



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Institut für Solarenergieforschung GmbH
Hamelin / Emmerthal



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

Erstellung und Validierung eines Verfahrens zur Voraussage von Temperaturverläufen in Speicheranschlussrohren mit ausgebildeter Einrohrzirkulation

Bachelorarbeit

Umwelttechnik

vorgelegt von

Nailya Maitanova

Matrikel-Nr. 2061166

Hamelin
am 8. März 2013

Betreut durch

Dipl.-Ing. (FH) Francis Kliem (ISFH) und Dipl.-Ing. (FH) Jan Steinweg (ISFH)

Gutachter: Prof. Dr. Fritz, Dildey (HAW Hamburg)

Gutachter: Dipl.-Ing. Gunter, Rockendorf (ISFH)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt am ISFH

Abstract

Diese Abschlussarbeit entstand zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor“. Sie wurde am Institut für Solarenergieforschung Hameln in einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekt bearbeitet und geschrieben. Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Bewertung von Einrohrzirkulation in Anschlüssen thermischer Energiespeicher. Im Focus der Untersuchungen stehen die Ermittlung der verursachten Wärmeverluste, die Entstehung und Ausbreitungsreichweite sowie die Beurteilung von Maßnahmen zur Reduktion der Verluste. Der physikalische Vorgang der Einrohrzirkulation entsteht aufgrund eines temperaturabhängigen Dichteunterschiedes. Ein Dichteunterschied entsteht in Speicheranschlussleitungen zum Beispiel nach dem Beenden einer erzwungenen Strömung warmen Wassers durch Abkühlvorgänge.

Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Verfahrens zur Prognostizierung der Ausbreitung der Einrohrzirkulation in Speicheranschlussrohren. Die Ausdehnung der Einrohrzirkulation sowie die daraus resultierenden Wärmeverluste können durch Bildung der Temperaturverläufe über die Rohrlänge charakterisiert werden. Im Rahmen der Abschlussarbeit wird eine Berechnungsmethode erarbeitet, welche die Temperaturprofile in Anschlussleitungen mit waag- und senkrechten Abschnitten voraussagt. Das Verfahren gründet sich auf Messwerte, die durch die Laboruntersuchungen mit rein horizontalen und vertikalen Anschlussrohren erhalten werden. Um diese praktischen Labormessungen zu ermöglichen wird ein Messstand verwendet, der ein Thermostat, einen Speicher und ein Kupferanschlussrohr enthält. Mit Hilfe dieses Prüfaufbaus werden die Temperaturverläufe bei den rein waag- und senkrechten Ausrichtungen des Anschlussrohres aufgenommen. Auf Basis der erhaltenen Messdaten werden die Temperaturprofile in Anschlussleitungen mit waag- und senkrechten Abschnitten durch das Berechnungsverfahren prognostiziert. Dann werden die Messungen mit den kombinierten Rohrleitungen durchgeführt um die Temperaturverläufe bei diesen Anordnungen zu erfassen. Anschließend wird das Prognostizierungsverfahren validiert, bzw. die prognostizierten Werte werden mit Messwerten verglichen.

Anhand der Validierung wird herausgefunden, dass die prognostizierten Temperaturprofile leicht von den Messwerten abweichen. Allerdings ist diese Abweichung vernachlässigbar gering. Daraus wird erschlossen, dass das erarbeitete Verfahren zur Prognostizierung von Temperaturprofilen in der Anschlussleitung mit waag- und senkrechten Segmenten verwendet werden kann.

Zur Erhöhung der Genauigkeit des Prognostizierungsverfahrens werden Empfehlungen zur Optimierung am Ende der Bachelorarbeit gegeben.

INHALTSVERZEICHNIS

ABSTRACT	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VII
NOMENKLATUR	VIII
1. EINLEITUNG	1
2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN	3
2.1. Stand des Wissens	3
2.2. Einrohrzirkulation	4
2.2.1. Primärzirkulation.....	4
2.2.2. Sekundärzirkulation.....	5
2.3. Einrohrzirkulation in Anschlüssen thermischer Energiespeicher	6
3. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	8
3.1. Aufbau des Messstandes.....	8
3.2. Durchführung der Messung und Auswerteverfahren.....	9
3.2.1. Instationäre Auswertung.....	10
3.2.2. Stationäre Auswertung	10
3.2.3. Stationäre Auswertung mittels Ausgleichsfunktion	12
4. UNTERSUCHTE PRÜFLINGSKONFIGURATIONEN	14
4.1. Waagrechte Ausrichtung	14
4.2. Senkrechte Ausrichtung	15
4.3. Kombination aus waag-, senk- und waagrechter Ausrichtung	15
4.4. Kombination aus senk und waagrechter Ausrichtung	18
4.5. Zusammenfassung der Varianten	21
5. MESSERGEBNISSE	22
5.1. Temperaturverläufe bei waagrechter Anordnung	22
5.2. Temperaturverläufe bei senkrechter Anordnung.....	23
5.3. Vergleich der Verläufe der waag- und senkrechten Anordnung.....	24
5.4. Temperaturverläufe bei der Kombination 1	25
5.5. Temperaturverläufe bei der Kombination 2	29
5.6. Vergleich der Verläufe der Kombination 1 und 2.....	32
5.7. Wärmeverluste und Wärmeverlustkoeffizienten	33
6. VERFAHREN ZUR PROGNOTIZIERUNG VON TEMPERATURPROFILIEN IN ANSCHLUSSLEITUNGEN MIT WAAG- UND SENKRECHTEN ABSCHNITTEN	37
6.1. Aufbereitung der Eingangsdaten und Festlegung der Rohrkombination	37
6.2. Beschreibung des Berechnungsverfahrens	39

7. DIE VALIDIERUNG DES PROGNOSTIZIERUNGSVERFAHRENS.....	43
7.1. Validierung bei der Rohrkombination 1	43
7.2. Validierung bei der Rohrkombination 2	45
8. MESSUNSICHERHEITSBETRACHTUNG	47
9. ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN	51
9.1. Zusammenfassung.....	51
9.2. Empfehlung zur Optimierung der Prognostizierung.....	52
LITERATURHINWEISE	
ANHANG.....	I
A. TECHNISCHE DATEN DER VERWENDETEN ANLAGEN	I
B. TEMPERATURVERLÄUFE.....	III
C. WÄRMEVERLUSTE UND WÄRMEVERLUSTKOEFFIZIENTEN	IX
D. VBA CODE.....	X

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: ERZ im quadratischen waagrechten Glasrohr	4
Abbildung 2.2: ERZ im runden waagrechten Glasrohr	5
Abbildung 2.3: Sekundärzirkulation im waagrechten quadratischen Glasrohr.....	5
Abbildung 2.4: Sekundärzirkulation im runden waagrechten Glasrohr	6
Abbildung 2.5: Dichte des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur	6
Abbildung 2.6: Funktionsschema der ERZ	7
Abbildung 3.1: Hydraulischer Aufbau des Messstandes (Erläuterung im Text).....	8
Abbildung 3.2: Sensoren auf der Ober- und Unterseite.....	9
Abbildung 3.3: Zeichnung der Anschlussleitung mit Dämmung.....	11
Abbildung 4.1: Hydraulischer Aufbau des Messstandes bei der waagrechten Anordnung des Anschlussrohres	14
Abbildung 4.2: Hydraulischer Aufbau des Messstandes bei der senkrechten Anordnung des Anschlussrohres	15
Abbildung 4.3: 90° Bogen.....	15
Abbildung 4.4: Hydraulischer Aufbau des Messstandes bei Kombination 1	16
Abbildung 4.5: Foto der Kombination 1	16
Abbildung 4.6: Sensorpositionen des Anschlussrohres bei Kombination 1	17
Abbildung 4.7: Anschlussstutzen auf dem Speicherdeckel	18
Abbildung 4.8: Hydraulischer Aufbau des Messstandes bei Kombination 2.....	18
Abbildung 4.9: Sensorpositionen des Anschlussrohres bei Rohrkombination 2.....	20
Abbildung 5.1: Temperaturverläufe bei waagrecht angeschlossenem Prüfling nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp} = 90\text{ °C}$).....	22
Abbildung 5.2: Temperaturverläufe bei senkrecht angeschlossenem Prüfling nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp} = 90\text{ °C}$).....	23
Abbildung 5.3: Temperaturverlauf $T_{Rohr} - T_{um}$ bei der waagrechten und bei der senkrechten Ausrichtung des Prüflings im Vergleich.....	24
Abbildung 5.4: Temperaturverläufe bei Kombination 1 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=90\text{ °C}$)	26
Abbildung 5.5: Temperaturverläufe $T_{Rohr}-T_{um}$ im stationären Zustand bei Kombination 1	27
Abbildung 5.6: Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 1 ($T_{Sp} = 90\text{ °C}$)	28
Abbildung 5.7: Temperaturverläufe bei Kombination 2 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=90\text{ °C}$)	29
Abbildung 5.8: Temperaturverläufe $T_{Rohr}-T_{um}$ im stationären Zustand bei Kombination 2	30

Abbildung 5.9: Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 2 ($T_{Sp} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$)	31
Abbildung 5.10: Temperaturverläufe $T_{Rohr}-T_{um}$ im stationären Zustand bei Kombination 1 und 2 im Vergleich.....	32
Abbildung 5.11: Wärmeverlustströme für unterschiedliche Anordnungen bei jeweiligen Speichertemperaturen	34
Abbildung 5.12: Wärmeverlustkoeffizienten für unterschiedliche Anordnungen bei jeweiligen Speichertemperaturen	35
Abbildung 6.1: Screenshot 1 des Excel-Tabellenblattes.....	38
Abbildung 6.2: Struktogramm des Programms zur Prognostizierung der Ausbreitung der ERZ in kombinierter Rohrleitung (Hauptroutine).....	40
Abbildung 6.3: Struktogramm der Funktion zur Kurvenanpassung (Subroutine).....	40
Abbildung 6.4: Verlauf der Temperaturdifferenz auf Basis der Prognostizierung bei der Kombination 1 ($T_{Sp}=90 \text{ }^\circ\text{C}$).....	42
Abbildung 7.1: Temperaturdifferenz $T_{Rohr}-T_{um}$ bei der Rohrkombination 1 auf Basis der Messung und Prognostizierung im Vergleich	43
Abbildung 7.2: Temperaturdifferenz $T_{Rohr}-T_{um}$ bei der Kombination 2 auf Basis der Messung und Prognostizierung im Vergleich	45
Abbildung 8.1: Temperaturdifferenz $T_{Rohr}-T_{um}$ für die Messung der Rohrkombination 2 mit Berücksichtigung der Messunsicherheit bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ Speichertemperatur	48
Abbildung 8.2: Die Fehlerfortpflanzung bei der Berechnung des Q_V -Wertes	49
Abbildung 0.1 Kalibrierschein für Rollbandmaß zur Messunsicherheitsbetrachtung (Perschmann Calibration).....	II
Abbildung 0.2 Temperaturverläufe bei der waagrechten Anordnung nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=40 \text{ }^\circ\text{C}$)	III
Abbildung 0.3 Temperaturverläufe bei der waagrechten Anordnung nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=65 \text{ }^\circ\text{C}$)	III
Abbildung 0.4 Temperaturverläufe bei der senkrechten Anordnung nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=40 \text{ }^\circ\text{C}$)	IV
Abbildung 0.5 Temperaturverläufe bei der senkrechten Anordnung nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=65 \text{ }^\circ\text{C}$)	IV
Abbildung 0.6 Temperaturverläufe bei Kombination 1 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=40 \text{ }^\circ\text{C}$).....	V
Abbildung 0.7 Temperaturverläufe bei Kombination 1 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=65 \text{ }^\circ\text{C}$).....	V
Abbildung 0.8 Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 1 ($T_{Sp} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$)	VI
Abbildung 0.9 Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 1 ($T_{Sp} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$)	VI
Abbildung 0.10 Temperaturverläufe bei Kombination 2 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=40 \text{ }^\circ\text{C}$)	VII

Abbildung 0.11 Temperaturverläufe bei Kombination 2 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=65\text{ °C}$)	VII
Abbildung 0.12 Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 2 ($T_{Sp} = 40\text{ °C}$)	VIII
Abbildung 0.13 Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 2 ($T_{Sp} = 65\text{ °C}$)	VIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Eigenschaften der Kombination 1	16
Tabelle 4.2: Eigenschaften der Kombination 2	18
Tabelle 4.3: Zusammenfassung durchgeführter Messungen.....	21
Tabelle 6.1: Erläuterung der Struktogramme.....	41
Tabelle 7.1: Q_V - und UA-Werte auf Basis der Messung und Prognostizierung bei der Rohrkombination 1	44
Tabelle 7.2: Q_V - und UA-Werte auf Basis der Messung und Prognostizierung bei der Kombination 2	46
Tabelle 8.1: Absolute und relative Fehler für den Q_V -Wert bei allen Speichertemperaturen und Rohrkombinationen.	50
Tabelle 8.2 Absolute und relative Fehler für den UA-Wert bei allen Speichertemperaturen und Rohrkombinationen.	50
Tabelle 0.1 Technische Daten des verwendeten Speichers.....	I
Tabelle 0.2 Technische Eigenschaften des verwendeten Dämmmaterials.....	I
Tabelle 0.3: Technische Eigenschaften der verwendeten Temperaturfühler, die die Vor- und Rücklauftemperatur des Thermostates messen.	I
Tabelle 0.4: Technische Eigenschaften der Umgebungstemperatursensoren	II
Tabelle 0.5: Technische Eigenschaften des Temperatursensors Pt 100 Klasse A.....	II
Tabelle 0.6 Q_V - und UA-Werte bei allen Prüflingsanordnungen	IX

Nomenklatur

Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
T	Temperatur	°C
dT	Temperaturdifferenz	K
\dot{Q}	Wärmestrom	W
x	Länge	m
UA	Wärmeverlustkoeffizient	W/K
$U_{L,R}$	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m·K)
d	Durchmesser	m
s	absoluter Messfehler	

Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² ·K)
δ	Stärke	m

Indizes

Symbol	Bezeichnung
unten	Unten
oben	Oben
a	Außen
i	Innen
V	Verlust

ges	Gesamt
m	Gemittelt
u	Umgebung
Sp	Speicher
D	Dämmung
R	Rohr
e	Exit

1. Einleitung

Motivation

Da die thermische Nutzung von Sonnenenergie von Jahr zu Jahr zunehmende Bedeutung gewinnt, werden die Forschungsanstrengungen in diesem Bereich weltweit intensiviert. Ein Forschungsschwerpunkt des Instituts für Solarenergieforschung (ISFH) ist die Optimierung von solarthermisch unterstützten Heizsystemen in Ein- und Mehrfamilienhäusern. Neben den wesentlichen Bestandteilen wie Wärmeerzeugern, Speichern und Lasten stehen der effiziente Betrieb und das optimale Zusammenspiel der Systemkomponenten im Mittelpunkt.

Der Warmwasserspeicher ist hierbei von zentraler Bedeutung, nicht nur im Bereich der Regenerativen Energien, sondern in der ganzen Energiewirtschaft, da die thermische Energiespeicherung das Herzstück der meisten Anlagen zur Wärmebereitstellung ist. Die Ursache dafür ist der zeitliche Versatz zwischen der Energieerzeugung und dessen Bedarf, wie zum Beispiel Warmwasser. Um die Qualität des Wärmespeichers abzuschätzen, müssen unterschiedliche Faktoren berücksichtigt werden, insbesondere die Höhe der Wärmeverluste. Es gibt verschiedene Maßnahmen für deren Reduktion. Es ist jedoch unmöglich, die Wärmeverluste ganz und gar zu verhindern, aber es ist möglich, sie merklich zu minimieren. Einige weitläufig bekannte Maßnahmen zur Verminderung des Wärmestromes an die Umgebung sind die Minimierung des Oberfläche zu Volumen Verhältnisses (A/V -Verhältnis) und die Verwendung von effektivem Dämmmaterial. Einige Wärmeverluste entstehen durch einen Vorgang, der interne Gegenstromzirkulation oder kurz Einrohrzirkulation genannt wird und in Speicheranschlussleitungen stattfindet. Obwohl die thermischen Verluste durch Einrohrzirkulation einen nennenswerten Teil in den gesamten Wärmeverlusten betragen, werden sie häufig vernachlässigt. Nur ein Bruchteil von Unternehmen sieht spezielle Maßnahmen zur Reduktion der Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation vor. Weiterhin sind zahlreiche Fragen zur diesem Effekt noch ungeklärt.

In diesem Kontext bearbeitet das ISFH zurzeit ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördertes Projekt, in dem die Entstehung, die Auswirkungen und die Verminderung von Wärmeverlusten durch Einrohrzirkulation an Anschlüssen thermischer Energiespeicher detailliert untersucht wird.

Zielstellung

In der Praxis kommt es sehr oft vor, dass die Rohrleitungen verschiedene Hindernisse umgehen müssen z.B. die Wände, andere Leitungen, Treppen usw. Damit z.B. warmes Wasser vom Speicher den Verbraucher erreichen kann, werden horizontale und vertikale Rohrstücke miteinander kombiniert. Bisher sind nur rein vertikale und horizontale Ausrichtungen untersucht worden. In der Praxis werden diese Abschnitte jedoch miteinander kombiniert. Deswegen hat die Untersuchung der Einrohrzirkulation in der Kombination von waagrechten und senkrechten Rohrsegmenten eine große praktische Bedeutung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die Grundlagen zur Voraussage eines von Einrohrzirkulation geprägten Temperaturprofils von beliebigen Rohrkombinationen, auf Basis von untersuchten rein waag- und senkrecht geführten Anschlussleitungen erarbeitet werden.

Zuerst soll ein Verfahren zur Voraussage des zu erwartenden Temperaturprofils von Rohranordnungen erarbeitet werden, die aus waag- und senkrechten Teilstücken bestehen. Basis dafür sollen experimentelle Untersuchungen an rein waag- und senkrecht geführten Rohleitungen sein, die zu Beginn der Arbeit durchgeführt werden. Dann wird mit einem im Zuge dieser Arbeit entwickelten Verfahren der Temperaturverlauf in unterschiedlichen Rohranordnungen prognostiziert. Abschließend wird das Voraussageverfahren mit experimentellen Untersuchungen der prognostizierten Kombinationen validiert.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Stand des Wissens

Die Problematik der Einrohrzirkulation ist seit den 80-ern Jahren bekannt und zuerst am Paul Scherrer Institut in der Schweiz untersucht worden. [Suter_2001]

Im Jahr 2006 hat sich Marko Köbli im Rahmen seiner Diplomarbeit am Institut für Solartechnik (SPF) in Rapperswil, Schweiz, mit der Einrohrzirkulation in Speicheranschlussleitungen beschäftigt. Seine Hauptaufgabe hat darin bestanden, die Einrohrkonvektion sichtbar zu machen, dies hat er unter Verwendung eines Aluminiumspeichers mit einer Anschlussleitung aus Glas realisiert. [Marty_2008]

Ein Jahr später hat Robert Huhn im Rahmen seiner Dissertation verschiedene thermische Verlustpfade von Warmwasserspeicher untersucht, unter anderem Verluste durch Einrohrzirkulation. Hier stand vor allem die Wirkung auf die Schichtung des Speicherinhaltes im Vordergrund (reiner Exergieverlust). Diese Untersuchungen sind wiederum an einem Plexiglasspeicher mit einer Anschlussleitung aus Kupfer (28 mm) von 0,3 m Länge in drei verschiedenen Winkeln vorgenommen worden. [Huhn_2007]

Elsa Anderson aus Dänemark hat aufbauend auf bereits vorhandenen Messungen Simulationen mit einem Computational Fluid Dynamics-Programm (CFD) vorgenommen. Aber die durch ihre Simulation ermittelten Berechnungen haben starke Abweichung von den Messwerten gezeigt. [Andersen_2007]

Das Institut für Solartechnik SPF, Schweiz, hat im Jahr 2011 eine ausführliche Zusammensetzung mit eigenen experimentellen Ergebnissen veröffentlicht. Aber diese Ergebnisse können für reale Systeme nur mit gewissen Beschränkungen verwendet werden, weil eine sehr begrenzte Zahl von Anschlusskonfigurationen und untypische Leitungen (z.B. relativ große Rohrleitungsdurchmesser – 28 mm und mehr) betrachtet worden sind. Des Weiteren sind die Rohre während der Messungen nicht an üblichen Warmwasserspeicher angeschlossen gewesen. [SPF_2011]

Seit dem Jahr 2010 führt das ISFH ein Forschungsprojekt durch, bei dem eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf die Entstehung von Einrohrzirkulation untersucht wird. Bei diesem Projekt wird nicht nur ein handelsüblicher Solarwärmespeicher sondern auch typische Rohrmaterialien (Cu und CrNi) und -durchmesser (18 mm und 22 mm) verwendet. Im Rahmen der Forschung wurden die durch Einrohrzirkulation verursachten Verluste bei verschiedenen Anordnungen des Anschlussrohres quantifiziert. Des Weiteren wurden unterschiedliche Maßnahmen bewertet, die die Einrohrzirkulation vermindern (Thermo-Siphons mit unterschiedlichen Schenkellängen aus Kupfer oder Edelstahl, Stopfen, Rückflussverhinderer und Konvektionsbremse). [ISFH_2011]

Im Jahr 2010 ist eine Marktübersicht von Warmwasserspeichern erstellt worden. Darin ist gezeigt worden, dass die Mehrheit der Speicherhersteller hinsichtlich Maßnahmen zur Reduktion der Wärmeverluste durch Einrohrzirkulation auf die Verantwortung des Installateurs verweisen. Aber es ist offensichtlich, dass keine energieeffiziente Entschei-

dung ohne Hilfe der Industrie getroffen werden kann. [Mäuler_2010]

2.2. Einrohrzirkulation

Wie es im Abschnitt 2.1 erwähnt ist, hat Marko Kölbl im Jahr 2006 am Institut für Solartechnik SPF, Schweiz, eine Reihe von Versuchen durchgeführt, die die Visualisierung der Strömung in Rohren ermöglichten. In seiner Arbeit hat er diese Strömung als rohrinterne Gegenstromzirkulation definiert, die auch als Einrohrzirkulation bezeichnet werden kann. In der vorliegenden Abschlussarbeit wird nur den Begriff Einrohrzirkulation oder kurz ERZ verwendet.

Die Versuche von M. Kölbl sind an horizontalen und vertikalen Glasrohren mit einem quadratförmigen oder runden Durchmesser und einer Länge von ca. 1 m durchgeführt worden. Das Rohr wurde an einem Aluminiumspeicher angeschlossen, in dem die Wassertemperatur auf 60 °C für mindestens 30 min gehalten worden ist. Die Umgebungstemperatur hat zwischen 20,5 und 21,5 °C variiert.

Für die Visualisierung ist eine geringe Menge Farbstoff in etwa der Mitte des betreffenden Elements nach oben und nach unten eingespritzt worden. Als Farbstoff ist blaue Lebensmittelfarbe verwendet worden, die außer der im Messingrohr befindlichen Teil nicht temperiert wurde. Das Einspritzen der Farbe ist von Hand vorgenommen worden und basierte betreffend Dosiervolumen und Dosiergeschwindigkeit auf dem gefühlsmäßigen Handeln des Anwenders. Vor dem Rohr ist eine Videokamera installiert worden, damit die Fortbewegung des Farbstoffes aufgenommen werden konnte. [Marty_2008]

2.2.1. Primärzirkulation

Die ERZ unterteilt sich in eine Primär- und eine Sekundärzirkulation.

Die Abbildung 2.1 zeigt die ERZ im quadratischen Glasrohr fünf Sekunden nach der Farbstoffinjektion.

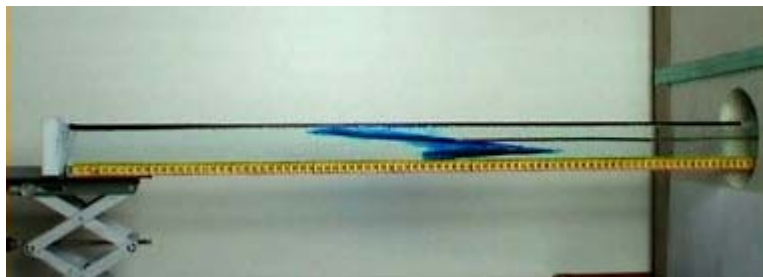


Abbildung 2.1: ERZ im quadratischen waagrechten Glasrohr

Bei Betrachtung der Abbildung 2.1 kann sehr klar festgestellt werden, dass der Farbstoff sich sofort in beide Strömungsrichtungen verteilt und sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 7 mm/s fortbewegt. Es entsteht ein lineares Strömungsprofil. Die warme Vorlaufströmung drückt den Farbstoff in Richtung Rohrende. Die kalte Strömung fließt in Richtung des Wärmespeichers. Dieser Effekt wird Primärzirkulation genannt.

Zwischen den Strömungsrichtungen bildet sich eine Diagonale, die die hin- und rückströmenden Flüsse trennt. Diese Diagonale liegt nicht horizontal im Rohr, sondern mit einer Neigung, die den Anfang und das Ende im reziproken Verhältnis (3:1 und 1:3) in

eine warme und eine kalte Strömung teilt.

Die Abbildung 2.2 illustriert die Primärzirkulation im horizontalen runden Rohr acht Sekunden nach der Farbstoffdosierung.



Abbildung 2.2: ERZ im runden waagrechten Glasrohr

Die Strömungsgeschwindigkeit ist in diesem Fall langsamer, weil durch die kleinere Gesamtoberfläche des Rohres ein kleinerer Energiestrom zwischen Umgebung und Wasser fließt und der Reibungseinfluss wegen dem kleineren Verhältnis von Oberfläche pro Kraft stärker ist.

Die Primärzirkulation bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 3,5 mm/s. Nach 10 min wird die Diagonale, welche die beiden Strömungsrichtungen trennt, über die gesamte Rohrlänge sichtbar.

Es werden die gleichen Versuche mit einer senkrechten Ausrichtung des rechteckigen und runden Rohres realisiert. Der Farbstoff im vertikal ausgerichteten Rohr bewegt nach oben und nach unten. Im Gegensatz zur horizontalen Ausrichtung sind die Strömung und die Fortbewegung nicht laminar sondern es erfolgt eine Fortbewegung durch turbulente Strömung.

2.2.2. Sekundärzirkulation

Ein weiterer sichtbarer Effekt im Anschlussrohr ist die Sekundärzirkulation. Die Abbildung 2.3 zeigt die Entstehung und Entwicklung der Sekundärzirkulation im waagrechten quadratischen Rohr.

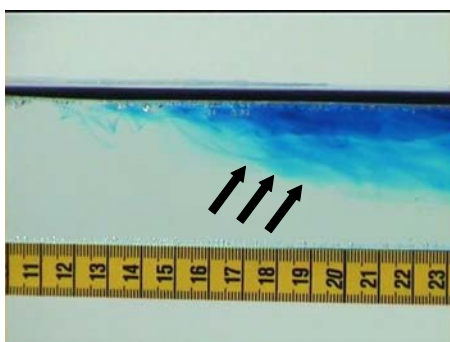
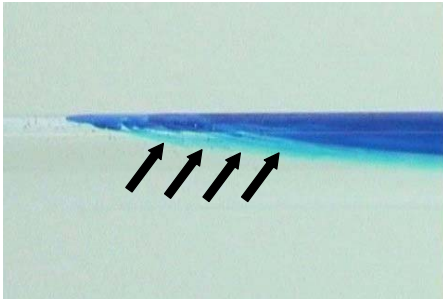


Abbildung 2.3: Sekundärzirkulation im waagrechten quadratischen Glasrohr

Da die Wand des Glasrohres ein wenig kühler ist als das Wasser im Rohr, entsteht eine Bewegung, die quer zur Primärzirkulation verläuft. Die Dicke der Strömung ist kleiner als 0,5 mm. Die Geschwindigkeit dieser Sekundärzirkulation ist 5 mm/s. Dieser Wert ist mit Vorsicht zu benutzen, da das Ablesen dieses Effektes mit verschiedenen Unsicherheiten versehen ist.

Der Verlauf der Sekundärzirkulation im runden Rohr ist auch sehr gut sichtbar und wird in der Abbildung 2.4 dargestellt.



Die Fortbewegungsgeschwindigkeit beträgt 2 mm/s. Da sich durch die Rohrgeometrie optische Verzerrungen ergeben, soll die Angabe wieder nur als Anhaltspunkt betrachtet werden.

Abbildung 2.4: Sekundärzirkulation im runden waagrechten Glasrohr

2.3. Einrohrzirkulation in Anschlüssen thermischer Energiespeicher

Für ein vollständiges Verständnis der ERZ muss der Zusammenhang zwischen der Dichte und der Temperatur des Wassers verstanden werden. Aus der Wärmeübertragungslehre ist bekannt, dass die Wasserdichte temperatur- und druckabhängig ist. Für die Bestimmung der Dichte eines entgasten und entmineralisierten Wassers, das unter einem konstanten Druck sich z.B. in der Leitung oder im Speicher befindet, spielt die Wassertemperatur eine entscheidende Rolle.

Die Abbildung 2.5 stellt die Dichte des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur dar.

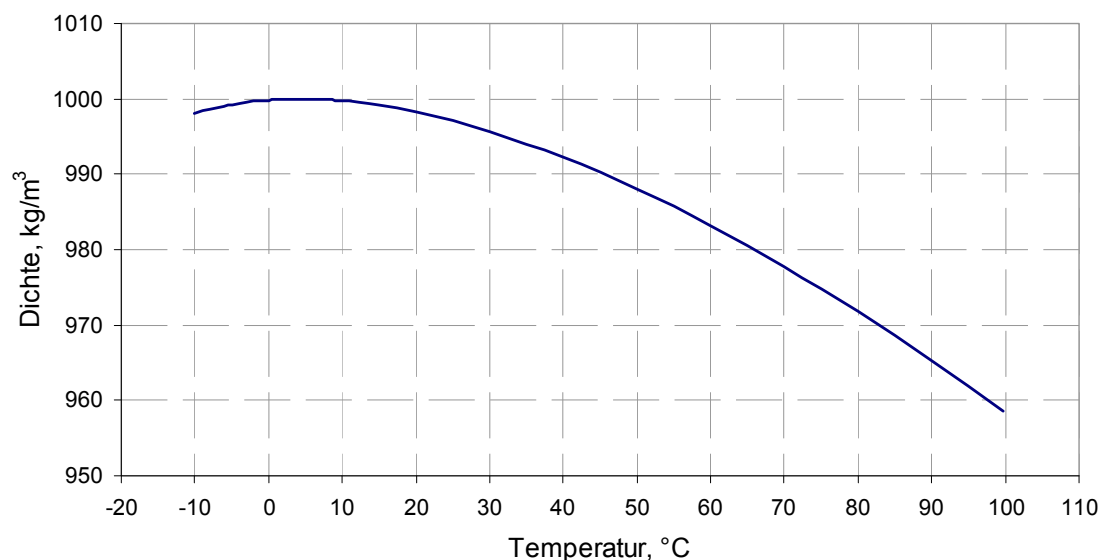


Abbildung 2.5: Dichte des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur

Der Abbildung 2.5 kann entnommen werden, dass eine Temperaturerhöhung zur Verringerung der Dichte führt, z.B. beim Anstieg der Wassertemperatur von 20 °C bis 90 °C verringert sich die Dichte von 998 kg/m³ auf 965 kg/m³. Das bedeutet, dass das warme Wasser eine niedrigere Dichte hat als das kalte Wasser. Beim gleichen Volumen ist die Masse des kalten Wassers höher als die Masse des heißen Wassers. Die Abhängigkeit

der Dichte von der Temperatur ist eine physikalische Grundlage für einen Vorgang wie der ERZ.

Die Entstehung beziehungsweise die Ausbildung der ERZ wird mit dem folgenden Beispiel erläutert. Wenn eine erzwungene Strömung warmen Wassers über einen Speicheranschluss (z.B. Beladung eines Pufferspeichers mit Solarwärme) beendet wird, kühlt die Rohrleitung sehr viel schneller aus als der Speicher. Auf der Abbildung 2.6 steht 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. [ISFH_2011]

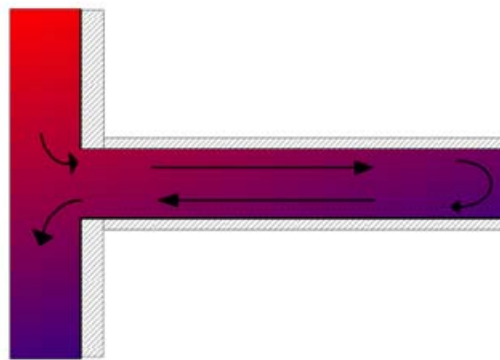


Abbildung 2.6: Funktionsschema der ERZ

Diese als Einrohrzirkulation bezeichnete Strömung kann sich im Rohr ausdehnen und eine erhebliche Reichweite erreichen. Auf diese Weise wird der Speicher noch zusätzlich abgekühlt.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1. Aufbau des Messstandes

Der Messaufbau unterteilt sich im Wesentlichen in einen hydraulischen und einen messtechnischen Aufbau. Der hydraulische Aufbau wird schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt. Zum hydraulischen Aufbau gehören derartige Bestandteile, die nicht unmittelbar zur Messdatenerfassung dienen. Das sind Heizthermostat (1), Wärmespeicher (2) und Prüfling (3) (hier waagrecht).

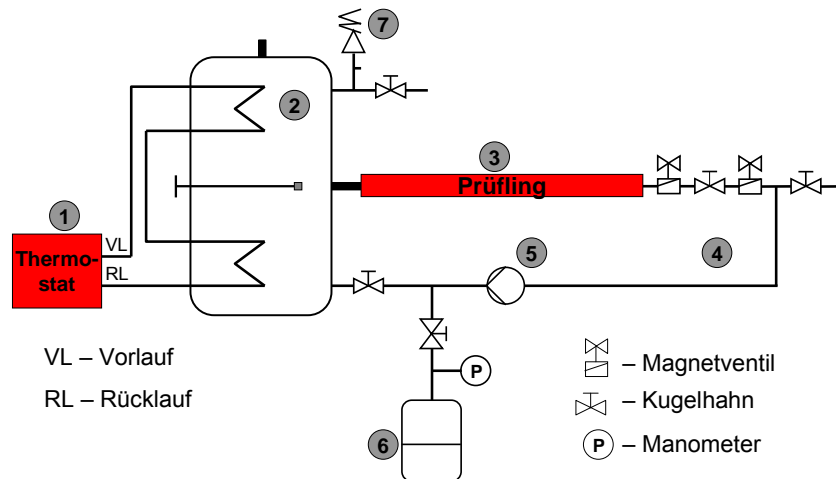


Abbildung 3.1: Hydraulischer Aufbau des Messstandes (Erläuterung im Text)

Für die Messungen wird ein handelsüblicher Solarspeicher verwendet, welcher durch einen Heizthermostat temperiert, bzw. erhitzt oder abgekühlt wird. Die technischen Daten vom Speicher werden im Anhang A in der Tabelle 0.1 gegeben.

Auf halber Speicherhöhe und auf dem Deckel befinden sich Speicheranschlusssutzen, an denen der Prüfling angeschlossen werden kann. Unter dem Prüfling wird ein Rohr oder zwei bis drei miteinander verbundene Rohrsegmente unterschiedlicher Materialien (z.B. Cu oder CrNi), Längen und Durchmesser verstanden. Auf der Abbildung 3.1 wird Prüfling als waagrechtes Anschlussrohr nur schematisch illustriert, damit der Messstandaufbau leichter verstanden werden kann. Im Rahmen vorliegender Abschlussarbeit wird die Ausbreitung der ERZ für unterschiedliche Aufbauten (waagrecht, senkrecht und Kombinationen aus waag- und senkrechten Rohrleitungen) untersucht. Deswegen sind die schematischen Darstellungen der untersuchten Rohrkombinationen in den Abschnitten 4.3 und 4.4 abgebildet.

Der durch den Prüfling verlaufende Fluidstrom wird durch einen wärmeisolierten Polyethylen(PE)-Kunststoffschlauch (4) und einer Umwälzpumpe (5) zum unteren Speicheranschluss zurückgeführt. Am Ende des Prüflings befinden sich ein Kugelhahn und zwei Magnetventile, die zur Absperrung des Prüflings von der Rücklaufleitung zum Speicher dienen. Um eine genauere Ausrichtung zu ermöglichen, liegt der Prüfling auf einem Aluminiumprofil.

Des Weiteren befinden sich am Speicher verschiedene Druckhaltevorrückungen wie Membranausdehnungsgefäß (6) und Überdruckventil (7), welche für einen sicheren Betrieb erforderlich sind.

Alle Bestandteile des hydraulischen Aufbaus werden sorgfältig gedämmt, um den Wärmeaustausch zwischen ihnen und der Umgebung möglichst klein zu halten. Für den Prüfling und alle Einbauteile (Kunststoffleitung, weitere Speicheranschlüsse usw.) wird eine 100%-Dämmung (25 mm Dämmstärke = ca. 100% des Rohrdurchmessers, Definition nach Energieeinsparverordnung (EnEV)) mit einer Wärmeleitfähigkeit λ_D von 0,04 W/(m·K) verwendet (Herstellerangabe). Die Stoffeigenschaften der verwendeten handelsüblichen Prüflingsdämmung können der Tabelle 0.2 im Anhang entnommen werden.

Der messtechnische Aufbau besteht vorwiegend aus Temperatursensoren (Pt-100). Deren Anzahl und Lage hängt von der Länge des Prüflings ab. Die Temperatursensoren sind auf dem Speichermantel und auf dem Prüfling installiert: sechs Sensoren messen die Temperatur an der Speicheroberfläche, zwei bis vier Sensoren sind auf dem Speicheranschlussstutzen aufgebaut und die restlichen dienen zur Bestimmung des Temperaturverlaufs im Anschlussrohr. Die Temperatursensoren des Prüflings und des Anschlusses sind stets auf der Ober- und der Unterseite angebracht. Ein Temperatursensor der Oberseite bildet mit einem Sensor der Unterseite ein Sensorpaar mit einer gemeinsamen Position.



Abbildung 3.2: Sensoren auf der Ober- und Unterseite

Im Vor- und Rücklauf des Thermostates werden Tauchhülsen eingebaut, damit die Temperatur des heißen Wassers im Beladekreis direkt gemessen werden kann. Die Umgebungstemperatur wird mit zwei Sensoren aufgenommen, die in unterschiedlichen Abständen vom Speicher entfernt und entlang des Prüflings positioniert sind.

3.2. Durchführung der Messung und Auswerteverfahren

Für jede Anordnung werden die Temperaturverläufe bei verschiedenen Speichertemperaturen aufgenommen:

- Bei Speichertemperatur gleich Umgebungstemperatur. Dieser sogenannte Nullabgleich dient zur Ermittlung der Abweichung jedes einzelnen Temperatursensors vom Mittelwert, der über alle auf dem Prüfrohr angebrachten Sensoren gebildet wird. Bei der Auswertung der anschließenden Messungen werden die so erhaltenen Abweichungen zur Korrektur der Messwerte herangezogen.

- Bei den Speichertemperaturen über Umgebungstemperatur ($T_{Sp} = 40\text{ °C}$, 65 °C und 90 °C). Aus diesen Messungen werden die Temperaturverläufe erhalten, die die Grundlage zur Bestimmung der Wärmeverluste durch ERZ bilden.

Bevor die Messung begonnen werden kann, muss der Prüfaufbau in einen stationären Zustand bei der entsprechenden Speichertemperatur gebracht werden. Dafür wird der Speicher durch den Thermostat auf die gewünschte Temperatur temperiert. Dieser Vorgang kann bis zu 12 h andauern. Während dieser Konditionierung sind die Magnetventile und der Kugelhahn am Ende des Prüflings geöffnet. Des Weiteren wird mit Hilfe der Umwälzpumpe das Wasser im gesamten Fluidkreis des Prüfaufbaus zirkuliert (vom Speicher zum Prüfling durch Speicheranschlussstutzen und vom Prüfling wieder zum Speicher durch PE-Schlauch und Pumpe, siehe Abbildung 3.1).

Sobald sich die Temperatur im Messaufbau über einen Zeitraum von ca. 120 min nur noch geringfügig verändert (ca. $0,1 \dots 0,2\text{ K}$), kann die Messung begonnen werden. Die Messung startet mit der Absperrung der beiden Magnetventile und des Kugelhahns am Ende des Prüflings und mit der Abschaltung der Pumpe. Während der Messung wird der Speicher durch den Thermostat ebenso wie bei der Konditionierung temperiert, damit die Temperatur im Speicher konstant bleibt. Da der Prüfling von der Kunststoffleitung abgesperrt wird, findet keine Wasserströmung mit Ausnahme von ERZ im Prüfling statt. Die Messung soll mindestens 13 h dauern, damit die Anordnung ins Gleichgewicht kommt und somit ein stationärer Endzustand erreicht ist. Unter Gleichgewicht wird in diesem Fall solcher Zustand verstanden, bei dem nur noch eine vernachlässigbar geringe oder gar keine Veränderung der Temperaturen im Aufbau auftritt. Während dieser 13 h wird Temperaturverlauf durch eine dafür entwickelte Messsoftware aufgenommen. Diese wird auf solche Art eingestellt, dass die Temperatur jede 10 s erfasst und jede 30 s ein Mittelwert von drei gemessenen Werten berechnet und gespeichert wird.

Nach der Messung wird die Auswertung der erhaltenen Messdaten durchgeführt. Die Auswertung unterteilt sich im Wesentlichen in einer instationären und einer stationären Auswertung.

3.2.1. Instationäre Auswertung

Unter der instationären Auswertung wird die Analyse der Ausbreitung der ERZ verstanden, bevor der Prüfling ein Temperaturgleichgewicht erreicht. Dafür werden einzelne Werte aus den Messdaten zu bestimmten Zeitpunkten ausgewählt. Die Temperaturen der Ober- und Unterseite des Rohres werden untereinander nach der Gleichung 3.1 gemittelt. Mit Hilfe dieser Daten können Temperaturverläufe zu verschiedenen Zeiten dargestellt werden.

$$T_{n_i} = \frac{T_{n,oben} + T_{n,unten}}{2} \quad 3.1$$

3.2.2. Stationäre Auswertung

Bei diesem Typ der Auswertung werden nur solche Messwerte abgeschätzt, welche im stationären Zustand erfasst sind. Die Anforderungen zum stationären Zustand laufen

darauf hinaus, dass die Änderung der Rohrmitteltemperatur weniger als 0,1 K je Stunde beträgt.

Bei der stationären Auswertung ermittelt man zuerst die Differenz zwischen der vorher gemittelten Rohrtemperatur T_{ni} und der gemittelten Umgebungstemperatur T_{um} für einen bestimmten Rohrabstand x_i (s. Gleichung 3.2).

$$\Delta T_{ni, Mess} = T_{ni} - T_{um} \quad 3.2$$

Dann lassen sich die auf Basis der Messung erhaltenen Temperaturdifferenzen für die jeweiligen Rohrabschnitten nach der Gleichung 3.3 berechnen.

$$T_{x_i, Mess} = \frac{\Delta T_{n_{i-1}, Mess} + \Delta T_{n_i, Mess}}{2} \quad 3.3$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient $U_{L,R}$ berücksichtigt hierbei die Wärmeleitfähigkeit λ_D und Geometrie der verwendeten Dämmung, sowie den Wärmeübergangskoeffizient α_a von der Dämmung zur Umgebung. Der $U_{L,R}$ kann nach Gleichung 3.4 berechnet werden [VDI_1997].

$$\frac{1}{U_{L,R}} = \left(\frac{1}{2 \cdot \lambda_D} \cdot \ln \frac{d_{a,D}}{d_{i,D}} + \frac{1}{\alpha_a \cdot d_{a,D}} \right) \cdot \frac{1}{\pi} \quad 3.4$$

Die Abbildung 3.3 zeigt eine Zeichnung der Kupferanschlussleitung, die sich innerhalb der Dämmung befindet. Diese Zeichnung enthält die Positionen der relevanten Maßangaben zur Berechnung des $U_{L,R}$.

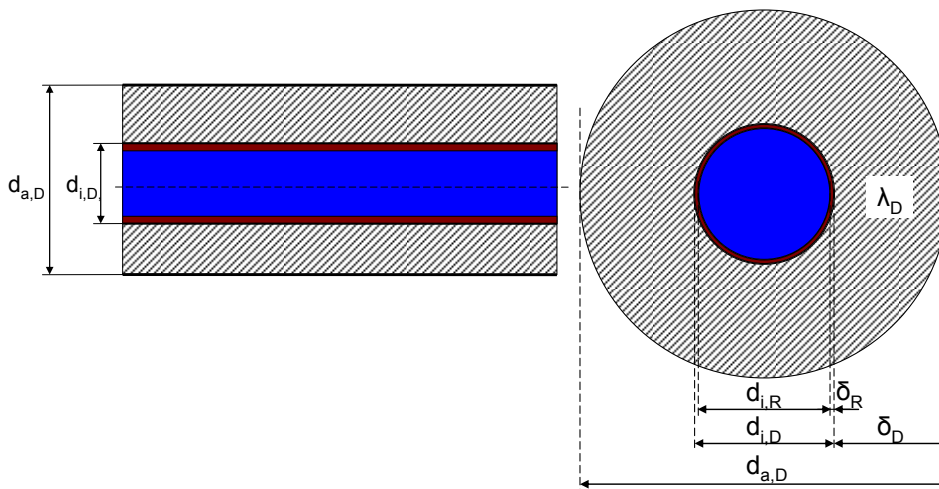


Abbildung 3.3: Zeichnung der Anschlussleitung mit Dämmung

Der innere Durchmesser der Dämmung $d_{i,D}$ ist gleichzeitig der Außendurchmesser des Rohres. Der Außendurchmesser $d_{a,D}$ ist die Summe von Innendurchmesser $d_{i,D}$ und der zweifachen Stärke der Dämmung δ_D . Die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung λ_D wird als konstant angenommen. Der Wärmeübergangskoeffizient α_a an die Umgebung beträgt $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ für alle Speichertemperaturen. Weitere Angaben zum Dämmmaterial befinden sich in der Tabelle 0.2 im Anhang.

Wenn alle notwendigen Werte für die Berechnung des Wärmeverluststromes Q_V bestimmt sind, können die Beträge der Wärmeverluste für jeden einzelnen Rohrabschnitt ermittelt werden. Der Wärmeverluststrom wird auf Basis der Messung nach der Gleichung 3.5 berechnet.

$$\dot{Q}_{V_i, Mess} = T_{x_i, Mess} \cdot x_i \cdot U_{L,R} \quad 3.5$$

Dann wird der gesamte Wärmeverluststrom durch Addition der für jeden einzelnen Rohrabschnitt ermittelten Wärmeverluste berechnet. Abschließend erfolgt die Ermittlung des Wärmeverlustkoeffizienten UA durch Bezug auf die Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Umgebung nach der Gleichung 3.6.

$$UA = \frac{\sum \dot{Q}_{V_i, Mess}}{(T_{Sp} - T_{um})} \quad 3.6$$

Als Speichertemperatur wird die Temperatur der Tauchhülse am Rücklauf zum Thermostat T_e definiert, die im stationären Zustand erfasst wird.

Am Ende der Auswertung werden die Wärmeverlustströme und Wärmeverlustkoeffizienten von drei Speichertemperaturen miteinander und mit den Auswertungsdaten von anderen Anordnungen verglichen.

3.2.3. Stationäre Auswertung mittels Ausgleichsfunktion

Auf Basis der Messwerte werden polynomische Ausgleichsfunktionen gebildet. Dafür wird die Excel-Funktion RGP verwendet. Diese Funktion berechnet die Statistik für eine Linie nach der Methode der kleinsten Quadrate, um eine Linie zu berechnen, die am besten an die Daten angepasst ist. [Office_RGP] Für die Zwecke dieser Untersuchung wird eine Polynomfunktion sechsten Grades verwendet. Um die sogenannten Funktionsparameter der Polynome zu ermitteln, werden folgende Messdaten benötigt:

- die Temperaturdifferenz zwischen dem Rohr und der Umgebung (aus der Messung);
- der Abstand zwischen dem vorangegangenen und nachfolgenden Sensorpaar x_i .

Die auf Basis der Ausgleichsfunktion ermittelten Temperaturdifferenzen lassen für die jeweiligen Rohrabschnitten nach den Gleichung 3.7 berechnen.

$$T_{x_i, Fkt} = \frac{\Delta T_{n_{i-1}, Fkt} + \Delta T_{n_i, Fkt}}{2} \quad 3.7$$

Der Wärmeverluststrom wird auf Basis der Ausgleichsfunktion mittels der Gleichung 3.8 berechnet.

$$\dot{Q}_{V_i, Fkt} = T_{x_i, Fkt} \cdot x_i \cdot U_{L,R} \quad 3.8$$

Zur Berechnung des Wärmeverluststromes nach der Funktion werden dieselben Längen der jeweiligen Rohrabschnitte x_i und derselbe $U_{L,R}$ -Wert verwendet.

Mit dem bekannten Wert der Speicherverluste werden die Wärmeverlustkoeffizienten für jede einzelne Speichertemperatur nach der Gleichung 3.9 ermittelt. Die Werte der Speicher- und der Umgebungstemperatur werden wieder aus den Messdaten genommen.

$$UA = \frac{\sum \dot{Q}_{Vi,Fkt}}{(T_{Sp} - T_{um})} \quad 3.9$$

Anschließend lassen sich die auf Basis der Messung berechneten Werte für Q_V und UA mit den auf Basis der Funktion ermittelten Werten vergleichen.

4. Untersuchte Prüflingskonfigurationen

4.1. Waagrechte Ausrichtung

Die Abbildung 4.1 illustriert den hydraulischen Aufbau des Messstandes bei der waagrechten Anordnung des Anschlussrohres.

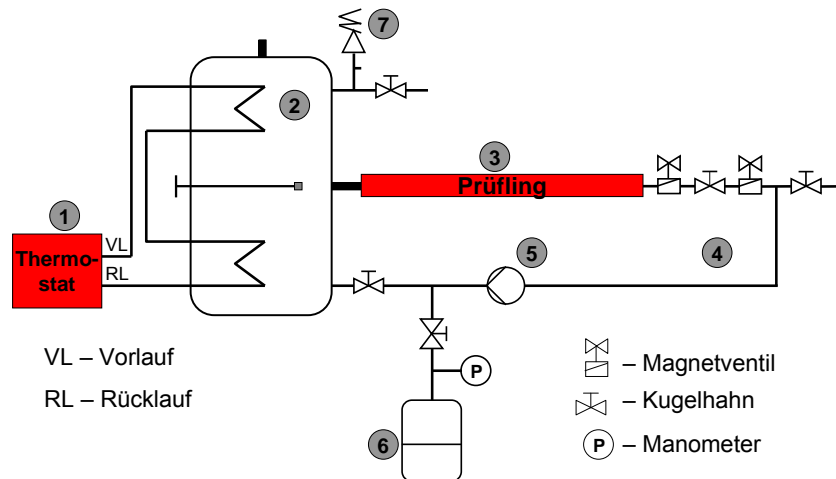


Abbildung 4.1: Hydraulischer Aufbau des Messstandes bei der waagrechten Anordnung des Anschlussrohres

Die Information über alle Bestandteile, wie z.B. Speicher, Thermostat und Druckhaltevorrichtungen, befindet sich im Kapitel 3.1. Die Länge des horizontalen Anschlussrohres, in welchem die Ausbreitung der ERZ erforscht wird, beträgt 6,7 m. Diese Länge ist erforderlich, damit der Prozess der ERZ bis zur vollständigen Auskühlung betrachtet werden kann.

Wie es bereits im Abschnitt 3.1 beschrieben wird, variieren die Anzahl und die Positionen der Temperaturfühler von Aufbau zu Aufbau. Bei der waagrechten Anordnung werden vier Sensoren auf dem Speichermantel um den Anschlussstutzen herum, einer im oberen Teil und noch einer im unteren Teil des Speichers installiert. Des Weiteren messen noch vier weitere Sensoren die Temperatur des Anschlussstutzens. Auf der ganzen Anschlussleitung werden insgesamt 32 Temperaturfühler installiert, damit die Ausprägung der ERZ beim waagrecht ausgerichteten Rohr möglichst präzise charakterisiert werden kann.

4.2. Senkrechte Ausrichtung

Der schematische Aufbau des Messstandes bei der vertikalen Ausrichtung des Anschlussrohres wird in der Abbildung 4.2 dargestellt.

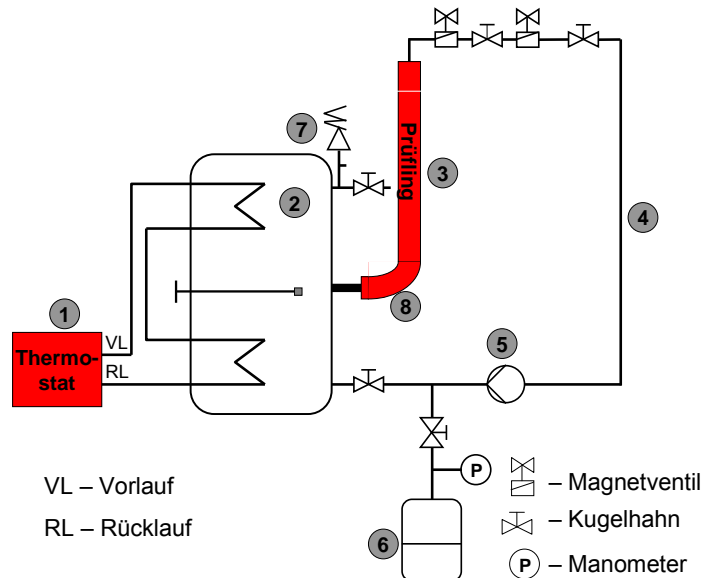


Abbildung 4.2: Hydraulischer Aufbau des Messstandes bei der senkrechten Anordnung des Anschlussrohres



Abbildung 4.3: 90° Bogen

Für die senkrechte Ausrichtung des Prüflings (3) wird ein zusätzliches Einbauteil, genauer ein 90° Bogen (8), zwischen dem Anschlussstutzen und dem Prüfling aufgebaut. Dieser Bogen wird auf der Abbildung 4.3 illustriert. Der Temperaturverlauf im Bogen wird durch zwei Sensorpaare, bzw. vier Temperaturfühler, aufgenommen. Bei dieser Anordnung beträgt die Länge des Rohres nur 3,5 m, da eine längere Anschlussleitung wegen der Raumhöhe des Labors, nicht möglich ist.

Bei der senkrechten Ausrichtung des Rohres wird die Temperatur des Speichermantels sowie des Anschlussstutzens auf gleicher Art gemessen wie beim horizontal aufgebauten Prüfling. Die Erfassung des Temperaturverlaufs im Rohr erfolgt mit Hilfe von 12 Sensorpaaren.

4.3. Kombination aus waag-, senk- und waagrechter Ausrichtung

Die Ausbreitung der ERZ in der segmentierten Anschlussleitung wird zuerst bei einer Kombination von waag-, senk- und waagrechten Rohrsegmenten untersucht. Die Ausrichtungen und Längen der einzelnen Segmente sind in der Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Eigenschaften der Kombination 1

	Ausrichtung des Segments	Länge des Segments
1. Segment:	waagrecht	1025 mm
2. Segment:	senkrecht	1030 mm
3. Segment:	waagrecht	1025 mm

Im Weiteren wird diese Kombination aus waag-, senk- und waagrechten Ausrichtungen als Kombination 1 gekennzeichnet.

Der hydraulische Aufbau des Messstandes bei der Kombination 1 wird auf der Abbildung 4.4 gegeben.

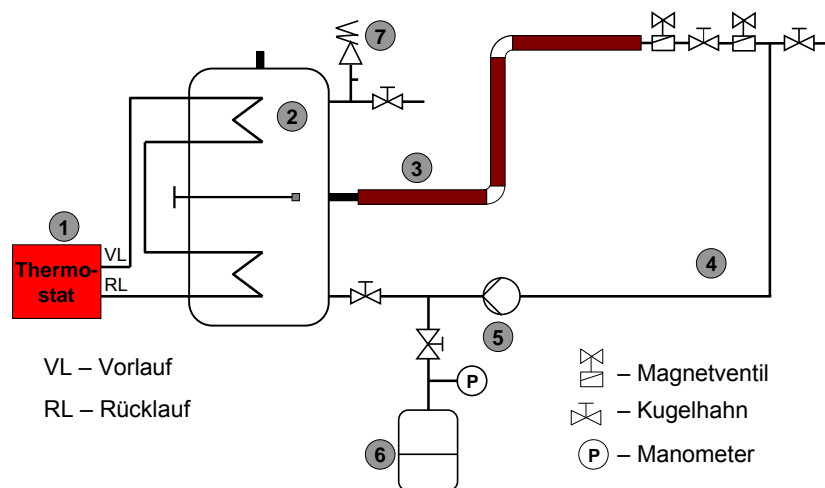


Abbildung 4.4: Hydraulischer Aufbau des Messstandes bei Kombination 1

Der Prüfling wird auf der Abbildung 4.4 mit der Nummer (3) gezeichnet. Die Erläuterung der anderen Bestandteile befindet sich im Abschnitt 3.1.

Aus der Abbildung 4.4 kann man ersehen, dass das erste waagrechte Stück des Prüflings zum Speicheranschlusssutzen angeschlossen wird, der sich auf halber Speicherhöhe befindet. Dann wird dieses Segment mit einem senkrechten Rohr durch eine Quetsch-Verbindung verknüpft. Der dritte Abschnitt des Anschlussrohres wird wieder waagrecht ausgerichtet und

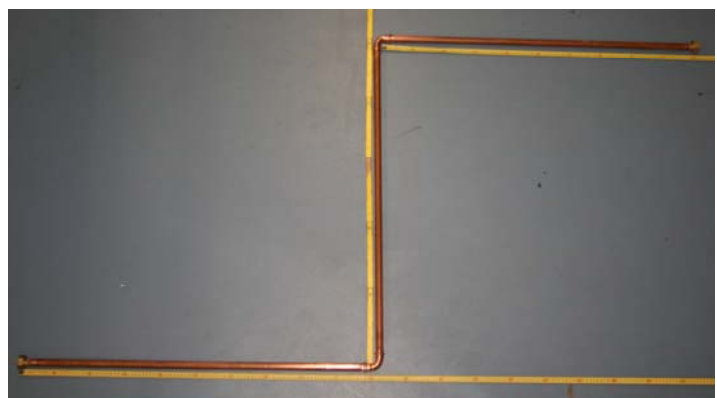


Abbildung 4.5: Foto der Kombination 1

mit dem vorherigen vertikalen Rohrsegment gequetscht. Das letzte Rohrsegment ist mit der Rücklaufleitung verbunden, deren Aufbau im Kapitel 3.1 gegeben wird. Auf der

Abbildung 4.5 sind drei bereits miteinander verbundene Rohrsegmente zu erkennen. Bei der Kombination 1 wird der Speicher und sein Anschlussstutzen genauso mit den Temperatursensoren bestückt wie bei der rein waagrechten Anordnung des Prüflings (vgl. Kapitel 4.1).

Bei dieser Art der Kombination werden insgesamt 17 Sensorpaare auf dem ganzen Prüfling aufgebracht. Deren Benennungen, Positionen und Abstände sind auf der Abbildung 4.6 schematisch gezeigt.

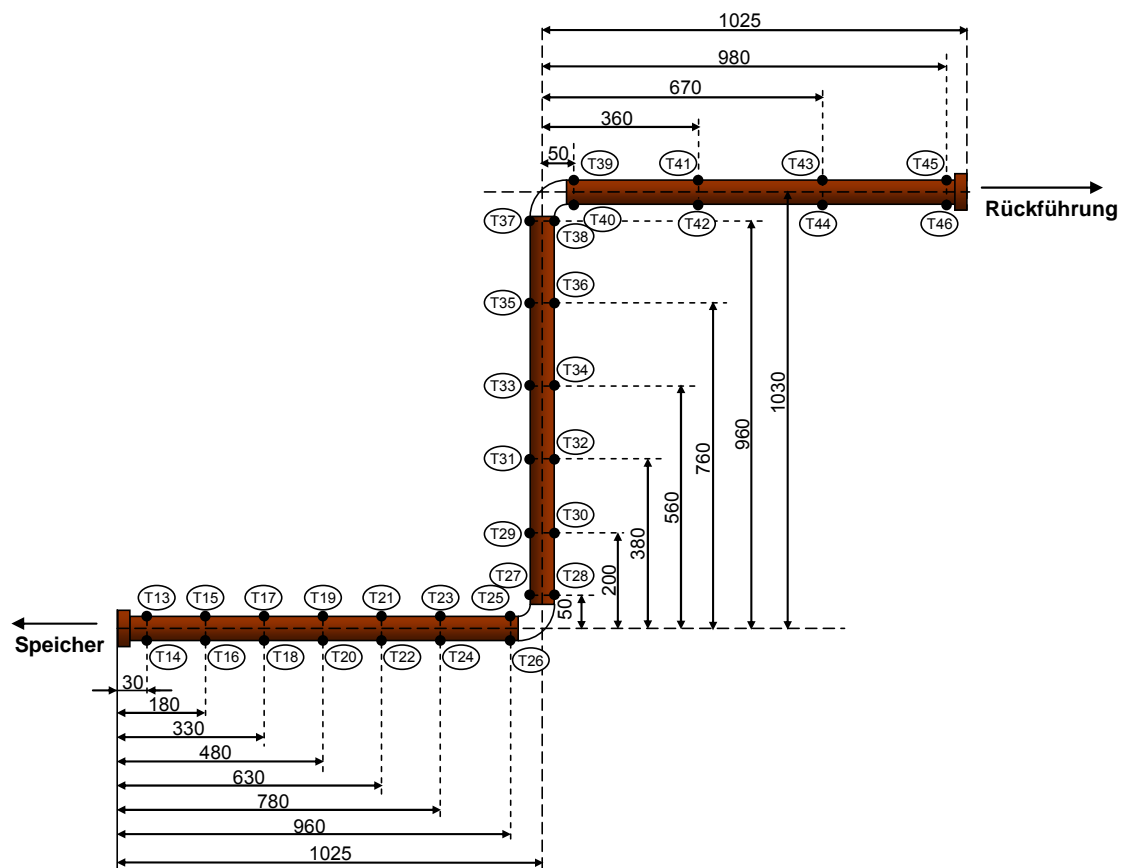


Abbildung 4.6: Sensorpositionen des Anschlussrohres bei Kombination 1

Der experimentelle Aufbau der Konfiguration 1 sowie die Positionen der verwendeten Temperatursensoren sind in der Abbildung 4.6 skizziert. Die Zeichnung von der Abbildung 4.6 unterscheidet sich vom realen Messaufbau nur unwesentlich.

Die Ausbreitung der ERZ im ganzen Anschlussrohr wird mit Hilfe von 34 Temperaturfühler bestimmt, um ein belastbares und möglichst genaues Ergebnis zu erhalten.

Wegen des stärkeren Temperaturabfalls über die Länge des ersten Rohrsegments werden 14 Temperaturfühler zur Aufnahme des Temperaturverlaufs installiert, um diesen möglichst genau charakterisieren zu können. Die Ausbreitung der ERZ im zweiten Rohrabschnitt wird mit Hilfe von sechs Sensorpaaren ermittelt. Das letzte Rohrsegment besitzt nur vier Sensorpaare.

4.4. Kombination aus senk und waagrechter Ausrichtung

Ein besonderes Merkmal der zweiten Variante der Rohrkombination besteht darin, dass das Anschlussrohr dem Speicherdeckel entsteigt. Die Abbildung 4.7 stellt einen Deckelanschlussstutzen dar. In diesem Fall besteht der Prüfling nur aus zwei Segmenten:

Tabelle 4.2: Eigenschaften der Kombination 2

	Ausrichtung	Länge
1. Segment:	senkrecht	1025 mm
2. Segment:	waagrecht	3000 mm

Im Weiteren wird diese Anordnung als Kombination 2 bezeichnet.

Die Abbildung 4.8 spiegelt den hydraulischen Messaufbau der Rohrkombination 2 wider.



Abbildung 4.7: Anschlussstutzen auf dem Speicherdeckel

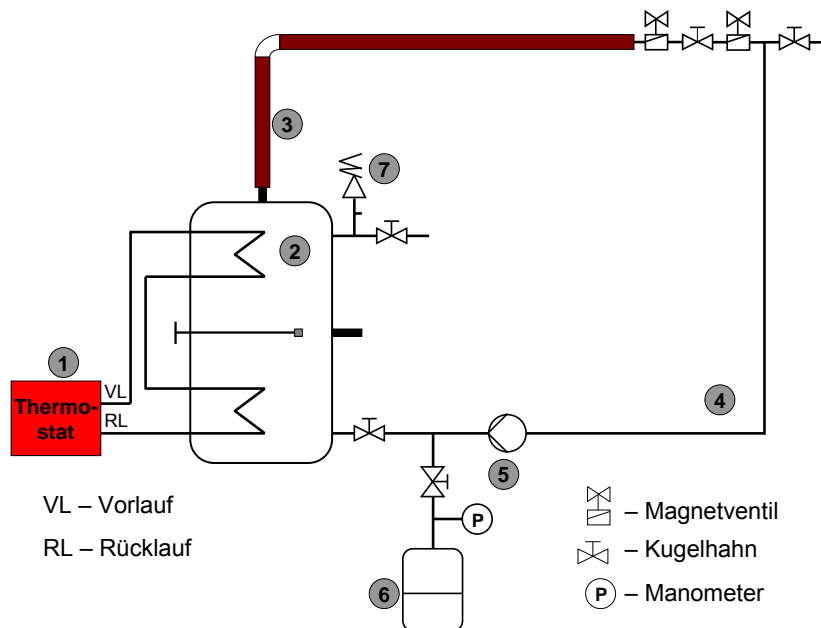


Abbildung 4.8: Hydraulischer Aufbau des Messstandes bei Kombination 2

Analog zur Abbildung 4.4 wird der Prüfling auf der Abbildung 4.8 mit Nummer (3) bezeichnet. Der Abbildung 4.8 kann entnommen werden, dass der erste Rohrabschnitt mit dem Deckelanschlussstutzen verbunden und senkrecht angeordnet ist. Anschließend wird er mit einem waagrechten Rohr durch eine Quetsch-Verbindung verknüpft. Das zweite Segment ist fast dreimal so lang wie das vertikale Rohrstück.

Der messtechnische Aufbau der Kombination 2 unterscheidet sich unwesentlich vom Aufbau der ersten Rohrkombinationsvariante. In diesem Fall werden vier Sensoren um den Deckelanschlussstutzen, einer wieder am oberen Teil und ein weiterer am unteren

Teil des Speichers platziert. Der Anschlussstutzen des Deckels ist nur halb so lang wie derjenige, der bei der Kombination 1 verwendet wird. Deswegen ist nur ein Sensorpaar auf ihm installiert. Die Abbildung 4.9 auf der nachfolgenden Seite illustriert die Bezeichnungen und die Positionen der Temperatursensoren bei der Kombination 2.

Das gesamte Anschlussrohr ist um ein Meter länger als bei der Kombination 1. Aufgrund dessen wird der Temperaturverlauf im Prüfling durch 36 Temperaturfühler aufgenommen (ein Sensorpaar mehr).

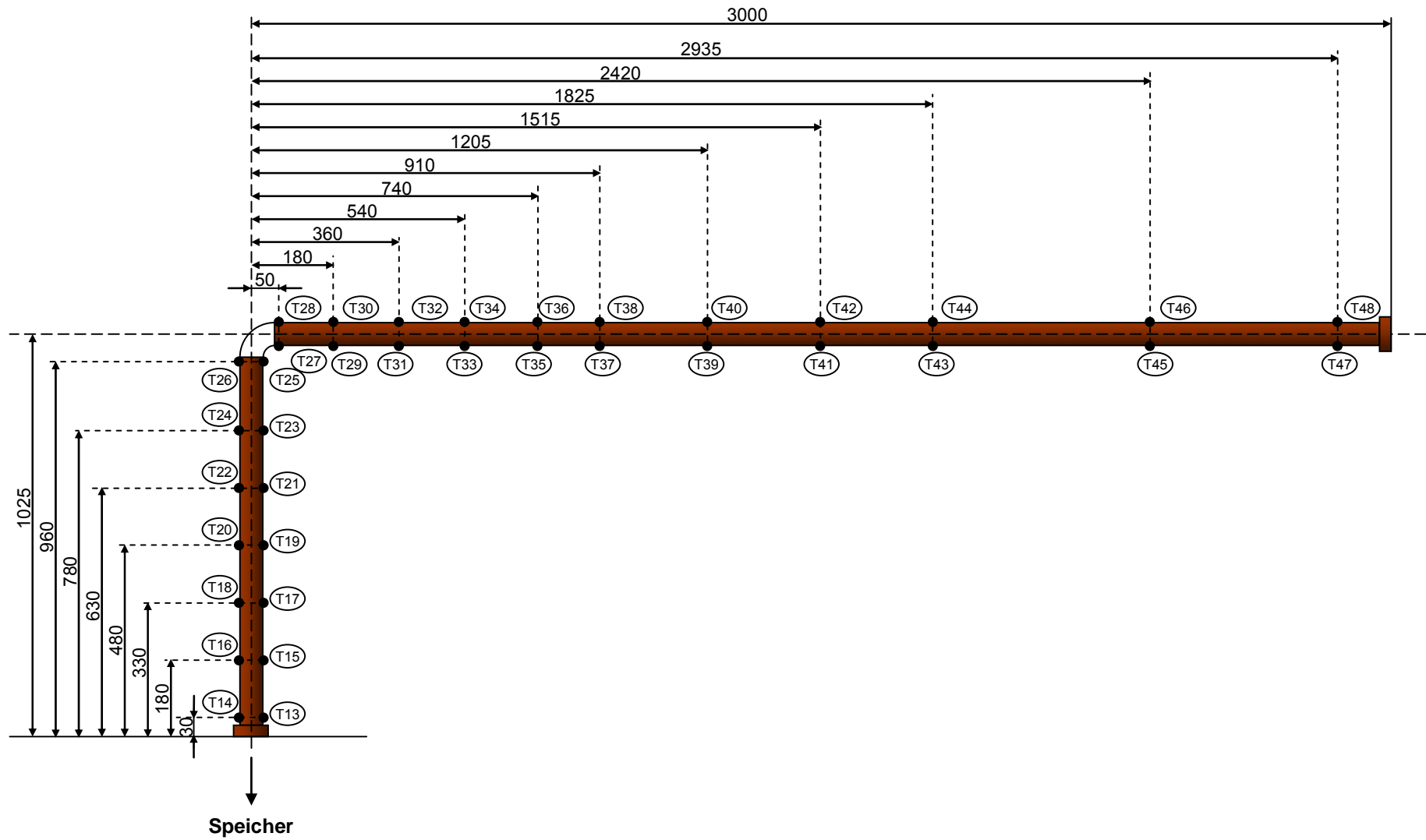






Abbildung 4.9: Sensorpositionen des Anschlussrohres bei Rohrkombination 2

4.5. Zusammenfassung der Varianten

Die durchgeführten Messungen werden in folgender Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Zusammenfassung durchgeführter Messungen

Prüfling: Kupferrohr 22 x 1 mm mit 25 mm Dämmstärke			
Foto Versuchsaufbau	Ausrichtung des Rohres		
	1. Segment	2. Segment	3. Segment
	waagrecht (6700 mm)	-	-
	senkrecht (3500 mm) vom Seitenan- schlussstutzen	-	-
	waagrecht (1025 mm)	senkrecht (1030 mm)	waagrecht (1025 mm)
	senkrecht (1025 mm) vom Deckelan- schlussstutzen	waagrecht (3000 mm)	-

5. Messergebnisse

Bei der Bewertung von Temperaturverläufen hinsichtlich ERZ kann grundlegend festgehalten werden:

- je weiter eine Temperature Ausbreitung auf dem Prüfling feststellbar ist, desto weiter ist auch die Ausprägung der ERZ im Rohr und
- je größer die Fläche zwischen dem Temperaturverlauf auf dem Prüfling und der Umgebungstemperatur, desto höher ist der durch die betreffende Anschlusskonfiguration verursachte Wärmeverlust am Speicher.

5.1. Temperaturverläufe bei waagrechter Anordnung

Die Abbildung 5.1 zeigt die Temperaturverläufe nach unterschiedlicher Auskühlzeit, wenn der Prüfling waagrecht angeschlossen und der Speicher auf 90 °C erhitzt wird.

Auf der Abszissenachse der Abbildung 5.1 werden die Entfernungen der Temperaturfühler vom Anfangspunkt des Anschlussrohres aufgetragen. Der Nullpunkt der Abszisse befindet sich genau auf dem Anfangspunkt des Prüflings. Im positiven Bereich der Abszisse sind die Positionen der Temperatursensoren vom Anschlussrohr dargestellt. Die Positionen der Temperatursensoren vom Speicheranschlussstutzen werden in negativer Richtung aufgetragen. Auf der Ordinatenachse wird eine Celsius-Temperaturskala (von 20 °C bis 100 °C) dargestellt. Diese Achsenbeschreibung ist für alle Abbildungen geeignet, die die Temperaturverläufe in den Anschlussleitungen darstellen.

Die Abbildung 5.1 enthält sechs verschiedene Kurven, jede von ihnen zeigt den gemessenen Temperaturverlauf zu einem bestimmten Zeitpunkt nach Beginn der Messung (0 h, 0.33 h, 1 h, 3 h, 7 h und 13 h). Die siebte Kurve (gerade dunkelgrüne Linie) stellt die gemittelte Umgebungstemperatur (T_{um}) dar.

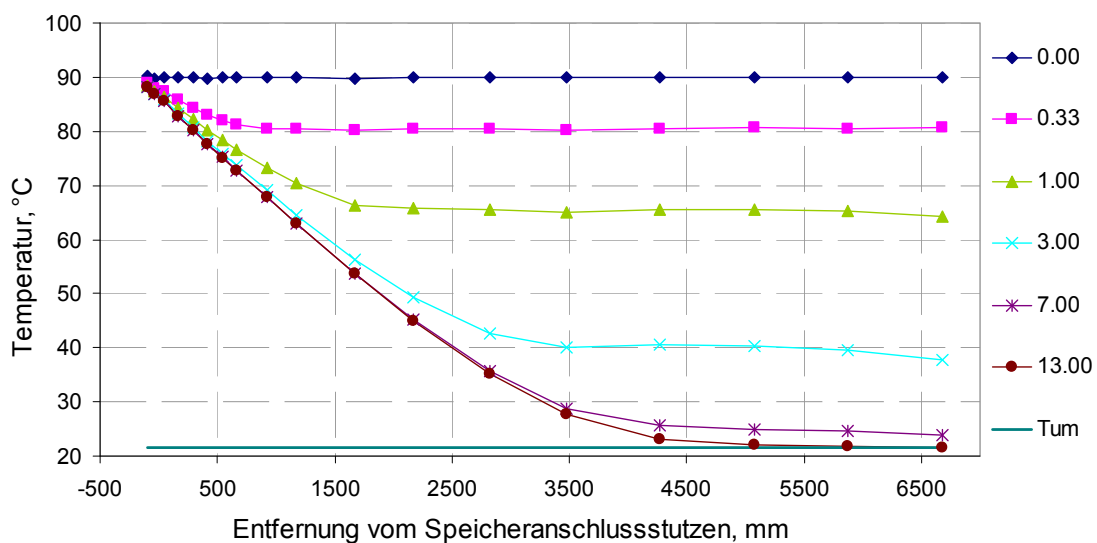


Abbildung 5.1: Temperaturverläufe bei waagrecht angeschlossenem Prüfling nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp} = 90 \text{ °C}$)

Zu Beginn der Messung (0 h) zeigen alle Sensoren die gleiche Temperatur, bzw. die Rohrtemperatur ist gleich der Speichertemperatur. Nach 20 min (0,33 h) ist die Temperatur in großen Bereichen (ca. 5500 m) des Anschlussrohres bereits um 9-10 K abgefallen, im Anschlussstutzen und im vorderen Bereich des Rohres bildet sich ein abfallender Verlauf. Damit treten bereits hier die Wärmeübertragungsvorgänge aus dem Speicher in das Messrohr auf. In drei Stunden nach dem Messungsbeginn ist ca. die Hälfte der gesamten Anordnung beeinflusst durch die Wärmeübertragungsvorgänge, die im Wesentlichen aus der ERZ bestehen. Der Temperaturverlauf nach 13 Stunden unterscheidet sich nur minimal vom Verlauf nach 7 Stunden. Zum Schluss der Messung ist der Temperaturverlauf stationär, bzw. die Rohrtemperatur ist zum Ende hin bis zur Umgebungstemperatur abgefallen.

Auf der Abbildung 5.1 ist deutlich erkennbar, dass die ERZ sich bis fünf Meter im Rohr ausdehnt (z.B. in 4,5 m Entfernung vom Anfangspunkt beträgt die Rohrtemperatur im stationären Zustand (nach 13 h) noch 23 °C, welche noch um ca. 1 °C höher als Umgebungstemperatur ist).

Die instationären Temperaturverläufe bei $T_{Sp} = 40\text{ °C}$ und $T_{Sp} = 65\text{ °C}$ befinden sich im Anhang.

5.2. Temperaturverläufe bei senkrechter Anordnung

Auf der Abbildung 5.2 werden die Temperaturverläufe bei der vertikalen Ausrichtung des Prüflings nach unterschiedlicher Auskühlzeit dargestellt. Die Speichertemperatur beträgt wieder 90 °C. Das Achsensystem ist identisch wie auf der Abbildung 5.1.

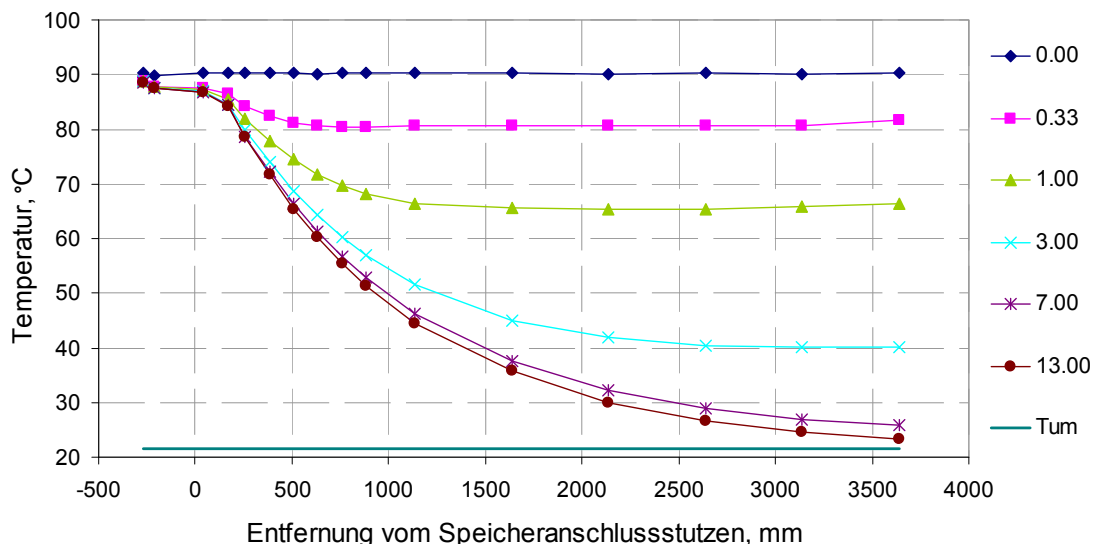


Abbildung 5.2: Temperaturverläufe bei senkrecht angeschlossenem Prüfling nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp} = 90\text{ °C}$)

Die erste dunkelblaue Kurve der Abbildung 5.2 zeigt, dass die Rohrtemperatur am Anfang der Messung gleich der Speichertemperatur ist. Das senkrechte Anschlussrohr kühlt genauso wie das waagrechte Anschlussrohr innerhalb von 20 min um 10 K ab. Nach einer Stunde sinkt die Rohrtemperatur um ca. 23 K. Zu diesem Zeitpunkt wird ein

Drittel des Anschlussrohres durch den Wärmeübertragungsvorgang der ERZ beeinflusst. Noch zwei Stunden später beträgt die Temperatur am Ende des Prüflings bereits 40 °C . Vergleichbar mit Abkühlverhalten der waagrechten Ausrichtung unterscheidet sich der Temperaturverlauf nach 13 Stunden bei der senkrechten Ausrichtung nur ein wenig vom Temperaturverlauf nach 7 Stunden. Zum Ende der Messung erreicht der Temperaturverlauf auf den 3,5 m Rohrlänge die Umgebungstemperatur nicht, welche bei ca. $21,5\text{ °C}$ liegt. Die Rohrtemperatur fällt im stationären Zustand bei 90 °C Speichertemperatur nur bis $23,5\text{ °C}$ ab. Da die vollständige Auskühlung über die Länge des Messrohres nicht erreicht wird, werden die Messwerte weiter linear extrapoliert bis die Umgebungstemperatur erreicht wird. Die Extrapolation sollte durchgeführt werden, bis die Rohrtemperatur gleich der Umgebungstemperatur ist.

Der Abbildung 5.2 kann entnommen werden, dass die Ausbreitung der ERZ im vertikal ausgerichteten Rohr bei 90 °C Speichertemperatur schwächer verläuft als bei der waagrechten Ausrichtung (vgl. Abbildung 5.1), obwohl die vollständige Auskühlung während der Messung nicht erreicht wird. Des Weiteren haben die Kurven des Temperaturverlaufs beim senkrechten Aufbau des Prüflings eine etwas andere Form als bei der waagrechten Anordnung.

Die gleichen Temperaturverläufe wie auf der Abbildung 5.2 aber für die 40 °C und 65 °C Speichertemperaturen befinden sich wieder im Anhang.

5.3. Vergleich der Verläufe der waag- und senkrechten Anordnung

Bei der stationären Auswertung wird die Differenz zwischen der gemittelten Rohrtemperatur und der gemittelten Umgebungstemperatur im stationären Zustand nach der Gleichung 3.2 berechnet. Auf Basis der erhaltenen Werte werden die Verläufe der Temperaturdifferenz ($T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$) für jede Speichertemperatur gebildet, die auf der Abbildung 5.3 dargestellt werden.

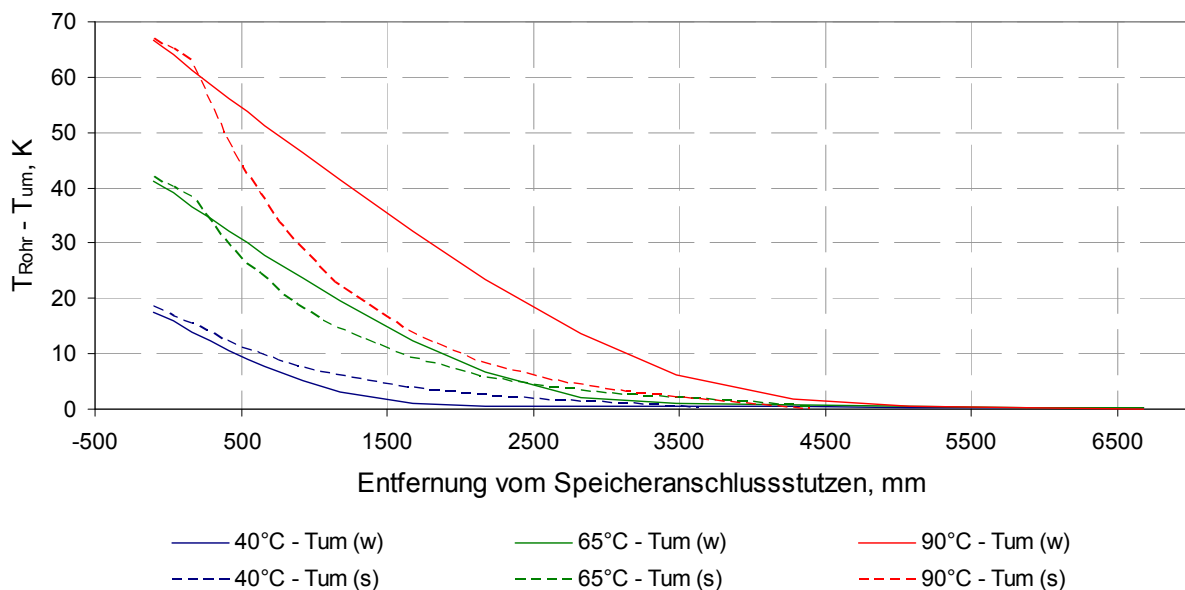


Abbildung 5.3: Temperaturverlauf $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ bei der waagrechten und bei der senkrechten Ausrichtung des Prüflings im Vergleich

Aus der Abbildung 5.3 können folgende Aussagen entnommen werden:

- Die Ausbreitung der ERZ intensiviert sich mit zunehmender Speichertemperatur. Das gilt sowohl für die waagrechte als auch für senkrechte Ausrichtung des Rohres.
- Bei 65 °C und 90 °C Speichertemperatur breitet sich die ERZ stärker im waagrechten Rohr aus als im senkrechten Rohr. Bei z.B. 90 °C Speichertemperatur und bei einer Entfernung von 1500 mm vom Anfangspunkt beträgt die Temperaturdifferenz noch 35 K bei der waagrechten und nur 14 K bei der senkrechten Ausrichtung der Anschlussleitung.
- Die ERZ ist tendenziell in waagrechten Anordnungen stärker ausgeprägt als in senkrechten Anschlussleitung. Die Ursache dafür besteht darin, dass die „sauberen“ gegenläufigen Wasserströmungen beim horizontalen Aufbau des Rohres auftreten. Aber beim senkrechten Aufbau findet eine turbulente Bewegung des Wassers statt, was zur schwächeren Ausbreitung der ERZ führt (s. Kapitel 2.2).
- Bei $T_{Sp} = 40 \text{ °C}$ ($T_{Rohr} - T_{um}$ ca. 20 °C) verlaufen die Temperaturdifferenzen anders als bei den höheren Speichertemperaturen. Bei dieser Speichertemperatur wird die Umgebungstemperatur früher erreicht, wenn das Rohr horizontal ausgerichtet ist. Außerdem ist die Differenz zwischen beiden Kurven bei 40 °C Speichertemperatur viel weniger als bei den 65 °C und 90 °C Speichertemperaturen.

5.4. Temperaturverläufe bei der Kombination 1

Nach der Prognose der Temperaturverläufe, der Wärmeverluste und des Wärmeverlustkoeffizienten auf Basis des theoretischen Berechnungsverfahrens (s. Kapitel 6), werden die Messungen der Rohrkombinationen durchgeführt.

Der Aufbau des Messstandes und die Positionen der Temperatursensoren befinden sich im Abschnitt 4.3. Deswegen wird es sich in diesem Kapitel nur auf die Temperaturverläufe konzentriert. Die Abbildung 5.4 stellt die Temperaturverläufe bei der Kombination 1 nach unterschiedlicher Auskühlzeit bei 90 °C Speichertemperatur dar.

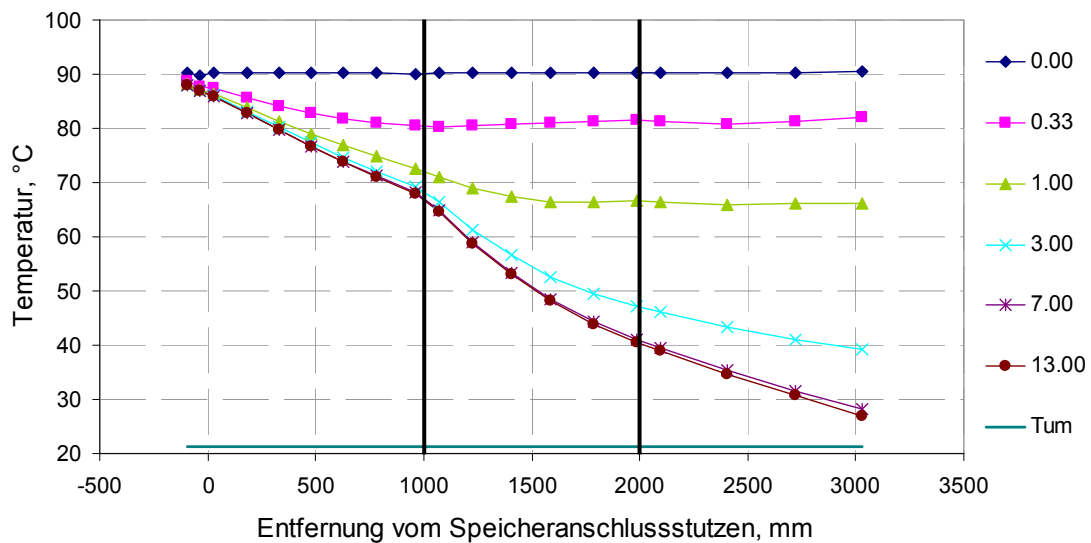


Abbildung 5.4: Temperaturverläufe bei Kombination 1 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=90\text{ °C}$)

Am Anfang beträgt die Temperatur im ganzen Messstand 90 °C , was die dunkelblaue Messkurve der Abbildung 5.4 beweist. Nach 0,33 Stunde tritt ein sinkender Temperaturverlauf im Anschlussstutzen und im vorderen Teil des Rohres (bis 800 mm). Zu diesem Zeitpunkt ist die Temperatur in großen Bereichen des Rohres um 8-9 K abgefallen. Nach 40 min breitet sich der abfallende Verlauf bis zur Hälfte des senkrechten Segments aus. Drei Stunden nach dem Messbeginn beeinflusst die ERZ bereits den ganzen Prüfling. Aus der Abbildung 5.4 kann entnommen werden, dass der Temperaturverlauf im ersten horizontalen Rohrabschnitt sich nach drei Stunden nicht mehr ändert. Der Temperaturverlauf unterscheidet sich im gesamten Prüfling nach 7 Stunden nur noch minimal vom Verlauf nach 13 Stunden.

Für eine detaillierte Analyse des stationären Temperaturverlaufs (13 h), soll die entsprechende Kurve der Abbildung 5.4 dreifach visuell geteilt werden. Der erste Teil (von 0 mm bis 1000 mm) stellt einen typischen Temperaturverlauf in der waagrechten Anschlussleitung dar (vgl. Abbildung 5.1). In diesem Rohrsegment sinkt die Rohrtemperatur von 86 °C auf 65 °C . Der zweite Teil der Kurve (von 1000 mm bis 2000 mm) hat eine deutlich andere Form als der des ersten Abschnitts und stellt einen klassischen Verlauf bei der senkrechten Anordnung dar (vgl. Abbildung 5.2). In diesem Rohrabschnitt fällt die Rohrtemperatur um $25,6\text{ °C}$, obwohl die Anfangstemperatur viel niedriger ist als im ersten Segment. Das ist noch ein Nachweis, dass die ERZ sich intensiver im horizontalen als im vertikalen Rohr bei $T_{Sp} = 90\text{ °C}$ ausbreitet. Der letzte Teil der Kurve (von 2000 mm bis zum Ende) spiegelt den Temperaturverlauf im dritten Rohrsegment wider, das waagrecht ausgerichtet ist. Der Übergang zwischen dem zweiten und dem dritten Segment ist bei Betrachtung des Temperaturverlaufs nicht erkennbar.

Die Abbildung 5.5 illustriert die Temperaturverläufe $T_{Rohr}-T_{um}$ bei 40 °C , 65 °C und 90 °C Speichertemperaturen im stationären Zustand, die auf Basis der Messung gebildet sind.

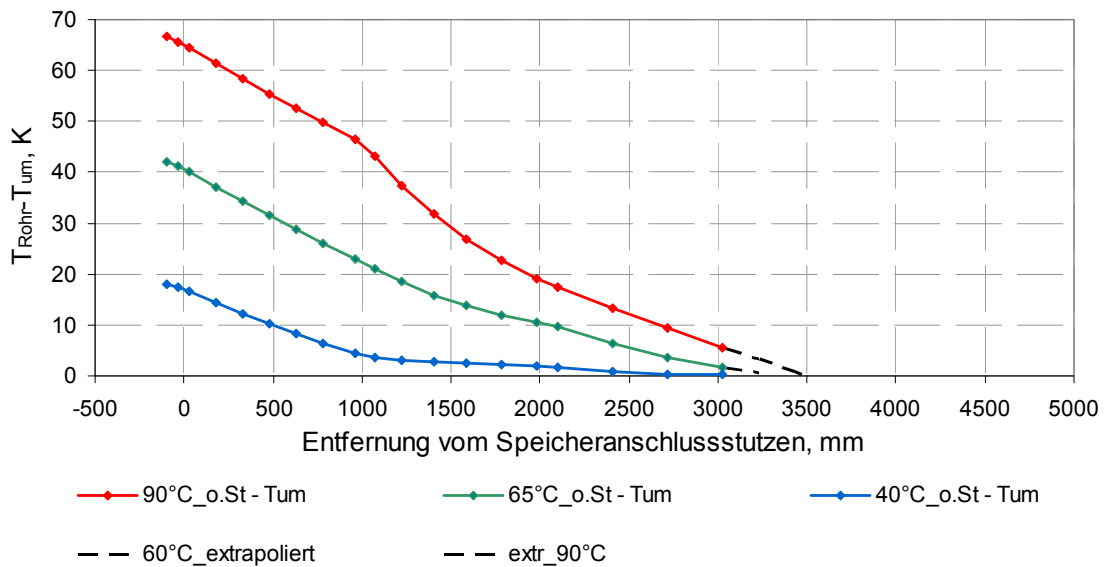


Abbildung 5.5: Temperaturverläufe $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ im stationären Zustand bei Kombination 1

Der Verlauf der Temperaturdifferenz bei 90 °C Speichertemperatur ist analog zum allgemeinen Verlauf im stationären Zustand, der auf der Abbildung 5.4 schon gegeben wird. Hier kann noch einmal darauf hingewiesen werden, dass der große Temperaturabfall bei 90 °C Speichertemperatur im senkrechten Rohrsegment auftritt. Die Abbildung 5.5 zeigt, dass der größte Temperaturabfall bei 65 °C Speichertemperatur im ersten waagrechten Abschnitt erscheint. In diesem Rohrsegment fällt die Temperatur um 19 K ab. Da die Rohrtemperatur im vertikalen Segment näher zur Umgebungstemperatur ist, sinkt die Temperatur hier langsamer und der Temperaturabfall beträgt nur 11,5 K. Aus dem Kapitel 5.3 ist es bereits bekannt, dass sich die ERZ bei 40 °C Speichertemperatur stärker ausbreitet, wenn das Anschlussrohr senkrecht ausgerichtet ist. Auf der Abbildung 5.5 ist diese Eigenschaft deutlich erkennbar. Bei dieser Speichertemperatur sinkt die Rohrtemperatur um 13 K im ersten horizontalen Segment und nur um 2 K im vertikalen Segment.

Bei den 40 °C und 90 °C Speichertemperaturen kann die erste Veränderung der Ausrichtung (vom waagrechten zum senkrechten Rohr) mit bloßem Auge erkannt werden. Der Verlauf der Temperaturdifferenz bei der 65 °C Speichertemperatur stellt eine glatte Kurve dar und die Übergänge zwischen den Segmenten sind kaum zu ersehen. Die Abbildung 5.5 zeigt, dass die vollständige Auskühlung nur bei 40 °C Speichertemperatur erreicht wird. Bei den beiden anderen Speichertemperaturen wird die Umgebungstemperatur nicht erreicht. Es gibt zwei Gründe dafür: höhere Speichertemperaturen und nicht ausreichende Länge des Prüflings. Deswegen wird die lineare Extrapolation durchgeführt. Die auf diese Weise ermittelten Werte werden durch eine schwarz punktierte Linie auf der Abbildung 5.5 veranschaulicht.

Wie es im Kapitel 3.1 beschrieben wird, sind die Sensoren auf der Ober- und Unterseite bei der waagrechten Anordnung und auf der rechten und linken Seite bei der senkrechten Anordnung angebracht. Die Abbildung 5.6 zeigt die Temperaturdifferenz zwischen der Ober- und der Unterseite, bzw. zwischen der rechten und linken Seite, des An-

schlussrohres nach unterschiedlicher Auskühlzeit bei der Speichertemperatur von 90 °C.

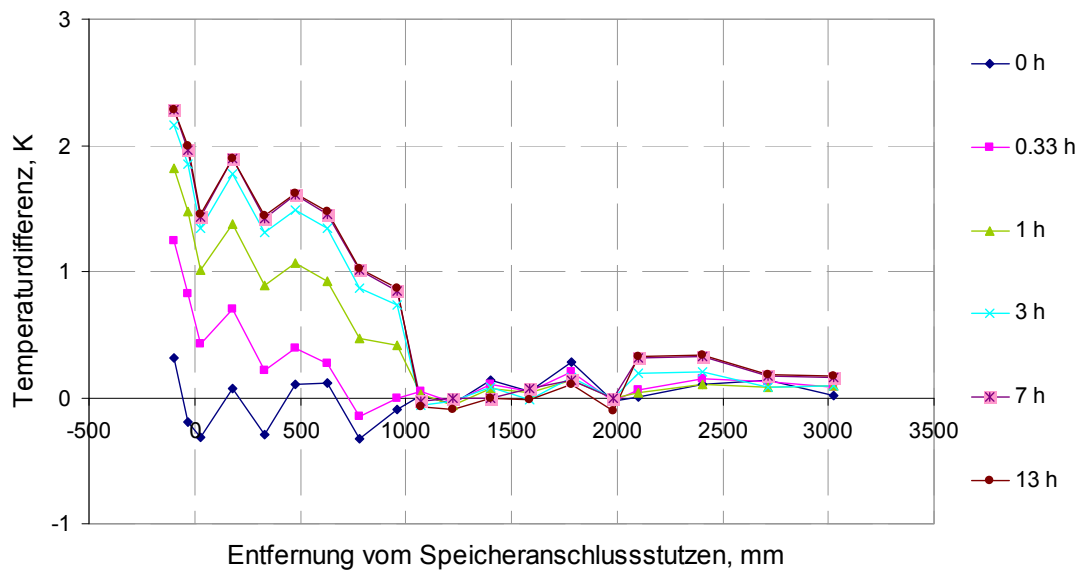


Abbildung 5.6: Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 1 ($T_{Sp} = 90 \text{ °C}$)

Im Kapitel 2.2 wurde beschrieben, dass das abgekühlte Rohrwasser sich unterhalb des warmen Speicherwassers in der waagrechten Anschlussleitung einschichtet (s. Abbildung 2.6). Das bedeutet, dass die Temperatur im oberen Bereich des Rohres höher ist als die Temperatur im unteren Bereich. Bei der senkrechten Ausrichtung tritt eine turbulente Mischung des Wassers auf, die zu den ungefähr gleichen Temperaturen rund um das Rohrstück führt. Die Abbildung 5.6 weist diese zwei Eigenschaften der ERZ auch im hier verwendeten Prüfaufbau nach.

Das Intervall von 0 bis 1000 mm der Abbildung 5.6 entspricht der Temperaturdifferenz zwischen der Ober- und Unterseite des ersten waagrechten Rohrsegments. In diesem Bereich gibt es eine deutlich bemerkbare Temperaturdifferenz zwischen der Ober- und der Unterseite des Rohres ($T_{\text{oben}} - T_{\text{unten}}$). Weiterhin kann Folgendes festgehalten werden: im Laufe der Messung nimmt die Temperaturdifferenz bei der waagrechten Anordnung deutlich zu. Nach drei Stunden beginnt die Temperaturdifferenz fast zu stagnieren: die Temperaturdifferenz nach 3 Stunden unterscheidet sich nur minimal von den Temperaturdifferenzen nach 7 und 13 Stunden. Auf dem zweiten Intervall von 1000 mm bis 2000 mm wird die Differenz zwischen der rechten und der linken Seite des vertikalen Rohrsegments gezeigt. Im ganzen Abschnitt gibt es keine Differenz größer als 0,3 K. Da der dritte Rohrabschnitt waagrecht ausgerichtet ist, entstehen die laminaren Strömungen dort wieder. Aber die Temperaturdifferenz ist nicht so erheblich wie im ersten Segment, weil die Temperatur des dritten Rohrstücks viel niedriger ist als des ersten Stücks.

Die gleichen Diagramme wie in der Abbildung 5.4 und der Abbildung 5.6 aber für 40 °C und 65 °C Speichertemperatur befinden sich im Anhang.

5.5. Temperaturverläufe bei der Kombination 2

Da der Aufbau des Messstandes und die Positionen der Temperaturfühler bei der Kombination 2 schon im Kapitel 4.4 gegeben sind, wird in diesem Abschnitt nur die zeitliche und die räumliche Ausbreitung der ERZ betrachtet.

Die Abbildung 5.7 stellt die Temperaturverläufe bei der Kombination 2 nach sechs unterschiedlichen Auskühlzeiten dar. Die Speichertemperatur beträgt wieder 90 °C . Das Achsensystem und die Kurvenbeschriftungen bleiben unverändert.

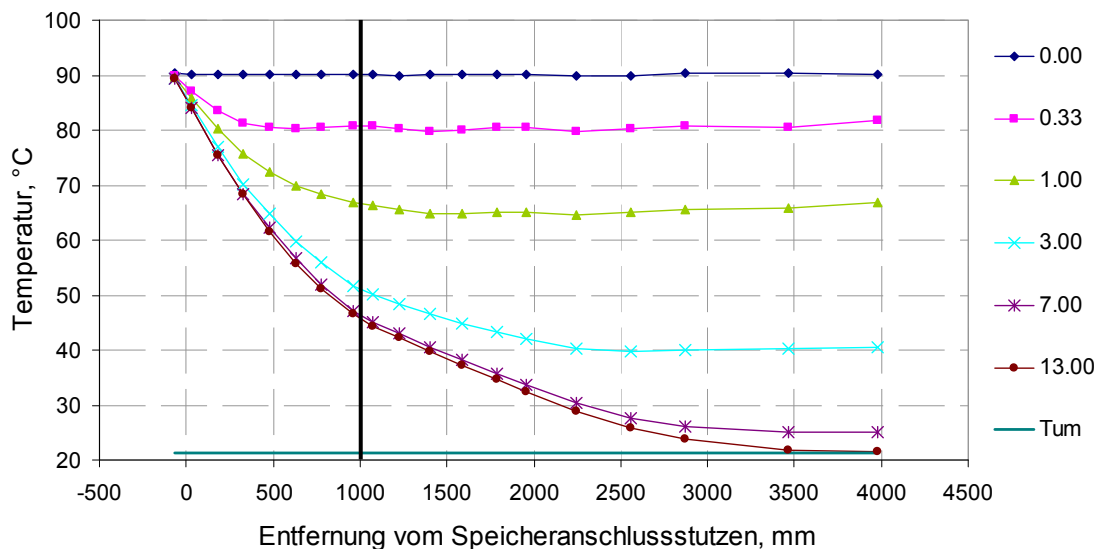


Abbildung 5.7: Temperaturverläufe bei Kombination 2 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=90\text{ °C}$)

Am Anfang der Messung beträgt die Temperatur sowohl im Speicher als auch im Prüfling wieder 90 °C . Nach 20 Minuten fällt die Temperatur in großen Bereichen des Anschlussrohres um 9-10 K. Zu diesem Zeitpunkt tritt der sinkende Temperaturabfall nur im Anschlusstutzen und im Halbtteil des senkrechten Segments auf. Nach 40 Minuten verbreitert sich der sinkende Ablauf bis 1,5 m des Prüflings, während die Temperatur des restlichen Teils ca. 65 °C beträgt. Drei Stunden nach dem Messbeginn werden das ganze senkrechte Segment und die Hälfte des waagrechten Segments durch den Wärmeübertragungsprozess der ERZ beeinflusst. Die Temperatur der anderen Hälfte ist ca. 40 °C . Der Temperaturverlauf im senkrechten Rohrstück unterscheidet sich nach 7 Stunden kaum vom Temperaturverlauf im selben Segment nach 13 Stunden. Trotzdem wird nach 7 Stunden kein stationärer Zustand erreicht. Zu dieser Auskühlzeit beträgt die Temperatur am Ende des gesamten Prüflings noch 25 °C , welche um 4 K höher ist als die Umgebungstemperatur.

Wenn der Temperaturverlauf im stationären Zustand aufmerksam betrachtet wird, kann der Übergang vom senkrechten zum waagrechten Segment durch einen Knick der betreffenden Messkurve auf der Abbildung 5.7 erkannt werden. Im ersten Rohrsegment, das vertikal dem Speicherdeckel entsteigt, fällt die Rohrtemperatur im stationären Zustand von 84 °C auf 44 °C . Im zweiten Rohrabschnitt, der waagrecht ausgerichtet wird,

sinkt die Rohrtemperatur nur um 23 K, obwohl dieser Abschnitt fast dreimal länger ist als vorherige. Das ist ein weiteres Indiz dafür, dass die senkrechte Anordnung der Leitung zur schwächeren Ausbreitung der ERZ im Vergleich mit der waagrechten Anordnung führt.

Auf der Abbildung 5.8 werden die stationären Temperaturverläufe $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{umg}}$ auf Basis der Messung bei den 40 °C, 65 °C und 90 °C Speichertemperaturen illustriert.

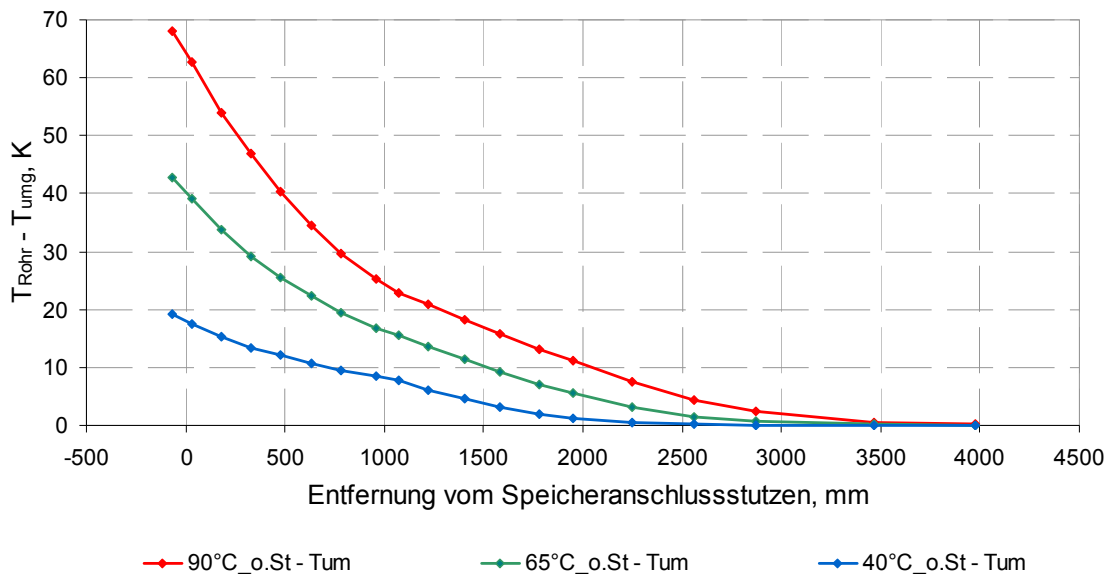


Abbildung 5.8: Temperaturverläufe $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{umg}}$ im stationären Zustand bei Kombination 2

Die blaue Kurve der Abbildung 5.8 illustriert den Verlauf der Temperaturdifferenz bei 40 °C Speichertemperatur. Im stationären Zustand fällt die Temperatur um 11,5 K im vertikalen Abschnitt und um 7,7 K im horizontalen Abschnitt. Der Temperaturabfall im waagrechten Segment ist niedriger als im senkrechten Segment, weil die Rohrtemperatur am Anfang des waagrechten Abschnittes nur um 7,7 K höher ist als die Umgebungstemperatur. Bei $T_{\text{Sp}} = 40$ °C wird die Auskühlung schon in der Hälfte des waagrechten Segments erreicht, was ein bisschen früher ist als bei der Rohrkombination 1. Die rote und die grüne Messkurven spiegeln die Abläufe der Temperaturdifferenz bei 90 °C beziehungsweise 65 °C Speichertemperatur wider. Die Temperaturdifferenz am Prüflingsanfang beträgt 62,7 K bei 90 °C und 39,1 K bei 65 °C Speichertemperatur. Nach einem Meter Entfernung wird die Ausrichtung des Rohres verändert und die Temperaturdifferenz am Anfang des waagrechten Segments beträgt 23 K bei 90 °C und 15 K bei 65 °C Speichertemperatur. Bei 90 °C Speichertemperatur entsteht ein rasanter Temperaturabfall im senkrechten Rohrsegment, welcher die schwache Ausdehnung der ERZ bei derartiger Ausrichtung bestätigt. Diese Aussage gilt auch für 65 °C Speichertemperatur.

Bei 40 °C und 90 °C Speichertemperatur wird der Übergang vom waagrechten zum senkrechten Segment durch einen entsprechenden Kurvenknick auf der Abbildung 5.8 sehr gut erkannt. Da die Kurve der Temperaturdifferenz bei 65 °C Speichertemperatur sehr glatt läuft, kann die Veränderung der Rohrausrichtung nicht wahrgenommen werden.

Im Unterschied zur Konfiguration 1 wird die vollständige Auskühlung bei allen Speichertemperaturen erreicht, weil die Konfiguration 2 mit dem senkrechten Rohrabschnitt anfängt und der gesamte Prüfling ein Meter länger ist als bei der Kombination 1. Deswegen gibt es keinen Grund um Extrapolation anzuwenden.

Die Abbildung 5.9 illustriert die Temperaturdifferenz zwischen rechter und linker Seite, bzw. Ober- und Unterseite des Anschlussrohres.

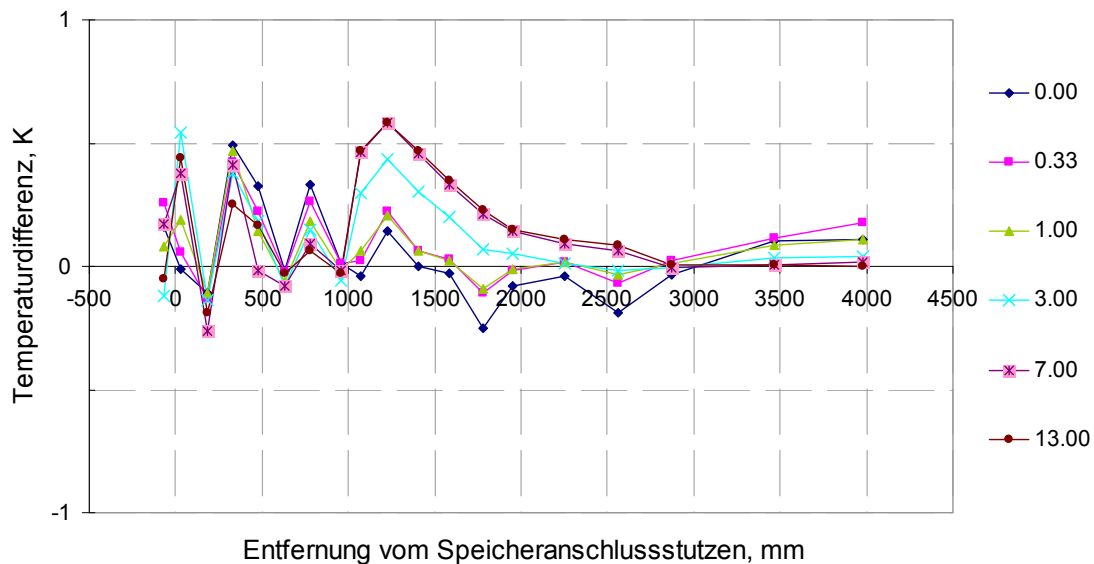


Abbildung 5.9: Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 2 ($T_{Sp} = 90 \text{ °C}$)

In der Temperaturdifferenz zwischen der rechten und der linken Seite des senkrechten Segments können keine Ordnung und keine Regelmäßigkeit festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass eine turbulente Mischung aus dem aufsteigenden warmen und dem absinkenden kalten Wasser in diesem Rohrstück vorliegt. Hier variiert die Temperaturdifferenz von $-0,26 \text{ K}$ bis $0,5 \text{ K}$. Wenn die Ausrichtung des Prüflings wechselt, entsteht eine für den waagerechten Verlauf typische Temperaturdifferenz zwischen der Ober- und der Unterseite des Rohres. Im stationären Zustand beträgt die größte Temperaturdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Bereich des horizontalen Segments nur $0,6 \text{ K}$. Das ist viel niedriger als bei der Rohrkonfiguration 1, weil die „Starttemperatur“ des waagerechten Abschnitts aufgrund des vorgeschalteten senkrechten Segments viel niedriger ist.

Aus der Abbildung 5.9 kann die folgende Analogie entnommen werden: im Laufe der Messung nimmt die Temperaturdifferenz zu. Diese Gesetzmäßigkeit gilt aber nur bis 3 m Entfernung, weil ein Gleichgewicht zwischen dem Prüfling und der Umgebung in diesem Rohrstück fast erreicht wird.

Die Abbildungen der Temperaturverläufe und Temperaturdifferenzen bei 40 °C und 65 °C Speichertemperaturen werden im Anhang dargestellt.

5.6. Vergleich der Verläufe der Kombination 1 und 2

In den zwei vorigen Kapiteln werden die Temperaturverläufe der Kombinationen 1 und 2 unabhängig voneinander diskutiert. Deshalb werden im vorliegenden Abschnitt die Temperaturverläufe dieser Prüflingskonfigurationen zusammengestellt und miteinander verglichen. Die Abbildung 5.10 illustriert die Verläufe der Temperaturdifferenz $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ der Kombination 1 und 2 bei allen drei Speichertemperaturen.

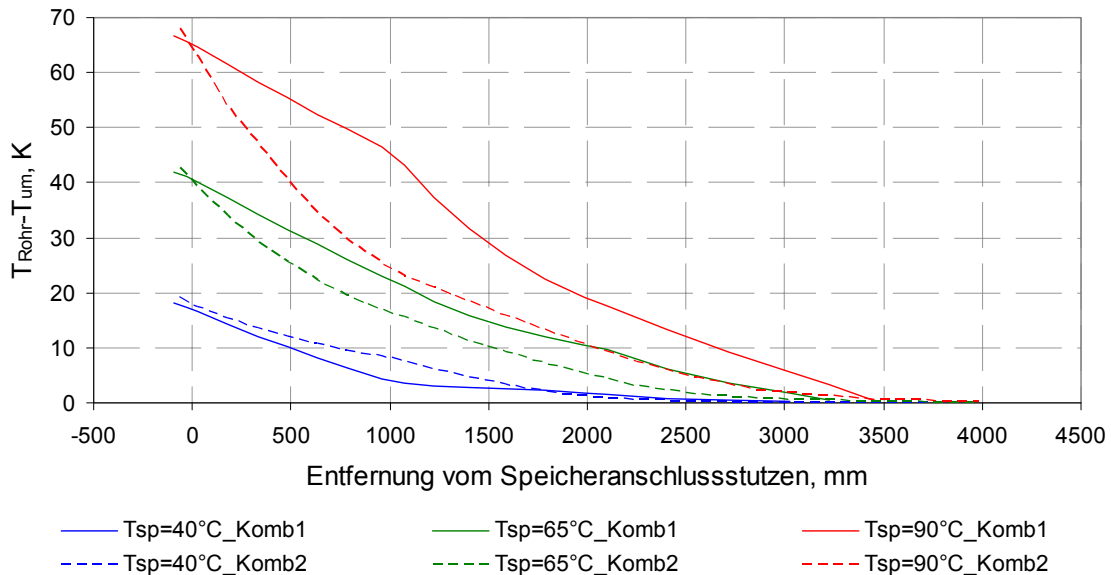


Abbildung 5.10: Temperaturverläufe $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ im stationären Zustand bei Kombination 1 und 2 im Vergleich

Durch Betrachtung der Abbildung 5.10 wird offensichtlich, welcher Prüflingsaufbau zur schwächsten Ausdehnung der ERZ führt und bei welchem die größte Intensität der ERZ auftritt. Es ist klar festzustellen, dass die Anfangstemperaturdifferenz im stationären Zustand bei der Kombination 2 leicht höher als bei der Kombination 1 ist. Trotzdem wird die Umgebungstemperatur im Laufe der Messung bei allen Speichertemperaturen nur bei der Kombination 2 erreicht.

Wenn der Speicher auf 90 °C erwärmt wird, ist die Rohrtemperatur am Ende des ersten Abschnittes bei Kombination 1 um 46 K höher als die Umgebungstemperatur. Bei der Kombination 2 ist der Unterschied zwischen Rohr- und Umgebungstemperatur am Ende des senkrechten Segments viel niedriger und beträgt nur 25 K. Aufgrund der Intensitätsabnahme der ERZ bei der vertikalen Ausrichtung wird ein größerer Temperaturabfall im senkrechten Segment beobachtet. Deswegen ergibt der Temperaturunterschied bei der Kombination 1 in zwei Metern Abstand vom Speicher bereits 19 K. Bei der Kombination 2 ist die Differenz fast halb so hoch und beträgt 10 K. Aus der Abbildung 5.10 ist deutlich zu ersehen, dass die Verläufe der Temperaturdifferenz $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ bei $T_{\text{Sp}} = 65$ °C sich analog zum Verlauf bei 90 °C Speichertemperatur verhalten. Falls der Speicher auf der niedrigeren Temperatur erhitzt wird ($T_{\text{Sp}} = 40$ °C), fällt die Rohrtemperatur bei der Kombination 1 stärker ab als bei der Kombination 2.

Ein senkrechter Abschnitt hat einen Vorteil gegenüber einem waagrechten Abschnitt bei

hohen Temperaturen, da er über die gleiche Länge einen deutlich größeren Temperaturabfall verursacht (vgl. Kapitel 5.3). Der vertikale Abschnitt vom Speicherdeckel verursacht einen großen Temperaturabfall über einen Meter bei hohen Speichertemperaturen, so dass der Temperaturabfall des waagrechten Abschnitts im stationären Zustand von niedrigerer Temperatur beginnt. Deswegen zeigt die Kombination 2 ihre Vorteile bei hohen Speichertemperaturen ($T_{Sp} = 65\text{ °C}$ und 90 °C). Bei niedrigeren Temperaturen hat das senkrechte Segment gegenüber dem waagrechten Segment jedoch einen Nachteil, weil bei geringen Temperaturen eine größere Reichweite im senkrechten Abschnitt auftritt (s. Abbildung 5.3). Aus diesem Grund führt die Rohrkombination 1 bei $T_{Sp} = 40\text{ °C}$ zur schwächeren Ausprägung der ERZ als die Kombination 2.

Je größer die Fläche zwischen dem Temperaturverlauf des Prüflings und der Umgebungstemperatur, oder anders gesagt, je größer die Fläche unter der Kurve des Temperaturdifferenzverlaufs, desto höher ist der durch die betreffende Anschlusskonfiguration verursachte Wärmeverlust am Speicher. Die Verlustkennwerte bei beiden untersuchten Prüflingskombinationen werden im Kapitel 5.7 dargestellt. In der Abbildung 5.10 ist bereits deutlich erkennbar, dass bei der Kombination 2 ein niedrigerer Wärmeverluststrom auftritt als bei der Kombination 1 (nur bei $T_{Sp} = 65\text{ °C}$ sowie 90 °C). Bei 40 °C Speichertemperatur breitet sich die ERZ schwächer aus, wenn der Prüfling mit dem waagrechten Segment anfängt, nämlich bei der Kombination 1. Deshalb kann eine umgekehrte Situation bei $T_{Sp} = 40\text{ °C}$ erwartet werden: die Wärmeverluste bei der Kombination 1 sind niedriger als bei der Kombination 2.

5.7. Wärmeverluste und Wärmeverlustkoeffizienten

Für die weitere Auswertung der Messdaten werden in den einzelnen Anordnungen entstehende Wärmeverluste und Wärmeverlustkoeffizienten bestimmt. Die Wärmeverluste werden für die jeweiligen Speichertemperaturen nach Gleichung 3.5 (s. Kapitel 3.2) ermittelt. Aus den Wärmeverlusten lassen sich dann die Wärmeverlustkoeffizienten nach Gleichung 3.6 (s. Kapitel 3.2) berechnen.

Auf der Abbildung 5.11 werden die Wärmeverlustströme bei vier Aufbauten des Prüflings dargestellt: bei der rein waagrechten, rein senkrechten Anordnung und bei den beiden Rohrkombinationen.

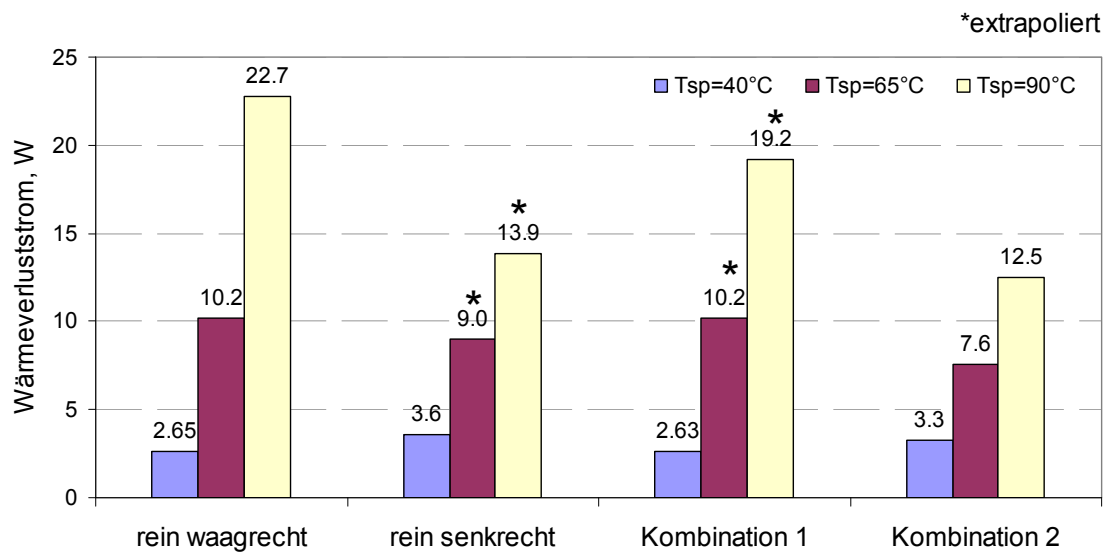


Abbildung 5.11: Wärmeverlustströme für unterschiedliche Anordnungen bei jeweiligen Speichertemperaturen

Bei allen Anordnungen kann folgende Analogie erkannt werden: mit steigender Temperatur nehmen die Speicherverluste für jede Anordnung stark zu. Wird zum Beispiel ein rein horizontales Rohr am Speicher angeschlossen und wird der Speicher auf 90 °C erhitzt, ergeben sich Wärmeverluste von über 23 W. Bei 65 °C Speichertemperatur halbieren sich die Verluste und bei 40 °C betragen sie nur ein Zehntel.

Da der erste Rohrabschnitt der Kombination 1 genau so ausgerichtet wird wie der ganze Prüfling bei der rein waagrechten Anordnung, können gewisse Ähnlichkeiten zwischen den Wärmeverlusten bei diesen beiden Prüflingsaufbauten bemerkt werden. Bei 40 °C Speichertemperatur unterscheidet der Wärmeverluststrom bei der waagrechten Anordnung kaum von den Wärmeverlusten bei der Kombination 1. Wenn $T_{Sp} = 65 \text{ °C}$ ist und der Prüfling ein rein horizontales Rohr darstellt, ergibt der Wärmeverluststrom 10,2 W. Bei der Rohrkombination 1 kann genau dieselbe Höhe der Wärmeverluste bei derselben Speichertemperatur festgestellt werden. Bei 90°C Speichertemperatur ist die Ähnlichkeit zwischen den Wärmeverlusten bei den beiden Anordnungen nicht festzustellen. Bei dieser Speichertemperatur beträgt Q_V 19,2 W bei der Kombination 1. Das ist um 3,5 W niedriger als bei der waagrechten Ausrichtung der Anschlussleitung.

Bei 40 °C Speichertemperatur unterscheidet sich die Höhe des Verluststromes bei der Rohrkombination 2 nur ein wenig von den Wärmeverlusten bei der senkrechten Anordnung. Der Unterschied beträgt nur 0,3 W. Zwischen allen untersuchten Anordnungen erscheinen die höchsten Wärmeverluste beim senkrechten Aufbau des Anschlussrohres ($T_{Sp} = 40 \text{ °C}$). Sie ergeben 3,6 W. Bei 65 °C Speichertemperatur treten die niedrigsten Wärmeverluste auf, wenn das Rohr mit einem Deckelanschlussstutzen verbunden ist (Kombination 2). Sie betragen 7,6 W, was um 2,6 W niedriger ist als bei der Kombination 1. Wenn der Speicher auf 90 °C erwärmt wird, erscheint der größte Verluststrom bei der waagrechten Ausrichtung des Prüflings. Bei dieser Speichertemperatur zeigt die

Rohrkombination 2, mit 12,5 W, die niedrigsten Wärmeverluste zwischen allen untersuchten Prüflingsaufbauten. Das ist um 6,7 W niedriger als bei der Rohrkombination 1 bei derselben Speichertemperatur.

Das wird im Abschnitt 5.6 bewiesen, dass die Rohrkombination 2 gegenüber der Kombination 1 ein Vorteil bei hohen Speichertemperaturen hat: bei $T_{sp} = 65\text{ °C}$ und 90 °C treten die niedrigeren Wärmeverluste bei der Kombination 2 auf im Vergleich mit Kombination 1. Und bei 40 °C Speichertemperatur zeigt die Kombination 1 geringeren Verluststrom als die Kombination 2.

Auf der Abbildung 5.12 werden die Wärmeverlustkoeffizienten dargestellt, die auf Basis der Messwerte mittels der Gleichung 3.6 berechnet werden.

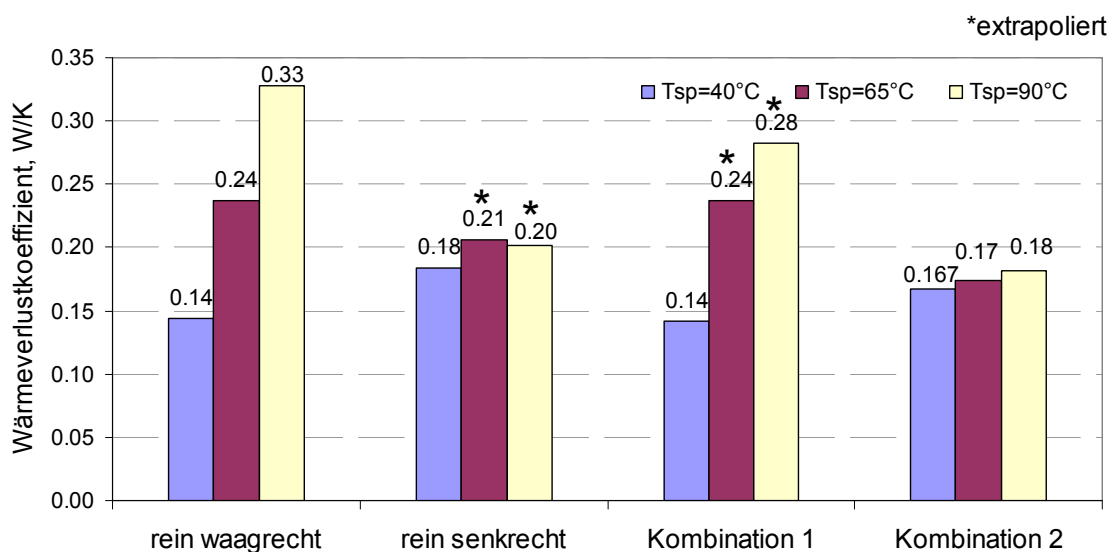


Abbildung 5.12: Wärmeverlustkoeffizienten für unterschiedliche Anordnungen bei jeweiligen Speichertemperaturen

Aus der Abbildung 5.12 kann man die gleiche Analogie wie im Balkendiagramm der Wärmeverlustströmen entnehmen: wird die Temperatur im Speicher erhöht, ergeben sich in der Regel auch höhere Verlustkoeffizienten. Dieser Zusammenhang ist aber bei der senkrechten Ausrichtung nicht eindeutig festzustellen.

Die Wärmeverlustkoeffizienten bei der Rohrkombination 1 zeigen eine gewisse Ähnlichkeit zu den Verlustkoeffizienten bei der waagrechten Anordnung. Bei der Rohrsegmentierung 1 ist der Wärmeverlustkoeffizient bei 40 °C Speichertemperatur genauso hoch wie bei der horizontalen Prüflingsanordnung, nämlich $0,14\text{ W/K}$. Das ist der niedrigste Verlustkoeffizient bei dieser Speichertemperatur zwischen allen untersuchten Anordnungen. Bei 65 °C Speichertemperatur beträgt der Verlustkoeffizient $0,24\text{ W/K}$ bei der Kombination 2, sowie beim rein waagrechten Aufbau der Anschlussleitung. Bei 90 °C Speichertemperatur tritt der größte Wärmeverlustkoeffizient bei der eher waagrechten Anordnung des Rohres auf. Bei der Kombination 1 ist er nur um $0,05\text{ W/K}$ niedriger.

Wenn das Anschlussrohr senkrecht nach oben aufgebaut wird, sind die Wärmeverlustkoeffizienten bei allen Speichertemperaturen fast gleich und jeder beträgt ca. $0,2\text{ W/K}$.

Die gleiche Situation kann bei der Rohrkombination 2 festgestellt werden, bei welcher die Wärmeverlustkoeffizienten aber zwischen 0,17 W/K und 0,18 W/K variieren. Bei der Kombination 2 erscheinen die niedrigsten Wärmeverlustraten bei zwei höheren Speichertemperaturen. Sie betragen 0,17 W/K und 0,18 W/K bei 65 °C, bzw. 90 °C Speichertemperatur.

Die reinen und extrapolierten Q_V - und UA-Werte sind im Anhang C in der Tabelle 0.6 zusammengefasst dargestellt.

6. Verfahren zur Prognostizierung von Temperaturprofilen in Anschlussleitungen mit waag- und senkrechten Abschnitten

Die Ausbreitung der ERZ in Kombination von waag- und senkrechten Rohrstücken kann durch ein im Rahmen dieser Arbeit speziell dafür entwickeltes Berechnungsverfahren prognostiziert werden. Diese Prognose gründet sich ausschließlich auf Messergebnissen der Untersuchungen mit den rein waag- und rein senkrechten Anschlussrohren.

6.1. Aufbereitung der Eingangsdaten und Festlegung der Rohrkombination

Zuerst werden die Messungen mit dem rein waag- und rein senkrechten Anschlussrohr durchgeführt, deren Ergebnisse in Kapiteln 5.1 und 5.2 dargestellt sind. Die Temperaturverläufe $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ von diesen Messungen dienen als Basisdaten, bzw. Input-Daten, im Berechnungsverfahren zur Prognostizierung von Temperaturprofilen in kombinierten Rohrleitungen.

Wie im Kapitel 5.3 gezeigt wird, hängt die Ausdehnung der ERZ stark von der Ausrichtung des Rohres ab (senkrecht oder waagrecht). Bei 65 °C und 90 °C Speichertemperatur ist die Rohrtemperatur in 1 m Abstand vom Speicher bei der waagrechten Ausrichtung höher als bei der senkrechten Anordnung (vgl. Abbildung 5.3). Bei 40 °C Speichertemperatur kann ein gegensätzliches Verhalten betrachtet werden, obwohl die Temperaturdifferenz zwischen beiden Anordnungen viel kleiner ist. Aus diesem Grund kann der Temperaturverlauf im waagrechten Anschlussrohr nicht unmittelbar mit einem Verlauf im senkrechten Rohr verbunden werden, um einen gesamten Temperaturverlauf in der kombinierten Rohrleitung zu erstellen. Der Temperaturverlauf einer Rohrkombination muss so aufgestellt werden, dass die Anfangstemperatur des nachfolgenden Rohrstückes gleich der Endtemperatur des vorherigen Rohrsegments ist.

Die Input- und Output-Daten werden in einem Excel Tabellenblatt zusammengestellt. Der Screenshot von diesem Tabellenblatt wird in der Abbildung 6.1 dargestellt.

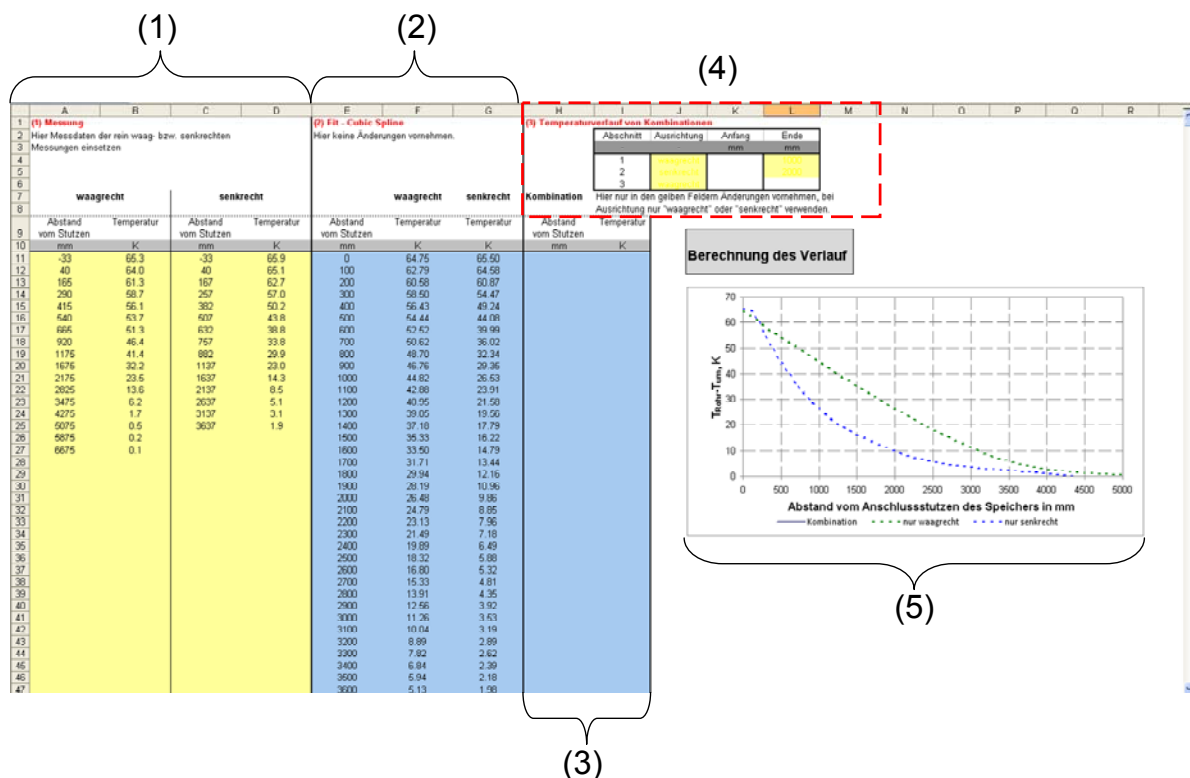


Abbildung 6.1: Screenshot 1 des Excel-Tabellenblattes

1 – Input-Daten: Daten von den Messungen mit rein horizontalen und vertikalen Anschlussrohren, nämlich die Temperaturdifferenz $T_{Rohr} - T_{um}$ über die Rohrlänge bei der entsprechenden Speichertemperatur (hier $T_{Sp} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$).

2 – Die Interpolation der Temperaturdifferenz für fein diskretisierte Rohrabstände mittels der Cubic Spline-Funktion auf Basis der Messdaten. Da aus den Messungen nur eine begrenzte Anzahl von Temperaturdifferenzen vorhanden ist, sollen die Werte dazwischen für die diskretisierten Rohrabstände mittels der Cubic Spline Funktion interpoliert werden. Unter feiner Diskretisierung wird eine solche Strecke verstanden, als ob die Temperatur alle 100 mm auf der Rohrleitung erfasst wird.

3 – Output-Daten: Temperaturdifferenz $T_{Rohr} - T_{um}$ über die Länge bei der ausgewählten Kombination von waag- und senkrechten Rohrleitungen (hier noch leere Felder).

4 – Auswahl von Ausrichtung und Länge der einzelnen Rohrsegmente. In dieser Umsetzung dürfen nur die Wörter „waagrecht“ oder „senkrecht“ für Bezeichnung der Ausrichtung benutzt werden, außerdem soll die Länge des Segments in mm eingegeben werden.

5 – Grafik des resultierenden Temperaturverlaufs $T_{Rohr} - T_{um}$ über eine Länge von bis zu 5000 mm. Die Abbildung 6.1 enthält eine Grafik, welche nur Verläufe der Temperaturdifferenz bei den rein waag- und senkrechten Ausrichtungen des Rohres widerspiegelt. Diese Kurven werden auf Basis der durch Cubic Spline Interpolation berechneten Werte gebildet und dienen zur Plausibilitätskontrolle der Funktion.

Spline ist ein Begriff aus der numerischen Mathematik, welcher zum Zeichnen einer glatten Kurve durch endlich viele Punkte sehr oft eingesetzt wird. Im Unterschied zur polynomischen Funktion versuchen die Splines nicht eine Funktion über alle Stützstellen zu interpolieren sondern nur lokal über zwei Stützstellen. In der vorliegenden Abschlussarbeit wird eine kubische Spline (eng: cubic spline) verwendet. Eine Funktion c heißt kubischer Spline zu den Stützstellen $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$, falls gilt:

- c'' existiert und ist stetig auf gesamten Intervall $[a,b]$;
- c ist auf den Intervallen $[x_i, x_{i+1}]$ jeweils ein Polynom vom Grad 3 ($i=0, \dots, n-1$) [Knorrenschild_08]

Wenn die Input-Daten im Excel Tabellenblatt eingetragen und für fein diskretisierte Abstände interpoliert werden, kann der Temperaturverlauf als Kombination von waag- und senkrechten Segmenten erstellt werden. Dafür muss man die gewollte Ausrichtung und Länge jedes einziges Rohrstücks im Bereich 4 eintragen. Die Berechnung der Temperaturdifferenzen für die gewünschte Rohrkombination wird durch Betätigung des Buttons „Berechnung des Verlauf“ gestartet und anschließend im Bereich 3 dargestellt. Diese Werte werden mittels eines dafür erstellten Programms / Visual Basic Makros berechnet, dessen Funktionsprinzip mit Hilfe des Struktogramms in Abbildung 6.2 verdeutlicht wird. Auf Basis der berechneten Werte wird ein Kurvenverlauf $T_{\text{Rohr}}-T_{\text{um}}$ erstellt, der im Bereich 5 des Excel Tabellenblattes grafisch dargestellt wird.

6.2. Beschreibung des Berechnungsverfahrens

Damit die Ausdehnung der ERZ in den kombinierten Rohrleitungen vorausgesagt werden kann, wird ein Programm in Visual Basis of Application (VBA) erstellt. Dieses Programm vereint die Cubic Spline Interpolation mit einer Kurvenanpassung und kann für Kombination aus max. 3 Rohrstücken verwendet werden. Mit der Abbildung 6.2 wird die Berechnungsmethode zur Prognostizierung von Temperaturprofilen in kombinierten Rohrleitungen in Form eines Struktogramms dargestellt.

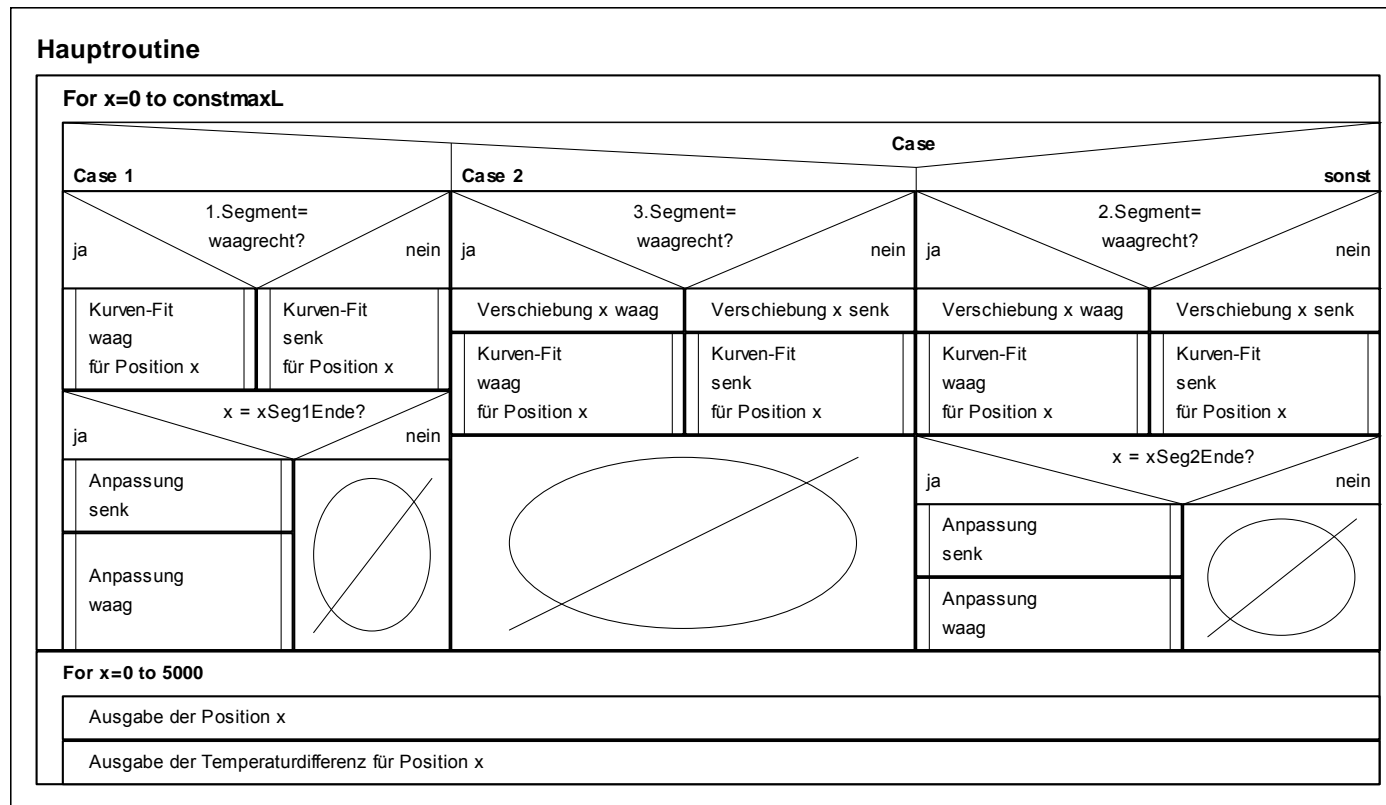


Abbildung 6.2: Struktogramm des Programms zur Prognostizierung der Ausbreitung der ERZ in kombinierter Rohrleitung (Haupt-routine)

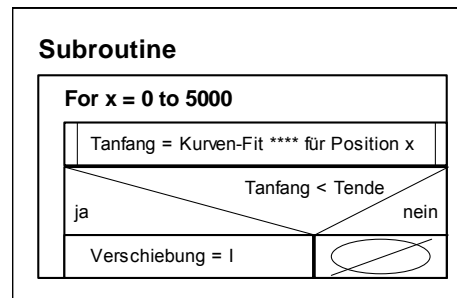


Abbildung 6.3: Struktogramm der Funktion zur Kurvenanpassung (Subroutine)

Zuerst wird eine Zählschleife gestartet, die von $x = 0$ bis constmaxL durchlaufen wird. Die Konstante constmaxL ist hierbei die maximale Länge der kombinierten Rohrleitung (festgelegt auf 5000). Eine Zählung entspricht hierbei 1 mm Rohrlänge und die maximale Länge ist 5000 mm. Bei jedem Durchlauf der Schleife wird ein Wert ermittelt, der der Temperaturdifferenz der kombinierten Rohrleitung an der Position x entspricht und in ein Array für die spätere Ausgabe abgelegt.

Der weitere Verlauf des Programms wird durch eine Case Abfrage untergliedert, die sich in drei Fälle teilt:

1. Case 1: $x \leq \text{xSeg1Ende}$
2. Case 2: $x > \text{xSeg2Ende}$
3. Case „sonst“

Tabelle 6.1: Erläuterung der Struktogramme

Funktion	Erläuterung
xSeg1Ende	Endpunkt des 1. Segments oder Länge des 1. Segments.
xSeg2Ende	Endpunkt des 2. Segments oder Länge des 2. Segments.
Kurven-Fit waag für Position x	Berechnung der Temperaturdifferenz an der Position x eines waagrecht Rohrs-segments mit Hilfe der Spline Funktion, die als Basis den Datensatz der Messung hat (s. Punkt 1 in Abbildung 6.1).
Kurven-Fit senk für Position x	Analog wie Kurven-Fit waag für Position x , aber zur Berechnung der Werte für einen senkrechten Rohrabschnitt.
Anpassung waag/senk	Diese Funktion vergleicht den Endwert (T_{Ende}) des vorhergehenden Segments mit dem Anfangswert (T_{Anfang}) des nachfolgenden Segments. Hierbei wird T_{Anfang} immer wieder neu berechnet, bis T_{Anfang} kleiner als T_{Ende} ist. Diese Funktion wird detaillierter durch das Struktogramm auf der Abbildung 6.3 erklärt.
Verschiebung x waag / senk	Korrektur der Position x mit der zuvor berechneten Verschiebung mittels der Anpassungsfunktion.

Nachdem alle erforderlichen Berechnungen und Anpassungsmaßnahmen erledigt worden, kann der Temperaturverlauf der ausgewählten Kombination von waag- und senkrechten Rohrleitungen in Form einer Grafik gebildet werden.

Die Abbildung 6.4 illustriert einen resultierenden Verlauf der Temperaturdifferenz bei der Rohrkombination 1, wenn die Speichertemperatur 90 °C ist.

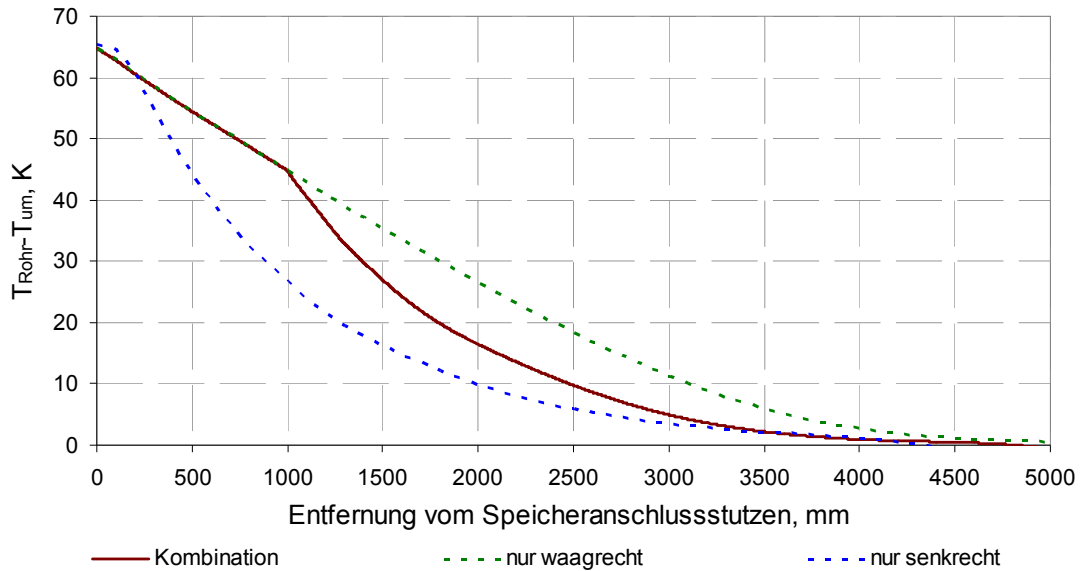


Abbildung 6.4: Verlauf der Temperaturdifferenz auf Basis der Prognostizierung bei der Kombination 1 ($T_{\text{Sp}}=90\text{ °C}$)

7. Die Validierung des Prognostizierungsverfahrens

In diesem Abschnitt wird bestimmt, ob das im Kapitel 6 erläuterte Berechnungsverfahren die reale Ausdehnung der ERZ beschreiben kann. Dafür werden die Messergebnisse mit der theoretischen Prognostizierung verglichen.

7.1. Validierung bei der Rohrkombination 1

Die Abbildung 7.1 stellt die Temperaturdifferenz $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ bei der Rohrkombination 1 auf Basis der Messung und Prognostizierung im Vergleich dar. Die Linien stellen die Verläufe der Temperaturdifferenz $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ im stationären Zustand dar, die auf Basis des Berechnungsverfahrens ermittelt sind. Die Punkte zeigen die Temperaturdifferenzen, welche bei den Laboruntersuchungen gemessen werden. Die Kurven werden für drei Speichertemperaturen gebildet.

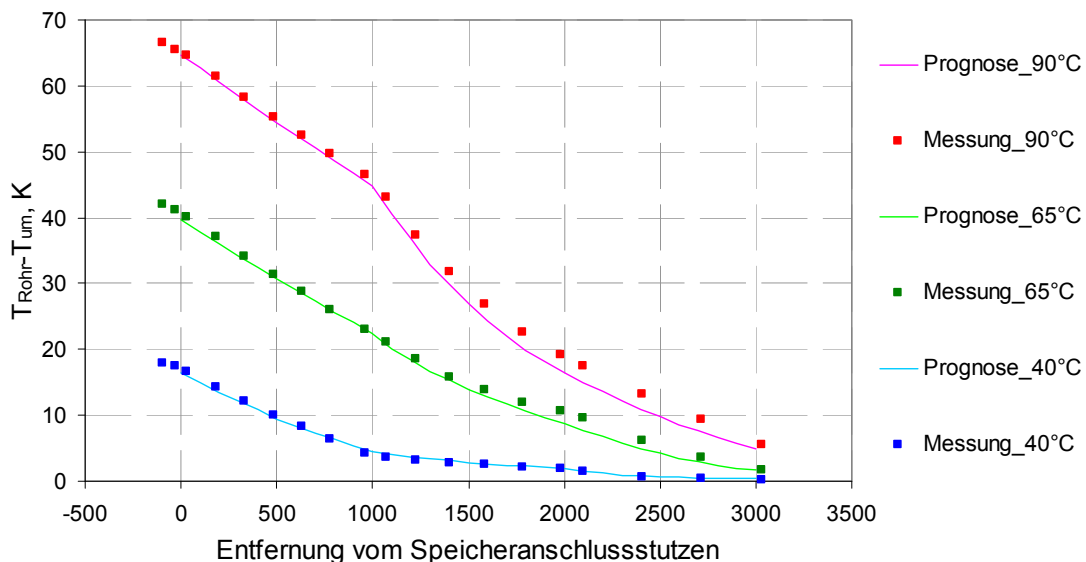


Abbildung 7.1: Temperaturdifferenz $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ bei der Rohrkombination 1 auf Basis der Messung und Prognostizierung im Vergleich

Auf dem Intervall von 0 mm bis 1000 mm kongruieren die Messwerte mit den prognostizierten Kurven bei allen Speichertemperaturen. Dieser Teil der Kurven beschreibt den Ablauf der Temperaturdifferenz im ersten waagrechten Segment. Bei 90 °C Speichertemperatur beginnt die prognostizierte Kurve von den Messdaten ein wenig abzuweichen, wenn die Ausrichtung des Rohres von waagrecht zu senkrecht wechselt. Der maximale Unterschied zwischen beiden Kurven beträgt 3 K. Das Verfahren zur Voraussage des Temperaturverlaufs im vertikalen Segment basiert auf den Messdaten, die beim rein vertikalen Prüflingsaufbau erfasst werden. Es wird vermutet, dass die Ursache für die Abweichung der Kurven voneinander im unterschiedlichen Prüflingsaufbau der rein senkrechten Anordnung des Prüflings gegenüber dem senkrechten Abschnitt in der Rohrkombination 1 liegt. Der Aufbau beim rein senkrechten Prüfling beginnt zum Beispiel mit einem Bogen mit großem Biegeradius (siehe Kapitel 4.2) wohingegen bei der Rohrkombination Quetschverbindungen mit kleinem Radius verwendet werden.

Bei 65 °C Speichertemperatur kongruieren die Prognostizierungs- und Messkurven besser miteinander als bei $T_{Sp} = 90$ °C. Sie verlaufen identisch bis zu 1500 mm, also der Mitte des gesamten Prüflings. Von diesem Punkt beginnen sie ein wenig auseinander zu driften. Dafür kann wahrscheinlich derselbe Grund angeführt werden, wie bei 90 °C Speichertemperatur. Zum Ende des Verlaufs deckt sich die prognostizierte Kurve mit der Kurve der Messwerte wieder. Bei 40 °C Speichertemperatur kongruieren die Messwerte mit der theoretisch vorausgesagten Kurve in allen Punkten. Der Unterschied zwischen der Voraussage und der Messung beträgt im Maximum weniger als 1 K.

Der Abbildung 7.1 kann entnommen werden, dass je niedriger die Speichertemperatur ist, desto besser kann das Berechnungsverfahren die Ausprägung der ERZ in einer kombinierten Rohrleitung prognostizieren. Aber diese Aussage ist nur zutreffend, solange ausschließlich die absolute Abweichung zwischen der Messung und der Prognose betrachtet wird. Unter der absoluten Abweichung versteht man die Differenz zwischen dem prognostizierten Wert und dem entsprechenden Messwert. Neben der absoluten Abweichung kann auch eine relative Abweichung berücksichtigt werden. Diese spiegelt die Beziehung der absoluten Abweichung zum entsprechenden Messwert wider. Die maximale relative Abweichung bei 90 °C Speichertemperatur beträgt 9%. Das ist um 0,25% niedriger als bei der 65 °C Speichertemperatur. Wenn der Speicher sich auf noch niedrigerer Temperatur (40 °C) befindet, besitzt die maximale relative Abweichung zwischen der Messung und der Voraussage einen noch höheren Wert, 11%.

Das Berechnungsverfahren liefert die Temperaturdifferenz $T_{Rohr}-T_{um}$ über der Rohrlänge. Mit diesen Werten lassen sich die Wärmeverlustströme und Wärmeverlustkoeffizienten berechnen und mit den Messwerten vergleichen. Die durch theoretische Voraussage und durch Messung ermittelten Werte werden in der Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Q_V - und UA-Werte auf Basis der Messung und Prognostizierung bei der Rohrkombination 1

	durch Berechnungsverfahren		durch Messung		Differenz zwischen Messung und Prognose
	Q_V	UA	Q_V	UA	UA
	W	W/K	W	W/K	%
$T_{Sp}=40^{\circ}C$	2,64	0,14	2,63	0,14	0,4
$T_{Sp}=65^{\circ}C$	9,66	0,22	10,15	0,23	5,2
$T_{Sp}=90^{\circ}C$	17,99	0,26	18,95	0,27	4,9

Bei 40 °C Speichertemperatur ergibt der prognostizierte Q_V -Wert 2,64 W, was nur um 0,01 W höher liegt als der auf Basis der Messung ermittelte Wert. Bei den zwei höheren Speichertemperaturen ist dieser Unterschied entsprechend größer; 0,5 W bei 65 °C und 1 W bei 90 °C Speichertemperatur. Mit steigender Speichertemperatur nimmt die absolute Differenz zwischen dem theoretischen und dem praktischen Wert für den Wärmeverluststrom zu.

Der Tabelle 7.1 kann entnommen werden, dass die prognostizierten UA-Werte sich kaum von den gemessenen Werten unterscheiden. Bei 65 °C und 90 °C Speichertempe-

raturen beträgt die Differenz zwischen der Theorie und Praxis nur 0,01 W/K. Bei 40 °C Speichertemperatur ist es noch weniger.

7.2. Validierung bei der Rohrkombination 2

Das Verfahren zur Voraussage der Ausdehnung der ERZ wird auch für die Kombination 2 validiert. Die Abbildung 7.2 stellt die Verläufe der Temperaturdifferenz auf Basis der Messung und Prognostizierung im Vergleich dar.

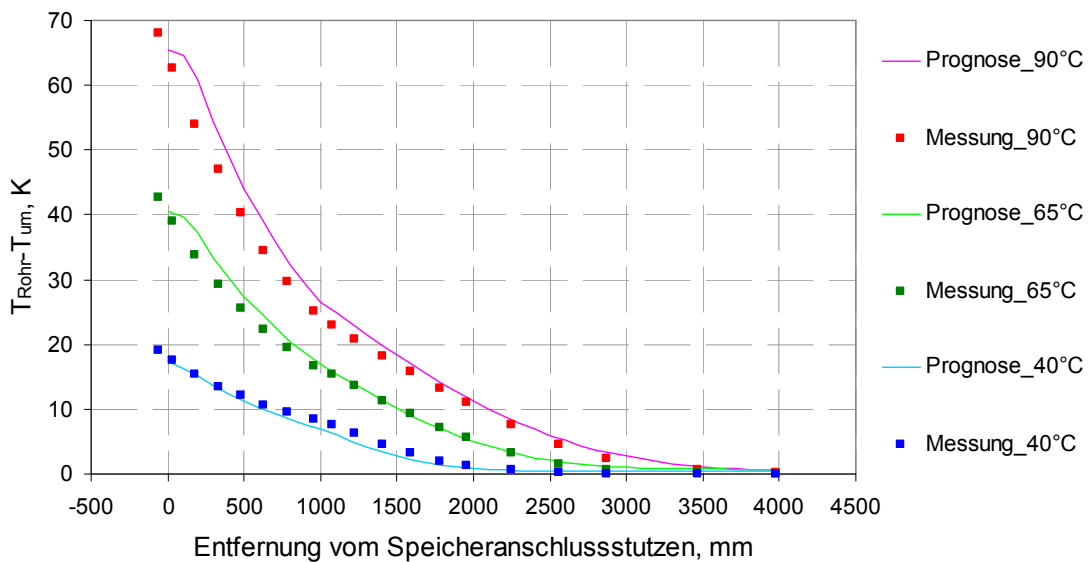


Abbildung 7.2: Temperaturdifferenz $T_{\text{Rohr}}-T_{\text{um}}$ bei der Kombination 2 auf Basis der Messung und Prognostizierung im Vergleich

Aus der Abbildung 7.2 kann man ersehen, dass die absolute Abweichung zwischen den Messwerten und den prognostizierten Werten mit sinkender Speichertemperatur auch abnimmt. Die maximale relative Abweichung verhält sich im Vergleich zur absoluten Abweichung umgekehrt: mit steigender Speichertemperatur verringert sich die relative Abweichung zwischen der Prognose und der Messung.

Die Differenz zwischen der prognostizierten und der praktischen Kurve nimmt ab, wenn die Ausrichtung des Prüflings sich von Senkrechten zum Waagrechten ändert. Gleich wie bei der Kombination 1 kann der Temperaturverlauf im horizontalen Segment besser und präziser prognostiziert werden als der Verlauf im vertikalen Segment. Bei 40 °C Speichertemperatur tritt eine sehr kleine absolute Abweichung im Intervall von 750 mm bis 1750 mm auf. Außer diesem Abschnitt deckt sich die prognostizierte Kurve mit den Messdaten nahezu vollständig. Bei 65 °C Speichertemperatur stimmen die theoretische und die praktische Kurve ab dem Intervall von 1000 mm bis zum Ende überein. Wenn der Speicher auf 90 °C temperiert wird, unterscheidet sich die prognostizierte Kurve ab dem Intervall von 1500 mm bis zum Ende kaum von der Messkurve.

Der Verlauf der Temperaturdifferenz im senkrechten Segment kann mit einer etwas größeren Abweichung prognostiziert werden als bei der Kombination 1. z. B., bei 65 °C Speichertemperatur beträgt die absolute Abweichung max. 3 K, was aber zweimal niedriger als bei 90 °C Speichertemperatur ist. Aus dem Kapitel 4.4 ist schon bekannt, dass

das Anschlussrohr bei der Kombination 2 dem Speicherdeckel entsteigt. Aber zur Prognostizierung werden derartige Messdaten verwendet, die beim Seitenanschlussstutzen erfasst worden sind. Wahrscheinlich aus diesem Grund unterscheiden die vorausgesagten Werte von den Messwerten bei der senkrechten Ausrichtung des Segments.

Bei der Rohrkombination 2 werden die Speicherverluste und Wärmeverlustkoeffizienten auf Basis der prognostizierten Temperaturverläufe berechnet. Dann lassen sie sich mit den gemessenen Q_V - und UA-Werten vergleichen. In der Tabelle 7.2 werden sowohl die praktischen als auch die prognostizierten Werte für Q_V und UA bei der Rohrkombination 2 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 7.2: Q_V - und UA-Werte auf Basis der Messung und Prognostizierung bei der Kombination 2

	durch Berechnungsverfahren		durch Messung		Differenz zwischen Messung und Prognose
	Q_V	UA	Q_V	UA	UA
	W	W/K	W	W/K	%
$T_{Sp}=40^\circ\text{C}$	2,89	0,15	3,27	0,17	8,9
$T_{Sp}=65^\circ\text{C}$	8,14	0,19	7,56	0,17	6,5
$T_{Sp}=90^\circ\text{C}$	13,93	0,20	12,5	0,18	11,4

Bei Rohrkombination 2 ist der Unterschied zwischen den theoretischen und praktischen Werten größer als bei der Kombination 1 und er steigt mit zunehmender Speichertemperatur an. Bei 40°C Speichertemperatur ist der prognostizierte Wärmeverluststrom um $0,38\text{ W}$ niedriger als derjenige, der durch die Laboruntersuchung ermittelt wird. Bei 60°C und 90°C Speichertemperatur sind die praktischen Q_V -Werte jedoch kleiner als die prognostizierten Werte. Der größte Unterschied zwischen der Prognose und der Messung ist bei 90°C Speichertemperatur zu finden: der Wärmeverluststrom nach der Voraussage ist um $1,4\text{ W}$ höher als jener, der auf Basis der Messdaten ermittelt wird.

Die Differenz zwischen dem praktischen und der theoretischen UA-Wert erreicht ein Maximum bei 90°C Speichertemperatur und ergibt $0,02\text{ W/K}$. Bei den restlichen Speichertemperaturen ist der Unterschied kleiner und beträgt $0,015\text{ W/K}$ bei 40°C und $0,01\text{ W/K}$ bei 65°C Speichertemperatur.

8. Messunsicherheitsbetrachtung

Wenn das Ergebnis der Messung einer physikalischen Größe vorgelegt wird, muss auch eine quantitative Angabe zur Qualität des Ergebnisses erfolgen, damit der Benutzer dessen Zuverlässigkeit beurteilen kann. Ohne eine solche Angabe lassen sich Messergebnisse weder miteinander noch mit Referenzwerten vergleichen. [DIN_1995]

Aus dem Kapitel 3.2 ist schon bekannt, dass das Ziel jeder Messung die Erstellung der Temperaturverläufe bei jeder einzelnen Prüflingsanordnung ist, um daraus die Wärmeverlustströme und Verlustkoeffizienten zu berechnen. Die Q_V - und UA-Werte sind nicht direkt messbar, sondern werden mithilfe von gemessenen Temperaturen sowie Stoffdaten und geometrischen Informationen indirekt bestimmt. Deshalb muss die Messunsicherheit durch das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz (International Organization for Standardization: law of propagation of errors or uncertainties; DIN 1319-3: Fortpflanzung der Unsicherheit) berechnet werden.

Nachfolgend sind die allgemeinen Rechenregeln zum Fehlerfortpflanzungsgesetz gegeben, die zur Bestimmung der Messunsicherheit verwendet werden:

- Für Summen und Differenzen gilt der gleiche Ausdruck. Für $F=f_1 \pm f_2$, wobei F die gesuchte Größe und f_k die direkt gemessene physikalische Größe (mit $k = 1 \dots N$) ist, ergibt sich der mittlere Fehler s_F nach [Gränicher_1996] zu

$$s_F^2 = \sum_k s_{f_k}^2 \quad 8.1$$

- Für Produkte wird die Berechnung durch Verwendung des relativen mittleren Fehlers vereinfacht. Der Ausdruck $F=f_1^p \cdot f_2^q \dots$ wird zuerst in die logarithmische Form gebracht. Die Anwendung des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes ergibt dann die folgende einfache Gleichung 8.2, wobei in den Klammern die relativen Varianzen (Quadrate der relativen Fehler) stehen [Gränicher_1996]:

$$\left(\frac{s_F}{F}\right)^2 = p^2 \cdot \left(\frac{s_{f_1}}{f_1}\right)^2 + q^2 \cdot \left(\frac{s_{f_2}}{f_2}\right)^2 + \dots \quad 8.2$$

Die Fehlerfortpflanzung wird auf die Erstellung der Temperaturverläufe im stationären Zustand angewendet:

1. Ermittlung des absoluten Messfehlers von jedem einzelnen Temperatursensor nach der Gleichung 8.3 (s. Tabelle 0.5 im Anhang):

$$s_{T_n} = 0,15 + 0,002 \cdot T_n \quad 8.3$$

2. Aus einer Beziehung zwischen dem absoluten Messfehler s_{T_n} und dem Messwert T_n ergibt sich ein relativer Messfehler. (vgl. Gleichung 8.4)

$$\text{relativerMessfehler} = \frac{s_{T_n}}{T_n} \quad 8.4$$

3. Die Sensoren T_{u1} , T_{u2} und T_e werden regelmäßig gegen eine auf nationale Stan-

dards rückführbare Referenz kalibriert und entsprechende Kalibrierdatenblätter angefertigt. Die Korrekturfaktoren werden diesen Datenblättern entnommen und als absolute Messfehler interpretiert.

- Zur Berechnung der Messunsicherheit eines Verlaufs der Temperaturdifferenz mit dem allgemeinen Term $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ werden die Messfehler jedes einzelnen Sensorpaares sowie die Messfehler der zwei Umgebungstemperaturfühler berücksichtigt.

$$s_{\Delta T_{ni}} = \sqrt{s_{T_{ni,oben}}^2 + s_{T_{ni,unten}}^2 + s_{T_{u1}}^2 + s_{T_{u2}}^2} \quad 8.5$$

$$\text{Beispiel: } s_{\Delta T_{ni}} = \sqrt{T_{13}^2 + T_{14}^2 + T_{u1}^2 + T_{u2}^2}$$

Aus der Gleichung 8.5 ist ersichtlich, dass die Messfehler für jeden einzelnen Rohrabschnitt durch geometrische Addition der absoluten Fehler ermittelt werden.

Auf der Abbildung 8.1 wird der Verlauf der Temperaturdifferenz $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ bei 40 °C Speichertemperatur mit Berücksichtigung der Messunsicherheit als Fehlerbalken dargestellt. Diese Kurve zeigt den Verlauf der Temperaturdifferenz für Rohrkombination 1.

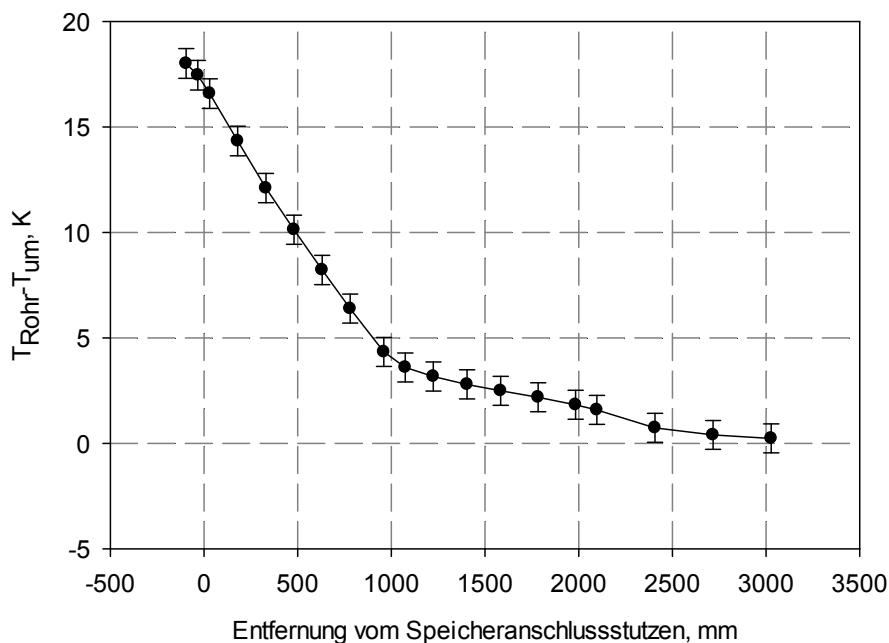
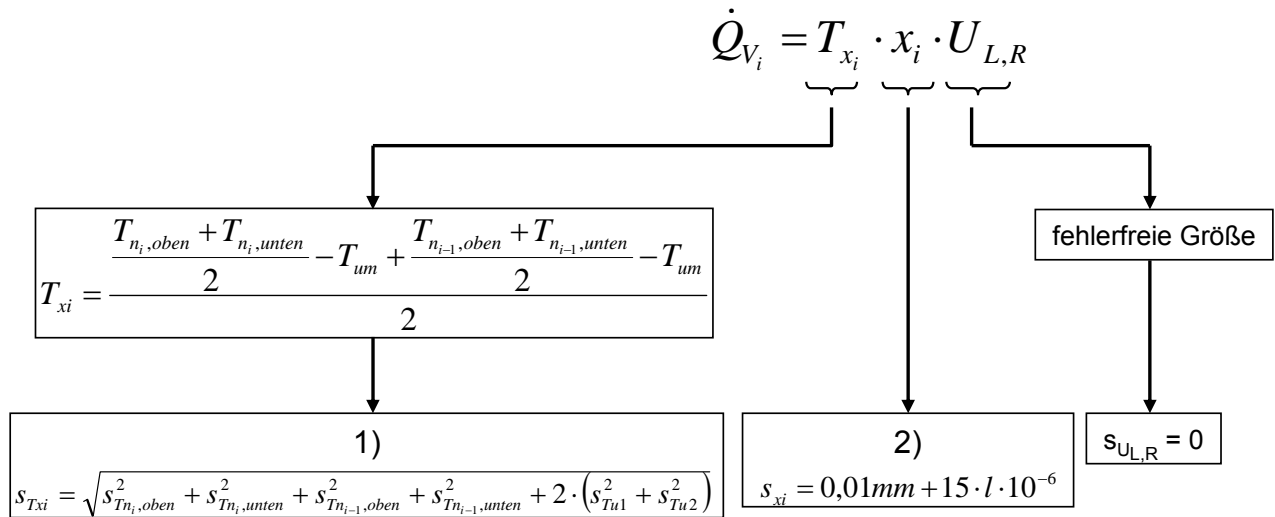


Abbildung 8.1: Temperaturdifferenz $T_{\text{Rohr}} - T_{\text{um}}$ für die Messung der Rohrkombination 2 mit Berücksichtigung der Messunsicherheit bei 40 °C Speichertemperatur

Nachdem die Temperaturverläufe gebildet sind, werden die Wärmeverlustströme und Verlustkoeffizienten bei allen drei Speichertemperaturen berechnet. Um den Wärmeverluststrom zu ermitteln müssen die Rohrtemperatur T_{xi} , die -länge x_i und der materialspezifische Wärmeverlustwert $U_{L,R}$ bekannt sein. Es wird angenommen, dass $U_{L,R}$ ein fehlerfreier Wert ist. Die Abbildung 8.2 stellt ein Schema dar, nach dem die Fehlerfortpflanzung bei der Berechnung der Eingangsgrößen T_{xi} und x_i bestimmt wird.


 Abbildung 8.2: Die Fehlerfortpflanzung bei der Berechnung des Q_V -Wertes

Die Fehlerfortpflanzung bei der Berechnung des Q_V - und UA-Wertes wird in den folgenden Schritten durchgeführt (s. auch Abbildung 8.2):

1. Die Fehlerfortpflanzung bei der Berechnung von T_{x_i} (gemittelte Differenz zwischen der Rohr- und der Umgebungstemperatur) wird durch die geometrische Addition aller einzelnen absoluten Messfehler nach der Gleichung 8.6 bestimmt.

$$s_{T_{x_i}} = \sqrt{s_{T_{n_i,oben}}^2 + s_{T_{n_i,unten}}^2 + s_{T_{n_{i-1},oben}}^2 + s_{T_{n_{i-1},unten}}^2 + 2 \cdot (s_{T_{u1}}^2 + s_{T_{u2}}^2)} \quad 8.6$$

$$\text{Beispiel: } s_{T_{x_i}} = \sqrt{s_{T_{13}}^2 + s_{T_{14}}^2 + s_{T_{15}}^2 + s_{T_{16}}^2 + 2 \cdot (s_{T_{u1}}^2 + s_{T_{u2}}^2)}$$

2. Die absolute Messunsicherheit des Messbandes kann mit der Gleichung 8.7 ermittelt werden (s. Abbildung 0.1 im Anhang).

$$s_{x_i} = 0,01mm + 15 \cdot l \cdot 10^{-6} \quad 8.7$$

3. Der Einfluss der fehlerbehafteten Eingangsgrößen T_{x_i} und x_i auf das Ergebnis Q_V kann mittels der Gleichung 8.8 berechnet werden.

$$\frac{s_{Q_V}}{Q_V} = \sqrt{\left(\frac{s_{T_{x_i}}}{T_{x_i}}\right)^2 + \left(\frac{s_{x_i}}{x_i}\right)^2} \quad 8.8$$

Die relativen und absoluten Messfehler für Q_V -Wert werden in der Tabelle 8.1 für 40 °C- 65 °C- und 90 °C-Speichertemperatur bei zwei Typen der Rohrkombination zusammengefasst.

Tabelle 8.1: Absolute und relative Fehler für den Q_V -Wert bei allen Speichertemperaturen und Rohrkombinationen.

	Q_V	abs. Messfehler	rel. Messfehler
	W	W	%
Rohrkombination 1			
$T_{Sp}=40\text{ °C}$	2,632	0,149	5,7
$T_{Sp}=65\text{ °C}$	10,148	0,152	1,5
$T_{Sp}=90\text{ °C}$	18,951	0,156	0,8
Rohrkombination 2			
$T_{Sp}=40\text{ °C}$	3,268	0,207	6,3
$T_{Sp}=65\text{ °C}$	7,563	0,209	2,8
$T_{Sp}=90\text{ °C}$	12,503	0,210	1,7

4. Zur Berücksichtigung des Messfehlers des UA-Werts werden die relativen Messfehler des Q_V -wertes und der Differenz zwischen der Speicher- und der Umgebungstemperatur verwendet.

$$\frac{s_{UA}}{UA} = \sqrt{\left(\frac{s_{Q_V}}{Q_V}\right)^2 + \left(\frac{s_{T_{Sp}-T_{um}}}{T_{Sp} - T_{um}}\right)^2} \quad 8.9$$

Die Fehlerfortpflanzung bei der Ermittlung der Differenz zwischen der Speicher- und der Umgebungstemperatur wird mittels der Gleichung 8.1 bestimmt.

Die relativen und absoluten Messfehler des UA-Wertes werden in der Tabelle 8.2 für beide Rohrkombinationen zusammengestellt.

Tabelle 8.2 Absolute und relative Fehler für den UA-Wert bei allen Speichertemperaturen und Rohrkombinationen.

	UA	abs. Messfehler	rel. Messfehler
	W/K	W/K	%
Rohrkombination 1			
$T_{Sp}=40\text{ °C}$	0,138	0,009	6,6
$T_{Sp}=65\text{ °C}$	0,232	0,005	2,1
$T_{Sp}=90\text{ °C}$	0,274	0,003	1,3
Rohrkombination 2			
$T_{Sp}=40\text{ °C}$	0,167	0,012	7,2
$T_{Sp}=65\text{ °C}$	0,174	0,005	3,1
$T_{Sp}=90\text{ °C}$	0,181	0,003	1,9

9. Zusammenfassung und Empfehlungen

9.1. Zusammenfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit hat zum Ziel ein Verfahren zur Prognostizierung des Temperaturprofils in komplexen Rohranordnungen, bestehend aus waag- und senkrechten Abschnitten, zu erstellen. Obwohl eine Kombination von waag- und senkrechten Rohrstücke sehr häufig in der Praxis auftritt, wurde die Ausbreitung der ERZ in kombinierten Rohrleitungen bis jetzt nicht betrachtet oder gemessen. Aus diesem Grund hatte das Thema der Bachelorarbeit eine große Bedeutung für die Praxis und war ebenso von hohem wissenschaftlichem Interesse.

Die in der Abschlussarbeit erarbeitete Voraussagemethode gründete sich auf Messdaten von Untersuchungen mit rein waag- und senkrecht ausgerichteten Anschlussrohren. Zur Bereitstellung der Input-Daten für die Berechnung wurden zuerst Temperaturverläufe bei rein horizontaler und vertikaler Ausrichtungen des Anschlussrohres durch experimentelle Messungen aufgenommen. Anschließend wurden diese Messdaten mittels der Cubic Spline Funktion für eine bestimmte Rohrkombination interpoliert, die aus zwei bis drei Abschnitten beliebiger Ausrichtung und Länge bestand. Da die Ausbreitungsstärke der ERZ sich mit dem Wechsel der Rohrausrichtung auch änderte, wurde eine spezielle Anpassungsfunktion als Teil des Prognostizierungsverfahrens erstellt. Diese Anpassungsfunktion berücksichtigt den Temperaturabfall im vorher aufgebauten Rohrstück und setzt einen sogenannten Anfangspunkt zur Berechnung des Temperaturverlaufs im nachfolgenden Segment. Mit dieser Berücksichtigung wurde der Verlauf für jedes nachfolgende Segment ermittelt. Nachdem Temperaturprofile für zwei exemplarische Rohranordnungen (Rohrverlauf bei Kombination 1: 1 m waagrecht, 1 m senkrecht, 1 m waagrecht; Kombination 2: 1 m senkrecht, 3 m waagrecht) erstellt worden sind, wurde das ausgearbeitete Berechnungsverfahren validiert. Dazu wurden praktische Messungen der vorgegebenen Kombinationen durchgeführt, um die erhaltenen Messwerte mit den prognostizierten Werten zu vergleichen.

Für die Laboruntersuchungen wurde ein Messstand eingesetzt, welcher es ermöglichte die Oberflächentemperatur einer Speicheranschlussleitung exakt zu messen. Die gemessenen Temperaturen bildeten über die Länge des Anschlussrohres je nach Betriebszustand unterschiedliche Temperaturverläufe, die eine Ausdehnung der Wärmeübertragungsvorgänge aus dem Speicher in das Anschlussrohr sowie den daraus entstehenden Energieverlust an die Umgebung widerspiegeln. Diese Temperaturverläufe wurden für verschiedene Anordnungen des Anschlussrohres gemessen und ausgewertet. Aus der bekannten Herstellerangabe der Dämmung und dem jeweiligen Temperaturverlauf wurden die Wärmeverluste und die Wärmeverlustkoeffizienten für die einzelnen Anordnungen ermittelt.

Ziel der vorliegenden Abschlussarbeit war es, die Temperaturprofile in Kombination mit waag- und senkrechten Abschnitten zu prognostizieren und diese Voraussage anschließend zu validieren. Die Validierung zeigte, dass die prognostizierten und die gemesse-

nen Temperaturprofile sich nur geringfügig voneinander unterschieden. Die Abweichung war bei der Vorhersage eines Temperaturverlaufs im senkrecht aufgebauten Abschnitt größer. Bei der waagrechten Ausrichtung des Segments trat kaum ein Unterschied zwischen Messung und Prognose auf. Wenn ein senkrechter Abschnitt vor dem waagrechten aufgebaut wurde, begannen die prognostizierten Werte des waagrechten Abschnitts von den Messwerten abzuweichen. Eine derartige Abweichung entstand durch eine höhere Abweichung bei der Prognose des Temperaturverlaufs im vertikalen Segment.

Obwohl Unterschiede zwischen den vorausgesagten und den gemessenen Werten auftraten, kann die Genauigkeit des erarbeiteten Verfahrens als zufriedenstellend eingeschätzt werden. Die Abweichung von den Messwerten betrug max. 3 K bei der Kombination 1 und max. 6 K bei der Kombination 2. Des Weiteren bleiben die für eine rein waag- beziehungsweise rein senkrechte Ausrichtung charakteristischen Temperaturprofile auch bei einer Kombination dieser Abschnitte erhalten. Somit konnte gezeigt werden, dass die Prognostizierung von Temperaturprofilen in Anschlussleitungen bestehend aus waag- und senkrechten Abschnitten möglich war. Im Laufe der Laboruntersuchungen wurde festgestellt, dass die niedrigsten Wärmeverluste dann auftraten, wenn das Anschlussrohr dem Speicherdeckel mit senkrechter Ausrichtung entstieg.

9.2. Empfehlung zur Optimierung der Prognostizierung

Während der Temperaturverlauf im horizontal aufgebauten Segment sehr präzise prognostiziert werden konnte, mussten die Werte von der theoretischen Betrachtung des Verlaufs im vertikal ausgerichteten Abschnitt mit Vorsicht benutzt werden. Bei der Voraussage des Temperaturverlaufs im senkrechten Rohrstück wichen die prognostizierte Werte von den Messwerten ab. Der Grund für die Abweichung lag im unterschiedlichen Prüflingsaufbau bei der rein senkrechten Anordnung. Darüber hinaus wurde bei der Kombination 2 ein anderer Speicheranschlussstutzen verwendet als bei der Messung mit dem rein senkrechten Anschlussrohr.

Zur Verminderung der Abweichung zwischen Prognose und Messung sollte die Datenbasis hinsichtlich der rein senkrechten Ausrichtung verbessert werden. Dafür müssten Messungen beim rein senkrechten Aufbau des Anschlussrohres mit Verwendung des Anschlussstutzens im Speicherdeckel durchgeführt werden. Die erhaltenen Messwerte könnten dann als Input-Daten zur Prognostizierung des Temperaturprofils in komplexen Rohranordnungen eingesetzt werden.

Literaturhinweise

- [Suter_2001] Suter, J.-M. (2001): "Heat losses from storage tanks: Up to 5 times higher than calculated". In Industry Newsletter No. 2 from IEA SHC Task 26, September 2001. Online in Internet: ULR: <http://www.solenergi.dk/task26/downloads.html> (Stand: 04.03.2013)
- [Huhn_2007] Huhn, Robert (2007): Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeicher in Energieumwandlungsketten. Diss. Technische Universität Dresden, Dresden 2007. ISBN 978-3-940046-32-1
- [Marty_2008] Marty, Heinz; Vogelsanger, Peter; Köbli Marco u.a. (2008): Wärmeverluste durch Rohrinterne Gegenstromzirkulation. SPF Institut für Solartechnik in Rapperswil, Schweiz. Online in Internet: ULR: <http://www.solarenergy.ch/fileadmin/daten/publ/WaermeverlusteDurrchRohrinterneGegenstromzirkulation-Notizenseiten.pdf> (Stand: 04.03.2013)
- [Andersen_2007] Andersen, Elsa u.a. (2007): Heat losses from pipes connected to hot water storage tanks. Technical University of Denmark, Lyngby.
- [SPF_2011] Dateisammlung zum Thema Einrohrzirkulation. Online in Internet: ULR: www.solarenergy.ch/Abgeschlossen.78.0.html. unter „Wärmeverluste durch rohrinterne ...“ (Stand: 04.03.2013)
- [ISFH_2011] Rockendorf, Gunter; Steinweg, Jan; Ramin, Tim (2011): Einrohrzirkulation in Anschlüssen thermischer Energiespeicher. Institut für Solarenergieforschung Hameln, Emmerthal 2001. Online in Internet: ULR: http://www.isfh.de/institut_solarforschung/files/beitrag_isfh_erk_ee_tagung.pdf (Stand: 04.03.2013)
- [Wossog_2002] Wossog, Günter (Hrsg.) (2002): Handbuch Rohrleitungsbau. 2. Aufl. Essen: Vulkan-Verlag.
- [Böckh_2011] Von Böckh, Peter; Wetzel, Thomas (2011): Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis. 4. Aufl. Heidelberg: Springer.
- [VDI_1997] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.) (1997): VDI-Wärmeatlas Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 8. überarb. u. erw. Aufl. Düsseldorf: Springer.

- [Mäuler_2010] Mäuler, D.: Marktübersicht Solarspeicher; SONNE WIND & WÄRME 18/2010
- [Gränicher_1996] Gränicher, Heini W.H. (1996): Messung beendet – was nun?: Einführung und Nachschlagewerk für die Planung und Auswertung von Messungen. 2., überarb. Aufl. Zürich: vdf, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich; Stuttgart: Teubner.
- [DIN_1995] Deutsche Institut für Normierung DIN (Hrsg.) (1995): Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. 1. Aufl. Berlin.
- [Knorrenschild_08] Knorrenschild, Michael (2008): Numerische Mathematik. Eine beispielorientierte Einführung 3. Aufl. Leipzig: Carl Hanser Verlag.
- [Bronstein_2008] Bronstein, I.N.; Semendjajew, K.A.; Musiol, G.; Mühlig, H. (2008): Taschenbuch der Mathematik. 7., vollst. überarb. und erg. Aufl. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.
- [Office_RGP] Microsoft Office. Online in Internet: ULR:
<http://office.microsoft.com/de-de/excel-help/rgp-funktion-HP010342653.aspx> (Stand: 04.03.2013)
- [Spline_SRS1] SRS 1 Software, LLC: a Newton, MA based software company for software and digital imaging products and services. Online in Internet: ULR:
<http://www.srs1software.com/SRS1CubicSplineForExcel.aspx>
(Stand: 04.03.2013)

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem im Ausgabeantrag formulierten Thema ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommenen Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hameln, den 8. März 2013

Erklärung zur Veröffentlichung

Die vorliegende Bachelorarbeit mit dem im Ausgabeantrag formulierten Thema, Erstellung und Validierung eines Verfahrens zur Voraussage von Temperaturverläufen in Speicheranschlussrohren mit ausgebildeter Einrohrzirkulation, darf in der Bibliothek der Fakultät Life Sciences der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg ausgelegt und Interessenten zugänglich gemacht werden.

Ich bin damit einverstanden, dass diese Arbeit Interessenten auch auf elektronischem Weg z.B. im Internet zugänglich gemacht wird.

Hameln, den 8. März 2013

Anhang

A. Technische Daten der verwendeten Anlagen

Tabelle 0.1 Technische Daten des verwendeten Speichers

Eigenschaft	Wert
Höhe ohne Dämmung	2002 mm
Durchmesser ohne Dämmung	750 mm
Gesamtvolumen	750 l
Mantelstärke/Mantelmaterial	3 mm / Baustahl
Volumen Solarwärmeübertrager / Material	12 l / Edelstahl-Glattrrohr
Volumen Trinkwasserwärmeübertrager / Material	33 l / Edelstahl-Wellrohr
Dämmstärke	100 mm

Tabelle 0.2 Technische Eigenschaften des verwendeten Dämmmaterials

Eigenschaft	Wert
Materialtyp	Schaumstoff auf EPDM-Kunstkautschukbasis (EPDM = Ethylen-Propylen-Dien-Monomer)
Anwendungen	Wärmedämmung von Rohren, Behältern und Schächten in Solarpanelen (auch im Freien), Kraftfahrzeugen, Heißgasleitungen sowie Dampf- und Wechseltemperaturleitungen
Anwendungsbereich	obere Anwendungsgrenz- 150 °C (kurzzeitig 175 °C) temperatur
	untere Anwendungsgrenz- -50 °C temperatur
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	$\lambda \leq 0,042$ $\lambda = [36,92 + 0,125 \cdot v_m + 0,0008 \cdot (v_m - 30)^2] / 1000$
Innendurchmesser, d_i	0,022 m
Außendurchmesser, d_a	0,072 m
Dämmstärke	0,025 m
Sonstige	hohe UV-Beständigkeit

Tabelle 0.3: Technische Eigenschaften der verwendeten Temperaturfühler, die die Vor- und Rücklauftemperatur des Thermostates messen.

Eigenschaft	Wert		
Gegenstand	Tauchhülse mit Anschlusskopf und Gewinde		
Hersteller und Typ	Jumo, Pt 100 6 mm		
Kalibrierverfahren	Vergleichsmethode		
max. Abweichung	DT (kor1), K	DT (kor2), K	DT (kor 1-2), K
	0,190	0,180	0,026
Standartmessunsicherheit	0,110	0,104	0,015

Tabelle 0.4: Technische Eigenschaften der Umgebungstemperatursensoren

Eigenschaft	Wert	
Gegenstand	ventilierter T _u -Sensor	
Hersteller und Typ	Eigenbau Alugehäuse mit Lüfter, Jumo Pt 100	
Kalibrierverfahren	Vergleichsmethode	
max. Abweichung	T _{U1}	T _{U2}
	0,305 K	0,455 K
Standartmessunsicherheit	T _{U1}	T _{U2}
	0,176 K	0,263 K

Tabelle 0.5: Technische Eigenschaften des Temperatursensors Pt 100 Klasse A

Eigenschaft	Wert
Klasse	A
Temperaturbereich	von -200 °C bis +650 °C
Grenzabweichung	T = ±(0,15 + 0,002 · T)

Kalibrierservice der 

Institut f. Solarenergiefor-
schung
Am Ohrberg 1
31860 Emmerthal

Kunden-Nr. : 1018148
Auftrags-Nr.: 551099

Perschmann
Calibration 

Kalibrierschein Nr. P-2108917

Seite (1/1)

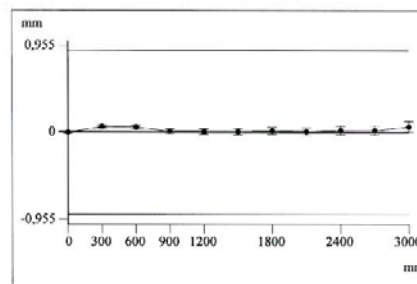
Ident-Nummer : 101-7071 **Prüfdatum** : 2011-12-15
Bezeichnung : Rollbandmaß
Prüfungsrichtlinie : verkörperte Längenmaße Richtlinien 73/362/EWG und 2004/22/EG
Prüfgerät : Zeiss Längenmessmaschine PM 0052
Bezugsnormal : RvA-K033 2536603 2010-02
Messunsicherheit k=2 : 0,01 mm + 15 · l · 10⁻⁶; l ist die Länge
Bemerkung :

Prüfergebnis : uneingeschränkt einsatzfähig **Sichtprüfung** : in Ordnung

Temperatur : 19,8 °C
Luftfeuchtigkeit : 43,8 % rF bis 44,3 % rF

Typ : Rollbandmaß
Genauigkeitsklasse: II
Messbereich : 0 mm bis 3000 mm
Skalenwert : 1 mm
Prüfschritt : 300 mm

	zulässig	festgestellt
f_{ges}	: 1,8 mm	0,06 mm
f_o	: 0,9 mm	0,06 mm
f_u	: -0,9 mm	0 mm

**Kalibrierwerte:**

mm	mm	mm	mm	mm	mm
Soll	festg. Abw.	Soll	festg. Abw.	Soll	festg. Abw.
0,000	0,000	300,000	0,060	600,000	0,055
900,000	0,010	1200,000	0,005	1500,000	0,005
1800,000	0,015	2100,000	0,005	2400,000	0,020
2700,000	0,020	3000,000	0,060		

Abbildung 0.1 Kalibrierschein für Rollbandmaß zur Messunsicherheitsbetrachtung (Perschmann Calibration)

B. Temperaturverläufe

Waagrechte Anordnung des Anschlussrohres:

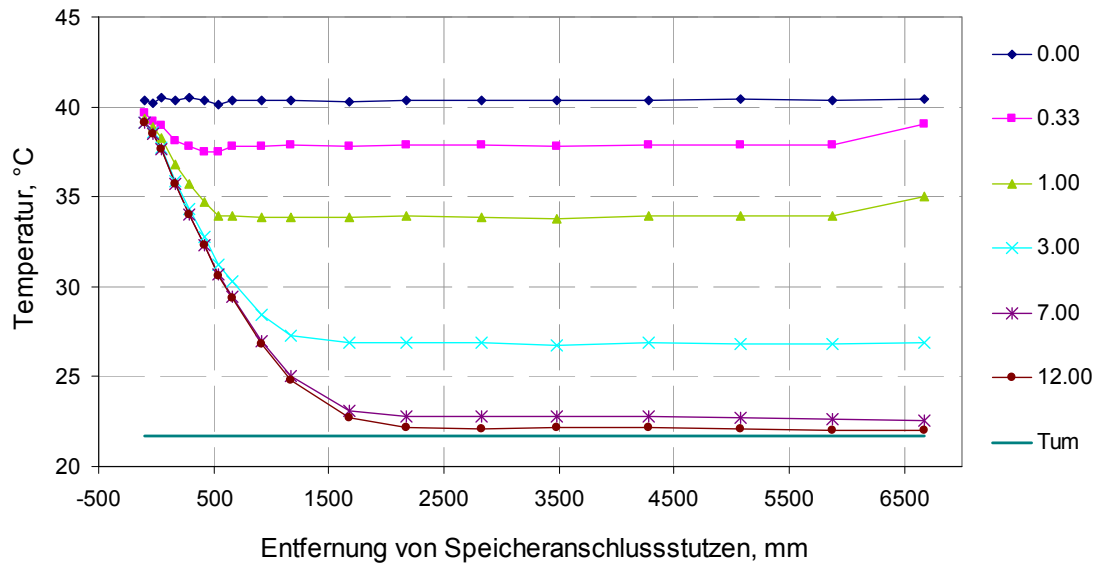


Abbildung 0.2 Temperaturverläufe bei der waagrechten Anordnung nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=40\text{ °C}$)

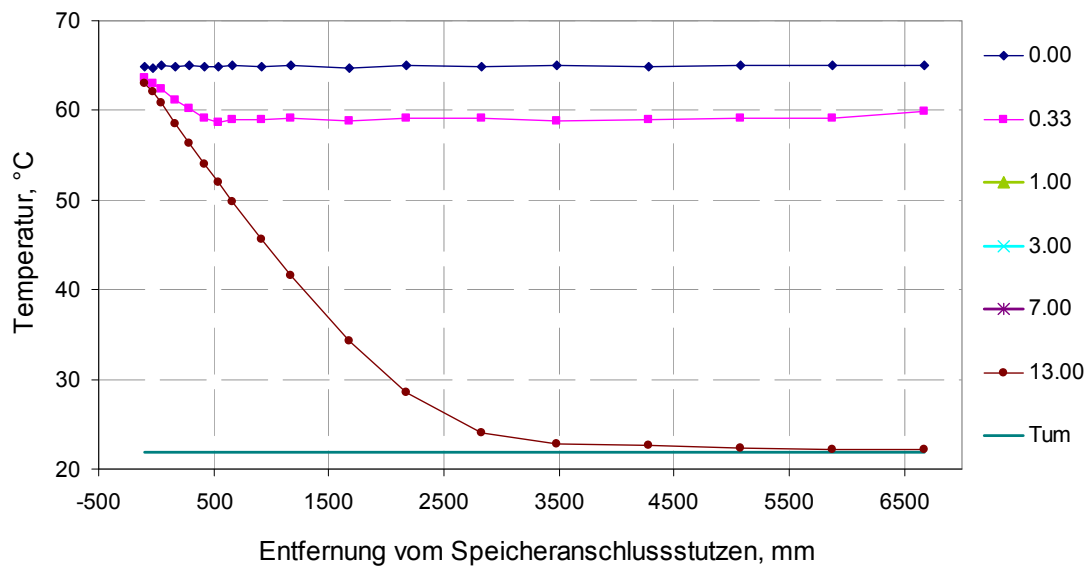


Abbildung 0.3 Temperaturverläufe bei der waagrechten Anordnung nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=65\text{ °C}$)

Senkrechte Anordnung des Anschlussrohres:

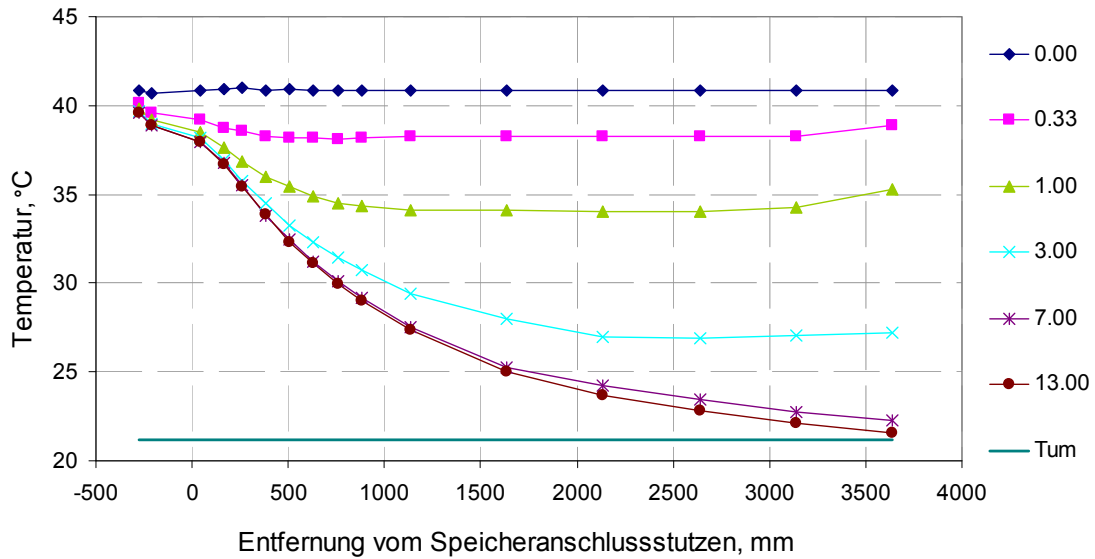


Abbildung 0.4 Temperaturverläufe bei der senkrechten Anordnung nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=40\text{ °C}$)

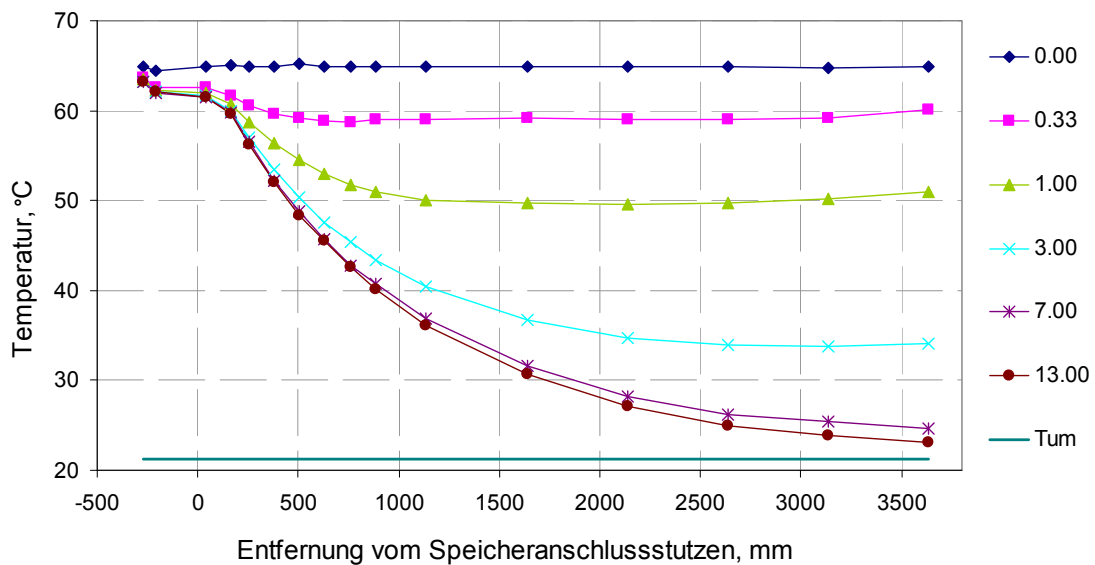
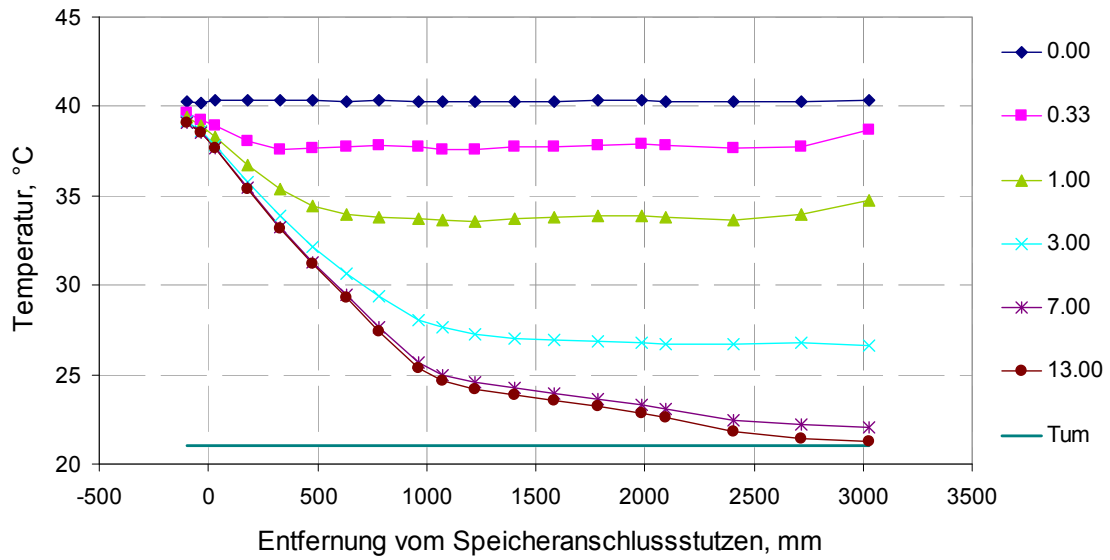
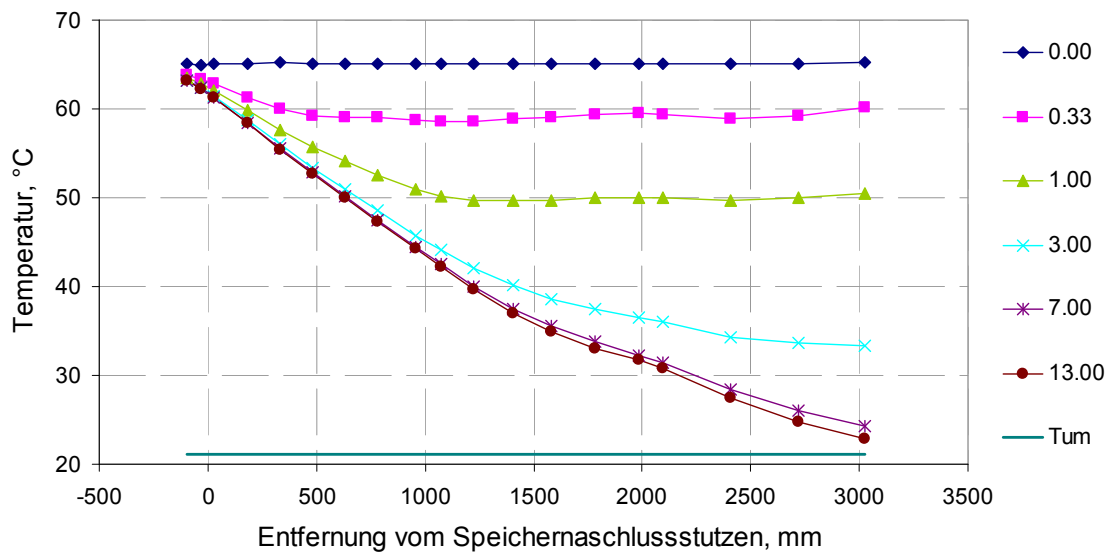


Abbildung 0.5 Temperaturverläufe bei der senkrechten Anordnung nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=65\text{ °C}$)

Rohrkombination 1:

Abbildung 0.6 Temperaturverläufe bei Kombination 1 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=40\text{ °C}$)Abbildung 0.7 Temperaturverläufe bei Kombination 1 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=65\text{ °C}$)

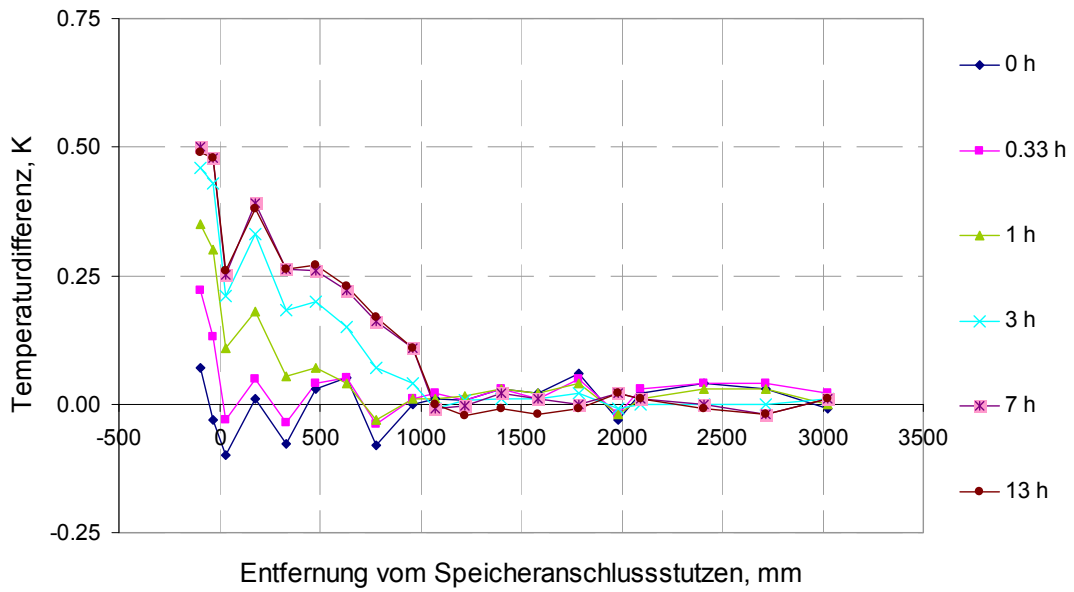


Abbildung 0.8 Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 1 ($T_{Sp} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

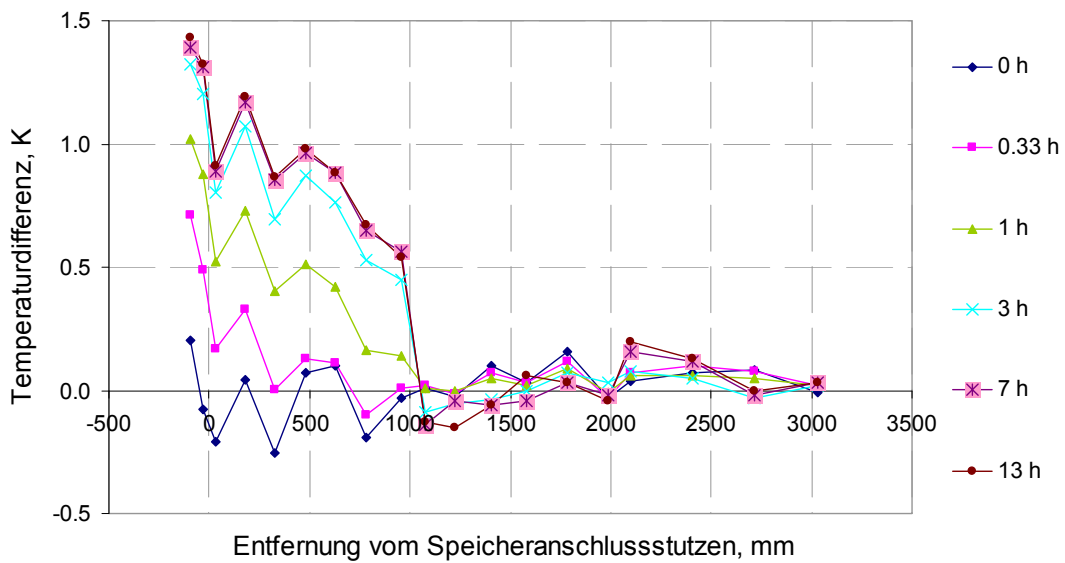
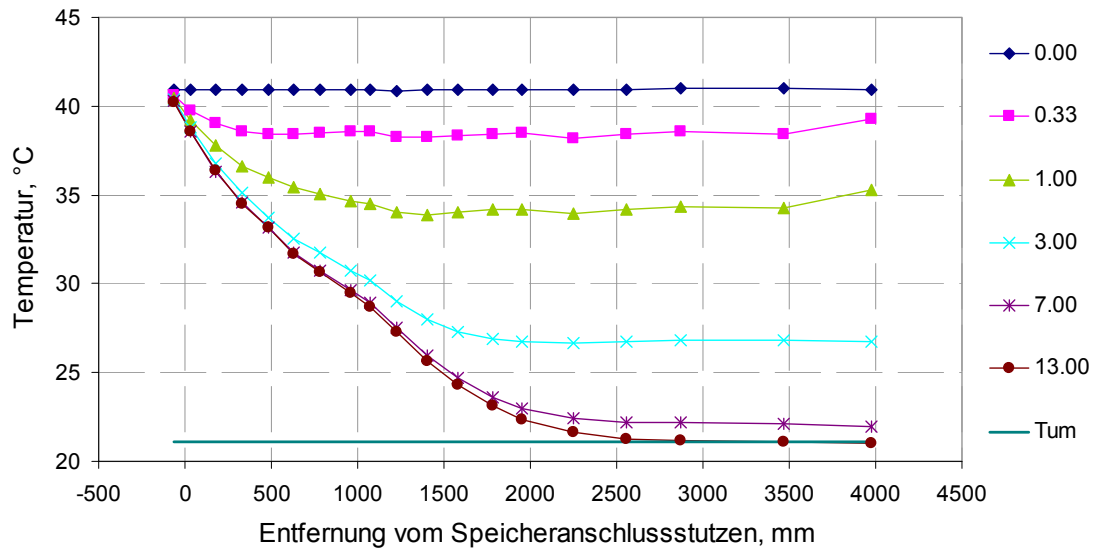
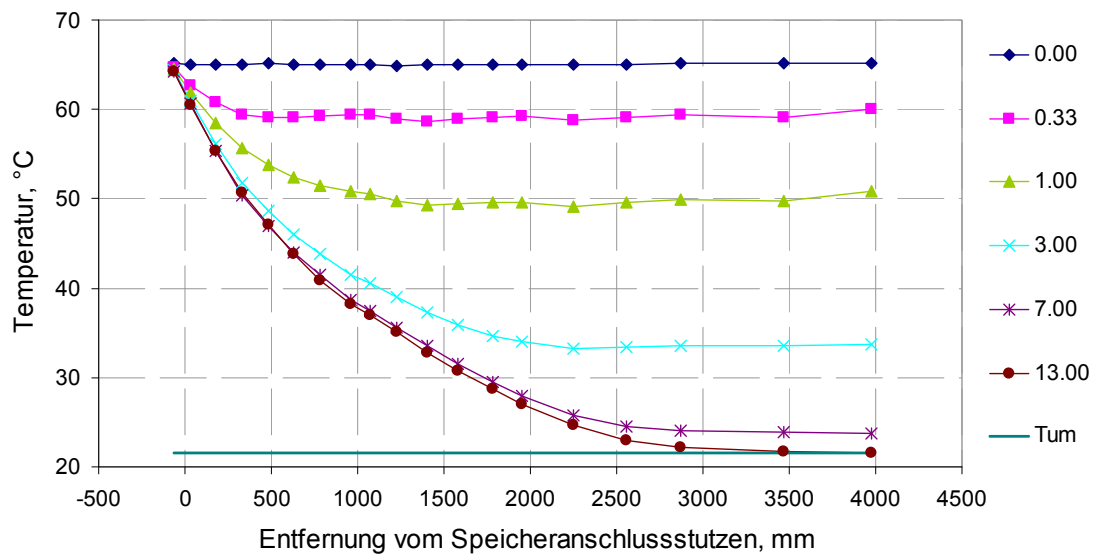


Abbildung 0.9 Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 1 ($T_{Sp} = 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Rohrkombination 2:

Abbildung 0.10 Temperaturverläufe bei Kombination 2 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=40\text{ °C}$)Abbildung 0.11 Temperaturverläufe bei Kombination 2 nach unterschiedlicher Auskühlzeit ($T_{Sp}=65\text{ °C}$)

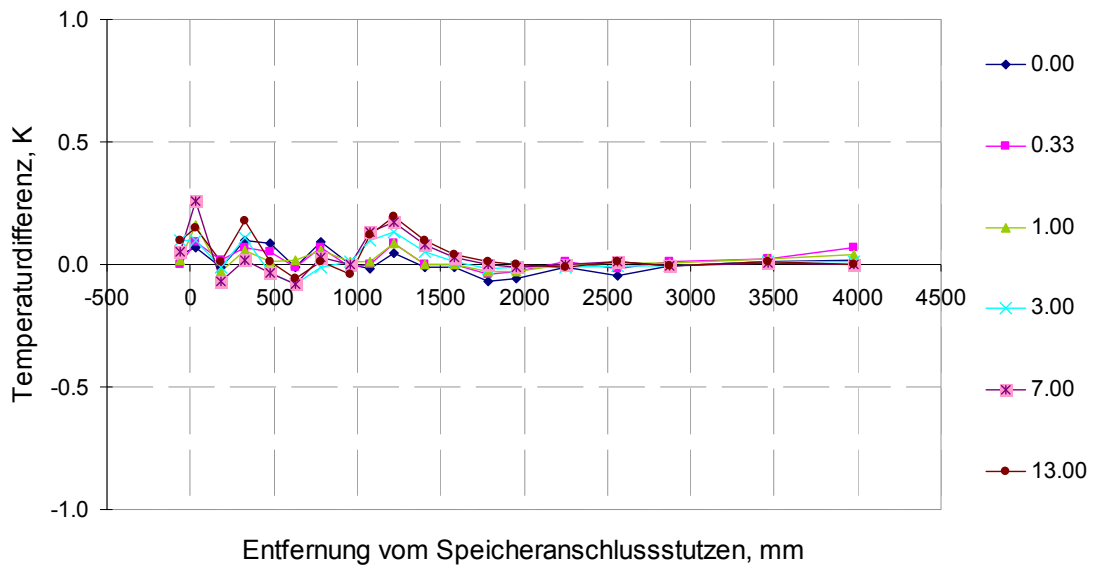


Abbildung 0.12 Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 2 ($T_{Sp} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$)

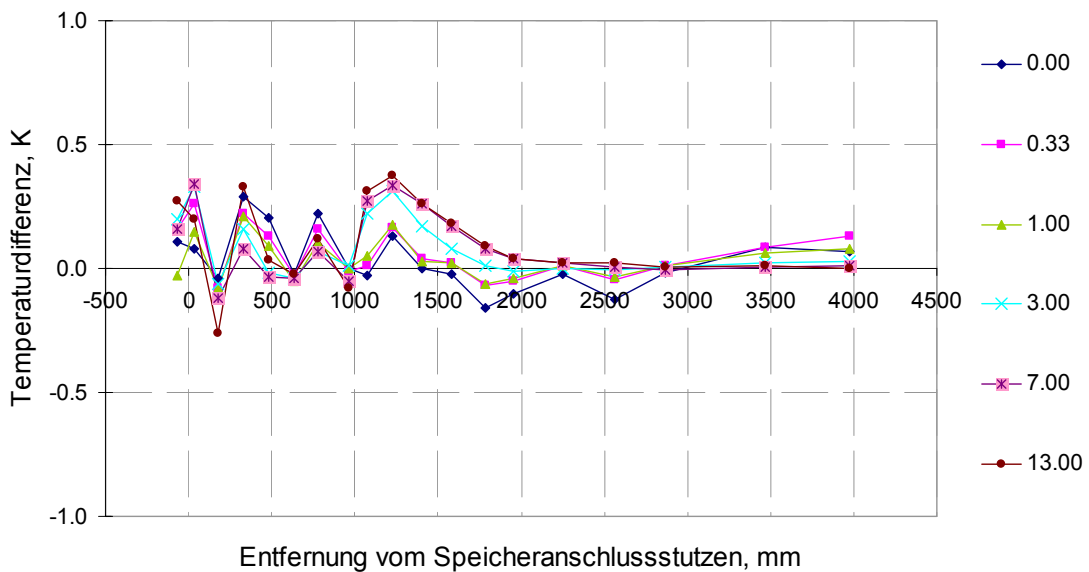


Abbildung 0.13 Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite, bzw. rechter und linker Seite, des Anschlussrohres bei der Kombination 2 ($T_{Sp} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$)

C. Wärmeverluste und Wärmeverlustkoeffizienten

Tabelle 0.6 Q_V - und UA-Werte bei allen Prüflingsanordnungen

	T_{Sp} (ermittelt)	$T_{Rohr, mittel}$	T_{um}	Q_V	UA	Q_V (extrapoliert)	UA (extrapoliert)
	°C	°C	°C	W	W/K	W	W/K
rein waagrechte Ausrichtung der Anschlussleitung							
$T_{Sp}=40\text{ °C}$	40,09	23,75	21,7	2,7	0,14	-	-
$T_{Sp}=65\text{ °C}$	64,90	29,80	21,92	10,2	0,24	-	-
$T_{Sp}=90\text{ °C}$	90,81	39,08	21,5	22,7	0,33	-	-
rein senkrechte Ausrichtung der Anschlussleitung							
$T_{Sp}=40\text{ °C}$	40,79	26,31	21,18	3,6	0,18	-	-
$T_{Sp}=65\text{ °C}$	64,90	33,77	21,23	8,8	0,20	9,0	0,206
$T_{Sp}=90\text{ °C}$	90,44	41,01	21,53	13,7	0,20	13,9	0,201
Rohrkombination 1							
$T_{Sp}=40\text{ °C}$	40,05	25,52	21,05	2,63	0,138	-	-
$T_{Sp}=65\text{ °C}$	65,0	38,47	21,18	10,15	0,232	10,2	0,237
$T_{Sp}=90\text{ °C}$	90,46	53,64	21,35	18,95	0,274	19,2	0,282
Rohrkombination 2							
$T_{Sp}=40\text{ °C}$	40,68	25,31	21,07	3,3	0,167	-	-
$T_{Sp}=65\text{ °C}$	65,02	31,3	21,49	7,6	0,17	-	-
$T_{Sp}=90\text{ °C}$	90,36	37,54	21,35	12,5	0,18	-	-

D. VBA Code

```

Const constmaxL As Integer = 5000 'Maximale Laenge in mm

Sub Ausw_Verlauf_Kombination()
'Ersteller: NMa, Datum: 08.02.2013

'Diese Sub ist dient zur Berechnung des Temperaturverlaufs in einer Rohrlei-
tung, die sich aus bis zu 3 waag- oder senkrechten Abschnitten zusammensetzt.
Basis für die Berechnung sind Messungen rein waag- und senkrechten geführten
Rohrleitung.
'*****
'*****
'Achtung: Alle Laengenangaben in mm

'1) Deklaration Variablen
Dim arrTverlauf(15000) As Single
Dim tmpTverlauf As Single
Dim tmpAusrichtung As String
Dim input_x_waag As Range
Dim input_x_senk As Range
Dim input_Temp_waag As Range
Dim input_Temp_senk As Range
Dim Segment1 As String
Dim xSeg1Ende As Integer
Dim Segment2 As String
Dim xSeg2Ende As Integer
Dim Segment3 As String
Dim xSeg3Ende As Integer
Dim x As Range
Dim xVerschiebung_waag As Integer
Dim xVerschiebung_senk As Integer

'2) Legt den Bereich der rein waag- und senkrechten Verlaeufe fest (Ausgangs-
daten)
Set input_x_waag = Range(Cells(11, 5), Cells(61, 5)) '[E11:E61]
Set input_x_senk = Range(Cells(11, 5), Cells(61, 5)) '[E11:E61]
Set input_Temp_waag = Range(Cells(11, 6), Cells(61, 6)) '[F11:F61]
Set input_Temp_senk = Range(Cells(11, 7), Cells(61, 7)) '[G11:G61]
Segment1 = Cells(4, 10) 'Zelle "J4"; Verlauf des ersten Rohrseg-
ment
xSeg1Ende = Cells(4, 12) 'Zelle "L4"; Ende des ersten Rohrsegment
(mm)
Segment2 = Cells(5, 10) 'Zelle "J5"; Verlauf des zweiten Rohrseg-
ment
xSeg2Ende = Cells(5, 12) 'Zelle "L5"; Ende des ersten Rohrsegment
(mm)
Segment3 = Cells(6, 10) 'Zelle "J6"; Verlauf des dritten Rohrseg-
ment
xSeg3Ende = Cells(6, 12) 'Zelle "L6"; Ende des ersten Rohrsegment
(mm)
xVerschiebung_waag = 0
xVerschiebung_senk = 0
Set x = Range(Cells(15, 11), Cells(15, 11))

'3) Berechnung des Temperaturverlauf in der kombinierten Rohrleitung
For I = 0 To constmaxL
x = I
Select Case I
Case Is <= xSeg1Ende
'Berechnung des ersten Abschnitt bzw. Segment

```

```

If Segment1 = "waagrecht" Then
    arrTverlauf(I) = cubic_spline(input_x_waag, input_Temp_waag, x)
ElseIf Segment1 = "senkrecht" Then
    arrTverlauf(I) = cubic_spline(input_x_senk, input_Temp_senk, x)
End If
'Verschiebung des Temperaturverlauf des zweiten Abschnitt
If I = xSeg1Ende Then
    xVerschiebung_senk = FuncVerschiebung(arrTverlauf(I), input_x_senk, input_Temp_senk)
    xVerschiebung_waag = FuncVerschiebung(arrTverlauf(I), input_x_waag, input_Temp_waag)
End If
Case Is > xSeg2Ende
'Berechnung des dritten Abschnitt bzw. Segment
If Segment3 = "waagrecht" Then
    x = x - xSeg2Ende + xVerschiebung_waag
    arrTverlauf(I) = cubic_spline(input_x_waag, input_Temp_waag, x)
ElseIf Segment3 = "senkrecht" Then
    x = x - xSeg2Ende + xVerschiebung_senk
arrTverlauf(I) = cubic_spline(input_x_senk, input_Temp_senk, x)
End If
Case Else
'Berechnung des zweiten Abschnitt bzw. Segment
If Segment2 = "waagrecht" Then
    x = x - xSeg1Ende + xVerschiebung_waag
    arrTverlauf(I) = cubic_spline(input_x_waag, input_Temp_waag, x)
ElseIf Segment2 = "senkrecht" Then
    x = x - xSeg1Ende + xVerschiebung_senk
arrTverlauf(I) = cubic_spline(input_x_senk, input_Temp_senk, x)
End If
'Verschiebung des Temperaturverlauf des dritten Abschnitt
If I = xSeg2Ende Then
    xVerschiebung_senk = FuncVerschiebung(arrTverlauf(I), input_x_senk, input_Temp_senk)
    xVerschiebung_waag = FuncVerschiebung(arrTverlauf(I), input_x_waag, input_Temp_waag)
End If

End Select
Next

'4) Ausgabe
For I = 0 To 5000
    Cells(11 + I, 8) = I
    Cells(11 + I, 9) = arrTverlauf(I)
Next

End Sub

Function FuncVerschiebung(ByVal TEnde As Single, ByVal input_x As Range, ByVal input_T As Range)
Dim x As Range
Set x = Range(Cells(15, 12), Cells(15, 12))
For I = 0 To 5000
    x = I
    If cubic_spline(input_x, input_T, x) < TEnde Then
        FuncVerschiebung = I
        Exit Function
    End If
Next
End Function

```