen Temperaturniveau nachgeliefert werden. Für Brennwertgeräte und noch ausgeprägter für Wärmepumpen bedeutet dies einen Betrieb in einem ungünstigen Wirkungsgradbereich. Primärenergetisch betrachtet werden also die durch ERZ verursachten Verluste nochmals höher ausfallen. Es ist somit offensichtlich, dass sich kostengünstige Minderungsmaßnahmen, wie Siphons oder Stufen- bzw. Z-Profile bereits kurze Zeit nach ihrer Installation amortisieren werden.



Aus den zuvor genannten Erkenntnissen ergibt sich, dass die Bedeutung von Minderungsmaßnahmen insbesondere in den folgenden Fällen hoch ist:

- Anschlüsse an heißen Speicherbereichen,
- Anschlüsse mit häufiger und langanhaltender Stillstandszeit.

Anschlussleitungen mit „ungünstigen“ Rohrführungen, schlechtleitenden Materialien und mit größerem Rohrdurchmesser lassen die Verluste signifikant steigen.

Thermosiphons oder gleichwertige Z-förmige Stufenprofile aus CrNi-Stahl sind die wirkungsvollsten Minderungsmaßnahmen. Kupfer als Siphonmaterial ist ebenfalls denkbar, aber erfordert im Vergleich zum CrNi-Stahl eine deutlich längere Ausführung des vertikalen Abschnittes. Gut geeignet sind im allgemeinen Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit, sofern sie den Temperatur- und Druckanforderungen der entsprechenden Fluidkreise genügen.

Dimensionierungsregeln für die Gestaltung von Siphonschenkeln sind erarbeitet worden. Für CrNi-Stahl sind Schenkellängen von etwa 5,5 Mal Rohrinne Durchmesser, für Kupferrohre etwa 13 Mal Rohrinne Durchmesser als Anhaltswerte zu verwenden.

Andere Maßnahmen und am Markt angebotene technische Lösungen sollten sich einer vergleichenden Bewertung über den gesamten Temperaturbereich bis 90 °C unterziehen.

## 1. Einleitung

Die zunehmende Verknappung fossiler Brennstoffe und die durch deren Nutzung hervorgerufene Umweltverschmutzung, insbesondere die Emission von klimaschädlichen Treibhausgasen, erfordern nicht nur eine ständige Verbesserung und den Ausbau der regenerativen Energieerzeugung, sondern insbesondere einen besonnenen Umgang mit der erzeugten Energie. Die Bedeutung der Energiespeicherung ist dabei hervorzuheben, da sie in vielen Systemen zur Wärmebereitstellung benötigt wird, Verluste unvermeidlich sind und sich somit effiziente Speicherkonzepte mehrfach auszahlen.

Bei der thermischen Solarenergienutzung zur Erzeugung von Trinkwarmwasser und Heizwärme ist eine effektive Wärmespeicherung seit jeher von zentraler Bedeutung. Ursache dafür ist der zeitliche Versatz zwischen der Wärmeerzeugung, die über den Tag erfolgt, und dem Bedarf, der häufig in den Morgen- und Abendstunden entsteht. Die gebräuchlichste Methode zur Überbrückung dieses Versatzes ist die Zwischenspeicherung der erzeugten Solarwärme in Warmwasserspeichern.

Speicher werden überall dort eingesetzt, wo die erzeugte Wärme nicht unmittelbar sofort verbraucht wird oder ein häufiges Takten des Erzeugers vermieden werden soll. Ein Speicher wird auch bei der Wärmezeugung durch eine stromnetzgesteuerte Wärmepumpe oder beim Betrieb eines Blockheizkraftwerkes benötigt. Die Minimierung der Wärmeverluste zwischen Erzeugung und Verbrauch ist aus ökologischen und ökonomischen Gründen sinnvoll, denn einerseits lassen sich Speicherverluste meist mit geringem Aufwand reduzieren, andererseits müssen sie häufig durch konventionelle Zusatzheizung gedeckt werden. Zudem können sie (im Sommer) zu unerwünscht hohen Innenraumtemperaturen beitragen.

Zur Beurteilung der Wärmeverluste darf der Speicher jedoch nicht herausgelöst aus dem Gesamtsystem betrachtet werden, da die hydraulische Anbindung an das System einen erheblichen Einfluss auf die Speicherverluste haben kann. Bei den gebräuchlichsten Normen zur Charakterisierung der Wärmeverluste werden jedoch die durch die Anschlussleitungen verursachten Verluste nahezu ausgeblendet, da die Prüfungen nur mit Minimalbelegungen der Rohranschlüsse durchgeführt werden. Diese Testbedingungen führen zu sehr positiven Wärmeverlustwerten, die in der Praxis zumeist deutlich überstiegen werden.

Für den Unterschied der Speicherverluste zwischen der Labor- und der Installati-

onspraxis sind neben den Anschlussleitungen weitere Effekte wesentlich, wie sorgfältiges Heranführen der Rohrdämmung an die Speicherdämmung oder Überdämmen von Wärmebrücken, z. B. an ungenutzten Stützen. In dem vorliegenden Bericht soll gezeigt werden, dass die Anschlussleitungen einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtverluste haben können. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn das Phänomen der sogenannten rohrinternen Gegenstromzirkulation oder kurz Einrohrzirkulation (ERZ) in den Rohrleitungen auftritt. Die ERZ ist zwar ein seit langem bekanntes Phänomen (Suter /1/), das bereits an verschiedenen Instituten (Andersen /2/; Huhn /3/; SPF /4/) untersucht worden ist, aber dennoch zahlreiche offene Fragen birgt und in der Praxis zu wenig Beachtung findet, obwohl ihre wirtschaftliche Bedeutung sehr hoch ist. Typische Speicherverluste mit Rohrdimensionen wie im Einfamilienhaus üblich fallen mit ERZ selbst bei optimaler Ausführung der Wärmedämmung um etwa die Hälfte höher aus als bei effektiver Vermeidung. ERZ ist in nahezu jeder Heizungsanlage anzutreffen, auch an anderen beheizten Elementen wie Heizkesseln, Verteilern und externen Wärmeübertragern. Im ungünstigen Fall ist sie der Auslöser für eine dichtgetriebene Vor- Rücklauf Zirkulation, deren Verluste um etwa zwei Größenordnungen höher liegen.

Unsere Untersuchungen ergeben als Anhaltswert für kleine Speicher (bis 300 l) Wärmeverluste durch ERZ – eine sorgfältige Anschlussisolierung nach Energieeinsparverordnung vorausgesetzt – von 200 bis 400 kWh pro Jahr. Betrachtet man lediglich die über 10 Mio. Warmwasserspeicher in den über 16 Mio. Einfamilien- und Reihen- Doppelhäusern in Deutschland, so machen allein deren ERZ-Verluste über 0,1 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland aus. Wenn man alle Gebäudetypen und weitere Komponenten wie Kessel, Verteiler etc. mit einbezieht, wird deutlich, dass hier ein enormes Effizienzpotential brach liegt. Wie unsere Ergebnisse zeigen werden, kann dieses Potential mit geringinvestiven Maßnahmen erschlossen werden.

Die Ziele des vorliegenden Berichtes sind:

- \* die Wärmeverluste verschiedener Speicheranschlussvarianten mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern, Rohrmaterialien und Neigungswinkeln aufzuzeigen,
- \* konkrete Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der durch ERZ entstehenden Verluste durch geeignete Minderungsmaßnahmen zu geben,
- \* die Relevanz der Verwendung von Minderungsmaßnahmen durch Bestimmung der ERZ-bedingten Jahreswärmeverluste in handelsüblichen Anlagen hervorzuheben, kurz:

Die wichtigsten am ISFH erarbeiteten Erkenntnisse zur Thematik ERZ vorzustellen.

## 2. Wärmeverluste von Warmwasserspeichern

In diesem Kapitel wird eine grundlegende Übersicht zu den Wärmeverlusten von Warmwasserspeichern gegeben. Es werden typische Bauformen beschrieben, die auftretenden Wärmeverlustpfade dargestellt sowie die gängigen Prüfmethode zur Charakterisierung der Verluste erläutert. Abschließend erfolgt eine Bewertung, in welchem Maß die normativ ermittelten Speicherverlustkoeffizienten auf reale Systeme aussagekräftig übertragbar sind.

### 2.1. Bauformen

In der Abbildung 2-1 sind die Querschnittszeichnungen eines Pufferspeichers, eines bivalenten Speichers und eines Kombispeichers zu erkennen. Diese Bauformen sind die am häufigsten vertretenden Speicherausführungen am Markt.

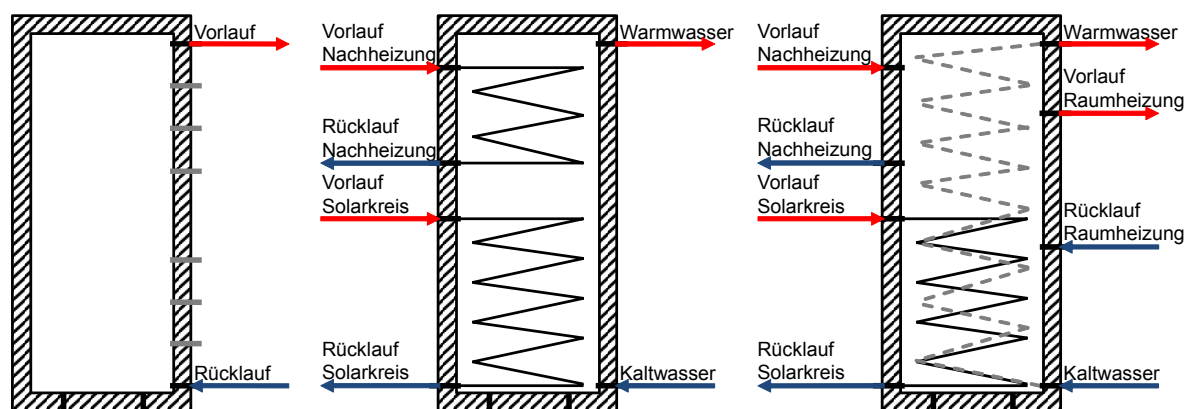


Abb. 2-1: Querschnittszeichnung eines Pufferspeichers (links), eines bivalenten TWW- Speichers (Mitte) und eines Kombispeichers (rechts)

#### Pufferspeicher

Der Pufferspeicher stellt die einfachste Bauform eines Warmwasserspeichers dar und besteht im Wesentlichen aus einer Speicherhülle, in der sich das Speichermedium Heizkreiswasser befindet, Füßen zur Aufstellung, mindestens einem Anschlusspaar für die Be- und Entladung sowie einer Wärmedämmung zur Minimierung der Transmissionsverluste vom Speicherzylinder an die Umgebung. Technisch erweiterte Ausführungen können zudem über Einbauten zur geschichteten Be- und Entladung sowie einem eingebauten elektrischen Tauchheizgerät verfügen. Der Pufferspeicher verfügt somit minimal über 2 Anschlussleitungen, wobei sich ein Anschluss am oberen und einer am unteren Ende des Speichers befindet.

## **Bivalente Speicher**

Bivalente Speicher werden häufig in solarthermischen Anlagen zur Trinkwassererwärmung eingesetzt. Ihr charakteristisches Merkmal sind zwei integrierte Wärmeübertrager, von denen sich einer im oberen (Nachheizkreis) und einer im unteren Bereich (Solarkreis) des Speichers befindet. Die Übertrager sind zumeist in Form von Rohrwendeln ausgeführt, die mit dem Arbeitsmittel des Nachheiz- oder des Solarkreises durchströmt werden. Im Speicherraum befindet sich das Trinkwarmwasser, das somit hydraulisch vom Nachheiz- und Solarkreis getrennt ist. Es ist ersichtlich, dass der bivalente Speicher über mindestens 6 Anschlussleitungen, die über die komplette Speicherrhöhe verteilt sind, verfügt. Bei Verwendung einer Zirkulationsleitung ist gegebenenfalls eine weitere Anschlussbelegung erforderlich.

## **Kombispeicher**

Der Kombispeicher wird ebenfalls in solarthermischen Anlagen verwendet, bietet aber neben der Trinkwarmwasserbereitung auch die Möglichkeit der Heizungsunterstützung. Bei dieser Speicherausführung ist das Speichervolumen im Gegensatz zum bivalenten Speicher mit Heizungswasser gefüllt. Das Trinkwarmwasser wird über einen eingetauchten Tank, einen Wärmeübertrager oder eine separate Trinkwasserstation erwärmt. Der Solarkreis steht wie beim bivalenten Speicher über einen integrierten Wärmetauscher in thermischen Kontakt mit dem Speicher. Alternativ ist auch ein externer Solar-Wärmeübertrager möglich. Für einen Standardanwendungsfall sind mindestens 8 Leitungen mit dem Speicher verbunden. Bei komplexeren Anwendungen kann sich die Anzahl der Anschlussbelegungen deutlich erhöhen.

Je nach Speicherbauform und Verwendungszweck werden unterschiedlich viele Anschlussleitungen am Speicher benötigt. Jeder zusätzliche Anschluss, auch wenn er ungenutzt ist, erhöht die Wärmeverluste des Speichers. Im Idealfall verfügt ein Warmwasserspeicher nur über so viele Anschlüsse, wie sie für den jeweiligen Anwendungsfall auch benötigt werden.

## 2.2. Wärmeverlustpfade

Um allgemein beurteilen zu können, ob eine Prüfmethode zur Ermittlung der Speicherwärmeverluste ausreichend ist, müssen alle relevanten Wärmeverlustpfade grundlegend bekannt sein. Eine anschauliche Darstellung der Verlustpfade von Warmwasserspeichern kann der Abbildung 2-2 entnommen werden.

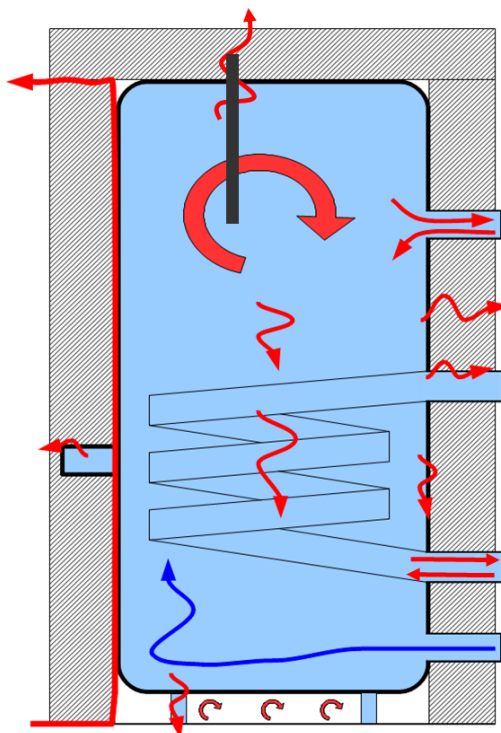


Abb. 2-2: Verlustpfade von Wärmespeichern

Die gesamten Speicherverluste setzen sich zusammen aus den Verlusten durch

- \* Mantel- und Deckeldämmung,
- \* ungenutzte Anschlüsse und Tauchhülsen,
- \* Anschluss Anode und Elektro- Heizstab,
- \* Anschluss interner Wärmeübertrager,
- \* Füße und reduzierte Dämmung im Bodenbereich,
- \* nicht ausreichend anliegende Dämmung,
- \* **Einrohrzirkulation in angeschlossenen Rohrleitungen** sowie
- \* interne Temperatur- „Verluste“ durch interne Zirkulation, Leitung, Einströmung.

## 2.3. Ermittlung der Wärmeverluste

In der Tabelle 2-1 ist eine Übersicht der gängigen Normen sowie deren Methode zur Ermittlung der Wärmeverluste von Warmwasserspeichern enthalten. Detailliertere Informationen können dem Anhang C entnommen werden.

Tab. 2-1: Übersicht der Verfahren zur Ermittlung der Wärmeverluste von Warmwasserspeichern nach den gängigen Normen

	DIN EN 12977-3/-4: 2012	DIN EN 12897-9: 2006	DIN EN 15332: 2007	DIN EN 60379: 2004
Anwendungsbereich	Warmwasserspeicher mit einem Nennvolumen von 50 l bis 3000 l	Speicher-Wassererwärmer bis zu 1000 l Nennvolumen	Warmwasserspeicher von bis zu 1500 l Nennvolumen	elektrisch beheizte Warmwasserspeicher für Hausgebrauch
Randbedingungen	$\vartheta_a = 20 \text{ °C}$ mit zulässiger Schwankung von $\pm 2 \text{ °C}$ während der Prüfung; $\vartheta_s = 55 \dots 65 \text{ °C}$	$\vartheta_a = 20 \text{ °C}$ mit zulässiger Schwankung von $\pm 2 \text{ °C}$ während der Prüfung; $\vartheta_s = 65 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$	$\vartheta_a = (20 \pm 5) \text{ °C}$ mit zulässiger Schwankung von $\pm 1 \text{ °C}$ während der Prüfung; $\vartheta_s = \text{Nenn-Speicherwassertemperatur} \pm 5 \text{ K}$ , jedoch mindestens $65 \text{ °C}$	$\vartheta_a = 20 \text{ °C}$ mit zulässiger Schwankung von $\pm 2 \text{ °C}$ während der Prüfung; $\vartheta_s = 65 \text{ °C} \pm 3 \text{ °C}$ mittels Thermostat des Wassererwärmers, sofern regelbar
Aufstellort	klimatisierter Raum, keine weiteren Anforderungen an die Aufstellung	auf 20 mm dicker Faserplatte mittlerer Dichte in $(400 \pm 100) \text{ mm}$ über dem Fußboden; abgeschirmt gegen direkte Bestrahlung und Zugluft; 700 mm von vertikalen Flächen entfernt, sofern keine Wandmontage laut Hersteller angegeben ist	Freiraum um Speicher herum von mindestens 700 mm und über Speicher mindestens 1000 mm; wandhängende Speicher an separater Wand mindestens 150 mm von Raumwand und 250 mm von Fußboden entfernt; Abschirmung vor Wärme-Strahlung und Zugluft; rel. Luftfeuchtigkeit kleiner 85 %	auf Boden, mitgeliefertem Gestell oder Hilfsboden mit Freiraum um Speicher herum von mindestens 700 mm; wandhängende Speicher an separater Wand mindestens 150 mm von Raumwand und mindestens 250 mm von Decke & Fußboden entfernt; zugfreier Raum; rel. Luftfeuchtigkeit kleiner 85 %
Belegte Anschlüsse	2 oder 4: nur für Prüfung erforderliche Be- und Entladeanschlüsse belegen, nicht benötigte Anschlüsse Verschließen und Dämmen	0 ... 4: Anschlussleitungen je nach Art und Weise der Temperaturhaltung und ob Befüllleitungen nach Befüllung am Speicher verbleiben	0: während der Prüfung sind sämtliche äußeren Anschlüsse zu trennen; wasserführende Anschlüsse müssen gedämmt werden; Rohrleitung sind mit 30 mm starker Dämmung zu versehen	0: keine Aussage bzgl. Behandlung der Anschlussleitungen
Prüfverfahren	Messung verschiedener Be- & Entladeabfolgen sowie Stand-By, bis 40...60 % der gespeicherten Energie verloren wurde; Ermittlung des Verlustkennwertes und weiterer Kennwerte durch Nachbildung der Sequenzen mittels Rechenmodell und Algorithmus zur Parameterfindung	Temperaturhaltung durch eingebauter Tauchheizgerät oder auch über außen liegenden elektrischen Durchflusserwärmer möglich; Ermittlung des elektrischen Energieverbrauchs über mehrere 24 h Prüfzeiträume	Temperaturhaltung durch eingebauter elektrischer Tauchheizgerät, welches im unteren Drittel des Speichers zu installieren ist; Ermittlung des elektrischen Energieverbrauchs über eine Dauer von min. 24 h	Temperaturhaltung durch Thermostat des Wassererwärmers; Ermittlung des elektrischen Energieverbrauchs über eine Dauer von min. 48 h
Ergebniswert	Stand-By Wärmeverlust in W/K	Bereitschafts-Wärmeaufwand in kWh/d	Bereitschaftsverlust in kWh/d	Wärmeverlust in kWh/d



## 2.4. Übertragbarkeit auf reale Systeme

Die Übertragbarkeit der ermittelten Wärmeverlustkennwerte soll anhand der Tabelle 2-2 veranschaulicht werden. In der Tabelle sind die Anzahl der am Speicher angeschlossenen Rohrleitungen während der Ermittlung der Verlustkennwerte und die Anzahl der Leitungen für typische Installationssituationen aufgelistet.

Tab. 2-2: Belegte Anschlüsse bei der Prüfung im Vergleich zum realen Betrieb

Installationssituation	angeschlossene Rohrleitungen	
<b>Bei Ermittlung der Wärmeverluste nach</b>	DIN EN 12977-3/-4: 2012	2 oder 4
	DIN EN 12897-9: 2006	0, 2 oder 4
	DIN EN 15332: 2007	0
	<i>DIN EN 60379: 2004<sup>1)</sup></i>	0
<b>Bei Praxisüblichen Betrieb als</b>	einfache Pufferspeicher u. elektrisch beheizte Boiler	≥ 2
	bivalente Speicher	≥ 6
	Kombispeicher	≥ 8

1) Die Norm ist gemäß dem Anwendungsbereich ausschließlich für elektrisch beheizte Warmwasserspeicher für den Hausgebrauch anzuwenden.

Die Tabelle zeigt, dass die Prüfverfahren die durch Anschlussleitungen bedingten Verluste an Warmwasserspeichern nur eingeschränkt berücksichtigen. Das bedeutet, dass die in der Praxis auftretenden Speicherverluste, je nach Anwendungssituation, allein durch die größere Anzahl von Speicheranschlüssen deutlich höher ausfallen können als die im Rahmen der Prüfung ermittelten Verluste. Wenngleich zumindest von der DIN EN 12977-3 ausdrücklich verlangt wird, dass das Auftreten natürlicher Konvektion durch geeignete Maßnahmen (z. B. Leitung nach Austritt aus dem Speicher abwärts führen, Siphons verwenden etc.) zu unterbinden ist.

In Prüflaboren werden die Wärmeverluste von Warmwasserspeichern den geltenden Normen entsprechend unter idealisierten Bedingungen ermittelt, was zu einer deutlichen Unterbewertung der Verluste im Vergleich zum realen Installationsfall führen kann. Nach derzeitigem Kenntnisstand dürfen die so ermittelten Kennwerte zur Produktkennzeichnung von Warmwasserspeichern („Energy label storage tanks“) gemäß der europäischen Richtlinie 2010/30/EU herangezogen werden.

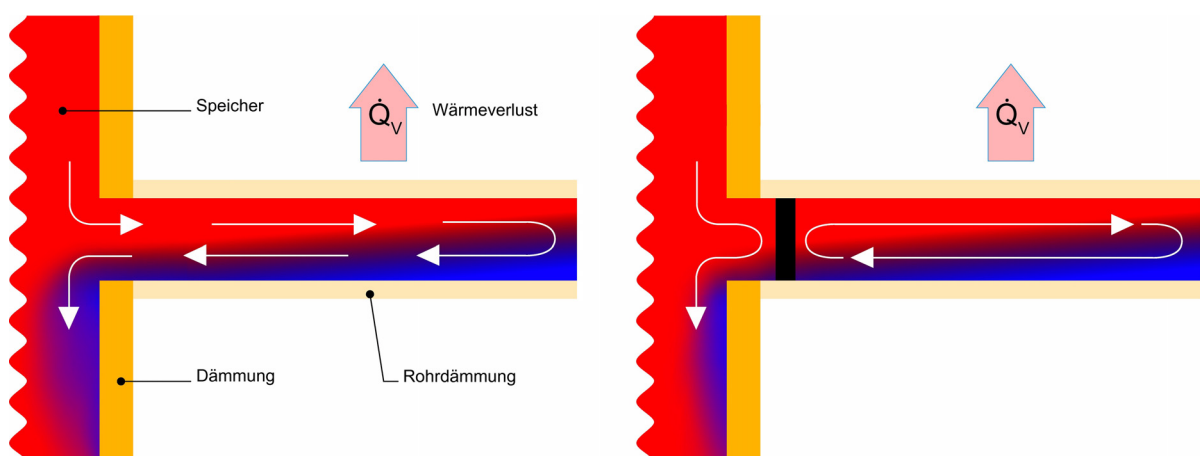
### 3. Ursache und Charakterisierung der Einrohrzirkulation

In diesem Abschnitt werden die Ursache von ERZ sowie das verwendete Messverfahren zur Quantifizierung der ERZ kurz vorgestellt. Auf die Besonderheiten bei der Bewertung der ERZ wird gezielt eingegangen, so dass daraus die wesentlichen Grundlagen des Prüfkonzepts abgeleitet werden können.

#### 3.1. Erläuterung und Entstehung

Wenn eine gewollte Strömung warmen Wassers über einen Speicheranschluss (beispielsweise Beladung eines Pufferspeichers mit Solarwärme oder Warmwasserzapfung) beendet wird, kühlt die Rohrleitung sehr viel schneller aus als der Speicher. An der Anschlussstelle steht jetzt kaltes Fluid im Rohr dem warmen Fluid im Speicher gegenüber. Aufgrund der Dichtedifferenz entsteht eine Antriebskraft, die dazu führt, dass das kalte Rohrwasser sich unterhalb des warmen Speicherwassers einschichtet. Dabei „fällt“ das Rohrwasser in den Speicher, während, um die Massenbilanz zu erfüllen, warmes Speicherwasser in das Rohr nachströmt. Diese als ERZ bezeichnete Strömung kann sich im Rohr ausdehnen und eine erhebliche Ausdehnung erreichen. Durch diese Strömung wird der Speicher zusätzlich abgekühlt. Eine einfache Illustration der ERZ kann einem zu diesem Zweck erstellten Informationsvideo /8/ entnommen werden.

Der Vorgang der ERZ zwischen Rohr- und Speicherwasser kann durch Absperr-elemente beeinflusst werden (siehe Abbildung 3-1). Wenn z. B. ein Ventil nahe dem Speicheraustritt die Strömung unterbricht, tritt ein durch Leitung induzierter Wärmetransport aus dem Speicher- in den Rohrbereich auf.



**Abb. 3-1:** Prinzip der Einrohrzirkulation mit waagrecht angeschlossenerm Rohr, links ohne und rechts mit Absperrung zum Speicher

Auf beiden Seiten des Ventils kann wiederum ERZ auftreten, ein direkter Austausch mit dem Speicherwasser findet dabei nicht statt. Trotzdem wird auch hier der Speicher zusätzlich und mitunter signifikant abgekühlt.

### 3.2. Prüfstand und Messwertaufnahme

Ein typischer Warmwasserspeicher (bis 1000 l) weist nach Norm einen Verlustkoeffizienten im Bereich von 2 bis 5 W/K auf, durch ERZ an nur einem Anschluss hervorgerufene zusätzliche Verlustkoeffizienten liegen z. B. für ein horizontales 22 mm Kupferrohr im Bereich von 0,05 bis 0,3 W/K. Um diese mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können, wird ein Messverfahren benötigt, das eine Unsicherheit von 0,02 W/K nicht überschreitet. Ein Bilanzverfahren, das den gesamten Speicher und seine Verluste selbst einschließt, scheidet deshalb aus.

Der Prüfstand zur Untersuchung von Wärmeverlusten durch ERZ ist so konzipiert, dass an einem möglichst praxisnahen Aufbau gemessen wird. Kern des Messverfahrens ist die genaue Bestimmung der Temperaturverteilung auf dem angeschlossenen Rohr. Dafür werden bis zu 50 einzelne Temperatursensoren verwendet, die auf Ober- und Unterseite des zu untersuchenden Prüflingsrohrs verteilt angebracht werden. Das Prüflingsrohr wird an einen marktüblichen Kombispeicher (Details siehe Anhang F) angeschlossen, der mit Hilfe eines Thermostaten auf die gewünschte Betriebstemperatur konditioniert werden kann. Abbildung 3-2 zeigt den schematischen Aufbau des Prüfstands.

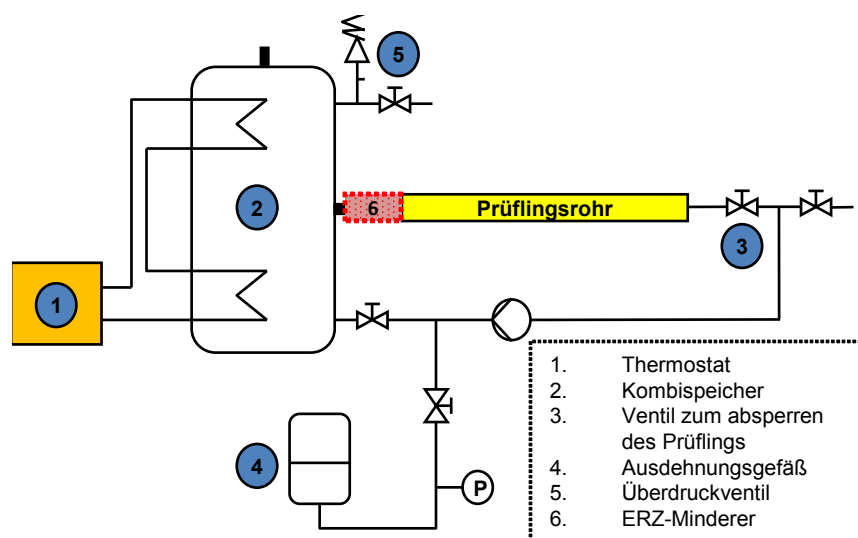


Abb. 3-2: Schematische Darstellung des Prüfstandes

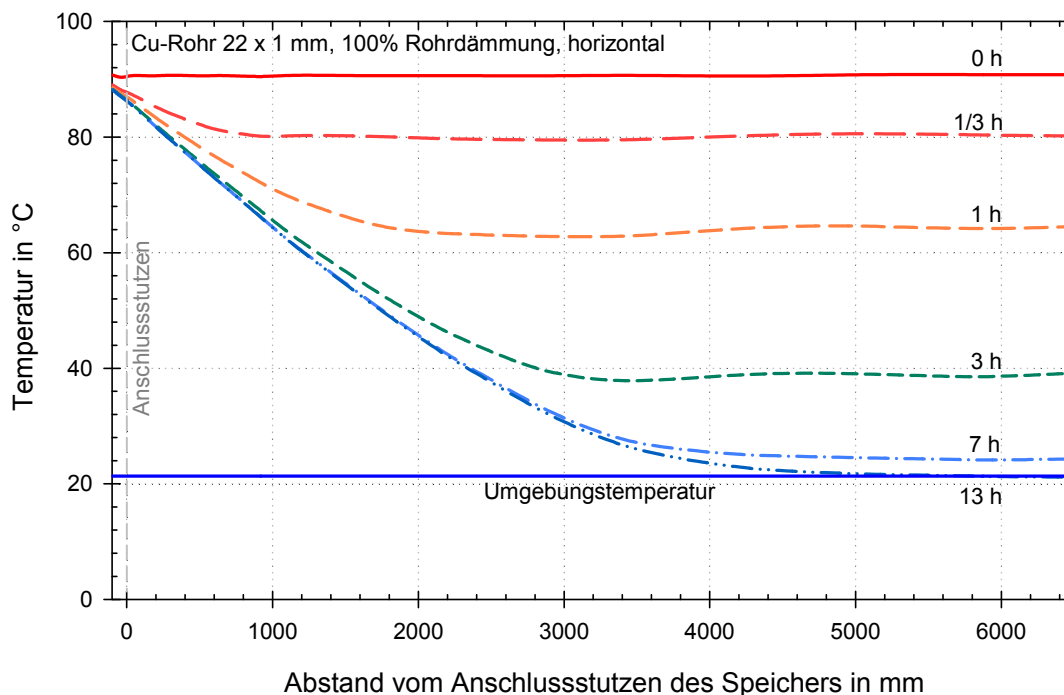
Dieser Aufbau ermöglicht die genaue Messung der resultierenden örtlichen Temperaturverteilung des installierten Prüflings mit stattfindender ERZ – und zwar in der zeitlichen Abfolge von der Entstehung bis zum Erreichen des stationären Zustands. Dabei wird nachfolgend davon ausgegangen, dass alle Installationen sowie die Speicher- und Rohrleitungsdämmung mit höchstmöglicher Sorgfalt und nach dem anerkannten Stand der Technik vorgenommen werden. Eine genauere Beschreibung des Prüfstandsbaus kann dem Beitrag „Einrohrzirkulation in Speicheranschlussrohren – Einflussgrößen und Gegenmaßnahmen“ des Tagungsbandes zum 23. Symposium thermische Solarenergie in Bad Staffelstein entnommen werden /6/.

### **3.3. Auswerteverfahren**

Die Auswertung untergliedert sich im Wesentlichen in die Betrachtung des instationären Auskühlvorgangs der Rohrleitung, während dessen sich die ERZ ausbildet und einer Bewertung des stationären Endzustands, bei dem die ERZ vollständig ausgebildet ist.

#### **3.3.1. Instationär**

Den Beginn der Messung stellt das Abschalten der Umwälzpumpe dar, mittels derer das gesamte Prüfrohr auf das Temperaturniveau des Speichers konditioniert worden ist. Durch Betrachtung der Temperaturen entlang der Rohrleitung ist zu bewerten, ob und wann der stationäre Endzustand eingetreten ist. Zu diesem Zweck wird das in der Abbildung 3-3 dargestellte Diagramm herangezogen. In dem Diagramm sind die Temperaturen entlang der Rohrleitung für die Stillstandszeiten von 20 min, 1 h, 3 h, 7 h und 13 h aufgetragen. Der Beginn der Messung ist durch die rot durchgezogene Linie und die Umgebungstemperatur durch die blau durchgezogene Linie gekennzeichnet. Ein stationärer Endzustand ist erreicht, wenn die Änderung der Rohrtemperatur nur noch minimal ist. Im dargestellten Fall tritt dies nach 13 Stunden ein.



**Abb. 3-3:** Auskühlung einer Rohrleitung nach Beendigung einer gewollten Durchströmung (z.B. Warmwasserzapfung)

Man erkennt, dass die Abkühlendenz des Rohrs in einem sich an den Speicher anschließenden Bereich durch ERZ gebremst wird. Mit zunehmender Zeit wird dieser Bereich größer. Die Energie, die diese Temperaturerhöhung im Vergleich zum reinen Abkühlen verursacht, wird mittels ERZ dem Speicher entnommen.

### 3.3.2. Stationär

Die Wärmeverluste des Anschlussrohres werden mit Hilfe der Temperaturverteilung auf dem Rohr bestimmt, die sich im stationären Endzustand einstellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Temperatur auf einem Rohrabschnitt  $\vartheta_{R,i}$ , repräsentiert durch einen in der Mitte des jeweiligen Abschnittes angeordneten Temperaturfühler, mit den Verlusten  $Q_{L,i}$  durch diesen Abschnitt  $i$  (Länge  $x_i$ ) nach Gleichung (3.1) korreliert.

$$\dot{Q}_{L,i} = U_{L,R} \cdot x_i \cdot (\vartheta_{R,i} - \vartheta_a) \quad \text{Gl. (3.1)}$$

$Q_{L,i}$  Wärmeverlust eines Rohrabschnittes des Anschlussrohres, in W

$U_{L,R}$  Wärmeverlustkoeffizient je Meter der Rohrleitung, in W/(mK)

$x_i$  Länge eines Rohrabschnittes, in m

$\vartheta_{R,i}$  Temperatur eines Rohrabschnittes, in °C

$\vartheta_a$  Umgebungstemperatur, in °C

Der Verlustkoeffizient  $U_{L,R}$  wird nach Gleichung (3.2) bestimmt /18/. Dabei sind  $d_i$  und  $d_a$  der innere und äußere Durchmesser der Dämmung,  $\lambda_D$  ist der Wärmeleitkoeffizient der Rohrdämmung und  $\alpha_a$  der äußere Wärmeübergangskoeffizient.

$$\frac{1}{U_{L,R}} = \left( \frac{1}{2 \cdot \lambda_D} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_a} \right) \frac{1}{\pi} \quad \text{Gl. (3.2)}$$

$d_i$  Außendurchmesser der Rohrdämmung, in m

$d_a$  Innendurchmesser der Rohrdämmung, in m

$\lambda_D$  Wärmeleitfähigkeit der Dämmung, in W/(mK)

$\alpha_a$  Wärmeübergangskoeffizient Rohrdämmung / Umgebung, in W/(m<sup>2</sup>K)

Der so bestimmte Wärmeverlustkoeffizient  $U_{L,R}$  wird in W/K pro m Rohrleitung angegeben. Für ein 22 mm Cu-Rohr mit einer 25 mm starken Dämmung ergibt sich z. B. ein Wert für  $U_{L,R}$  von 0,19 W/(mK).

Die Temperaturverteilung  $\vartheta_{R,i}$  auf dem Rohr wird gemessen und mit Hilfe der zugehörigen Längen  $x_i$  wird der gesamte Verlustwärmestrom  $\dot{Q}_L$  in W aufsummiert. Da die sich auf dem Rohr einstellenden Temperaturen und damit die Wärmeverluste  $\dot{Q}_{L,k}$  für eine bestimmte Konfiguration  $k$  von der treibenden Temperaturdifferenz, also der Differenz zwischen Speicherinnentemperatur  $\vartheta_s$  und Umgebungstemperatur  $\vartheta_a$ , abhängen, kann nach Gleichung (3.3) ein Anschlussverlustkoeffizient  $(UA)_k$  gebildet werden.

$$(UA)_k = \frac{\dot{Q}_{L,k}}{\vartheta_s - \vartheta_a} \quad \text{Gl. (3.3)}$$

Dieser Verlustkoeffizient ist die wesentliche Kenngröße für die Bewertung des betrachteten Anschlusses. Er kann mit weiteren Verlustkoeffizienten und der Herstellerangabe laut Prüfbericht zu einem Gesamtverlustkoeffizienten des installierten Speichers summiert werden.

Die ermittelten Anschlussverlustkoeffizienten  $(UA)_k$  können aufsummiert und dem Gesamtverlustkoeffizient des Speichers hinzuaddiert werden.

## 4. Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation

In diesem Kapitel werden die relevanten Einflussgrößen sowie Maßnahmen zur Minderung der durch ERZ hervorgerufenen Wärmeverluste dargestellt.

### 4.1. Einflussgrößen

Zunächst wird auf den Einfluss der Häufigkeit und der Länge von Stand-By-Zeiten eingegangen, um zu zeigen, ab welcher Stillstandszeit die durch ERZ bedingten Verluste die der Rohrauskühlung dominieren und somit ERZ-Minderungsmaßnahmen essentiell werden. Darauf folgend wird die Auswirkung unterschiedlicher Speichertemperaturen und Rohrquerschnitte auf die resultierenden Anschlussverluste diskutiert. Ziel ist die Herausstellung der Rand- und Betriebsbedingungen, ab denen die ERZ Verluste gravierend werden. Weiterhin erfolgen Erläuterungen zum Einfluss des Neigungswinkels der Anschlussleitung und des Rohrmaterials.

Folgende Einflussgrößen sind wesentlich:

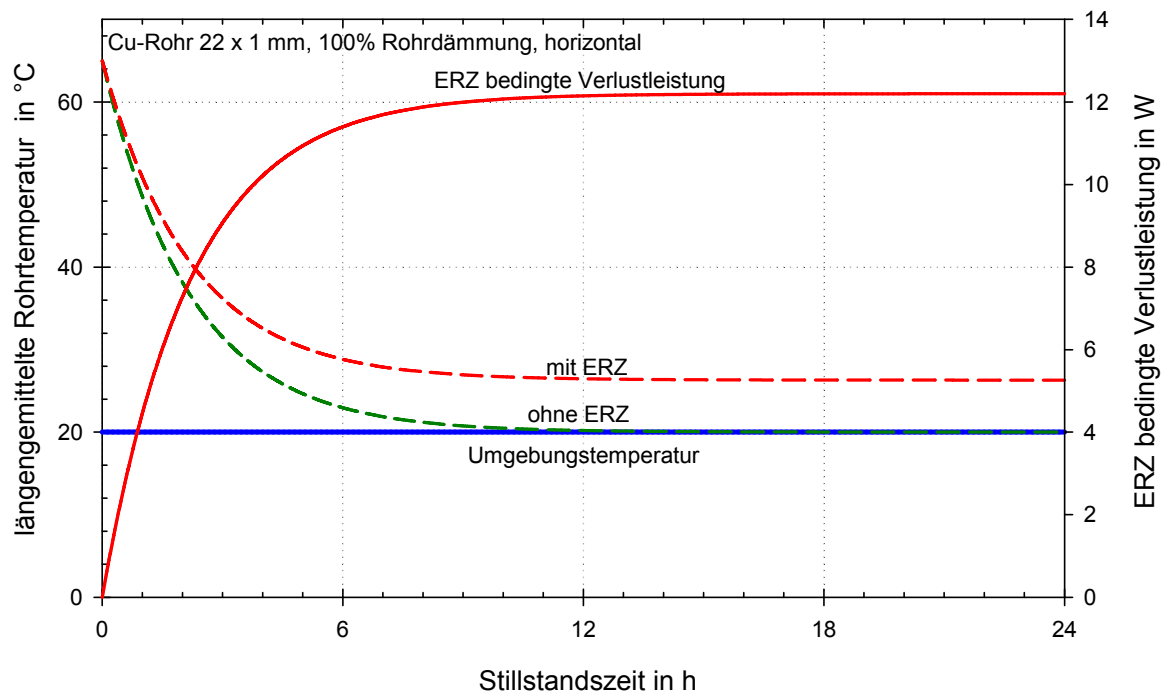
- \* Häufigkeit und Länge der Stand-By Zeiten
- \* Speichertemperatur und Rohrquerschnitt
- \* Rohrausrichtung und -Material

#### 4.1.1. Häufigkeit und Länge der Stand-By-Zeiten

Die ERZ ist nicht unmittelbar nach der Beendigung einer gewollten Durchströmung vorhanden, sondern bildet sich nach dem Ende einer erzwungenen Durchströmung langsam aus und verhindert somit, auf Kosten des im Speicher befindlichen Energieinhalts, eine vollständige Auskühlung der Anschlussleitung.

In Abbildung 4-1 ist als grün gestrichelter Verlauf die mittlere Rohrtemperatur in Abhängigkeit der Stand-By-Zeit aufgetragen, wenn ausschließlich die Auskühlung der Rohrleitung berücksichtigt wird. Der Verlauf wurde unter der idealisierten Annahme berechnet, dass keine konvektive Strömung im Rohr stattfindet und somit die Auskühlkurve berechnet werden kann.

Der rot gestrichelte Verlauf entspricht einem tatsächlichen Abkühlvorgang mit auftretender ERZ. Als rot durchgezogene Linie ist die daraus resultierende ERZ bedingte Verlustleistung aufgetragen. Diese ergibt sich aus der Differenz der beiden Abkühlkurven, multipliziert mit dem Verlustkoeffizient des Rohres.



**Abb. 4-1:** Vergleich der längengemittelten Rohrtemperatur mit und ohne ERZ in Abhängigkeit der Stillstandszeit sowie Skizzierung der resultieren ERZ bedingten Verlustleistung.

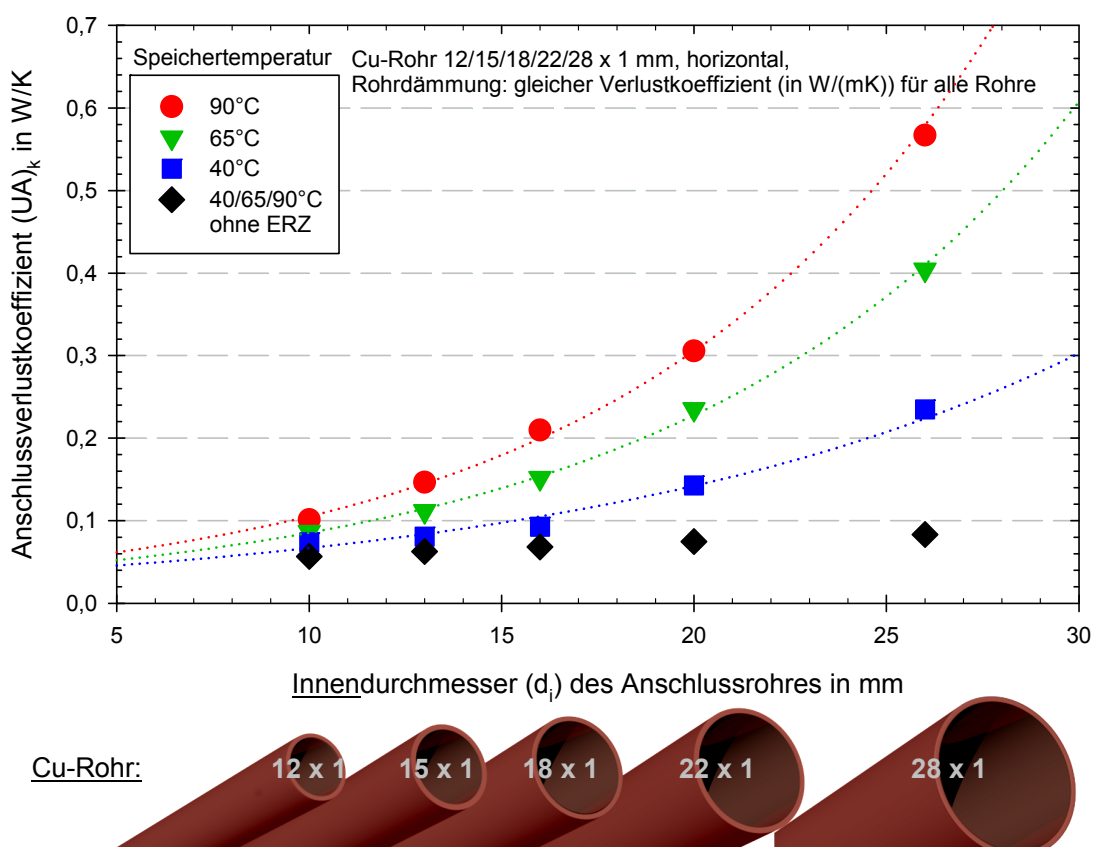
Nach ungefähr 7 Stunden Stillstand wäre die gedämmte Rohrleitung ohne ERZ vollständig auf die Umgebungstemperatur abgekühlt. Das Temperaturniveau der ERZ behafteten Rohrleitung liegt jedoch auch nach 7 Stunden noch deutlich über der Umgebung und zeigt auch keine weitere Tendenz zur Abkühlung. Die Verluste über die Oberfläche der Rohrleitung und die durch die ERZ vom Speicher abgezogene Wärme befinden sich zu diesem Zeitpunkt bereits im Gleichgewicht (stationärer Zustand). Es wird ersichtlich, dass bereits bei Stillstandszeiten von mehr als ein bis zwei Stunden von signifikant höheren Wärmeverlusten durch ERZ ausgegangen werden kann.

Bereits ab Stillstandszeiten von mehr als einer Stunde kann von deutlich erhöhten Wärmeverlusten durch ERZ in der Anschlussleitung ausgegangen werden.



#### 4.1.2. Speichertemperatur und Rohrquerschnitt

Des Weiteren hängt die Höhe der Verluste erheblich von der Speichertemperatur und dem Querschnitt der angeschlossenen Rohrleitung ab. In Abbildung 4-2 sind die resultierenden Wärmeverlustkoeffizienten je Anschluss für Speichertemperaturen von 40 °C, 65 °C, 90 °C und für 5 verschiedene Rohrdurchmesser aufgetragen. Die Wandstärke aller verwendeten Rohre beträgt 1 mm und der längenspezifische Verlustkoeffizient der Rohre ist konstant 0,194 W/(mK). Weiterhin sind als Vergleichswert Verlustkoeffizienten dargestellt, die sich ohne ERZ ergeben würden.



**Abb. 4-2:** Auswirkung der Speichertemperatur und des Querschnitts der angeschlossenen Rohrleitung auf den jeweiligen Anschlussverlustkoeffizienten.

Es ist offensichtlich, dass sich die Verluste mit zunehmender Speichertemperatur und größerem Rohrquerschnitt deutlich erhöhen. Ursache dafür ist der Anstieg der Dichtedifferenz zwischen dem heißem Wasser im Speicher und dem abkühlenden Wasser in der Rohrleitung. Es sei hervorgehoben, dass die Dichtedifferenz die eigentlich treibende Kraft der ERZ ist. Weiterhin stehen bei einer Vergrößerung des lichten Innendurchmessers auch der warmen Vor- (oberen Hälfte des Querschnittes) und der abkühlenden Rücklaufströmung (unter Hälfte des Querschnittes) größere Strömungs-

querschnitte zur Verfügung. Dadurch werden zum einen die anteiligen Reibungsverluste an der Rohrwand und an der entgegen fließenden Strömung verringert und zum anderen der Anteil des Wärmetransportes in der Rohrwand von der Oberseite zur Unterseite des Rohres. Diese sogenannte „tangentielle Wärmeleitung“ im Rohrmantel kann die Schichtung im Rohr verschlechtern und somit die Antriebskraft und dadurch die Reichweite der ERZ verringern. Mehr zu dieser Thematik ist im Abschnitt 4.1.3 enthalten.

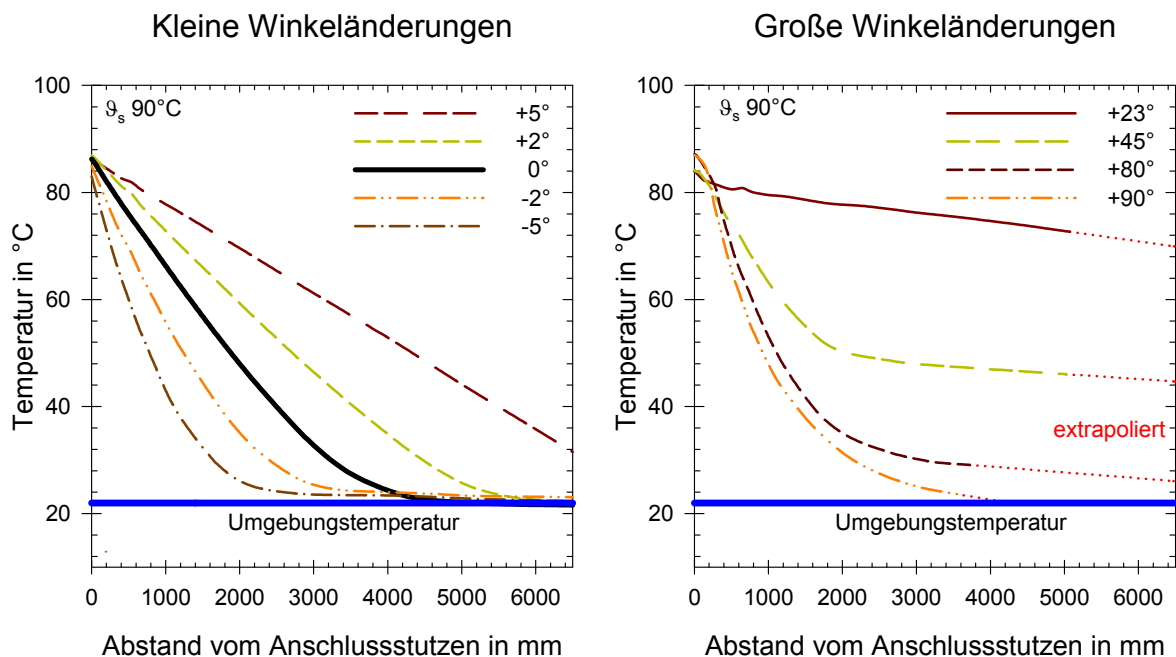
Die ERZ bedingten Wärmeverluste steigen mit zunehmender Speichertemperatur. Weiterhin erhöhen sich die Verluste mit größer werdendem Rohrquerschnitt aufgrund des größeren zur Verfügung stehenden Strömungsquerschnittes erheblich. Sie sind etwa 70 % höher, wenn statt eines Kupferrohrs 22 x 1 eines mit 28 x 1 eingesetzt wird.

#### **4.1.3. Rohrausrichtung und -Material**

Im Folgenden wird zuerst die Winkelabhängigkeit exemplarisch an einem 22 x 1 mm Kupferrohr diskutiert und anschließend ein Vergleich zu einem 22 x 1 mm CrNi-Stahlrohr durchgeführt. Es wird gezeigt, dass die Rohrneigung und das Rohrmaterial einen erheblichen Einfluss auf die ERZ haben.

#### **Auswirkung der Rohrneigung auf die Einrohrzirkulation**

In Abbildung 4-3 werden auf der linken Seite Temperaturverläufe bei 90 °C Speichertemperatur (stationärer Zustand) für eine geringe Neigungswinkelveränderung des Prüflings und auf der rechten Seite große Änderungen gegenüber der Horizontalen gezeigt. Aufgetragen wird hierbei die mittlere Rohrtemperatur als Funktion des Abstands vom Speicheranschlussstutzen.

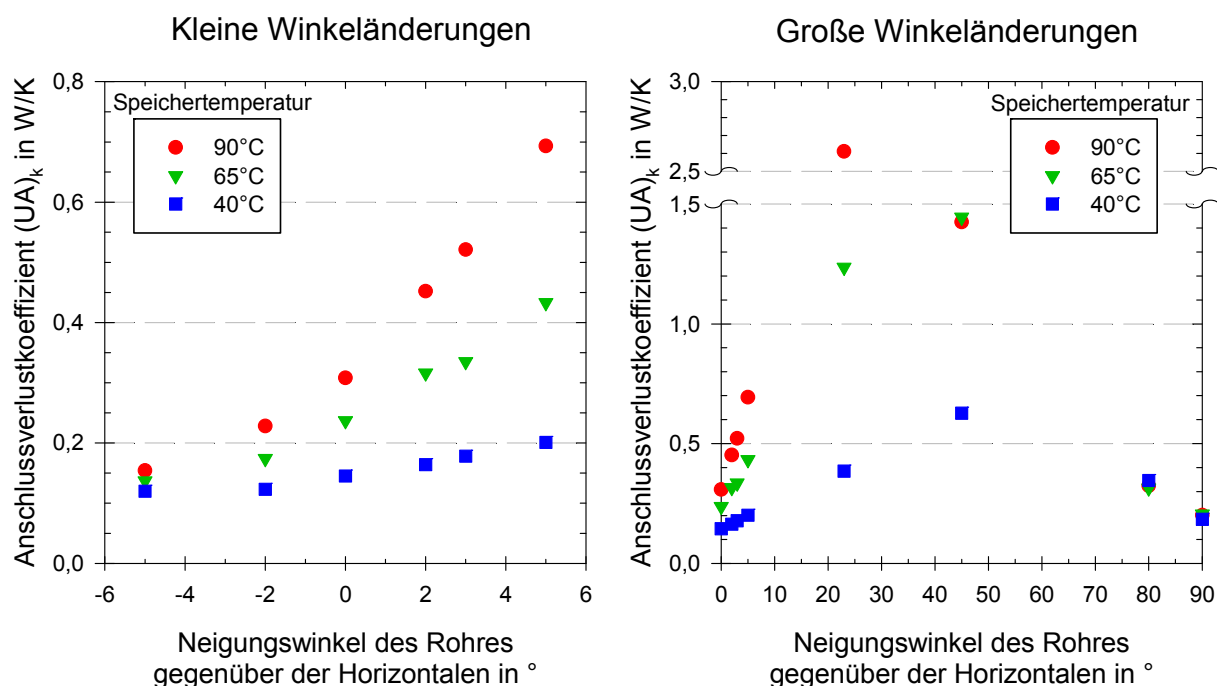


**Abb. 4-3:** Stationäre Temperaturverläufe (nach 13 h) verschiedener Neigungswinkeländerungen (NW) des Prüflings (Cu-Rohr 22 x 1 mm, 100 % Rohrdämmung) gegenüber der Horizontalen (NW Positiv: Das Rohr ist vom Speicher ausgehend nach oben geneigt. NW Negativ: Neigung nach unten)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Reichweite der ERZ bereits bei kleinen positiven Winkeländerungen signifikant zunimmt, wohingegen negative Winkel zu einer Verringerung führen. Es kann jedoch nicht festgestellt werden, dass die Ausbreitung der ERZ und somit auch die dadurch hervorgerufenen Wärmeverluste kontinuierlich mit einer Erhöhung des Neigungswinkels bis hin zur senkrechten Ausrichtung steigen. Bis zu einem Winkel von +23° (aufwärts gerichtet) ist eine Verstärkung der ERZ, mit einem auffällig linearen Temperaturverlauf festzustellen. Dies deutet darauf hin, dass die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr über den gesamten betrachteten Bereich auf einem fast gleichbleibend hohen Niveau ist. Für eine Neigung von 45° ist hingegen eine Kombination aus einem gekrümmten (bis ca. 2 m) und linearen Verlauf (ab ca. 2 m) zu erkennen. Es wird daher vermutet, dass sich im vorderen Teil des Rohres nicht die für die ERZ charakteristische zweiphasige Gegenströmung ausbildet, sondern eine starke Durchmischung der gegenläufigen Strömungen auftritt, wie es auch bei einer senkrechten Anschlussleitung zu beobachten ist (siehe Andersen, 2007 /2/). Nach einem gewissen Temperaturabfall vermindert sich der Grad der Durchmischung, bis schließlich die für eine waagrechte Ausrichtung typische getrennte gegenläufige Strö-

mung auftritt. Die Charakteristik des Temperaturverlaufs bei einem Winkel von  $80^\circ$  Neigung ähnelt der der rein senkrechten Ausrichtung mit einer erhöhten Ausbreitung der ERZ, die sogar über der des horizontalen Anschlusses ( $0^\circ$ ) liegt.

Die aus den Neigungswinkelvariationen resultierenden Anschlussverlustkoeffizienten für die Speichertemperaturen von  $90^\circ\text{C}$ ,  $65^\circ\text{C}$  und  $40^\circ\text{C}$  können der Abbildung 4-4 entnommen werden. Die Verlustkoeffizienten für Neigungswinkel größer  $5^\circ$  basieren dabei auf extrapolierten Temperaturverläufen, da die Ausbreitungen für diese Anordnungen zum Teil deutlich größer als die realisierbare Prüflingslänge sind.



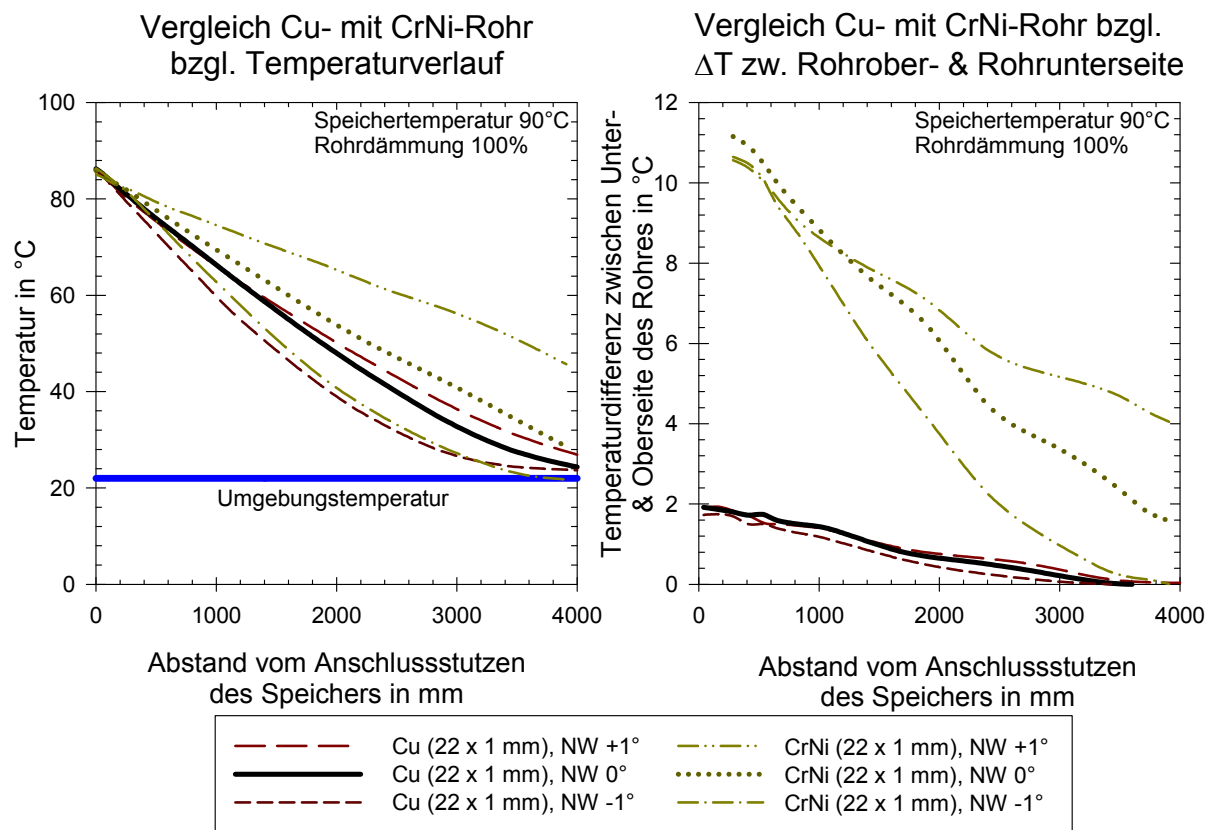
**Abb. 4-4:** Gemessene Anschlussverlustkoeffizienten für geringe (links) und große (rechts) Neigungswinkel NW des Prüflings (Cu-Rohr 22 x 1 mm, 100 % Dämmung) gegenüber der Horizontalen

Von  $-5^\circ$  bis  $+23^\circ$  Neigung steigen die Verlustkoeffizienten und von  $+45^\circ$  bis  $+90^\circ$  (senkrechte Ausrichtung) sinken die Koeffizienten. Das Maximum der ERZ liegt für das betrachtete Kupferrohr bei  $90^\circ\text{C}$  Speichertemperatur mit hoher Wahrscheinlichkeit in einem Winkelbereich zwischen  $+23^\circ$  und  $+45^\circ$  Neigung.

Bereits geringe Neigungswinkelveränderungen der Anschlussleitung haben einen erheblichen Einfluss auf die Reichweite der ERZ und somit auf die dadurch hervorgerufenen Wärmeverluste. Daher wird empfohlen, dass für den Fall, in dem Siphons nicht verwendet werden können, die Leitungen eher mit geringer Abwärtsneigung zu installieren sind.

### Auswirkung des Rohrmaterials auf die Einrohrzirkulation

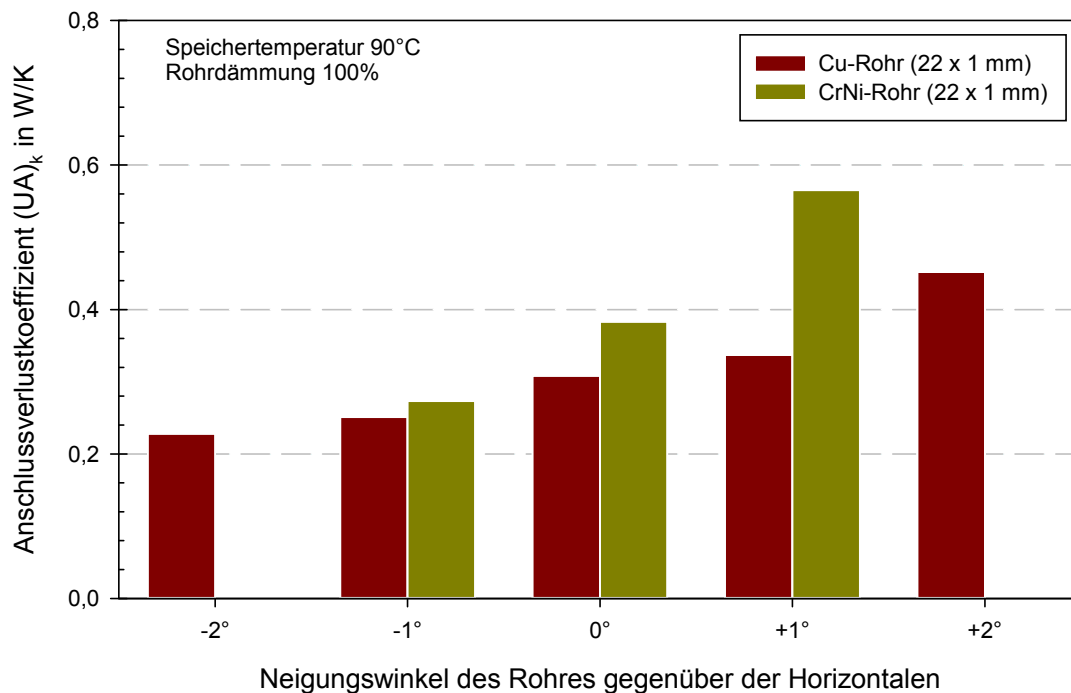
Der Abbildung 4-5 können auf der linken Seite Temperaturverläufe für ein Kupferrohr (Cu) im Vergleich zu einem Edelstahlrohr (CrNi) für die Neigungswinkel  $-1^\circ$ ,  $0^\circ$  und  $+1^\circ$  entnommen werden. Auf der rechten Seite werden die Temperaturdifferenzen zwischen der Rohr- Ober- und Unterseite der genannten Anordnungen dargestellt.



**Abb. 4-5:** Links: Temperaturverläufe für ein Cu-Rohr im Vergleich zu einem CrNi-Rohr für die Neigungswinkel  $-1^\circ$ ,  $0^\circ$  und  $+1^\circ$ ; rechts: dazugehörige Temperaturdifferenzen zwischen der Ober- und Unterseite des jeweiligen Prüflingsrohrs

Die Intensität der ERZ im waagrechten Aufbau ist bei einem CrNi-Rohr stärker ausgeprägt als im Cu-Rohr, wie im linken Diagramm ersichtlich. Weiterhin zeigt die Auslenkung um nur  $+1^\circ$  oder  $-1^\circ$  aus der Horizontalen beim CrNi-Rohr eine erheblich größere Auswirkung auf die Reichweite der ERZ. Ursächlich dafür ist die geringere Wärmeleitfähigkeit von CrNi gegenüber Cu, was eine kleinere tangentielle Wärmeleitung im Rohrmantel von der Ober- zur Unterseite zur Folge hat und somit die Ausbildung der gegenläufigen rohrinternen Strömung durch bessere Schichtung begünstigt. Ein Vergleich der gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen Ober- und Unterseiten des CrNi- und des Cu-Rohrs (siehe Abbildung 4-5 rechts) bekräftigt diese

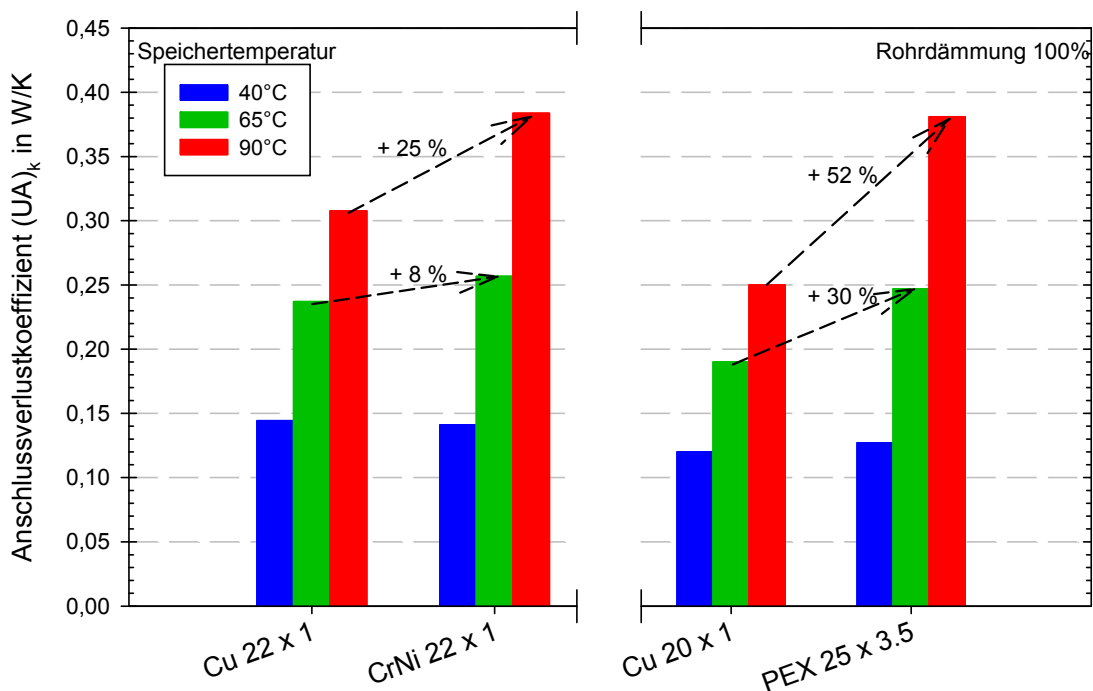
Vermutung. Der Temperaturunterschied zwischen der Rohroberseite und dessen Unterseite beträgt beim CrNi-Rohr ein Mehrfaches von dem des Cu-Rohres. Zudem zeigt sich das bei positiver Vergrößerung des Neigungswinkels auch die höhere Temperaturdifferenz auf einem längeren Rohrstück erhalten bleibt. In Abbildung 4-6 sind die Anschlussverlustkoeffizienten der bereits diskutierten Rohrausrichtungen und der Materialvariation (Cu, CrNi) dargestellt.



**Abb. 4-6:** Anschlussverlustkoeffizienten eines Cu- und eines CrNi-Rohres bei kleiner Änderung des Neigungswinkels gegenüber der Waagrechten

Es ist, wie bereits anhand der Temperaturverläufe zuvor erörtert, eine stärkere ERZ Ausprägung und Winkelabhängigkeit beim CrNi-Rohr gegebenüber dem Cu-Rohr festzustellen.

Durch den Vergleich der Anschlussverlustkoeffizienten eines Kupferrohres und eines PEX-Kunststoffrohres (siehe Abbildung 4-7) mit gleichem Strömungsquerschnitt wird die Materialabhängigkeit bzw. der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials noch deutlicher.



**Abb. 4-7:** Vergleich der Anschlussverlustkoeffizienten eines Cu- und CrNi-Rohres sowie eines Cu- und PEX-Rohres (Graph für Cu 20 x 1 aus Interpolation nach Abbildung 4-2)

Es zeigt sich, dass der resultierende Verlustkoeffizient gegenüber einem Kupferrohr noch einmal deutlich ansteigt, obwohl für den Vergleich Cu/PEX Leitungen mit einem etwas geringeren Strömungsquerschnitt verwendet worden sind. Die Aussage, dass Rohrmaterialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit die Ausbildung der ERZ begünstigen wird auch durch Strömungssimulationen bestätigt (siehe Anhang E).

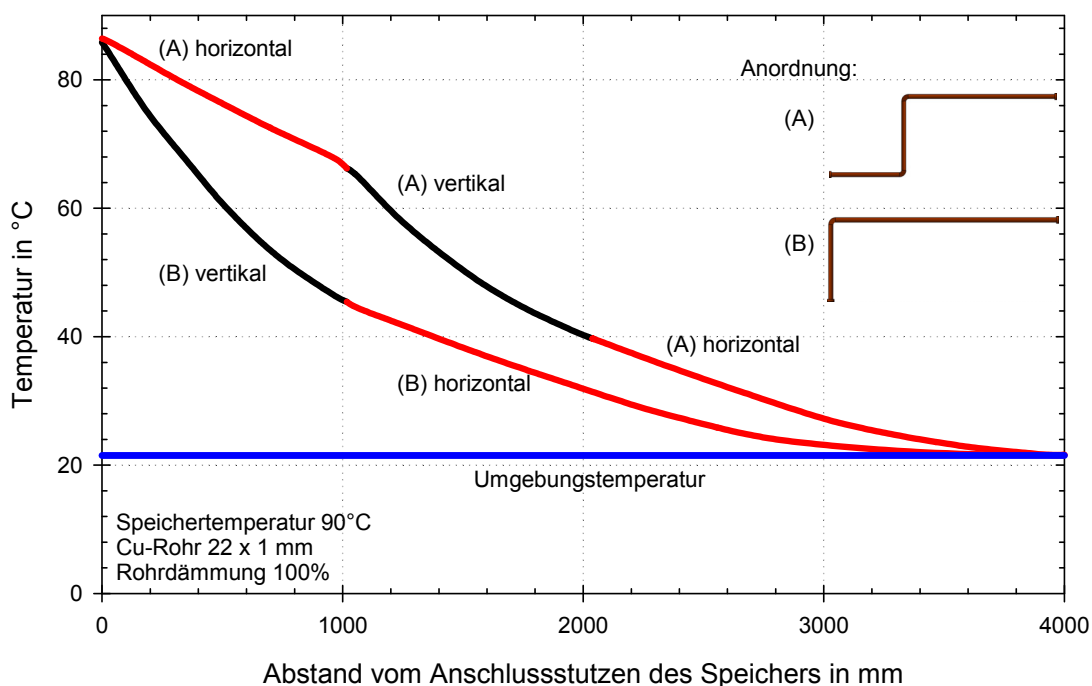
Die ERZ-Verluste steigen, wenn Rohrmaterialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit verwendet werden. Ursache dafür ist eine bessere Ausprägung der gegenläufigen Strömungen innerhalb der Rohrleitung.

#### 4.2. Kombination von waag- und senkrecht ausgerichteten Rohrleitungen

Da alle zuvor beschriebenen Einflussgrößen auf Messungen an ausschließlich geraden Strömungswegen bzw. Rohren beruhen, wird in diesem Kapitel das Verhalten der ERZ in kombinierten Rohrleitungsanordnungen, bestehend aus waag- und senkrechten Rohrabschnitten erörtert. Für die Übertragbarkeit in die Installationspraxis ist diese Betrachtung von großer Relevanz, da reale Wärmenetze häufig aus mehrfach abgewinkelten Rohrleitungsteilstrecken bestehen. Um die Ausbreitung der ERZ auf Basis von Untersuchungen an rein waag- und senkrechten Prüfröhren auf praxisnahe

Kombinationen zu übertragen, wird ein eigens dafür neu entwickeltes Verfahren verwendet. Dieses Verfahren basiert auf der Erkenntnis, dass die Charakteristik der Temperaturverläufe unabhängig von der Speichertemperatur ist. Daraus folgt, dass die Temperatur am Ende eines Rohrstücks als die Starttemperatur des folgenden Rohrstücks verwendet werden kann. So können Rohrleitungsstücke zu einem komplexen Verlauf zusammengesetzt werden. Dieses Verfahren ist experimentell überprüft worden, der Fehler des damit bestimmten Anschlussverlustkoeffizienten gegenüber der Messung beträgt unter 10 % (siehe Tagungsbeitrag OTTI /6/).

In Abbildung 4-8 sind Temperaturverläufe für zwei Kombinationen mit je 4 m Gesamtlänge dargestellt, die beide zum gleichen Endpunkt führen. Die Anordnung A ist an einem seitlichen Anschlussstutzen des Speichers angebracht. Sie besteht aus drei Rohrstücken (Ausrichtungen: 1 m waagrecht, 1 m senkrecht, 2 m waagrecht). Die Anordnung B ist am oberen Abgang am Speicherdeckel angeschlossen und wird 1 m senkrecht und ca. 3 m waagrecht geführt.



**Abb. 4-8:** Temperaturverlauf in Rohrleitungen, bestehend aus waagrechten und senkrechten Teilstücken

Die mittlere Rohrtemperatur, die Reichweite der ERZ und somit auch die dadurch hervorgerufenen Wärmeverluste sind in der Anordnung mit einem waagrechten Speicherabgang größer als bei der Anordnung mit einem senkrechten Abgang. Weiterhin ist deutlich zu erkennen, dass der charakteristische Temperaturverlauf von rein waag-



rechter und rein senkrechter Rohrausrichtung auch bei einer Kombination dieser Stücke erhalten bleibt. Daher sind beliebige Rohranordnungen auf Basis von Messungen an rein waag- und senkrechten Rohren prognostizier- und kombinierbar.

Der charakteristische Temperaturverlauf von rein waag- und senkrechter Rohrausrichtung bleibt auch bei Kombination dieser Stücke zu einer komplexeren Rohrleitung erhalten. Damit werden beliebige Rohranordnungen berechenbar.

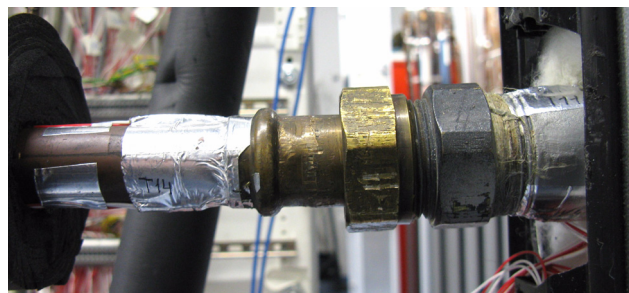
Anordnungen mit einem waagrechten Speicherabgang erzeugen bei Speichertemperaturen  $\geq 60$  °C eine höhere ERZ Reichweite und dadurch stärkere Wärmeverluste als Anordnungen mit senkrechtem Abgang.

### 4.3. Anschlussvarianten Wärmeübertrager und Dämmängel

Die im Abschnitt 4.1 dargestellten Einflüsse auf die ERZ basieren auf Messungen an direkten Speicheranschlüssen mit lückenlos ausgeführter Wärmedämmung und einem Dämmstandard von 100 % nach EnEV. Direkt angeschlossen heißt, dass sich das Wasser in der Rohrleitung direkt mit dem Wasser im Speicher austauschen kann, also keine Medientrennung erfolgt. Zahlreiche Arbeitskreise einer Heizungsanlage sind jedoch nur indirekt mit Wasser des Speichers verbunden, so dass zu klären ist, ob durch einen Wärmeübertrager ein positiver oder negativer Einfluss auf die ERZ festgestellt werden kann. Weiterhin wird die Auswirkung einer unsachgemäßen Ausführung der Wärmedämmung im Anschlussbereich erörtert.

#### 4.3.1. Dämmängel im Anschlussbereich

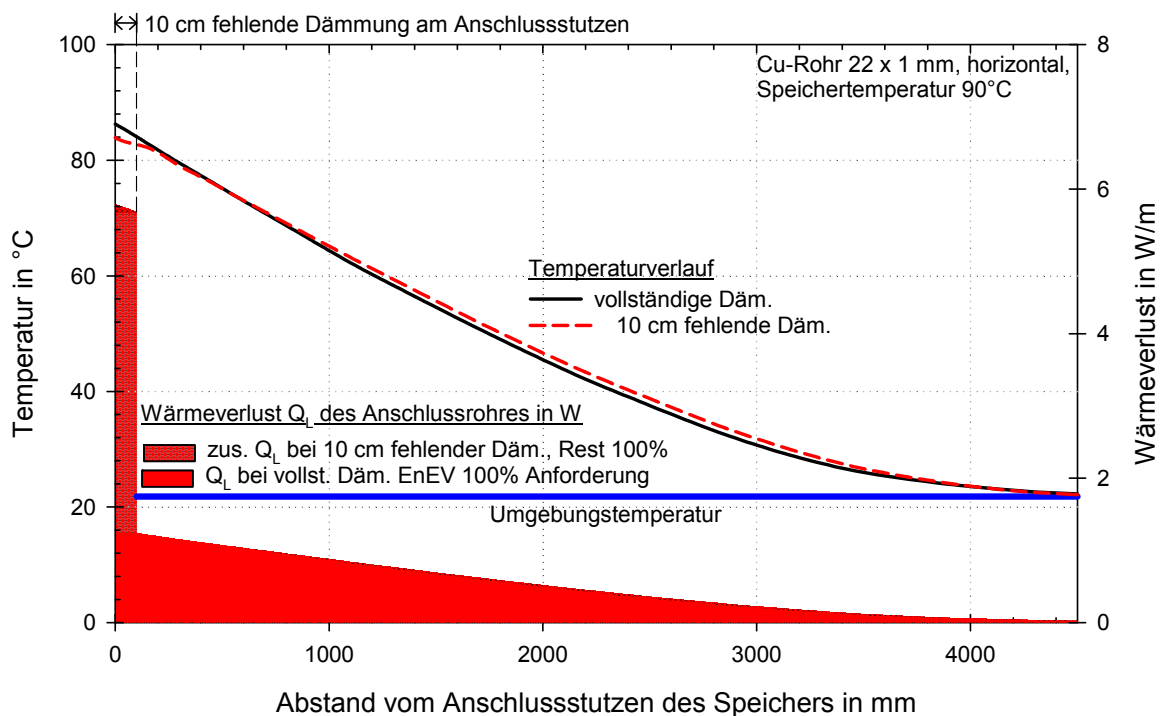
Zur Untersuchung der Anschlusssituation mit unvollständig ausgeführter Dämmung werden die ersten 10 cm nach dem Anschlussstutzen nicht gedämmt (siehe Abbildung 4-9).



**Abb. 4-9:** Mangelhaft ausgeführte Dämmung des Anschlusses

Der resultierende Temperaturverlauf sowie der sich daraus ergebene Wärme-

verlust entlang der Rohrleitung sind in der Abbildung 4-10 dargestellt. Des Weiteren sind zum Vergleich der Temperaturverlauf und der Wärmeverluststrom eines Rohres mit lückenlos ausgeführter Dämmung abgebildet.



**Abb. 4-10:** Temperaturverlauf und Wärmeverlust entlang einer Rohrleitung mit lückenlos ausgeführter Dämmung im Vergleich zu einer mit 10 cm fehlender Rohrdämmung am Anschlussstutzen

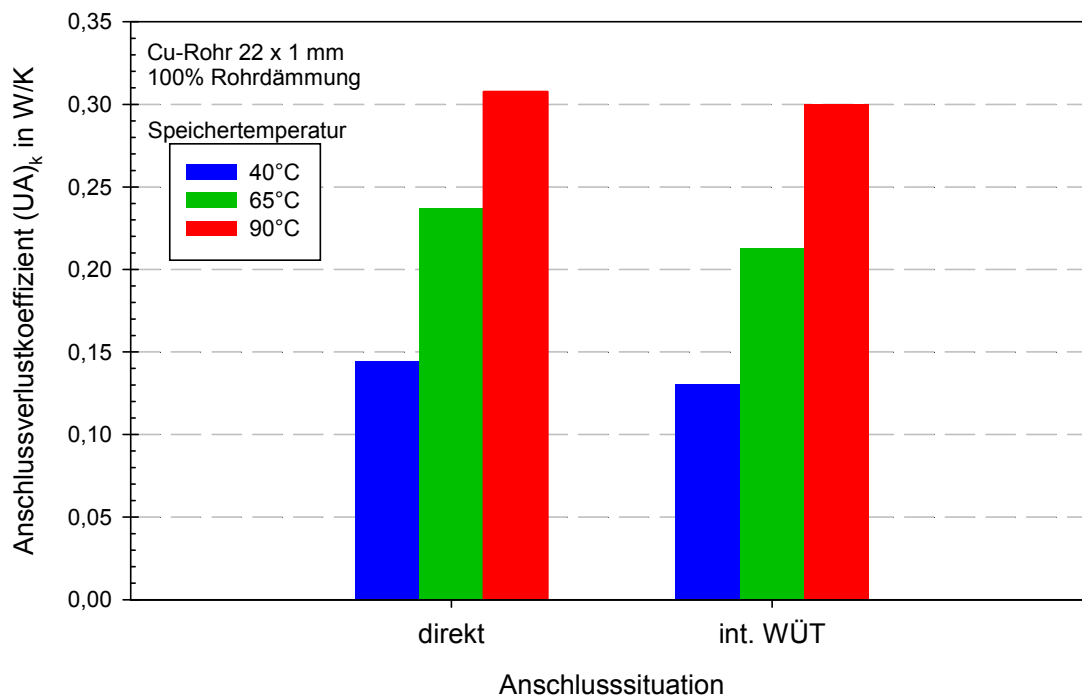
Aufgrund der fehlenden Dämmung im Anschlussbereich erhöht sich lokal der Wärmeverluststrom zur Umgebung deutlich (rote Fläche mit Schraffierung) und somit auch der resultierende Anschlussverlustkoeffizient  $((UA)_k$  ca. +20 % für das dargestellte Beispiel). Die Reichweite der ERZ wird hierdurch jedoch nicht verringert.

Der geringe Unterschied der Temperaturverläufe am Beginn der Rohrleitung ist durch einen systematischen Unterschied bei der Temperaturmessung dieses Rohrabchnittes zu begründen, eine merkliche Verringerung der Fluidtemperatur findet hier nicht statt.

Weitere Untersuchungen mit 150 cm fehlender Dämmung oder einer lückenlosen Dämmung mit nur einem Dämmstandard von 50 % (siehe Anhang G, Abbildung G-1) zeigen vergleichbare Resultate. Eine Verringerung der Dämmung beeinflusst die Reichweite der ERZ kaum, aber erhöht die Wärmeverluste erheblich.

### 4.3.2. Interner Wärmeübertrager

Zur Bewertung des ERZ Verhaltens in Anschlussleitungen von internen Wärmeübertragern (int. WÜT) werden beispielhaft Messungen am Vor- und Rücklaufanschluss des Trinkwasserwärmeübertragers vom Prüfstandsspeicher (siehe Anhang F) durchgeführt.



**Abb. 4-11:** Anschlussverlustkoeffizienten für direkten Rohranschluss mit fachgerecht ausgeführter Dämmung im Vergleich zum Anschluss an interne Wärmeübertrager

Durch Betrachtung der Anschlussverlustkoeffizienten wird klar, dass im Speicher liegende Bauteile die durch ERZ hervorgerufenen Wärmeverluste nicht beeinflussen. Es ist zwar kein Austausch vom Wasser der Rohrleitung und dem Speicher mehr möglich, aber der thermische Kontakt zwischen den beiden Kreisen ist dennoch deutlich zu groß, als dass daraus eine mindernde Wirkung auf die ERZ resultieren könnte. Es ist daher auch nicht anzunehmen, dass andere im Speicherraum befindliche Maßnahmen die ERZ negativ beeinflussen könnten.

### 4.3.3. Externer Wärmeübertrager

Eine beispielhafte Beurteilung der ERZ-Verluste bei Verwendung eines externen Wärmeübertrager (ext. WÜT, im Bsp. Plattenwärmeübertrager) erfolgt durch Betrachtung einer Übergabestation für Solarwärme, die nach Abbildung 4-12 mit dem Speicher verbunden ist. Die Leitungslänge des Vorlaufs zum Speicher beträgt 0,93 m (VlzumSp) und die des Rücklaufes vom Speicher 1,96 m (RlvomSp). Im Kollektorkreis befindet sich oberhalb der Station eine Kühlrippe, die mögliche Wärmeverluste in diesem Kreis während des Pumpenstillstands im Speicher- und Solarkreis nachbildet. Mögliche umlaufende Zirkulationen im Kollektorkreis werden durch Absperrung mit einem Kugelhahn unterbunden (nicht abgebildet), so dass im Solarkreis lediglich ERZ auftreten kann.

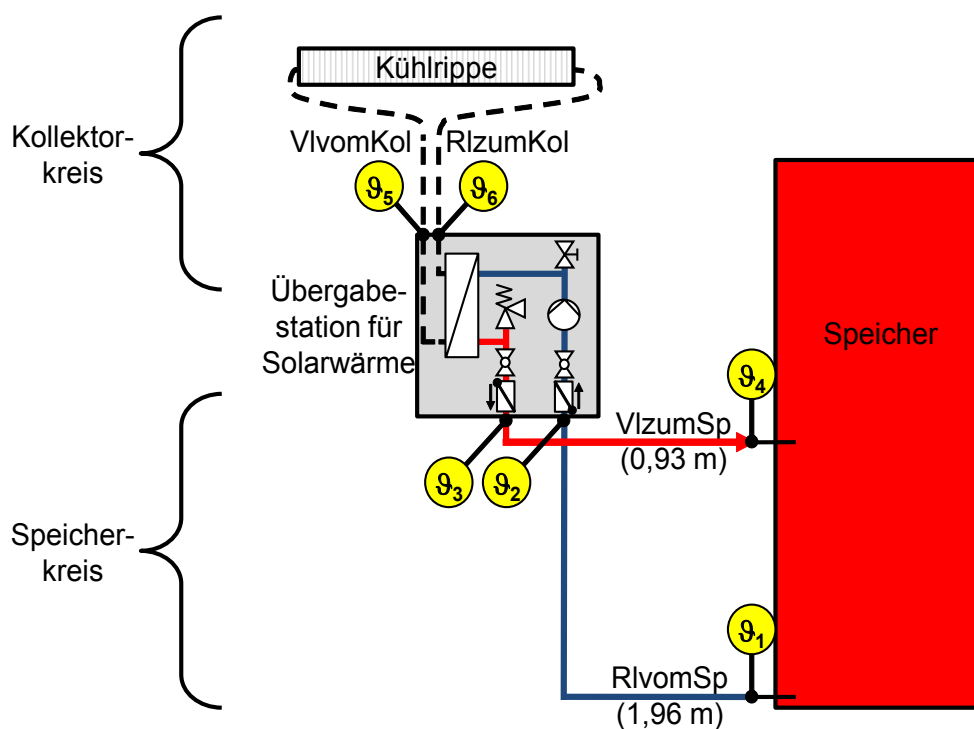
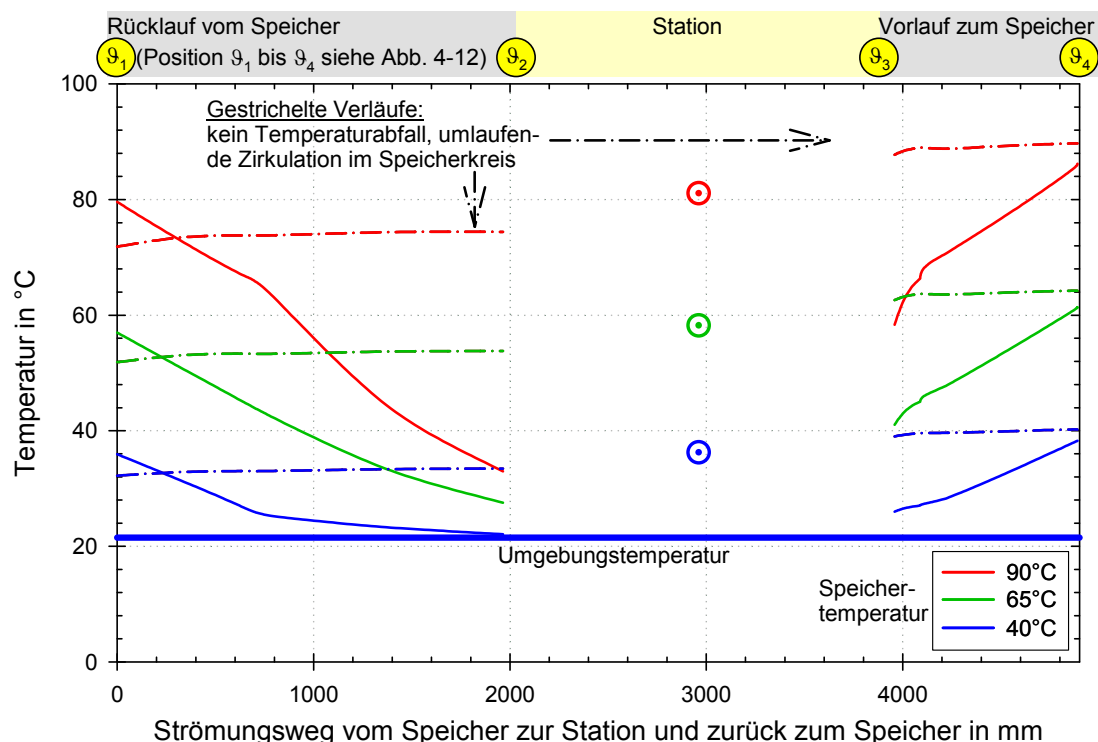


Abb. 4-12: Hydraulikschema der Verbindung zwischen Speicher und externem WÜT

Die Bewertung bei Verwendung eines externen WÜT wird auf Basis von zwei möglichen Zuständen des Speicherkreises durchgeführt. Beim Zustand 1 sind die Schwerkraftbremsen des Speicherkreises intakt, so dass nur ERZ und keine umlaufende Zirkulation im Speicherkreis auftreten kann. Beim Zustand 2 sind die Schwerkraftbremsen defekt und es tritt somit eine umlaufende Vor- Rücklaufzirkulation im Speicherkreis auf. Die Betrachtung des zweiten Zustands wird als erforderlich empfunden, da Schwerkraftbremsen grundsätzlich defektanfällig sind.

In der Abbildung 4-13 sind die resultierenden Temperaturverläufe für den Strömungsweg vom Speicher zur Übergabestation und wieder zurück dargestellt.



**Abb. 4-13:** Temperaturverlauf im Strömungsweg vom Speicher, zur Übergabestation und zum Speicher zurück für drei Speichertemperaturen durchgezogene Linien: Schwerkraftbremse intakt (nur ERZ)  
gestrichelte Linien: Schwerkraftbremsen defekt (umlaufende Zirkulation)

Die durchgezogenen Temperaturverläufe entsprechen dabei dem Zustand 1, also intakten Schwerkraftbremsen. Es wird ersichtlich, dass sich die Rohrleitungen am Eintrittspunkt in die Station noch nicht auf die Umgebungstemperatur abgekühlt haben. Die resultierenden Verläufe bei umlaufender Zirkulation im Speicherkreis (Zustand 2) sind in Form von gestrichelten Linien ausgeführt. Für diesen Fall kann auch eine mittlere Temperatur des Wärmetauschers der Station abgeleitet werden, die im Diagramm durch kreisförmige Symbole gekennzeichnet ist. Es kommt folglich beim Zustand 1 und 2 zu einer Anhebung der Stationstemperatur im Pumpenstillstand und somit auch zu einer ungewollten Wärmeübertragung vom Speicher an die Station.

Um die Wirkung dieser Temperaturerhöhung auf den Kollektorkreis zu zeigen, sind in Tabelle 4-1 die zugehörigen Anschlusstemperaturen des Vor- und Rücklaufes vom Solarkreis der Station dargestellt.

Tab. 4-1: Anschluss Temperatur des Vor- und Rücklaufes vom Solarkreis der Station

$\vartheta_{Sp}$ in °C	nur ERZ im Speicherkreis			umlaufende Zirkulation im Sp.-Kr.		
	40	65	90	40	65	90
$\vartheta_5$ in °C	23	26	29	27	36	46
$\vartheta_6$ in °C	22	24	26	25	30	36

Es zeigt sich, dass es auch zu einer Übertragung vom Wärme auf die Kollektorkreis-seite der Station kommt. Insbesondere mit umlaufender Zirkulation im Speicherkreis ist eine erhebliche Temperaturerhöhung an den Anschlüssen des Kollektorkreis festzustellen. Die Ausbildung einer umlaufenden Vor- Rücklaufzirkulation im Kollektorkreis wird durch den Versuchsaufbau ausgeschlossen.

Die resultierenden Anschlussverlustkoeffizienten sind in Abbildung 4-14 dargestellt. Weiterhin sind zum Vergleich Verlustkoeffizienten eingetragen, die sich bei einem rein waagrechten Anschluss von 2 Rohrleitungen (2 x direkt) ergeben würden. Die schraffierten Bereiche beinhalten die Wärmeverluste der Station<sup>1</sup> und basieren auf Wärmebilanzen am gesamten Speicher. Aufgrund der Bilanz am Speicher ist der  $(UA)_k$  mit einer erhöhten Unsicherheit behaftet.

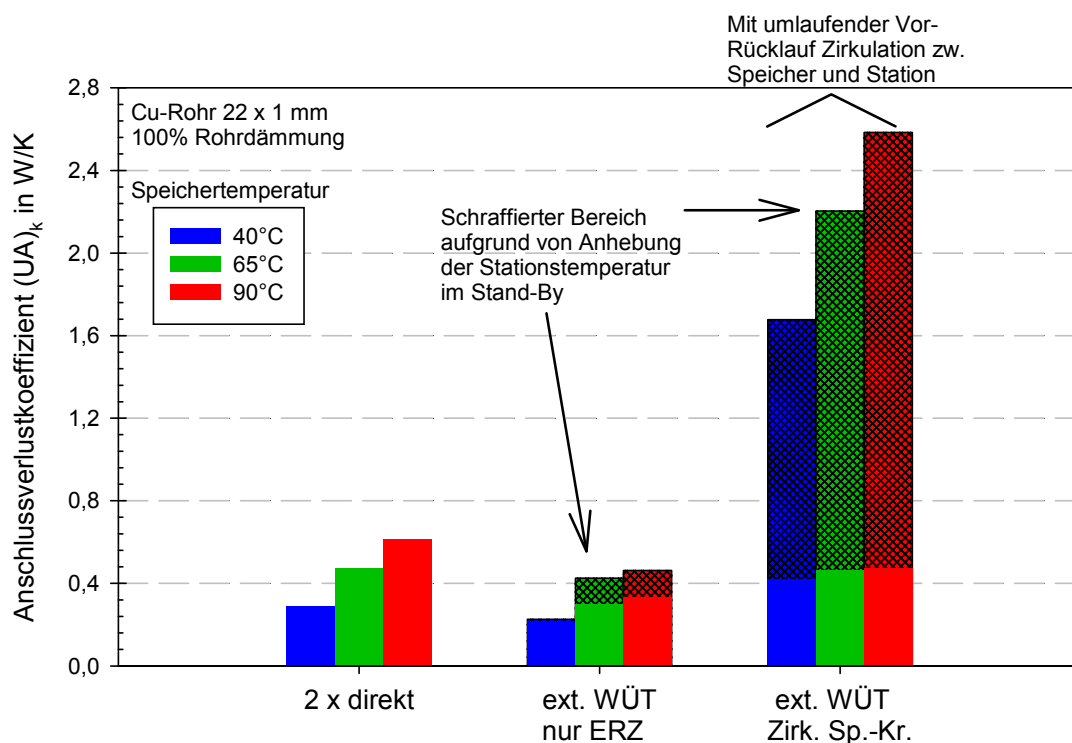


Abb. 4-14: Anschlussverlustkoeffizienten für direkten Rohranschluss im Vergleich zur Verbindung mit externem Wärmeübertrager bei intakten (nur ERZ) und bei defekten Schwerkraftbremsen (Zirk. Sp.-Kr.)

1. Der Verlustwärmestrom der Station inklusive Rohrleitung ergibt sich aus der Differenz des gesamten Testaufbaus (siehe Abbildung 4-12) und dem reinen Speicherverlust.

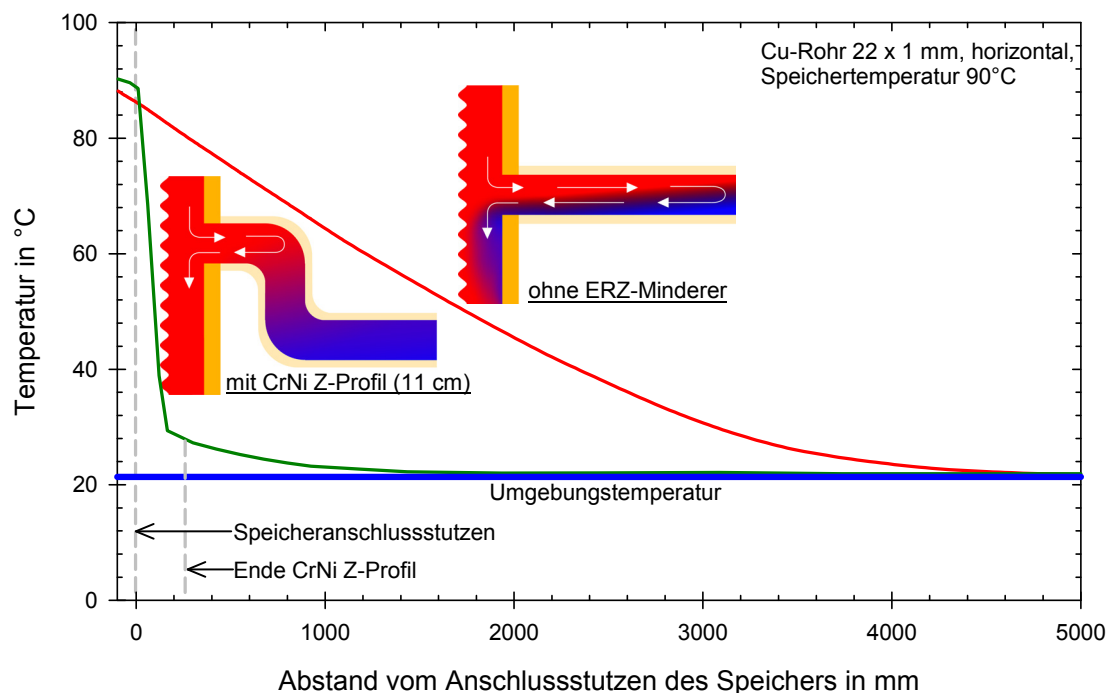
Bei ausschließlicher Betrachtung der Wärmeverluste der Rohrleitung (nicht schraffierter Bereich) scheinen die Anschlussverluste bei der Verbindung mit einem externen Wärmeübertrager etwas geringer auszufallen. Dieser Unterschied ist jedoch nur auf die kürzere Rohrleitung und dem abgewinkelten Verlauf bis zur bzw. von der Station zurückzuführen. Es wird weiterhin deutlich, dass die Anhebung der Stationstemperatur mit einer beträchtlichen Erhöhung der Anschlussverluste einhergeht - das gilt insbesondere dann, wenn umlaufende Zirkulation im Speicherkreis auftritt. Je nach hydraulischer Anbindung und Größe des Kollektorfeldes werden jedoch um ein vielfaches größere Wärmeverluste entstehen, wenn im Solarkreis ebenfalls eine umlaufende Zirkulation entsteht.

Diese Problematik gilt jedoch nicht ausschließlich für die Verbindung eines Speichers mit Wärmeübergabestationen, sondern für alle mit dem Speicher verbundenen Fluidkreise. Über den Nachheizkreis kann zum Beispiel eine deutliche Wärmeübertragung vom Speicher auf den Heizkessel entstehen. Ebenfalls hohe Verluste können durch die Verbindung mit Wärmeverteilern entstehen.

- \* Fehlende Dämmung im Bereich des Anschlussstutzens verringert die Reichweite der ERZ nicht, sondern führt lediglich zu einer Erhöhung der Wärmeverluste.
- \* Die Wärmeverluste durch ERZ verringern sich nicht, wenn die Rohrleitung an einem internen Wärmeübertrager angeschlossen ist. Gleiches ist folglich für nach oben abknickende Rohrenden im Speicherinneren zu erwarten.
- \* Externe Wärmeübertrager, Heizkessel, Wärmeverteiler und andere hydraulisch mit dem Speicher verbundene Komponenten können durch ERZ eine deutliche Temperaturerhöhung im Stillstand erfahren. Die somit entstehenden Verluste liegen deutlich über den Wärmeverlusten (Abhängig von der Wärmedämmung der jeweiligen Komponente zur Umgebung), die bei ausschließlicher Betrachtung der ERZ in gut gedämmten Rohrleitungen entstehen.

#### 4.4. Minderungsmaßnahmen

Eine deutliche Minderung der Verluste kann mit einfachen Maßnahmen, wie zum Beispiel Siphons oder gleichwertige Z-förmige Profile (siehe Abbildung 4-15) und schräg am Speicher angeschweißte Stutzen, erreicht werden.



**Abb. 4-15:** Temperaturverlauf entlang einer Rohrleitung ohne und mit CrNi Z-Profil (abwärts führende Länge 11 cm) für eine Speichertemperatur von 90 °C<sup>1</sup>

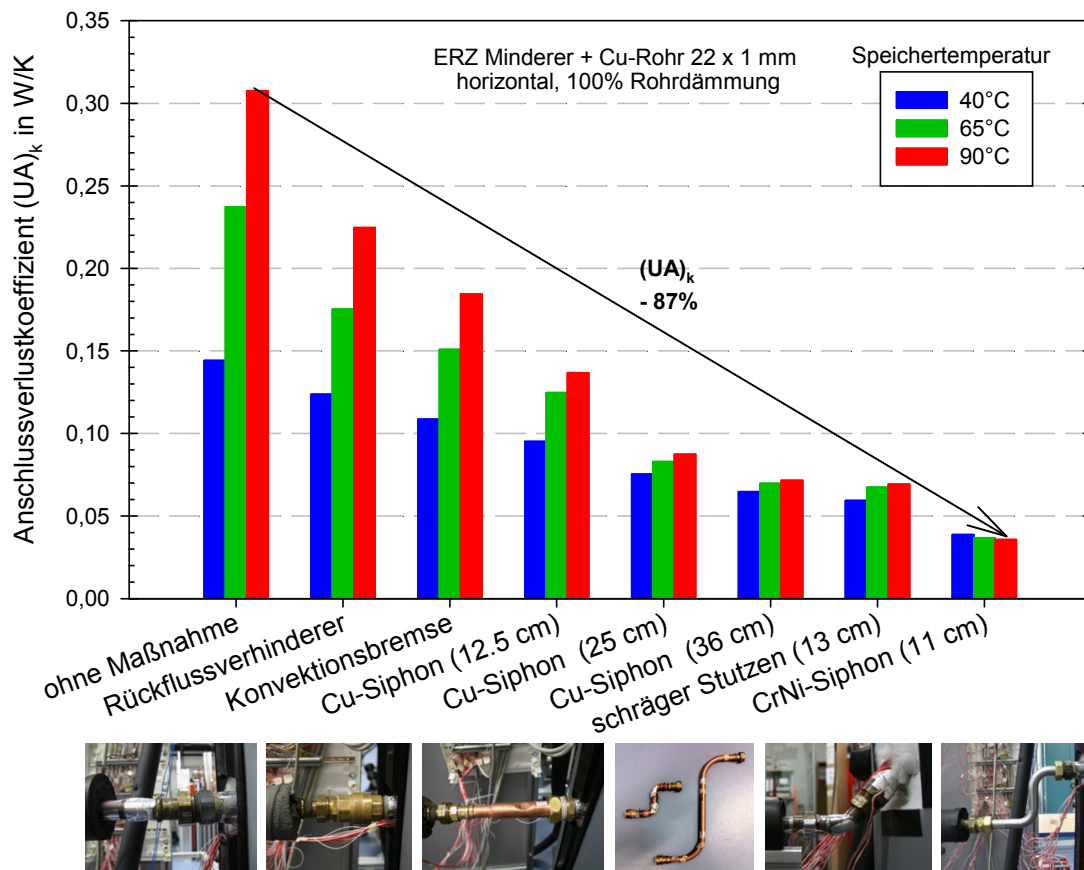
Aufgrund des abwärts führenden bzw. vertikalen Rohrabschnitts des CrNi Z-Profils, der auch als Schenkellänge bezeichnet wird, wird die Rückströmung von kaltem Wasser in den Speicher unterbunden. Es kommt folglich nur noch zu einer geringfügigen Ausbreitung der ERZ bis in den abwärts führenden Bogen des Z-Profils. Dass es sich bei dem Beispiel um ein gut ausgelegtes Z-Profil handelt ist daran erkennbar, dass die Temperatur am unteren Ende des Profils nur unwesentlich über der Umgebungstemperatur liegt.

Die Abbildung 4-16 zeigt, dass neben Siphons oder Z-förmigen Profilen auch schräg am Speicher angeschweißte Stutzen die ERZ sehr wirkungsvoll mindern. Hierbei ist wichtig, dass insbesondere die vertikalen Abschnitte der Rohrstücke aus schlecht wärmeleitendem Material gefertigt werden sollten, um die erforderliche abwärts führende Länge so kurz wie möglich zu halten. So kann ein Edelstahl- Siphon (CrNi-

1. siehe Anhang G, Abbildung G-2 für 40 °C und 65 °C



Stahl) bei besserer Wirksamkeit wesentlich kürzer ausgeführt werden als ein Kupfersiphon. Durch eine kürzere Schenkellänge werden zum einen die Wärmeverluste im Betrieb minimiert und zum anderen der erforderliche Raum zur Montage am Speicher verringert.



**Abb. 4-16:** Anschlussverlustkoeffizienten verschiedener ERZ Minderungsmaßnahmen im Vergleich (Schenkellänge in Klammern)

Rückflussverhinderer sind zur Minderung ERZ-bedingter Verluste ungeeignet, da Sie aufgrund ihrer beweglichen Komponenten stör anfällig sind und auch im voll funktionsfähigen Zustand keine ausreichende Wirksamkeit zeigen. Ursache dafür ist die häufig massive metallische Konstruktion, über die der Wärmestrom an der geschlossenen Klappe vorbei in die Rohrleitung fließt und dort zu einer sekundären ERZ führt, selbst wenn der Rückflussverhinderer dichtend schließt. Falls er nicht abdichtet, wirkt er nahezu gar nicht.

Eine etwas höhere Wirksamkeit als der Rückflussverhinderer zeigt die Konvektionsbremse (ein Kunststoff-Einschubteil), die zudem ohne bewegliche Komponenten auskommt. Die Wirksamkeit liegt jedoch deutlich unterhalb der eines gut ausgelegten Siphons. Weiterhin entsteht aufgrund der Strömungsumlenkung innerhalb des

Einschubteils ein etwas erhöhter Druckverlust.

Die wirtschaftliche Bedeutung der Minderung von Wärmeverlusten durch ERZ ist hoch. Typische Speicherverluste mit Rohrdimensionen wie im Einfamilienhaus üblich können mit ERZ um etwa 50% höher ausfallen als bei deren effektiver Verminderung. ERZ kann auch an anderen beheizten Elementen wie z. B. Heizkesseln, Verteilerbalken und externen Wärmeübertragern auftreten. Unter ungünstigen Bedingungen ist sie der Auslöser für eine ebenfalls ungewollte dichtegetriebene umlaufende Zirkulation, deren Verluste um 1 bis 2 Größenordnungen höher liegen.

Die Relevanz von Minderungsmaßnahmen steigt bei Anschlussrohren:

- \* An heißen Speicherbereichen
- \* Mit häufiger und langer Stand-By Zeit
- \* Mit „ungünstigen“ Rohrführungen & Materialien
- \* Mit größerem Rohrquerschnitt

Für die Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen gilt:

- |   |                  |
|---|------------------|
| * CrNi-Stahl- (Wellrohr) Siphon<br>(Z-Profile sind gleichwertig zu Siphons) | ↑ sehr gut       |
| * schräger Anschlussstutzen <sup>1)</sup>                                   |                  |
| * Kupfersiphon  | → gut            |
| * Konvektionsbremse   |                  |
| * Rückflussverhinderer  | ↓ unbefriedigend |

1) Hinsichtlich des schrägen Anschlussstutzens ist sicher zu stellen, dass sich durch die schwierigere Montage der Dämmung keine größere Wärmebrücke in der Speicherdämmung ausbildet.

## 5. Jährliche Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation

Um die jährlichen Verluste durch ERZ und somit auch die dadurch entstehenden Energiekosten zu prognostizieren, sind Jahressimulationen, die nicht nur die Wärmeverluste im stationären Zustand, sondern auch das dynamische Verhalten berücksichtigen, erforderlich. Es muss beispielsweise beachtet werden, wie häufig und über welchen Zeitraum die jeweiligen Anschlussleitungen nicht genutzt werden und wie hoch dabei die Wassertemperatur im angrenzenden Speicherbereich ist.

Zu diesem Zweck wird ein in TRNSYS implementiertes Modell verwendet, das die ERZ bedingten Wärmeverluste in Abhängigkeit der Stillstandszeit und der Speichertemperatur berechnet und dem Speicher als zusätzlichen Wärmeverlust beaufschlagt. Die Grundlage des am ISFH erstellten und validierten Modells bilden die in großem Umfang durchgeführten Messungen, deren Ergebnisse im Abschnitt 4 dieses Berichtes enthalten sind. Für die Modellierung der Anschlussverluste wird dabei von Rohrleitungen ausgegangen, die waagrecht geführt und lückenlos mit einem Dämmstandard von 100 % nach EnEV gedämmt sind. Zudem wird das Auftreten von ungewollter umlaufender Vor- und Rücklauf- Thermosiphonströmung in den Fluidkreisen ausgeschlossen, so dass real auftretende Anschlussverluste noch einmal deutlich über den hier simulierten liegen können.

Für die Prognose der jährlichen ERZ bedingten Wärmeverluste werden exemplarisch Systemsimulationen einer thermischen Solaranlage zur Trinkwassererwärmung und einer kombinierten Anlage zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung durchgeführt.

### 5.1. Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung

Die Basis des Simulationsmodells bildet die nach DIN EN 12977-2 erstellte Simulationsanordnung zur Vorausbestimmung des Langzeitverhaltens großer und kleiner kundenspezifisch gefertigter thermischer Solaranlagen. Seine wesentlichen Komponenten sowie deren Kopplung ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Ausführlichere Informationen können der Norm /10/ entnommen werden. Zentral im System befindet sich ein bivalenter Trinkwarmwasserspeicher mit 2 internen Wärmeübertragern. Dieser wird über eine thermische Solaranlage im unteren Bereich und eine Nachheizung im oberen Speicherbereich beheizt.

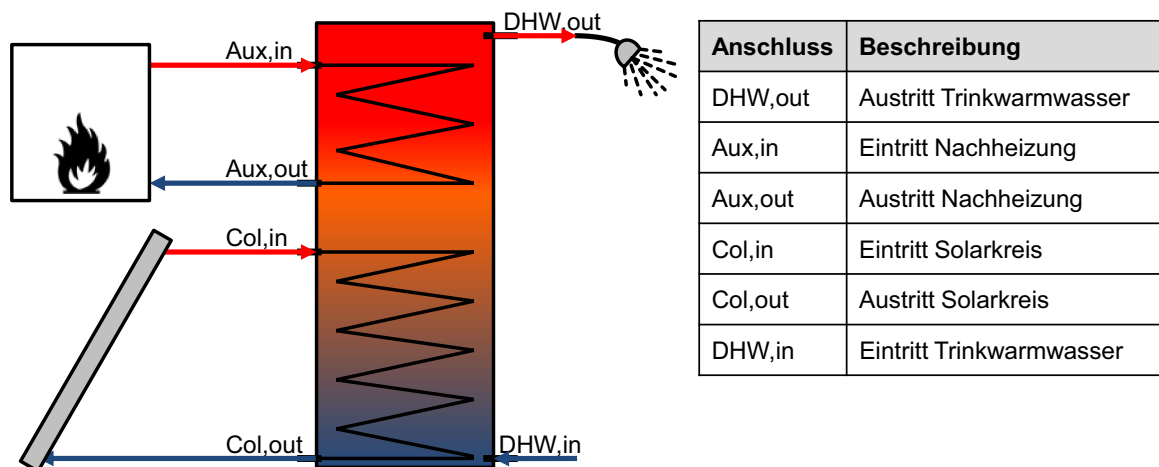


Abb. 5-1: Systemschema für das Simulationsmodell nach DIN EN 12977-2

Die zentralen Kenngrößen des Systems sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Die Wetterdaten entsprechen dem Standort Würzburg. Das TWW-Zapfprofil nach DIN EN 12977-2 sieht nur eine einzige Zapfung am Tag von 200 l bei einem Zapfmassestrom von 500 l/h vor. Da erwartet wird, dass die durch ERZ verursachten Wärmeverluste stark von der Dauer der Stillstandszeit eines Anschlusses abhängen, wird das System zusätzlich mit dem deutlich dynamischeren Zapfprofil des IEA SHC TASK 44 /16/ betrieben. Die energetische Gleichwertigkeit wird durch leichte Modifikation (Reduktion des täglichen TWW-Verbrauchs) des Zapfprofils der EN 12977-2 erreicht.

Tab. 5-1: Zusammenfassung wesentlicher Parameter der abgebildeten Anlage zur Untersuchung des ERZ-Einflusses im Simulationsdeck

Wetter	Würzburg (Meteonorm)
Solaranlage	7,1 m <sup>2</sup> Flachkollektor, Ausrichtung 45° Süd
Speicher Volumen Wärmeverluste nach EN 12977-3 Nachheiztemperatur Speicherschutztemperatur	Bivalenter TWW-Speicher mit 2 int. WÜT 370 l 2,85 W/K 65 °C 95 °C
Trinkwarmwasser-Zapfprofile EN 12977-2	200 l/d bei 45 °C, eine Zapfung pro Tag mit 500 l/h, hier modifiziert auf 355 l/h, Energiebedarf 2980 kWh/a, modifiziert auf 2116 kWh/a
Task 44	200 l/d bei 45 °C, 23 Zapfungen pro Tag, mehrere unterschiedliche Volumenströme, Energiebedarf 2133 kWh/a

Das Modell bestimmt die Auskühlverluste und die ERZ-Verluste simultan. Die Auskühlverluste entstehen aufgrund der aufgeladenen Wärmekapazität des angeschlossenen Rohres nach einer Durchströmung mit warmem Fluid. Sie könnten insbesondere durch geringere Rohrdurchmesser reduziert werden.

Weitere Detailinformationen zum Simulationsmodell o. Ä., dem Modell zur Nachbildung der ERZ und dessen Einbindung in das Deck können dem OTTI Tagungsbeitrag „Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation in Speicheranschlüssen - Modellerstellung und Systemsimulationen“ /9/ entnommen werden.

### Simulationsergebnisse

Die nachfolgende Tabelle 5-2 gibt einen allgemeinen Überblick über die wesentlichen Kenngrößen der simulierten Systeme und ihrer energetischen Leistung. Es wird dabei nach Zapfprofil und nach Berücksichtigung der ERZ unterschieden, sodass insgesamt vier unterschiedliche Systemvarianten resultieren.

**Tab. 5-2:** Übersicht der vier simulierten Systemvarianten mit zwei unterschiedlichen Zapfprofilen: EN 12977-2 mit sowie Task 44 mit und ohne ERZ für den bivalenten TWW-Speicher

	EN 12977-2 mit ERZ	EN 12977-2 ohne ERZ	Task 44 mit ERZ	Task 44 ohne ERZ
Wärmebedarf WW-Bereitung	2116 kWh		2133 kWh	
Nachheizenergiemenge	1110 kWh	887 kWh	1054 kWh	884 kWh
Energie von Kollektor in Speicher	2127 kWh	2037 kWh	2176 kWh	2098 kWh
Transmissionswärme- verluste des Speichers	782 kWh	808 kWh	825 kWh	849 kWh
Gesamtverluste durch ERZ <sup>1)</sup>	339 kWh	-	272 kWh	-
Takte TWW-Zapfung	1 pro Tag 365 pro Jahr		23 pro Tag 8395 pro Jahr	

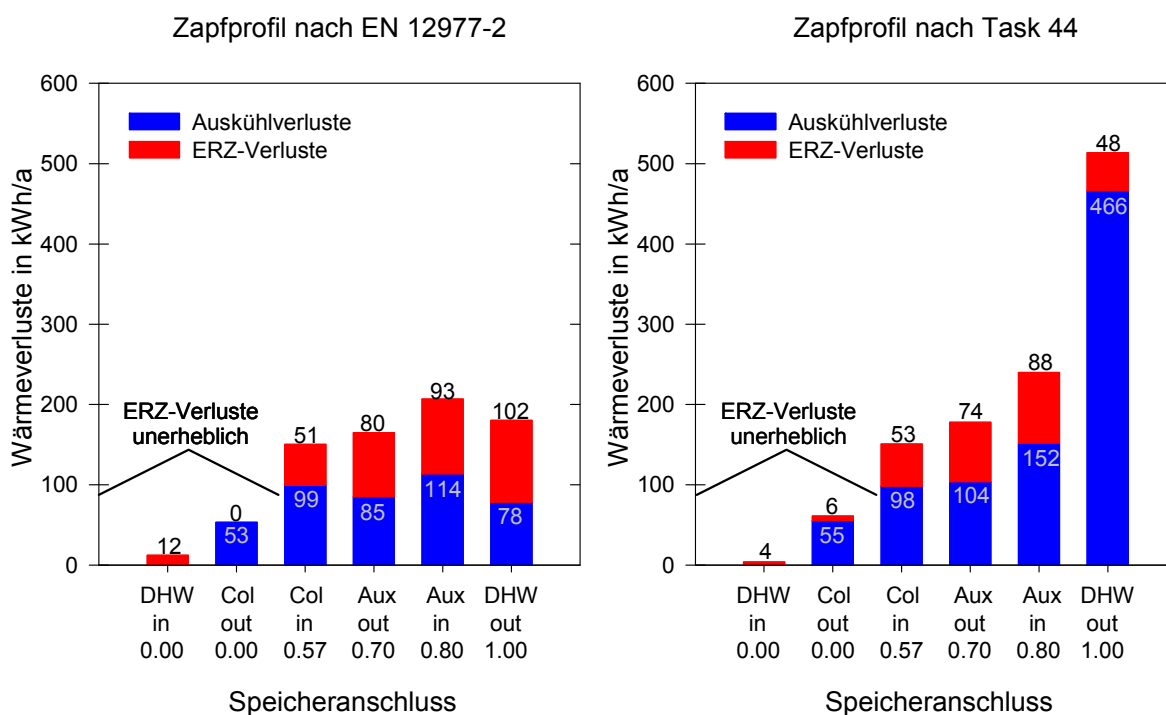
1) zusätzlich zu den Speicherverlusten durch Transmission

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die insgesamt durch ERZ verursachten Wärmeverluste für die hier abgebildete Speicherkonfiguration abhängig vom verwendeten Zapfprofil zwischen 272 kWh/a (Task 44) und 339 kWh/a (EN 12977-2) betragen. Diese zusätzlichen Verluste erhöhen die anfallenden Transmissionsverluste des Speichers signifikant um 30 % bis 40 %. Dabei sind die Verlustsummen hauptsächlich von der Anzahl der Anschlüsse und deren Nutzungsprofil abhängig und kaum vom Speichervolumen an sich. Auch eine bessere Speicherwärmedämmung wird die

ERZ-Verluste kaum beeinflussen, ihr relativer Anteil am Gesamtverlust wird aber zunehmen.

Die ERZ- Verluste müssen zusätzlich durch die Energieerzeuger kompensiert werden. Dies wird vornehmlich von der Nachheizung übernommen, deren gelieferte Nachheizenergiemenge bei Berücksichtigung der ERZ um 20 % (Task 44) bis 25 % (EN 12977-2) ansteigt. In wesentlich geringerem Maße steigert sich der Kollektorsertrag.

Die nachfolgende Abbildung 5-2 zeigt zusammenfassend die jährlichen Wärmeverluste der an den TWW-Speicher angeschlossenen Rohre für die betrachteten Zapfprofile nach EN 12977-2 und Task 44. Die Anschlussbezeichnungen entsprechen dabei denen der Abbildung 5-1, die Zahlen unter diesen Bezeichnungen geben die relative Anschlusshöhe an.



**Abb. 5-2:** Übersicht der jährlichen Wärmeverluste je Anschluss des TWW-Speichers für die Zapfprofile nach EN 12977-2 und Task 44

Folgende Erkenntnisse können aus den Grafiken gezogen werden:

1. Die durch ERZ verursachten Wärmeverluste sind im oberen und mittleren Speicherbereich, insbesondere im Nachheizbereich und knapp darunter, sehr hoch. Dies liegt zum einen an der ganzjährig hohen Speichertemperatur in diesen Bereichen. Zum anderen stehen einige der dort positionierten Anschlüsse z. T. lange still. Ein Beispiel sind die Nachheizungsanschlüsse, die durch die Solaranlage im Sommer nennenswerte Phasen mehrtägigen Stillstands haben.

2. Im unteren Bereich sind die Verluste durch ERZ deutlich geringer und können nahezu vernachlässigt werden. Dies liegt an der oft sehr geringen Speichertemperatur, die im unteren Speicherbereich herrscht. Zeitweise kann es sogar zu Wärmegewinnen aus der Umgebung kommen.
3. Der Einfluss der Stillstandszeit und der Häufigkeit der Taktung ist beim Vergleich der Verluste des TWW- Austritts (DHW,out) für die zwei unterschiedlichen Zapfprofile sehr gut zu erkennen. Die geringe Anzahl an Zapfungen (1x pro Tag) des Profils nach EN 12977-2 führen zu den höchsten ERZ- Verlusten je Anschluss. Verglichen damit sind die Verluste des Zapfprofils nach Task 44 (23 Zapfungen pro Tag) nur knapp halb so groß.
4. Die Verluste durch Rohrauskühlung sind hier umso ausgeprägter. Als Konsequenz wird die Verwendung des stets kleinstmöglichen Rohrquerschnitts dringend empfohlen. Dies mindert zum einen die ERZ- Verluste, wie in Abschnitt 4.1.2 gezeigt und reduziert gleichzeitig die Verluste durch Auskühlung durch ein kleineres stehendes Wasservolumen im Rohr.

## 5.2. Solaranlage zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung

In einem zweiten Simulationsschritt wird das abgebildete System modifiziert und mit einem Kombispeicher anstatt eines bivalenten TWW-Speichers ausgerüstet. So ist es möglich, zusätzlich den Effekt der Speicheranschlüsse für die Raumheizung zu untersuchen. Folgende Tabelle fasst alle Änderungen am System gegenüber den bereits beschriebenen Parametern zusammen. Hier nicht aufgeführte Werte bleiben somit unverändert.

**Tab. 5-3:** Änderungen im Simulationsmodell zur Implementierung eines Solar-Kombispeichers mit Heizungsanschlüssen

Solaranlage	9,4 m <sup>2</sup> Flachkollektor, Ausrichtung 45° Süd
Speicher Volumen Wärmeverluste nach EN 12977-3	Solar-Kombispeicher mit internem TWW-Wärmeübertrager 600 l 3,78 W/K
Heizkreis	9090 kWh/a 128 m <sup>2</sup> Wohnfläche

Abbildung 5-3 zeigt die zusätzlichen Anschlüsse der Raumheizung am Speicher.

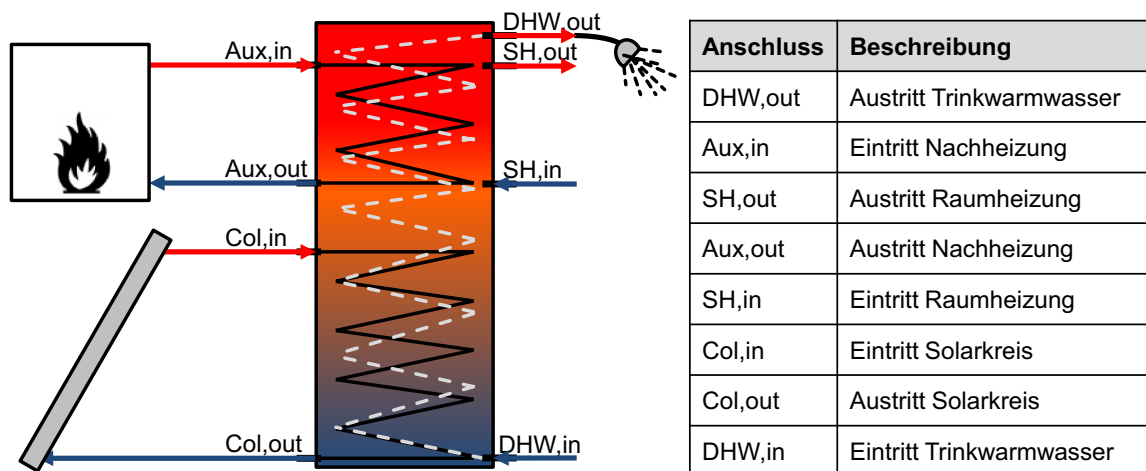


Abb. 5-3: Systemschema des Simulationsmodells mit Solar-Kombispeicher

### Simulationsergebnisse

Tabelle 5-4 zeigt zunächst analog zu Tabelle 5-2 die wichtigsten energetischen Systemgrößen in einer Zusammenfassung.

Tab. 5-4: Übersicht der vier simulierten Systemvarianten mit zwei unterschiedlichen Zapfprofilen: EN 12977-2 mit und ohne ERZ sowie Task 44 mit und ohne ERZ für den abgebildeten Solar-Kombispeicher

	EN 12977-2 mit ERZ	EN 12977-2 ohne ERZ	Task 44 mit ERZ	Task 44 ohne ERZ
Wärmebedarf WW-Bereitung / Raumheizung	2116 kWh / 9090 kWh		2133 kWh / 9090 kWh	
Nachheizenergiemenge	9973 kWh	9731 kWh	9954 kWh	9751 kWh
Energie von Kollektor in Speicher	2621 kWh	2503 kWh	2646 kWh	2544 kWh
Transmissionswärmeverluste des Speichers	991 kWh	1029 kWh	1039 kWh	1072 kWh
Gesamtverluste durch ERZ <sup>1)</sup>	397 kWh	-	338 kWh	-
Takte TWW-Zapfung	1 pro Tag 365 pro Jahr		23 pro Tag 8395 pro Jahr	

1) zusätzlich zu den Speicherverlusten durch Transmission

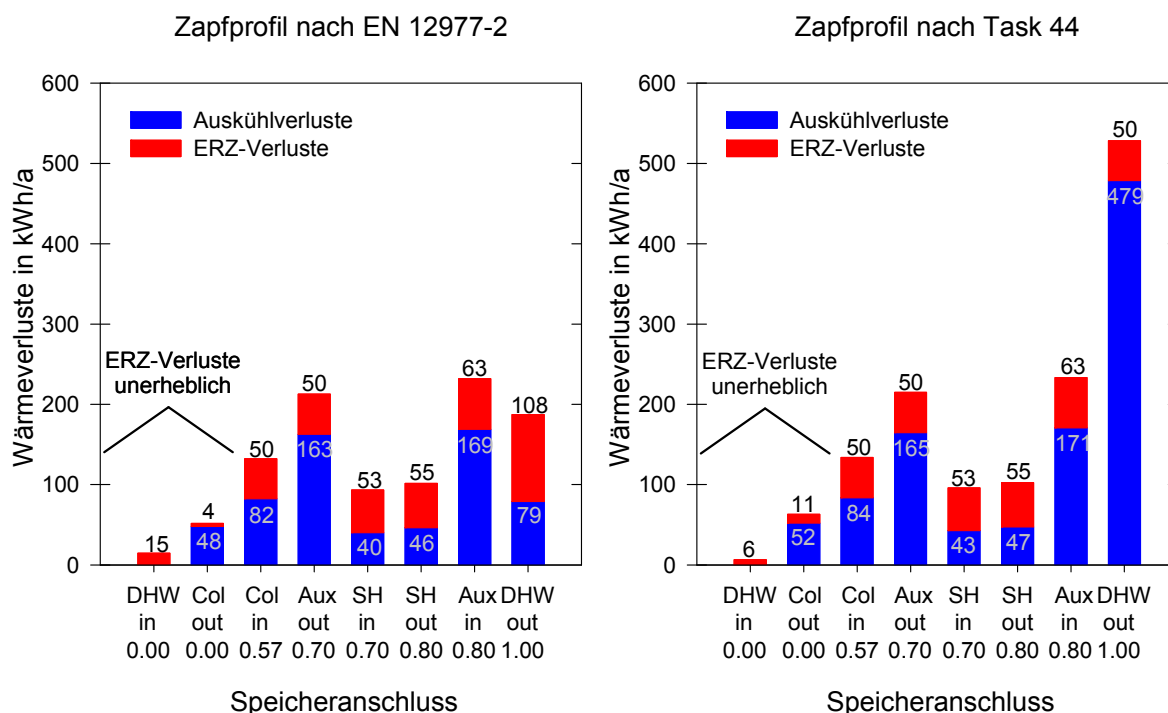
Verglichen mit den Ergebnissen des bivalenten TWW-Speichers aus Tabelle 5-2 zeigt sich, dass die ERZ-Verluste mit zusätzlichem Anschlusspaar für die Raumheizung am Speicher um 58 kWh (EN 12977-2) bzw. 66 kWh (Task 44) zunehmen. Durch den größeren Speicher nehmen dessen Wärmeverluste ebenfalls zu. Somit ist der relative Verlustanteil durch ERZ mit 43 % (EN 12977-2) bzw. 33 % (Task 44) in ähnlicher Höhe



wie beim TWW-Speicher.

Die durch ERZ zusätzlich benötigte Nachheizenergiemenge beträgt 242 kWh/a (EN 12977-2) bzw. 203 kWh/a (Task 44) und ist damit etwa 10 bis 15 % höher als beim TWW-Speicher.

Nachfolgende Abbildung 5-4 gibt einen zusammenfassenden Überblick aller Anschlussverluste des hier abgebildeten Solar-Kombispeichers für die verwendeten Zapfprofile.



**Abb. 5-4:** Übersicht der jährlichen Wärmeverluste je Anschluss des Solar-Kombispeichers für die Zapfprofile nach EN 12977-2 und Task 44

Hieraus lassen sich folgende Beobachtungen ableiten:

1. Die Wärmeverluste durch ERZ sind im unteren und mittleren Speicherbereich – unterhalb des Nachheizbereichs – vergleichbar mit denen des TWW-Speichers.
2. Im Nachheizbereich kommen durch die Anschlüsse der Raumheizung etwa 100 kWh/a an ERZ-Wärmeverlusten hinzu.
3. Gleichzeitig reduzieren sich die durch ERZ verursachten Wärmeverluste der Nachheizanschlüsse um jeweils etwa 30 kWh/a. Dies kann durch die deutlich gestiegene Anzahl der Takte und Laufzeit der Nachheizung erklärt und als Resultat der zusätzlichen Bedienung der Raumheizlast in den Wintermonaten angesehen werden.

4. Insgesamt zeigt sich die Höhe der jährlich durch ERZ verursachten Wärmeverluste nahezu unabhängig vom Volumen des Wärmespeichers. Sie wird lediglich durch Anzahl und Nutzungsprofil der Anschlüsse bestimmt.

Die abgeleiteten Charakteristika der verschiedenen Anschlusshöhen des Speichers können analog zu den Erklärungen der Abbildung 5-2 zugeordnet werden.

Die ERZ bedingten Wärmeverluste liegen bei den simulierten solar unterstützten Anlagen im Bereich von 270 bis 400 kWh pro Jahr, von denen nur ein kleiner Anteil durch Sonnenwärme gedeckt wird.

ERZ-Verluste führen daher zu höherem Nachheizbedarf. Die Simulationen weisen auf höhere Taktraten und Laufzeiten des Wärmeerzeugers hin. Da die Verluste durch ERZ im heißen Nachheizbereich mit seinen langen Stillstandzeiten am stärksten sind, müssen sie auf einem hohen Temperaturniveau nachgeliefert werden. Für Brennwertgeräte bedeutet dies einen Betrieb bei einem ungünstigen Wirkungsgrad. Gleiches gilt sogar in noch stärkerem Maße für den Einsatz einer Wärmepumpe. Primärenergetisch betrachtet können also die durch ERZ verursachten Verluste nochmals höher ausfallen.

## 6. Empfehlungen für die Praxis

Eine wirkungsvolle Minderung von ERZ bedingten Wärmeverlusten ist bereits mit einfachen Maßnahmen, wie sie in Abschnitt 4.4 beschrieben werden, möglich. Die Praxis zeigt jedoch häufig eine mangelnde Beachtung während der Installation, die Unterschätzung der ERZ-bedingten Wärmeverluste während der Anlagenplanung und bei der Komponentenentwicklung (insbesondere Speicher) sowie die Unkenntnis über das Phänomen an sich. Eine Verbesserung der Situation ist folglich nicht allein Aufgabe des Handwerks, der Industrie, der Anlagenplanung oder der Forschung, sondern verlangt Engagement von allen Bereichen.

Aus Sicht der Forschung werden mit dem vorliegenden Bericht detaillierte Informationen zum Phänomen der ERZ gegeben. Eine einfache Illustration der ERZ, die den Kern des Problems in 5 Minuten abhandelt, kann einem zu diesem Zweck erstellten Informationsvideo /8/ entnommen werden. Im Folgenden werden Empfehlungen gegeben, wie sich alle Partner an einer Steigerung der Effizienz von Systemen zur Wärmeversorgung beteiligen können.

### Industrie

Die Produktion der einzelnen Komponenten (Speicher, Heizkessel, etc.) für thermische Systeme bildet die Basis für den Anlagenbau. Folglich ist es zielführend, bereits zu diesem Zeitpunkt mögliche ERZ- Minderungsmaßnahmen direkt am Produkt vorzunehmen oder ERZ- mindernde Einbauteile im Lieferumfang bereit zu stellen.

Schräg nach unten geführte Anschlussstutzen können direkt an den jeweiligen Komponenten realisiert werden und erfordern keinen nachträglichen Installationsaufwand. Es ist sicherzustellen, dass durch den schräg in der Dämmung verlaufenden Stutzen keine zusätzliche Wärmebrücke entsteht.

Die Beigabe von vorgefertigten Siphons oder Stufenprofilen (Z-Profilen) kann jedoch uneingeschränkt empfohlen werden. Die erforderlichen Siphonmaße richten sich nach dem Rohrmaterial, Rohrquerschnitt und den Betriebstemperaturen. In Tabelle 6-1 werden Auslegungsempfehlungen gegeben.

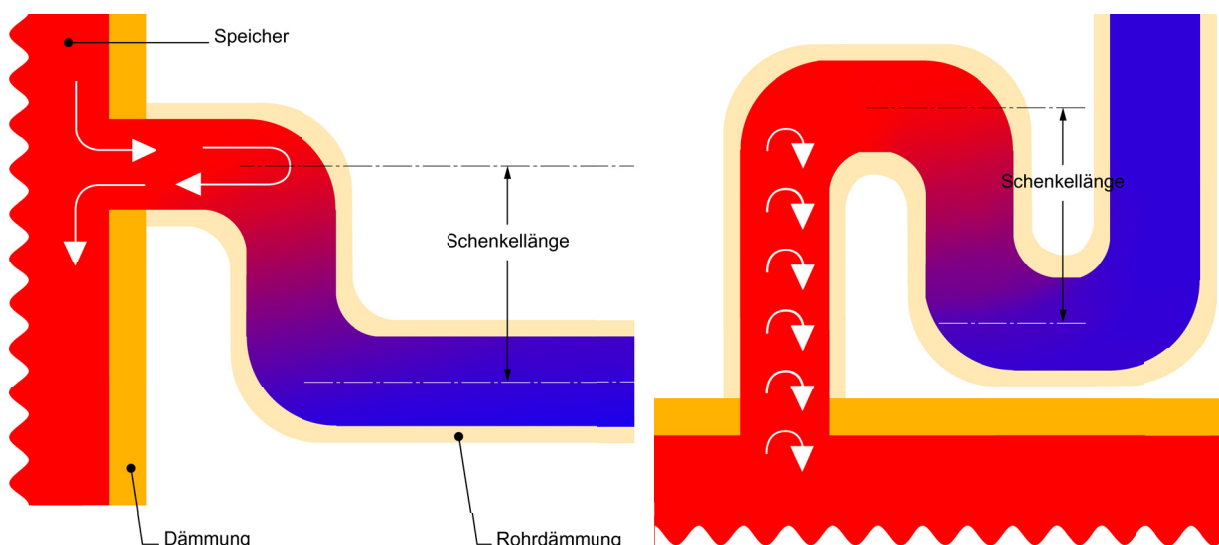
## **Anlagenplaner**

Der Anlagenplaner trägt eine besondere Funktion hinsichtlich der Verwendung von Effizienzmaßnahmen, ganz gleich, ob es sich dabei um kundenspezifische oder vorgefertigte Systeme handelt, denn er legt den Betriebsbereich des Systems und aller darin enthaltenen Komponenten fest. Vom Planer kann folglich am besten eingeschätzt werden, wie häufig und wie lange eine Anschlussleitung steht, welche Temperatur am Anschluss herrscht und welche Materialien verwendet werden. Er sollte in jedem Fall Minderungsmaßnahmen vorsehen, wenn sich an Wärme speichernden (z. B. Warmwasserspeicher) oder anderen permanent beheizten Komponenten (z. B. Vor- und Rücklaufverteiler oder Heizkessel) Anschlussleitungen befinden, die häufig über mehr als eine Stunde nicht betrieben werden. Es ist sicherlich zweckdienlich, wenn die ERZ-Minderungsmaßnahmen auch in den Hydraulik schemata als Einbauteil abgebildet werden.

## **Handwerk**

In erster Linie ist auf eine lückenlose und bis bündig an den Speicher ausgeführte Wärmedämmung zu achten, die mindestens den Vorgaben gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) entspricht. Es resultieren zwangsläufig höhere Wärmeverluste gegenüber den hier gezeigten Verlusten, wenn ein geringerer Dämmstandard angewendet wird. Weiterhin sind ungenutzte Anschlüsse für Rohrleitungen, Temperatursensoren und ähnliches zu überdämmen.

Die Ergreifung von Maßnahmen zur Minderung von ERZ obliegt derzeit häufig allein dem Handwerker, da heute im Normalfall weder ERZ mindernde Bauteile im Lieferumfang noch explizite Handlungsempfehlungen in den Installationsanleitungen von Speichern enthalten sind, wenngleich dies wünschenswert wäre. Überdies sind ERZ bedingte Wärmeverluste kein Problem, welches ausschließlich auf Anschlussleitungen vom Warmwasserspeichern begrenzt ist. Es ist folglich bei der Installation von thermischen Anlagen in der Regel vom Handwerker zu beurteilen, ob die jeweiligen Leitungen mit dauerhaft warmen Systemkomponenten verbunden sind, aber selbst immer wieder längere Stillstandsphasen aufweisen und somit zusätzliche Wärmeverluste verursachen. Hierzu zählen neben Speichern z. B. Kesselinstallationen und Rohrverteiler. Grundsätzlich empfiehlt es sich, einen Anschluss über einen Siphon oder ein gleichwertiges Z-förmiges Stufenprofil vorzunehmen oder nachgewiesenermaßen gleichwertige Einbauteile zu verwenden.



**Abb. 6-1:** Skizzierung der Schenkellänge bei einem Stufen- bzw. Z-Profil für einen horizontalen Speicherabgang (links) und eines Siphons für einen vertikalen Abgang (rechts)

In Abbildung 6-1 ist die vertikale Schenkellänge skizziert, die in der nachfolgende Tabelle 6-1 für Auslegungsempfehlungen von Siphons bzw. Stufen- oder Z-Profilen angegeben wird.

**Tab. 6-1:** Empfehlung zur Auslegung von Siphons oder gleichwertigen Z-Profilen zur Minimierung von Wärmeverlusten durch ERZ in Anschlussrohrleitungen für Speichertemperaturen bis 90 °C.

Rohrabmessung in mm	Kupfer-Siphon Schenkellänge in mm	CrNi-Stahl- Siphon <sup>1)</sup> Schenkellänge in mm
12 x1	130	55
15 x1	170	70
18 x1	210	90
22 x1	260	110
28 x1	340	140

1) Siphone oder Z-Profile aus Kunststoff können in guter Näherung mit gleicher Schenkellänge ausgelegt werden.

Die Tabellenwerte entsprechen für CrNi-Stahl 5,5 und für Kupfer 13 mal dem Rohrinwendendurchmesser. Die Angaben sind aus den Messergebnissen abgeleitet. Wenn die Vorgaben der Tabelle 6-1 eingehalten werden, ergeben sich Anschlussverlustkoeffizienten  $(UA)_k$  von maximal 0,1 W/K im Fall von Kupfer und 0,05 W/K im Fall von CrNi-Stahl.



## Anhang A: Literatur

### Allgemeine Literatur zur Einrohrzirkulation

- /1/ Suter J.-M. (September 2001): *Heat losses from storage tanks: Up to 5 times higher than calculated!*. Industry Newsletter No. 2 from IEA SHC Task 26; Bezug: <http://www.solenergi.dk/task26/downloads.html>, Zugriff: 22.02.2013
- /2/ Andersen E. (2007): *Paper X: Heat losses from pipes connected to hot water storage tanks*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Lyngby
- /3/ Huhn R. (Juli 2007): *Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energieumwandlungsketten*. TUDpress Verlag der Wissenschaften Dresden
- /4/ Solar-Prüf- und Forschungszentrum Rapperswil (2011): *Dateisammlung zum Thema - Wärmeverluste durch Rohrinterne Gegenstromzirkulation*. Rapperswil; Bezug: <http://www.solarenergy.ch/Abgeschlossen.78.0.html>
- /5/ Steinweg J., Ramin T., Rockendorf G. (2012): *Einrohrzirkulation in Speicheranschlussrohren – Wärmeverluste und Maßnahmen*. Beitrag zum 22. Symposium thermische Solarenergie, Bad Staffelstein
- /6/ Kliem F., Steinweg J., Maitanova N., Rockendorf G. (2013): *Einrohrzirkulation in Speicheranschlussrohren – Einflussgrößen und Gegenmaßnahmen*. Beitrag zum 23. Symposium thermische Solarenergie, Bad Staffelstein
- /7/ Steinweg J., Kliem F., Rockendorf G. (2013): *Pipe Internal Recirculation in Storage Connections – Characteristics and Influencing Parameters*. Beitrag zur SHC 2013 International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Freiburg
- /8/ Kliem F., Steinweg J., Rockendorf G. (2013): *Video Submission: Pipe Internal Recirculation in Storage Connections*. Beitrag zur „Video Competition“ von Solarthermalworld.org auf der SHC 2013 in Freiburg  
engl: [http://www.youtube.com/watch?v=zHi5rN1\\_FQQ](http://www.youtube.com/watch?v=zHi5rN1_FQQ) oder  
deu: [http://www.isfh.de/institut\\_solarforschung/einrohrzirkulationsverluste.php](http://www.isfh.de/institut_solarforschung/einrohrzirkulationsverluste.php)
- /9/ Steinweg J., Kliem F., Rockendorf G. (2014): *Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation in Speicheranschlüssen – Modellerstellung und Systemsimulationen*. Beitrag zum 24. Symposium thermische Solarenergie, Bad Staffelstein

### Sonstige Literatur

- /10/ DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 12977-2 (2012): *Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kundenspezifisch gefertigte Anlagen - Teil 2: Prüfverfahren für solar betriebene Warmwasserbereiter und Kombinationssysteme*. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- /11/ DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 12977-3 (2012): *Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kundenspezifisch gefertigte Anlagen - Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin

- /12/ DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 12977-4 (2012): *Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kundenspezifisch gefertigte Anlagen - Teil 4: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung (Kombispeicher)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- /13/ DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 12897-9 (2006): *Wasserversorgung - Bestimmung für mittelbar beheizte, unbelüftete (geschlossene) Speicher-Wassererwärmer*. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- /14/ DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 15332 (2007): *Heizkessel - Energetische Bewertung von Wasserspeichersystemen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- /15/ DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN 60379 (2004): *Verfahren zum Messen der Gebrauchseigenschaften von elektrischen Warmwasserspeichern für den Hausgebrauch (IEC 60379:12987, modifiziert)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- /16/ Haller M.Y., Dott R., Ruschenburg J., et. al. (2012): *The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38, Part A: General Simulation Boundary Conditions*, A technical report of subtask C, Report C1 Part A, International Energy Agency
- /17/ Jeschar R., Alt R., Specht E. (1990): *Grundlagen der Wärmeübertragung - Kap. 3.4, Stationäre Wärmeleitung in Rippen*. Viola-Jeschar-Verlag, Goslar
- /18/ VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (2006): *VDI Wärmeatlas – Wärmeverlust von Wänden und Rohrleitungen (Eb 1)*. Springer-Verlag, Berlin



## Anhang B: Formelzeichen und Abkürzungen

Tab. B-1: Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erläuterung
$A_{\text{Fluid}}$	$\text{m}^2$	Querschnittsfläche des Fluids (freier Kreisquerschnitt des Rohrs)
$A_{\text{RW}}$	$\text{m}^2$	Querschnittsfläche der Rohrwand (Fläche des Kreisrings)
$C_A$	l	tatsächlicher Speicherinhalt
$d_a$	m	Außendurchmesser der Rohrdämmung
$d_i$	m	Innendurchmesser der Rohrdämmung
$E_{24\text{h}}$	kWh	über einen Prüfzeitraum von 24 Stunden verbrauchte Energie
$i$	-	Laufindex
$L$	m	Länge
$Q_L$	W	Wärmeverlust des Anschlussrohrs
$Q_{L,i}$	W	Wärmeverlust des Abschnitts $i$ des Anschlussrohrs
$Q_{L,k}$	W	Wärmeverlust für die Anschlusskonfiguration $k$ (entspricht $Q_L$ , wenn keine zusätzlichen Einbauteile verwendet werden)
$(UA)_k$	W/K	Anschlussverlustkoeffizient für die Konfiguration $k$
$U_{L,R}$	W/(mK)	Wärmeverlustkoeffizient je Meter Rohrleitung
$x$	m	Länge eines (Rohr-) Abschnittes bzw. bei Rippengleichung Abstand vom Rippenfuß
$\alpha_a$	W/( $\text{m}^2\text{K}$ )	Wärmeübergangskoeffizient von Rohroberfläche an Umgebung
$\lambda_D$	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung
$\lambda_{\text{Fluid}}$	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit des Fluids
$\lambda_{\text{RW}}$	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit des Materials der Rohrwand
$\mu_{\text{ers}}$	1/m	Zwischenwert zur Berechnung der Wärmeleitung in der Rippe
$\vartheta_{A1}$	$^{\circ}\text{C}$	Abschalt-Temperatur des Thermostaten zu Beginn der Prüfung
$\vartheta_{An}$	$^{\circ}\text{C}$	Abschalt-Temperatur des Thermostaten am Ende der Prüfung

$\vartheta_a$	°C	Umgebungstemperatur
$\vartheta_{R,i}$	°C	Temperatur eines Rohrabschnittes
$\vartheta_{Sp}$	°C	mittlere Speichertemperatur
$\vartheta_w$	°C	mittlere Wassertemperatur
$\vartheta_{xn}$	°C	mittlere Speicherwasserübertemperatur (min. 45 °C)
$\vartheta_x$	°C	Temperatur der Rippe nach der Länge x
$\vartheta_{x=0}$	°C	Temperatur am Anfang der Rippe (Rippenfuß)
$\Delta\vartheta$	K	Temperaturdifferenz

Tab. B-2: Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
Aux,in/out	Ein- bzw. Austritt des Wärmeträgerfluids am Speicher vom Zusatzheizgerät (Nachheizung)
Col,in/out	Ein- bzw. Austritt des Wärmeträgerfluids am Speicher vom Sonnenkollektor
DHW,in/out	Ein- bzw. Austritt des Trinkwarmwassers am Speicher (DHW = domestic hot water)
ERZ	Einrohrzirkulation (auch rohrinterne Gegenstromzirkulation oder Mikrozirkulation genannt)
EnEV	Energieeinsparverordnung
RH (SH)	Raumheizung (SH = space heating)
RlzumKol	Rücklauf zum Kollektor
RlvomSp	Rücklauf vom Speicher
SH,in/out	Ein-/Austritt des Wärmeträgerfluides am Speicher von der Raumheizung (SH = space heating)
TWW (DHW)	Trinkwarmwasser (DHW = domestic hot water)
VlvomKol	Vorlauf vom Kollektor
VlzumSp	Vorlauf zum Speicher
WÜT	Wärmeübertrager (Index „ext.“ für externen, Index „int.“ für internen WÜT)

## Anhang C: Wärmeverlustmessung an Warmwasserspeichern

Im Folgenden werden die gängigen Prüfmethode zur Charakterisierung der Verluste von Warmwasserspeichern erläutert.

### DIN EN 12977-3/4:2012

Die Leistungsprüfung von bivalenten Speichern für Solaranlagen kann nach der DIN EN 12977 Teil 3 /11/ beziehungsweise nach Teil 4 für Kombispeicher /12/ erfolgen.

Motivation der Prüfungen sind im Wesentlichen die Ermittlung

- \* der effektiven Wärmekapazität,
- \* der Wärmeverluste des Speichers im Stand-by sowie
- \* des Wärmeübertragungsvermögens von integrierten Wärmeübertragern.

Im Folgenden wird nur die Ermittlung der Stand-by-Wärmeverlustrate betrachtet, welche den Wärmeverlust des gesamten Speichers, bezogen auf 1 K Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Temperatur im Speicher  $\vartheta_{Sp}$  und der Umgebungstemperatur  $\vartheta_a$  widerspiegelt. Es sei hervorgehoben, dass nur die DIN EN 12977 eine Bestimmung der Stand-By-Wärmeverluste vorsieht. Die anschließend aufgeführten Normen beschreiben stattdessen Prüfverfahren zur Ermittlung des täglichen Bereitschaftsverlustes.

### Randbedingungen und Prüfverfahren

Für die Prüfung wird der Speicher nach einer initialen Konditionierung auf eine Temperatur von 60°C aufgeheizt und nach einer definierten Stand-by-Zeit entladen. Für die Dauer der Prüfung muss die Umgebungstemperatur auf  $(20 \pm 2)$  °C temperiert werden. Die Dauer der Stand-by-Zeit wird so ausgelegt, dass der Speicher während des Stand-by's ungefähr 40 % bis 60 % der gespeicherten Energie verloren hat. Während der Stillstandszeit wird der Speicher weder be- noch entladen, so dass die Abkühlung des Wasserraumes ausschließlich durch die Wärmeverluste des Speichers verursacht wird. Die Wärmeverlustrate wird anschließend unter Verwendung der erhaltenen Messdaten und eines mathematischen Speichermodells ermittelt.

**DIN EN 12897:2006-09**

Die DIN EN 12897 /13/ beschreibt ein Prüfverfahren zur Ermittlung des Bereitschafts-Wärmeaufwandes.

Randbedingungen und Prüfverfahren

Der Prüfspeicher muss sich entweder auf einer 20 mm dicken Faserplatte mittlerer Dichte in einer Höhe von  $(400 \pm 100)$  mm über dem Fußboden befinden oder nach Herstellerangaben an der Wand befestigt werden. Der Prüfort muss weiterhin zugfrei, gegen direkte Strahlung abgeschirmt und auf eine Umgebungstemperatur von  $(20 \pm 2)$  °C geregelt sein. Der Abstand zu den Wänden muss dabei mindestens 700 mm betragen, sofern es sich nicht um eine Installation an der Wand handelt.

Die Ermittlung des Bereitschafts-Wärmeaufwandes erfolgt über mehrere 24 h Zeiträume, bei denen der Speicher mittels eines eingebauten Tauchheizgerätes auf einer Temperatur von  $(65 \pm 2)$  °C gehalten wird. Die Temperaturhaltung kann alternativ auch über einen außen liegenden elektrischen Durchflusserwärmer mit Umwälzpumpe erfolgen. Die Prüfung ist beendet, wenn der nach Gleichung (3.1) berechnete Bereitschafts-Wärmeaufwand für mindestens zwei 24 h Zeiträume um weniger als 2 % schwankt. Der Bereitschafts-Wärmeaufwand  $Q_{st}$  entspricht dann dem Mittelwert dieser Ergebnisse.

$$Q_{st} = E_{24h} \cdot \left( \frac{45}{\vartheta_w - \vartheta_a} \right) \quad \text{Gl. (3.1)}$$

$E_{24h}$  die über einen 24 h Prüfzeitraum verbrauchte Energie, in kWh

$\vartheta_w$  die mittlere Wassertemperatur über einen 24 h Prüfzeitraum, in °C

$\vartheta_a$  die mittlere Umgebungstemperatur über einen 24 h Prüfzeitraum, in °C

**DIN EN 15332:2008-01**

In der DIN EN 15332 /14/ ist ebenfalls eine Methode zur Bestimmung des Bereitschaftsverlustes beschrieben.

Randbedingungen und Prüfverfahren

Um den Speicher herum muss ein Freiraum von mindestens 700 mm und über dem Behälter von mindestens 1000 mm vorhanden sein. Wandhängende Speicher sind an einer separaten Wand mit einem Mindestabstand von 150 mm von der Raumwand und einem Freiraum zwischen Speicher und Fußboden von mindestens 250 mm zu installieren. Weiterhin ist der Speicher geschützt vor Zugluft sowie Wärme-Strahlung aus der Umgebung und einer relativen Luftfeuchtigkeit von weniger als 85 % aufzustellen. Die Raumtemperatur soll bei der Prüfung  $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  betragen, darf aber um nicht mehr als  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  schwanken. Für die Prüfung soll der Speicher von sämtlichen äußeren Anschlüssen getrennt sein.

Die Messung des Bereitschaftswärmeverlustes erfolgt durch Temperaturhaltung des Speicherwassers mittels eines zusätzlichen elektrischen Tauchheizgerätes, dass im unteren Drittel des Speichers zu platzieren ist. Die zu erhaltende Speicherwassertemperatur muss der Nenn-Speicherwassertemperatur um  $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  entsprechen, aber mindestens  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  betragen. Der Bereitschaftsverlust ist nach Gleichung (3.2) zu berechnen. Er entspricht dem Verbrauch an elektrischer Energie über einem Zeitraum von mindestens 24 h, nachdem ein Beharrungszustand erreicht worden ist.

$$Q_B = E_{24h} \cdot \frac{\vartheta_{xn}}{\vartheta_w - \vartheta_a} \quad \text{Gl. (3.2)}$$

$E_{24h}$  die über einen 24 h Prüfzeitraum verbrauchte Energie, in kWh

$\vartheta_{xn}$  die mittlere Speicherwasserübertemperatur (min.  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ), in  $^\circ\text{C}$

$\vartheta_w$  die mittlere Wassertemperatur über einen 24 h Prüfzeitraum, in  $^\circ\text{C}$

$\vartheta_a$  die mittlere Umgebungstemperatur über einen 24 h Prüfzeitraum, in  $^\circ\text{C}$

**DIN EN 60379:2004-07**

In der DIN EN 60379:2004-07 /15/ ist ein Verfahren zur Ermittlung des Wärmeverlustes in 24 h beschrieben, welches explizit nur für die Charakterisierung von elektrischen Warmwasserspeicher für den Hausgebrauch anzuwenden ist.

Randbedingungen und Prüfverfahren

Für die Prüfung ist eine Aufstellung auf dem Boden, auf einem mitgelieferten Gestell oder einem Hilfsboden zulässig. Weiterhin muss um den Speicher ein Freiraum von mindestens 700 mm vorhanden sein. Wandhängende Speicher sind an einer separaten Wand mit mindestens 150 mm Abstand von der Raumwand und jeweils 250 mm von Decke und Fußboden entfernt zu montieren. Darüber hinaus soll der Aufstellort weitestgehend frei von Zugluft sein und eine relative Luftfeuchtigkeit von 85 % nicht überschreiten. Die Raumtemperatur soll bei der Prüfung  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  betragen.

Die für die Haltung der Speichertemperatur  $\vartheta_s$  ( $65 \pm 3$ )  $^\circ\text{C}$  verbrauchte Energie ist über die Dauer von mindestens 48 h zu messen und anschließend in den Energieverbrauch  $E$  für einen Zeitraum von 24 h umzurechnen. Der Wärmeverlust  $Q_{pr}$  kann daraufhin durch Verwendung der Gleichung (3.3) berechnet werden.

$$Q_{pr} = E_{24h} \cdot \frac{45}{\vartheta_w - \vartheta_a} + \frac{1,16 \cdot C_A \cdot (\vartheta_{A1} - \vartheta_{An})}{1000} \quad \text{Gl. (3.3)}$$

$E_{24h}$  die über einen 24 h Prüfzeitraum verbrauchte Energie, in kWh

$\vartheta_w$  die mittlere Wassertemperatur über einen 24 h Prüfzeitraum, in  $^\circ\text{C}$

$\vartheta_a$  die mittlere Umgebungstemperatur über einen 24 h Prüfzeitraum, in  $^\circ\text{C}$

$C_A$  tatsächlicher Speicherinhalt, in l

$\vartheta_{A1}$  Abschalt-Temperatur des Thermostaten zu Beginn der Prüfung, in  $^\circ\text{C}$

$\vartheta_{An}$  Abschalt-Temperatur des Thermostaten am Ende der Prüfung, in  $^\circ\text{C}$

## Anhang D: Auslegung Siphons auf Basis der Rippengleichung

Für den Fall, dass ein Siphon ausgelegt werden soll, ohne ihn zu vermessen, bietet sich die im folgenden beschriebene Rechenmethode an. Diese kann zum Einsatz kommen, wenn bisher nicht vermessene Kombinationen aus Rohrmaterial, Rohrdurchmesser und Rohrwandstärke eingesetzt werden. Die Rechenmethode zur Auslegung der benötigten abwärtsführenden Länge eines Siphons basiert auf der sogenannten Rippengleichung /17/. Dabei wird angenommen, dass für den Wärmetransport in dem senkrecht nach unten geführten Abschnitt nur die Wärmeleitung in der Rohrwand und dem Fluid erfolgt. Das heißt, dass dort keine konvektiven Strömungen auftreten.

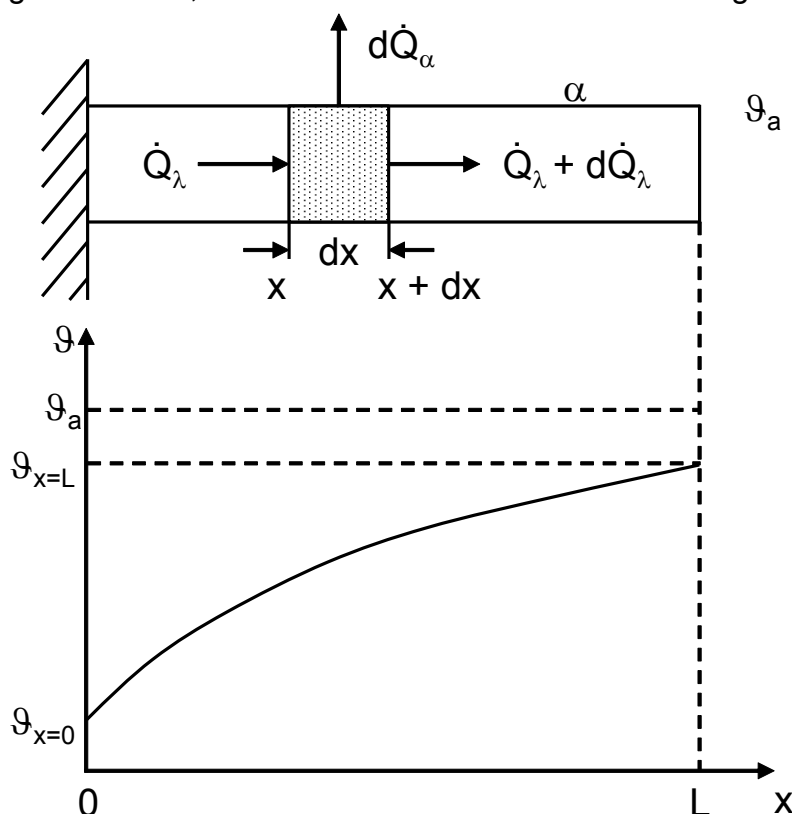


Abb. 4-1: Schema einer Rippe gemäß Rippengleichung

Der Temperaturverlauf entlang der Rippe  $\vartheta_x$  oder die Temperatur am Rippenende  $\vartheta_{x=L}$  können somit durch Verwendung der Gleichung (4.1) berechnet werden.

$$\vartheta_x = \frac{\cosh[\mu_{ers} \cdot (L - x)]}{\cosh[\mu_{ers} \cdot L]} \cdot (\vartheta_{x=0} - \vartheta_a) + \vartheta_a \quad \text{Gl. (4.1)}$$

- L Länge der Rippe, in m
- x Abstand vom Anfang der Rippe, in m
- $\vartheta_x$  Temperatur der Rippe nach der Länge x, in °C
- $\vartheta_{x=0}$  Temperatur am Anfang der Rippe, in °C
- $\vartheta_a$  Umgebungstemperatur, in °C

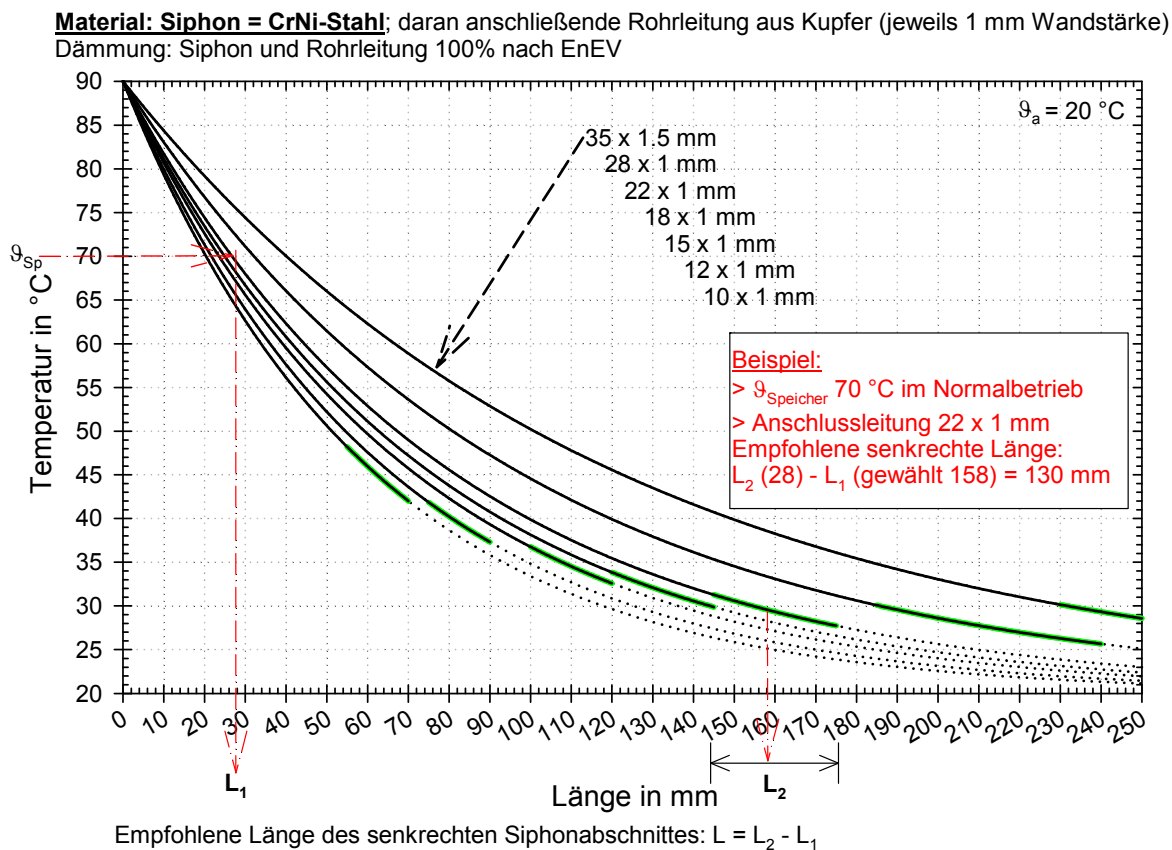
Der Wert für  $\mu_{\text{ers}}$  wird dabei durch Anwendung der Gleichung (4.2) erhalten.

$$\mu_{\text{ers}} = \sqrt{\frac{U_{L,R}}{\lambda_{\text{Fluid}} \cdot A_{\text{Fluid}} + \lambda_{\text{RW}} \cdot A_{\text{RW}}}} \quad \text{Gl. (4.2)}$$

$U_{L,R}$	Verlustkoeffizient je m der Rohrleitung (siehe Kapitel 3.3.2), in W/(mK)
$A_{\text{Fluid}}$	Querschnittsfläche des Fluids (lichter Querschnitt der Rohrleitung), in m <sup>2</sup>
$A_{\text{RW}}$	Querschnittsfläche der Rohrwandung, in m <sup>2</sup>
$\lambda_{\text{Fluid}}$	Wärmeleitfähigkeit des Fluids, in W/(mK)
$\lambda_{\text{RW}}$	Wärmeleitfähigkeit des Materials der Rohrwand, in W/(mK)

Abbildung D-2 zeigt exemplarisch die nach Anwendung der Wärmerippengleichung resultierenden Temperaturverläufe für 7 Rohrleitungen mit unterschiedlichen Querschnitten. Das Material der betrachteten Rohrleitung ist CrNi-Stahl ( $\lambda_{\text{RW}} = 15 \text{ W/(mK)}$ ) und die Dämmung entspricht der 100 % Anforderung gemäß EnEV. Die Verlängerung des vertikalen Teils des Siphons hat nur noch einen geringen Einfluss, sobald die durchgezogene Linie in die gestrichelte Linie übergeht. Empfohlen wird, dass der vertikale Teil des Siphons im grün markierten Bereich endet. Dieser Bereich markiert eine Temperatur am Austritt des Siphons bzw. am Eintritt des folgenden Rohrstücks, die für eine wirkungsvolle Minderung der ERZ unterschritten werden muss. Diese zu unterschreitende Temperatur hängt ab vom Rohrdurchmesser (siehe Kapitel 4.1.2).





**Abb. D-2:** Temperaturverlauf in einem von einer Wärmequelle senkrecht nach unten geführten CrNi-Stahlrohr mit unterschiedlichen Querschnitten

Das Diagramm ist für eine Betriebstemperatur der geheizten Komponente (z. B. des Speichers) von 90 °C erstellt worden. Wenn die Betriebstemperatur auf Anschlusshöhe geringer ist (im Beispiel 70 °C), muss die Temperaturkurve nicht mehr von 90 auf 70 °C abfallen. Das entspricht einer ansonsten nötigen vertikalen Länge  $L_1$  von 28 mm (Schnittpunkt der Betriebstemperatur  $\vartheta_{\text{Sp}} 70\text{ °C}$  mit der verwendeten Anschlussleitung 22 x 1 mm), (zur Verschiebung der Temperaturkurve siehe Kapitel 4.2).

Der in Grün markierte Bereich des Temperaturverlaufes skizziert den empfohlenen Bereich für die Länge  $L_2$  (im Beispiel:  $L_2$  145 bis 175 mm). Eine Unterschreitung des Bereiches hat eine verminderte Wirksamkeit zur Folge und eine Überschreitung führt zu einer unnötigen Verlängerung der Rohrleitung und damit zu einer unnötigen Erhöhung der Wärmeverluste im Betrieb.

Die empfohlene senkrechte Länge des Siphons oder Z-Profiles berechnet sich aus der Subtraktion von  $L_2$  und  $L_1$  zu 117 bis 147 mm. Im Beispiel wird für  $L_2$  eine Länge von 158 mm gewählt, so dass sich eine resultierende Schenkellänge von 130 mm ergibt, die gut geeignet für einen Temperaturbereich von 55 bis 90 °C ist.

Die nach dem Diagramm in Abbildung D-2 bestimmten Schenkellängen berücksichtigen lediglich den vertikalen Abschnitt des Formteils. Bei einem realen Z- oder Siphonprofil hingegen schließen sich an den rein vertikalen Teil Segmente mit geringeren Neigungen an, die ebenfalls die ERZ mindern. Daher führen die tatsächlichen Messwerte insbesondere an kurzen Stufenprofilen zu einer höheren Wirksamkeit als es Abbildung D-2 zeigt. Somit liegt man bei Verwendung des Diagramms auf der sicheren Seite, d.h. die mit dem Diagramm ausgelegten Siphons sind länger und damit wirkungsvoller als es sich nach einer Messung ergeben würde.

Mit Hilfe des Rechenverfahrens ist es somit möglich, auch ohne Messungen eine sichere, wenn auch etwas überdimensionierte Auslegung eines Siphons oder Z-Profiles vorzunehmen. Wichtig ist, dass am Austritt des Siphons sich Endtemperaturen entsprechend den grünen Bereichen in Abbildung D-2 einstellen. Diese Endtemperaturen sind die Eintrittstemperaturen in die weiterführende Rohrleitung und führen dort nicht mehr zu signifikanten Wärmeverlusten. Wenn andere Materialien verwendet werden sollen, können somit eigene Diagramme erstellt werden, in die für jeden Durchmesser die genannten Bereiche der Endtemperaturen zu übertragen sind

### Anhang E: Visualisierung der ERZ mittels CFD-Simulation

Die ERZ verringernde Wirkung einer hohen tangentialen Wärmeleitung in der Rohrwand, wie sie in Kapitel 4.1.3 experimentell gefunden wurde, ist ein bisher nicht bekanntes Phänomen. Zur Überprüfung dieses Phänomens sind Simulationsrechnungen mit Computational Fluid Dynamic Software (CFD) durchgeführt worden.

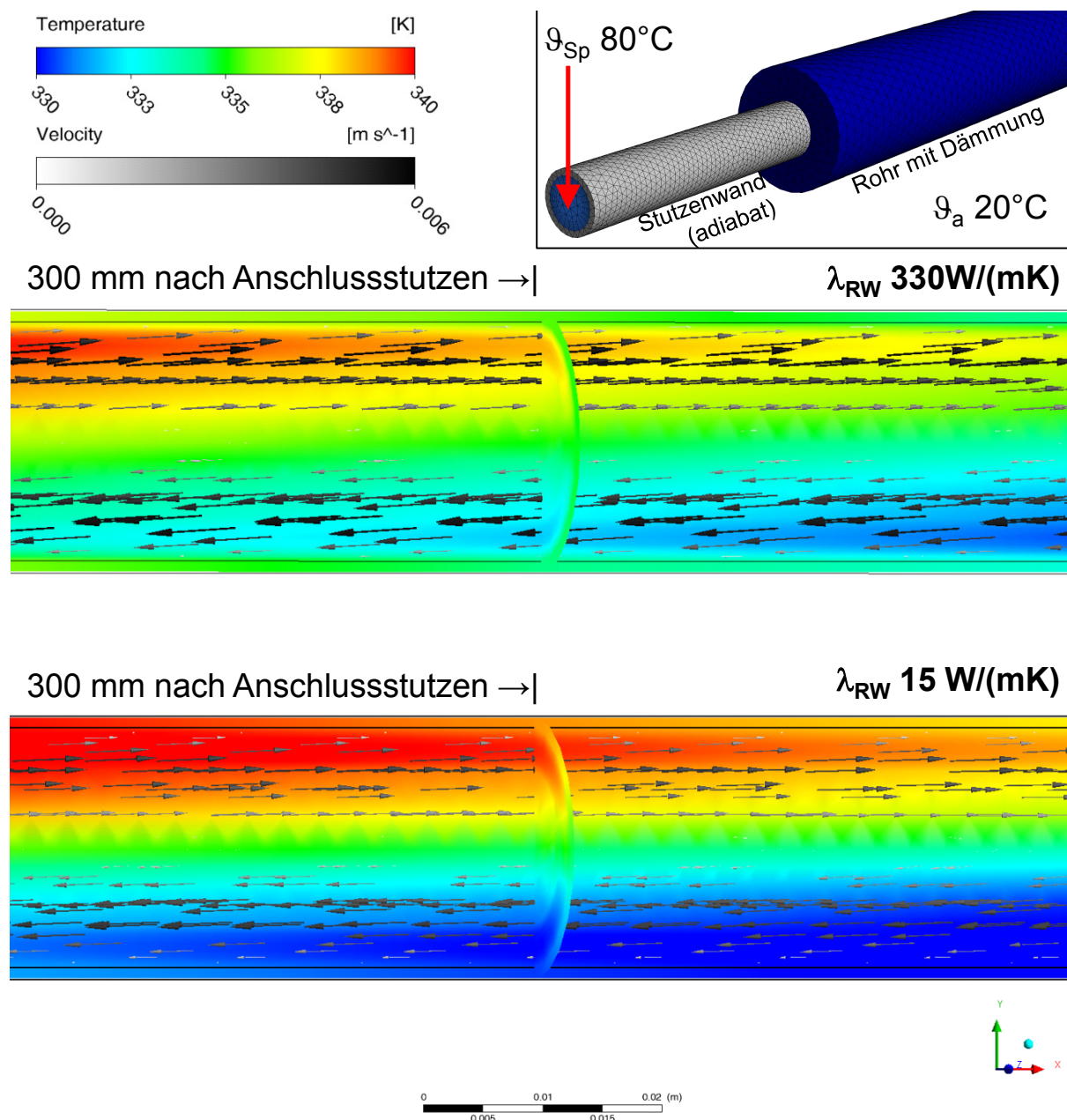
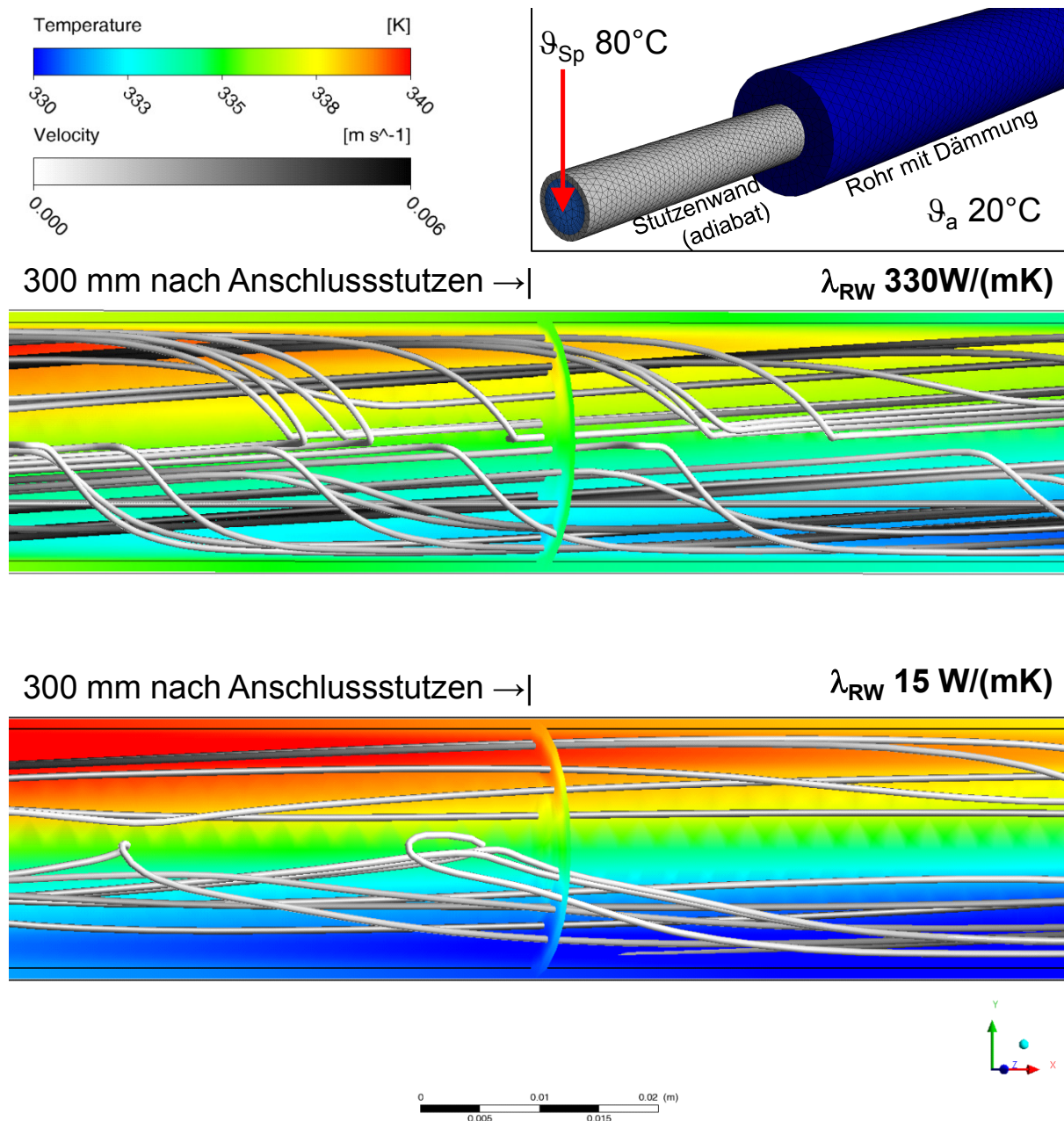


Abb. E-1: Vergleich des Temperatur- und Strömungsprofils (anhand von lokalen Vektoren) bei ausgebildeter ERZ in einem waagrechten Speicheranschlussrohr (22 x 1 mm, 100 % Dämmung) mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials

Die Temperatur- und Strömungsprofile der Abbildung E-1 und Abbildung E-2 basieren auf Strömungssimulationen mittels ANSYS CFD. Die Randbedingungen der Simulationen sind, abgesehen von der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials (Cu-Rohr  $\lambda_{RW}$  330 W/(mK), CrNi-Stahl-Rohr  $\lambda_{RW}$  15 W/(mK)), identisch.



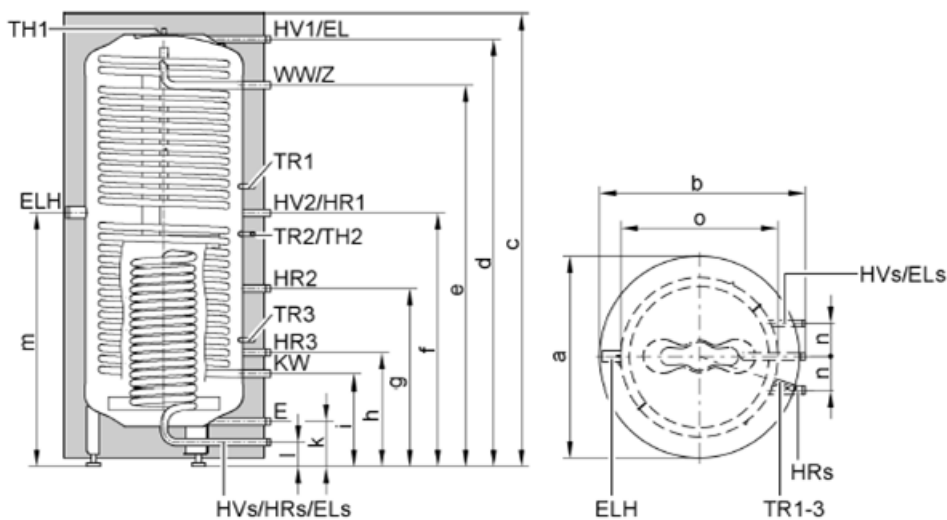
**Abb. E-2:** Vergleich des Temperatur- und Strömungsprofils (anhand von Strömungsfäden) bei ausgebildeter ERZ in einem waagrechten Speicheranschlussrohr (22 x 1 mm, 100 % Dämmung) bei unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials

Es zeigt sich, in Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen, dass das Rohr mit geringerer Wärmeleitfähigkeit einen erheblich größeren Temperaturunterschied zwischen der Ober- und Unterseite hat. Die abwärts und aufwärts führenden Strömungen (nicht parallel zur Rohrachse) sind geringer, so dass das Strömungsprofil eine deutlich geringere Durchmischung zwischen Vorwärts- und Rückströmung im Vergleich zum Rohr mit hoher Wärmeleitfähigkeit auf. Diese Durchmischung bremst die Strömung und damit die Verluste. Folglich begünstigt eine geringere Rohr-Wärmeleitfähigkeit die Ausbildung der gegenläufigen rohrinternen Strömung.

## Anhang F: Technische Daten des verwendeten Speichers

### Technische Angaben Vitocell 340-M (Typ SVK) / Vitocell 360-M (Typ SVS)

#### Anschlüsse und Maße



Vitocell 340-M

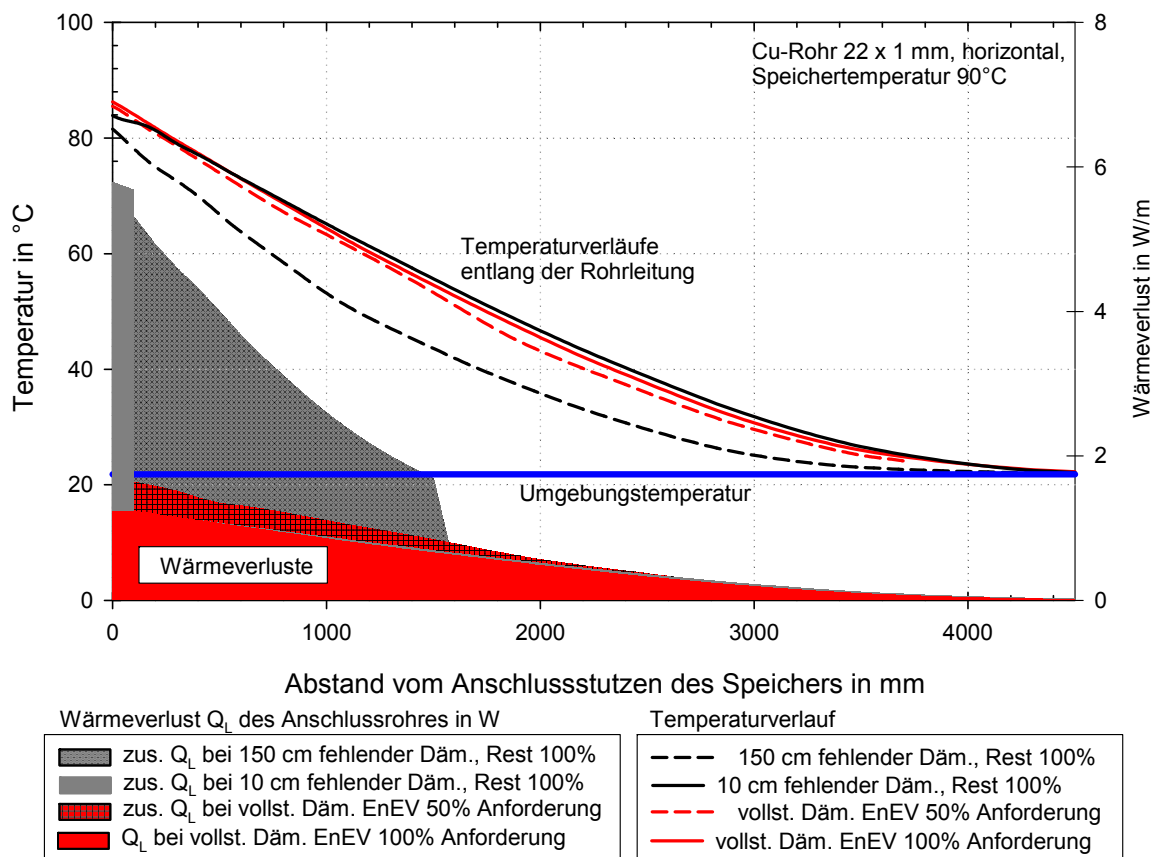
- |   |   |
|---|---|
| E Entleerung                                | HVs Heizwasservorlauf Solaranlage       |
| EL Entlüftung                               | KW Kaltwasser                           |
| ELs Entlüftung Solaranlage                  | TH Thermometer                          |
| ELH Muffe Rp 1½ für Elektro-Heizeinsatz-EHE | TR Temperaturregler / Temperatursensor  |
| HR Heizwasserrücklauf                       | WW Warmwasser                           |
| HRs Heizwasserrücklauf Solaranlage          | Z Zirkulation (Zubehör, siehe Seite 14) |
| HV Heizwasservorlauf                        |   |

Maßtabelle			Vitocell 340-M	
Speicherinhalt		l	750	1000
Länge (∅)	a	mm	960	1060
Breite	b	mm	1000	1100
Höhe	c	mm	2100	2100
	d	mm	1980	2023
	e	mm	1761	1747
	f	mm	1156	1142
	g	mm	796	814
	h	mm	526	512
	i	mm	426	412
	k	mm	173	136
	l	mm	75	75
	m	mm	1156	1142
	n	mm	157	185
Länge (∅) ohne Wärmedämmung)	o	mm	750	850

Abb. F-1: Technische Daten des im Prüfstand verwendeten 750 l Speichers<sup>1</sup> (Wärmedämmung aus Polyestervlies, 100 mm stark)

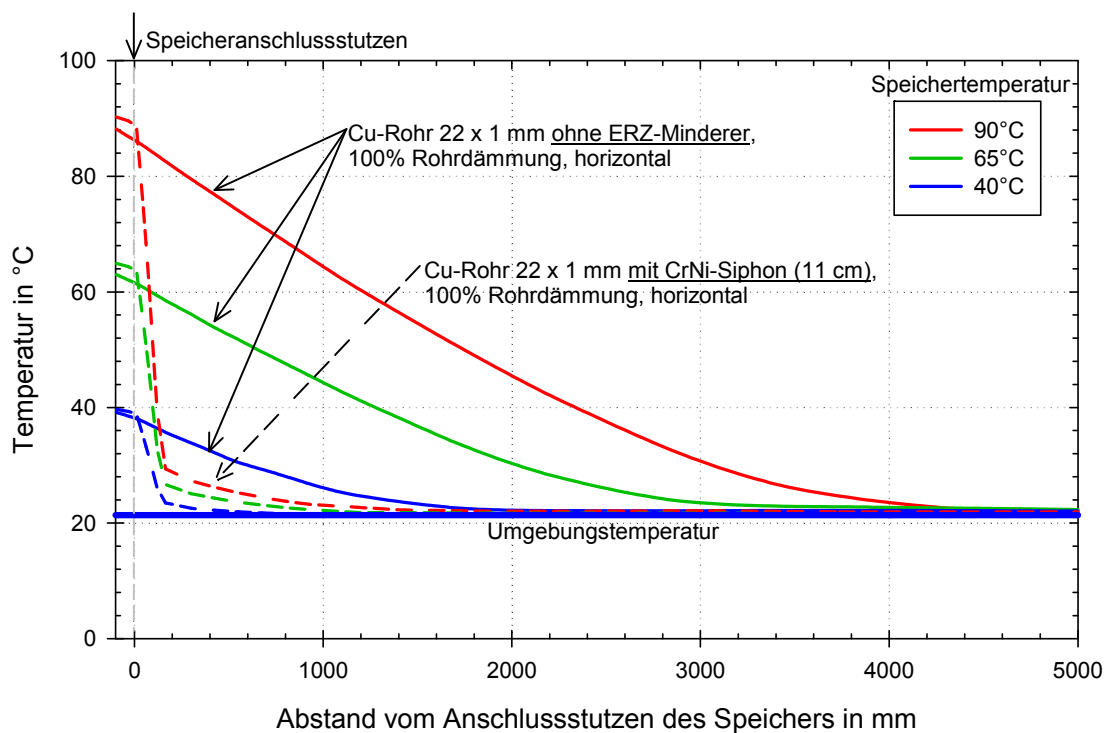
1. Quelle: Viessmann Datenblatt: VITOCCELL 340-/360-M Heizwasser-Pufferspeicher mit Trinkwassererwärmung - 750 und 1000 Liter Inhalt (5811 387, 4/2007)

### Anhang G: Weitere Messdaten



**Abb. G-1:** Temperaturverläufe und Wärmeverluste entlang einer Rohrleitung mit unterschiedlich ausgeführter Dämmung (im Vergleich: lückenlos ausgeführte Dämmung bei einem Dämmstandard von 50 und 100 % nach EnEV; 10 und 150 cm nicht gedämmte Rohrleitung im Anschlussbereich mit darauf folgender 100 % Dämmung)





**Abb. G-2:** Temperaturverläufe entlang einer Rohrleitung im Vergleich  
durchgezogene Linie: ohne ERZ-Minderungsmaßnahme  
gestrichelte Linie: mit CrNi-Siphon (11 cm)



Bei der „rohrinternen Gegenstromzirkulation“ oder kurz „Einrohrzirkulation“ (ERZ) handelt es sich um einen Vorgang, der an Anschlüssen von Warmwasserspeichern zum Teil zu beachtlichen Wärmeverlusten führen kann. In dem Bericht werden die entstehenden Wärmeverluste verschiedener Speicheranschlussvarianten mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern, Rohrmaterialien und Neigungswinkeln aufgezeigt und konkrete Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der durch ERZ entstehenden Verluste gegeben. Weiterhin wird die Relevanz der Verwendung von Minderungsmaßnahmen, durch Abschätzung der ERZ-bedingten Jahreswärmeverluste in handelsüblichen Solaranlagen hervorgehoben.

**Gefördert durch die:**

(Az. 29647)



Institut für Solarenergieforschung GmbH  
Am Ohrberg 1  
31860 Emmerthal  
Telefon +49(0)5151 - 999 - 100  
Telefax +49(0)5151 - 999 - 400  
E-Mail [info@isfh.de](mailto:info@isfh.de)  
Internet [www.isfh.de](http://www.isfh.de)