

## Öffentlicher Projektabschlussbericht

<p>ZE:  <b>DLR, Institut für Technische Thermodynamik</b>  <b>DLR, Institut für Solarforschung</b></p>	<p>Förderkennzeichen:  <b>03EE5005 (DLR)</b></p>										
<p>Vorhabenbezeichnung:  <b>Komponententests für Flüssigsalzanwendungen (MSComp)</b></p>											
<p>Laufzeit des Vorhabens:  <b>01.07.2019 – 31.12.2021 (2,5 Jahre)</b></p>											
<p>Berichtszeitraum:  <b>01.07.2019 – 31.12.2021</b></p>											
<p>Bearbeiter:</p> <table border="0"> <tr> <td><b>Marco Prenzel</b></td> <td><b>(DLR-TT)</b></td> </tr> <tr> <td><b>Thomas Bauer</b></td> <td><b>(DLR-TT)</b></td> </tr> <tr> <td><b>Dirk Krüger</b></td> <td><b>(DLR-SF)</b></td> </tr> <tr> <td><b>Niklas Dicke</b></td> <td><b>(DLR-SF)</b></td> </tr> <tr> <td><b>Anne Schlierbach</b></td> <td><b>(DLR-SF)</b></td> </tr> </table>		<b>Marco Prenzel</b>	<b>(DLR-TT)</b>	<b>Thomas Bauer</b>	<b>(DLR-TT)</b>	<b>Dirk Krüger</b>	<b>(DLR-SF)</b>	<b>Niklas Dicke</b>	<b>(DLR-SF)</b>	<b>Anne Schlierbach</b>	<b>(DLR-SF)</b>
<b>Marco Prenzel</b>	<b>(DLR-TT)</b>										
<b>Thomas Bauer</b>	<b>(DLR-TT)</b>										
<b>Dirk Krüger</b>	<b>(DLR-SF)</b>										
<b>Niklas Dicke</b>	<b>(DLR-SF)</b>										
<b>Anne Schlierbach</b>	<b>(DLR-SF)</b>										
<div data-bbox="199 1321 327 1422"> </div> <p><b>Deutsches Zentrum  DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.</b>  in der Helmholtz-Gemeinschaft</p>											

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Inhaltsverzeichnis

I	Kurze Darstellung .....	4
1	Aufgabenstellung.....	4
2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde .....	6
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
II	Darstellung Einzelergebnisse .....	8
1	Einleitung.....	8
2	Konzeption von Komponententests (AP2).....	10
2.1	Anforderungsprofile an flüssigsalzdurchströmte Komponenten .....	10
2.1.1	Globale Anforderungen in flüssigsalz-basierten Hochtemperatur-prozessen ..	10
2.1.2	Rohrleitungen inkl. Lagerung, Begleitheizung und Isolierung .....	11
2.1.3	Verbindungstechnik.....	13
2.1.4	Ventile .....	15
2.1.5	Pumpen.....	17
2.1.6	Receiverrohre.....	18
2.1.7	Instrumentierung .....	19
2.1.8	Sonstige Komponenten .....	21
2.2	Entwicklung Testkonzept für Flüssigsalz-Komponenten .....	21
2.2.1	Angewandte Standards im Komponentenbereich.....	21
2.2.2	Rohrleitungen inkl. Lagerung, Begleitheizung und Isolierung .....	22
2.2.3	Verbindungstechnik.....	24
2.2.4	Ventile .....	27
2.2.5	Pumpen.....	28
2.2.6	Receiverrohre.....	29
2.2.7	Instrumentierung .....	30
2.2.8	Sonstige Komponenten .....	30
2.3	Ableich wissenschaftlicher Anforderungen mit TESIS:com.....	31
2.3.1	Rohrleitungen inkl. Lagerung, Begleitheizung und Isolierung .....	32
2.3.2	Verbindungstechnik.....	32
2.3.3	Ventile und Begleitheizung mit Isolierung .....	33
2.3.4	Pumpen.....	34
2.3.5	Receiverrohre.....	34
2.3.6	Instrumentierung .....	34

---

3	Durchführung von Komponententests (AP3)	35
3.1	Vorbereitung der Testkampagnen	35
3.1.1	Akquisition von Industriepartnern	35
3.1.2	Beschreibung der TESIS:com Versuchsanlage	36
3.1.3	Überblick der durchgeführten Komponententests	37
3.2	Testkampagne 1	38
3.2.1	Versuche Flanschverbindungen (KLINGER Kempchen GmbH)	38
3.2.2	Versuche Ventile #1 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)	54
3.3	Testkampagne 2	66
3.3.1	Versuche Ultraschall-Durchflussmessgerät (Endress und Hauser)	66
3.3.2	Versuche Ventile #2 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)	69
4	Empfehlungen für Komponenten und -tests (AP4)	77
4.1	Anpassungen Testkonzepte	77
4.1.1	Flanshtests	77
4.1.2	Ventiltests	78
4.1.3	Tests Instrumentierung - Durchflussmessung	79
4.2	Grundlegende Design Empfehlungen	79
4.2.1	Rohrleitungen inkl. Lagerung, Begleitheizung und Isolierung	79
4.2.2	Verbindungstechnik	81
4.2.3	Salzventile	82
4.2.4	Pumpen	85
4.2.5	Receiverrohre	85
4.2.6	Instrumentierung	87
III	Darstellung zur Verwertung und zum Fortschritt	89
	Erfolgte DLR Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Konferenzbänden	89
IV	Quellenverzeichnis	90

# I Kurze Darstellung

## 1 Aufgabenstellung

Die installierte Leistung von Solarkraftwerken mit Flüssigsalz als Arbeits- und/oder Speichermedium nimmt stetig zu. Beim Speicher kommt sowohl im Turm- als auch im Rinnensystem derzeit nahezu ausschließlich Flüssigsalz zum Einsatz. Neben den bereits als Stand der Technik geltenden Turmsystemen mit Flüssigsalz als Wärmeträger wird auch die Installation von Parabolrinnensystemen mit Flüssigsalz als Wärmeträger angestrebt. Damit einher geht eine steigende Nachfrage nach zuverlässigen und kostengünstigen Komponenten für Flüssigsalz (Ventile, Sensoren, Pumpen etc.). Nur sehr wenige Hersteller können qualifizierte Komponenten mit entsprechend vertrauenswürdigen Garantien anbieten. Aus diesem Grund sind Preise für salzführende Komponenten derzeit hoch. Hersteller, die keinen Funktionsnachweis vorweisen können, fallen bei der Auswahl häufig heraus, da gerade die salzführenden Bauteile eine hohe Qualität aufweisen müssen.

Im Fokus des Projekts MSComp stand insbesondere deutschen Komponentenherstellern eine Testmöglichkeit zu bieten, um ihre Produkte mit zugeschnittenen Versuchen und unter praxisrelevanten Randbedingungen zu qualifizieren. Somit lassen sich neue Produkte entwickeln und das Angebot am Markt diversifizieren. Die Versuche wurden in der DLR-Testanlage TESIS:com durchgeführt. Im Einzelnen wurden folgende Ziele mit dem Projekt MSComp verfolgt:

- Bestimmung der Anforderungsprofile an flüssigsalzdurchströmte Komponenten und Entwicklung von Testkonzepten. Zudem wurden die Anforderungen der Komponententests mit den Möglichkeiten der TESIS:com Anlage abgeglichen (siehe Abschnitt II-2).
- Durchführung von Versuchen mit Komponenten von Industriepartnern in der TESIS:com Anlage anhand der vorher definierten Testkonzepte (siehe Abschnitt II-3).
- Mit den Erkenntnissen aus den Versuchen wurden die Testempfehlungen nochmals kritisch hinterfragt und zum Teil angepasst. Zudem wurden grundlegende Designempfehlungen für Komponenten erarbeitet (siehe Abschnitt II-4).
- Verwertung und Publikation der Ergebnisse und Erkenntnisse (siehe „Erfolgte DLR Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Konferenzbänden“ in Abschnitt III)

## 2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Stand 2020 waren weltweit solarthermische Kraftwerke mit einer Kapazität von ca. 6.000 MW installiert. Die Mehrheit der Turmkraftwerke verwenden Flüssigsalz als Wärmeträgermedium. Insgesamt besitzen knapp die Hälfte der solarthermischen Kraftwerke einen Flüssigsalzspeicher. Der Einsatz von Flüssigsalz in Parabolrinnenkraftwerken befindet sich noch in der Erprobungsphase. Diese Fakten und der wachsende Markt für Concentrated Solar Power (CSP) verdeutlichen den Stellenwert von Flüssigsalz als Arbeits- und Speichermedium. Folglich nimmt auch die Bedeutung von geeigneten und kostengünstigen Flüssigsalzkomponenten stetig zu. Deshalb benötigen Hersteller, die einen Zugang zum CSP Markt suchen, Testmöglichkeiten, um ihre Komponenten unter praxisrelevanten Rahmenbedingungen zu prüfen.

Bei dem Vorhaben MSComp handelte es sich daher um ein Vorhaben in der vorwettbewerblichen Phase, in dem Forschungs- und Entwicklungsaufgaben mit hohem Potential aber auch hohem Entwicklungsrisiko untersucht wurden. Dies bezieht sich insbesondere auf die experimentell untersuchten Komponenten, welche von den beteiligten Industriepartnern zum Teil erstmalig mit Flüssigsalz bis zu einer Temperatur von 560 °C getestet wurden.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben MSComp wurde vom DLR durchgeführt. Beteiligt waren das Institut für Technische Thermodynamik und das Institut für Solarforschung. Ersteres war verantwortlich für die Projektkoordination. Das Vorhaben konnte fristgerecht zum 30.12.2021 abgeschlossen werden. Nachfolgend werden die Kompetenzen und Rolle der beiden Forschungsinstitute erläutert.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist das nationale Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt mit den weiteren Schwerpunkten Energie-, Sicherheits- und Verkehrstechnik.

Das Institut für Technische Thermodynamik des DLR besitzt langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet thermischer Energiespeicher im Hochtemperaturbereich. Es war bzw. ist in zahlreichen Entwicklungsprojekten für die Speicherung in den Bereichen Solarwärme, industrielle Prozesswärme und Kraftwerkstechnik in deutschen und EU-Projekten beteiligt (ITES, REAL-DISS, DE-TOP, HOTSPOT, MS-Store, Partner-Dampfkraftwerk, Reslag, STAGE-STE, Newsol). In diesen Projekten ist das DLR-TT Kompetensträger in den Bereichen Systemtechnik für sensible und latente thermische Speicher auf Salzbasis. Weiterhin wurden in diesen Projekten die Analyse und Synthese von flüssigen Salzen als Speicher- und Wärmeträgermedium adressiert. Aufbauend auf diesen Erfahrungen betreibt DLR-TT mit Unterstützung des BMWK, die Flüssigsalzversuchsanlage TESIS in Köln, mit dem Ziel die Speicher- und Verfahrenstechnik von Flüssigsalz weiterzuentwickeln, so wie die Komponentenqualifizierung voranzutreiben. Der Einsatz alternativer und verbesserter Komponenten für Flüssigsalzsyste me weist ein hohes Kostenreduktionspotential auf. Es sind aber noch wesentliche wissenschaftliche und technologische Fragestellungen zu lösen die im Projekt adressiert wurden. Hierzu hat das DLR-TT spezifische Tests für die im Projekt untersuchten Komponenten in der Anlage TESIS:com entwickelt. Die Vorbereitung, Durchführung, Auswertung der Versuche sowie die wissenschaftliche Verwertung der Versuchsergebnisse waren ebenfalls in der Verantwortlichkeit von DLR-TT. Es wurden Tests mit Ventilen, Flanschen und Durchflussmessgeräten durchgeführt. Die Ergebnisse der Tests und die Erkenntnisse aus den Diskussionen mit den Industriepartnern sind in die nachfolgend beschriebenen Arbeiten von DLR-SF eingeflossen.

Das Institut für Solarforschung gehört zu den international führenden Forschungs- und Entwicklungsinstitutionen im Bereich solarthermischer Kraftwerke. An den Standorten Köln, Stuttgart, Almeria und Jülich arbeiten derzeit etwa 150 Angestellte an der Weiterentwicklung konzentrierender Solartechnologien. Im Rahmen des Projekts MS-Store wurden von DLR-SF Versuche zur Prozessführung von Flüssigsalzanlagen definiert und durchgeführt. Im Projekt HPS2 wurde mit einer Reihe von Industriepartnern eine Demonstrationsanlage für Flüssigsalz in Portugal aufgebaut. Durch dieses Projekt verfügt DLR-SF über umfassende Erfahrungen mit Flüssigsalzanwendungen und den entsprechenden Anforderungen, die eine reale Anlage an die Komponenten stellt. Im Projekt übernahm DLR-SF die Gesamtkonzeption der Testprozeduren für salzdurchströmte Komponenten.

Dies beinhaltet die Definition von Anforderungsprofilen aus dem CSP-Kraftwerk, die Aufarbeitung der Literatur und die internationale Vernetzung. Die Ergebnisse der Komponententests sind in die Ausarbeitung von Empfehlungen zur Prüfung und zum Design von Komponenten eingeflossen. Die Arbeiten wurden mit der Veröffentlichung dieser Empfehlungen abgeschlossen.

## 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Wie bereits erwähnt entwickeln sich Solarturmkraftwerke mit Salzschnmelzen als Wärmeträger und Speichermedium mehr und mehr zum Industriestandard. Viele Parabolrinnenkraftwerke mit Thermoöl als Wärmeträger sind mit einem Flüssigsalzspeicher, der ebenfalls salzdurchströmte Komponenten beinhaltet, ausgestattet. Folgende Tabelle fasst die Betriebserfahrung von mit Nitratsalzschnmelzen durchströmten Komponenten zusammen.

**Tabelle 1: Betriebserfahrung von durchströmten Komponenten mit Nitratsalzschnmelzen.**

Anwendung	Flüssigsalztemperatur	Betriebserfahrung
Industrielle Prozesswärme bis 500 °C in Nischenanwendungen (z.B. chemische Industrie)	Max. 500 °C	Jahrzehnte
Solarthermische Parabolrinnenkraftwerke mit Thermoöl als Wärmeträger und Flüssigsalz als Speichermedium	Max. 400 °C	Ca. 10 Jahre
Solarturmsystemen mit Flüssigsalz als Wärmeträger- und Speichermedium	Max. 560 °C	Einige Jahre
Solarthermische Parabolrinnenkraftwerke mit Flüssigsalz als Wärmeträger	~500 °C	Forschung & Entwicklung

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass insbesondere für Temperaturen oberhalb von 400-500 °C sehr wenig Betriebserfahrung für flüssigsalzdurchströmte Komponenten vorliegt. Im Rahmen des Vorhabens hat das DLR viele Gespräche mit Komponentenherstellern geführt, um diese von einer Teilnahme an den Versuchen in MSComp zu überzeugen. Zum einen sind aus einigen Einzelgesprächen mit erfahreneren Unternehmen diverse Probleme und Herausforderungen hinsichtlich Funktion (gefrorenes Salz, überhitztes Salz, Dichtungsthematiken) und Messgenauigkeit bei der Instrumentierung bekannt. Zum anderen haben viele Komponentenhersteller den Business Case CSP noch gar nicht oder nur teilweise für sich erkannt. Dadurch ist der Entwicklungsstand von Komponenten von Flüssigsalz stellenweise auf einem niedrigen Stand oder überhaupt nicht vorhanden. Es sind eher wenige Publikationen zum Test von salzdurchströmten Komponenten verfügbar. Beispielsweise wurden Testergebnisse von Salzventilen veröffentlicht [1, 2]. Im Rahmen der Task Annexes der „International Energy Agency Solarpaces“ gibt es im „Task III: Solar Technology and Advanced Applications“ Bemühungen Testprozeduren für Flüssigsalzkomponenten für thermische Speicher zu entwickeln.

Somit ist es zwar hilfreich diesen Wissenstand zu sichten und zu nutzen, gleichzeitig ist es aber absehbar, dass ein großes Wissensdefizit hinsichtlich der Testprozeduren von salzdurchströmten Komponenten in der offenen Literatur vorliegt. Gleiches gilt für die kritischen Designaspekte von Komponenten. Das Know-How liegt hier bei den Industriepartnern und Details sind, da die Komponentenhersteller ihr Fachwissen schützen, kaum in der Fachliteratur vorhanden.

## **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Im Rahmen des Projekts waren Komponentenhersteller über Industrieverträge eingebunden. Die folgenden Unternehmen waren an den Tests beteiligt:

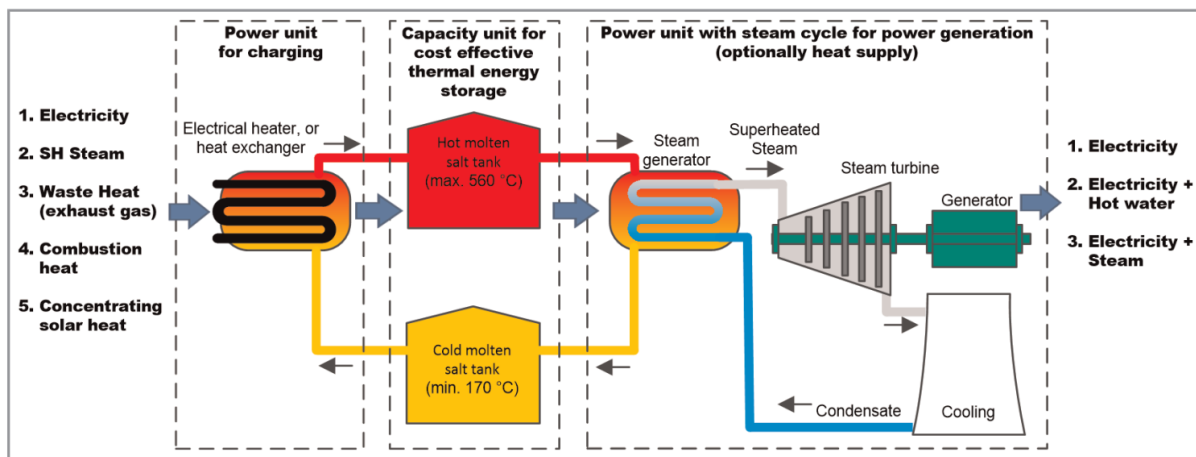
- Stahl-Armaturen PERSTA GmbH – Absperrventile
- KLINGER Kempchen GmbH – Flanschverbindungen und Dichtungen
- Endress und Hauser Flowtec AG – Durchflussmesstechnik

Darüber hinaus wurde das Projekt im SolarPACES Task III „Solar Technology and Advanced Applications“ des Task Annexes der „International Energy Agency Solarpaces“ vorgestellt.

## II Darstellung Einzelergebnisse

### 1 Einleitung

Übergeordnetes Ziel des Projekts MSComp war, die Flüssigsalztechnologie insbesondere im Bereich solarthermischer Kraftwerke weiterzuentwickeln. Die Flüssigsalztechnologie bietet perspektivisch auch das Potential für Anwendungen im Bereich konventionelle Kraftwerkstechnik bzw. Wärmespeicherkraftwerke und Effizienzsteigerung bei der industriellen Prozesswärme in Deutschland. Eine Skizze eines Wärmespeicherkraftwerks ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1: Skizze eines Wärmespeicherkraftwerks mit drei Teilsystemen: Leistungseinheit zum Laden (links); Kapazitätseinheit zum Speichern (Mitte); Stromerzeugungseinheit zum Entladen (rechts); entnommen aus [3].**

Die Speicherkomponente ist ein herkömmlicher 2-Tank-Flüssigsalzspeicher. Auf der Beladeseite ist die Leistungskomponente ein Flüssigsalz-Wärmetauscher. Die zur Erwärmung des Flüssigsalzes benötigte Wärme kann aus verschiedenen Quellen stammen, z.B. aus einem Solarfeld mit Thermalöl als Wärmeträger. Eine Ausführung der Beladeeinheit als Flüssigsalz-Elektroheizer ist ebenfalls möglich, um volatilen erneuerbaren Strom zu speichern. Im Falle eines solarthermischen Kraftwerks mit Flüssigsalz als Wärmeträger ersetzt das Solarfeld bzw. Turm den Flüssigsalz-Wärmeübertrager. Auf der Entladeseite wird in einem Flüssigsalz-Dampferzeuger Hochdruckdampf produziert, um eine Turbine mit Generator anzutreiben.

Fokus des Projekts MSComp sind nicht die oben beschriebenen Hauptkomponenten von solarthermischen Kraftwerken und Wärmespeicherkraftwerken, sondern die vielen verschiedenen Subkomponenten, welche für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der großtechnischen Anlagen benötigt werden. Diese sind Rohrleitungen und alle damit verbunden Komponenten (Lagerung, Verbindungstechnik, Begleitheizung etc.), Ventile, Pumpen, Receiver, Instrumentierung etc. Dabei stehen die folgenden Ziele im Vordergrund:

- Ausschöpfung von Kostensenkungspotentialen bei Flüssigsalzkomponenten, z.B. durch eine größere Zahl von Komponentenanbietern mit Funktionsnachweis
- Best-Practice-Empfehlungen für Testverfahren von Flüssigsalzkomponenten als ersten Schritt in Richtung Standardisierung und Qualitätssicherung von flüssigsalzdurchströmten Komponenten



In den folgenden Abschnitten werden die durchgeführten Arbeiten und die dabei erzielten Ergebnisse für die jeweiligen Arbeitspakete dargestellt. Die Arbeiten im Projekt sind gemäß dem Projektantrag in vier Arbeitspakete aufgeteilt:

## **AP1: Projektsteuerung, Berichtswesen und Verwertung**

Zu den Aufgaben in AP1 gehörten die Abstimmung der Inhalte der einzelnen Arbeitspakete sowie die Sicherstellung der pünktlichen und reibungslosen Weitergabe von Informationen zwischen den zahlreichen externen Firmen und dem DLR. Zudem wurden die während der Projektlaufzeit regelmäßig stattfindenden Projekt- und Arbeitstreffen und das Berichtswesen koordiniert. Da in diesem Arbeitspaket, mit Ausnahme der Verwertung der Ergebnisse, keine berichtsrelevanten Inhalte erarbeitet wurden, wird auf das AP1 nicht weiter eingegangen. Die Verwertung der Ergebnisse ist Gegenstand des Abschnitts III.

## **AP2: Konzeption von Komponententests**

Übergeordnetes Ziel des Arbeitspakets war es geeignete Komponententests zu konzipieren. Hierzu wurden zunächst die Anforderungsprofile an flüssigsalzdurchströmte Komponenten erörtert. Die erarbeiteten Anforderungsprofile waren Grundlage für die Entwicklung geeigneter Testkonzepte für Flüssigsalz-Komponententests. Das Arbeitspaket 2 wurde mit einem Abgleich der wissenschaftlichen Anforderungen mit den Möglichkeiten der verwendeten TESIS:com Anlage abgeschlossen. Die Inhalte von AP2 sind im Abschnitt II-2 dargestellt.

## **AP3: Durchführung von Komponententest**

Das Ziel des Arbeitspakets war es, Komponenten der Industriepartner anhand der in AP2 definierten Testprozeduren an der Tesis:com-Anlage zu testen. Mit Abschluss des Arbeitspakets lagen Messergebnisse und Erfahrungen der Tests für verschiedene Flüssigsalzkomponenten vor. Die Versuche sind im Abschnitt II-3 beschrieben.

## **AP4: Empfehlungen für Komponententests**

Die grundlegenden Erkenntnisse aus dem Testbetrieb flossen in eine kritische Hinterfragung der Testkonzepte aus AP2 ein. Beispielsweise wurden systematische Schwachstellen bei Bauteilen anonymisiert aufgezeigt. Zudem wurden grundlegender Design-Empfehlungen abgeleitet. Das ursprüngliche Testprogramm für die jeweiligen Einzelkomponenten wurde bewertet und zum Teil angepasst. Abschnitt II-4 befasst sich mit den Ergebnissen des Arbeitspakets 4.

## 2 Konzeption von Komponententests (AP2)

### 2.1 Anforderungsprofile an flüssigsalzdurchströmte Komponenten

In diesem Kapitel werden für jedes Bauteil individuell prozesstechnische Anforderungen definiert, die sich aus dem Einsatz in solarthermischen Kraftwerken ergeben. Dies betrifft z.B. Drücke, Temperaturen, Durchflüsse, Nennweiten und Anzahl von Temperaturwechseln. Die Arbeiten werden durch eine Aufbereitung des Wissenstandes bzw. eine Literaturrecherche hinsichtlich der Komponentenanforderungen ergänzt. Bei Technologien für Turmkraftwerke kann, soweit bekannt, auf Erfahrungen aus bestehenden Anlagen zurückgegriffen werden. Zu linienfokussierenden Systemen (LFS) liegen Erfahrungen zum Speichersystem vor, wobei zu den Kollektoren nur Erfahrungen aus Forschungsanlagen vorliegen. Es fließen hier auch Erfahrungen aus internationalen Netzwerken (z.B. IEA, SolarPACES), sowie Erfahrungswerte der DLR Salzanlagen ein: Testanlage für Wärmespeicherung in Salzschnmelzen (Tesis:com, Köln), Évora Molten Salt Plattform (EMSP, Betrieb mit der Universität Évora), Solarturm Jülich.

#### 2.1.1 Globale Anforderungen in flüssigsalzbasieren Hochtemperaturprozessen

Die Verwendung von Flüssigsalz in bspw. solarthermischen Kraftwerken als Arbeits- und Speichermedium stellt hohe Anforderungen an die verschiedenen Komponenten. Das korrosive und heiße Salz, welches ca. die Viskosität von Wasser bei etwa doppelter Dichte aufweist, beansprucht die Komponenten, sodass herkömmliche Testverfahren mit Wasser oder Gasen kaum Rückschlüsse auf Flüssigsalz erlauben. Es ist daher notwendig die benötigten Bauteile und Armaturen unter möglichst realen Einsatzbedingungen zu testen.

Bezogen auf solarthermische Kraftwerke lassen sich global gültige Anforderungen an Temperatur- und Druckbeständigkeit aller Komponenten definieren. Diese sind abhängig von dem verwendeten Salz, wobei am häufigsten ein Nitratsalz, das sog. Solarsalz (40 Gew%  $\text{KNO}_3$ , 60 Gew%  $\text{NaNO}_3$ ), eingesetzt wird. Die typischen Betriebstemperaturen liegen im Vorlauf und im Bereich der kalten Speichertanks bei ca. 290 °C limitiert durch die Schmelztemperatur des Salzes (Liquidustemperatur ca. 250°C). Im Rücklauf des Solarkreises, dem heißem Tank und dem Dampferzeuger werden maximale Temperaturen von 565 °C im Medium und max. 580°C - 600°C als Wandtemperatur bei Turmreceiver erreicht [2, 4, 5]. Bei Temperaturen ab ca. 565 °C beginnt jedoch die Degradierung des Salzes. Es ist davon auszugehen, dass die exakte Zersetzungstemperatur von den äußeren Randbedingungen - insbesondere der Atmosphäre abhängt [6, 7]. Durch die geringe Viskosität bei gleichzeitig hoher Dichte des Nitratsalzes sind die Druckverluste in den Leitungen gegenüber herkömmlichen Öl- oder Wasser-/Dampfanlagen geringer. Weiterhin weisen die eingesetzten Flüssigsalze quasi keinen Dampfdruck auf. Die notwendigen Betriebsdrücke sind dementsprechend reduziert und betragen für kommerzielle solarthermische Rinnensysteme circa 10 bar bis 20 bar. Die geforderten Designdrücke der Anlagen überschreiten i.d.R. 40 bar nicht [2, 5, 8-10]. Herstellerangaben zufolge gibt es aber auch Anfragen für Turmsysteme mit bis 80 bar Auslegungsdruck. Diese hohen Drücke treten in den Steigleitungen des Vorlaufs, aufgrund des Drucks der geodätischen Höhe der Türme und des Druckverlusts des Receivers, auf.

Zusammengefasst ergeben sich die maximalen Anforderungen an Druck und Temperatur, technologiespezifisch, nach Tabelle 2.

Im Folgenden wird näher auf die unterschiedlichen Komponenten und deren spezifischen Anforderungen eingegangen.

**Tabelle 2: Max. Anforderungen an Komponenten in solarthermischen Kraftwerken.**

	Rinnensysteme		Turmsysteme	
	Vorlauf	Rücklauf	Vorlauf	Rücklauf
Max. Druck in bar	40	10	80	50
Max. Temperatur in °C	290	400 (Öl) 565 (Salz)	290	565

## 2.1.2 Rohrleitungen inkl. Lagerung, Begleitheizung und Isolierung

### *Rohrleitungen*

Die Verrohrungen der Kraftwerkskomponenten sind wichtige Komponenten im Gesamtsystem. Beim Einsatz in einem Prozess mit Flüssigsalz müssen die Rohrleitungen neben den Anforderungen durch Druck, Ausdehnung und Temperatur auch dem Medium Flüssigsalz standhalten. Je nach Temperatur und Reinheit kann Flüssigsalz korrosiv wirken. Zudem besteht immer das Risiko des Einfrierens bei Unterschreitung der Salzschnmelztemperatur, weshalb Begleitheizungen und deren Überwachung zentral für die Langlebigkeit der Leitungen bzw. das Verhindern von Erstarrungsvorgängen sind. Gleiches gilt auch für die Absorber- bzw. Receiverrohre (Heat collecting element = HCE), welche bereits durch einmaliges Einfrieren/Auftauen dauerhaft geschädigt werden können.

Ein weiteres Element der Verrohrung sind die Rohrleitungsstützen, welche zur Vermeidung von Kältebrücken ebenfalls isoliert und teilweise beheizt werden. Die thermischen Ausdehnungen müssen durch Gleitlager am Rohr kompensiert werden. Dies erfordert spezielle Konstruktionen, die eine am Rohr unverschiebbar fixierte Stütze mit einem Gleitlager kombinieren und dabei die Wärmeverluste so gering wie möglich halten.

Die meisten Anforderungen an Rohrleitungen entsprechen denen für Ventile in Abschnitt 2.1.4. Speziell für die Receiverrohre in linienfokussierenden (LFS) Kollektoren gelten allerdings nach Abschnitt 2.1.6 teilweise andere Bedingungen, weshalb diese separat beschrieben werden.

Die Lastwechsel finden i.d.R. zweimal täglich aufgrund von Tag und Nacht statt. Entsprechend der Belastungen der Ventile entspricht das zwischen 18.250 und 21.900 thermischen Lastwechseln innerhalb einer geplanten Laufzeit zwischen 25 und 30 Jahren [11]. Bei den Zyklen beträgt der Temperaturgradient nach Literaturwerten ca. 2,8°K/s [12]. Die typisch verwendeten Stähle sind nichtrostende, austenitische, hitzebeständige Chrom-Nickel Legierungen (bspw. 1.4878, 1.4571 oder 1.4961) [12]. Die Rohrleitungen haben technologieunabhängig ähnlich große Rohrenndurchmesser zwischen DN 50 und DN 500. Massenströme von bis zu 1.700 kg/s sind in großen Turm-kraftwerken möglich. In Abhängigkeit von der installierten elektrischen Leistung, können bei solarthermischen Großkraftwerken (> 50 MW) auch größere Nenndurchmesser als DN 500 auftreten. Die Strömungsgeschwindigkeiten variieren mit dem Lastgang und bewegen sich im Bereich <5 m/s, um die Druckverluste zu begrenzen. Zu gering sollte die Strömungsgeschwindigkeit nicht sein, da sonst mit den Durchmessern die Wärmeverluste steigen.

Eine wesentlich aufwendigere und fehleranfälliger Komponente der Rohrleitungen ist die Begleitheizung, welche das Gefrieren von Salz in den Leitungen verhindern soll. Da die Schmelztemperatur von Salz im Kraftwerksbereich bei ca. 250°C liegt, müssen die Rohre permanent oberhalb dieser Temperatur gehalten werden.

In der Praxis wird zur Vermeidung von kalten Bereichen eine Mindesttemperatur von ca. 290°C für Solarsalz angegeben [2, 5, 8, 9, 11]. Die Regelung der Begleitheizung wird mit Temperaturmessungen an der Oberfläche der Rohrabschnitte gewährleistet. Im Turmbereich werden die Receiver und Steigleitungen häufig nachts drainiert, um die Wärmeverluste zu verringern.

Zusammenfassung der Anforderungen:

- Typische Stähle für Rohrleitungen 1.4878, 1.4571 oder 1.4961 (Chrom-Nickel)
- Thermische Lastwechsel liegen bei 18.250 bis 21.900
- Temperaturgradienten ca. 2,8 °C/s
- Temperaturen und Drücke siehe Tabelle 2

### ***Rohrleitungslagerungen***

Den Stützen mit integrierten Gleitlagern für die Rohrleitungen sollte ebenfalls Aufmerksamkeit geschenkt werden. Nach der Anbringung der Dämmung ist eine Wartung der Rohrlager aufwendig, weshalb ein reibungsloser Betrieb über die geplante Laufzeit aufrechterhalten werden muss. Entsprechende Rohrlager sind aus der konventionellen Kraftwerkstechnik bereits standardisiert und für die entsprechenden Temperaturbereiche bis 650°C erhältlich (Abbildung 2, Fa. Lisega).



**Abbildung 2: Rohrleitungshalterung mit Rohrschellen auf einer Stütze auf einem Gleitelement Typ „LISEGA“.**

### ***Begleitheizungen***

Bei Begleitheizungssystemen führt eine mangelhafte Montage oft zu einer unzureichenden Wärmeleitung und/oder zur punktuellen Überhitzung mit Schädigung. Geschuldet ist dies oft Kabellängen, die nicht zur Komponente passen. Schlechter Kontakt zwischen Kabel und Komponente, der durch zu lange Kabel zustande kommen kann, führt zu lokalen Überhitzungen und ggf. Schädigung, ohne die eigentliche Oberfläche und somit die Rohrleitung zu erwärmen.

Testbedarf wird in der Identifikation einer optimalen Anbringung und hinsichtlich Einfrier- und Auftauvorgängen gesehen. Schwerpunkte können sein das Nachstellen der Extremfälle, wenn sich die Salzschnmelze abkühlt und zu erstarren droht, das Auftauen von bereits erstarrter Salzschnmelze und die Prüfung der Tauglichkeit verschiedener Begleitheizungssysteme und deren optimaler Anbringung an der jeweiligen Komponente (z.B. Ventile, Pumpen, Rohrleitungslagerungen, Messtechnik).

### ***Rohrleitungsisolierung***

Eine Besonderheit bei Isolierungen für Salzanlagen ist, dass sie lückenlos ausgeführt sein muss. Während bei Medien wie Öl eine Lücke in der Isolierung lediglich zu thermischen Verlusten führt, führt sie bei Salzanlagen leicht zur Einfriervorgängen und somit Verstopfung von Rohren. Dies passiert weniger bei der Befüllung von Anlagen, weil dort das heiße Salz mit einigen 10 K über der Gefriertemperatur eingefüllt wird und dadurch auch z.B. einige Meter kaltes Rohr überwunden werden können. Bei der Entleerung stellt sich nach dem Abfluss der Hauptsalzmenge aber ein kleiner Massenstrom von höher gelegenen, noch nassen Bereichen ein. An kalten Stellen kann das Salz gefrieren und sich nach und nach aufbauen (möglicherweise bis zu einem vollständigen Verschluss bzw. Pfropfen). Beim neuerlichen Befüllen des Rohrs wird die der Pfropfen dann meist erst bemerkt. Der Pfropfen muss dann zunächst lokalisiert werden und schließlich durch Ausbesserung der Isolierung oder zusätzliche Beheizung entfernt werden.

Während gerade Rohrleitungen einfach isoliert werden können, sind für kompliziertere Geometrien wie z.B. Ventile, Pumpen, aber auch Rohrleitungsstützen idealerweise konstruktiv angepasste Lösungen vorteilhaft.

### **2.1.3 Verbindungstechnik**

#### ***Flexible Rohrverbinder (REPAS)***

Bei Parabolrinnensystemen ist eine flexible Verbindungstechnik zwischen den einzelnen Kollektoren bzw. Loopsträngen, zum Beispiel durch Schlauchverbindungen (Abbildung 3), notwendig. Die flexiblen Rohrverbinder an beiden Enden des Kollektors verbinden den bewegten Kollektor mit der statischen Rohrleitung. Die sogenannten REPAS (Rotation and Expansion Performing Assemblys) nehmen die Drehung der Nachführung um die Kollektorachse und die lineare Längenausdehnung der Absorberrohre durch die thermische Ausdehnung auf.



**Abbildung 3: Flexible Rohrverbinder in Parabolrinnenkollektoren nehmen Expansionsbewegung (Pfeil oben) und Rotationsbewegung (unten) auf.**

Dabei kann das gesamte Temperatur- als auch das gesamte Druckspektrum von Vor- und Rücklauf, je nach Einbauort im Kollektorfeld, auftreten. Die notwendigen Bewegungszyklen während einer geplanten Betriebsdauer von 25 bis 30 Jahren betragen zwischen 9.000 und 10.800 und diese Anzahl wurde bereits mit Flüssigsalz getestet [13, 14]. Da REPAS

dünnwandig ausgeführt sind um die Bewegung zu ermöglichen, kann möglicher korrosiver Angriff durch Flüssigsalz eine Herausforderung darstellen. Hierbei wurden die täglichen thermischen Lastwechsel zwischen 230°C und 580°C noch nicht berücksichtigt, da die Tests zunächst bei konstant 230°C und später bei 580°C gefahren wurden.

Während eines Tagesgangs von 0 – 175 Grad muss bei jedem Nachführschritt, der alle 0,1-0,3 Grad stattfindet das Losbrechmoment beim Anfahrvorgang überwunden werden. Die REPAs dürfen nur bewegt werden, wenn die Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur des verwendeten Salzes liegt, weil durch solide Anhaftungen die Wellschläuche beschädigt werden können. Daher muss eine Begleitheizung installiert werden, welche auch bei den ständigen Bewegungen der REPAS dauerhaft zuverlässig arbeitet. Drehdurchführungen mit Graphitdichtungen können aufgrund der chemischen Reaktion mit Flüssigsalz bei über 400 °C nicht eingesetzt werden und erwiesen sich in kommerziellen Kraftwerken ebenfalls als kritisch.

Zusammenfassung der Anforderungen:

- Bewegungszyklen betragen zwischen 9.000 und 10.800
- Nachführung von 0 ° bis ca. 175° in 0,1 ° bis 0,3 ° Schritten
- Temperaturen und Drücke siehe Tabelle 2
- Nenndurchmesser DN 80

### **Flanschverbindungen**

Die wahrscheinlich kritischsten Bauteile sind Dichtungen, Flanschverbindungen und flexible Schläuche, da das korrosive und heiße Flüssigsalz die Materialien angreifen kann (z.B. chemische Reaktion von Flüssigsalz mit Graphitdichtungen ab ca. 400 °C). Zusätzlich sind Flanschverbindungen häufig nicht auf (durch Flüssigsalz auch durchaus schnelle) Temperaturwechsel ausgelegt. Häufige Temperaturwechsel können zu Materialspannungen und auf Dauer zu Materialermüdung führen, sodass es zu Undichtigkeiten kommen kann. Abbildung 4 zeigt die Materialermüdung einer Schraube durch thermische Lastwechsel. Derzeit werden Flanschverbindungen, wenn möglich vermieden und durch Schweißverbindungen ersetzt, da kein Hersteller am Markt für die Dichtigkeit garantiert.

Hinsichtlich Wartung und Flexibilität wäre deren Einsatz jedoch wünschenswert, weshalb es ein hohes Potential für zuverlässige Verbindungstechnik gibt.



**Abbildung 4: Materialermüdung einer Schraube (Bild unten) durch thermische Lastwechsel: Bei wiederholter plastischer Dehnung im heißen Zustand (Bilder oben).**

Die Temperatur- und Druckanforderungen entsprechen denen der vorhergegangenen Komponenten (siehe Tabelle 2). Gleiches gilt für die Rohrdurchmesser, welche zwischen DN 70 und DN 500 (oder ggf. größer bei den größten Anlagen) liegen. Die thermischen Lastwechsel liegen entsprechend der Rohre zwischen 18.250 und 21.900 innerhalb einer geplanten Laufzeit zwischen 25 und 30 Jahren [11]. Die durchschnittlichen Temperaturgradienten nach Literaturwerten betragen ca.  $2,8^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  [12]. Bei Aufheiz- und Abkühlphasen, sowie Eintritt von Flüssigsalz in eine vorgewärmte Leitung sind allerdings auch höhere Gradienten möglich. Gleiches gilt bei einer Betriebsstörung. Genaue Literaturwerte sind für solarthermische Kraftwerke in der Literatur nicht gefunden worden.

Zusammenfassung der Anforderungen:

- Thermische Lastwechsel liegen bei 18.250 bis 21.900
- Nominelle Temperaturgradienten ca.  $2,8^{\circ}\text{C}/\text{s}$
- Temperaturen und Drücke siehe Tabelle 2

## 2.1.4 Ventile

Ventile sind eines der wichtigsten, aber auch problematischsten Bauteile in Hochtemperaturprozessen mit Flüssigsalz als Wärmeträgermedium. Das Salz stellt hohe Anforderungen an die Dichtungen, Packungen und die elastischen Balge (wenn vorhanden) der Ventile. Da die Ventile in das Rohrleitungssystem der Anlagen typischerweise eingeschweißt werden, können defekte Bauteile oder Dichtungen zu längeren Systemausfällen und aufwendigen Reparaturen führen. Für Gewährleistung eines dauerhaften und sicheren Betriebes sollten daher entsprechende Komponententests unter realen Bedingungen durchgeführt werden.

### 2.1.4.1 Bauarten und Funktionsweise von Ventilen

In Anlagen die mit flüssigem Salz betrieben werden, gibt es zwei Ventiltypen die zum Einsatz kommen. Zum einen Butterfly-Ventile, welche bei allen Rohrdurchmessern eingesetzt werden können und zum anderen Globe-Ventile, welche überwiegend in den kleinen Unterverteilungen mit begrenztem Durchmesser verbaut werden. Globe-Ventile werden entsprechend der Anforderungen als Regelventile oder Absperrventile ausgeführt. Zwei Beispielventile sind in Abbildung 5 dargestellt. Zumeist werden Ventile mit mineralisierten Heizleitern umwickelt, um ein Einfrieren zu vermeiden und im Fehlerfall ein Auftauen zu ermöglichen. Weiterhin gibt es Ventilspindelheizungen zur Vorwärmung bei manchen Herstellern. Globe-Ventile stauen bauartbedingt das Salz bis zu einer gewissen Höhe in der Rohrleitung.

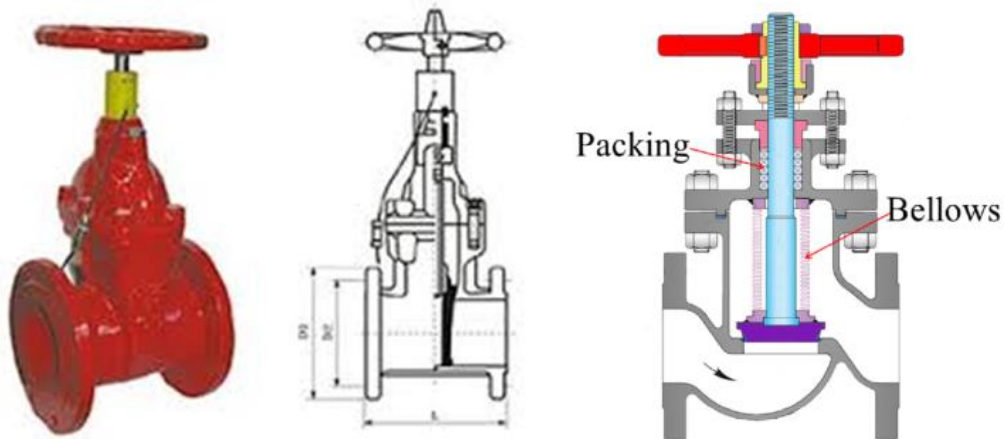


Abbildung 5: Beispielventile links Butterfly-Ventil, rechts Globe-Ventil.

### 2.1.4.2 Spezifische Anforderungen für Ventile in solarthermischen Kraftwerken

Die Auslegungsleistung eines solarthermischen Kraftwerkes ist entscheidend für die notwendigen Salzmassenströme. Regulär beträgt die Strömungsgeschwindigkeit in einer **Parabolrinnen- oder Fresnelkollektorfeld** in jedem Loop (600 m Looplänge) eines Solarfeldes ca. 1 bis 3 m/s, was bei Standardabsorbern (DN 70) etwa 10 kg/s entspricht. Diese ergeben sich als Optimum zwischen Wärmeverlusten, Druckverlusten und der benötigten Temperaturdifferenz. Aufgrund der deutlichen Dichteunterschiede zum konventionellen Arbeitsmedium Öl, sind die durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeiten in Salzanlagen geringer. Die Zuleitungen haben entsprechend einen Rohrdurchmesser von ca. DN 50 bis DN 80. In den Sammelleitungen ergeben sich für konventionelle Kraftwerksgrößen (20 bis 125 MW<sub>el</sub>) Massenströme zwischen 130 kg/s und 900 kg/s. In Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit ergeben sich Rohrdurchmesser zwischen DN 250 und DN 500 [5, 8].

In **Turmsystemen** kommen ähnliche Rohrdurchmesser zum Einsatz. In den Zuleitungen zu den einzelnen Receiverpaneelen werden DN 50 bis DN 100 Ventile verbaut. Die Sammelleitungen haben ähnlich der Rinnensysteme Rohrdurchmesser zwischen DN 300 und DN 500. Massenströme von bis zu 1.700 kg/s sind in großen Turmkraftwerken möglich [15]. In Abhängigkeit von der installierten elektrischen Leistung, können bei solarthermischen Großkraftwerken (> 50 MW) auch größere Nenndurchmesser als DN 500 auftreten. Allerdings wird es häufig vermieden in den größten Querschnitten Ventile zu verbauen.

Durch die hohen Temperaturen, Lastwechsel und Betriebszyklen können Salzleckagen an den Dichtungen und Ventil-Packungen entstehen. Es gibt keinen einheitlichen Standard, welcher die minimale Ventilzyklenzahl in Flüssigsalzanlagen bis zum Versagen beschreibt. Die theoretischen Literaturwerte für Turm- und Linienfokussierenden Systemen variieren stark und übersteigen die realen Zyklenzahlen teils deutlich. Für Regelventile werden bei einer Kraftwerkslaufzeit zwischen 25 und 30 Jahren zwischen 305.000 und 760.000 Zyklen [2, 9, 11] angegeben. Bei Absperrventilen beträgt die Anzahl bei gleicher Laufzeit zwischen 18.250 und 21.900 Zyklen [2, 11].

Diese theoretischen Werte würden bei einer konstanten Regelung mittels der Ventile erreicht, was in der Realität allerdings seltener vorkommen kann. Reale Zyklenzahlen, welche auf den Erfahrungen bspw. aus dem Parabolrinnenkraftwerk Andasol 3 beruhen, sind deutlich geringer und werden nach Lage im Kraftwerk in Tabelle 3 dargestellt. Die Betriebszeit der Anlagen beträgt analog zu den Literaturwerten zwischen 25 und 30 Jahren.



**Tabelle 3: Reale Ventilzyklen in solarthermischen Kraftwerken während 25-30 Jahre Betrieb für Turm- und Rinnenkraftwerke.**

	Speicher/Headerleitung	Loops/Solarfeldquadranten
Regelventile	90.000 – 100.000	< 100
Absperrventile	1.250 – 1.300	< 100

Die großen Abweichungen ergeben sich aus den Betriebsstrategien der kommerziellen Anlagen, da diese nicht energetisch sondern wirtschaftlich ideal betrieben werden. Absperrventile werden fast ausschließlich für Revisions- oder Drainagezwecke verwendet. Ein weiteres Beispiel für den Unterschied zwischen Realität und Literatur findet sich bei den Ventilzyklenzahlen von einzelnen Loop oder Solarfeldquadranten für Ölrinnenkraftwerke. I.d.R. werden die Regelventile nur selten (2-3 Zyklen pro Jahr) verwendet, da die gleichmäßige Verteilung des Wärmeträgermediums auf alle Stränge schwierig zu regeln ist.

Meist gibt es nur einen Sommer- und einen Winterbetriebszustand. Die Leistungsregelung erfolgt daher nicht über den Massenstrom sondern über die Defokussierung der Kollektoren. Die Absperrventile werden ebenfalls für Revisions- oder Drainagezwecke nur selten verwendet. Lediglich die Regelventile der großen Headerleitung und rund um die Dampferzeuger weisen eine hohe Zyklenzahl auf.

Weitere Anforderungen ergeben sich aus den täglichen Lastwechseln der Anlagen, aufgrund von Tag- und Nachtbetrieb. Solartürme werden täglich morgens mit Flüssigsalz befüllt und abends entleert, woraus sich 18.250 bis 21.900 thermische Lastwechsel über die Lebensdauer ergeben. Ähnliches gilt für Salzzinnenanlagen, deren Loops über Nacht auf die Kalttanktemperatur ( $\approx 290^{\circ}\text{C}$ ) abgesenkt oder drainiert werden. Erfahrungen aus kommerziellen Kraftwerken liegen noch nicht vor. Allerdings ist die Drainage bzw. die Befüllung eines linienfokussierenden Systems (LFS) ein aufwendiger Prozess, welcher erst noch näher untersucht wird (s. MSOpera Projekt [16]). Wegen des hohen (Zeit-)Aufwands bei der Befüllung zielt die derzeitige Planung für den Betrieb vor die linienfokussierenden Kollektoren auch nachts befüllt zu belassen.

Zusammenfassend sind folgende Punkte bei Salzventilen als maßgeblich für Tests einzuordnen:

- Ausführung des elektrischen Beheizungssysteme
- Versagen von z.B. Packungen, Balg, keine Spezifikationen für Salzventiltests vorhanden.
- Es kommen überwiegend Globe- und Butterfly-Ventile zum Einsatz
- Die Nenndurchmesser betragen zwischen DN 50 und DN 500 (ggf. auch größer)
- Strömungsgeschwindigkeiten betragen 1 m/s bis 3 m/s
- Temperaturen und Drücke siehe Tabelle 2
- Zyklen siehe Tabelle 3

## 2.1.5 Pumpen

Bewegte Bauteile und Lager in Pumpen mit Kontakt zu flüssigem Salz sind, wie auch Ventile, kritische Komponenten eines solarthermischen Kraftwerks. Das Versagen einer Pumpe kann die Verfügbarkeit einer Anlage einschränken, da es erforderlich sein kann die Pumpen für die

Reparatur aus der Salzschnmelze herauszuziehen was einen zeitaufwändigen Vorgang darstellt. Aus diesem Grund werden häufig redundante Pumpensysteme in salzgeführten solarthermischen Kraftwerken eingesetzt. Typischerweise kommen Pumpen mit langen Wellen (bis zu 15 m) in den Salztanks zum Einsatz. In Pumpentests hat sich gezeigt, dass es selbst bei vielen Betriebsstunden und häufigen Lastwechseln nicht zu Beschädigungen der Hülsen und Lager kommt [17].

Die Anforderungen an Pumpen hinsichtlich Temperaturen, Massenströmen und Drücken erschließen sich aus dem jeweiligen Anwendungsbereich. In solarthermischen Kraftwerken gibt es Salzpumpen im kalten Tank zur Förderung des Wärmeträgermediums in die Receiver, aber auch im heißen Tank, um die Dampferzeuger mit Salz zu versorgen.

Typische Massenströme liegen im Bereich zwischen 130 kg/s und 1.700 kg/s [5, 8, 15], was den Anforderungen an Ventile entspricht. In Turmanlagen, welche täglich drainiert werden, finden häufiger Lastwechsel bei den Pumpen im Vorlauf statt. Daraus resultieren bei einer Laufzeit zwischen 25 und 30 Jahren etwa 90.000 bis 110.000 Betriebsstunden bei 18.000 bis 20.000 An/Abfahrvorgängen. Wesentliche Teile der Pumpe werden aber ständig durch das Salz beheizt, so dass die Temperaturgradienten gering ausfallen. Hingegen sind bei nicht drainierten Rinnenanlagen die Pumpen häufig durchgängig im Einsatz. Gleiches kann für die Pumpen gelten, welche die Versorgung der Dampferzeuger mit heißem Salz permanent sicherstellen. Diese sind durch den nächtlichen Speicherbetrieb ebenfalls zwischen 18 h und 24 h täglich im Einsatz in Abhängigkeit von der Speicherkapazität. Es ergeben sich zwischen 165.000 und 262.000 Betriebsstunden bei gleicher Kraftwerkslaufzeit.

Zusammenfassung der Anforderungen:

- Einsatz von Pumpen mit langem Schaft (15 m)
- Die Nenndurchflüsse betragen zwischen 130 kg/s und 1.700 kg/s (ggf. auch größer)
- Betriebsstunden betragen zwischen 90.000 h und 262.000 h (Technologieabhängig)
- An/Abfahrvorgänge liegen bei 18.000 bis 20.000
- Temperaturen und Drücke siehe Tabelle 2

### 2.1.6 Receiverrohre

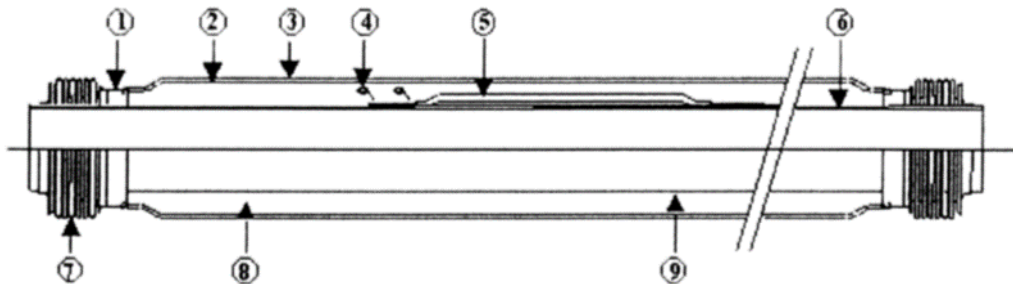
Im Vergleich zu den übrigen Rohren in solarthermischen Kraftwerken sind Receiverrohre am höchsten belastet. Aufgrund der konzentrierten Solarstrahlung liegen die Wandtemperaturen über den Fluidtemperaturen.

Die Drücke sind auch bei **Solartürmen** moderat, da der statische Druck aufgrund der Höhe nahezu vollständig entfällt. Typische Drücke in den Einlassbehältern von Solarturmreceivern liegen bei 30 bis 40 bar. Am Auslass der Receiver sind die Drücke bei Umgebungsdruck oder knapp darüber, je nach System. Wegen der hohen Wärmestromdichten sind geringe Rohrwandstärken vorteilhaft, um die thermischen Spannungen über die Wandstärke der Rohre zu minimieren. Dies führt zu Rohrdimensionen mit einem Rohrinne Durchmesser von 18 mm und einer Rohrwanddicke von 1,2 mm [18]. Größere Durchmesser erreichen bis zu 50 mm. Die Strahlungsdichte beträgt bis zu 1 MW/m<sup>2</sup>.

In **Rinnensystemen** bewegen sich die Designdrücke zwischen 10 und 40 bar entsprechend der Lage des jeweiligen Receiverrohrs. In linienfokussierenden Receivern sind die Temperaturdifferenzen wegen der geringeren Wärmestromdichte erheblich kleiner als in Turmsystemen. Die Massenströme entsprechen den der Rohrleitungen zwischen 130 kg/s und 1.700 kg/s und teilen sich entsprechend auf die einzelnen Receiverrohre auf [5, 8, 15]. Die durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeiten betragen bei linienfokussierenden Systemen

1 m/s bis 3 m/s, hingegen bei Turmreceivern ca. 5 m/s [15]. Diese sind notwendig, um die höheren Wärmestromdichten am Turmreceiver abführen zu können. Zusätzlich kann die Lastwechselanzahl bei Turmreceiverrohren deutlich höher sein, da Wolkenüberzug oder Defokussierung zu weiteren Beanspruchungen führen können. Typische Stahlsorten sind salzseitig bspw. 1.4571 oder 1.4961 im Parabolrinnenbereich und 1.4301, 1.4404, 1.4550, 1.4541 oder 2.4856 im Turmbereich.

Die Prinzipskizze eines Receiverrohrs, wie es in Parabolrinnen und Fresnelkollektoren eingesetzt wird (HCE= heat collecting element) ist in nachfolgender Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6: Querschnitt eines Receiverrohrs für Parabolrinnen;**  
**1: Glas-Metall-Verbindung, 2: Glashüllrohr, 3: Antireflexionsbeschichtung,**  
**4: Vakuumindikatoren, 5: Getter für Vakuumstabilität, 6: Edelstahlrohr, 7: Falten-**  
**balg, 8: Evakuierter Raum, 9: Selektive Beschichtung.**

In dem Bereich zwischen Glashüll- und Metallrohr wird bei der Herstellung Vakuum erzeugt und abgeschlossen. Vakuumbedingungen reduzieren den Wärmeverlust durch Isolierung des Metallrohrs und verhindern eine Oxidation der Rohroberfläche.

Zusammenfassung der Anforderungen:

- Typische Stähle für Rinnenreceiver 1.4571 oder 1.4961
- Typische Stähle für Turmsysteme 1.4301, 1.4404, 1.4550, 1.4541, oder 2.4856 ()
- Sehr häufige thermische Lastwechsel aufgrund der wechselnden Einstrahlung
- Spitzentemperaturen von 650 °C auf der sonnenzugewandten Stahlseite
- Temperaturen und Drücke siehe Tabelle 2

## 2.1.7 Instrumentierung

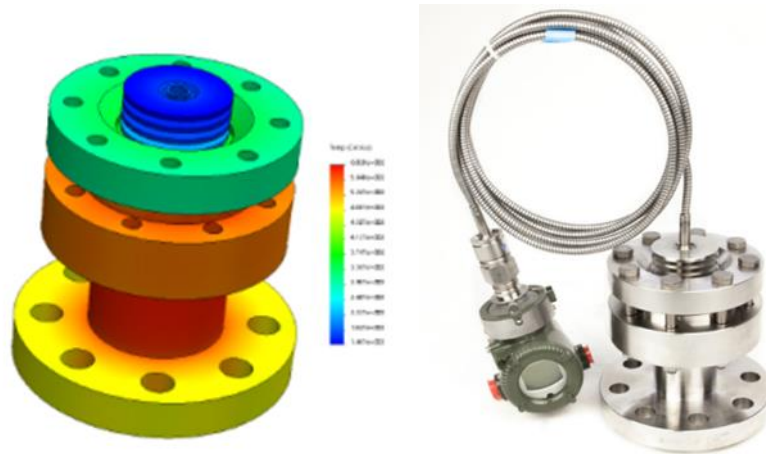
### *Durchflussmessung*

Zur Messung des Durchflusses in den Rohrleitungen von solarthermischen Kraftwerken mit Flüssigsalz als Arbeitsmedium kommen Ultraschall- oder Vortex-Sensoren zum Einsatz. Wobei die Ultraschall Messmethode einige Vorteile aufweist. Bei der Ultraschall Messmethode werden zwei Verfahren unterschieden: Aufklemsensoren (clamp-on) z.B. Flexim und im Rohr integrierte Sensoren (in-line) z.B. Krohne. Die Aufklemmmethode funktioniert eingriffsfrei mittels Aufklemsensoren und Standardlösungen sind bis Prozesstemperaturen von 600°C verfügbar. Da der direkte Kontakt mit dem Flüssigsalz vermieden wird, gibt es keine Probleme mit Korrosion oder zusätzlichen Druckverlusten. Die möglichen Rohrnennweiten betragen bis zu 4 m und die Messung wird für verschiedenste Medien mit einer Messunsicherheit von  $\pm 1\%$  angegeben. Die Prospekt-Unsicherheiten werden im Feld nicht erreicht nach Diskussionen mit Herstellern. Demnach gibt es für die Anwendung in Flüssigsalz bis zu 600°C bereits

Standardlösungen, welche allerdings eine eingeschränkte Messgenauigkeit mit sich bringen. Diese gilt es in Tests auch bei Salztemperaturen von 560°C zu ermitteln. (Fa. Flexim, Fa. Endress+Hauser, Fa. Yokogawa, Fa. Krohne).

## **Salzdruckmessung**

In der Vergangenheit waren Druckmessungen limitiert durch die maximale Betriebstemperatur der Membrandichtung zwischen Sensor und Medium (mit Zwischenschaltung Thermoöl). Diese betrug ca. 400 °C, wurde allerdings speziell für solarthermische Kraftwerke weiterentwickelt und wird mit bis zu 600°C vom Hersteller Badotherm angegeben [19]. Das wird über eine Kühlstrecke mittels eines gerippten Zylinders zwischen Medium und Membran erreicht (siehe Abbildung 7). Es muss allerdings eine Begleitheizung und/oder Dämmung installiert werden, da das Salz in der kleinen Öffnung (3,5 mm) zwischen Kühlstrecke und Membran oberhalb der Schmelztemperatur gehalten werden muss. Das Zusammenspiel von Heizung, Dämmung und Kühlstrecke des Sensors ist der anfälligste Bereich der Messung.



**Abbildung 7: Drucksensor der Fa. Badotherm**

Ist die Heizung und/oder Dämmung zu gering, führt das zu einer Pfropfenbildung in der Öffnung und der Druck kann nicht mehr gemessen werden. Gelangt flüssiges Salz mit über 400°C an die Membran, wird diese zerstört. Der maximale Druckbereich dieser Sensoren beträgt derzeit standardmäßig bis 40 bar (Fa. Badotherm).

## **Füllstandmessung**

Zur Füllstandmessung in den Speichertanks von solarthermischen Kraftwerken werden Leitfähigkeitssensoren (Punktmessung), Radarmessungen (kontinuierliche Messung) oder sog. Bubbler eingesetzt. Der Einsatz von Sensoren zur Füllstandmessung erfolgt häufig redundant, um eine höhere Sicherheit gewährleisten zu können. Eine Radarmessung misst kontinuierlich den Abstand zwischen Sensor und Fluidoberfläche. Sie kann mit Leitfähigkeitssensoren kombiniert werden, die anzeigen, ob Salz an der Messstelle vorliegt (binäre Information). Damit kann nur die Unter/Überschreitung einer Füllhöhe an einer bestimmten Stelle erfasst werden. Sie können als Messungen für MIN- bzw. MAX-Füllstände im Leitsystem dienen. Ein Bubbler ist wie die Radarmessung ein kontinuierliches Messverfahren und kann ebenfalls eingesetzt werden. Ein Bubbler bläst kontinuierlich einen geringen Massenstrom in den unteren Tankbereich. Aus dem benötigten Druck zur Überwindung der Flüssigsalzsäule kann anschließend der Füllstand im Tank berechnet werden (Fa. Bronkhorst). Da Luft ins System geblasen wird, muss vorab geprüft werden, ob

diese einen Einfluss auf die Salzstabilität hat. Ein solcher Bubbler war bspw. auf der EMSP (Èvora Molten Salt Platform) geplant, konnte aber aufgrund der Salzstabilität nicht eingesetzt werden.

## 2.1.8 Sonstige Komponenten

Eine kontinuierliche Überwachung der Salzchemie und auch der NOx Bildung kann je nach Temperatur sinnvoll sein, um die Degradation des Salzes zu überwachen. Eine manuelle Probenentnahme, z.B. über Luken kann mit einer Freisetzung von NOx Gasen einhergehen (potentielle Gefährdung von Betriebspersonal). Für kommerzielle Solarkraftwerke sind derzeit keine Probeentnahmesysteme oder Korrosionsüberwachungsmethoden bekannt.

## 2.2 Entwicklung Testkonzept für Flüssigsalz-Komponenten

Auf Basis einer Literaturrecherche zu Tests flüssigsalzdurchströmter Komponenten und angewandter Standards für weiter verbreitete Wärmeträgermedien wie Thermoöl ist in diesem Kapitel eine Übersicht aller relevanten Komponenten dargestellt. Dabei sind Erkenntnisse aus dem Austausch in internationalen Wissenschaftler-Netzwerken, Konferenzen, Abstimmung mit internationalen Forschungsinstituten und Industrieerfahrung, in diese Zusammenstellung eingeflossen.

In der Testanlage sollen Komponenten und Instrumentierung sowie Betriebsstrategien unter realen Betriebsbedingungen kommerzieller Salzanlagen, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, getestet werden.

Hierzu wurden Standards zu grundlegenden Anforderungen an einheitlichen Prüfverfahren verschiedener Komponenten und Vorgehensweisen untersucht.

### 2.2.1 Angewandte Standards im Komponentenbereich

Bei Salzsammelanlagen handelt es sich um verfahrenstechnische (Chemie)-Anlagen die im Speichersystem drucklos und im Wärmeträgerbereich unter Druck (> 0,5 bar) betrieben werden. Es wurden Standards zu den Bestandteilen wie Rohrleitungsbau, verschiedene Komponenten und Korrosion betrachtet. Eine allgemeine Einführung und Übersicht über DIN-Normen, im Bereich (Chemie-) Anlagenbau, bietet der Deutsche Fachverband der chemischen Industrie mit dem VCI-Infoblatt „Normung für Chemieunternehmen“ [20]. In der folgenden Tabelle sind wichtige Standards des Anlagenbaus zusammengefasst:

**Tabelle 4: Standards des Anlagenbaus zusammengefasst.**

Titel	Dokument	Standard	Jahr
Druckgeräte-Richtlinie zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt	RICHTLINIE 2014/68/EU	EU Richtlinie	2014
Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern	DIN 4754	DIN ISO Standard	2015
Process Piping	ASME B31.3	ASME	2019
Rohrleitungen	DIN EN 13480	DIN ISO Standard	2015

Tests werden unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen und der Belastungen konzipiert, denen Komponenten im realen Betrieb ausgesetzt sind.

Als wichtige Parameter für Salzkomponententests wurden Befüll- und Entleerungsvorgänge, Aufheiz- und Abkühlvorgänge und das „Einfrieren“ und das „Überhitzen“ des flüssigen Salzes identifiziert.

Bei der Auslegung sind Drücke und Temperaturen für die Material und Komponentenauswahl zu berücksichtigen. Diese Anforderungen einer Anlage sind Gegenstand von DIN 4754: „Wärmeübertragungsanlagen mit organischen Wärmeträgern“, die man auf Salzsammelanlagen übertragen kann.

Ein wichtiger und relevanter Standard ist die Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU, sie gilt für Druckgeräte und Baugruppen mit einem Druck von mehr als 0,5 bar. Druckgeräte nach dem Geltungsbereich der Richtlinie sind Druckbehälter, Rohrleitungen und Ausrüstungsteile, sowie beheizte Druckgeräte zur Erzeugung von Dampf und Heißwasser. In der Richtlinie sind verschiedene Fluidgruppen definiert und Flüssigsalz lässt sich hier zuordnen. In der Richtlinie sind ausschließlich Beschaffenheitsanforderungen für Druckgeräte festgelegt.

Das Spanische Komitee für Standards, UNE (Comité Nacional 206), arbeitet an verschiedenen relevanten Standards:

- UNE 206015:2018 Fluidos de transferencia de calor para centrales termosolares con tecnología de captadores cilindroparabólicos. Requisitos y ensayos. (HTF Wärmeträgermedien für solarthermische Kraftwerke mit Parabolrinnentechnologie)
- UNE 206012:2017 Caracterización del sistema de almacenamiento térmico para aplicaciones de concentración solar con captadores cilindroparabólicos. (Charakterisierung von Thermischen Speichersystemen in solarthermischen Kraftwerken mit Parabolrinnentechnologie)
- Stand der Normierung IEC 62862 der Internationalen Elektrotechnische Kommission, hat den Standard IEC/TS 62862-2-1, der Salzspeichersysteme abdeckt, veröffentlicht: IEC/TS 62862-2-1: Thermal energy storage systems - Characterization of active, sensible systems for direct and indirect configurations

## 2.2.2 Rohrleitungen inkl. Lagerung, Begleitheizung und Isolierung

Rohrleitungen können z.B. nach DIN EN 13480 ausgelegt werden. Relevante Bestandteile von Rohrleitungen sind Rohre, Flansche und Armaturen. Die Auslegung des Salzbereichs von solarthermischen Anlagen findet häufig nach ASME statt. In Tabelle 5 werden relevante Standards des Rohrleitungsbaus aufgelistet.

Eine gute Übersicht zu Standards im Rohrleitungsbau liefert das Mußmann Ingenieurbüro für Schweißtechnik und Qualitätsmanagement [21]. Ein Überblick zu Standards im Rohrleitungsbau ist außerdem in Tabelle 5 dargestellt. Als Rohrbefestigungen werden überwiegend Rohrschellen, gemäß DIN 3567, und Rundstahlbügel, gemäß DIN 3570, verwendet. Anforderungen an Werkstoffe für Rohrhalterungen sind in der EN 13480-3 festgelegt. Die wesentlichen Halterungen sind, Hängend (starr/federnd), Stützen (starr/federnd), Führend (gleitend, rollend, gelenkig) und blockend.

**Tabelle 5: Normen für die Standards beim Rohrleitungsbau.**

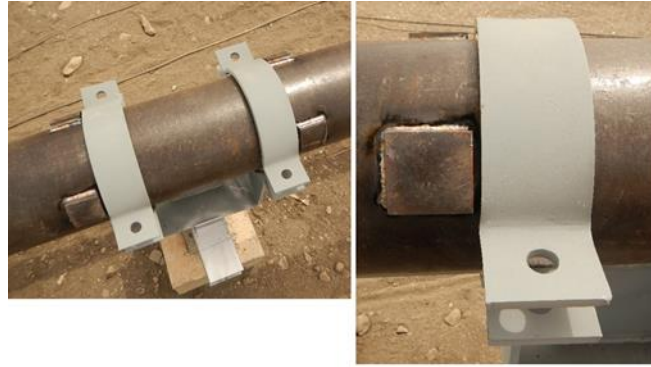
Titel	Dokument	Standard	Jahr
Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen	EN10216	DIN EN	2014
Rohrleitungen	DIN EN 13480	DIN ISO	2015
Flansche und ihre Verbindungen - Runde Flansche für Rohre/Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN bezeichnet	EN1092 /	EN / ASME	2018
Industriearmaturen - Anforderungen und Prüfungen für Metallarmaturen als drucktragende Ausrüstungsteile	ASME B16.5/16.47	DIN / ISO	2018
Schwingungen in Rohrleitungssystemen	EN 16668	VDI	2004
Rohrflansche und Flanschfittings	VDI 3842	ASME	2017
Process Piping	ASME B31.3	ASME	2018

Bei gedämmten Rohren wird, an die Rohrschelle nach unten eine Stütze oder nach oben an einem Gestänge befestigt, die etwas länger als die Dämmungsdicke ist. Bei Stützen ist üblicherweise ein Gleitelement angebracht. Zur Verringerung der Wärmeableitung sollte der Stützquerschnitt gering sein, bzw. ausgespart werden. Die Bauformen unterscheiden sich meist nur in der Gestaltung der Gleitpaarung. Der Reibungswiderstand sollte gering sein, damit die Wärmedehnung nicht behindert wird und um ein seitliches Abknicken der Rohrleitung zu verhindern. Rohraufhängungen, wie federnde Aufhängungen oder Konstant-Federhänger bevorzugt man bei Rohrleitungen die seitlich und nach unten nicht abgefangen werden können. Bei Festpunkten ist die Abstützung, im Gegensatz zum Führungslager, kraftschlüssig mit der Konsole verbunden. S kann z.B. nach Typ „LISEGA“ ausgelegt, für horizontale Rohrlager entspricht dem „Typ 49“.

Rohrbefestigungen können an Salzanlagen durch erhöhten Wärmeverlust eine kalte Stelle mit möglicher Salzerstarrung erzeugen. Um die Wärmeleitung zu mindern, kann zwischen Rohrschelle und Rohr, ein Glasfaserband oder andere Isolierteile montiert werden. Alternativ kann am Gleitlager thermisch isoliert oder ausreichend lange Kühlstrecken genutzt werden.

Aufgeschweißte sogenannte „Knaggen“, auf Rohren mit großem Durchmesser, verhindern das Verrutschen des Rohres in der Schelle (Abbildung 8). Rohrleitungshalterungen könne kippen, sich verklemmen und so durch unkontrollierte Bewegung auf Grund von Wärmedehnung zu Beschädigungen führen.

Es wird kein Testverfahren vorgeschlagen, in der Auslegung müssen aber die oben genannten Probleme berücksichtigt werden. Es wird empfohlen die Bewegungen der Rohrleitung an den Halterungen im kalten und heißen Zustand zu markieren.



**Abbildung 8: Rohrleitungshalterung mit Rohrschellen; durch angeschweißte „Knaggen“ stabilisiert.**

So wird die Bewegung innerhalb der Freiheitsgrade der Rohrleitungsberechnung validiert. Auf diese Weise können Veränderungen detektiert und verfolgt werden.

## 2.2.3 Verbindungstechnik

### *Flexible Rohrverbinder (REPAS)*

Flexible Rohrverbinder, in Form von flexiblen Schläuchen, fallen in die Kategorie Kompensatoren mit metallischen Bälgen für Druckanwendungen, gemäß EN 14917:2012-06, sowie DIN 20066:2018-03 Fluidtechnik- Hydraulikschlauchleitungen- Maße, Anforderungen.

REPAS sind Gegenstand von Arbeitsgruppen, welche Standards für CSP Komponenten erarbeiten, wie z.B. AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Wichtige Punkte sind Vorgaben für Einbauposition und standardisierte Qualitäts- und Eignungstest.

Die flexiblen Schläuche, sowie Drehdurchführungen, können temperaturbeaufschlagt mit dem Salz durchströmt und hinsichtlich der Tauglichkeit mit dem Wärmeträgermedium untersucht werden. Betriebsfälle durch (teilweises) Einfrieren könnten simuliert werden. Mögliche Tests könnten sich in verschiedenen Aspekten unterscheiden:

- durchströmt/undurchströmt;
- bewegt/unbewegt;
- Temperaturniveau;
- einfrieren ja/nein;
- Temperaturzyklen ja/nein.

Auch für Funktionstests der REPAS mit Begleitheizung wird Testbedarf gesehen, da bei Befüllung und Entleerung das Medium vor dem Einfrieren geschützt werden muss und Begleitheizungen von REPAS oft bewegt werden.

### *Flanschverbindungen*

Flansche werden nach Auslegung produziert und üblicherweise nicht getestet. Um korrekte Montage und Dichtheit nach TA Luftvorgaben zu erreichen, gibt es einen Leitfaden vom Verband der chemischen Industrie [22], zur Montage von Flanschen in verfahrenstechnischen Anlagen. Relevante Regelwerke sind in Tabelle 6 gelistet.

Der Einbau von Dichtungen wird allgemein in Anlagen mit hohen Salzttemperaturen soweit möglich vermieden und durch geschweißte Verbindungen ersetzt. Insbesondere bei hohen



Gradienten treten leicht Leckagen auf, die sich dann im Laufe der Zeit vergrößern. Der Ersatz einer Dichtung ist aufwändig, wenn Flansche gewechselt werden müssen.

Eine Übersicht der Auswahlkriterien, Dichtungstypen und verfügbaren -Materialien liefert der Wegweiser für eine sichere Dichtverbindung an Flanschen [23].

Bei der Auswahl der Dichtung sind folgende Kriterien zu beachten [23]:

- Beständigkeit gegen das Prozessmedium
- Betriebstemperatur und Betriebsdruck
- Änderungen der Betriebsbedingungen (z.B. in Zyklen)

**Tabelle 6: Übersicht relevante Normen für Flanschverbindungen und Dichtungen.**

Titel	Dokument	Standard	Jahr
Flansche und ihre Verbindungen - Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtung	DIN EN 1591	DIN EN	2014
Flansche und ihre Verbindungen - Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN bezeichnet	EN1092	EN / ASME Standard	2018
Emissionsminderung - Kennwerte für dichte Flanschverbindungen	ASME B16.5/16.47	Richtlinie	2014
Metalldichtungen für Rohrverbindungen	VDI 2290	ASME Standard	2017

Die Richtlinie VDI 2290 gilt für die Beurteilung der technischen Dichtheit von Flanschverbindungen. Der Produktstandard ASME B16.5 beinhaltet Rohrflansche und Flanschfittings für Flansche der Bewertungsklassifizierungen 150, 300, 400, 600, 900, und 1500 in den Größen NPS 1/2 bis NPS 24. ASME B16.5 ist in Verbindung mit Bauteilen, die in anderen Bänden der ASME B16 Standardreihe, sowie mit anderen ASME Standards beschrieben sind, zu verwenden, wie dem Boiler and Pressure Vessel Code (Konstruktion, Fertigung und Prüfung von Druckbehältern) und den B31 Piping Codes (Vorschriften für Druckrohrleitungen).

Die Wahl des Dichtmaterials schließt einfache Materialien wie z.B. Graphit, durch die chemische Reaktion mit dem Salz aus. Es werden Metalldichtungen eingesetzt. Eine Übersicht metallischer Werkstoffe gibt Tabelle 7 [23]. Genormte und Neuentwickelte Flanschverbindungskonstruktionen sollten getestet werden, weil es durch starke Temperaturgradienten im Salz zu Verformungen kommen kann. Gleiches gilt für Dichtungen, diese sollten auf ihre Tauglichkeit im Zusammenspiel mit dem Medium bei den vorherrschenden Gradienten des Prozesses an der im Rohrleitungssystem eingesetzten Stelle getestet werden.

**Tabelle 7: Metallische Werkstoffe für Dichtungen.**

Bezeichnung	Markenname	Beschreibung	Bemerkung
Kohlenstoffstahl			Nur für allgemeine Anwendungen geeignet
316	18-12 Cr / Ni austenitischer Edelstahl, mit Mo		Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit, jedoch anfällig gegen Spannungsrisskorrosion und interkristalline Korrosion bei bestimmten Medien
316L	Variante von 316, mit reduziertem Kohlenstoffgehalt		Reduzierte Anfälligkeit gegen Spannungsriss- und interkristalline Korrosion
304	18-8 Cr / Ni austenitischer Edelstahl		Ausgezeichnete Beständigkeit gegen Korrosion, jedoch anfällig gegen Spannungsrisskorrosion bei hohen Temperaturen
304L	Variante von 304, mit reduziertem Kohlenstoffgehalt		Reduzierte Anfälligkeit gegen Spannungsriss- und interkristalline Korrosion
321	18-10 Cr / Ni Edelstahl, mit Ti		Anfällig gegen Spannungsrisskorrosion, jedoch weniger gegen interkristalline Korrosion
347	18-10 Cr / Ni Edelstahlvariante		Anfällig gegen Spannungsrisskorrosion, jedoch weniger gegen interkristalline Korrosion. Geeignet für hohe Temperaturen.
410	12-9 Cr / Ni ferritischer Edelstahl		Sehr gut geeignet für hohe Temperaturen, gute Beständigkeit gegen Korrosion
Titan			Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen, hervorragend bei oxidierenden Medien
Legierung 600	Inconel 600®	70% Ni, 15 % Cr, 8% Fe Nickellegierung	Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen
Legierung 625	Inconel 625®	Ni / Cr Legierung, mit Mo und Nb	Hervorragende Korrosionsbeständigkeit in einer Vielzahl von Säuren und Laugen

Bezeichnung	Markenname	Beschreibung	Bemerkung
Legierung 800	Incoloy 800®	32% Ni, 20% Cr, 46% Fe legierter Stahl	Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit bei hohen Temperaturen
Legierung 825	Incoloy 825®	Ni, Cr, Fe, Mo, Cu Nickel-Legierung	Hohe Beständigkeit gegen heiße Säuren und hervorragende Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion
Legierung 200	Nickel 200®	Nickel 99.2% mit min. 99.2% Ni	Hohe Beständigkeit gegen Reduktionsmedien und Laugen
Legierung 400	Monel® 400	67% Ni, 30% Cu Nickel-Legierung	Hohe Beständigkeit gegen Flusssäure
Legierung B2	Hastelloy B2®	Ni / Mo Nickel-Legierung	Ausgezeichnete Beständigkeit gegen Essig-, Salz-, Phosphor- und Schwefelsäure
Legierung C276	Hastelloy C276®	Ni / Cr / Mo Nickel-Legierung	Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit sowohl bei oxidierenden als auch reduzierten Medien
Legierung 20	Carpenter 20	Fe / Ni / Cr legierter Stahl	Speziell entwickelt für Anwendungen, bei denen Beständigkeit gegen Schwefelsäure gefordert wird
Legierung x-750	Inconel® x-750	Ni / Cr / Fe Nickel-Legierung	Ausscheidungsgehärteter, hoch beständiger Stahl
Aluminium			Ausgezeichnete Dehnbarkeit und Streck- bzw. Schmiedbarkeit
Kupfer			Allgemeine Korrosionsbeständigkeit

## 2.2.4 Ventile

In kommerziellen Projekten (solare Kraftwerke mit Parabolrinnentechnologie inklusive Speichersystem oder Solare Turmkraftwerke) werden im Salzbereich hauptsächlich Globevalves und Butterfly-valves eingesetzt. Die Auslegung, was auch standardisierte Prüfverfahren beinhaltet, findet nach den Regelwerken in Tabelle 8 statt. Bei der Prüfnorm EN12266-:2002 handelt es sich um eine hydraulische Druckprüfung zum Feststellen der Dichtigkeit von Ventilen. Der Abschlusskörper wird befüllt in Geschlossenstellung gebracht, für eine festgelegte Dauer mit dem Prüfdruck beaufschlagt und auf Leckagen geprüft. Dabei handelt es sich um eine grundsätzliche Dichtigkeitsprüfung nach Fertigung, weniger um eine Tauglichkeitsprüfung. Die Prüfung kann entweder mit Wasser, einer Flüssigkeit deren Viskosität nicht größer als der von Wasser ist, oder Gas stattfinden. Die Temperatur des Prüfmediums muss im Bereich von 5°C-40°C liegen, somit ist eine Prüfung mit Salzschnmelze nicht vorgesehen.

**Tabelle 8: Regelwerke für Auslegung und standardisierte Prüfverfahren für Ventile.**

Titel	Dokument	Standard	Jahr
Pipework components— Definition and selection of DN (nominal size)	ISO 6708	DIN ISO	1995
Industrial valves — Testing of metallic valves	EN 12266	EN	2002
Valve Inspection and Testing	API 598	API	2016
Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN bezeichnet	ASME B16.5/16.47	ASME-Standard	2018
Schwingungen in Rohrleitungssystemen	VDI 3842	VDI-Richtlinie	2004

Die Prüfdruckberechnung für die hydrostatischen Leckagetests werden auch in ASME 31.1. § 345 beschrieben. Diese hängen von der Designtemperatur, Druckklasse und des E-Moduls der Materialien ab.

Eine gute Beschreibung der Prüfprozedurprozeduren bietet das Handbuch von LANL Engineering Standards für ASME B31.3 Process Piping Appendix H- Leak/Pressure Testing [24].

Bei den Komponententests dieses Projekts handelt es sich um spezifische Tests mit Salzschnmelze als Wärmeträgermedium, bei denen die Tauglichkeit der Prüflinge, unter realen Betriebsbedingungen, getestet werden soll. Parameter, wie z.B. Temperaturen des Wärmeträgermediums, Oberflächentemperaturen der Ventilkörper, Drücke und Durchfluss werden gemessen, dokumentiert und interpretiert. Testzyklen sollten in Anlehnung an die reale Zyklen Zahl des jeweiligen Anwendungsfalls festgelegt werden. Bestimmte spezielle Betriebssituationen des Anwendungsfalls sollten erzeugt werden, um das Verhalten der zu prüfenden Komponenten zu interpretieren und zu dokumentieren. Hierzu gehören auch kritische Situationen, wie Einfrieren der Salzschnmelze aber auch das transiente Verhalten bei Temperaturwechseln. Die Ventile sollten in diesem speziellen Fall im Zusammenspiel mit der Begleitheizung getestet, werden, um kritische Betriebssituationen, wie das Erstarren der Salzschnmelze, nachzustellen. Dichtheitsprüfungen, im Sinne von Funktionsprüfungen, während und nach Abschluss von Testreihen, erscheinen sinnvoll um Defekte und deren Zeitpunkte zu detektieren. Die Durchführung regelmäßiger Dichtheitsprüfungen der Leckagerate, abströmseitig des Abschlusskörpers, nach einer bestimmten Anzahl von Testzyklen, ist empfehlenswert

## 2.2.5 Pumpen

Die Pumpen, die für Salzschnmelzen zum Einsatz kommen, sind langwellige Turbinenpumpen, deren Wellenlager vom Salz geschmiert werden. Die Pumpen werden auf einer separaten Struktur montiert und durch das Dach des Tanks eingesetzt. Auf einen Pumpensumpfvolumen wird üblicherweise bei Flachbodentanks verzichtet, um eine freie Ausdehnung des Flachbodentanks zu gewährleisten. Tests sind im Zusammenhang mit einem ausreichend großen Speichertank durchführbar. Für die Auslegung, Installation und den Betrieb, sind folgende Standards relevant (Tabelle 9).

**Tabelle 9: Normen für die Auslegung, Installation und den Betrieb von Pumpen.**

Titel	Dokument	Standard	Jahr
Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries	API 610 STD	American Petroleum Institute (API)	2010
Drehende elektrische Maschinen	DIN EN IEC 60034	DIN EN EIC Standard	2019
Mechanische Schwingungen- Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen- Teil 7: Kreiselpumpen für den industriellen Einsatz	DIN ISO 10816-7:2009-08	DIN ISO Standard	2009

## 2.2.6 Receiverrohre

Sowohl im Turm- als auch im Rinnenbereich werden Receiverrohre eingesetzt. Folgender Text bezieht sich auf Receiverrohre in Parabolrinnen- und Fresnel-Anlagen, wobei ähnliche Fragestellungen im Turmbereich auftreten. Diese werden durch den Zusammenbau mehrerer Rohre und geeigneter Anbauten (z.B. Ventile), wie in einer Kollektorreihe, als Teil eines Druckgerätes betrachtet (gemäß 2014/68/EU Druckgeräterichtlinie). Da der Hauptzweck die Wärmeübertragung und nicht der Transport von Flüssigkeiten ist, gelten Receiverrohre als Druckbehälter gemäß 2014/68/EU. Für Märkte außerhalb der Europäischen Union, definiert ASME Abschnitt VIII div. 1, die Anforderungen an Druckbehälter. Receiver werden unter Einhaltung der Druckanforderungen geprüft, konstruiert und gefertigt. Als Druckbehälter unterliegen Receiverrohre nicht den Standards für verfahrenstechnische Rohrleitungen (ASME B31.1 oder ASME B31.3). In der Anlage bedarf es der Anbringung einer CE-Kennzeichnung seitens Kraftwerkshersteller, sowie einer Konformitätserklärung. Weitere Anforderungen sind:

- EN10217-7: Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen, technische Lieferbedingungen– Teil 7: Rohre aus nichtrostenden Stählen;
- ASTM A249 Geschweißte Rohre aus austenitischem Stahl für Kessel, Überhitzer und Wärmetauscher,
- ISO9223 Korrosion von Metallen und Legierungen, Korrosivität von Atmosphären Klassifizierung, Bestimmung und Abschätzung, müssen berücksichtigt werden.

Beim Betrieb mit Salzschnmelze als HTF werden durch die Einfriergefahr häufiger Befüll- und Entleervorgänge durchgeführt, als in einer Anlage mit Öl als Wärmeträgermedium. Dadurch kommt es beim Befüllvorgang, mit heißem HTF, in ein kühleres Receiverrohr, zu einer heißen Flüssigkeitszunge der Salzschnmelze, in das zu befüllende Receiverrohr. Dies führt zu einer ungleichen Temperaturverteilung über den Umfang, die zu Wärmespannungen, verbogenen Rohren, bis hin zu defekten Glashüllrohren, führt.

Der Umgang mit dem oben beschriebenen Phänomen der heißen Flüssigkeitszunge könnte Bestandteil einer Testreihe werden, um abzubilden, welche Betriebsstrategie diese Belastungen reduziert (z.B. durch solare Vorwärmung). In Leistungstests der isolierten Begleitheizung sollte die Tauglichkeit validiert werden, die Salzschnmelze flüssig zu halten.

## 2.2.7 Instrumentierung

Messgenauigkeit wird vom Anlagenbetreiber spezifiziert. Sie ergibt sich durch die Anforderungen und die Bestimmung (wissenschaftliche Messungen verlangen höhere Genauigkeiten) der Messung. Für Salzanlagen ist vor allem die Instrumentierung mit Flüssigsalz-Berührung hinsichtlich folgender Größen relevant: Temperatur, Druck, Durchfluss und Füllstand. Explosionsschutz-Richtlinie, ATEX-Richtlinie 94/9/EG, beinhalten Vorschriften für Geräte und Schutzsysteme, zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen. Bei Salzanlagen können EX-Bereiche entstehen, wenn zusätzlich brennbare Medien eingesetzt werden (z.B. Erdgas, Öle – Flüssigsalz selbst ist lediglich brandfördernd aber nicht explosiv oder brennbar). Hierzu muss dann ggf. eine Betrachtung hinsichtlich der ATEX Klassifizierung des jeweiligen Anlagenbereichs durchgeführt werden, wo die Instrumente montiert sind. Wichtig zu beachten sind Schutzklassen gemäß DIN EN 60529 (VDE 0470-1):2014-09 Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code), sie geben die Eignung von elektrischen Betriebsmitteln für verschiedene Umgebungsbedingungen an, zusätzlich den Schutz von Menschen gegen potentielle Gefährdung bei deren Benutzung.

In Salzanlagen kann es zu Ausfällen von Instrumenten, durch mangelhaft montierte Begleitheizung an Messrohrleitungen, mit geringen Durchmessern kommen. Durch den schlechten Kontakt zwischen Heizungssystem und Kontaktfläche, sowie die daraus entstehende schlechte Wärmeleitung, kommt es zu Einfrieren der Salzschnmelze. Dies kann zu ungenauen Messungen, Messausfällen, bis hin zu defekten Instrumenten führen.

Für Tests der Instrumentierung sollten Geräte in der von der Industrie geforderten Genauigkeit und Ausführung getestet und von genaueren wissenschaftlichen Geräten validiert werden. Bei fehlenden alternativen Messmöglichkeiten zur Validierung kann über mehrere redundante Messungen eine Überprüfung sinnvoll sein.

## 2.2.8 Sonstige Komponenten

Bezüglich der Materialauswahl für die Anwendung mit Solarsalz, ist der Korrosionszuschlag für die Auslegung des Rohrleitungssystems und der Speichertanks wichtig, um die Lebensdauer zu garantieren. Diese variiert je nach Material sowie Höchsttemperatur und wird zur rechnerisch (nach Druckgeräterichtlinie) ermittelten Wanddicke als weiterer Aufschlag addiert. Materialabtrag durch Korrosion lässt sich quantitativ schwer bestimmen, weil er von vielen verschiedenen Faktoren abhängig ist, z.B. ob das heiße Salz am Prüfling vorbeiströmt, oder statisch in Tiegeln erhitzt wird. Eine Veröffentlichung von Walczak et al. [25] bietet eine gute Übersicht zum Thema Salzkorrosion.

Angewandte Standards sind in Tabelle 10 aufgeführt:

**Tabelle 10: Übersicht zu Normen im Bereich Korrosion.**

Testtyp	Dokumententitel	Dokument ID	Dokumententyp	Jahr
Korrosionstests in Flüssigsalz	Korrosion von Metallen und Legierungen - Prüfverfahren für die Hochtemperaturkorrosionsprüfung von metallischen Werkstoffen durch Eintauchen in geschmolzenes Salz oder andere Flüssigkeiten unter statischen Bedingungen	ISO 17245	DIN ISO Standard	2015

Testtyp	Dokumententitel	Dokument ID	Dokumententyp	Jahr
Thermo-zyklische Exposition	Korrosion von Metallen und Legierungen - Prüfverfahren zur Prüfung der thermischen Wechselbeanspruchung unter Hochtemperaturkorrosionsbedingungen für metallische Werkstoffe	ISO 13573	DIN ISO Standard	2012
Verfahren zur Entkalkung	Korrosion von Metallen und Legierungen - Entfernung von Korrosionsprodukten von Korrosionsprüfkörpern	ISO 8407	DIN ISO Standard	2014
Metallographische Untersuchung von Proben	Korrosion von Metallen und Legierungen - Verfahren zur metallographischen Untersuchung von Proben nach Einwirkung von korrosiven Hochtemperaturumgebungen	ISO 26146	DIN ISO Standard	2012

## 2.3 Abgleich wissenschaftlicher Anforderungen mit TESIS:com

In diesem Arbeitspaket werden die für einen Einsatz der Komponenten im industriellen Betrieb erforderlichen thermodynamischen Verhältnisse mit den Testmöglichkeiten der TESIS-Anlage für verschiedene Komponenten abgeglichen und angepasst.

Die ca. 2 x 8 m lange U-förmige Teststrecke der TESIS:com Anlage wird mit Salz aus einem Kalttank (ca. 290°C) und einem Heißwassertank (ca. 560°C) beschickt. Derzeit wird das sogenannte Solarsalz (60% NaNO<sub>3</sub>, 40% KNO<sub>3</sub>) verwendet. Durch Mischen am Eingang kann die Teststrecke beliebige Temperaturen zwischen 290 °C und 560 °C und Massenströme zwischen 0,5 und 8 kg/s bei DN50 sowie Temperatur- und Massenstromrampen erzeugen. Die TESIS:com-Anlage verfügt bereits über eine Temperatur- und Massenstrommessung vor dem Messobjekt. Tests im Rahmen des MS-Store BMWi-Projektes zeigten einen maximalen Gradienten am Teststreckeneingang von ca. 32 K/s. Der maximale Gradient in der Testkomponente nach 14 m Strecke beträgt ca. 13 K/s. Das Salz kann in der Teststrecke und deren Komponenten auch gezielt zum Einfrieren gebracht werden. Dies sind die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Prüfung der Komponenten. Die Komponenten sind zugänglich und können zwischen den Tests untersucht und überholt werden. Tabelle 11 zeigt einen Vergleich der Bedingungen in Kraftwerken und in TESIS:com.

**Tabelle 11: Vergleich der Bedingungen in Kraftwerken und in TESIS:com Anlage.**

	Linienfokussierende Kraftwerke	Turmkraftwerke	TESIS:com	
Massenstrom gesamt	130 - 1700	130 - 1700	0,5 - 8	kg/s
Massenstrom Receiverrohr	> 6 kg/s	> 6 kg/s	0,5 - 8	kg/s

	Linienfokussierende Kraftwerke	Turmkraftwerke	TESIS:com	
Strömungsgeschwindigkeit	1 – 3	Bis 5	0,1 – 2 bei $d_i = 50\text{mm}$	m/s
Temperatur Vorlauf Temperatur Rücklauf	565	565	560	°C
Temperaturgradient	2,8	2,8	30	K/s
Druck Vorlauf Druck Rücklauf	40 10	40 – 80 50	$\leq 8$	bar
Typische bzw. gemittelte Zahl der Lastwechsel für verschiedene Komponenten	20.000	20.000	beliebig	

### 2.3.1 Rohrleitungen inkl. Lagerung, Begleitheizung und Isolierung

Die ca. 20.000 thermischen Lastwechsel, die der Laufzeit von Rohrleitungen in solarthermischen Kraftwerken entsprechen, können technisch gesehen in der TESIS:com durchgeführt werden. Bei den Zyklen beträgt der Temperaturgradient nach Literaturwerten ca.  $2,8^\circ\text{C}/\text{sec}$ , was gut erreichbar ist. Beim Temperaturwechsel werden der Heiß- und Kaltsalztank jedoch durch das zurückgeführte Salz abgekühlt bzw. aufgeheizt, so dass dies bei vielen Wechseln zu längeren Temperierungsphasen bei erhöhtem Massenstrom von  $8\text{ kg/s}$  führen kann. Bei  $4\text{ kg/s}$  ist die TESIS:com Anlage durch einen installierten Erhitzer im Heißtankbereich und Kühler im Kalttank auf dauerhaften Mischbetrieb ohne Unterbrechung ausgelegt.

Kritisch ist das Auftauen von Salz zwischen Bereichen in denen das Salz noch gefroren ist, also eine ungleichmäßige Beheizung. Dadurch können Rohrleitungen über die erlaubte Streckgrenze hinaus gedehnt werden. Die Dehnung und auftretenden Spannungen wurden bereits bei Auftauversuchen in der TESIS:com im Projekt MS-Store untersucht. Dabei wurden auch Temperaturschocks aufgebracht und analysiert.

Rohrleitungsstützen mit integrierten Gleitlagern benötigen nicht zwingend den Betrieb mit heißem Salz in der Rohrleitung, um ihre Funktionalität zu prüfen, da kein Kontakt zum flüssigen Salz besteht. Prinzipiell können auch andere Medien wie überhitzter Dampf eingesetzt werden, um die Rohrdehnung und Funktionalität zu prüfen. Wärmeverluste über Rohrlager können z.B. mit elektrischer Beheizung getestet werden.

### 2.3.2 Verbindungstechnik

#### ***Flexible Rohrverbinder (REPAS)***

Die flexiblen Schläuche und Drehdurchführungen für den Einsatz in Verbindung mit Parabolrinnenkollektoren können mit Salz bei den im Kraftwerk üblichen Massenströmen und Temperaturen durchströmt werden. Für die Untersuchung wäre es insbesondere hilfreich gleichzeitig die Flexverbindungen zu bewegen. Dies erfordert jedoch Apparaturen, die nicht Teil der TESIS:com sind. Zyklische Belastungstests, unter Einbeziehung der



temperaturbedingten axialen Längenausdehnung, oder der Rotationsbewegung, können daher nicht ohne zusätzliche Aufbauten durchgeführt werden. Das mehrfache Einfrieren und Auftauen der Flexverbindung ist möglich und wurde bereits im MS-Store Projekt untersucht. Auch Begleitheizungssysteme für REPAS sollten insbesondere unter Bewegung getestet werden, da hier bisher keine Betriebserfahrung vorliegt.

### ***Flanschverbindungen***

Bei Flanschverbindungen kommt es auf die dauerhafte Dichtigkeit an. Undichtigkeiten können in erster Linie auf Temperaturwechsel zurückzuführen. Wegen der oben genannten Randbedingungen ist eine beschränkte Anzahl von Tests mit Temperaturwechseln bei verschiedenen Gradienten möglich. Dies beinhaltet auch die Erstarrung und das Auftauen von Salz, sowie die Auskühlung auf Raumtemperatur.

### **2.3.3 Ventile und Begleitheizung mit Isolierung**

Regelventile unterliegen in Parabolrinnenkraftwerken in den Leitungen im Speicherbereich und in den Sammelleitungen einer Zyklenzahl von ca. 90.000 – 100.000. In den Sammelleitungen ergeben sich für konventionelle Kraftwerksgrößen Massenströme zwischen 130 kg/s und 900 kg/s für Rohrdurchmesser zwischen DN 250 und DN 500. Die erforderlichen Massenströme für diese Ventile liegen erheblich über den Möglichkeiten des TESIS:com Prüfstands. Daher ist es sinnvoll baugleiche, kleinere Ventile zu testen und die Erfahrungen auf größere Ventile zu beziehen.

Bei Ventilen stehen vor allem das vollständige Schließen auch nach langer Betriebsdauer im Vordergrund, sowie die Dichtigkeit der Ventilpackung zur Umgebung. Für den Betreiber solarthermischer Kraftwerke ist zudem eine gleichmäßige Beheizung der Ventile erforderlich mit der sie vorgewärmt und im Fehlerfall aufgetaut werden können, sowie eine wirksame Isolierung.

In den einzelnen Loops der Parabolrinnenkraftwerke liegt die Zahl der Zyklen unter 100 bei einer Durchströmung von etwa 1 bis 3 m/s (dies entspricht je nach Durchmesser der Rohre und Temperatur des Solarsalzes mindestens 6 kg/s, höhere Massenstrom bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und Dichte des Solarsalzes (niedrige Temperaturen)). Diese Zahl an Zyklen kann in Experimenten gut erreicht werden und die in den Anlagen genutzten Ventile können in TESIS:com eingesetzt werden.

Die Ventilpackung wird durch das Medium Salz angegriffen und im Falle von Kristallisation noch stärker belastet. Um dies zu prüfen sind ein Betrieb bei verschiedenen Salztemperaturen mit Öffnen und Schließen der Ventile sowie Einfrierversuche hilfreich. Zudem müssen Ventile auch Temperaturschocks ohne Schaden überstehen.

In TESIS:com ermöglicht es im Rahmen des MSComp Projekts aussagekräftige Tests mit Ventilen durchzuführen, da Anforderungen und TESIS:com Möglichkeiten gut zueinander passen. Mit einem Massenstrom, der etwa dem im Kraftwerksbetrieb entspricht, können einige 1000 Ventilhub durchgeführt werden und es kann Salz in den Ventilen eingefroren und aufgetaut werden. Die Temperaturschocks aus kommerziellen Anlagen können ebenfalls aufgebracht werden.

Eine Begleitheizung muss ausreichend dicht angeordnet sein, um den Ventilkörper auf die notwendige Temperatur zu erhitzen. Gleichzeitig darf es aber nicht zu lokalen Überhitzungen des Salzes über die erlaubten Temperaturen kommen. Dies kann in TESIS:com mit Einfriertests geprüft werden. Dafür müssen an relevanten Stellen in der Isolierung die Temperaturen mit Thermoelementen erfasst werden.

## 2.3.4 Pumpen

Die Erprobung langweiliger Pumpen ist im TESIS:com Testloop nicht möglich. Ggf. sind Tests in der TESIS:store Anlage im Eintankspeicher möglich. Diese zweite Teilanlage stand im Projekt nicht zur Verfügung.

## 2.3.5 Receiverrohre

Eine hohe Belastung von Receiverrohren in Parabolrinnen und ebenso in Fresnelkollektoren entsteht durch Temperaturgradienten beim Einlaufen von Salz. Salz- und Rohrwandtemperatur sind dabei unterschiedlich. Weil das Salz zunächst im tiefer gelegenen Rohrwandbereich einläuft kommt es zu einer radial ungleichmäßigen Temperaturverteilung und entsprechenden Spannungen. Selbst bei einer radial gleichmäßigen Temperaturänderung erlauben die Hersteller nur einen bestimmten Gradienten für ihre Receiverrohre. Diese Situation kann in der TESIS:com mit den gleichen Transienten und Massenströmen wie in Parabolrinnenkraftwerken nachgestellt werden. Die Massenströme der TESIS:com-Anlage passen zu denen von einzelnen Strängen in Parabolrinnenkraftwerken. Typische Receiverrohrängen können in der TESIS:com Strecke mit bis zu 8 m verbaut werden. Insgesamt wurde die TESIS:com-Anlage unter anderem für Tests von Receiverrohren bereits in der Spezifikation passend konzipiert.

## 2.3.6 Instrumentierung

Der Test von Instrumentierung ist in der TESIS:com zu weiten Teilen möglich. Im Projekt MS-Store wurden bereits Leitfähigkeitsmessungen zu einer neuen Füllstandserfassungsmethode in Rohrleitungsabschnitten durchgeführt. Im Projekt HPMS2 wurden Drucksensoren getestet und Volumenstrommessungen mit Ultraschall durchgeführt. Temperaturmessungen außen auf der Rohraußenseite und im Flüssigsalzmedium sind bereits in der Anlage eingebaut. Leitfähigkeits- und Temperaturmessungen können repräsentativ in der TESIS:com Anlage getestet werden. Druckmessungen sind auf ca. 8 bar beschränkt, was unterhalb von realen Anlagendrücken liegt. Die Durchflussmenge mit -messungen erlaubt Massenströme zwischen 0,5 und 8 kg/s. Die Massenströme und Rohrdurchmesser sind in realen CSP-Anlagen größer als in der TESIS:com Anlage, so dass Messungen auf kleine Massenströmen und Durchmesser beschränkt sind.

### 3 Durchführung von Komponententests (AP3)

Inhalt dieses Arbeitspakets ist die Planung, Durchführung und Auswertung von Komponententests in der TESIS:com Anlage. Das Design der Versuche basiert auf den in AP2 definierten Anforderungen. Das Arbeitspaket ist in drei Teilarbeitspakete untergliedert. AP3.1 befasst sich mit der Vorbereitung der Testkampagnen. Die Testkampagnen 1 und 2 werden in AP3.2 bzw. AP3.3 behandelt.

#### 3.1 Vorbereitung der Testkampagnen

Da die Arbeiten im AP3 nicht im Förderumfang enthalten waren, mussten Tests mit Komponentenhersteller akquiriert werden. Angebote für Komponententests wurden vom DLR erstellt und durch Beauftragung der Industriepartner konnten die Kosten für Umbau, Betrieb und Abbau der TESIS:com Versuche einschließlich Personal finanziert werden. Die zu testenden Komponenten wurden von den Industriepartnern für die Tests zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus waren Vorgespräche, Abstimmung von Schnittstellen und die Entwicklung von Testplänen Bestandteil des Teilarbeitspakets. Schnittstellen und Testpläne werden der Übersichtlichkeit halber in AP3.2 und 3.3 dieses Berichts behandelt. Stattdessen beinhaltet dieses Unterkapitel eine detailliertere Beschreibung der TESIS:com Anlage und einen Überblick der durchgeführten Versuche.

##### 3.1.1 Akquisition von Industriepartnern

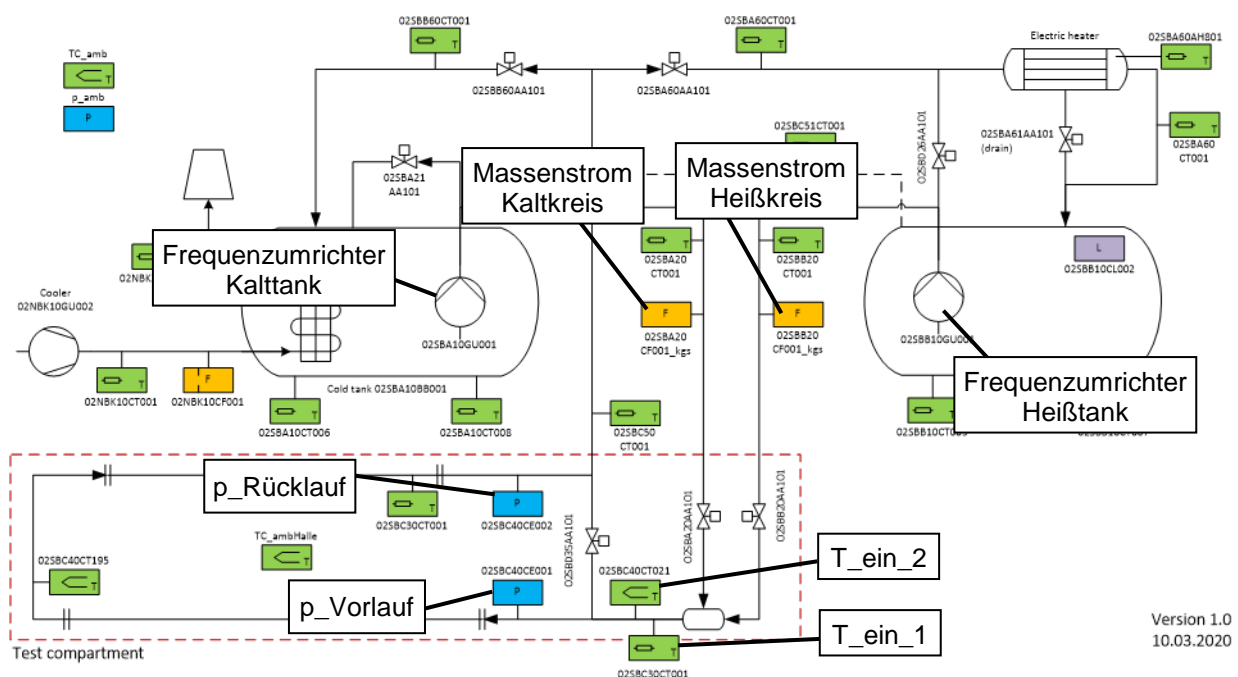
Aufgrund der langjährigen Erfahrung auf dem Gebiet der Flüssigsalz-Technologien und solarthermischen Kraftwerke steht das DLR mit zahlreichen Komponentenherstellern in Verbindung. Darüber hinaus wurden bereits vor Projektbeginn und im Rahmen des AP3 in etwa 40 Firmen kontaktiert, um diese für Komponententests zu gewinnen. Die Firmen bzw. Komponenten wurden im Vorfeld auf ihre Eignung für Versuche in MSComp geprüft. Dabei wurde unter anderem erörtert, ob potentielle Industriepartner bereits in anderen DLR-Projekten involviert sind oder ob eine Untersuchung der jeweiligen Komponente im TESIS:com überhaupt möglich ist. Weiterhin wurde geprüft, ob ein Unternehmen bereits am Markt etabliert ist und somit ein reduziertes bzw. kein Potenzial für die Produktentwicklung aufweist. Der Projektanforderung entsprechende Komponentenhersteller wurden anschließend kontaktiert und über Marktpotenziale sowie Testmöglichkeiten in der TESIS:com Anlage informiert. Drei Firmen konnten als Industriepartner für MSComp akquiriert werden:

- Endress und Hauser Flowtec AG (Clamp-on Ultraschall-Durchflussmessgerät)
- KLINGER Kempchen GmbH (Rohrbauteil mit 3 Flanschverbindungen)
- Stahl-Armaturen PERSTA GmbH (3 elektrische und 1 pneumatisches Globe-Ventil)

Die Stahl-Armaturen PERSTA GmbH hat an beiden Testkampagnen teilgenommen.

### 3.1.2 Beschreibung der TESIS:com Versuchsanlage

Abbildung 9 gibt einen Überblick über die TESIS:com Anlage einschließlich der wichtigsten Komponenten und Messgeräte. Das Arbeitsmedium Solarsalz (60% NaNO<sub>3</sub>, 40% KNO<sub>3</sub>) wird in einem kalten (ca. 290-300 °C) und einem heißen (ca. 560 °C) Tank vorgehalten. Die Versuchsstrecke kann durch unterschiedliche Ventilstellungen und Betriebsmodi mit kaltem Salz, heißem Salz oder einem Gemisch durchströmt werden. Zur Messung des Salzmassenstroms stehen zwei Volumenstrom-Messgeräte zur Verfügung. Der gemessene Volumenstrom mit zugehöriger Temperatur wird automatisiert in einen Massenstrom umgerechnet und in kg/s ausgegeben. Die Messeinrichtung für den Kaltsalz-Massenstrom bzw. der Messwert wird im Folgenden als "Massenstrom Kaltkreislauf" bezeichnet. Für den Heißkreis-Massenstrom wird sinngemäß als Bezeichnung "Massenstrom Heißkreislauf" verwendet.



Version 1.0  
10.03.2020

**Abbildung 9: Darstellung der wichtigsten Komponenten und Messeinrichtungen der TESIS:com Testanlage.**

Da bei einigen Experimenten die Salzpumpen zwar laufen, aber kein Massenstrom strömt (z.B. beim Pumpen gegen ein geschlossenes Ventil), werden auch die Frequenzumrichter der Salzpumpen in die Verwertung einbezogen. Diese sind als "Frequenzumrichter Kalttank" und "Frequenzumrichter Heißtank" benannt. Zur Bestimmung der Eintrittstemperatur in die Teststrecke stehen zwei Temperaturmessungen, ein Widerstandsthermometer und ein Thermoelement, zur Verfügung. Das Widerstandsthermometer trägt die Bezeichnung "T\_ein\_1". Das Thermoelement wird im Folgenden mit "T\_ein\_2" abgekürzt. Beide Temperaturmessstellen befinden sich im Rohr, messen also die Flüssigsalzttemperatur. Ebenfalls relevant sind die Druckmessungen am Vor- und Rücklauf der Teststrecke. Die Druckmessgeräte werden mit "p\_Vorlauf" bzw. "p\_Rücklauf" bezeichnet.

### 3.1.3 Überblick der durchgeführten Komponententests

In MSComp wurden zwei Testkampagnen durchgeführt. Diese werden im hiesigen Bericht mit TK1 und TK2 abgekürzt. In TK1 wurden zwei Ventile der Stahl-Armaturen PERSTA GmbH und eine Rohrverbindung mit drei Flanschen der KLINGER Kempchen GmbH getestet. Die Komponenten waren zur gleichen Zeit in der TESIS:com Teststrecke eingebaut. Es wurden sechs verschiedene Versuche im Rahmen der TK1 durchgeführt. Die sechs Versuche werden im Folgenden mit TK1/V1 bis TK1/V6 bezeichnet. In der zweiten Testkampagne wurde ein Clamp-on Ultraschall-Durchflussmessgerät der Endress & Hauser Flowtec AG getestet. Es wurden zwei unterschiedliche Versuche mit dem Messgerät durchgeführt. Diese zwei Versuche werden mit TK2/V1 und TK2/V2 abgekürzt. In einem separaten Versuchsaufbau wurden zwei weitere Ventile der Stahl-Armaturen PERSTA GmbH im Rahmen der TK2 geprüft. Diese Versuche sind mit den Abkürzungen TK2/V3 und TK2/V4 gekennzeichnet. Tabelle 12 gibt einen Überblick über alle durchgeführten Testreihen einschließlich der gewählten Abkürzung. Zudem sind Informationen zum Massenstrom bzw. Pumpendrehzahl, der Eintrittstemperatur und dem Abbruchkriterium (Versuchszeit/Ziel) enthalten. Mehr Details zum Versuchsablauf folgen in den Unterkapiteln zu TK1 und TK2 in den Abschnitten 3.2 und 3.3.

**Tabelle 12: Durchgeführte Testreihen in Testkampagne 1 und 2.**

<b>Testkampagne 1 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH und KLINGER Kempchen GmbH)</b>				
<b>Bezeichnung</b>	<b>Kürzel</b>	<b>Massenstrom</b>	<b>Eintrittstemperatur</b>	<b>Versuchszeit/Ziel</b>
Funktionstest	TK1/V1	4 kg/s	290 und 560 °C	8 h
Drucktest	TK1/V2	1000-1100 rpm	290 °C	1 h
Ventilzyklen Version 1	TK1/V3	1100 rpm	290 und 560 °C	5000 Zyklen pro Ventil (290 °C) 5000 Zyklen pro Ventil (560 °C)
Temperaturrampen	TK1/V4	8 kg/s	290 – 560 °C	8 h
Temperaturschocks	TK1/V5	4 – 8 kg/s	290 – 560 °C	8 h
Einfrierversuch	TK1/V6	0 kg/s	-	24 h
<b>Testkampagne 2 (Endress und Hauser Flowtec AG und Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)</b>				
<b>Bezeichnung</b>	<b>Kürzel</b>	<b>Massenstrom</b>	<b>Eintrittstemperatur</b>	<b>Versuchszeit/Ziel</b>
Variation Massenstrom #1	TK2/V1	1 – 8 kg/s	300 °C	10 h
Variation Massenstrom #2	TK2/V2	1 – 8 kg/s	400 °C	14 h
Ventilzyklen Version 2	TK2/V3	6 kg/s	290 – 560 °C	175 Zyklen pro Ventil
Ventilzyklen Version 3	TK2/V4	6 kg/s	290 – 560 °C	175 Zyklen mit einem Ventil

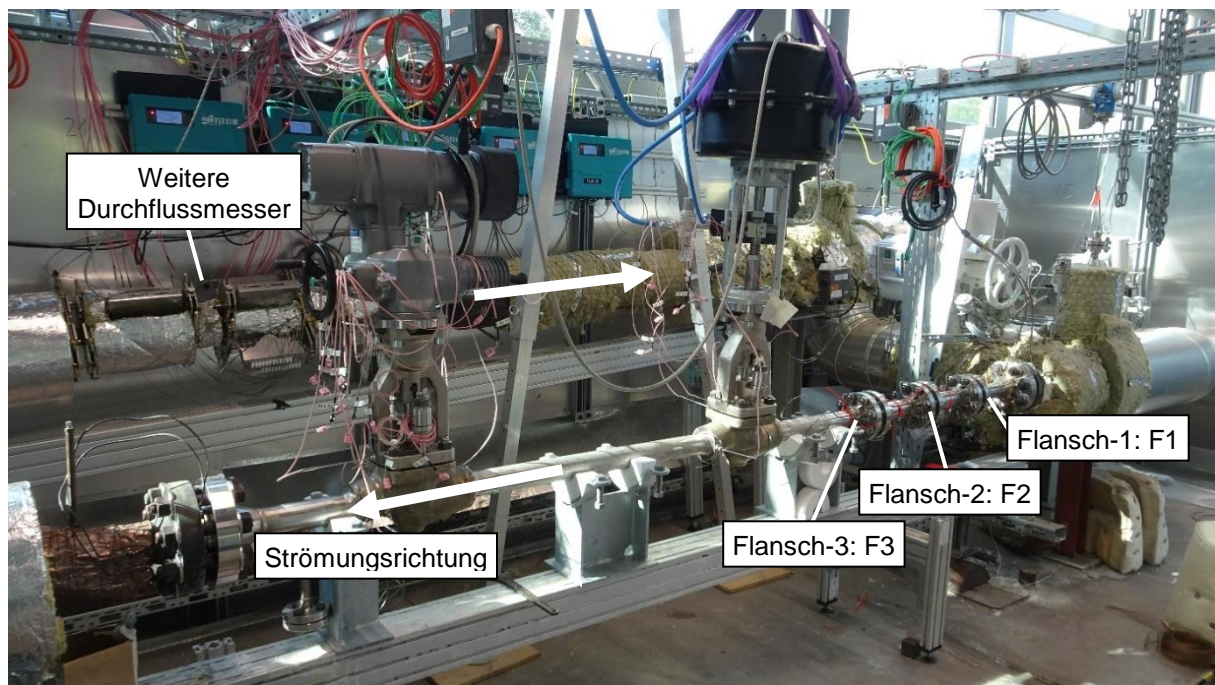
## 3.2 Testkampagne 1

Die nachfolgenden Abschnitte befassen sich mit den Versuchen der Testkampagne 1. Zuerst werden die Inhalte bzgl. der Flanschverbindungen der KLINGER Kempchen GmbH beschrieben. Danach folgen Inhalte zu den Ventilen der Stahl-Armaturen PERSTA GmbH.

### 3.2.1 Versuche Flanschverbindungen (KLINGER Kempchen GmbH)

#### 3.2.1.1 Versuchsaufbau (KLINGER Kempchen GmbH)

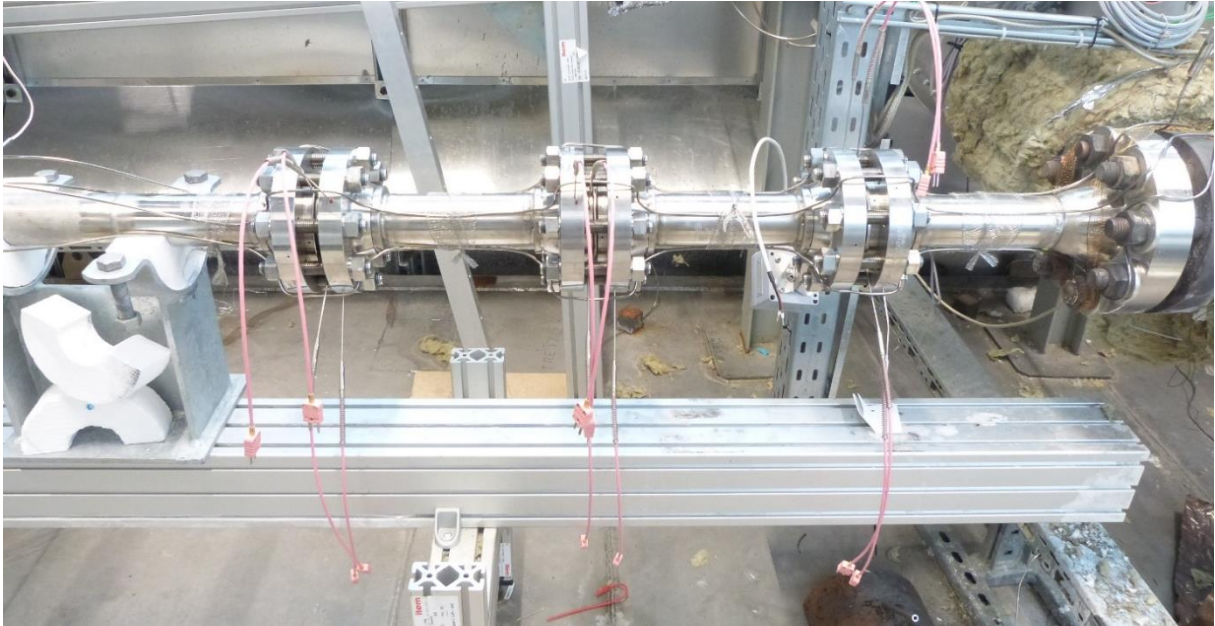
Abbildung 10 gibt einen Überblick über das Layout der Teststrecke und die Positionierung der Flansche. Im Vordergrund des Fotos befindet sich der Vorlauf der Teststrecke mit Strömungsrichtung von rechts nach links durch die Flansche. Die Flansche werden entsprechend der Reihenfolge, in der sie mit Flüssigsalz durchströmt werden, als Flansch-1 (F1), Flansch-2 (F2) und Flansch-3 (F3) bezeichnet.



**Abbildung 10: Versuchsaufbau mit den drei Flanschen der KLINGER Kempchen GmbH.**

Im Hintergrund von Abbildung 10 ist der Rücklauf der Teststrecke zu sehen. Dort sind zusätzliche Durchflussmesser verbaut. Diese Durchflussmesser waren nicht Teil des Projekts und werden im weiteren Verlauf des Berichts nicht weiter untersucht, wurden jedoch zur zusätzlichen Verifizierung des Durchflusses verwendet. Darüber hinaus zeigt Abbildung 10 noch die zwei Ventile von PERSTA stromabwärts der Flansche. Bei einigen Versuchen wird Flüssigsalz gegen ein geschlossenes Ventil gefahren oder die Ventile werden wiederholt geschlossen und wieder geöffnet. Bei der Diskussion der verschiedenen Versuche wird nochmals explizit darauf eingegangen.

Die Flansche wurden mit einer Begleitheizung und einer thermischen Isolation ausgestattet, um die Flansche vor Beginn eines Experiments zu beheizen und ein Einfrieren des Flüssigsalzes während der Versuche zu verhindern. Das Foto in Abbildung 11 zeigt die Flanschverbindung während der Montagephase. Hier sieht man die 4-strängig ausgeführte Begleitheizung an den Flanschen. Abbildung 12 hingegen zeigt die thermische Isolation an den Flanschen.

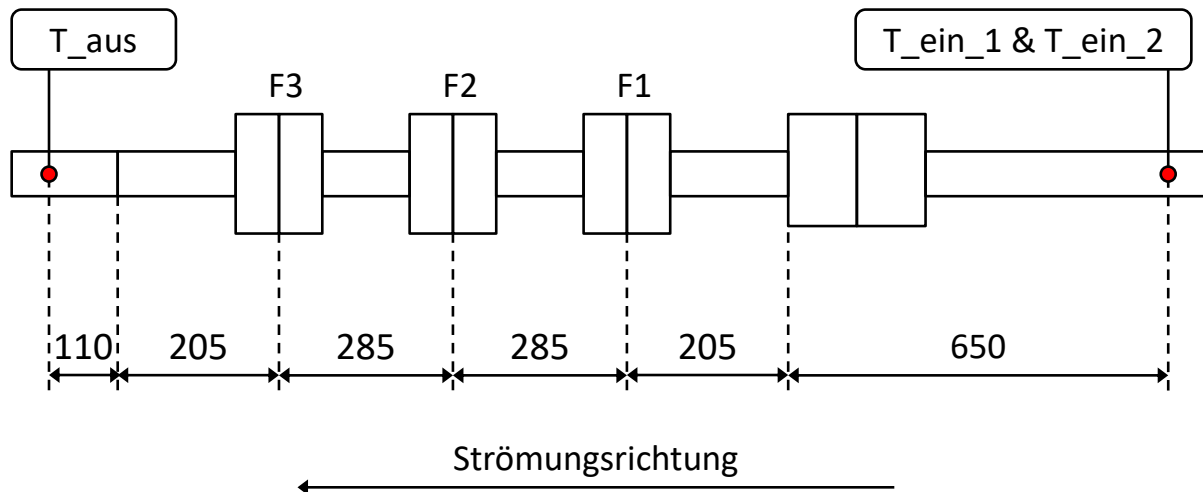


**Abbildung 11: Begleitheizung an den Flanschen.**



**Abbildung 12: Wärmedämmung an den Flanschen.**

Eine bemaßte Skizze der Positionierung der Flansche und der zugehörigen Thermometer innerhalb der Teststrecke ist in Abbildung 13 dargestellt. Flussrichtung ist erneut von rechts nach links. Die beiden Thermometer am Eintritt der Teststrecke  $T_{\text{ein}_1}$  und  $T_{\text{ein}_2}$  wurden bereits angesprochen. Darüber hinaus wurde noch ein Thermoelement im Rohr hinter Flansch-3 mit der Kennzeichnung  $T_{\text{aus}}$  platziert.

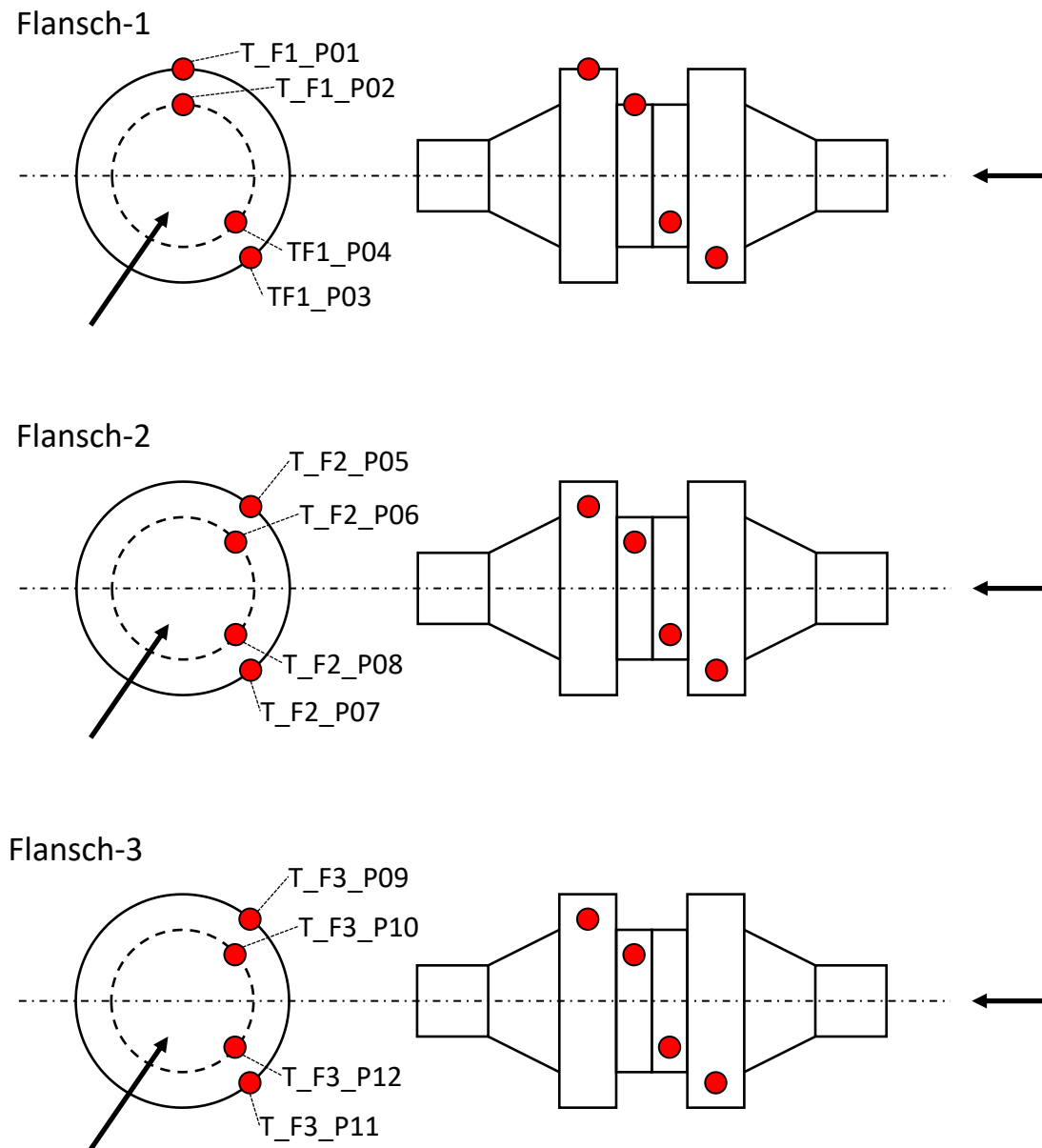


**Abbildung 13: Skizze des Teststreckenabschnitts; Positionierung der Flansche und Thermometer (alle Maße in mm).**

Zusätzlich zu den Thermoelementen im Salz waren auch Thermoelemente an den Flanschen selbst angebracht. Abbildung 14 gibt einen Überblick über die Thermoelemente einschließlich ihrer Kennzeichnung und Position an den Flanschen. Bei den Querschnitten auf der linken Seite verläuft die Strömungsrichtung senkrecht in der Bildebene. Bei den Längsschnitten auf der rechten Seite erfolgt die Durchströmung von rechts nach links. Die Thermoelemente sind von 1 bis 12 nummeriert und tragen das Kürzel des Flansches, an dem sie befestigt sind. Nicht in Abbildung 14 dargestellt sind drei weitere Thermoelemente, die sich in der thermoelektrischen Dichtung von Flansch-1 befanden. Der Temperatúrausgang der drei Thermoelemente wurde durch ein 4-20 mA-Signal als Mittelwert angegeben. Der Transmitter dieses 4-20-mA-Signals wurde bei der Installation beschädigt. Daher wurden die drei Thermoelemente bei den ersten Tests einzeln verdrahtet und gemessen. Die drei Messwerte werden hier als  $T_{\text{TE\_P01}}$ ,  $T_{\text{TE\_P02}}$  und  $T_{\text{TE\_P03}}$  angegeben. Im späteren Verlauf der Tests wurde die thermoelektrische Dichtung ersetzt und dementsprechend stand das 4-20 mA-Signal wieder als Mittelwert zur Verfügung. Dieses Signal wurde in einen °C-Wert umgewandelt und wird im Bericht mit  $T_{\text{F1\_Dichtung}}$  bezeichnet.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Thermoelemente bei den Versuchen teilweise aus den Bohrungen gerutscht sind oder dass kein ausreichender Kontakt zwischen dem Thermoelement und der Flanschoberfläche bestand. War dies der Fall, zeigen die Thermoelemente teils sehr inkonsistente Temperaturen, die nicht mit dem Verlauf der Salzttemperaturen korrespondieren. Zwar wurde immer wieder versucht, die Thermoelemente in die Bohrungen hineinzuschieben, allerdings war das aus Sicherheitsgründen nur zwischen den Versuchen möglich.





**Abbildung 14: Position und Bezeichnung der Thermoelemente an den Flanschen; Die drei zusätzlichen Thermoelemente in der thermo-elektrischen Dichtung im Flansch 1 sind nicht abgebildet.**

### 3.2.1.2 Zeitplan: Versuche und Umbaumaßnahmen (KLINGER Kempchen GmbH)

Tabelle 13 beschreibt die zeitliche Abfolge der Versuche und an den Flanschen durchgeführten Wartungen. Neben den bereits bekannten Abkürzungen für Testkampagnen (TK) und den Versuch (V) wird ggf. noch ein R, für Repetition stehend, ergänzt. Diese weitere Information wird verwendet, wenn ein Versuch in mehreren Phasen oder wiederholt durchgeführt wurde.

Wie bereits erwähnt wurden im Rahmen von TK1 insgesamt sechs verschiedene Experimente durchgeführt. Die Versuche werden an dieser Stelle nur kurz aufgelistet und in das Gesamtkonzept der TK1 eingeordnet. Eine detaillierte Beschreibung der für die Flanschverbindungen relevanten Tests erfolgt im nächsten Abschnitt:

**Tabelle 13: Zeitlicher Ablaufplan der Flansch-Versuche in Testkampagne 1.**

Datum	Versuch	Kennzeichen	Kommentar
05.10.2020	Funktionstest	TK1/V1	Beginn Messkampagne
07.10.2020	Drucktest	TK1/V2/R1	Ventil geschlossen
07.10.2020	Ventilzyklen Version 1 (290 °C)	TK1/V3/R1	Abbruch wegen Anlagenalarm nach ca. 3 Stunden
08.10.2020 – 10.10.2020	Ventilzyklen Version 1 (290 °C)	TK1/V3/R2	Versuchsziel erreicht nach ca. 51 Stunden
11.10.2020	Ventilzyklen Version 1 (560 °C)	TK1/V3/R3	Abbruch wegen technischen Fehler nach ca. 2 Stunden
16.10.2020 – 17.10.2020	Ventilzyklen Version 1 (560 °C)	TK1/V3/R4	Abbruch wegen technischen Fehler nach ca. 15 Stunden
20.10.2020	Austausch thermoelektrische Dichtung	-	Durchgeführt von KLINGER Kempchen
22.10.2020	Drucktest	TK1/V2/R2	Ventil geschlossen
23.10.2020	Temperaturschocks	TK1/V5/R1	Schocks vorgezogen aufgrund von technischen Problemen
23.10.2020	Drucktest	TK1/V2/R3	Ventil geschlossen
27.10.2020	Temperaturrampen	TK1/V4	
28.10.2020	Drucktest	TK1/V2/R4	Ventil geschlossen
28.10.2020	Einfrierversuch	TK1/V6	
30.10.2020	Drucktest	TK1/V2/R5	Ventil geschlossen
02.11.2020	Austausch Flanschdichtungen	-	Durchgeführt von KLINGER Kempchen
03.11.2020	Temperaturschocks	TK1/V5/R2	Vorzeitiger Abbruch wegen Anlagenalarm
04.11.2020	Temperaturschocks	TK1/V5/R3	Ende Messkampagne

- Allgemeiner Funktionstest (TK1/V1): Ziel des Experiments ist es einerseits die Funktion der Anlage und der Komponenten zu überprüfen. Insbesondere muss die Funktionalität der Datenerfassung (Thermoelemente, Druck und Massenstrom) validiert werden. Zudem wird die Anlage per Sicht auf Dichtheit kontrolliert bzw. geprüft, ob Salz aus den Komponenten austritt.

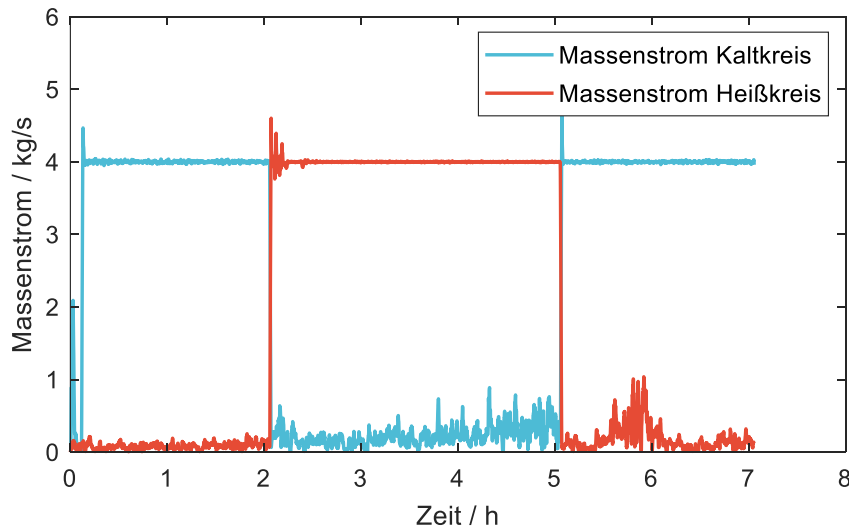
- Drucktest (TK1/V2/R1 - TK1/V2/R5): Bei der Druckprüfung wird Salz gegen ein geschlossenes Ventil, stromabwärts der Flansche, gefahren. Der sich vor dem Ventil aufbauende Druck bewirkt, dass alle stromaufwärts liegenden Komponenten auf Dichtheit geprüft werden. Die Drucktests wurden wiederholt zwischen den anderen Versuchen durchgeführt, um zu prüfen, ob die unterschiedlichen Belastungen der Komponenten zu einer Undichtigkeit führen.
- Ventilzyklen (TK1/V3/R1 - TK1/V3/R4): Während der Ventilzyklen werden die, den Flanschen nachgeschalteten, Ventile abwechselnd geschlossen und wieder geöffnet. Ähnlich wie bei den Drucktests baut sich vor den geschlossenen Ventilen ein Druck auf, und die dort befindlichen Komponenten, also die Flansche, werden diesem Druck ausgesetzt. Wenn die Ventile wieder geöffnet werden, fällt der Druck ab. Daraus resultiert eine zyklische Druckbelastung der Flansche. Die Ventilzyklen mussten aufgrund technischer Probleme in vier Phasen durchgeführt werden. TK1/V3/R1 und TK1/V3/R2 fanden im Kaltkreis (290 ° C) statt. TK1/V3/R3 und TK1/V3/R4 wurden im Heißkreis durchgeführt.
- Temperaturrampen (TK1/V4): Während der Rampenfahrten wird am Eintritt der Teststrecke eine zeitveränderliche Vorlauftemperatur vorgegeben. Verschiedene Temperaturänderungsgeschwindigkeiten wurden sowohl für steigende als auch für fallende Vorlauftemperaturen getestet.
- Temperaturschocks (TK1/V5/R1 - TK1/V5/R3): Die Temperaturschocks sind im Ablauf identisch mit den Temperaturrampen. Allerdings werden am Eintritt zur Teststrecke wesentlich schnellere Temperaturänderungsraten vorgegeben. Der Versuch wurde in insgesamt drei Phasen durchgeführt. Der erste Schockversuch (TK1/V5/R1) konnte ohne Verzögerungen durchgeführt werden. Ein zweiter Schockversuch (TK1/V5/R2), mit leicht veränderter Versuchsdurchführung, musste aufgrund eines Anlagenalarms vorzeitig beendet werden. Dieser wurde letztendlich in einer dritten Versuchsphase (TK1/V5/R3) abgeschlossen.
- Einfrierversuch (TK1/V6): Durch Schließen eines Ventils in der Bestandsanlage kann Flüssigsalz in der Teststrecke bzw. an den Komponenten aufgestaut werden. Während des Einfrierversuchs wird die Begleitheizung bewusst abgeschaltet, um ein Einfrieren des Flüssigsalzes zu bewirken. Nach dem Einfrieren wird die Begleitheizung wieder eingeschaltet und das Flüssigsalz langsam aufgetaut. Die Ausdehnung des Flüssigsalzes beim Gefrieren führt zu einer Belastung der Komponenten.

### 3.2.1.3 Versuchsbeschreibung, Ergebnisse und Diskussion (KLINGER Kempchen GmbH)

In diesem Abschnitt liegt der Schwerpunkt auf den Testergebnissen der Flanschverbindungen. Um die Beschreibung und Diskussion auf das Wesentliche zu beschränken, liegt der Fokus auf Versuchen, die neue Erkenntnisse über das Verhalten des Versuchsaufbaus bzw. der Flansche liefern.

#### ***Funktionstest (TK1/V1)***

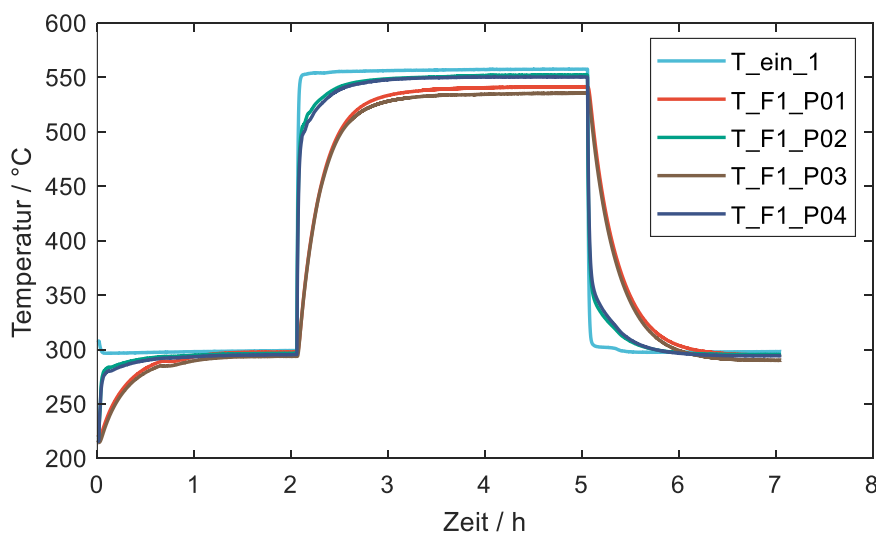
Beginnend mit dem Funktionstest (TK1/V1) zeigt Abbildung 15 den zeitlichen Verlauf des Massenstroms. Der Salzmassenstrom wurde während des gesamten allgemeinen Funktionstests auf 4 kg/s geregelt. Die Ventile waren durchgehend geöffnet. TK1/V1 beginnt und endet mit einer 2 Stunden langen Kaltphase, d.h. ca. 290 °C Vorlauftemperatur in der Teststrecke.



**Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms während des allgemeinen Funktionstests TK1/V1 (Die Massenströme wurden für eine bessere Lesbarkeit geglättet, Mittelwert aus zehn Messwerten).**

Zwischen den beiden Kaltphasen wird eine 3 Stunden lange Heißphase mit einer Vorlauftemperatur von ca. 560 °C gefahren. Der Wechsel zwischen Kalt- und Heißkreis ist deutlich am Verlauf des Massenstroms zu erkennen. Auch wenn die Kalt- und Heißkreispumpe ausgeschaltet sind, lässt sich ein Rauschen bei sehr kleinen Massenströmen feststellen. Dies kann z.B. vorkommen, wenn Flüssigsalz durch Kühlapparate oder elektrische Heizgeräte gefördert wird, um das Salz in den Vorlagetanks zu kühlen bzw. zu erwärmen. Dieser Massenstrom wird jedoch nicht durch die Teststrecke gefördert, daher werden die vorgegebenen 4 kg/s eingehalten.

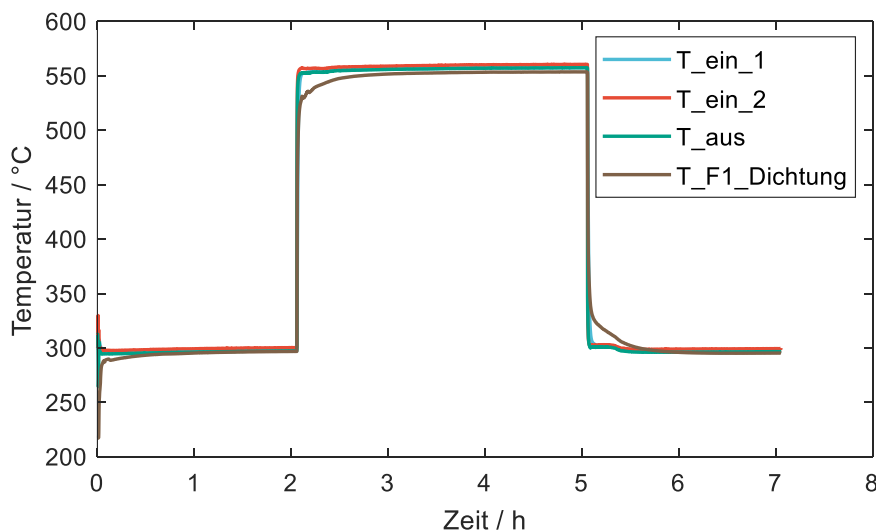
Die zeitlichen Verläufe der Salztemperatur am Eintritt zur Teststrecke ( $T_{ein\_1}$ ), sowie der Temperaturen am Flansch-1 sind in Abbildung 16 dargestellt. Wie bei den Massenströmen sind auch bei der Vorlauftemperatur der Versuchsstrecke die Veränderungen zwischen dem Kalt- und Heißkreis deutlich erkennbar. Die Temperaturen am Flansch-1 zu Beginn des Versuchs betragen ca. 220 °C. Dies ist für den Betrieb mit Solarsalz gerade ausreichend, um ein Gefrieren des Mediums zu verhindern (Schmelztemperatur ist 220 °C).



**Abbildung 16: Zeitliche Verläufe der Vorlauftemperatur und der Temperaturen am Flansch-1 während des allgemeinen Funktionstests TK1/V1.**

Mit Einsetzen des Massenstroms heizt sich der Flansch schnell und homogen auf und erreicht annähernd die Temperatur des Flüssigsalzes. Erwartungsgemäß reagieren die Temperaturen am Flansch 1 zeitverzögert auf eine Änderung der Vorlauftemperatur. Die näher am Salz gelegenen Messstellen T\_F1\_P02 und T\_F1\_P04 reagieren etwas schneller als die weiter entfernten Thermoelemente T\_F1\_P01 und T\_F1\_P03. Beim Versuch TK1/V1 liegen die Thermoelemente noch an den Enden der Bohrungen an und haben Kontakt mit dem Flanschmaterial. Aus diesem Grund sind die Temperaturreaktionen in Abbildung 16 konsistent mit der Vorlauftemperatur der Teststrecke.

Abbildung 17 zeigt den Verlauf der Ein- und -Austrittstemperaturen, gemessen im Salz, sowie die gemittelte Temperatur an der elektrothermischen Dichtung von Flansch-1. Dafür wurden die drei Thermoelemente an der Dichtung einzeln ausgelesen und in T\_F1\_Dichtung als Mittelwert zusammengefasst. Der Temperaturunterschied zwischen den Messstellen im Salz sind wie zu erwarten nur marginal. Die Temperaturfühler an der elektrothermischen Dichtung reagieren deutlich schneller auf die Temperaturänderung als die übrigen Thermoelemente am Flansch-1. Es gibt keinen nennenswerten Unterschied in der Reaktionszeit und Anzeigegenauigkeit der Temperaturmessung T\_F1\_Dichtung im Vergleich zur den Standardmessung im Flüssigsalz (T\_ein\_1, T\_ein\_2 und T\_aus). Darüber hinaus bleibt die Temperaturmessung T\_F1\_Dichtung auch während der restlichen Experimente der TK1 stets konsistent mit den Salztemperaturen.



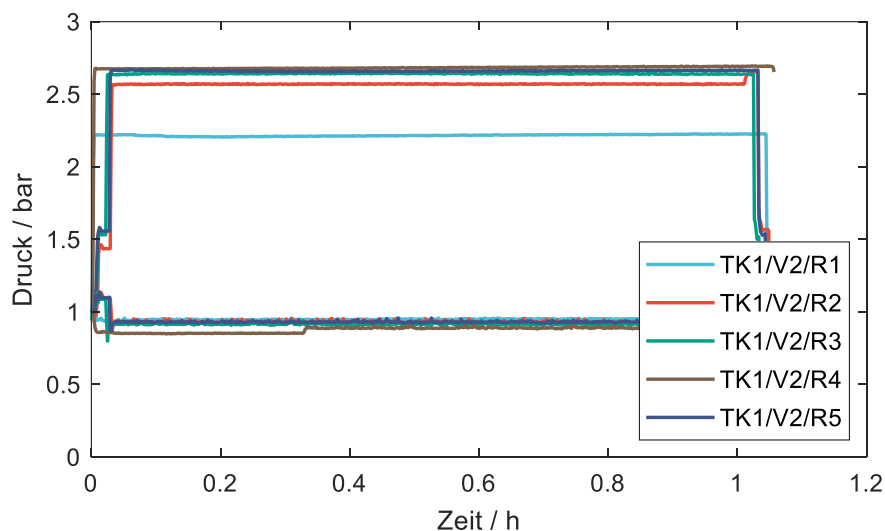
**Abbildung 17: Zeitliche Verläufe aller Salztemperaturen und der Temperatur an der elektrothermischen Dichtung des Flansch-1 während des allgemeinen Funktionstests TK1/V1.**

Bei der Diskussion anderer Versuche zeigt sich, wie die Temperaturkurven aussehen, wenn ein Thermoelement nicht mehr exakt positioniert ist. Die Temperaturen an Flansch-2 und Flansch-3 verhalten sich vergleichbar mit Flansch-1. Daher wird hier auf eine Darstellung der Messergebnisse verzichtet. Die Ergebnisse während des allgemeinen Funktionstests zeigen keine weiteren Auffälligkeiten. Es wurde keine Salzleckage während TK1/V1 detektiert.

### **Drucktests (TK1/V2/R1 - TK1/V2/R5)**

Die Drucktests wurden alle im Kaltkreis, d.h. bei einer Flüssigsalztemperatur von ca. 290 °C durchgeführt. Da beim Fahren gegen ein geschlossenes Ventil kein Massenstrom entsteht, wurde die Drehzahl der Kalttankpumpe auf einen konstanten Wert eingestellt.

Folglich stellt sich ein konstanter Druck vor dem geschlossenen Ventil bzw. an den Flanschen ein. Die fünf Drucktests hatten alle eine Dauer von jeweils 1 Stunde. Der zeitliche Verlauf des Drucks im Vor- und Rücklauf der Teststrecke kann für alle Drucktests in Abbildung 18 betrachtet werden. Die höheren Drücke traten im Vorlauf der Teststrecke, also vor dem geschlossenen Ventil, auf, wo sich die Flansche befanden. Die unteren Drücke, nahe Umgebungsdruck, wurden im Rücklauf der Teststrecke, also nach dem geschlossenen Ventil, gemessen. Der Druck im Vorlauf während TK1/V2/R1 ist leicht niedriger als bei den nachfolgenden Drucktests. Grund hierfür ist die niedrigere Pumpendrehzahl beim ersten Drucktest von 1.000 rpm gegenüber der Drehzahl von 1.100 rpm während der restlichen Versuche. Dies war lediglich eine Inkonsistenz bei der Durchführung der Drucktests und hatte keine wissenschaftlichen Gründe. Die Drücke im Vorlauf der Teststrecke befinden sich, mit Ausnahme von TK1/V2/R1, durchweg in der gleichen Größenordnung. Bei der Druckprüfung TK1/V2/R3 wurden am Boden der Prüfstrecke und auf Höhe der Flansche geringe Mengen von Flüssigsalz detektiert (siehe für Details Abbildung 23 und Abbildung 24).

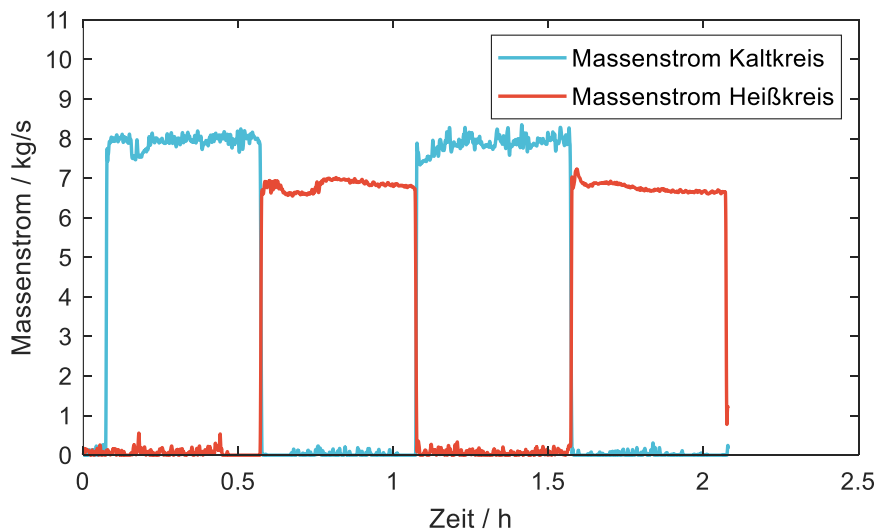


**Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf des Drucks im Vor- und Rücklauf für alle Drucktests.**

Es wird angenommen, dass die Leckage bereits bei den Temperaturschocks TK1/V5/R1 unmittelbar vor der Druckprüfung TK1/V2/R3 ausgelöst wurde. Es dauerte jedoch einige Zeit, bis das Flüssigsalz die Wärmedämmung durchdrang und schlussendlich am Boden sichtbar wurde. Aus diesem Grund konnte die Leckage erst verzögert während der Druckprüfung erkannt werden. Mit Ausnahme der Druckprüfung TK1/V2/R3, wurde an den Flanschen keine weitere Leckage festgestellt. Näheres zu den Leckagen wird im folgenden Abschnitt berichtet.

### **Temperaturschocks (TK1/V5/R1 - TK1/V5/R3)**

Durch direktes Umschalten vom Kalt- in den Heißkreis oder umgekehrt wird eine schnelle Temperaturänderungsrate am Eintritt der Teststrecke (Schock) vorgegeben. Die Ventile waren während der Schock-Versuche durchweg geöffnet. Die Temperaturschocks wurden in drei Phasen durchgeführt. Abbildung 19 zeigt die abrupten Wechsel zwischen dem Kaltkreis und Heißkreis Massenstrom während Phase 1. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass der Massenstrom Heißkreis die eigentlich geplanten 8 kg/s nicht erreicht, sondern bei ca. 7 kg/s liegt. Die Druckerhöhung der Heißkreis-Pumpe reicht nicht aus, um den 8 kg/s Massenstrom umzusetzen.

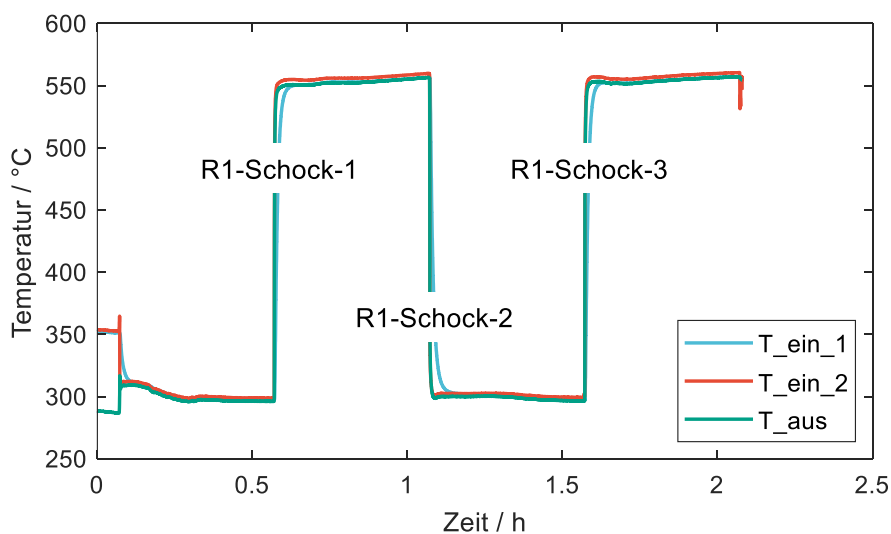


**Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms während des Temperaturschock-Versuchs TK1/V5/R1 (Die Massenströme wurden für eine bessere Lesbarkeit geglättet, Mittelwert aus zehn Messwerten).**

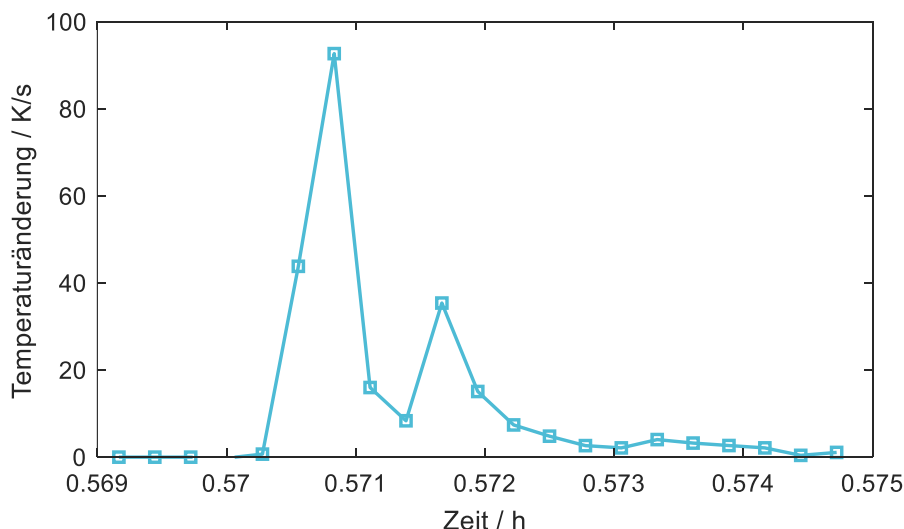
Der zeitliche Verlauf der Temperaturen im Salz ist in Abbildung 20 dargestellt. Zur besseren Übersicht sind die Temperaturschocks von links nach rechts in Abbildung 20 gemäß der ersten Versuchsphase mit R1-Schock-1, R1-Schock-2 und R1-Schock-3 bezeichnet. Zur Veranschaulichung der Temperaturänderungsrate, zeigt Abbildung 21 die Temperaturänderungsrate für R1-Schock-1 (kurz nach 0,5 h). Für eine hohe zeitliche Auflösung der Temperaturschocks wurden hierfür Messdaten mit einer Messfrequenz von 1 s verwendet:

$$\Delta T/t = \frac{T(t) - T(t - 1\text{ s})}{1\text{ s}}$$

Im Zähler steht die Differenz zwischen der Temperatur zum aktuellen Zeitpunkt (t) und der Temperatur, die vor 1 s gemessen wurde (t - 1 s). Die Differenz wird durch das Messintervall von 1 s geteilt.



**Abbildung 20: Zeitliche Verläufe der Salzttemperaturen während des Temperaturschock-Versuchs TK1/V5/R1.**



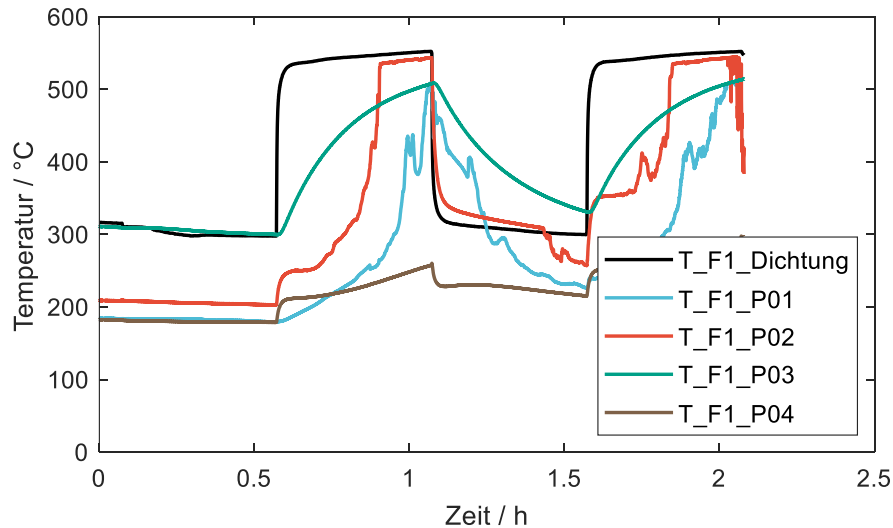
**Abbildung 21: Temperaturänderungsrate im Flüssigsalz während des Temperaturschock-Versuchs TK1/V5/R1; Dargestellt ist nur ein kurzer Zeitabschnitt in dem der erste Schock (R1-Schock-1) stattgefunden hat (T\_ein\_2 wurde für die Berechnung verwendet).**

Bei genauerer Analyse von Abbildung 20 stellt sich heraus, dass T\_ein\_1 minimal langsamer auf Temperaturänderungen am Eintritt der Teststrecke reagiert. Aus diesem Grund wurde zur Berechnung der Temperaturänderungsrate in Abbildung 21 T\_ein\_2 herangezogen. Der Achsenabschnitt der Zeitachse (x-Achse) in Abbildung 21 stellt nur den Zeitpunkt von R1-Schock-1 dar, um den Verlauf der Temperaturänderungsrate ausreichend aufzulösen. Die dargestellten Marker geben die Zeitpunkte an, bei denen Messdaten aufgezeichnet wurden. Entgegen eigenen Erwartungen erreichte die Temperaturänderungsrate bei R1-Schock-1 einen maximalen Wert von +92,7 K/s. Bisher waren aus eigenen Messungen nur Werte von bis zu 50 K/s bekannt. Bedingt durch diese hohe Rate ist die Temperaturänderung im Vorlauf der Teststrecke in nur wenigen Sekunden abgeschlossen. Gemäß Abbildung 21 dauerte der Schock von ca. 0.570 h bis 0.573 h, was in etwa 11 Sekunden entspricht. Dies entspricht einer gemittelten Änderungsgeschwindigkeit von  $(560\text{ °C} - 290\text{ °C})/11\text{ s} = \text{ca. } 25\text{ K/s}$ .

Die maximalen Temperaturänderungsraten von R1-Schock-2 und R1-Schock-3 fielen noch höher aus und betragen -115,5 und +127,2 K/s, respektive.

Die Antworten der Temperaturen an Flansch-1 auf die Temperaturschocks sind in Abbildung 22 aufgezeigt. T\_F1\_Dichtung dient hier als Referenzwert, da der Verlauf mit anderen Salztemperaturen vergleichbar ist. Der Verlauf von T\_F1\_P03 ist durchaus plausibel. Die Temperatur zu Beginn des Versuchs liegt bei knapp über 300 °C und reagiert sofort auf Temperaturänderungen im Salz. T\_F1\_P01 und T\_F1\_P02 starten bei ca. 200 °C, reagieren deutlich verspätet auf Temperaturänderungen im Salz und zeigen darüber hinaus willkürliche Fluktuationen. T\_F1\_P04 liegt zu Beginn ebenfalls um 200 °C, reagiert jedoch kaum auf die Temperaturschocks. Die sind hier bewusst dargestellt, um zu zeigen, dass die Temperaturwerte in den durchgeführten Versuchen zum Teil stark vom erwarteten Werten abweichen. Wie bereits erwähnt wird davon ausgegangen, dass die Thermoelemente aus den Bohrungen herausrutschen und somit einerseits die Positionierung nicht eingehalten wird und andererseits kein Kontakt zur Flanschoberfläche mehr besteht.



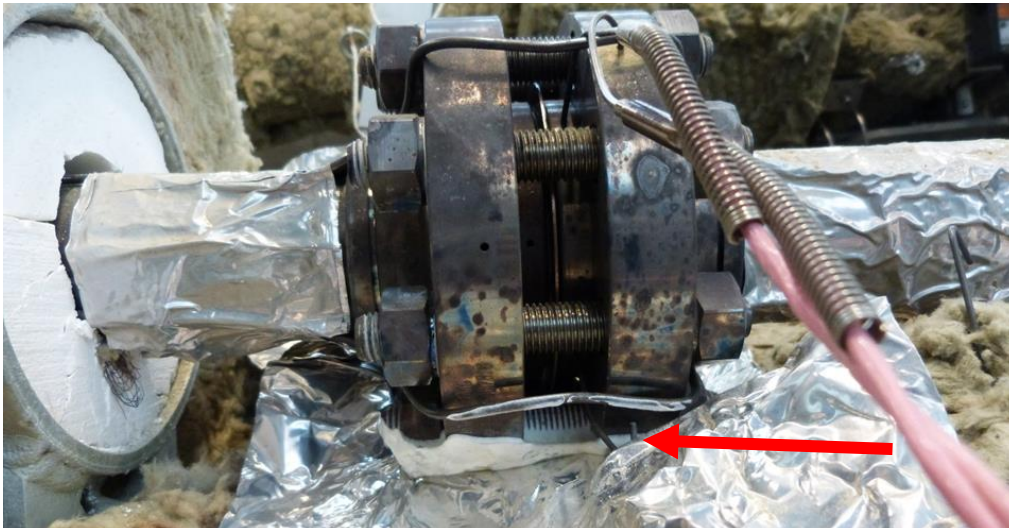


**Abbildung 22: Zeitliche Veränderung der Temperaturen am Flansch-1 während des Temperaturschock-Versuchs TK1/V5/R1.**

Wie bereits im Abschnitt zu den Drucktests angedeutet, wurde im direkten Anschluss an Schocktest TK1/V5/R1 der Drucktest TK1/V2/R3 ausgeführt. Während des Drucktests kam es zu einer minimalen Leckage an Flansch-2 (siehe Abbildung 23) und einer moderaten Leckage an Flansch-3 (siehe Abbildung 24). Am Flansch.1 waren keine Flüssigsalzrückstände erkennbar. Der rote Pfeil in Abbildung 23 zeigt auf kleinste Mengen von Flüssigsalz, die auf der Isolierfolie am Flansch-2 nachgewiesen werden konnten. Aufgrund der Art der Ablagerungen kann davon ausgegangen werden, dass Flüssigsalz über einen kurzen Zeitraum unten aus der Dichtung gespritzt ist.



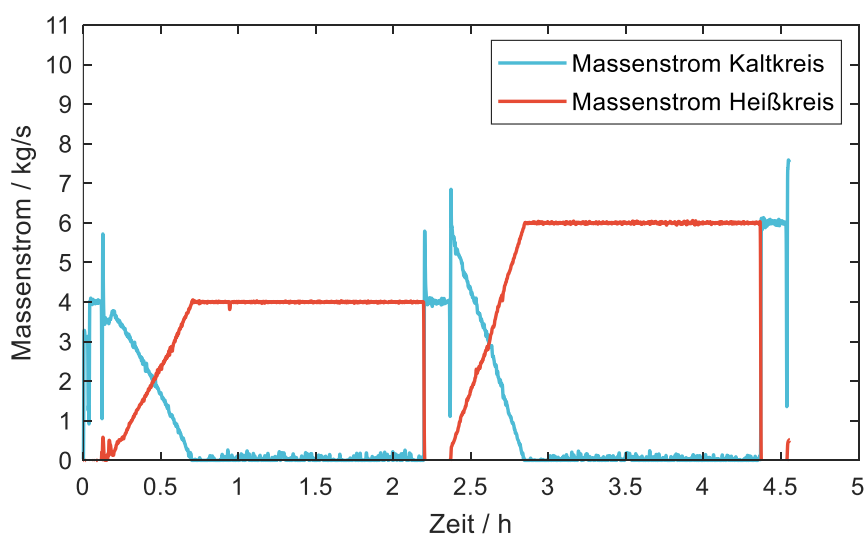
**Abbildung 23: Flansch-2 nach dem Drucktest TK1/V2/R3; Es sind leichte Flüssigsalzreste an der Isolierfolie unten links zu erkennen (siehe roter Pfeil).**



**Abbildung 24: Flansch-3 nach dem Drucktest TK1/V2/R3; Es sind größere Mengen an Flüssigsalz unten am Flansch zu erkennen (siehe roter Pfeil).**

Ansonsten wurden an Flansch 2 keine weiteren Flüssigsalzreste festgestellt. Es gibt keine Anhaltspunkte, ob die Leckage schon während der Schocks oder erst beim Drucktest aufgetreten sind. Am Flansch-3 ist eine etwas größere Salzmenge zu sehen. Da am Flansch ansonsten keine Ablagerungen gefunden werden konnten, ist davon auszugehen, dass das Salz unten aus der Dichtung ausgetreten ist. Die Dichtungen der Flansche wurden vor den Schocktests TK1/V5/R2 und TK1/V5/R3 getauscht (siehe hierzu Tabelle 13).

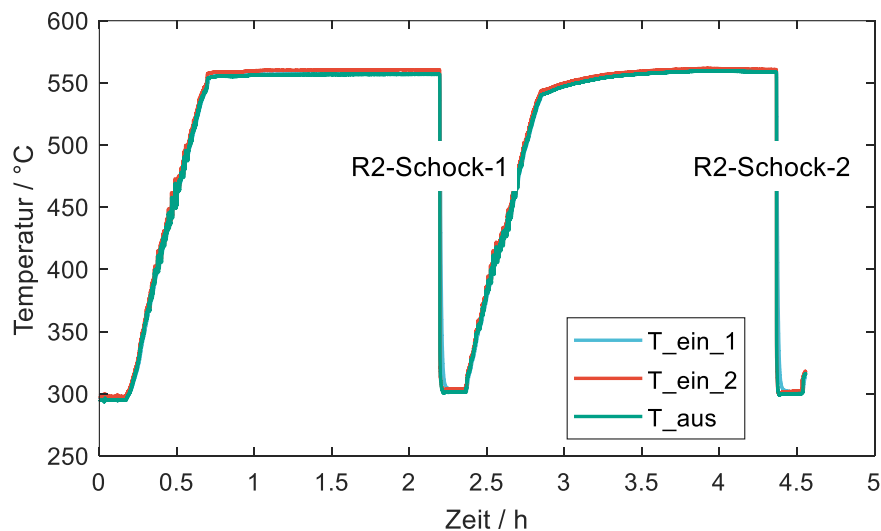
Phase 2 und 3 der Temperaturschocks hatten einen leicht abgeänderten Versuchsablauf im Vergleich zu TK1/V5/R1. Ziel war es, die maximale Temperaturänderungsrate eines Schocks gegenüber dem ersten Schockversuch TK/V5/R1 zu reduzieren. Hierzu wurde Massenstrom bei einigen Schocks reduziert. In Abbildung 25 sind die Kaltkreis und Heißkreis Massenströme über die Versuchszeit aufgetragen. Der Versuch beginnt mit einer kurzen Kaltkreisphase, bevor die Anlage über einen Mischbetrieb langsam in den Heißkreisbetrieb übergeht.



**Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms während des Temperaturschock-Versuchs TK1/V5/R2 (Die Massenströme wurden für eine bessere Lesbarkeit geglättet, Mittelwert aus zehn Messwerten).**

Die Teststrecke wird anschließend über einen längeren Zeitraum von 1,5 h im Heißkreis temperiert. Nach der Temperierung erfolgt der erste Schock, indem die Anlage abrupt vom Heiß- in den Kaltkreisbetrieb wechselt. Der Massenstrom wird danach auf 6 kg/s erhöht und die Anlage fährt erneut über einen Mischbetrieb in den Heißkreis. Nach einer weiteren Phase der Temperierung von 1,5 h erfolgt der zweite Schock. Der Versuch musste nach dem zweiten Schock aufgrund eines Anlagenfehlers unterbrochen werden. Die Schocks (abrupter Wechsel vom Heiß- in den Kaltkreis) sind im Diagramm bei ca. 2,2 h und 4,4 h zu sehen.

Die aus dem Massenströmen resultierenden Temperaturverläufe im Salz sind in Abbildung 26 dargestellt. Die Temperaturschocks sind diese im Diagramm mit R2-Schock-1 und R2-Schock-2 gekennzeichnet. Im Vergleich zu TK1/V5/R1 stiegen die maximalen Temperaturänderungsraten von R2-Schock-1 und R2-Schock-2 des Versuchs TK1/V5/R2 nochmals auf höhere Betragswerte von 134,9 K/s bzw. 137,6 K/s. Das Ergebnis zeigt, dass mit den aktuellen Betriebsmöglichkeiten der TESIS:com Anlage nicht gezielt Temperaturänderungsraten im Bereich von 10-50 K/s gefahren werden können.



**Abbildung 26: Zeitliche Verläufe der Salztemperaturen während des Temperaturschock-Versuchs TK1/V5/R2.**

Auf eine Darstellung der Temperaturverläufe an den Flanschen wird hier verzichtet, da diese nicht signifikant von denen des Versuchs TK1/V5/V1 abweichen. Zudem lassen sich aus den unplausiblen Temperaturverläufen keine Erkenntnisse ableiten. Auch auf eine detaillierte Diskussion der dritten Phase der Schockversuche (TK1/V5/R3) wird verzichtet. Der Ablauf ist identisch mit TK1/V5/R2, nur der Massenstrom wurde auf 8 kg/s abgeändert. Die Temperaturänderungsrate während des Schocks in Phase 3 betrug -135,3 K/s. Nach dem Tausch der Dichtungen kam es während den Versuchen TK1/V5/R2 und TK1/V5/R3, trotz der extremen Temperaturänderungsraten, zu keinen Leckagen an den Flanschen.

### ***Einfrierversuch (TK1/V6)***

Beim Einfrierversuch TK1/V6 wird Flüssigsalz in der Teststrecke absichtlich im Bereich der Flansche aufgestaut und dann die Begleitheizung der Flansche abgeschaltet, um das Salz einzufrieren. Für diesen Versuch wurde die thermische Isolation an den Flanschen entfernt und zusätzlich mit einem Ventilator aktiv gekühlt (siehe Abbildung 27).



Abbildung 27: Bild der Flansche während dem Einfrierversuch TK1/V6.

Abbildung 28 zeigt die Temperaturen im Salz während des Einfrierversuches. Die Temperaturen  $T_{ein\_1}$  und  $T_{ein\_2}$  lagen während des Tests durchgehend über der Schmelztemperatur des Solarsalzes ( $220\text{ °C}$ ). Die Begleitheizungssysteme in der bestehenden Anlage wurden bewusst nicht abgeschaltet, um Schäden oder Langzeitblockaden der TESIS:com Anlage zu vermeiden.  $T_{aus}$  befindet sich stromabwärts der Flansche und die Temperatur an dieser Position sinkt während des Einfrierversuchs auf bis  $114\text{ °C}$  ab.

Um sicherzustellen, dass Salz tatsächlich in den Flanschen eingefroren ist, sind in Abbildung 29 exemplarisch die Temperaturen an Flansch-1 während des Einfrierversuchs dargestellt. Alle Temperaturen sinken im Versuchsverlauf deutlich unter die Schmelztemperatur von  $220\text{ °C}$  und erreichen die niedrigsten Werte nach ca. 3,3 h. Durch die niedrigen Temperaturen an den Flanschen ist davon auszugehen, dass sich tatsächlich Salz in der Rohrleitung verfestigt hat. Bei 3,3 h wurde die Begleitheizung wieder zugeschaltet und das Solarsalz über einen längeren Zeitraum wieder aufgeschmolzen

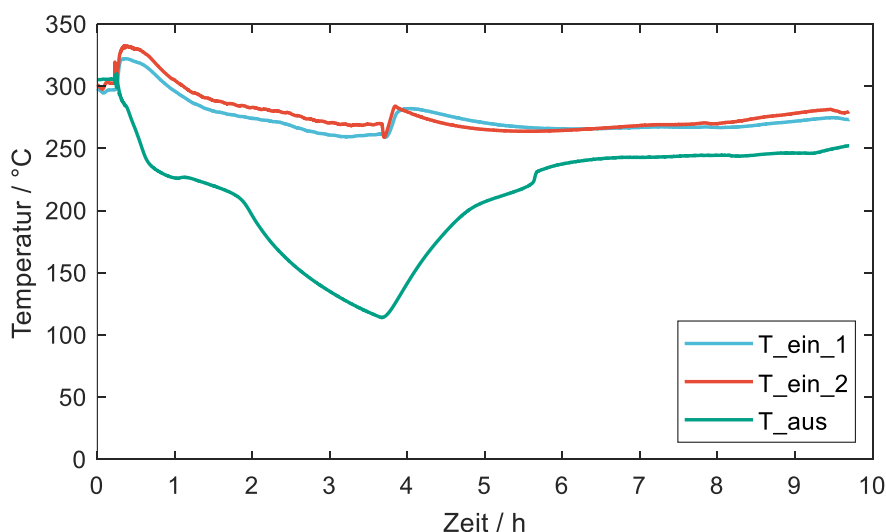
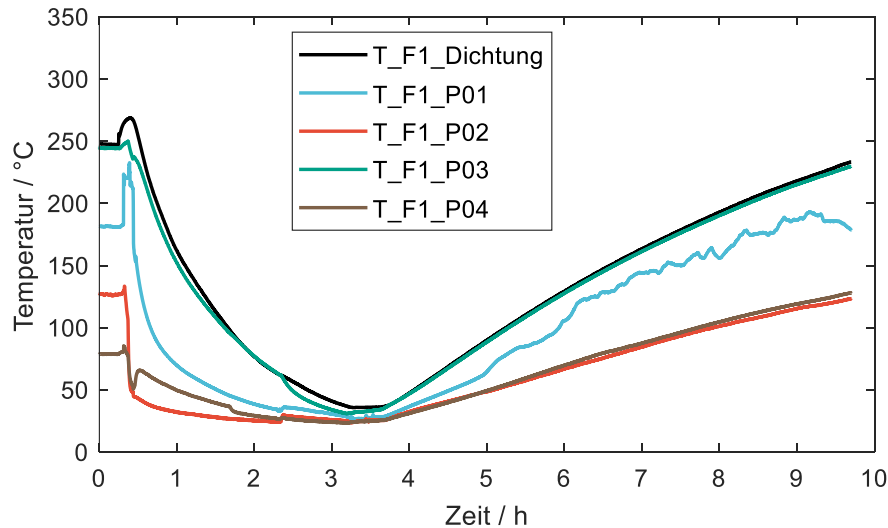


Abbildung 28: Temperaturen im Salz während des Einfrierversuchs TK1/V6.



**Abbildung 29: Zeitliche Verläufe der Temperaturen am Flansch-1 während des Einfrierversuchs TK1/V6.**

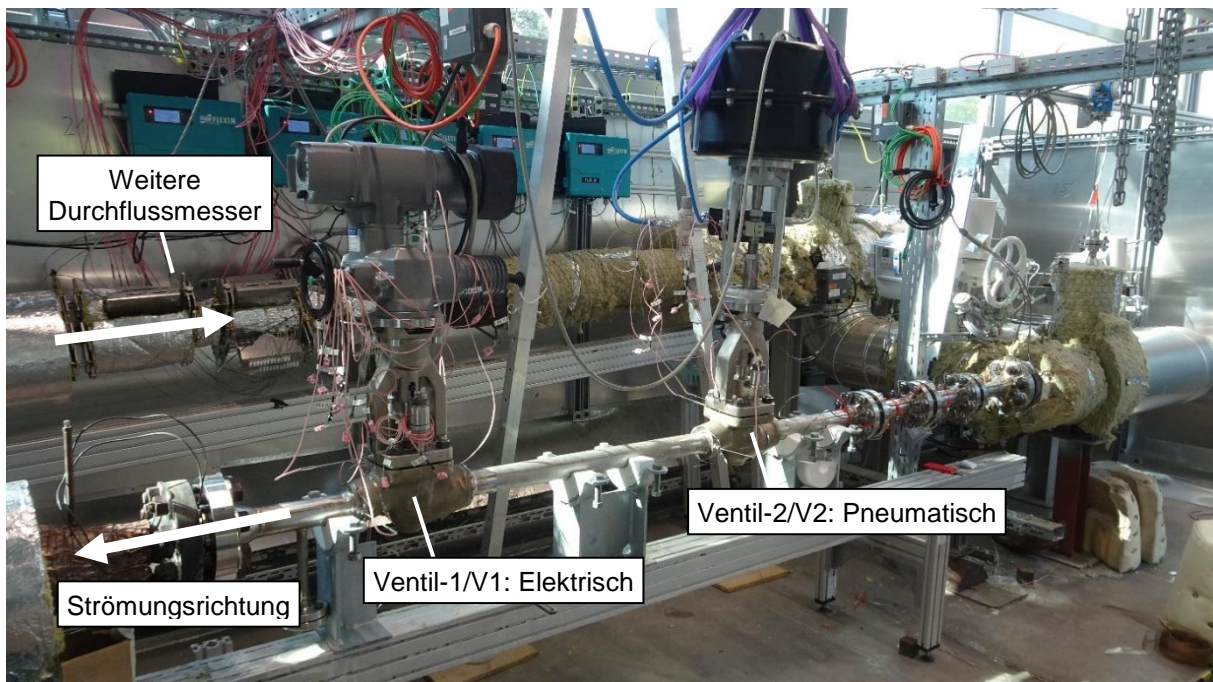
Der Einfrierversuch fand vor der Druckprüfung TK1/V2/R5 und den Temperaturschocks TK1/V5/R2 und TK1/V5/R3 statt. Da bei den drei genannten Tests keine Leckage auftrat, kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Einfrierversuch zu keiner Beschädigung der Dichtungen führte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Flansche den teilweise extremen und unterschiedlichen Beanspruchungen standhalten konnten. Lediglich bei zwei Flanschen konnte während des ersten Thermoschocks eine kleine Leckage detektiert werden. Durch den Austausch der Dichtungen und die Einstellung des richtigen Anpressdrucks kam es während des restlichen Testlaufs trotz extremer Thermoschocks ( $> 100$  K/s) und anderer Belastungen (z.B. Einfrieren von Flüssigsalz) zu keiner weiteren Leckage. Besonders die Resistenz gegen Thermoschocks ist hervorzuheben, da die Temperaturänderungsraten während der Versuche deutlich über den maximalen Literaturwerten von  $2,8$  K/s liegen. Die thermoelektrische Dichtung hat eine integrierte Temperaturmessung, welche herkömmliche Temperaturmessungen an Rohrleitungen ersetzen kann. Die Reaktionszeit und Anzeigegenauigkeit ist vergleichbar mit den verfügbaren Salzttemperatur-Messstellen in der TESIS:com Anlage. Durch den Einsatz dieser Technologie können durch Thermolemente verursachte Störstellen in den Rohrleitungen vermieden werden.

### 3.2.2 Versuche Ventile #1 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)

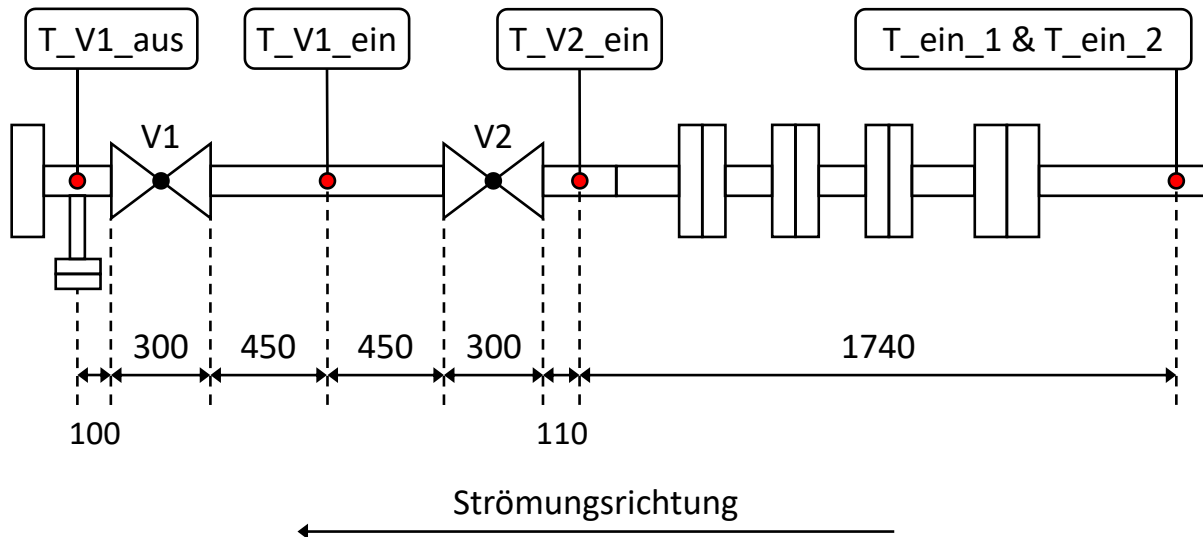
#### 3.2.2.1 Versuchsaufbau #1 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)

Der Versuchsaufbau der ersten Testkampagne ist nochmals in Abbildung 30 dargestellt. Diesmal liegt der Fokus auf den Ventilen der Stahl-Armaturen PERSTA GmbH. Das pneumatische Ventil ist in Fließrichtung zuerst positioniert. Dieses Ventil wird "Ventil-2" oder „V2“ genannt (wie von Persta definiert). Das pneumatische Ventil musste zuerst in der Teststrecke platziert werden, da es aus Platzgründen nicht weiter links eingebracht werden konnte. In Fließrichtung wird das elektrische Ventil als zweites durchströmt. Das elektrische Ventil ist als "Ventil-1" oder „V1“ gekennzeichnet.



**Abbildung 30: Versuchsaufbau #1 mit den zwei Ventilen der Stahl-Armaturen PERSTA GmbH.**

Für eine genauere Darstellung der Positionierung der Ventile und der zugehörigen Thermometer innerhalb der Teststrecke kann Abbildung 31 herangezogen werden. Flussrichtung ist erneut von rechts nach links. Die beiden Thermometer am Eintritt der Teststrecke  $T_{\text{ein}_1}$  und  $T_{\text{ein}_2}$  wurden bereits im vorherigen Abschnitt angesprochen. Darüber hinaus wurden noch drei weitere Thermoelemente zur Messung der Salztemperatur eingebracht. Gemäß der Bezeichnung der Ventile sind die Thermoelemente mit „ $T_{V2\_ein}$ “, „ $T_{V1\_ein}$ “ und „ $T_{V1\_aus}$ “ benannt. Ebenfalls wurde ein Blindflansch in einem Abzweig stromabwärts des elektrischen Ventils ( $V1$ ) installiert. Bei einer Druckprüfung gegen das geschlossene Ventil und bei geöffnetem Blindflansch lässt sich feststellen, ob eine interne Leckage am Ventil vorliegt. Dies wäre der Fall, wenn Salz aus dem Blindflansch austritt. Der Blindflansch wurde nur während des ersten Drucktests ( $TK1/V2/R1$ ) entfernt, da nach den Ventilzyklen bei  $560\text{ °C}$  eine Dichtigkeit der Ventile und damit keine ausreichende Sicherheit mehr gewährleistet war.

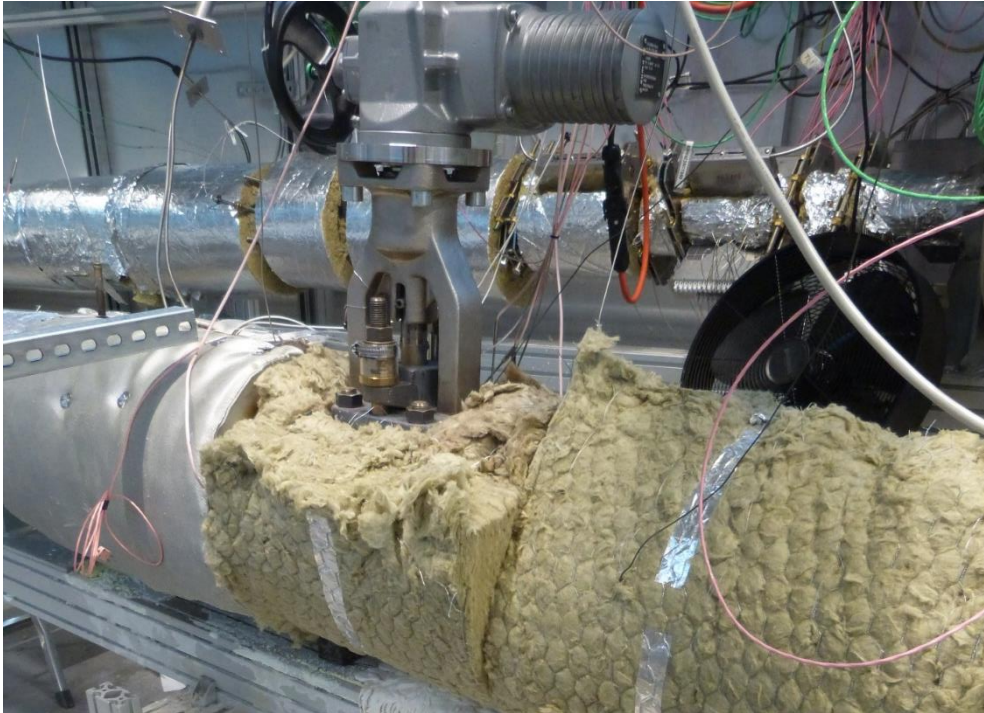


**Abbildung 31: Skizze des Teststreckenabschnitts; Positionierung der Ventile und Thermometer (alle Maße in mm).**

Beide Ventile wurden am Ventilkörper mit einer Begleitheizung und einer thermischen Isolation ausgestattet, um die Ventile vor Versuchsstart zu beheizen und während der Versuche ein Gefrieren des Flüssigsalzes innerhalb der Ventile zu verhindern. Beispielhaft zeigt Abbildung 32 die Begleitheizung des pneumatischen Ventils (V2). Abbildung 33 zeigt exemplarisch die thermische Isolation am elektrischen Ventil (V1).



**Abbildung 32: Begleitheizung am pneumatischen Ventil (V2).**



**Abbildung 33: Thermische Isolation am elektrischen Ventil (V1).**

Die beiden Ventile hatten, entsprechend der Rohrleitung, einen Nenndurchmesser von DN50. Laut mündlichen Aussagen von Persta haben die Ventile eine Leckrate A gemäß EN 12266-2:2002 (Keine sichtbar feststellbare Undichtheit während der Dauer der Prüfung). Als Spindeldichtung wurde bei beiden Ventilen ein Bornitrid-Fließ mit Glimmer und einem Graphitkern verwendet. Darüber hinaus waren die untersuchten Ventile mit einer Rückdichtung ausgestattet. Bei komplett geöffnetem Ventil drückt die Ventilschindel gegen die Rückdichtung und verhindert damit einen Kontakt zwischen Arbeitsmedium und der Spindeldichtung. Damit sollten die Ventile, auch bei defekter Spindeldichtung, nach außen hin abdichten (keine externe Leckage). Die Rückdichtung bei geöffnetem Ventil funktioniert in beide Strömungsrichtungen. Bei komplett geschlossenem Ventil verschließt der Ventilteller den Strömungskanal im Ventilkörper. Damit ist auch in diesem Fall eine Absicherung gegen eine externe Leckage gewährleistet. Diese Abdichtung bei geschlossenem Ventil ist jedoch nur in einer Strömungsrichtung der Fall.

Die Position und Bezeichnung der Thermoelemente an den Ventilen sind in Abbildung 34 dargestellt. Die Thermoelemente mit den Nummern Tv11 bis Tv14 sowie Tv21 bis Tv24 befinden sich am Ventilkörper. An dieser Stelle ist zu beachten, dass die Durchflussrichtung in der obigen Abbildung 34 von links nach rechts ist. Gemäß der Abbildung sind die Thermoelemente Tv15, Tv16 und Tv17 des elektrischen Ventils an unterschiedlichen Höhen nahe der Ventilschindel angebracht. Die restlichen Thermoelemente am elektrischen Ventil (Tv18 bis Tv117) und am pneumatischen Ventil (Tv25 und Tv26) befinden sich an unterschiedlichen Positionen an den Ventilpackungen.



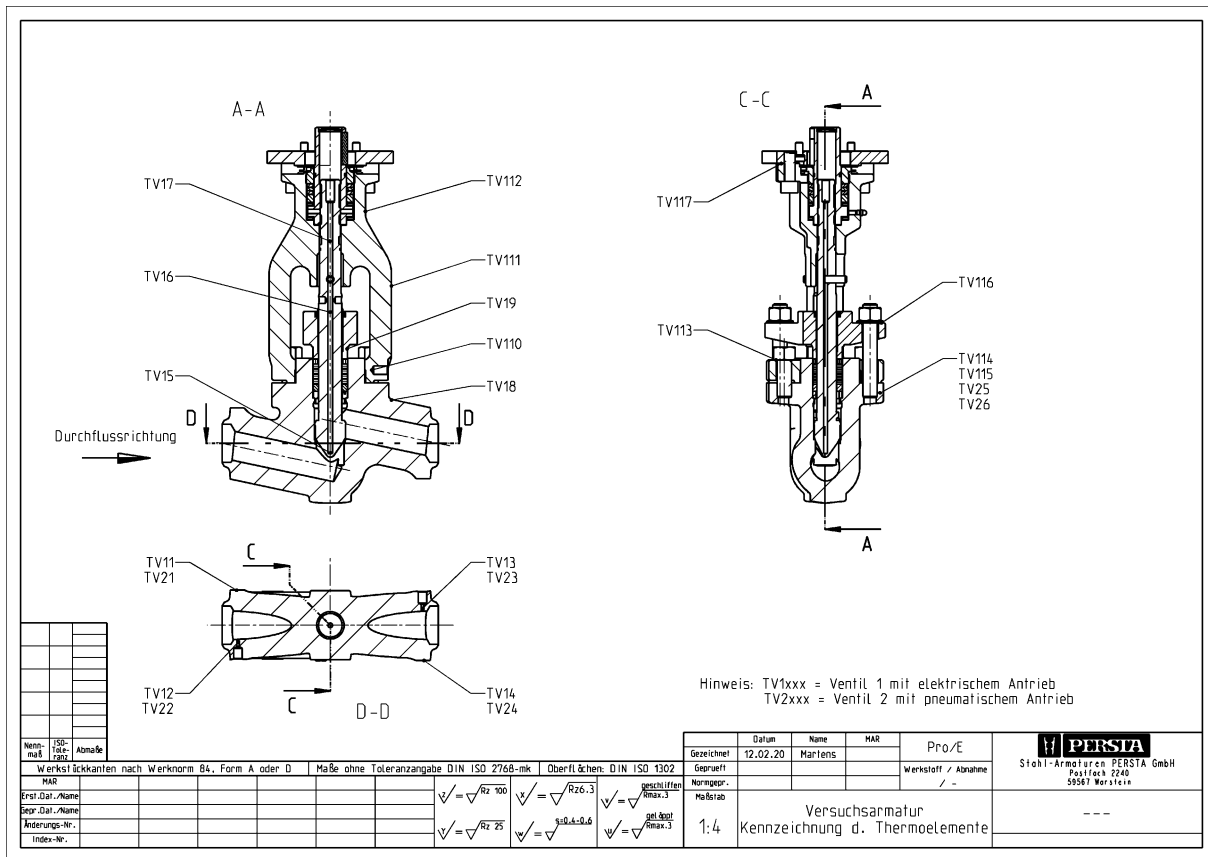


Abbildung 34: Position der Thermelemente an den Ventilen während TK1.

Während der Messkampagne kam es häufiger zu Ausfällen der Thermelemente an den Ventilen. Die defekten Thermelemente wurden im Laufe der Versuche ersetzt. Deshalb sollten gemessene Temperaturen stets durch Vergleichswerte plausibilisiert werden.

Neben den Temperaturen wurde auch die Position der Ventile aufgezeichnet. Diese wird im Folgenden als Prozentwert mit den Bezeichnungen Messung\_Position\_V1 und Messung\_Position\_V2 angegeben. Ein Wert von 100% entspricht einem vollständig geöffneten Ventil. Außerdem wurde das Drehmoment am V1 aufgezeichnet. Das Drehmoment wird in Nm angegeben und ist in diesem Bericht als Drehmoment\_V1 gekennzeichnet.

**3.2.2.2 Zeitplan: Versuche und Umbaumaßnahmen #1 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)**

Da die durchgeführten Versuche bereits im Abschnitt 3.2.1.2 beschrieben wurden, wird hier auf eine wiederholte Erläuterung verzichtet. Der zeitliche Ablauf der Versuche und Wartungen der TK1, diesmal mit Bezug auf die untersuchten Ventile, ist in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Zeitlicher Ablaufplan der Ventil-Versuche in Testkampagne 1.

Datum	Versuch	Kennzeichen	Kommentar
05.10.2020	Funktionstest	TK1/V1	Beginn Messkampagne
07.10.2020	Drucktest	TK1/V2/R1	V1 geschlossen, Blindflansch offen

Datum	Versuch	Kennzeichen	Kommentar
07.10.2020	Ventilzyklen Version 1 290 °C	TK1/V3/R1	Abbruch wegen Anlagenfehlernach ca. 260 Zyklen
08.10.2020 – 10.10.2020	Ventilzyklen Version 1 290 °C	TK1/V3/R2	5000 Zyklen im Kaltkreis
11.10.2020	Ventilzyklen Version 1 560 °C	TK1/V3/R3	Abbruch wegen Leckage an beiden Ventilen nach ca. 160 Zyklen
15.10.2020	Austausch Ventilpackungen	-	Packungen getauscht; Handrad an V2 installiert
16.10.2020 – 17.10.2020	Ventilzyklen Version 1 560 °C	TK1/V3/R4	Abbruch wegen Leckage an V1 nach ca. 1.300 Zyklen
22.10.2020	Drucktest	TK1/V2/R2	V2 geschlossen, Blindflansch zu
23.10.2020	Temperaturschocks	TK1/V5/R1	Schocks vorgezogen aufgrund von technischen Problemen an der Anlage
23.10.2020	Drucktest	TK1/V2/R3	V2 geschlossen, Blindflansch zu
27.10.2020	Temperaturrampen	TK1/V4	
28.10.2020	Drucktest	TK1/V2/R4	V2 geschlossen, Blindflansch zu
28.10.2020	Einfrierversuch	TK1/V6	
30.10.2020	Drucktest	TK1/V2/R5	V2 geschlossen, Blindflansch zu
03.11.2020	Temperaturschocks	TK1/V5/R2	Vorzeitiger Abbruch wegen Anlagenfehler
04.11.2020	Temperaturschocks	TK1/V5/R3	Ende Messkampagne

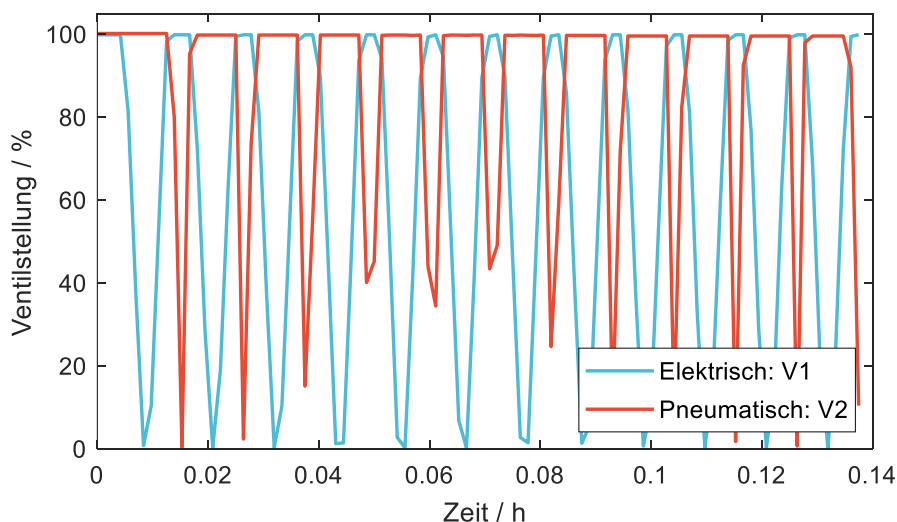
### 3.2.2.3 Versuchsbeschreibung, Ergebnisse und Diskussion #1 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)

Da bei den Flanschen bereits viele Versuche besprochen wurden, konzentriert sich dieser Abschnitt auf die noch übrigen Ventiltests. Neben den Temperaturrampen stellen die Ventilzyklen die kritischsten Versuche für die Komponenten von PERSTA da.

### Ventilzyklen Version 1 (TK1/V3)

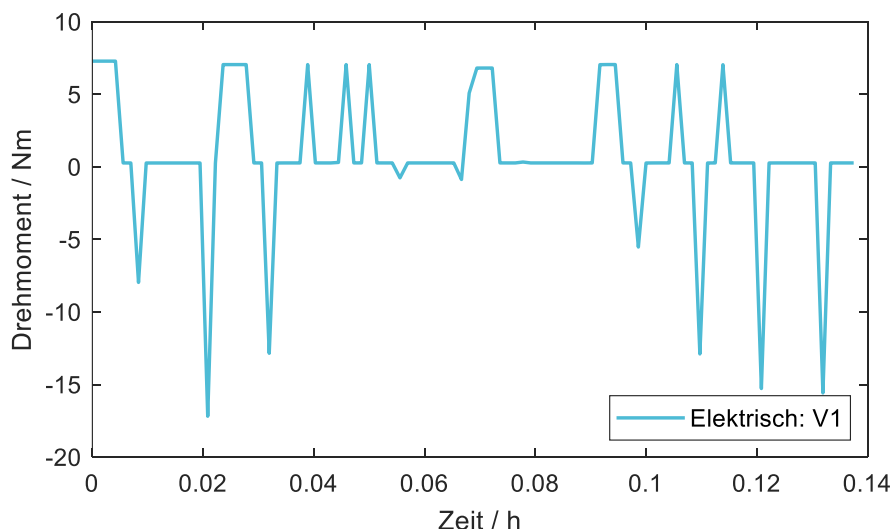
Ziel dieses Versuchs war es beide Ventile ohne zeitliche Verzögerung 10.000-mal vollständig zu schließen und wieder zu öffnen. Diese einfache Abfolge der Ventilzyklen ist hier als Version 1 betitelt (Versionen 2 und 3 werden erst in TK2 relevant). Jeweils 5.000 vollständige Zyklen (vollständig öffnen und schließen) sollten im Kaltkreis (290 °C) bzw. Heißkreis (560 °C) ausgeführt werden. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass alle Ventilzyklen-Versuche bei einer konstanten Pumpendrehzahl von 1.100 rpm durchgeführt wurden. Dies ist sowohl für den Betrieb im Kalt- als auch im Heißkreis der Fall.

Die Ventilzyklen bei 290 °C mussten zweimal durchgeführt werden. Der erste Anlauf (TK1/V3/R1) umfasste ca. 260 vollständige Zyklen, bevor das Experiment wegen eines Anlagenalarms abgebrochen werden musste. Die restlichen Zyklen wurden dann im zweiten Anlauf nachgeholt (TK1/V3/R2). Zunächst zeigt Abbildung 35 die Stellung beider Ventile während der ersten Zyklen des Experiments. Die Ventilzyklen beginnen mit beiden Ventilen in geöffneter Stellung. Zunächst schließt das elektrische Ventil und öffnet sofort nach Erreichen der geschlossenen Position wieder. Ein Ventilzyklus des elektrischen Ventils (V1) dauert in etwa 30 s. Sobald das elektrische Ventil die offene Position erreicht, startet das pneumatische Ventil (V2) den Ventilzyklus. Dieser Zyklus dauert ca. 10 s. Bei der Position des pneumatischen Ventils ist zu erkennen, dass die Messdatenerfassung nicht immer zeigt, dass V2 die geschlossene Position erreicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Messdatenerfassung die Ventilstellung (und auch andere Messwerte) im 5-Sekunden-Intervall aufzeichnet. Aufgrund des kurzen Ventilzyklus des pneumatischen Ventils ist es möglich, dass die vollständig geschlossene Ventilstellung schlichtweg nicht erfasst wird. Das vollständige Schließen und Öffnen der Ventile wurde jedoch über eine Stellungsrückmeldung gewährleistet und somit eingehalten.



**Abbildung 35: Stellung des elektrischen und pneumatischen Ventils während der ersten Zyklen des Versuchs TK1/V3/R1.**

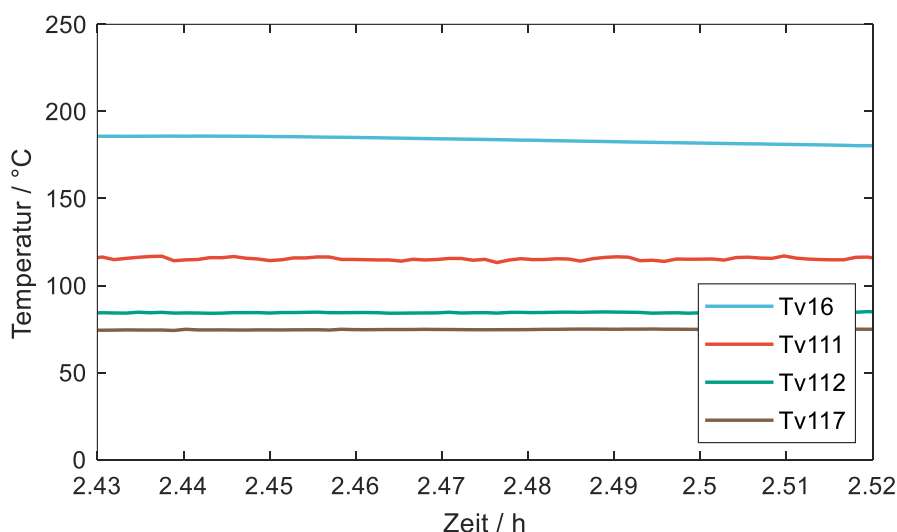
Das Drehmoment, im gleichen Zeitabschnitt wie in Abbildung 35, ist nun in Abbildung 36 aufgezeigt. Eine Messung des Drehmoments steht nur für das elektrische Ventil (V1) zur Verfügung. Wie zu sehen ist, kann einer Ventilstellung nicht immer das gleiche Drehmoment zugeordnet werden. Im geöffneten Zustand (100%) beträgt die Spitze/Plateau des Drehmoments entweder etwa 7 Nm oder verharrt bei 0 Nm.



**Abbildung 36: Drehmoment des elektrischen Ventils während der ersten Zyklen des Versuchs TK1/V3/R1.**

Wenn das elektrische Ventil geschlossen ist, liegen die Spitzenwerte bei maximal -18 Nm. Zu manchen Zeiten wird jedoch überhaupt keine negative Drehmomentauslenkung beobachtet. Dies ist z.B. kurz vor 0.08 h der Fall. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich das elektrische Ventil in der geschlossenen Stellung. Ein ähnliches Verhalten kann bei allen nachfolgenden Ventilzyklus-Versuchen beobachtet werden. Es ist nicht klar, wodurch dieses Phänomen verursacht wird. Ggf. liegt dies an der 5-sekündigen Datenerfassung.

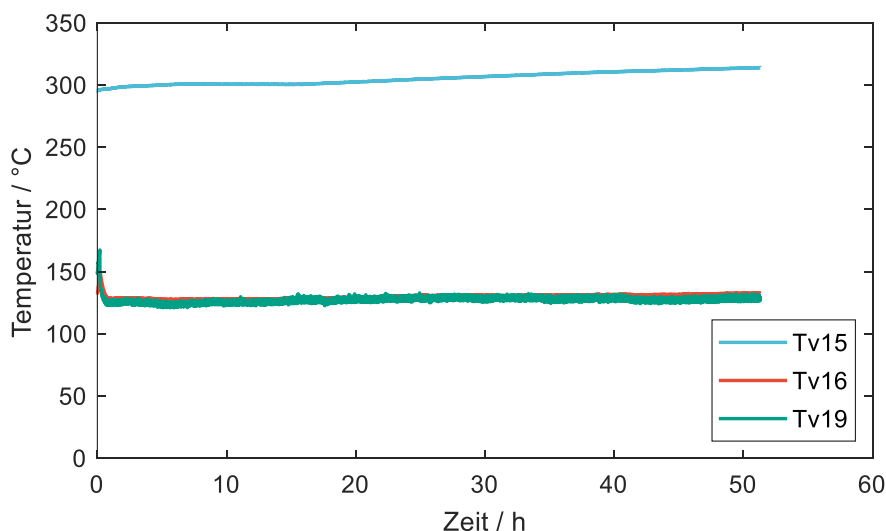
Darüber hinaus kam es während des Versuchs TK1/V3/R1 zu einer Überhitzung und damit Ausfall des elektrischen Antriebs. Das elektrische Ventil blieb 5 Minuten lang in offener Position und kühlte ab, bevor die Ventilzyklen wieder aufgenommen wurden. Abbildung 37 zeigt die Temperaturen in der Nähe des Elektromotors während der beschriebenen Zeitspanne. Zusätzlich zu den gezeigten Thermoelementen wäre für diese Betrachtung auch Tv17 von Interesse gewesen. Da das Thermoelement Tv17 jedoch während des Versuchs TK1/V3/R1 defekt war, wird es nicht gezeigt.



**Abbildung 37: Temperaturen am elektrischen Ventil während des Überhitzens des Motors beim Versuch TK1/V3/R1.**

Die Temperatur Tv16 befindet sich an der Ventilspindel und am oberen Ende des Ringspalt zwischen Spindel und Packung. Die Temperatur zu Beginn der Überhitzung betrug 185 °C und fiel im betrachteten Zeitraum auf 180 °C. Die Temperaturen Tv111, Tv112 und Tv117 befinden sich an der Ventilpackung und zunehmend näher am Elektromotor. Die Temperaturen liegen, ohne große Änderung im betrachteten Zeitraum, bei 115 °C, 85 °C bzw. 75 °C. Hier ist zu prüfen, ob die Überhitzung teilweise auf Wärmeleitung zurückzuführen ist oder ob der Motor ausschließlich durch das wiederholte Betätigen überhitzt wurde. Bei nachfolgenden Ventilzyklus-Versuchen wurde ein Ventilator auf das elektrische Ventil gerichtet. Danach trat keine Überhitzung des Elektromotors mehr auf.

In Abbildung 38 sind die Temperaturen Tv15 (unteres Ende der Ventilspindel), Tv16 (an Ventilspindel und am oberen Ende des Ringspalt zwischen Spindel und Packung) und Tv19 (an der Ventilpackung in der Nähe der Ventilspindel) während des Versuchs TK1/V3/R2 über die Zeit aufgetragen. Durch die Nähe zum Ventilkörper zeigt Tv15 wie erwartet Temperaturen nahe der Flüssigsalztemperatur von 290 °C. Die Temperaturen Tv16 und Tv19 liegen im Betrachtungszeitraum zwischen 120 °C und 130 °C und damit deutlich unterhalb der Schmelztemperatur von Solarsalz (220 °C). Es ist davon auszugehen, dass während der Ventilzyklen Flüssigsalz zwischen die Ventilspindel und Buchse/Ventilführung kriecht. Bedingt durch die geringen Temperaturen in diesem Bereich der Ventilspindeldichtung (siehe Abbildung 38) wird dort Salz zwangsläufig gefrieren und durch die Ventilzyklen die Spindel beschädigen. Voraussichtlich kam es aus diesem Grund bereits nach wenigen Ventilzyklen im Heißkreis (ca. 160) zu einer Leckage an der Ventilspindeldichtung (siehe hierzu den nächsten Abschnitt). Ansonsten gab es während dem Experiment TK1/V3/R2 keine weiteren Auffälligkeiten.



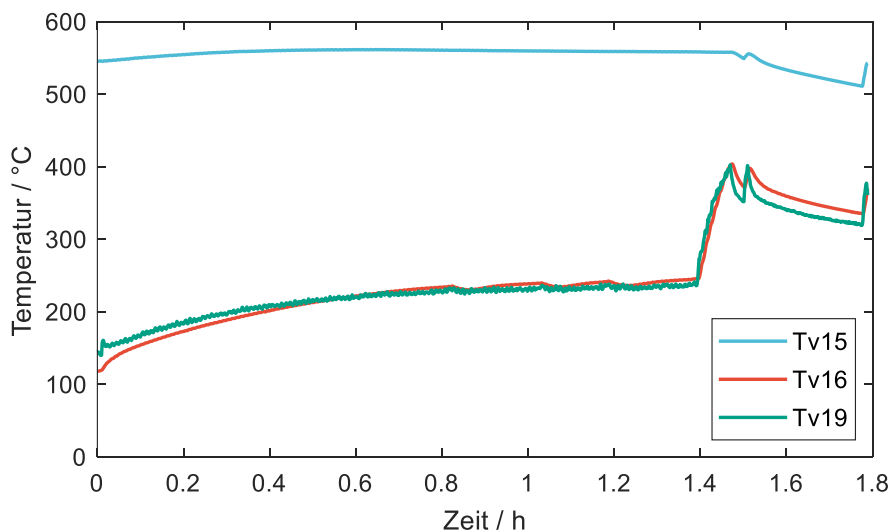
**Abbildung 38: Temperaturen am elektrischen Ventil in der Nähe der Ventilspindel bzw. Ventilspindeldichtung während des Versuchs TK1/V3/R2.**

Nach Abschluss der 5.000 Ventilzyklen im Kaltkreis wurden am Folgetag die Ventilzyklen im Heißkreis (560 °C) gestartet. Nach ca. 160 vollständigen Ventilzyklen kam es zu einer Leckage an beiden Ventilen (siehe Abbildung 39). Ausgehend von der Menge an Salz, war die Leckage am pneumatischen Ventil deutlich ausgeprägter. Als Austrittspunkt konnte der Spalt zwischen Spindel und Packung identifiziert werden.



**Abbildung 39: Leckage an beiden Ventilen während des Versuchs TK1/V3/R3.**

Wie bereits erwähnt, wird angenommen, dass eine Beschädigung der Ventilspindel während der Ventilzyklen im Kaltkreis ausschlaggebend für die Leckage war. Hinzu kommen höhere Salz- und Ventilttemperaturen im Heißkreis. Somit bleibt das Salz auch im Ringspalt zwischen Spindel und Packung flüssig und kann durch die Ventilspindeldichtung nach Außen gelangen. Abbildung 40 zeigt nochmals die Temperaturen Tv15, Tv16 und Tv19, diesmal für das Experiment TK1/V3/R3. Tv15 liegt wie erwartet bei ca. 560 °C und damit in Höhe der Flüssigsalzttemperatur im Heißkreis. Die Temperaturen Tv16 und Tv19 steigen im Verlauf der Ventilzyklen im Heißkreis stetig an und überschreiten die Schmelztemperatur des Solarsalzes im Laufe des Experiments. Bei etwa 1,4 h kommt es zu einem abrupten Temperaturanstieg. Höchstwahrscheinlich ist zu diesem Zeitpunkt bereits erstes Flüssigsalz ausgetreten und mit den Thermoelementen in Kontakt gekommen. Der Test wurde fortgesetzt, bis das Flüssigsalz den Boden der Teststrecke erreichte und die dort befindlichen Thermoelemente die Leckage detektierten.



**Abbildung 40: Temperaturen am elektrischen Ventil in der Nähe der Ventilspindel bzw. Ventilspindeldichtung während des Versuchs TK1/V3/R3.**

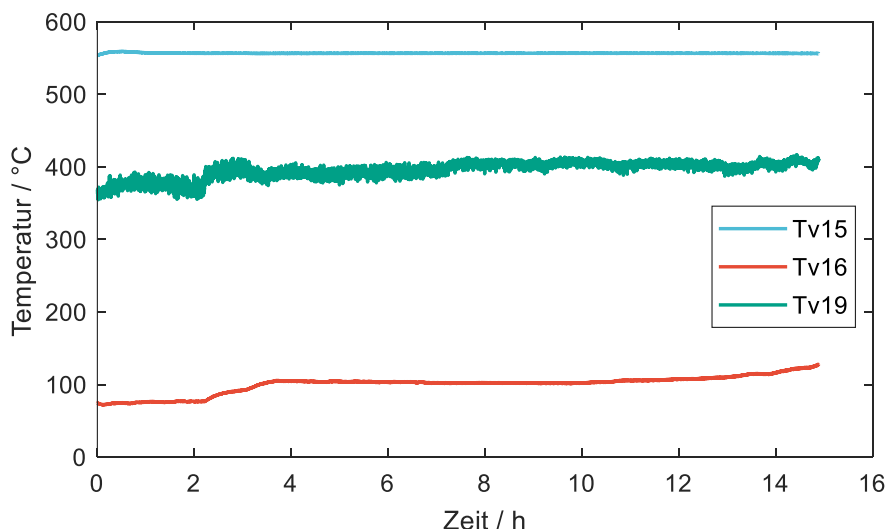
Nach den ersten Ventil-Zyklen im Heißkreis wurden beide Ventilpackungen getauscht und am pneumatischen Ventil ein Handrad montiert. Das pneumatische Ventil war bereits so stark beschädigt, dass es für weitere Ventilzyklen nicht weiterverwendet wurde und dauerhaft in offener Stellung während der Versuche in der Anlage verblieb. Der zweite Ventilzyklen-Versuch im Heißkreis (TK1/V3/R4) wurde also ausschließlich mit dem elektrischen Ventil durchgeführt. Vor dem Versuch und nach dem Aufheizen der Ventile auf Betriebstemperatur wurde die Packung mehrmals nachgezogen, um sicherzustellen, dass die Packung nicht wegen der Temperaturexpansion undicht wird.

Im hiesigen Fall konnte das elektrische Ventil ca. 1.300 Ventilzyklen durchlaufen, bevor es zu einer erneuten Leckage kam. Abbildung 41 zeigt, wie während des Versuchs die Graphitdichtung (schwarzes Material) aus dem Ringspalt zwischen der Spindel und Packung herausgedrückt wurde. Erfahrungsgemäß reagiert Graphit mit Flüssigsalz bei Temperaturen  $> 400\text{ °C}$  und verliert dadurch die Dichtfähigkeit. Es wird daher davon ausgegangen, dass zuerst festes Salz die Dichtung zerrieben hat und dann die Reaktion zwischen Flüssigsalz und Graphit die Auslöser für das Herausdrücken der Dichtung und folglich der Leckage war.

Um diese Vermutung zu untermauern sind in Abbildung 42 nochmals die Temperaturen Tv15, Tv16 und Tv19 für den Versuch TK1/V3/R4 dargestellt. Tv15 zeigt erneut Temperaturen um  $560\text{ °C}$ . Entgegen den Erwartungen misst Tv16 relativ moderate Temperaturen (z.B. im Vergleich zu Abbildung 40). Dies kann z.B. auf eine veränderte Anbringung des Thermoelements nach dem Wechsel der Packung zurückzuführen sein oder an einem Defekt liegen.



**Abbildung 41: Zerstörte Graphit-Dichtung an der Ventilpackung.**

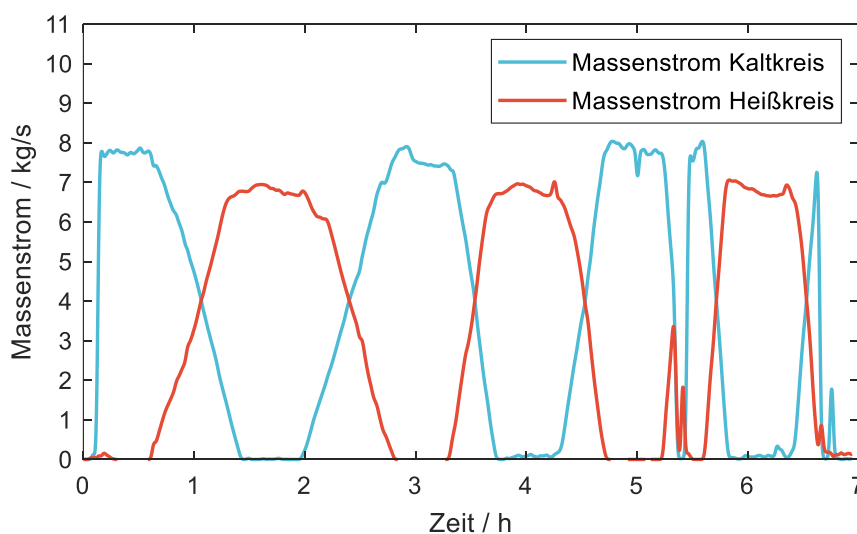


**Abbildung 42: Temperaturen am elektrischen Ventil in der Nähe der Ventilspindel bzw. Ventilspindeldichtung während des Versuchs TK1/V3/R4.**

Entscheidend ist jedoch die Temperatur Tv19, die teilweise über 400 °C liegt. Es ist daher davon auszugehen, dass auch Temperaturen > 400 °C im Ringspalt vorliegen und damit die Reaktion zwischen Flüssigsalz und Graphit durchaus möglich wäre.

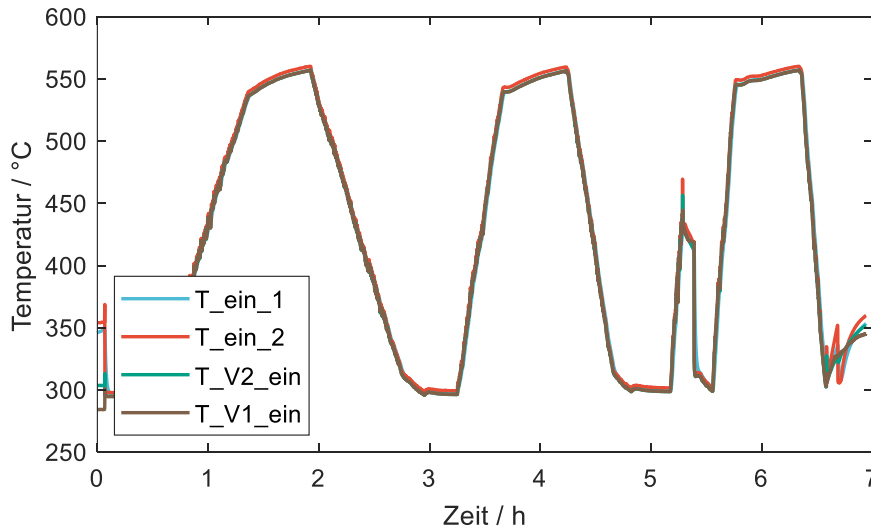
**Temperaturrampen (TK1/V4)**

Nach den Ventilzyklen wurden die Packungen der beiden Ventile nicht mehr ausgetauscht. Bei vollständig geöffneten Ventilen sollten die Rückdichtungen ein Austreten des Flüssigsalzes verhindern. Die Funktionsfähigkeit der Rückdichtungen kann daher mit den danach durchgeführten Versuchen überprüft werden. Hierfür werden im Folgenden exemplarisch die Versuchsergebnisse der Temperaturrampen dargestellt und diskutiert. Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen den zeitlichen Verlauf der Massenströme und damit die zeitliche Änderung der Temperaturen im Flüssigsalz in der Teststrecke.



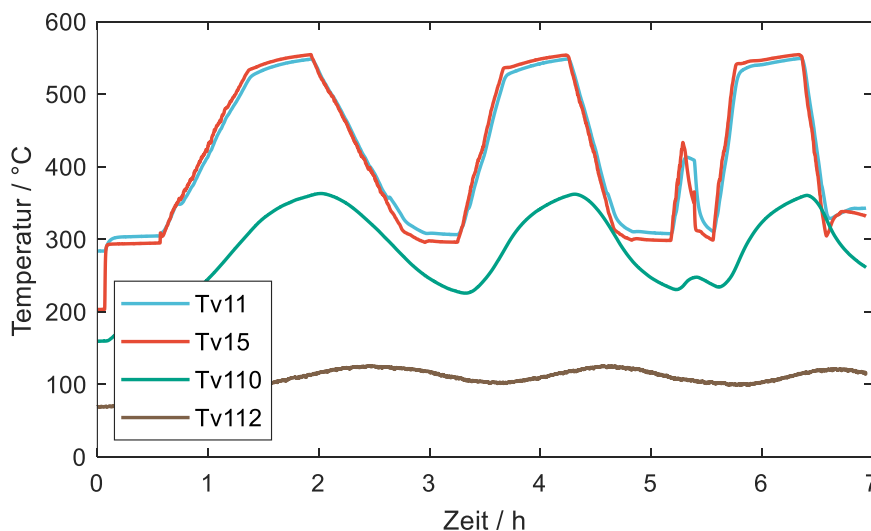
**Abbildung 43: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms während der Temperaturrampen TK1/V4 (Die Massenströme wurden für eine bessere Lesbarkeit geglättet, Mittelwert aus zehn Messwerten).**





**Abbildung 44: Zeitliche Verläufe der Salztemperaturen während der Temperaturrampen TK1/V4.**

Bei Betrachtung der Massenströme sind deutlich Wechsel zwischen Kalt- und Heißkreis, sowie ein Temperieren der Teststrecke zu erkennen. Die Steilheit der zeitlichen Temperaturänderungen im Salz und dementsprechend die Temperaturänderungsrate nimmt mit 5 K/min, 10 K/min und 20 K/min von links nach rechts in Abbildung 44 zu. Bei etwa 5,5 h sollte die 20 K/min-Rampe beginnen, musste aber aufgrund eines Anlagenfehlers wieder gestoppt werden. Die Versuchsstrecke wurde dann im Kalkkreis erneut temperiert und die positive 20 K/min-Rampe wurde kurz danach erneut gestartet. Die thermische Antwort auf die Temperaturrampen einiger Thermoelemente am elektrischen Ventil ist in Abbildung 45 aufgezeigt. Die Thermoelemente Tv11 und Tv15 befinden sich am Ventilkörper bzw. am unteren Ende der Ventilspindel. Beide zeigen eine ähnliche Temperaturkurve wie die Salztemperaturen in Abbildung 44. Tv110 ist etwas weiter oben an der Ventilpackung in einer Bohrung montiert. Wie erwartet, reagiert die Temperatur an dieser Stelle etwas langsamer. Tv112 befindet sich weit oben an der Ventilpackung und zeigt fast keine Reaktion auf die Temperaturänderungen im Salz.



**Abbildung 45: Temperaturen am elektrischen Ventil an verschiedenen Positionen während des Versuchs TK1/V4.**

Während der Temperaturrampen konnte keine externe Leckage festgestellt werden. Während der Temperaturrampen sowie bei allen weiteren Versuchen (Schocks, Drucktests etc.) kam es zu keinen weiteren Leckagen am elektrischen bzw. pneumatischen Ventil. Somit ist die Funktionsfähigkeit der Rückdichtung, sogar bei einem de facto defekten Ventil, bestätigt und die Dichtheit gewährleistet.

## 3.3 Testkampagne 2

Die nächsten Abschnitte befassen sich mit den Versuchsaufbauten- und Ergebnissen der Testkampagne 2. Zuerst werden die Tests mit dem Ultraschall-Durchflussmessgerät der Endress und Hauser Flowtec AG beschrieben. Bei dem Messgerät handelt es sich um einen um Prototypensensor auf Basis der Proline Prosonic P 500 Plattform. Danach folgt die zweite Versuchskampagne der Stahl-Armaturen PERSTA GmbH.

### 3.3.1 Versuche Ultraschall-Durchflussmessgerät (Endress und Hauser)

#### 3.3.1.1 Versuchsaufbau (Endress und Hauser Flowtec AG)

Bei einem sogenannten Clamp-on Ultraschall-Durchflussmessgerät handelt es sich um ein nicht-invasives Messsystem zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit in einem Rohr. Nichtinvasiv bedeutet, dass das Messgerät lediglich auf das Rohr gespannt wird (Clamp-on) und nicht in das strömende Fluid eintauchen muss (In-Line). Das Messverfahren basiert auf dem Effekt, dass sich Schallwellen in einem Fluid in Strömungsrichtung schneller ausbreiten als entgegengesetzt der Strömungsrichtung. Über die sogenannte Laufzeitdifferenz können Rückschlüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit gezogen werden. Aufgrund der strömungsinduzierten Laufzeitdifferenz der Ultraschallsignale mit- und gegen den Strom ( $t_{up}$ ,  $t_{dn}$ ) ergibt sich eine Zeitdifferenz  $\Delta t$ , welche proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ist. Der Volumenstrom ergibt sich durch den Querschnitt des Rohres. Im Anschluss kann über die temperaturabhängige Dichte des Arbeitsmediums der Massenstrom bestimmt werden (siehe Abbildung 46).

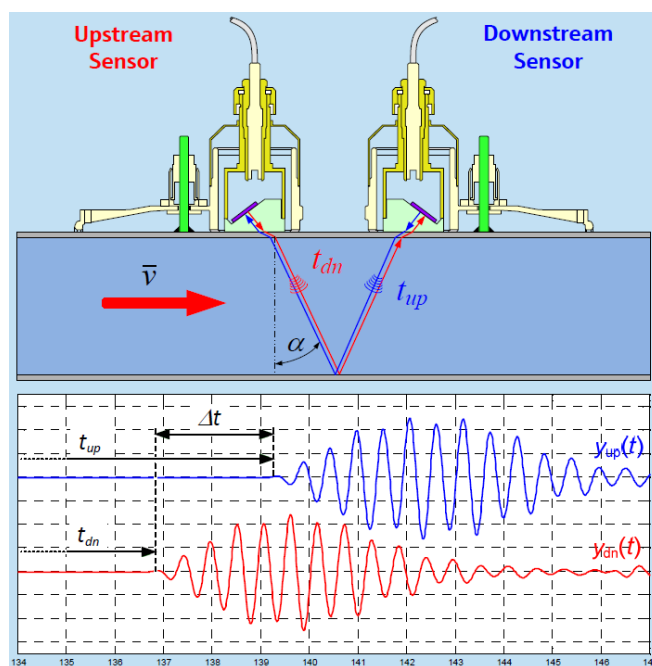


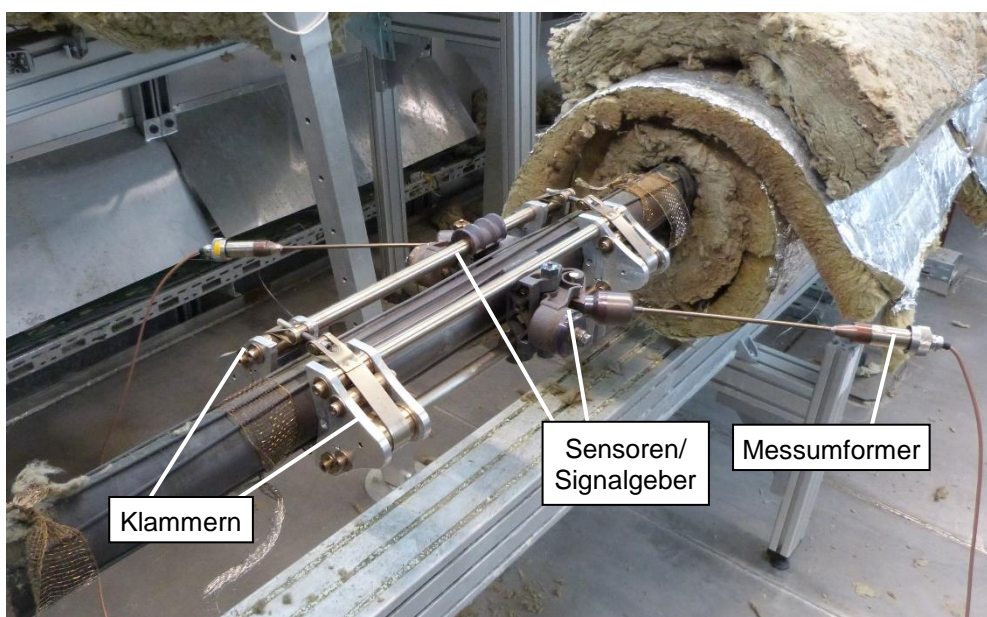
Abbildung 46: Messprinzip eines Clamp-on Ultraschall-Durchflussmessgeräts (bereitgestellt durch E&H).

Die Vor- und Nachteile des Clamp-on Systems sind:

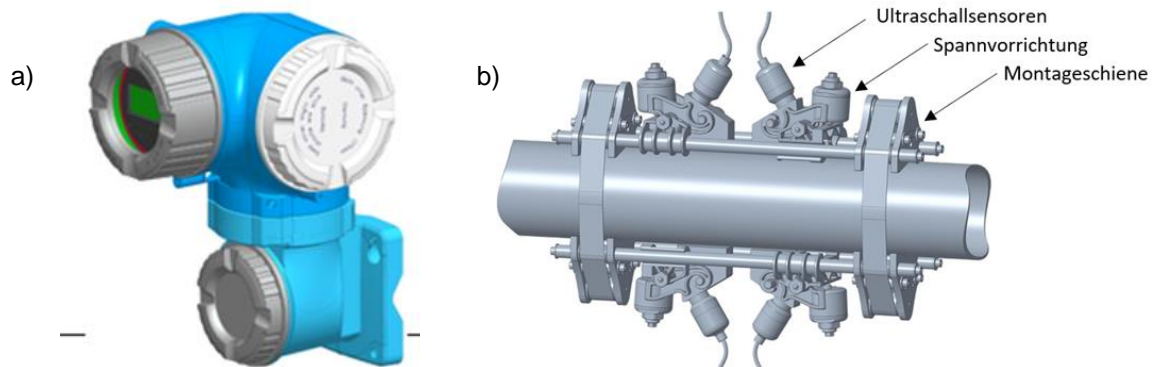
- + Messgerät kann ohne großen Aufwand nachgerüstet werden
- + Installation ohne Messunterbrechung
- + Kein Einfluss auf das Strömungsverhalten des Arbeitsmediums
- + Messmethode ist unabhängig vom Druck
- + Messung bei Temperaturen bis 600 °C  
(Untersucher Prototyp von E&H aktuell bis 550 °C)
- + Bauteile der Messung befinden sich außerhalb vom Medium (z.B. keine Probleme mit Korrosion und Dichtigkeit von Durchführungen)
- Messgerät muss auf das spezifische Rohrmaterial und Maße kalibriert werden
- Frequenz der Ultraschallwellen muss auf die temperaturabhängige Viskosität des Arbeitsmediums angepasst werden
- Signalstärke ist im Vergleich zum in-line Verfahren herabgesetzt
- Messung erfolgt bei aktuell verfügbaren Sensoren abgesetzt bzw. indirekt in kälterer Umgebung über sogenannte Waveguides (zusätzliches Element zur Übertragung vom Rohr zum Sensor, da dieser temperaturempfindlich ist)

Für die Strömungsmessung bei Flüssigsalzanwendungen finden neben dem Ultraschall- auch Differenzdruck-, Coriolis- und Vortexsysteme Anwendung. Die letzten beiden sind allerdings derzeit auf maximale Betriebstemperaturen von ca. 400-450 °C begrenzt. Aus diesem Grund ist die Ultraschall-Durchflussmesstechnik äußerst relevant für den Einsatz im Hochtemperaturteil von Turmkraftwerken und auch in zukünftigen modifizierten Parabolrinnenkraftwerken.

Abbildung 47 zeigt ein Bild der Messeinrichtung in der TESIS:com Teststrecke. Der verwendete Transmitter und eine detailliertere Darstellung des Messgeräts sind in Abbildung 48 dargestellt.



**Abbildung 47: Versuchsaufbau mit dem Clamp-on Ultraschall-Durchflussmessgerät der Endress und Hauser FLOWtec AG.**



**Abbildung 48: a) Proline Prosonic P 500 Transmitter und b) Clamp-on HT-Sensoren in 2-Pfad Aufspannung.**

Mit Hilfe einer Montageschiene und Spannvorrichtung werden die Signalgeber/Sensoren direkt an der Rohroberfläche befestigt. Dies ist ein klarer Unterschied gegenüber bisher verfügbaren Clamp-on Ultraschallsensoren, bei denen Waveguides verwendet werden. Zwischen den Sensoren und der Rohrleitungsoberfläche befindet sich ein Kontaktmaterial, um den Eintrag der Ultraschallwellen zu verbessern. Durch eine Verlängerung haben die Messumformer einen größeren Abstand zur heißen Rohroberfläche und sind so vor hohen Temperaturen geschützt. Die Sensoren können vollständig mit Wärmedämmung ausgestattet werden. Für den Versuchsaufbau wurde auf eine Wärmedämmung verzichtet, damit während der Versuche leichter Anpassungen am Messgerät vornehmen zu können. Die Begleitheizung konnte am Rohr verbleiben. Die mineralisierten Leiter müssen lediglich etwas verschoben werden, damit die Sensoren exakt auf der Rohroberfläche aufsetzen können. Für eine detaillierte Beschreibung des Messprinzips des Prototypen wird auf folgendes Video von Endress+Hauser verwiesen [26].

Im Rahmen der Messkampagne wurden Massenströme und Temperaturen variiert. Für die Verifizierung der Messwerte war ein Coriolis Durchflussmessgerät in der Teststrecke installiert (deshalb waren die Versuche auf 400 °C begrenzt). Ziel von E&H war zunächst eine grundsätzliche Qualifizierung ihres Messgeräts für Flüssigsalzanwendungen durchzuführen. Eine erweiternde Messkampagne mit Versuchen bis 560 °C war ursprünglich geplant, wurde jedoch verworfen mangels eines geeigneten Referenz-Messgeräts. Die ersten Testergebnisse fielen positiv aus und der Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Prototyps war erfolgreich. Die Erkenntnisse aus den Messungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

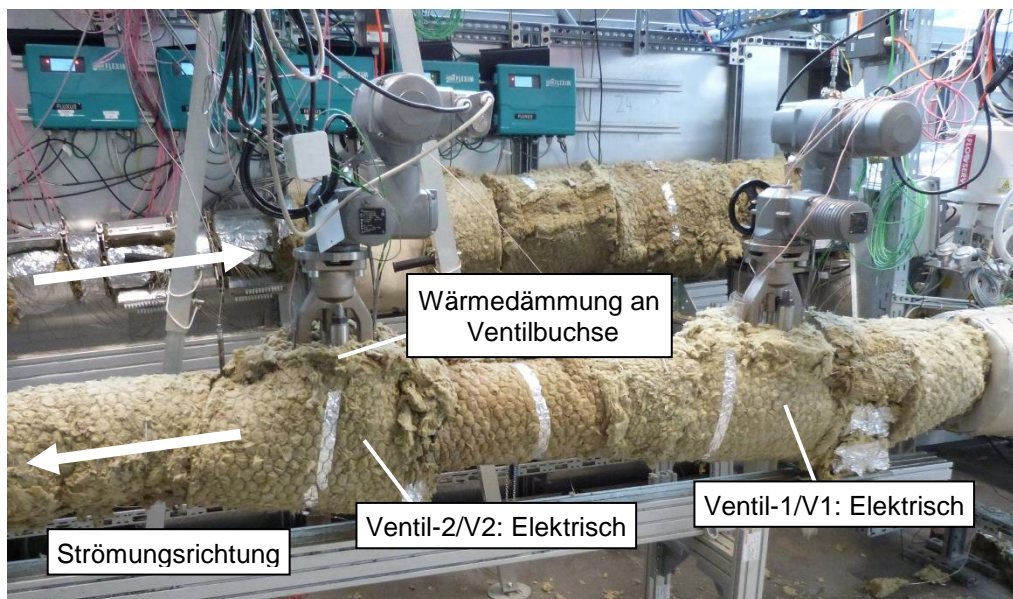
- Salzschnmelzen lassen sich mit Ultraschall im Frequenzbereich um 1MHz problemlos messen: Es ist keine außergewöhnlich hohe Dämpfung vorhanden
- Die Funktionalität der Sensoren bei den hohen Mediumstemperaturen, der sie 1:1 ausgesetzt sind, hat sich bestätigt
- Aufgrund der Messresultate scheint eine Messunsicherheit bei optimaler Auslegung im Bereich von  $\pm 2\%$  im Bereich des Möglichen

Aufgrund der sehr frühen Entwicklungsphase des Messgeräts, kann noch keine detaillierte Darstellung der Messergebnisse erfolgen. Weitere Versuche in der TESIS:com Anlage, gegebenenfalls auch bei höheren Betriebstemperaturen, sind sinnvolle nächste Schritte für eine weiterreichende Qualifizierung des Prototyps.

## 3.3.2 Versuche Ventile #2 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)

### 3.3.2.1 Versuchsaufbau #2 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)

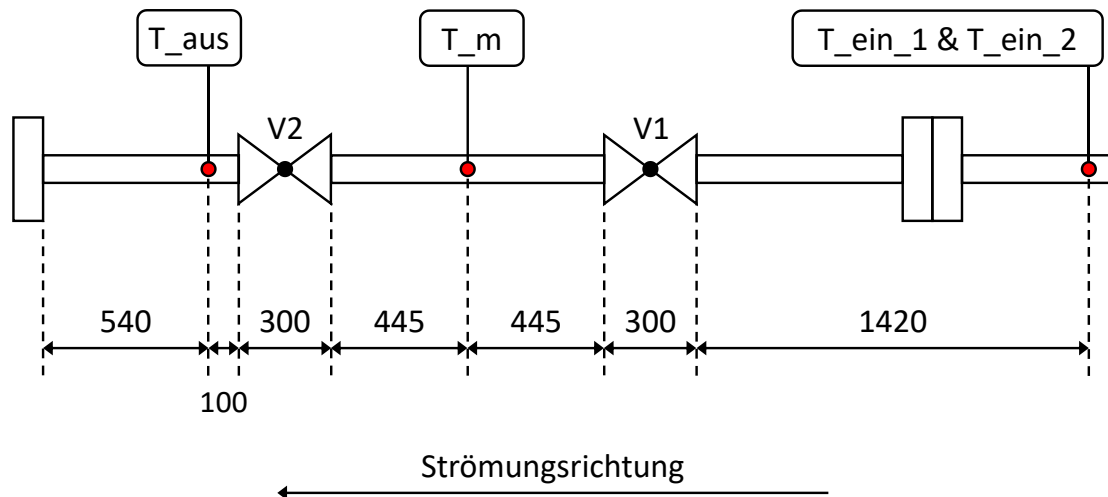
Ein Bild des zweiten Versuchsaufbaus für PERSTA ist in Abbildung 49 zu sehen. In TK2 wurden zwei elektrische Ventile getestet. Auf den Einsatz von pneumatischen Ventilen wurde verzichtet, da aus TK1 bereits bekannt war, dass die hohe Betätigungsgeschwindigkeit die Ventile zusätzlich belastet. Die Erkenntnisse aus der ersten Testkampagne wurden von PERSTA genutzt, um gemeinsam mit ihrem Dichtungslieferanten eine verbesserte Ventilpackung herzustellen (Details hierzu wurden von PERSTA nicht geteilt). Darüber hinaus wurde die Konstruktion der Ventile angepasst, um eine bessere Durchwärmung des Ventilkörpers zu gewährleisten, aber auch um eine Überhitzung der Motoren zu vermeiden.



**Abbildung 49: Versuchsaufbau mit den zwei elektrischen Ventilen der Stahl-Armaturen PERSTA GmbH beim der zweiten Testkampagne.**

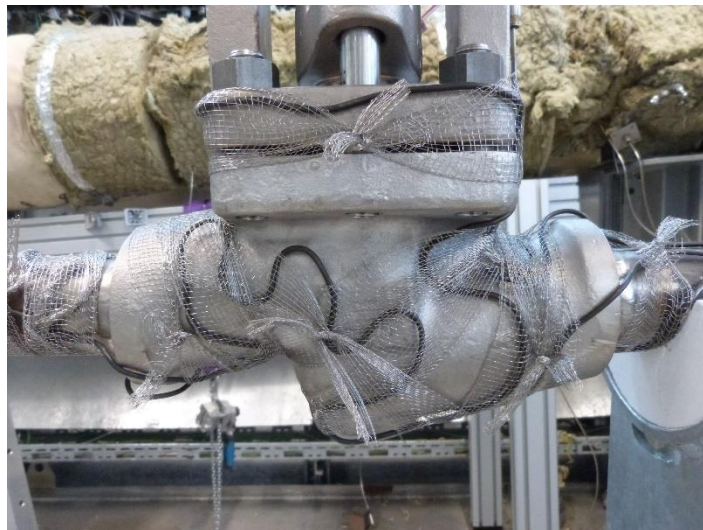
Bei diesem Aufbau wird das in Strömungsrichtung erste Ventil mit V1 und das zweite mit V2 abgekürzt.

Abbildung 50 zeigt eine bemaßte Skizze des Testaufbaus. Zwischen den beiden Ventilen ( $T_m$ ) und hinter V2 ( $T_{aus}$ ) wurden zwei Thermoelemente installiert, um die Flüssigsalztemperatur zu messen. Wie bereits bekannt geben  $T_{ein\_1}$  und  $T_{ein\_2}$  die Eintrittstemperatur in die Teststrecke an.



**Abbildung 50: Skizze des Teststreckenabschnitts; Positionierung der Ventile und Thermometer in TK2 (alle Maße in mm).**

Im Vergleich zur ersten Testkampagne wurden die Begleitheizung und die Wärmedämmung an den Ventilen angepasst. Die erste Messkampagne zeigte, dass die Leistung der installierten Heizleiter nicht ausreichte, um das Ventil vor dem Teststart hinreichend aufzuheizen. Aus diesem Grund wurde die Länge der Begleitheizung an den Ventilen und damit die installierte Leistung erhöht. Außerdem wurden die Begleitheizungen auch weiter oben am Ventilkörper installiert (siehe Abbildung 51).

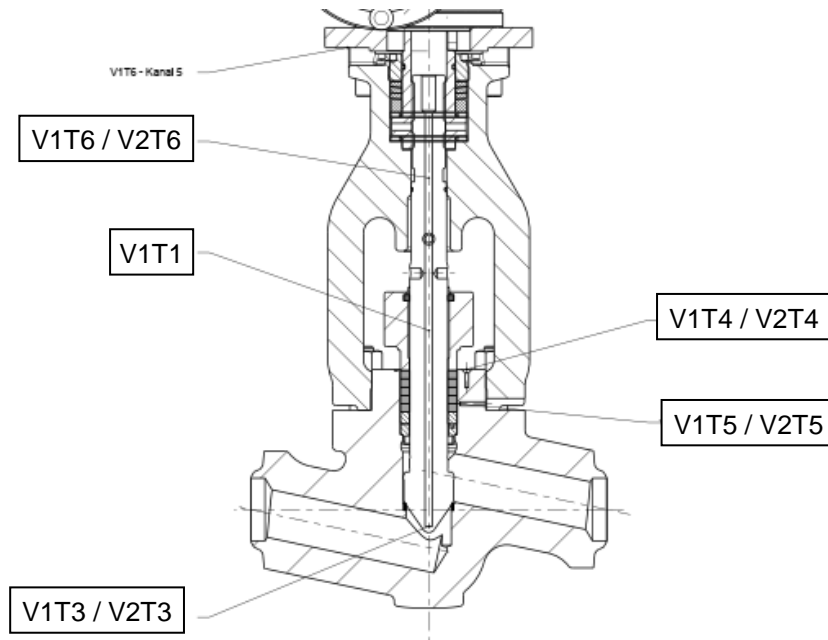


**Abbildung 51: Begleitheizung an einem der beiden elektrischen Ventile bei der zweiten Testkampagne mit PERSTA.**

Außerdem wurde die Ventilbuchse mit einer zusätzlichen Wärmedämmung versehen. Dies soll dazu beitragen, die Wärmeverluste im Bereich der Ventilpackung zu verringern und das Gefrieren von Salz in diesem Bereich zu verhindern (siehe Abbildung 49).

Wie bei TK1 wurden beide Ventile mit einer Rückdichtung versehen und auf einen Faltenbalg und eine separate Ventilspindelheizung wurde verzichtet (siehe Argumentation hierzu im Abschnitt 3.2.2.1).

Die Position und Bezeichnung der Thermoelemente an den Ventilen sind in Abbildung 52 dargestellt. Die Durchflussrichtung in Abbildung 52 ist von links nach rechts. Beide Ventile sind mit Thermoelementen an identischen Positionen ausgestattet. Nur das Thermoelement mit der Nummerierung T1 befindet sich ausschließlich am Ventil 1.



**Abbildung 52: Position der Thermoelemente an den Ventilen während TK2.**

Neben den Temperaturen wurde erneut die Position der Ventile aufgezeichnet. Auf eine Messung des Drehmoments wurde von PERSTA in TK2 verzichtet.

### 3.3.2.2 Zeitplan: Versuche und Umbaumaßnahmen #2 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)

Der Zeitplan für die Ventil-Versuche im Rahmen von TK2 ist in Tabelle 15 dargestellt. In der zweiten Testkampagne wurden nur Ventilzyklen-Tests durchgeführt. Die Sequenz der Ventilbetätigung unterscheidet sich von der ersten Testkampagne. Aus diesem Grund sind die Ventilzyklen hier mit den Versionsnummern 2 bzw. 3 versehen. Die Beschreibung der Versuchsabläufe wird im nächsten Abschnitt ausführlich erläutert. Bei Endress und Hauser wurden die Versuchsnummern V1-V3 bereits vergeben. Daher beginnt die Kennzeichnung der Ventil-Versuche mit dem Kürzel TK2/V4. Der Test V4 musste in fünf Durchgängen ausgeführt werden. Die technischen Anforderungen an das TESIS:com-System waren bei diesen Versuchen sehr hoch, so dass es häufiger zu Systemfehlern kam. Bei V5 waren zwei Wiederholungen notwendig, um das Testziel zu erreichen.

**Tabelle 15: Zeitlicher Ablaufplan der Ventil-Versuche in Testkampagne 2.**

Datum	Versuch	Kennzeichen	Kommentar
01.09.2021	Ventilzyklen Version 2 (300 °C-550 °C)	TK2/V4/R1	Beginn Messkampagne, Abbruch wegen Anlagenfehler
03.09.2021 – 05.09.2021	Ventilzyklen Version 2 (300 °C-550 °C)	TK2/V4/R2	Abbruch wegen Anlagenfehler
06.09.2021	Ventilzyklen Version 2 (300 °C-550 °C)	TK2/V4/R3	Abbruch wegen Anlagenfehler
07.09.2021 – 08.09.2021	Ventilzyklen Version 2 (300 °C-550 °C)	TK2/V4/R4	Abbruch wegen Anlagenalarm
13.09.2021 – 14.09.2021	Ventilzyklen Version 2 (300 °C-550 °C)	TK2/V4/R5	175 Zyklen von beiden Ventilen abgeschlossen
15.09.2021 – 16.09.2021	Ventilzyklen Version 3 (300 °C-550 °C)	TK2/V5/R1	Abbruch wegen Anlagenfehler
17.09.2021 – 19.09.2021	Ventilzyklen Version 3 (300 °C-550 °C)	TK2/V5/R2	V1 175 Zyklen und V2 17 Zyklen abgeschlossen, Ende der Messkampagne

### 3.3.2.3 Versuchsbeschreibung, Ergebnisse und Diskussion #2 (Stahl-Armaturen PERSTA GmbH)

In den nächsten Abschnitten werden die Ventil-Versuche der zweiten Testkampagne beschrieben und diskutiert.

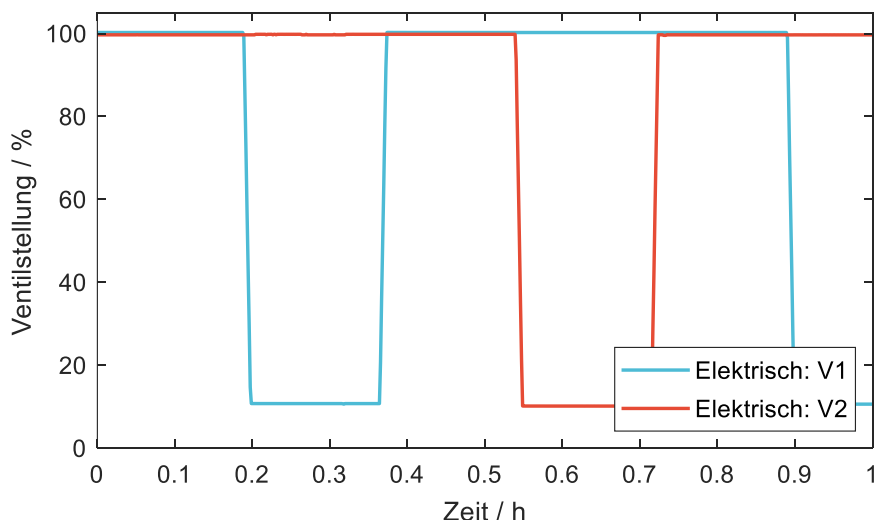
#### **Ventilzyklen Version 2 (TK2/V4)**

Wie bereits erwähnt, wurde die Reihenfolge der Ventilzyklen im Vergleich zur ersten Testkampagne geändert. Zur Erläuterung ist in Abbildung 53 die Abfolge der Ventilbetätigungen im TK2/V4-Test dargestellt. Die Schrittkette sieht wie folgt aus:

- Schritt 1: V1 = 100%, V2 = 100% → Durchströmung für 10 Minuten
- Schritt 2: V1 wird bis auf 10% geschlossen
- Schritt 3: V1 = 10%, V2 = 100% → Durchströmung für 10 Minuten
- Schritt 4: V1 wird auf 100% geöffnet
- Schritt 5: V1 = 100%, V2 = 100% → Durchströmung für 10 Minuten
- Schritt 6: V2 wird bis auf 10% geschlossen
- Schritt 7: V1 = 100%, V2 = 10% → Durchströmung für 10 Minuten
- Schritt 8: V2 wird auf 100% geöffnet → Zurück zu Schritt 1

Ein Durchlauf der oben genannten Schrittkette dauert 40 Minuten. Ziel von TK2/V4 waren 175 Durchläufe. Daraus folgt, dass die Ventile jeweils 175 Zu/Auf-Zyklen ausführen und etwas weniger als 5 Tage im Betrieb mit heißem Flüssigsalz waren.

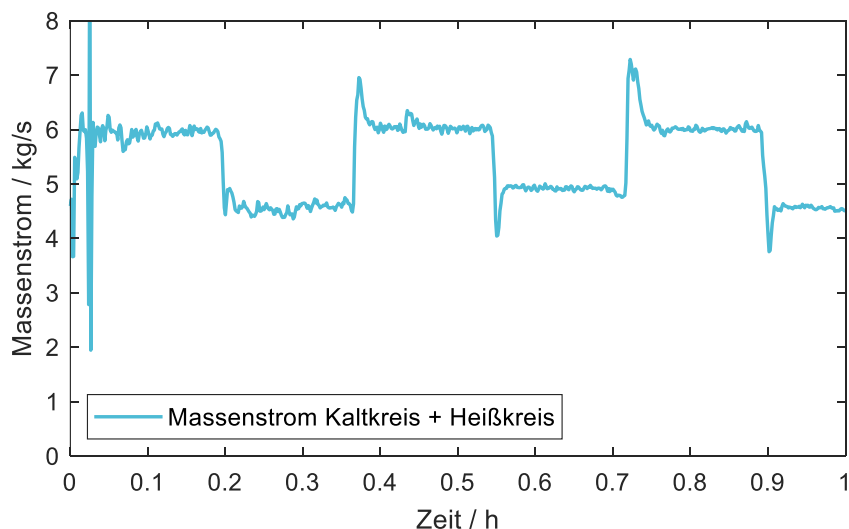




**Abbildung 53: Sequenz der Ventilbetätigungen bei den Ventilzyklen Version 2 (TK2/V4).**

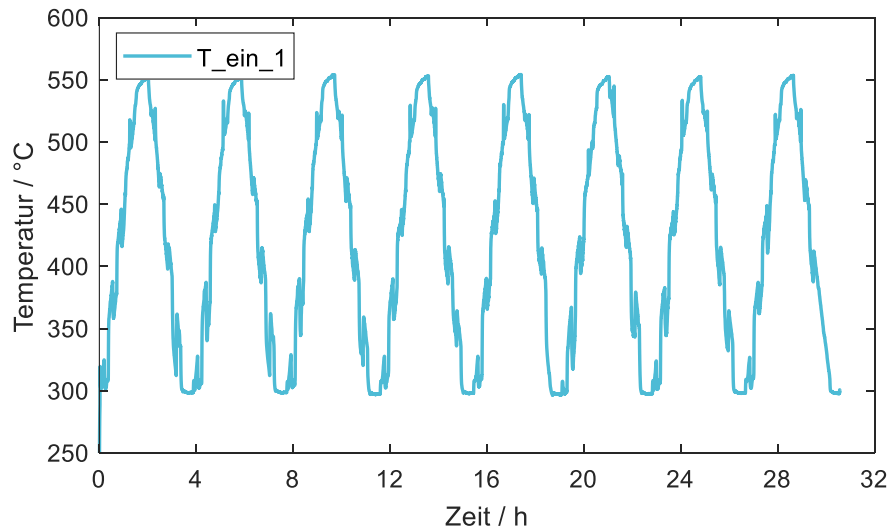
Die Wartezeit zwischen den Ventilbetätigungen wurde bewusst eingebaut, um die Kontaktzeit mit dem Flüssigsalz hochzuhalten. Gleichzeitig wurde die Anzahl der Zyklen reduziert. Auf diese Weise spiegeln die durchgeführten Betätigungen besser die tatsächliche Anzahl der Betätigung von Absperrventilen (siehe Abschnitt 2.1.4) in solarthermischen Kraftwerken wider. Die Ventile wurden nicht ganz geschlossen, damit stets ein Durchfluss von Flüssigsalz gewährleistet war.

Für TK2/V4 und auch TK2/V5 wurde ein Soll-Massenstrom von 6 kg/s festgelegt. Abbildung 54 zeigt den Massenstrom für den gleichen Zeitraum wie im obigen Diagramm. Die Anlage wurde permanent im Mischbetrieb gefahren, d.h. sowohl die Kalt- als auch die Heißtankpumpe waren ständig in Betrieb. Um den Gesamtmassenstrom durch die Messstrecke zu erhalten, werden die Massenströme addiert (Massenstrom Kaltkreis+ Heißkreis). Bei vollständig geöffneten Ventilen konnte das TESIS:com-System den Zielwert von 6 kg/s erreichen. Wird eines der beiden Ventile auf 10% Stellung gebracht, sinkt der Massenstrom auf ca. 4,5 kg/s. Die Druckerhöhung der Pumpen reichte in diesem Fall nicht aus, um den erhöhten Druckverlust durch die Ventile auszugleichen.



**Abbildung 54: Massenstrom während der Ventilzyklen Version 2 (TK2/V4); es ist der gleiche Zeitabschnitt wie in Abbildung 53 auf der x-Achse dargestellt.**

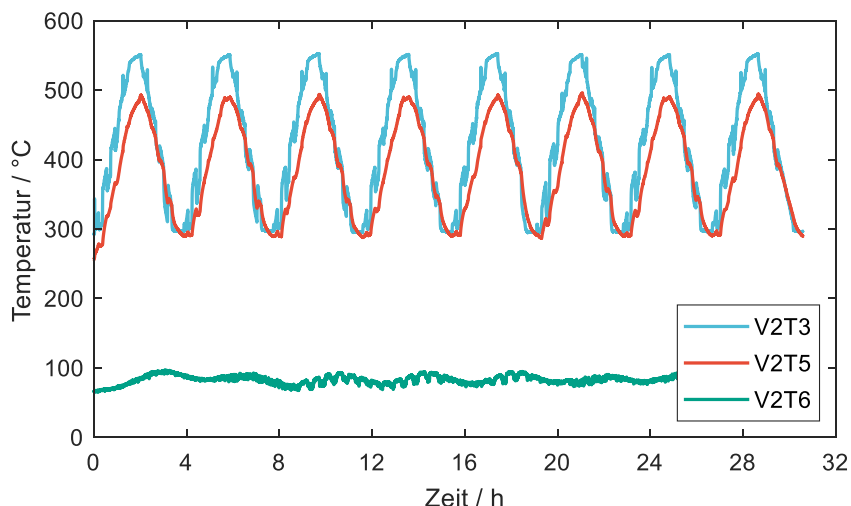
Nach dem Öffnen eines Ventils steigt der Massenstrom kurzzeitig über 6 kg/s an (z. B. bei 0,7 h). Die Regler der TESIS:com Anlage benötigen etwas Zeit, um den Soll-Massenstrom wieder einzustellen. Es ist auch zu erkennen, dass der Massenstrom, unabhängig von der Ventilstellung, Schwankungen unterworfen ist. Dies ist hauptsächlich auf den Mischbetrieb bzw. die sich ständig ändernden Eintrittstemperaturen zurückzuführen. Während der zweiten Messkampagne wurden die Ventile ständig wechselnden Temperaturen zwischen 300 und 550 °C ausgesetzt. Der Verlauf der Eintrittstemperatur ist exemplarisch für den Versuch TK2/V3/R5 in Abbildung 55 aufgezeigt.



**Abbildung 55: Verlauf der Eintrittstemperatur während des Versuchs TK2/V4/R5.**

Die Eintrittstemperatur wird kontinuierlich zwischen 300 °C und 550 °C variiert. Eine positive Temperaturrampe wird zunächst in 90 Minuten durchlaufen. Anschließend verbleibt die Eintrittstemperatur 30 Minuten lang an der oberen Temperaturgrenze. Dieser Schritt ist notwendig, damit die TESIS:com Anlage die Temperaturen in den Vorlagebehältern halten bzw. wiederherstellen kann. Aufgrund der Verschaltung der Anlage steigt während einer Rampe die Temperatur im kalten Tank leicht an und die Temperatur im heißen Tank sinkt. Dies gilt gleichermaßen für positive und negative Temperaturrampen. Im nächsten Schritt wird die Vorlauftemperatur in 90 Minuten wieder auf 300 °C abgesenkt. Wie schon bei der oberen Temperaturgrenze werden auch hier die 300 °C für 30 Minuten gehalten, bevor die nächste positive Temperaturrampe beginnt. Der Einfluss der Ventilstellung lässt sich auch an der Vorlauftemperatur erkennen. Schließt ein Ventil auf 10 %, sinkt oder steigt die Eintrittstemperatur schlagartig an. Wie die Temperatur auf das Schließen eines Ventils reagiert, hängt von der Mischtemperatur ab. Bei hohen Mischtemperaturen liefert die Heißtankpumpe den Hauptteil des Massenstroms, d.h. die Druckerhöhung ist stärker ausgeprägt als bei der Kalttankpumpe. Schließt nun ein Ventil, reicht der Druckanstieg der Kalttankpumpe nicht mehr aus, um flüssiges Salz in die Mischleitung zu drücken. Folglich steigt die Eintrittstemperatur kurzzeitig an. Das Gleiche gilt sinngemäß für niedrigere Mischtemperaturen. Die Eintrittstemperatur beeinflusst den Massenstrom insofern, als dass die Pumpendrehzahl und die Stellung der Mischventile immer wieder angepasst werden müssen, um die Soll-Mischtemperatur einzustellen. Dies führt zu den bereits erwähnten Schwankungen des Massenstroms, gezeigt in Abbildung 54.

Einige während des Versuchs TK2/V4/R5 am Ventil-2 gemessenen Temperaturen sind in Abbildung 56 über der Zeit aufgetragen. Der Versuch TK2/V4/R5 und das Ventil-2 werden hier als Beispiel angeführt. Die nachfolgend geschilderten Erkenntnisse gelten gleichermaßen für das Ventil-1 und andere Repetitionen des Versuchs T2/V4.



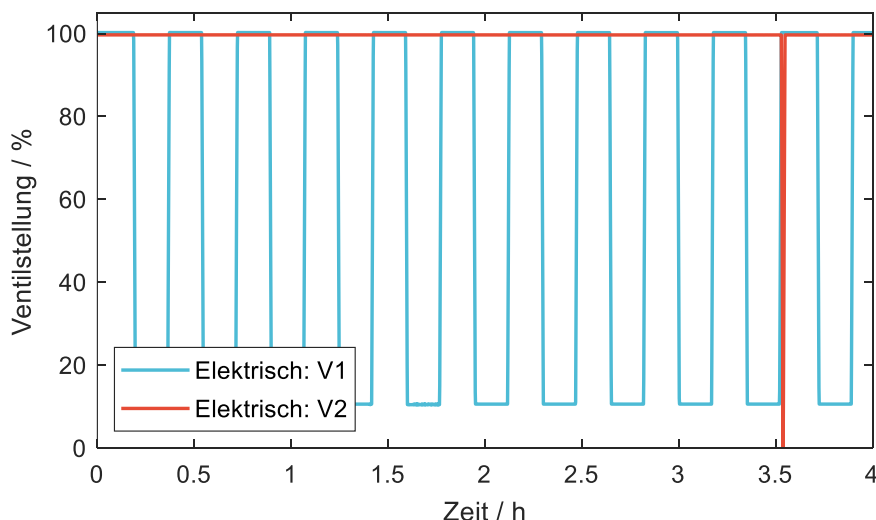
**Abbildung 56: Temperaturen am Ventil-2 während des Versuchs TK2/V4/R5.**

Mit dem Anstieg der Eintrittstemperatur ändern sich auch die Temperaturen am Ventil-2. V2T3 sitzt an der Spitze des Ventils und bildet daher die Temperaturkurve des Flüssigsalzes sehr genau ab. V2T5 wurde für dieses Diagramm ausgewählt, weil es durch eine Bohrung im Ventilkörper nahe an der Ventilpackung positioniert wurde. Da dieses Thermoelement etwas weiter vom durchströmten Teil des Ventils entfernt ist, sind die Temperaturrampen in abgeschwächter Form zu sehen. Zu bemerken ist, dass die Temperatur vor Beginn des Versuchs deutlich über der Schmelztemperatur des Flüssigsalzes von 220 °C liegt. Darüber hinaus sinkt die Temperatur an der Ventilpackung zu keinem Zeitpunkt unter 300 °C. Es ist daher bewiesen, dass durch die verbesserte Begleitheizung und Wärmedämmung im Bereich der Stopfbuchse kein Flüssigsalz einfrieren kann. Allerdings überschreitet V2T5 an der oberen Grenze der Temperaturrampen 400 °C. Bei über 400 °C reagiert das Flüssigsalz mit dem Graphitkern der Ventilpackung. Nachfolgende Tests von PERSTA werden zeigen, ob der Mantel der Ventilpackung ausreicht, um die Reaktion zu unterbinden.

Schließlich ist auch der Messwert des Thermoelements V2T6 im Diagramm eingezeichnet. Dieses Thermoelement befindet sich in der Nähe des Elektromotors. Bei hohen Flüssigsalztemperaturen nähert sich der Messwert 100 °C. Um eine Überhitzung des Motors zu vermeiden, sollte die Konstruktion der Ventilbuchse überdacht werden. Die Schwierigkeit liegt darin die Ventilstopfbuchse bzw. die Wärmeverluste so auszulegen, dass in jedem denkbaren Betriebspunkt die Temperatur im Bereich der Stopfbuchse deutlich über 220 °C liegt und gleichzeitig die Temperatur am Motor so niedrig wie möglich bleibt.

### **Ventilzyklen Version 3 (TK2/V5)**

Der Soll-Massenstrom von 6 kg/s und der Verlauf der Eintrittstemperatur sind identisch zum Versuch TK2V4. Deswegen wird auf eine erneute Darstellung dieser Parameter verzichtet. Die Sequenz der Ventilbetätigungen bei den Ventilzyklen Version 3 ist graphisch in Abbildung 57 aufgezeigt.



**Abbildung 57: Sequenz der Ventilbetätigungen bei den Ventilzyklen Version 3 (TK2/V5).**

Ventil 1 wird in 10-Minuten-Zyklen auf 10% geschlossen und wieder auf 100% geöffnet. Nach 10 Schließ- und Öffnungszyklen von V1 wird V2 vollständig geschlossen und ohne Zeitverzögerung wieder geöffnet. Im Experiment TK2/V5 durchläuft V1 wiederum 175 Zyklen, und folglich wird V2 17 Mal betätigt. Durch die unterschiedliche Anzahl der Zyklen kann PERSTA feststellen, wie sich die Betätigungen mechanisch auf die Ventilpackung auswirken. Auf weitere Aspekte wird hier nicht eingegangen werden. Die Temperaturverläufe an den Ventilen sind vergleichbar mit TK2/V4. In TK1/V4 ist die Betätigung beider Ventile und in TK2/V5 das Verhalten von Ventil-1 den Absperrventilen in den Loops von Parabolrinnen-Kraftwerken nachempfunden. Diese werden halbjährlich oder jährlich verstellt, um die Verteilung des Flüssigsalzes in den Kreisläufen anzupassen. Die Ventile sind nie vollständig geschlossen, da ein Durchfluss möglich sein muss. Die Funktionsweise des Ventils-2 in TK2/V5 entspricht eher der von Absperrventilen in Turmkraftwerken. Vor und nach dem Receiver werden die Absperrventile im Normalbetrieb zweimal täglich geöffnet und geschlossen, um das System zu füllen bzw. zu entleeren. Ventil-1 hat in TK2 350 Zyklen durchlaufen. Zum Vergleich: Ein Absperrventil in einem Parabolrinnen-Kraftwerk wird während seiner Lebensdauer nicht mehr als 100 Mal verstellt. Ventil-2 absolvierte 175 Zyklen mit 10 Minuten Wartezeit zwischen Schließen und Öffnen und weitere 17 ohne Wartezeit. Bei TK2 wurden bei beiden Ventilen keine Leckagen oder technischen Probleme festgestellt.

## 4 Empfehlungen für Komponenten und -tests (AP4)

Im AP4 wurden anhand der durchgeführten Komponententest und den daran anschließenden Auswertungen, Anpassungen für zukünftige Testkonzepte abgeleitet (Abschnitt 4.1). Außerdem wurden im 4.2 grundlegende Designhinweise für kritische Flüssigsalzkomponenten, welche aus den Tests und weiteren Erfahrungen aus den Flüssigsalz Anlagen weltweit abgeleitet sind identifiziert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf Ventilen, da sie umfangreich getestet wurden und auch eine kritische Komponente in Anlagen mit Flüssigsalz sind.

### 4.1 Anpassungen Testkonzepte

Nach den Testkampagnen werden im Folgende Empfehlungen für zukünftige Komponententests von Verbindungstechnik, Ventilen und Durchflusssensorik festgehalten. Tests für weitere Komponenten konnten im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt werden und werden daher hier auch nicht evaluiert.

#### 4.1.1 Flanschttests

Eine wesentliche Voraussetzung für die Dichtigkeit von Flanschen bei starken Temperaturwechseln ist eine geeignete Auslegung und Vorspannung. Hierzu sollten im Vorfeld Auslegungsrechnungen mit geeigneten Lastfällen durchgeführt werden. Hierbei sollten durchaus Fälle betrachtet werden, bei denen sich die Flanschttemperatur von der Schraubentemperatur unterscheidet. Es können dann bereits im Vorfeld geeignete Maßnahmen (z.B. Federn, Hülsen) getroffen werden, soweit die Auslegungsrechnung bereits unzulässige Lastfälle aufzeigt.

Zum Verständnis der thermischen Belastungen in dem Flansch ist eine zuverlässige Temperaturmessung von Bedeutung. In den Tests hat sich herausgestellt, dass die Positionen der Sensoren, aber vor allem deren Befestigung und der thermische Kontakt, eine große Rolle bei der Qualität der Temperaturmessung spielen. Um Leckagen zeitnah detektieren und deren Ursprung ermitteln zu können, sollten zusätzliche Anlegetemperaturfühler außerhalb des Flansches und in Bohrungen innerhalb des Flansches verteilt in verschiedenen radialer Entfernung vom Rohr installiert werden.

Nach dem Thermoschock Versuch TK1/V5/R1 wurde eine Salzleckage an zwei Flanschen festgestellt. Allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass die Temperaturänderungsraten mit bis zu +93 K/s sehr groß waren. Für die Anwendung in solarthermischen Kraftwerken sind diese Änderungsraten unwahrscheinlich. Häufiger treten dafür Temperaturänderungen mit Raten von < 5 K/s, beispielsweise bei Wolkendurchzug, auf. Die Abbildung der thermischen Zyklen zur Simulation von Materialermüdung der Schrauben, ist durch eine höhere Zyklenanzahl, nach Abschnitt 2.1.3, bei reduzierter Temperaturänderungsrate darstellbar. Das bringt jedoch eine deutlich längere Versuchsdauer und damit Kosten mit sich. Alternativ können die Schraubenbolzen in separaten thermischen Belastungstests auf plastische Verformung geprüft werden, allerdings kann eine Leckage nur bedingt ausgeschlossen werden.

Die Drehmomente, mit denen die Schrauben festgezogen werden, sollten nicht nur vom Hersteller vorgegeben (Moment, Temperatur des Flansches), sondern auch dokumentiert werden. Bei den Tests gab es auch Fälle, in denen nach Salzleckagen die Schrauben an den Flanschen nachgezogen wurden. Nachziehen (nur bei ausreichend hohen Temperaturen, bei denen das Salz im Ringspalt flüssig ist) nach Leckagen sollte immer zusammen mit einem Dichtungswechsel durchgeführt werden, um definierte Rahmenbedingungen für die Tests zu

gewährleisten. Auch das Schmiermittel sollte für die Schrauben vorgegeben werden. Zu Bedenken ist, dass die meisten Schmiermittel bei den hohen Betriebstemperaturen verbrennen und so die Schrauben beim Lösen einen trockenen Gewindegang haben.

Im Nachgang sollten die Dichtungen und Schrauben näher auf Schäden und plastische Verformung untersucht werden.

#### **4.1.2 Ventiltests**

Entscheidend bei der Durchführung von Tests für Flüssigsalzventile ist deren Einsatzbereich in solarthermischen Kraftwerken, da die Anzahl der notwendigen Ventilzyklen stark variiert. Regelventile müssen bis zu 100.000 Zyklen während ihrer Lebenszeit fahren, sodass im Vergleich zu 1.300 Zyklen der Absperrventile von Parabolrinnen- oder Fresnelloops (vgl. Abschnitt 2.1.4), unterschiedliche Tests durchgeführt werden müssen.

Weiterhin muss Klarheit darüber bestehen, ob ein Wechsel der Dichtungspackungen überhaupt infrage kommt oder wie oft er möglich ist. In Turmkraftwerken können Ventile nur schlecht zugänglich sein. In linienfokussierenden Kollektorfeldern gibt es Planungsbüros, die davon ausgehen, dass das Kollektorfeldes nicht entleert wird, idealerweise während der gesamten Laufzeit von 20 bis 25 Jahren nicht. Bei befüllten Systemen können die Packungen aber zum Teil nicht gewechselt werden, je nachdem ob eine Rückdichtung eingebaut ist. Die Standards für den Betrieb von Ventilen sehen allerdings einen jährlichen Packungswechsel vor, wovon Ventilhersteller durchaus auch ausgehen bei der Auslegung der Ventildichtungen. Die Ventilhersteller müssen daher über die Betriebsweise aufgeklärt werden und die Tests entsprechend angepasst werden.

Neben der benötigten Zyklenzahl sollten die Tests auch den typischen Temperaturbereich (270 °C bis 565 °C) von Salzsammelanlagen abbilden. Die niedrigsten und höchsten Prozesstemperaturen sind bei Tests entscheidend für die Bewertung der Prüflinge.

Bei einer geringen Salztemperatur besteht ein erhöhtes Risiko von Schäden durch das Erstarren von Salz in bewegten Teilen der Ventile. Um reproduzierbare Ergebnisse und eindeutige Schadensursachen ermitteln zu können, sollten die notwendigen Beheizungen des Ventils klar definiert oder im besten Fall im Lieferumfang des Ventilherstellers enthalten sein.

Hohe Salztemperaturen hingegen können zur Überhitzung des Antriebs führen, denn die Spindel agiert als Wärmebrücke. Ggf. ist das Design anzupassen, um temperaturkritische Bauteile weit genug vom heißen Bereich abzusetzen. Entsprechend muss die Isolierung abgestimmt sein und installiert werden. Die Position und Befestigung der Temperatursensoren sollte in kritischen Ventilbereichen, also Spindel, Packung/Faltenbalg, Antrieb und Gehäuse akribisch geplant werden, damit die Qualität der Messwerte für die Fehleranalyse ausreichend ist. Speziell sollte die Temperatur möglichst nahe der Spindeldichtung gemessen werden und in die Anlagensteuerung eingebunden werden. So kann sichergestellt werden, dass das Ventil ausreichend vorgewärmt ist, bevor es betätigt wird. Die Aufheizdauer sollte möglichst mit untersucht werden, da sie Rückschlüsse über die Dimensionierung der Heizung zulässt. Um Leckagen zeitnah detektieren und deren Ursprung ermitteln zu können, sollte bei den zu testenden Komponenten an äußeren Dichtungsbereichen zusätzliche Anlegetemperaturfühler installiert werden.

Beim Einsatz von Graphitpackungen gilt außerdem zu beachten, dass Flüssigsalz ab einer Temperatur von ca. 400 °C mit Graphit chemisch reagiert und es zu Leckagen kommen kann.

Neben der Leckage nach außen sollte auch die interne Ventildichtigkeit bei niedrigen und hohen Temperaturen getestet werden. Gerade Absperrventile sollten während Wartungsarbeiten dauerhaft dicht schließen auch am Ende der erwarteten Lebensdauer. Es

empfiehlt sich daher Dichtigkeitstests zu Beginn und am Ende einer Ventiltstkampagne durchzuführen.

Neben der Zyklenbeständigkeit der Ventile kann es bei längeren Kontaktzeiten mit dem Flüssigsalz zu chemischen Reaktionen und Korrosion kommen. Es empfiehlt sich daher für dichtende Bauteile wie Packungen oder Dichtungen, Langzeittests in Flüssigsalz im Labormaßstab vorab durchzuführen.

### **4.1.3 Tests Instrumentierung - Durchflussmessung**

In der zweiten Messkampagne wurden auch Ultraschall-Durchflusssensoren getestet. Dabei ist stets ein kalibrierte Referenzmessung erforderlich, welche oberhalb einer Salztemperatur von 450°C nicht kommerziell bzw. nur als Clamp-On (Ultraschall) verfügbar ist. Zuverlässige Qualifizierung von Durchflussmessungen sind daher nur bis 450 °C oder über Ausliterung mit großen Salzvolumen darstellbar. Grundsätzlich sind Kalibrieranlagen für Wasser vorhanden (z.B. PTB), aber Kalibrieranlagen für Flüssigsalz hingegen nicht, so dass mit höheren Unsicherheiten gerechnet werden muss. Durchflussmessungen können in Bereichen mit niedrigeren Salztemperaturen verbaut werden, um eine zuverlässigere Messunsicherheit zu gewährleisten (z.B. 290 °C statt 560 °C). Wesentliche Fehlerquellen für die Messunsicherheit sind außerdem die Maße der Rohrleitung, die Temperaturmessung in der Nähe des Messgerätes, Stoffeigenschaften des Flüssigsalzes und der Kontakt des Ultraschallsensors auf der Rohroberfläche. Insbesondere bei kleinen Rohrleitungsdurchmessern in der Größenordnung 70 mm ist es schwierig die Sensoren ausreichend genau zu montieren. Die Aufspannmessungen sind sehr empfindlich gegenüber kleinsten Lufträumen zwischen Sensor und Rohrleitung. Diese Lücke wird üblicherweise mit Pasten geschlossen, die aber bei hohen Temperaturen austrocknen und wegbröseln können. Daher ist der Einsatz von weichen Metallfolien empfehlenswert. Der Hersteller sollte ein Verständnis darüber haben, mit welchem Material und Stärke eine Metallfolie eingesetzt werden soll. Fehlertoleranzen von besser als 5% sind nicht zu erwarten. Für genauere Kalibrierung der Ultraschallmessung könnten „Ausliterversuche“ eingesetzt werden.

Während der Inbetriebnahme kann sich die Einstellung der Kalibrierfaktor als schwierig erweisen, daher empfiehlt es sich das Gerät vorab oder vor Ort durch den Hersteller konfigurieren zu lassen.

## **4.2 Grundlegende Design Empfehlungen**

In diesem Kapitel werden grundlegende Designempfehlungen für entscheidende Komponenten in Flüssigsalzkraftwerken zusammengefasst. Diese beruhen auf den Testergebnissen und Erfahrungen aus den Salzschnelzeanlagen weltweit.

### **4.2.1 Rohrleitungen inkl. Lagerung, Begleitheizung und Isolierung**

#### ***Rohrleitungen***

Bei der Rohrleitungsplanung für Flüssigsalzanlagen sollte stets auf die Drainierbarkeit salzführender Leitungen geachtet werden. Je größer die Steigung der Leitung, desto schneller lässt sich die Rohrleitung entleeren und es sinkt das Risiko von Verstopfungen. Es wird eine Neigung von mindestens 0,15% empfohlen, damit ein typischer Parabolrinnen- oder Fresnelloop in etwa 40 Minuten drainiert werden kann. Bei der Auswahl des Rohrmaterials kann sich an Abschnitt 2.1.2 orientiert werden. Es gibt aber noch weitere Materialien und Beschichtungen, welche anwendungsspezifisch getestet und eingesetzt werden können.

## ***Rohrleitungslagerung***

Die Lagerung der salzführenden Rohrleitungen sollte als isolierte Rohrstütze ausgeführt werden, um Wärmeverluste zu reduzieren und Kaltpunkte zu vermeiden. Sie kann als Kreisabschnitt aus einer Calciumsilikat-Platte und einer entsprechenden Rohrschelle ausgeführt werden (siehe Abbildung 2) oder alternativ eine thermische Isolation im Bereich der Gleitlager (siehe Abbildung 58). Dabei muss neben der thermischen Ausdehnung auch auf die Durchführungen der Begleitheizung geachtet werden. Im Wesentlichen wird keiner weiterer Entwicklungsbedarf gesehen, da kommerzielle Lösungen verfügbar sind.

## ***Begleitheizung***

Begleitheizungen in solarthermischen Kraftwerken mit Salzschnmelze ziehen sich weitläufig wie Adern über sämtliche Bereiche und finden sich in verschiedenen Komponenten wieder. Ein Ausfall einer einzelnen Begleitheizung kann das vollständige Vorwärmen der Gesamtanlage verhindern und somit die Verfügbarkeit einer Salzanlage herabsetzen, so dass es sich um kritische Komponenten mit hohen Anforderungen handelt.

Da häufig angepasste Beheizungslösungen notwendig sind und diese im Idealfall vom Komponentenhersteller mit entwickelt wird, werden in diesem Abschnitt überwiegend allgemeingültige Aussagen getroffen. Empfehlungen für Komponenten, welche eine angepasste Begleitheizung bedürfen, folgen in den jeweiligen Abschnitten.

Begleitheizungen sind in vielen industriellen Anwendungen vertreten. Am häufigsten werden mineralisierte (MI) Heizkabel verwendet, welche bspw., axial an Rohrleitungen befestigt werden. Es sollte akribisch darauf geachtet werden, dass es keine Lücken in der Beheizung gibt, da dies bei der Drainage zur Akkumulation von Salz und einem soliden Stopfen an kalten Stellen im Rohrquerschnitt führen kann. Die Suche nach einer solchen Verstopfung kann sich schwierig gestalten, da die Begleitheizung unterhalb der Dämmung liegt und das Rohrleitungssystem von solarthermischen Kraftwerken sehr umfangreich ist. Die Heizungen werden daher in zahlreiche Heizkreise entsprechend des Designs und der Stromversorgung aufgeteilt, welche mittels Anlegetemperatursensoren zentral geregelt werden. Die Messstellen sollten im definierten Abstand zu den Heizleitern angebracht werden, da es sonst zur Überschätzung der Temperatur oder Überhitzung der Heizleiter kommen kann. Da die Sensoren unterhalb der Dämmung liegen und teilweise nicht leicht zugänglich sind, sollte hier über redundante Temperatursensoren nachgedacht werden. Weiterhin ist auf eine einheitlich Isolierdicke und kein Kreuzen von MI-Kabel zu achten, um Überhitzung zu vermeiden. Die korrekte Positionierung von Anschlussmuffen ist ebenfalls wichtig (z.B. Beachtung der max. Temperatur von gelöteten vs. geschweißte Muffen). Bei der Auslegung und Trennung von Rohrleitungsabschnitten mit MI-Kabeln ist auf die Funktionalität des Rohrabschnitts zu achten (Salzströmung, stehendes Salz, nicht gefüllte Rohrleitungen).

Redundanz empfiehlt sich ebenfalls bei der Ausführung von Heizleitern an komplexeren Geometrien, Hochtemperaturbereichen oder kritischer Infrastruktur, wie Dampferzeugern oder Speichern. MI-Kabel sind bei Schäden oder Fertigungsfehlern anfällig gegenüber Umgebungsfeuchte, da das gekapselte Isolationsmaterial (Magnesiumoxid) hygroskopisch wirkt. Durch das Dichtharz an den kalten Enden kann Feuchtigkeit eindringen und es kommt zum Verlust der elektrischen Isolationswirkung. Heizkreise, die nur selten und unter Umgebungsbedingungen betrieben werden, sind besonders betroffen. Außerdem können durch Bewegungen und zu hohe Temperaturen Mikrorisse im Mantelmaterial des Heizelements entstehen, sodass Feuchtigkeit eindringen kann. Häufig muss dann das gesamte Heizkabel ersetzt werden.



Bei Betriebspausen ist eine wiederkehrende Betätigung der Heizleiter empfehlenswert, um diese rechtzeitig zu trocknen bzw. einen Defekt frühzeitig zu erkennen.

### ***Rohrleitungsisolierung***

Bei der Rohrleitungsisolierung gilt es Wärmebrücke zu vermeiden und die Dämmung weitestgehend lückenlos auszuführen. In Abbildung 2 wurde beispielsweise der Übergang von der Rohrhalterung auf die anschließende flexible Dämmung nicht vollständig installiert und es entsteht eine Kaltstelle. Salzführenden Leitungen mit bestimmten Anwendungsbereichen und Temperaturen sollten ähnliche k-Werte aufweisen, um Kaltbereiche und damit das Erstarrung von Salz zu verhindern. Kommt es in Rohrleitung zu einer Verstopfung, kann sich die Lokalisierung schwierig gestalten und das Auftauen zu einer plastischen Durchmesserergrößerung führen (siehe Projekt MS-Store [27]).



**Abbildung 58: Rohrhalter mit Calciumsilikat Halterung und Rohrschelle. Übergang der Isolierungen wurde bei Installation nicht vollständig fertiggestellt.**

## **4.2.2 Verbindungstechnik**

### ***Flexible Rohrverbinder (REPAS)***

Flexible Rohrverbinder, die sogenannten REPAS (Rotation and Expansion Performing Assemblys), nehmen die Drehung der Nachführung um die Kollektorachse und die lineare

Längenausdehnung der Absorberrohre durch die thermische Ausdehnung auf. In kommerziellen Anlagen mit Thermoöl wird das meist mittels einer Drehdurchführung mit Graphitdichtungen realisiert, wohingegen REPAS aus flexiblen Schläuchen bestehen. In zahlreichen Fällen weisen die REPA nach einigen Jahren Betrieb Leckagen auf und der Austausch ist aufwendig. Bei Flüssigsalzanwendungen und Einsatztemperaturen über 400 °C ist von den Drehdurchführungen abzuraten. Alternativ kann eine Konstruktion aus mehreren Schläuchen der Nachführung gerecht werden. Es ist zu beachten, dass die Schläuche durch das Eigen- und Gewicht des Salzes durchhängen. Für eine erfolgreiche Drainage des Kollektorloops sollte stets auf eine horizontale Lage geachtet werden, damit es nicht zu Siphoneffekten kommt.

Ebenfalls wichtig für Drainagen und die Befüllung von Kollektorloops ist eine Beheizung der REPAS und deren Dämmung. Aktuelle Prototypen greifen auf MI-Kabel oder Impedanzheizungen zurück. Da MI-Kabel anfällig auf Bewegung reagieren bleibt deren Langlebigkeit umstritten. Die Impedanzheizung hat sich als sehr aufwändig erwiesen, da Transformatoren und Verkabelung mit großen Querschnitten installiert und nachgeführt werden müssen. Außerdem stellt die elektrische Isolation hohe Anforderungen an die vollständige Kollektor- und Stützstruktur, sodass beim Einsatz von Impedanzheizungen hohe Investitionskosten entstehen.

Hier wird ein Potenzial für eine konsequente Weiterentwicklung und Qualifizierung gesehen, weil im Schadensfall ein Austausch des gesamten REPA erfolgt. REPA für Flüssigsalz sind weniger komplex herzustellen als kommerzielle Drehdurchführungen, weshalb der Marktzugang einfacher ist. Das kann zur Marktdiversifizierung und damit zur Senkung der derzeit hohen Komponentenkosten führen.

### ***Flanschverbindungen***

Flanschverbindungen werden bei Flüssigsalzanwendungen häufig durch Schweißverbindungen ersetzt, da mit klassischen Dichtungen Leckagen drohen. Die getesteten metallischen Dichtungen aus Reinstnickel haben auch bei extremen Temperaturänderungsraten keine Leckagen verursacht. Allerdings ist das Drehmoment der Schraubenbolzen entscheidend für die Dichtigkeit, ebenso wie die Abbildung der etwa 20.000 thermischen Zyklen auf die Schraubenverbindung.

Die Reinstnickeldichtungen sind aber recht teuer und die Flanschoberflächen müssen bearbeitet werden, weshalb Flansche wohl auch zukünftig nur in reduziertem Umfang und an strategisch sinnvollen Positionen eingesetzt werden.

### **4.2.3 Salzventile**

Salzventile sind eine wesentliche und kritische Komponente in solarthermischen Kraftwerken, dessen Design anspruchsvoll ist. Sie sind normalerweise in die Rohrleitungen eingeschweißt und der Austausch wird, neben den hohen Ventilkosten, schnell aufwendig und ist mit Stillstandzeiten verbunden. Daher bevorzugen Anlagenbauer möglichst wartungsarme Ventile, welche keine zusätzlichen Drainagen notwendig machen. Im Falle von linienfokussierenden Kollektoren kommt hinzu, dass möglichst überhaupt kein Austausch von Dichtungen/Packung über die Lebenszeit von 20 bis 25 Jahren notwendig sein soll. Gerade für Ventile bei denen Graphitpackungen eingesetzt werden, ist ein regelmäßiger Austausch aufgrund der chemischen Reaktionen mit dem Flüssigsalz notwendig. Empfehlenswert ist daher der Einsatz von Rückdichtungen, sodass keine Leckage nach außen auftritt, sobald das Ventil voll geöffnet oder voll geschlossen ist. Durch den Einsatz eines Faltenbalgs können regelmäßige Packungstausche vermieden und hohe Zyklenzahlen realisiert werden. Das führt allerdings zu einem etwa 30% höherer CAPEX für die Komponenten. Die kombinierten

Ergebnisse von TK1 und TK2 lassen schlussfolgern, dass Durchgangsventile ohne Faltenbalg eher für einen Betrieb mit weniger Betätigungen geeignet sind.

Allgemein hat sich die Abdichtung der Ventile nach außen als Schwierigkeit erwiesen, wenn keine Faltenbälge eingesetzt werden, da das Packungsmaterial chemisch angegriffen oder abgerieben werden kann. Zweiteres steht im engen Zusammenhang mit der Begleitheizung der Ventile, gerade im Dicht- und Spindelbereich. Ist die Beheizung und Dämmung zu gering dimensioniert oder falsch installiert kann es bei den unteren Einsatztemperaturen des Salzes zur Kristallisation im Ringspalt zwischen Packung und Spindel oder auch im Faltenbalg kommen (siehe Abbildung 59). Das solide Salz kann dann nachhaltigen Schaden an der Spindel, der Packung und dem Faltenbalg anrichten und zu Undichtigkeiten führen. Entscheidend ist daher die Temperaturmessung im kältesten Bereich der Spindeldichtung zu erfassen, um Kristallisation sicher ausschließen zu können. Über die Temperaturmessung mit Einbindung in die Anlagensteuerung kann sichergestellt werden, dass das Ventil ausreichend für den Betrieb vorgewärmt wurde. Ggf. können Gewährleistungsthemen im Feld besser ausgeräumt werden und dient der Absicherung für Ventilhersteller.

Hohe Fahrgeschwindigkeiten der Ventile verschlimmern das Schadensbild, daher empfiehlt sich für pneumatische Ventile eine Abluftdrossel um den Verschleiß zu verringern. Pneumatische Ventile sind günstiger und bei größeren Anlagen erforderlich. Allerdings muss die Druckluftversorgung gewährleistet werden, sodass bei Neuinstallationen bereits bei wenigen Ventilen, Pneumatikventile kostengünstiger sind.



**Abbildung 59: Undichtigkeit nach Beschädigung der Packung und Spindel durch solides Salz im Ringspalt (links). Gestauchter Faltenbalg mit solidem Salz in den Ringspalten des Kompensators (rechts).**

Eine überdimensionierte Heizung im Spindelbereich kann ebenfalls zu Schäden durch Überhitzung führen. Entscheidende Faktoren sind der thermische Kontakt der Heizungen, deren Design und Installation, sowie die Positionierung des Temperatursensors für die Regelung. Hat das Hezelement abschnittsweise oder auch vollständig den Kontakt zum Ventilkörper verloren oder ist der Abstand zwischen Windungen beim Hezelement zu gering, überhitzt der Mantel des Hezelements und wird porös (Abbildung 60). Dies gilt es beim Design und der Installation der notwendigen Beheizung zu berücksichtigen. Der Abstand zwischen Hezelementen und Messstelle sollte nicht zu groß sein, da es durch die thermische Trägheit zu einem verzögerten Regelverhalten und damit zur Überhitzung der Heizung kommen kann. Darüber hinaus sollte die Messstelle aussagekräftige Werte für die Durchwärmung des gesamten Ventilkörpers liefern können.

Neben Schäden an der Begleitheizung kann es gerade bei hohen Salzttemperaturen auch zur Überhitzung der Ventilantriebe kommen. Eine Kühlstrecke zwischen Dichtungsbereich und Antrieb sollte, ebenso wie die Dämmung der angeschlossenen Rohrstrecke, beim Design berücksichtigt werden. Gleichzeitig muss die Dämmung ausreichen um den Bereich der Spindeldichtung so zu isolieren, dass Kältebrücken vermieden werden.

Die Beheizung und Dämmung sollte vom Ventilhersteller klar definiert werden, gerade wenn bei der Beheizung auf das Begleitheizungssystem der angeschlossenen Rohre zurückgegriffen werden soll. Eine Planung der Verlegung der MI-Kabel, sowie der Dämmmanschetten sollten mindestens im Lieferumfang enthalten und zuvor getestet worden sein. Im Idealfall werden passende Heizmanschetten inklusive der Dämmung zum Ventil angeboten, das reduziert vermeidbare Defekte, den Wartungsaufwand und Gewährleistungsfragen. Auch die Installation und der Zusammenbau der Ventile sollte durch den Hersteller erfolgen damit sicherer Betrieb und Dichtigkeit gewährleistet werden.



**Abbildung 60: Defekte und poröse Ventilspindelheizung nach Überhitzung.**

## 4.2.4 Pumpen

Salzpumpen werden bereits heute in kommerziellen Parabolrinnenkraftwerken mit Flüssigsalz Wärmespeichern erfolgreich eingesetzt. Obwohl gelegentlich von kleineren Leckagen im Packungsbereich (siehe Abbildung 61) oder Überhitzung der Lager bei hohen Salzttemperaturen berichtet wird, ist das Entwicklungspotenzial gering.



**Abbildung 61: Salzleckage durch den Ringspalt zwischen Packung und Antriebswelle.**

## 4.2.5 Receiverrohre

Receiver für Flüssigsalz sind für Parabolrinnenkraftwerke und Solartürme kommerziell verfügbar. Dabei können sich Designs gerade bei Solartürmen erheblich unterscheiden. Die Optimierung und Qualifizierung von Receivern wird schon längere Zeit in zahlreichen Projekten behandelt und daher an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt (siehe z.B. Projekte HPMS, HPMS2).

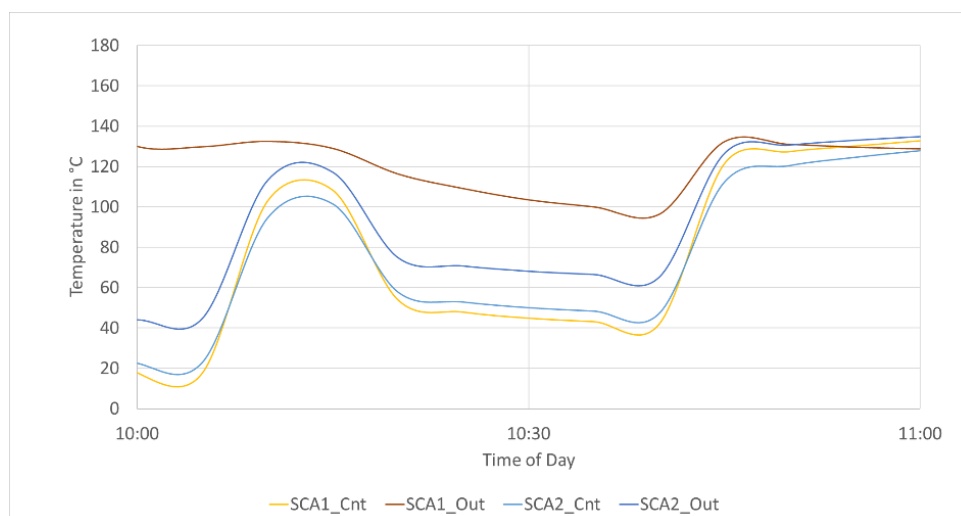
Empfehlungen erfolgen lediglich für die Beheizung der Receiver, um beim Befüllen und insbesondere Entleeren eine Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur der verwendeten Salzmischung zu gewährleisten. Dies ist vor allem in Parabolrinnen und Fresnelkollektoren, aufgrund der langen etwa 700 m bis 800 m langen Kollektor-Loops, relevant. Es gibt dabei die folgenden Ansätze zur Erwärmung der leeren Rohrleitungen:

- Impedanzheizung
- Solare Vorwärmung
- Heißluft oder andere Vorwärmmedien

Bei der Impedanzheizung wird eine Spannung an die Receiverrohre angelegt, sodass über den Widerstand der Receiverrohre eine gleichmäßige Erwärmung resultiert. Das Spannungsniveau wird im Bereich der maximalen Berührungsspannung, also  $< 50\text{ V}$  ausgeführt, um das Risiko von Unfällen zu reduzieren. Immerhin muss das gesamte beheizte Rohrleitungssystem elektrisch von der Stahlstruktur isoliert werden, um Fehlströme zu vermeiden. Durch Nässe oder fehlerhafte Isolierung können Ströme ungewollt durch die Struktur abfließen und zu Erosion an den Kontaktstellen führen. Die Fehlersuche gestaltet sich aufgrund der vielen Möglichkeiten und Einflüsse als schwierig. Außerdem führt das geringe Spannungsniveau zu erheblichen notwendigen Stromstärken von  $\sim 500\text{ A}$  pro Kollektor. Die sich ergebenden Kabelquerschnitte sind aufwändig in der Verlegung und auch Schaltanlagen und Transformatoren erfordern hohe Investitionen. Eine Impedanzheizung zur Vorwärmung von Receivern scheint demnach nur als mobile Beheizungslösung sinnvoll, wobei der apparative Aufwand zur synchronen Vorwärmung von Solarfeldern hoch ist.

Untersucht wird derzeit eine solare Vorwärmung, welche den Receiver durch gezielte Bestrahlung auf die gewünschte Temperatur vorwärmt. Dazu können die Kollektoren in gewissen Zeitintervallen partiell fokussiert werden. Auch der Einsatz von Sekundärreflektoren und einfacher Sonne ist möglich. Allerdings befindet sich die solare Vorwärmung noch in der Erforschung und muss erprobt werden.

Ein besonderes Augenmerk ist auf die Temperaturmessung an Ein- und Austritt eines Kollektors zu legen. Sie wird im regulären Betrieb in der Regelung der Kollektortemperaturen verwendet. Allerdings dienen die Fühler auch bei entleerten Receiverrohren zur Überprüfung, ob die Temperaturen ausreichend hoch über der Gefrieretemperatur des Salzes liegen. Die Temperaturmessung der Receiver ist mit den in Kraftwerken üblichen Temperaturfühlern in Eintauchhülsen schwierig und die Messunsicherheit hoch. Temperatursensoren in Eintauchhülsen haben in stehender Luft einen hohen Wärmeleitwiderstand, so dass die Wärmeabfuhr nach außen an die Umgebung das Signal stark beeinflusst. Die angezeigten Temperaturen unterschätzen die tatsächliche Rohrtemperatur leicht um einige  $10\text{ K}$  (Abbildung 62). Dies konnte bei Messungen mit verbessertem Wärmeübergang durch die Integration eines Heißluftgebläses auf der EMSP beobachtet werden. Nach dem Anschalten des Gebläses etwa um 10:35 Uhr homogenisieren sich die Temperaturen schnell auf einem um bis zu ca.  $80\text{ K}$  höheren Niveau.



**Abbildung 62: Sprung in der Temperaturanzeige nach Einschalten des Gebläses.**

Dieses Unterschätzen kann im Zweifel zur Nicht-Befüllung und damit Stillstandzeiten und Gewährleistungsfragen führen. Möglichkeiten zur Verbesserung wird beim Messkonzept gesehen. Auf der EMSP sind 3 mm starke PT-100 Temperaturfühler direkt im Absorberrohr (ohne Tauchhülse) im Einsatz. Aber auch dann beträgt der Unterschied zwischen gemessener und tatsächlicher Temperatur einige 10 K.

Ungeplante Drainagen in der Nacht bergen ein erhöhtes Risiko für partielle Einfrierungen, da es bei rein solarer Beheizung keine Beheizungsmöglichkeit gibt.

Ein weiterer Ansatz ist die Vorwärmung von Kollektor-Loops mit Salzrezeivern mittels Hilfsmedien wie Heißluft, Dampf oder Salz-Wasser-Lösungen. Aus den unterschiedlichen Medien ergeben allerdings verschiedene Herausforderungen. Bei Heißluft ist die Leistung aufgrund des Druckverlustes begrenzt und eine gleichmäßige Erwärmung über die Loop-Länge ist schwierig. Das Konzept ist aber mit geringem apparativem Aufwand verbunden und technisch simpel. Es verbleiben nach der Vorwärmung keine anderen Medien in der Leitung wie es beim Dampf der Fall sein kann. Konzepte mit Dampf sehen häufig eine mobile Einheit vor, da lokale Dampferzeuger teuer sind und als Druckgeräte Wartungsaufwand bedeuten. Zudem resultieren die notwendigen Dampftemperaturen, zum Beispiel für Solar Salz zwischen 250 °C und 275 °C in Systemdrücke zwischen 30 bar und 60 bar. Als Medium ist außerdem eine Salz-Wasser-Lösung denkbar, welche eine auch bei niedrigen Temperaturen flüssig und förderbar ist. Durch Austreiben des Wassers kann die Temperatur der Lösung immer weiter gesteigert werden, bis reines Salz in der Leitung zirkuliert. Dies ist auch als mobile Einheit denkbar, welche an den Loopabzweig angeschlossen und so mit der notwendigen Wärme zum Austreiben des Wassers versorgt werden kann. Den Ansatz mit Hilfsmedien die Vorwärmung zu erreichen, ist prinzipiell auch mit apparativem Aufwand verbunden. Dennoch birgt sie neben einer genaueren Temperaturmessung auch weitere Potenziale. Beispielsweise könnte Heißluft auch während einer ungeplanten Drainage kurzfristig eingesetzt werden, um den Loop beim Drainieren zu beheizen. Auch die Möglichkeit einer Wasserinjektion ins Flüssigsalz zur kurzfristigen Konservierung oder Unterstützung der Drainage durch Dampfbildung ist denkbar. Zusammenfassend ist die Beheizung von Receivern eine wesentliche Fragestellung für die Betriebssicherheit und Solarfeldkosten. Es gibt ein hohes Entwicklungspotenzial mit verschiedenen Ansätzen, welche sich derzeit in verschiedenen Phasen befinden und weiterverfolgt werden (siehe z.B. Projekt MSOpera [16]).

## 4.2.6 Instrumentierung

### *Durchflussmessung*

Bei der Durchflussmessung sind die hohen Salzttemperaturen problematisch und referenzierbare Sensoren bei hohen Temperaturen sind nicht verfügbar, so dass derzeit lediglich eine Kalibration mit Wasser erfolgen kann. Unterhalb von 450 °C sind verschiedene Messprinzipien verfügbar die gegenseitig abgeglichen werden können, so dass bei diesen Temperaturen die Genauigkeit höher ist. Daher werden Durchflussmessungen im kalten Vorlauf bzw. bei Dampferzeugern im Rücklauf von solarthermischen Kraftwerken mit Salzschnmelze verbaut. Eine Alternative mit Einsatztemperaturen bis 600 °C ist eine Ultraschallmessung mittels Clamp-On Methode. Die Tests und Erfahrungen zeigen deutlich, dass diese Messgeräte für den Einsatz im Flüssigsalzbereich vor dem Gebrauch korrekt eingestellt sein muss. Idealerweise sollte das Messgerät bereits bei der Anlieferung am Einsatzort korrekt eingestellt sein (Stichwort Kalibrierfaktoren), da im Betrieb vermutlich kein Referenzmessgerät zur Verfügung steht. Laut Herstellerangaben zur Folge ist eine Fehlertoleranz von etwa 5% denkbar. Eine geringere Toleranz ist aufgrund der vielen Einflussfaktoren nicht zu erwarten. Fehlerquellen sind z.B. die Maße der Rohrleitung, die

Temperaturmessung in der Nähe des Messgerätes, Stoffeigenschaften des Flüssigsalzes und der Kontakt des Ultraschallsensors auf der Rohroberfläche. Statt Pasten, die bei hohen Temperaturen austrocknen, ist der Einsatz von metallischen Blechen empfehlenswert. Da der Massenstrom zur Bilanzierung der Leistung bei der Anlagenabnahme eine wichtige Messgröße darstellt, sollte die Genauigkeit durch Entwicklung gesteigert werden.

### ***Salzdruckmessung***

Auch bei der Salzdruckmessung spielt die Temperatur die entscheidende Rolle, da die Sensormembranen nur bis 450 °C standardmäßig verfügbar sind. Abhilfe kann eine Kühlstrecke zwischen Rohrleitung und Membran oder ein stabiles Zwischenmedium (z.B. flüssiges Metall) schaffen, sodass kommerzielle Drucksensoren bis 600 °C verfügbar sind. Die Ausgestaltung der Kühlstrecke oder des Zwischenmediums sollte durch den Hersteller Salzdruckmessung erfolgen, da diese entscheidend für die Funktionalität ist.

### ***Füllstandmessung***

Bei der Füllstandsmessung kann auf Radarsensoren, Bubbler oder Level-Schalter zurückgegriffen werden. Bei Radarsensoren gibt es ähnliche Limitierung wie zuvor mit 450 °C und auch hier kann eine Kühlstrecke oder aktive Kühlung des Radarsensors Abhilfe schaffen. Bubbler sind auch für höhere Temperaturen verfügbar, allerdings muss die Lufteindüsung bei der Salzchemie berücksichtigt werden. Level-Schalter werden durch den geänderten Widerstand des Schalters bei Über- bzw. Unterdeckung mit Salz betätigt. Es erfolgt eine binäre qualitative Aussage für bestimmte Füllstandshöhen und ist auch für höchste Temperaturen verfügbar. Die Sensoren gerade im oberen Tankbereich haben sich allerdings als unsicher erwiesen (insbesondere die elektrische Isolierstrecke zwischen Elektrode und Gehäuse). Vermutlich ist das auf die enorme Kriech Eigenschaften des Salzes zurückzuführen.



## III Darstellung zur Verwertung und zum Fortschritt

### Erfolgte DLR Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Konferenzbänden

- Prenzel, M., et al. (2020). Component performance tests at DLR's TESIS:com molten salt test facility. 26th SolarPACES Conference. Online. Poster.
- Dicke, N., et al. (2021). Results of molten salt component tests with the TESIS:com facility. 27th SolarPACES Conference. Online. Poster.
- Bauer, T., et al. (2021). Durchflussmesstechnik für Flüssigsalz. Workshop: Durchfluss- und Wärmemessung bei hohen Temperaturen - Industrieller Bedarf und Praxis, Online, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).
- Dicke, N. C., et al. (2022). "Results of Molten Salt Valve and Flange Component Tests with the TESIS:com Facility." Submitted to AIP Conference Proceedings.
- DLR (2021). "MSComp - Komponententests für Flüssigsalzanwendungen." Retrieved 17.11.2021, from [https://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-11126/22730\\_read-70382/](https://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-11126/22730_read-70382/).

## IV Quellenverzeichnis

1. Welch, K.T., *Salt valve and instrumentation test using the nagle long shafted pump :final report*. 2013, Sandia National Laboratories: Albuquerque (NM), United Sates.
2. Rodriguez-Garcia, M.-M., M.E. Rojas, and M. Pérez, *Procedures for testing valves and pressure transducers with molten salt*. Applied Thermal Engineering, 2016. **101**: p. 139-146.
3. Bauer, T., C. Odenthal, and A. Bonk, *Molten Salt Storage for Power Generation*. Chemie Ingenieur Technik, 2021. **93**(4): p. 534-546.
4. Manenti, F. and Z. Ravaghi-Ardebili, *Dynamic simulation of concentrating solar power plant and two-tanks direct thermal energy storage*. Energy, 2013. **55**: p. 89-97.
5. Seitz, M., *Thermodynamische Simulation und Optimierung von Betriebszyklen bei solarthermischen Kraftwerken mit Flüssigsalzen als Wärmeträgermedien*. 2012, Augsburg University of Applied Sciences.
6. Bonk, A., M. Braun, et al., *Solar Salt – Pushing an old material for energy storage to a new limit*. Applied Energy, 2020. **262**: p. 114535.
7. Sötz, V.A., A. Bonk, and T. Bauer, *With a view to elevated operating temperatures in thermal energy storage - Reaction chemistry of Solar Salt up to 630°C*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020. **212**: p. 110577.
8. Montes, M.J., A. Abánades, and J.M. Martínez-Val, *Thermofluidynamic Model and Comparative Analysis of Parabolic Trough Collectors Using Oil, Water/Steam, or Molten Salt as Heat Transfer Fluids*. Journal of Solar Energy Engineering, 2010. **132**(2).
9. Grogan, D.C.P., *Development of Molten-Salt Heat Transfer Fluid Technology for Parabolic Trough Solar Power Plants - Public Final Technical Report*. 2013, Abengoa Solar, LLC: United States.
10. Wittmann, M., M. Schmitz, et al., *HPS2 – Demonstration of Molten-Salt in Parabolic Trough Plants – Design of Plant*. Vol. 2126. 2018.
11. Rodríguez-García, M.M., J.F. Andreu, and A. González-Cuesta, *Special valves for solar thermal power plants. Tests and designs*. AIP Conference Proceedings, 2019. **2126**(1): p. 160006.
12. Zavoico, A.B., *Solar Power Tower Design Basis Document, Revision 0*. 2001(SAND2001-2100).
13. Shininger, R., K. Kattke, et al., *Flexible hose interconnect testing for parabolic troughs with nitrate salt*. AIP Conference Proceedings, 2020. **2303**(1): p. 150014.
14. Shininger, R., K. Kattke, et al., *Flexible Hose Interconnect Testing for Parabolic Troughs with Nitrate Salt*. 2019, Solar Dynamics: Daegu, South Korea.
15. Giuliano, S., M. Puppe, et al., *HPMS - High Performance Molten Salt Tower Receiver System*. 2017: Stuttgart.
16. Krüger, D.R. *MSOpera*. [Last accessed on 15.06.2022]. Available from: [https://dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-9315/22254\\_read-64651/](https://dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-9315/22254_read-64651/).
17. Barth, D.L., J.E. Pacheco, et al., *Development of a High-Temperature, Long-Shafted, Molten-Salt Pump for Power Tower Applications*. Journal of Solar Energy Engineering, 2002. **124**(2): p. 170-175.
18. Frantz, C., M. Ebert, et al., *Experimental Receiver Setup of a High Performance Molten Salt Test Receiver System*. To be published in AIP Conference Proceedings 2022.
19. Badotherm. *High Temperature Diaphragm Seal - Measuring process pressure at 600 °C*. [Last accessed on 15.06.2022]. Available from: [https://www.badotherm.com/downloads/Badotherm\\_HTDS\\_6pager.pdf](https://www.badotherm.com/downloads/Badotherm_HTDS_6pager.pdf).

20. Verband der Chemischen Industrie e.V. *VCI-Infoblatt - Normung für Chemieunternehmen*. [Last accessed on 15.06.2022]. Available from: <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/220411-infoblatt-normung-fuer-chemieunternehmen.pdf>.
21. Mußmann, J.W. *Aktueller Stand der Normen im Rohrleitungsbau*. [Last accessed on 15.06.2022]. Available from: [https://www.mussmann.org/wp-content/uploads/2020/01/Normen%C3%BCbersicht-Rohrleitungsbau\\_13-01-2020.pdf](https://www.mussmann.org/wp-content/uploads/2020/01/Normen%C3%BCbersicht-Rohrleitungsbau_13-01-2020.pdf).
22. Höchst, T., *Leitfaden zur Montage von Flanschverbindungen in verfahrenstechnischen Anlagen*. 2016, Verband der Chemischen Industrie e. V.: Frankfurt, Germany.
23. ESA and FSA, *Wegweiser für eine sichere Dichtverbindung an Flanschen*. 2000: Wayne, PA, USA.
24. Oruch, T., K. Beckman, et al., *ASME B31.3 Process Piping Guide - Revision 2*. 2009, Los Alamos National Laboratory (LANL).
25. Walczak, M., F. Pineda, et al., *Materials corrosion for thermal energy storage systems in concentrated solar power plants*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. **86**: p. 22-44.
26. Endress+Hauser, *Proline Prosonic Flow P 500 with FlowDC function*.
27. Odenthal, C., A. Bonk, et al., *Flüssigsalzspeicher-Testanlage und neue Fluide (MS-Store)*. 2019, German Aerospace Center, Institute of Engineering Thermodynamics: Cologne.