

Konzeption und Implementierung von Messtechnik für die Überwachung der Drainage von Parabolrinnenanlage mit Salzschnelze

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science
im Studiengang <Maschinenbau>
an der Fakultät für <Anlagen, Energie- und Maschinensysteme>
der Technischen Hochschule Köln

vorgelegt von: Anas Martini
Matrikel-Nr.: 11140002
E-Mail: anas.martini@smail.th-koeln.de

eingereicht bei: Prof. Dr. Patrick Tichelmann
Zweitgutachter: M.Sc. Niklas Dicke

Köln, 11.09.2025

Erklärung

Ich versichere, die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer oder der Verfasserin/des Verfassers selbst entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für die Arbeit benutzt habe, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Anmerkung: In einigen Studiengängen findet sich die Erklärung unmittelbar hinter dem Deckblatt der Arbeit.

Köln, 11.09.2025

Ort, Datum



Unterschrift

Abstract

Salzschmelzen stellen ein vielversprechendes Wärmeträger- und Speichermedium für Parabolrinnenanlagen dar, da sie bis etwa 600 °C drucklos in Tanks gelagert werden können, kostengünstig verfügbar sind und aufgrund ihrer hohen Dichte eine effiziente Energiespeicherung ermöglichen. Gleichzeitig führt ihr hoher Schmelzpunkt von 135 °C bis 240 °C zu erheblichen betrieblichen Herausforderungen, da eine Erstarrung in den Receiverrohren unbedingt vermieden werden muss. Um dies sicherzustellen, kann die Salzschmelze während der Nachtstunden oder in Phasen ohne Sonneneinstrahlung in beheizte Drainagetanks entleert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Messtechnik entwickelt, die eine zuverlässige Überwachung des Füllstands der Receiverrohre ermöglicht und damit den Drainagefortschritt sichtbar macht. Darüber hinaus erlaubt sie im Fall einer Erstarrung die Lokalisierung des betroffenen Bereichs im bis zu 700 m langen Kollektorloop. Zur Untersuchung wurden verschiedene Messtechnologien evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Dehnungsmessstreifen eine geeignete Methode zur Füllstandserfassung darstellen.

Auf dieser Grundlage wurde ein Messkonzept für die HPS2-Anlage¹ entwickelt, das mithilfe industrieller Verstärkersysteme eine präzise und zuverlässige Überwachung des gesamten Solarfelds erlaubt. Aufgrund der hohen Kosten eignet sich dieses Konzept primär für wissenschaftliche Fragestellungen. Für kommerzielle Anwendungen wurde ergänzend eine kostengünstige, Arduino-basierte Lösung erarbeitet, die im Rahmen dieser Arbeit getestet, jedoch noch nicht für den Einsatz im Feld ausgereift ist.

¹Die HPS2-Anlage ist eine 3,5 MW_{th} Demonstrationsanlage aus dem HPS2-Forschungsprojekt auf der Évora Molten Salt Platform, die gemeinsam durch das DLR und die Universität Évora betrieben wird.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Glossar	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Hintergrund	2
1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung	3
1.3. Das Institut für Solarforschung des DLR	4
1.4. Aufbau der Arbeit	5
2. Theoretische Grundlagen	7
2.1. Konzentrierende Solarsysteme (CSP)	8
2.2. HPS2-Anlage in Évora Molten Salt Platform (EMSP)	12
2.3. Salzschnelze als Wärmeträger	15
2.4. Aufbau und Funktion der Receiverrohre	17
2.5. Drainageprozess in Receiverrohren solarthermischer Parabolrinnenanlagen	19
2.6. Analyse marktverfügbarer Füllstandssensorik	22
2.7. Messtechnologien zur Füllstandserfassung der Feldverrohrung an der HPS2-Anlage	26
3. Entwicklung geeigneter Messtechnik zur Drainageüberwachung	29
3.1. Anforderung an die Messtechnik	30
3.2. Auswahl der Sensorik für Drainage-Überwachung	31
3.3. Ziel, Aufbau und Durchführung der Vorversuche	33
3.3.1. Infrarotkamera	33
3.3.2. Thermoelemente	36
3.3.3. Dehnungsmessstreifen	39

4. Bewertung der Vorversuchsergebnisse und Auswahl geeigneter Messtechnologien	46
4.1. Analyse der Messergebnisse und Bewertung der Messtechnologien . . .	47
4.1.1. Infrarotkamera	47
4.1.2. Thermoelemente	49
4.1.3. Dehnungsmessstreifen	51
4.2. Vergleich und Bewertung der Messtechnologien	52
5. Vertiefende Untersuchung und Optimierung der ausgewählten Messtechnologie	54
5.1. Signalsoptimierung durch Spannungsanalyse	55
5.2. Quantitative Füllstandserfassung unter Variation der Masse	56
5.3. Simulation eines Drainagevorgangs	58
6. Konzeption und Auslegung des finalen Messsystems	60
6.1. Berechnung der Mindestanzahl an Messstellen für die Überwachung der HPS2-Anlage	61
6.2. Systemarchitektur und Komponenten	62
6.3. Planung der Messtechnik-Integration im Solarfeld	65
6.4. Wirtschaftlichkeit / Kostenabschätzung des finalen Messkonzepts . . .	66
7. Arduino-basierte Lösung für kommerziellen Anlagen	68
7.1. Beschreibung der eingesetzten Komponenten	69
7.2. Elektrische Verschaltung der eingesetzten Komponenten	70
7.3. Durchführung und Auswertung einer Beispielmessung	72
7.4. Zusammenfassung und Bewertung der Arduino-basierten Lösung . . .	73
8. Fazit und Ausblick	75
8.1. Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse	76
8.2. Ausblick auf zukünftige Arbeiten	77
Literatur	79
Anhang	85
A. Rohrleitungs- und Sensorplan des Salzkreislaufs an der EMSP	86
B. Arduino-Sketch zur Gewichtserfassung	87

Tabellenverzeichnis

2.1. Vergleich kommerzieller Füllstandsmessverfahren	25
3.1. Anforderungen an die Messtechnik zur Drainageüberwachung	31
3.2. Technologischer Eignungsvergleich gängiger Messverfahren zur Drainageüberwachung	32
3.3. Potentielle Korrelation zwischen Füllstand und physikalischen Größen	32
4.1. Qualitativer Vergleich der Messtechnologien zur Drainageüberwachung	53
6.1. Stückliste der Komponenten für das finale Messsystem	64

Abbildungsverzeichnis

2.1. Schematische Darstellung der Funktionsweise von Solarturmkraftwerken	8
2.2. Schematische Darstellung der Funktionsweise von Dish-Stirling-Systemen	9
2.3. Schematische Darstellung der Funktionsweise von Linearen Fresnel-Kollektoren	10
2.4. Schematische Darstellung der Funktionsweise von Parabolrinnenanlagen	11
2.5. Industrielle Einsatzfelder solarthermischer Systeme	12
2.6. Luftaufnahme der HPS2-Demonstrationsanlage auf dem Gelände der EMSP	13
2.7. Übersicht über den Prozessablauf des Salzkreislaufs	15
2.8. Receiverrohr mit auskristallisiertem Salz infolge einer mangelhaften Drainage	17
2.9. Schematischer Aufbau eines Receiverrohrs für Parabolrinnenkollektoren	18
2.10. Flexible REPA-Verbindungsschläuche zur Anbindung der Receiverrohre in der HPS2-Anlage (EMSP)	20
2.11. Schematische Darstellung des Drainage-Prozesses an der HPS2-Anlage	21
2.12. Übersicht der wichtigsten Technologien für Füllstandsmessung	23
2.13. Füllstandserfassung vom Drainagetank bei einer erfolgreichen Drainage	26
2.14. Temperaturverläufe der Thermoelemente während der Drainage (SCA1, SCA2, SCA3)	27
3.1. Visualisierung eines halb mit Salzschnmelze gefüllten Stahlrohrs	34
3.2. Nachgestellter Versuchsaufbau zur IR-Messung mit handelsüblicher Digitalkamera	35
3.3. Schematische Darstellung des Versuchsaufbau der Temperaturmessung mit Thermoelementen	37
3.4. Aufbau der Versuchsanordnung zur Detektion des Temperaturprofils im Receiver mit Thermoelementen	39
3.5. Verwendete Messausrüstung zur Durchführung der DMS-Messreihe	40
3.6. Schrittweise Installation eines Dehnungsmessstreifens auf dem HCE-Support der SOPRAN-Anlage	42
3.7. Aufbau der Versuchsanordnung zur Detektion der gewichtsabhängigen Dehnung im HCE-Support mittels DMS	44
3.8. Schematische Darstellung der Anschlussklemmen des ClipX sowie deren Anbindung an Netzteil und DMS	45

4.1.	Messergebnisse der Vorversuche – Messreihe Infrarot	47
4.2.	Infrarot-Thermografie des Receiverrohrs in einer Parabolrinnenanlage auf der Plataforma Solar de Almería (PSA)	48
4.3.	Messergebnisse der Vorversuche - Messreihe Thermoelemente	50
4.4.	Messergebnisse der Vorversuche – Messreihe Dehnungsmessstreifen . . .	51
5.1.	Spannungsanalyse des HCE-Supports mit markierter Messstelle	55
5.2.	Messung zwischen Voll- und Leerezustand an der durch die FEM- Analyse identifizierten Messstelle	56
5.3.	Signalverlauf bei Belastung des HCE-Supports mit unterschiedlichen Massen	57
5.4.	Signaländerung am HCE-Support während des Ablaufs von Wasser aus einem 20 kg Beutel	58
6.1.	Schematische Darstellung einer Loop-Hälfte der HPS2-Anlage mit 350 m Länge der verschweißten Receiverrohre und dem Gefälle von 0,15 % . . .	61
6.2.	Systemarchitektur und Komponenten des finalen Messsystem	63
6.3.	Integration der Messstellen im Loop der HPS2-Anlage gemäß dem entwickelten Messkonzept	65
7.1.	Schaltbild der Wheatstone-Hablbücke mit DMS	70
7.2.	Beispielhafte Verschaltung des Load Cell Click-Moduls mit dem ESP32	71
7.3.	Aufgezeichnetes Messsignal der Spannungsdifferenz der Arduino-basierten Lösung während der Belastung des HCE-Supports mit 20 kg	72
A.1.	Rohrleitungs- und Instrumentierungsschema der HPS2-Anlage	86

Glossar

Brennlinie Fokussierte Linie, entlang der ein Receiverrohr in Parabolrinnenanlagen positioniert ist. Die gebündelte Sonnenstrahlung trifft dort auf das Rohr und erhitzt das darin zirkulierende Wärmeträgermedium. 10

Drainagetank Beheizter Behälter zur Aufnahme der Salzschnelze aus den Receiverrohren während der Drainage. 2

Drainieren Bezeichnet in solarthermischen Anlagen den kontrollierten Prozess des Ablassens der flüssigen Salzschnelze aus den Receiverrohren in den Drainagetank mittels Schwerkraft. 2

Heliostat Motorisch gesteuerter Spiegel, der Sonnenlicht auf einen festen Punkt reflektiert, um Energie in solarthermischen Anlagen zu konzentrieren, welcher zweiachsig nachgeführt ist. 4

REPA-Schläuche (Rotation and Expansion performing assembly) Flexible Verbindungselemente in solarthermischen Parabolrinnenanlagen. 20

Receiverrohre Bauteile in einer Parabolrinnenanlage, die die Solarstrahlung absorbieren und in Wärme umwandeln. 2

Stromgestehungskosten Kosten zur Erzeugung einer Kilowattstunde Strom, inklusive aller Investitions- und Betriebskosten. 2

Abkürzungsverzeichnis

CSP Concentrated Solar Power. 8

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. 2

EMSP Évora Molten Salt Platform. 2

FEM Finite-Elemente-Methode. 55

HPS2 High Performance Solar 2. 2

LCoE Levelized Cost of Electricity (Stromgestehungskosten). 2

PSA Plataforma Solar de Almeria (Spanien). 4

PTC Parabolic Trough Collectors. 10

SCA Solar Collector Assembly. 13

SPOT Solar Preheating and Drainage of Parabolic Troughs. 2

UÉ Universität Évora. 2

1. Einleitung

„There is enough energy from the sun hitting the Earth every hour to power all of humanity for an entire year.“ – Dr. Steven Chu.

Kapitel 1 erläutert die Beweggründe und Zielsetzung der Arbeit, stellt die beteiligte Forschungseinrichtung vor und gibt einen Überblick über den Aufbau der Ausarbeitung

1.1. Motivation und Hintergrund

Die vorliegende Arbeit ist eingebettet in das Forschungsprojekt SPOT (Solar Preheating and Drainage of Parabolic Troughs), eine Kooperation zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Industriepartnern und der Universität Évora (UÉ) in Portugal. Dort betreiben das DLR und die UÉ eine einzigartige Forschungsplattform für die Entwicklung und Demonstration von Salzschnmelzetechnologien im Megawatt-Maßstab. Das Projekt SPOT ist dabei nur ein Projekt, welches die Infrastruktur der Évora Molten Salt Platform (EMSP) nutzt. Die wesentlichen Komponenten der Salzinfrastuktur wurden im Rahmen des High Performance Solar 2 (HPS2) Projektes aufgebaut und demonstriert. Ziel der Forschungsplattform ist die Weiterentwicklung solarthermischer und weiterer Salzschnmelze-Technologien zur nachhaltigen Energiegewinnung, wobei insbesondere die sichere und effiziente Handhabung vom Wärmeträger-Nitratsalz im Fokus steht.^[7]

Das am häufigsten in solarthermischen Anlagen eingesetzte Salz ist eine binäre Mischung aus Natriumnitrat (NaNO_3) und Kaliumnitrat (KNO_3), die unter der Bezeichnung Solarsalz bekannt ist.^[44] Dieses Wärmeträgermedium zeichnet sich durch eine hohe Wärmekapazität aus und eignet sich besonders für den Einsatz in solarthermischen Kraftwerken. Eine höhere Betriebstemperatur des Solarsalzes bei sehr geringem Dampfdruck führt zu einem verbesserten Wirkungsgrad und somit zur Senkung der *Stromgestehungskosten* (LCoE).^[6] Aufgrund seiner vergleichsweise hohen Erstarrungstemperatur ergeben sich jedoch spezifische Anforderungen an die thermische Betriebsführung der Anlage – insbesondere beim Ablassen (*Drainieren*) der Salzschnmelze aus den Rohrleitungen und *Receiverrohren*.^[9]

Beim Drainieren wird das flüssige Salz durch Schwerkrafteinwirkung aus den Rohrleitungen in einen speziell dafür vorgesehenen Auffangbehälter – den sogenannten *Drainiagetank* – abgelassen. Eine unvollständige Entleerung birgt das Risiko, dass Salzreste im Rohrsystem erstarren. Dies kann nicht nur Funktionsstörungen und Anlagenausfälle verursachen, sondern auch zu gravierenden Schäden an Systemkomponenten führen. Vor diesem Hintergrund ist eine zuverlässige Überwachung des Füllstands der Rohrleitungen während des Drainageprozesses von zentraler Bedeutung.^[17]

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Technologien zur Füllstandsüberwachung in Receiverrohren solarthermischer Anlagen untersucht. Dabei werden unterschiedliche Messprinzipien betrachtet. Es wird ein Messkonzept entwickelt und getestet, das eine kosteneffiziente und robuste Lösung zur Drainageüberwachung bietet und somit einen wesentlichen Beitrag zur Betriebssicherheit leisten kann.

1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Für hoch effiziente Parabolrinnenanlagen stellt Salzschnmelze ein vielversprechendes Wärmeübertragungsmedium dar und bietet eine Alternative zum herkömmlichen Thermoöl. Ein wesentlicher Vorteil liegt in der höheren Betriebstemperatur von bis zu 565°C , während Thermoöl ab etwa 400°C thermisch instabil wird. Dies führt zu einem höheren thermischen Wirkungsgrad der Stromerzeugung, reduziert die Kosten für Wärmespeicher und macht den gesamten Ölkreislauf einschließlich Wärmetauscher überflüssig. In der Folge können die Stromgestehungskosten (LCoE) um bis zu 20% gesenkt werden.^[5]

Trotz dieser Vorteile bringt der Einsatz von Salzschnmelze auch Herausforderungen mit sich. Neben der Korrosivität des Mediums stellt insbesondere der hohe Schmelzpunkt von bis zu 240°C ein Risiko in Bezug auf das ungewollte Erstarren in Rohrleitungen oder Tanks dar. Unkontrolliertes Erstarren des Salzes kann zu Schäden an den Komponenten führen und die gesamte Anlage stilllegen. Um dies zu verhindern, müssen die Rohrleitungen bei längeren Stillstandszeiten, Reparaturen oder Notfällen kontrolliert entleert (drainiert) werden. Dieser Prozess muss in einem kilometerlangen Netz aus Rohrleitungen sorgfältig überwacht werden, um sicherzustellen, dass sich keine Verstopfungen bilden.^[5]

Derzeit erfolgt die Überwachung im Wesentlichen über die gemessenen Temperaturen in den Rohrleitungen, die Rückschlüsse auf den Befüllungsgrad der Rohrleitungen erlauben. Sinkt die gemessene Temperatur stark ab, deutet dies darauf hin, dass der Sensor nicht mehr im direkten Kontakt mit der Salzschnmelze steht. Dieses Messverfahren liefert allerdings nur punktuelle und qualitative Information und ist stark von der Sensorposition und Sensorart abhängig.^[17]

Ziel dieser Arbeit ist demnach die Entwicklung und Implementierung eines Messverfahrens, das ein quantitatives Monitoring des Drainageprozesses ermöglicht. Damit soll erkannt werden, ob der Drainagevorgang vollständig abläuft und an welchen Stellen im Rohrsystem sich potenziell kritische Salzreste sammeln.

Forschungsfrage: Neben den eingesetzten Temperatursensoren zur Überwachung des Drainageprozesses in Parabolrinnenanlagen mit Salzschnmelze, besteht eine signifikante Forschungslücke bezüglich der automatisierten und präzisen Erfassung der verbleibenden Salzschnmelze in den komplexen Rohrsystemen. Insbesondere fehlen umfassende Ansätze zur Auswahl und Integration von Sensorik und der Datenanalyse, zur Bewertung des Drainageprozesses und für die frühzeitige Identifikation von potenziellen Erstarrungsrisiken.

Die Arbeit konzentriert sich daher auf die Entwicklung von innovativen Überwachungssystemen, die in der Lage sind, Echtzeitdaten zu liefern, um die

Betriebssicherheit und das Verständnis über die Drainage von Parabolrinnenanlagen mit Salzschnmelze signifikant zu erhöhen. Als Teil der Arbeit wird daher ein Konzept für geeignete Messtechnik entwickelt, das anschließend an einer relevanten Testanlage des DLR implementiert und getestet wird.

1.3. Das Institut für Solarforschung des DLR

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt sowie für Energie- und Verkehrsforschung. Mit rund 11.180 Mitarbeitenden an mehr als 30 Standorten ist das DLR eine der führenden Forschungseinrichtungen in Europa. Es vereint Grundlagenforschung, angewandte Forschung und Entwicklung und agiert als Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.^[8]

Das DLR gliedert sich in verschiedene Institute und Einrichtungen, die sich jeweils auf spezielle Forschungsgebiete konzentrieren. Eines dieser Institute ist das Institut für Solarforschung, das eine zentrale Rolle in der Entwicklung nachhaltiger Energietechnologien einnimmt.^[10]

Das Institut für Solarforschung hat seinen Hauptsitz in Köln-Porz und unterhält weitere Standorte in Jülich, Stuttgart, Oldenburg sowie in Almería (Spanien). Es widmet sich der Erforschung und Entwicklung konzentrierender solarthermischer Technologien zur umweltfreundlichen Erzeugung von Strom, Wärme und synthetischen Brennstoffen.^[10]

Ein Schwerpunkt liegt im großtechnischen Testen unter realistischen Bedingungen: Am Standort Jülich betreibt das Institut den Solarturm Jülich, Deutschlands einzige solarthermische Versuchsanlage dieser Art, ausgestattet mit zwei Solartürmen und über 2000 *Heliostat* zur Erzeugung von Temperaturen bis zu 700 °C.^[14] Zusätzlich wird die Plataforma Solar de Almería (PSA) genutzt, Europas größte Versuchsanlage für konzentrierte Solartechnik, um optische Systeme und Komponenten unter realen Sonnenbedingungen zu erforschen.^[15]

Darüber hinaus entwickelt das Institut innovative Messtechnik und Analyseverfahren zur Zustandsüberwachung und Qualitätssicherung solarthermischer Kraftwerke. Zu den Kernkompetenzen zählen die Inspektion von Heliostaten mittels Drohnen, Energiemeteorologie und die Bewertung von Gebäudesystemen. Damit spielt das Institut eine Schlüsselrolle bei der Weiterentwicklung von Parabolrinnenanlagen und anderen konzentrierten Solarsystemen.^[12]

Als Bindeglied zwischen Grundlagenforschung und industrieller Anwendung unterstützt das Institut Industriepartner bei der Umsetzung und Markteinführung neuer Technologien. Mit etwa 140 wissenschaftlichen Mitarbeitenden trägt es maßgeblich zur Wärmewende und zur Dekarbonisierung industrieller Energiesysteme bei.^[11]

1.4. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in acht Kapitel gegliedert, die systematisch die Untersuchung und Entwicklung von Messtechnik zur Drainageüberwachung in solarthermischen Parabolrinnenanlagen mit Salzschnelze behandeln.

Nach der Einleitung in Kapitel 1, in der Motivation, Zielsetzung und die beteiligte Forschungseinrichtung vorgestellt werden, werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen erläutert. Hierbei werden die Funktionsweise konzentrierender Solarsysteme, die Eigenschaften von Salzschnelzen als Wärmeträger sowie die technischen Rahmenbedingungen der HPS2-Anlage behandelt.

Kapitel 3 beschreibt die Entwicklung geeigneter Messtechnik zur Drainageüberwachung. Dazu gehören die Definition der Anforderungen und der experimentelle Aufbau der Vorversuche mit verschiedenen Sensorprinzipien. Aufbauend darauf werden in Kapitel 4 die Ergebnisse der Vorversuche ausgewertet, die Messdaten analysiert und die Eignung der unterschiedlichen Messtechnologien für die Drainageüberwachung systematisch verglichen, um eine fundierte Auswahl zu treffen.

Kapitel 5 widmet sich der vertiefenden Untersuchung und Optimierung der ausgewählten Messtechnologie. Hierbei werden optimale Messstellen identifiziert, Füllstandsmessungen unter variierenden Bedingungen durchgeführt und Drainagevorgänge simuliert, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messtechnik zu maximieren.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird in Kapitel 6 das finale Messsystem konzipiert und ausgelegt. Es werden die Mindestanzahl an Messstellen bestimmt, die Systemarchitektur erläutert und die Integration der Messtechnik im Solarfeld beschrieben. Ergänzend wird eine Wirtschaftlichkeits- und Kostenabschätzung durchgeführt.

Kapitel 7 stellt eine Arduino-basierte Lösung für den Einsatz in kommerziellen Solarfeldern vor. Dabei werden die eingesetzten Komponenten, die Verschaltung, Signalverarbeitung und Datenübertragung beschrieben sowie exemplarische Messdaten ausgewertet. Abschließend erfolgt eine Bewertung der Lösung hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile sowie Optimierungsmöglichkeiten.

Das abschließende Kapitel 8 fasst die zentralen Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungs- und Entwicklungsperspektiven.

Im Anhang sind ergänzende Materialien technische Dokumentationen und Programmcode für die Arduino-basierte Lösung zusammengefasst.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Funktionsweise konzentrierender Solarsysteme, die Eigenschaften von Salzschnelzen als Wärmeträger sowie die technischen Rahmenbedingungen der untersuchten Anlage erläutert.

2.1. Konzentrierende Solarsysteme (CSP)

Konzentrierende Solarsysteme (Concentrated Solar Power, CSP) nutzen reflektierende optische Komponenten zur Bündelung der direkten Sonnenstrahlung auf einen Absorber, der dadurch auf hohe Temperaturen erhitzt wird. Diese Wärme wird anschließend in einem thermodynamischen Kreisprozess – typischerweise durch Dampferzeugung – in elektrische Energie umgewandelt. Im Gegensatz zu photovoltaischen Systemen, die auf direkter Licht-Strom-Wandlung beruhen, erlaubt die CSP-Technologie eine thermische Energiespeicherung und somit auch eine Stromerzeugung bei geringer Einstrahlung oder nach Sonnenuntergang.^[46]

Die wesentlichen CSP-Technologien lassen sich in vier Hauptsysteme unterteilen: Parabolrinnenanlagen, Solarturm-Kraftwerke, lineare Fresnel-Kollektoren sowie Dish-Stirling-Systeme.^[37]

- **Solarturm-Anlagen (Solar tower):** Solarturmkraftwerke verwenden ein Feld aus Heliostaten, um direkte Sonneneinstrahlung auf einen zentralen Receiver an der Turmspitze zu konzentrieren. In diesem Absorber wird ein Wärmeträgermedium – geschmolzenes Salz – auf Temperaturen von über 750 °C erhitzt. Die resultierende Hochtemperaturwärme wird in einem thermischen Zwei-Tank-Speichersystem zwischengespeichert. Bei Energiebedarf durchläuft das Medium einen Wärmetauscher zur Dampferzeugung, dessen Dampf eine Turbine zur Stromerzeugung antreibt.^[32]

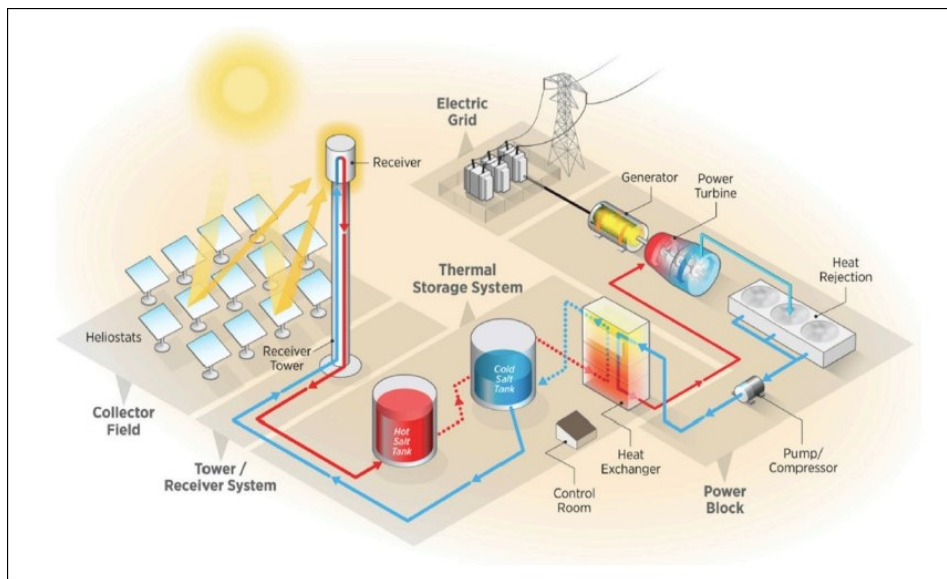


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung der Funktionsweise von Solarturm-Kraftwerken^[32]

- **Dish-Stirling-Systeme (Dish Stirling):** Dish-Stirling-Systeme verwenden parabolisch geformte Spiegel (Dishes), die die direkte Sonneneinstrahlung auf einen Stirling-Motor im Brennpunkt konzentrieren. Der Stirling-Motor wandelt die Wärme direkt in mechanische Energie um, welche anschließend über einen Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. Diese Systeme sind auf einer zweiachsigen Nachführung montiert, die den Spiegel so ausrichtet, dass das Sonnenlicht stets optimal auf den Motor fokussiert wird. Dadurch zeichnen sich Dish-Stirling-Systeme durch eine hohe thermische Effizienz aus, da die Wärme direkt und verlustarm in mechanische Energie umgewandelt wird.^[29]

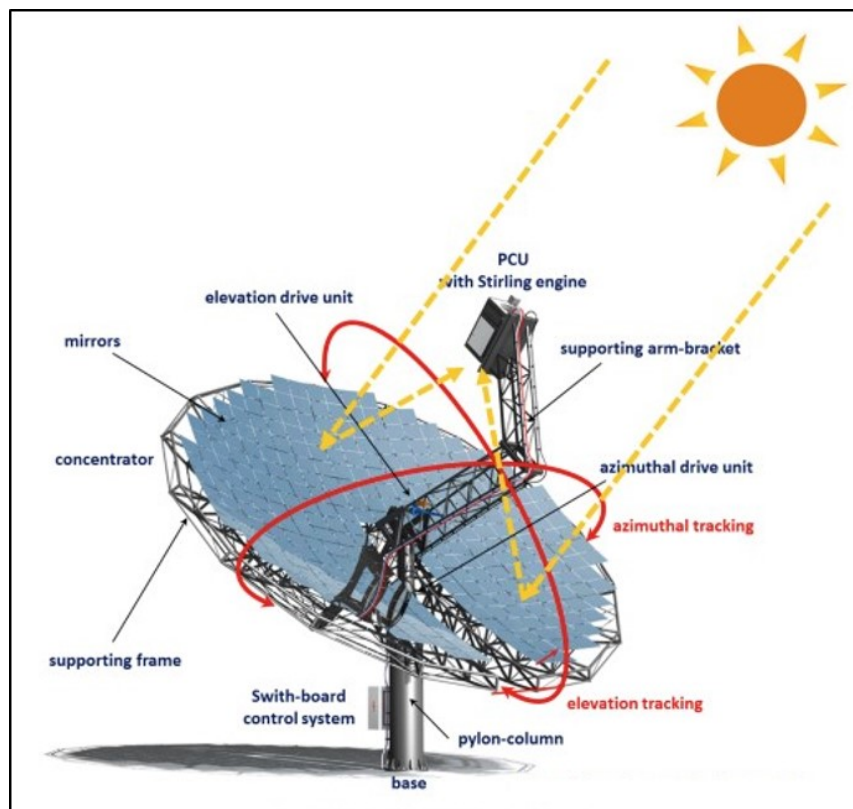


Abbildung 2.2.: Schematische Darstellung der Funktionsweise von Dish-Stirling-Systemen^[29]

- **Lineare Fresnel-Kollektoren (Linear Fresnel Reflector):** Lineare Fresnel-Kollektoren nutzen eine Reihe schmaler, flach geneigter Spiegel, die in linearer Anordnung auf einer ebenen Fläche montiert sind. Diese Spiegel reflektieren die direkte Sonnenstrahlung auf ein stationäres, oberhalb der Spiegel angeordnetes

Receiverrohr, das die konzentrierte Wärmeenergie aufnimmt. Im Receiver zirkuliert ein Wärmeträgermedium — Wasser oder Thermoöl —, das durch die eingestrahlte Energie erhitzt wird. Die erwärmte Flüssigkeit wird anschließend in einem Wärmetauscher zur Erzeugung von Dampf verwendet, der eine Turbine zur Stromerzeugung antreibt. Durch das einachsige Nachführsystem der Spiegel wird der Sonnenstand im Tagesverlauf berücksichtigt, wodurch die Effizienz der Lichtbündelung maximiert wird.^[29]

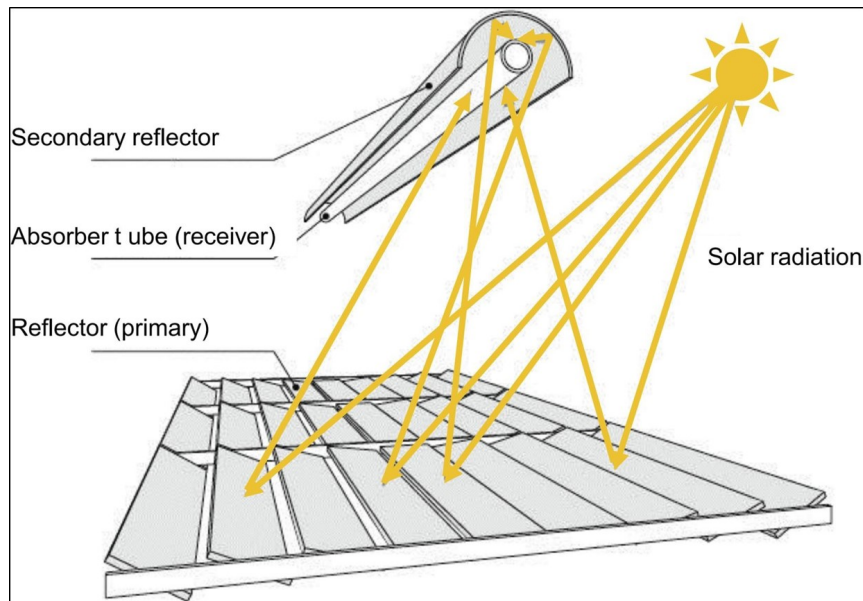


Abbildung 2.3.: Schematische Darstellung der Funktionsweise von Linearen Fresnel-Kollektoren^[29]

• **Parabolrinnenanlagen (Parabolic Trough Collectors, PTC):** Parabolrinnenanlagen stellen die weltweit am häufigsten eingesetzte CSP-Technologie dar. Im September 2010 betrug ihr Anteil an der gesamten CSP-Kapazität etwa 90%.^[22] Sie bestehen aus langen, gekrümmten Parabolspiegeln, die die Sonnenstrahlen auf ein entlang der *Brennlinie* verlaufendes Absorberrohr fokussieren. In diesem Rohr zirkuliert ein Wärmeträgerfluid, meist Thermoöl oder zunehmend auch Salzschnmelze. Die typischen Betriebstemperaturen liegen dabei zwischen 300 °C und 550 °C.^[23]

Ein einachsiges Nachführsystem ermöglicht es den Parabolrinnenspiegeln, der täglichen Bewegung der Sonne zu folgen, wodurch die solare Einstrahlung optimal genutzt und die Systemeffizienz gesteigert wird. Das in den Absorberrohren zirkulierende Wärmeträgerfluid überträgt die aufgenommene thermische Energie über einen Wärmetauscher an einen Wasserdampfkreislauf, der mittels Dampfturbinen elektrische

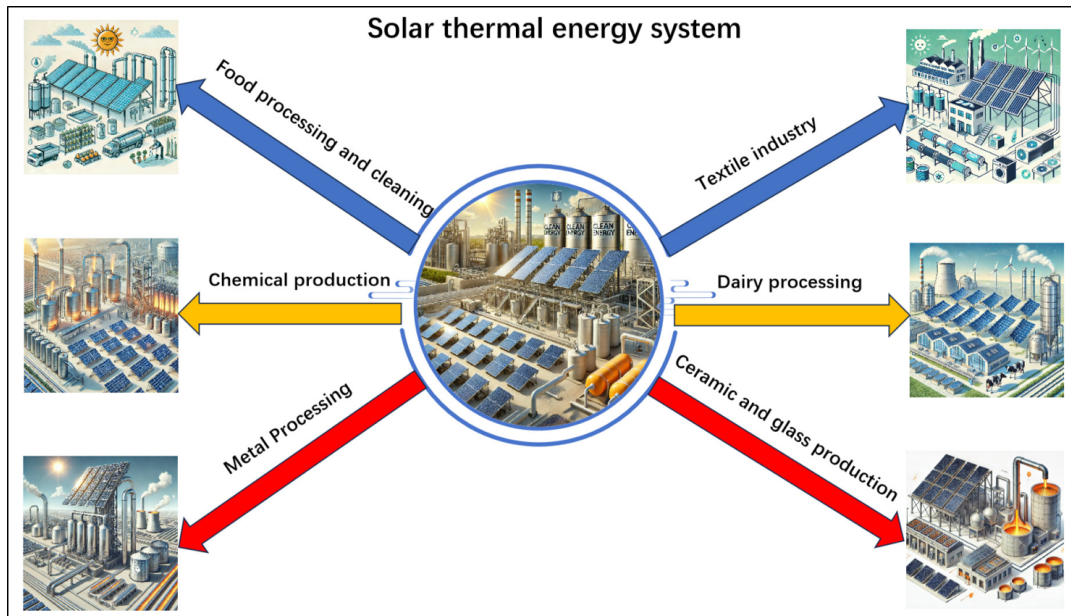


Abbildung 2.5.: Industrielle Einsatzfelder solarthermischer Systeme^[45]

Im Fokus dieser Arbeit steht eine Parabolrinnenanlage mit Salzschnelze als Wärmeträgermedium, die sich in Évora (Portugal) befindet. Im folgenden Kapitel werden die technischen Rahmenbedingungen dieser Anlage detailliert erläutert.

2.2. HPS2-Anlage in Évora Molten Salt Platform (EMSP)

Die HPS2-Anlage wurde konzipiert, um den sicheren und zuverlässigen Betrieb eines Parabolrinnen-Solarthermiekreislaufs mit geschmolzenem Salz sowohl als Wärmeträgerfluid im Kollektorfeld als auch als Medium zur thermischen Energiespeicherung zu demonstrieren. Die thermische Nennleistung des Solarfelds der HPS2-Anlage auf der EMSP beträgt $3,5 \text{ MW}_{\text{th}}$. Die Anlage gliedert sich in mehrere Teilsysteme, die gemeinsam den Prozess der solarthermischen Energieumwandlung und -speicherung realisieren.^[13]

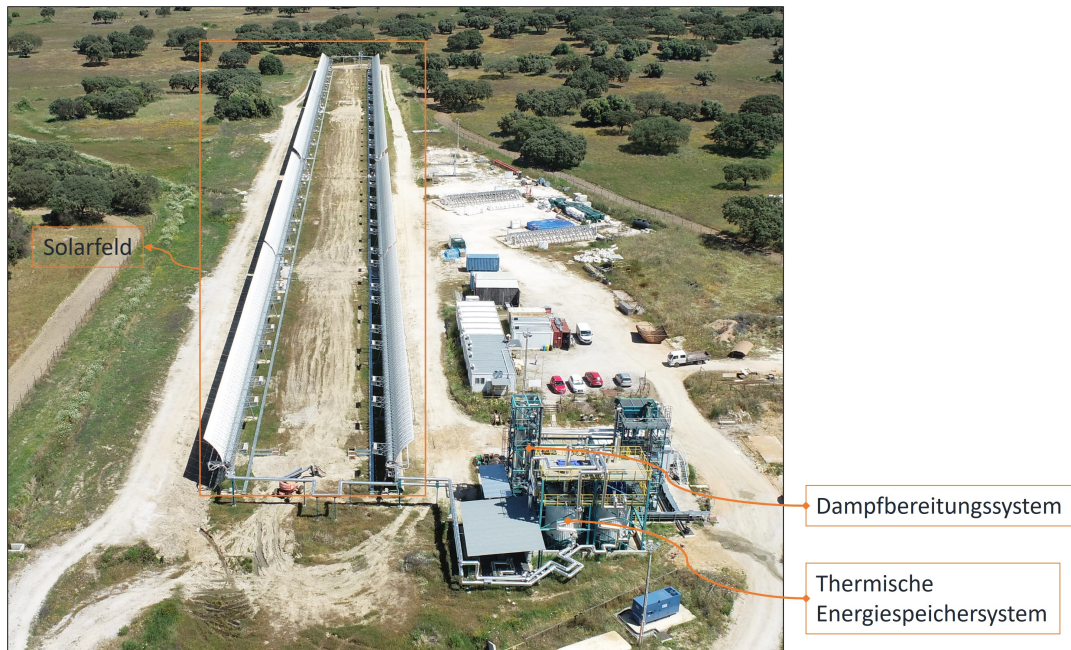


Abbildung 2.6.: Luftaufnahme der HPS2-Demonstrationsanlage auf dem Gelände der EMSP^[35]

Das **Solarfeld** dient der Erwärmung des im kalten Tank gelagerten Salzeschmelze von $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf eine Zieltemperatur von $565\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dies erfolgt durch die Fokussierung der direkten Sonneneinstrahlung mittels Parabolrinnenkollektoren auf Receiverrohre, durch die das Salz zirkuliert und dabei kontinuierlich aufgeheizt wird. Das Solarfeld besteht aus vier Solar Collector Assemblies (SCA), die gemeinsam eine Gesamtlänge von etwa 700 Metern erreichen (siehe Abbildung 2.7).^[13]

Das **thermische Energiespeichersystem** besteht aus zwei Speichertanks: einem für das kalte Salz bei nominal $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einem für das heiße Salz bei nominal $565\text{ }^{\circ}\text{C}$. Beide Tanks sind mit redundanten Pumpen ausgestattet, um das Salz zuverlässig in der Anlage zu fördern.^[44]

Das **Dampfbereitungssystem** erzeugt überhitzten Dampf unter Nutzung des heißen geschmolzenen Salzes als Wärmequelle. Es gliedert sich in zwei funktionale Einheiten: Das erste Modul, der Dampferzeuger, besteht aus einem Verdampfer sowie zwei Überhitzern, die den Dampf auf die erforderliche Zieltemperatur bringen und das Salz dabei von $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ abzukühlen. Das zweite Modul umfasst die Wasser-Dampf-Aufbereitung. Dieses System stellt die Versorgung des Dampferzeugers mit Hochdruckspeisewasser sicher und übernimmt gleichzeitig die Rückführung und

Handhabung des erzeugten überhitzten Dampfes. Eine Turbine ist in der Anlage nicht vorgesehen. Stattdessen wird der Dampf über zwei Drosselstufen entspannt, mithilfe von Wasserinjektion abgekühlt und anschließend in einem luftgekühlten Kondensator verflüssigt. Ein Kondensattank sowie ein Speisewassertank schließen den Wasserdampfkreislauf.^[44]

Das Drainagesystem verbindet alle Anlagenteile, die mit geschmolzenem Salz in Kontakt stehen. Es besteht aus einem unterirdischen Drainagetank als tiefsten Punkt der Anlage und fasst das Volumen aller mit Salz befüllten Rohrleitungsvolumina. Es ermöglicht die kontrollierte Entleerung des Systems, etwa bei Notfällen wie Stromausfällen oder aus prozesstechnischen Gründen. Darüber hinaus dient es der Verteilung des Salzes vom kalten Tank zum Dampfbereitungssystem (Dazu mehr im Kapitel 2.5).^[7]

Das elektrische System versorgt alle Komponenten mit der erforderlichen elektrischen Energie und verfügt über eine Notstromversorgung durch Batterie und Dieselgenerator, um den Betrieb auch bei Stromausfall sicherzustellen.^[44]

Das Leitsystem ermöglicht die zentrale Steuerung aller Anlagenteile durch den Bediener vom Kontrollraum aus.

Das Heizungssystem hat die Funktion, alle Komponenten vor Befüllung mit Salzschnmelze auf Betriebstemperatur zu bringen und während Betriebspausen oder Notfällen das Einfrieren des Salzes zu verhindern. Es umfasst das Heizsystem des Solarfelds, Rohrbegleitheizungen, Tauchheizkörper in den Tanks sowie Begleitheizungen am Dampferzeuger.^[44]

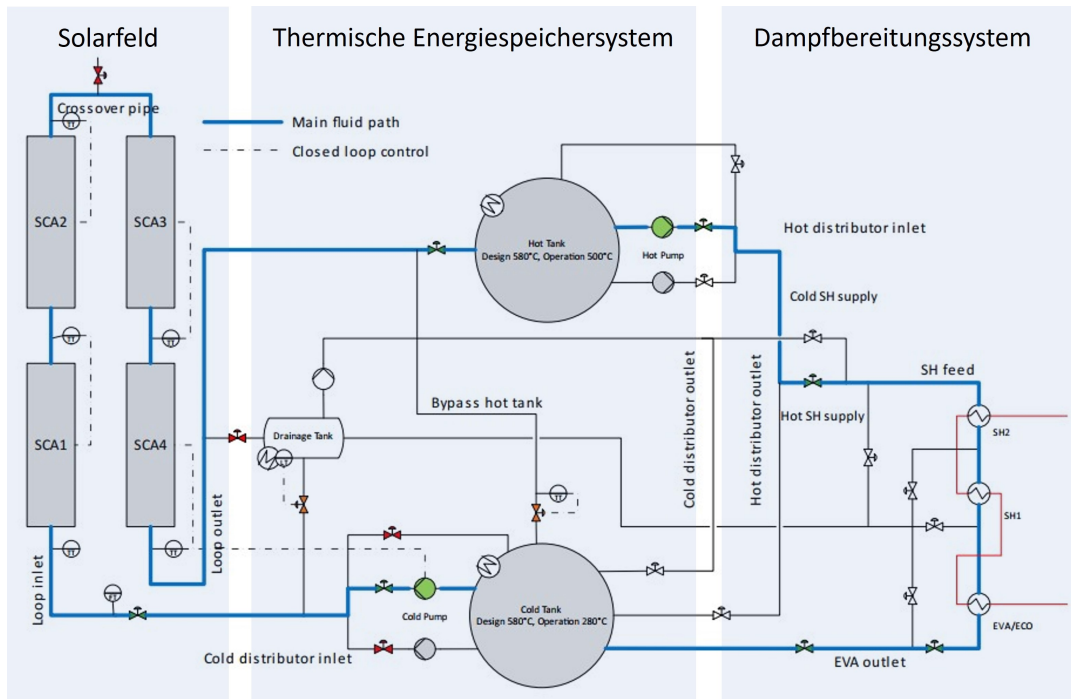


Abbildung 2.7.: Übersicht über den Prozessablauf des Salzkreislaufs^[44]

Abbildung 2.7 verdeutlicht den Salzkreislauf im Normalbetrieb. Dieser beginnt im kalten Salztank, in dem sich die Salzschnmelze bei etwa 290 °C befindet. Über eine Pumpe (Cold Pump) wird das Salz in das Solarfeld gefördert, wo es durch konzentrierte Sonneneinstrahlung auf bis zu 565 °C erhitzt wird. Anschließend gelangt die erhitzte Salzschnmelze über Rohrleitungen in den heißen Salztank. Von dort fördert eine zweite Pumpe (Hot Pump) das heiße Salz zum Dampferzeugungssystem, wo es zur Verdampfung von Wasser genutzt wird. Nach der Wärmeabgabe fließt die abgekühlte Salzschnmelze zurück in den kalten Tank, wodurch sich der Kreislauf schließt.^[44]

2.3. Salzschnmelze als Wärmeträger

In modernen solarthermischen Kraftwerken kommt häufig eine Salzschnmelze als Wärmeträgerfluid zum Einsatz, insbesondere das sogenannte Solar Salt. Dabei handelt es sich um eine binäre Mischung aus Natriumnitrat (NaNO_3) und Kaliumnitrat (KNO_3) im typischen Gewichtsverhältnis 60:40, die sich aufgrund ihrer günstigen thermophysikalischen Eigenschaften in der Praxis bewährt hat. Diese Mischung

zeichnet sich durch eine vergleichsweise niedrige Liquidus-Temperatur, eine hohe Wärmekapazität und gute thermische Stabilität aus, wodurch sie besonders für Anwendungen im mittleren bis hohen Temperaturbereich geeignet ist.^[2]

Das eutektische Gemisch weist keinen exakt definierten Schmelzpunkt, sondern einen Schmelzbereich auf. Der Solidus liegt bei etwa 223 °C, der Liquidus bei etwa 247 °C. Um eine vollständige Verflüssigung sicherzustellen und die Bildung fester Phasen zu vermeiden, wird das Salz im Betrieb typischerweise oberhalb von 270 °C gehalten. In solarthermischen Anlagen wie HPS2 auf der EMSP liegt die Betriebstemperatur der Salzschnmelze in einem Bereich von ca. 290 °C bis 565 °C.^[2]

Die spezifische Wärmekapazität der Mischung beträgt im flüssigen Zustand etwa 1,55 bis 1,60 kJ/(kg·K). Diese hohe Wärmespeicherkapazität macht Solar Salt besonders attraktiv für die direkte Wärmeaufnahme im Solarfeld und die nachgelagerte thermische Energiespeicherung. Zusätzlich besitzt die Salzschnmelze eine moderate thermische Leitfähigkeit, die ausreichend ist, um den Wärmeaustausch mit Wärmetauschern und Dampferzeugern effizient zu gestalten. Die Viskosität des Salzes nimmt mit steigender Temperatur ab, was sich positiv auf die Pumpbarkeit und den Druckverlust im Rohrsystem auswirkt.^[47]

Ein weiterer Vorteil von Solar Salt ist seine thermische Stabilität bis zu Temperaturen von ca. 565 °C, oberhalb derer thermische Zersetzungsreaktionen zunehmend auftreten. Bei längerem Einsatz können sich z. B. Nitriten (NO_2^-) als Abbauprodukt bilden, was eine leichte Veränderung der chemischen Zusammensetzung zur Folge hat. Für den Einsatz in metallischen Rohrleitungen, Speichertanks und Wärmetauschern sind die korrosiven Eigenschaften des Salzes ebenfalls von Bedeutung. Langzeituntersuchungen zeigen, dass bei geeigneter Materialwahl – etwa mit rostfreien Stählen oder Nickellegierungen – die Korrosion kontrollierbar bleibt.^[2]

Abbildung 2.8 zeigt ein demontiertes Receiverrohr aus der HPS2-Anlage, in dem kristallisiertes Solar-Salz deutlich zu erkennen ist. Die Aufnahme stammt aus einem Betriebszustand, in dem die Salztemperatur unter den Soliduspunkt der binären Mischung gefallen ist – also unter etwa 223 °C. In diesem Temperaturbereich nimmt die Viskosität des Salzes stark zu, wodurch der freie Fluss des Wärmeträgerfluids stark eingeschränkt oder vollständig unterbunden wird. Die infolgedessen eingetretene Verfestigung des Salzes führte zu einer Verstopfung im Receiverkreislauf, die eine zeitweilige Stilllegung der Anlage erforderlich machte.



Abbildung 2.8.: Receiverrohr mit auskristallisiertem Salz infolge einer mangelhaften Drainage^[35]

2.4. Aufbau und Funktion der Receiverrohre

Receiverrohre stellen das Herzstück von Parabolrinnenanlagen dar, da sie für die effiziente Umwandlung der konzentrierten Solarstrahlung in thermische Energie verantwortlich sind und somit eine zentrale Rolle im Wärmeübertragungsprozess spielen.^[4]

Die Abbildung 2.9 veranschaulicht exemplarisch den typischen Aufbau eines Receiverrohrs. Im Zentrum befindet sich ein Stahlabsorberrohr, das als Durchflussleitung für die Salzschnmelze dient. Dieses Rohr ist mit einer selektiven Absorberschicht versehen, die eine hohe solare Absorptivität und gleichzeitig eine geringe Emissivität aufweist.^[46]

Das Absorberrohr ist von einem zylindrischen Glasrohr umgeben, das durch eine gasdichte Glas-Metall-Verbindung mit dem Stahlrohr verbunden ist. Der Zwischenraum zwischen Metall- und Glasrohr ist evakuiert, wodurch konvektive Wärmeverluste

nahezu vollständig unterbunden werden. Dieser Vakuumraum ist essenziell für die hohe thermische Effizienz des Receivers und wird über eine Evakuierungsöffnung hergestellt. Um das Vakuum langfristig aufrechtzuerhalten, werden sogenannte Gettermaterialien eingesetzt. Diese absorbieren Gasmoleküle, wie Wasserstoff, die durch Diffusion oder Materialausgasung in den Vakuumraum gelangen könnten, und dienen zusätzlich als Indikator für den Vakuumzustand.^[46]

Die mechanische Flexibilität des Systems wird durch Bälge (engl. bellows) an den Enden gewährleistet, die temperaturinduzierte Längenänderungen zwischen Innen- und Außenrohr kompensieren. Trotz des komplexen Aufbaus reflektiert das System einen geringen Teil des Sonnenlichts und gibt einen kleinen Teil der Wärme konvektiv ab.^[46]

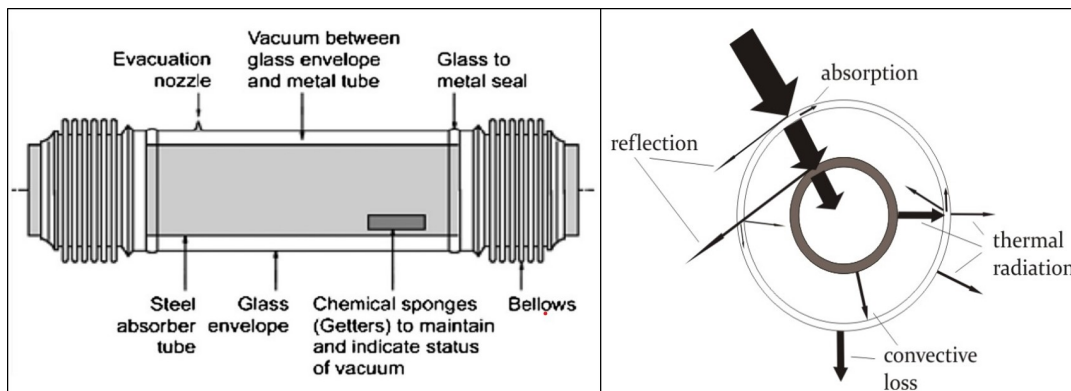


Abbildung 2.9.: Schematischer Aufbau eines Receiverrohrs für Parabolrinnenkollektoren^{[46][23]}

Im Rahmen des HPS2-Projekts wird in der Évora Molten Salt Platform (EMSP) als solarthermischer Receiver der PTR-70 von Rioglass eingesetzt. Dieses Receiverrohr ist speziell für den Betrieb mit Schmelzsalzen als Wärmeträger ausgelegt und besitzt ein Absorberrohr mit einem Außendurchmesser von 70 mm und einer Länge von 4060 mm. Die geometrische Auslegung des PTR-70-Receiverrohrs ermöglicht eine hohe Effizienz bei Temperaturen bis zu 565 °C, was den Einsatz von der binären Solar Salt unterstützt.^[17]

2.5. Drainageprozess in Receiverrohren solarthermischer Parabolrinnenanlagen

In solarthermischen Parabolrinnenanlagen, die mit Salzschnelze als Wärmeträger betrieben werden, ist der Drainageprozess von entscheidender Bedeutung für den Schutz der Anlage vor Frostsäden. Das verwendete Solarsalz hat einen hohen Gefrierpunkt, weshalb das Verbleiben der Salzschnelze in den Receiverrohren und Rohrleitungen während der Nacht oder bei längeren Stillstandszeiten das Risiko birgt, dass die Salzschnelze erstarrt und kristallisiert. Eine Erstarrung führt zu Verstopfungen, mechanischen Spannungen und im schlimmsten Fall zu irreparablen Schäden an den sensiblen Absorberrohren, Verbindungselementen und weiteren Komponenten (siehe Abbildung 2.8).^{[17][19]}

Neben der Vermeidung von Frostsäden trägt die Drainage maßgeblich zur Erhöhung der Betriebssicherheit und Lebensdauer der Anlage bei. Darüber hinaus stellt ein tragfähiges Konzept für Drainage, Vorwärmung und Schnelzprozesse eine grundlegende Voraussetzung für die Finanzierbarkeit großtechnischer Solaranlagen dar, da Investoren die Umsetzung solcher Strategien als entscheidendes Kriterium für die Risikobewertung heranziehen. Die herkömmliche Methode, das Solarfeld nachts aktiv mit Heizsystemen vor Erfrierung zu schützen, ist energieintensiv und mit hohen Wärmeverlusten verbunden, die sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage auswirken. Die gezielte Drainage der Rohrleitungen am Abend und die morgendliche Wiederbefüllung mit vorgeheiztem Salz wird derzeit lediglich als konzeptioneller Ansatz diskutiert. Während dieses Verfahren potenziell eine erhebliche Reduzierung der Wärmeverluste verspricht, setzen kommerzielle Anlagen bislang auf eine kontinuierliche Befüllung der Rohrleitungen, um das Risiko betrieblicher Ausfälle durch Einfrieren zu minimieren.^[19]

Darüber hinaus ist die Drainage notwendig, um bei Wartungsarbeiten oder Wetterphasen mit schlechter Sonneneinstrahlung die Parabolrinnenanlage sicher zu drainieren und Schäden zu vermeiden, die beim anschließenden Aufschmelzen eingefrorener Salzschnelze auftreten können.^[17]

Ablauf des Drainageprozesses:

In der Abbildung 2.11 wird der Ablauf des Drainageprozesses visualisiert.

Am Abend nach Betriebsende wird der Solarfeldkreislauf vorbereitet. Zunächst werden sämtlich Parabolrinnenkollektoren (SCAs) in eine definierte Drainageposition (0° Position) gebracht. Diese Position ist notwendig, da die Receiverrohre in ihrem normalen Betriebszustand (nachgeführte Sonnenausrichtung) immer Steigungen und Senken aufweisen, die zu Siphons führen. Solche lokalen Hoch- und Tiefpunkte

im Rohrsystem verhindern eine durchgängige Drainage durch Schwerkraft. In der Drainageposition hingegen befinden sich die Receiverrohre in einer nahezu horizontalen Lage mit einem leichten Gefälle von etwa 0,15 % – beginnend am höchsten Punkt im Bereich der Crossover Pipe – bis hin zum tiefsten Punkt des Solarfelds, dem Anschluss an den Drainagetank. Diese Neigung gewährleistet, dass sich keine Salzreste oder Luft einschließen in den Leitungen sammeln und dass auch flexible Verbindungselemente wie *REPA-Schläuche* vollständig entleert werden können (Siehe Abbildung 2.10). In der Praxis konnte gezeigt werden, dass unter diesen Voraussetzungen das gesamte Solarfeld innerhalb von 45 Minuten vollständig und sicher drainiert werden kann.

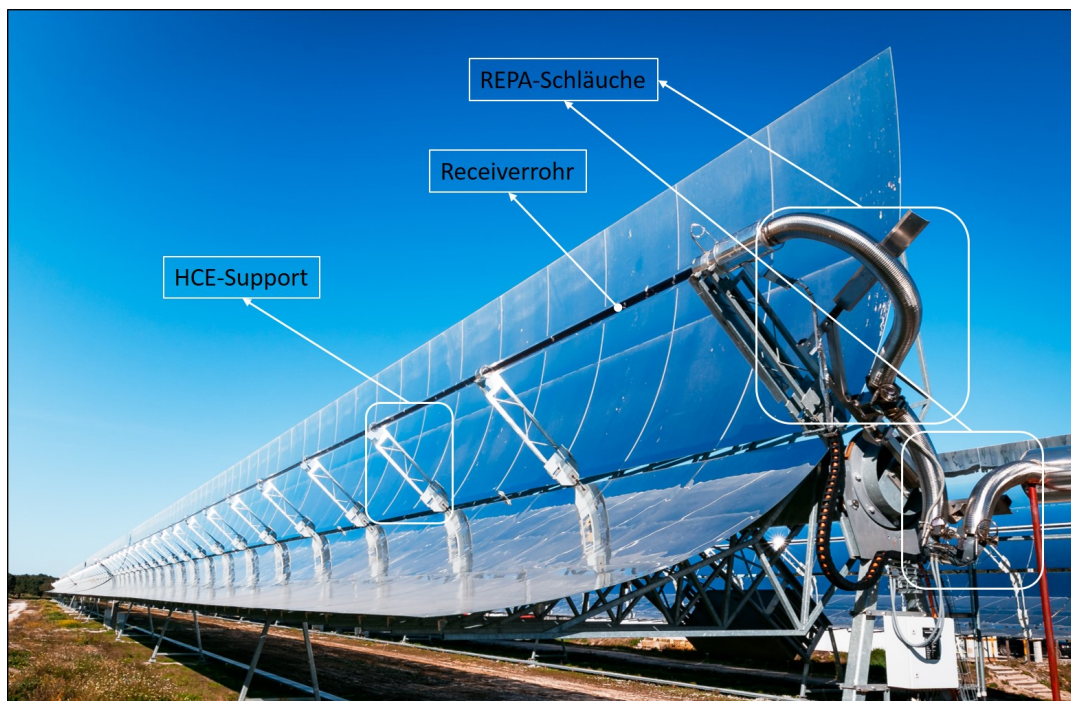


Abbildung 2.10.: Flexible REPA-Verbindungsschläuche zur Anbindung der Receiverrohre in der HPS2-Anlage (EMSP)^[35]

Vor Einleitung der Drainage muss sichergestellt sein, dass der Füllstand im Drainagetank unterhalb der maximal zulässigen Höhe liegt, um das gesamte Volumen des Solarfelds aufnehmen zu können. Die Beheizung des Tanks ist unabhängig vom Betriebsmodus dauerhaft aktiviert und hält den Tank zuverlässig auf der vorgesehenen Solltemperatur. Die Temperaturhaltung ist sicherheitsgerichtet ausgelegt und gemäß SIL2-Klassifikation abgesichert; sie wird zudem über einen Dieselgenerator betrieben, sodass ein Auskristallisieren der einlaufenden Salzschnmelze auch bei einem Stromausfall

wirksam verhindert wird.

Anschließend werden die entsprechenden Ventile geöffnet, und die Salzschnmelze beginnt unter dem Einfluss der Schwerkraft durch die geneigten Rohrleitungen in Richtung Drainagetank zu fließen. Der Drainageprozess wird insbesondere durch das Öffnen des Ventils im Bereich der Crossover Pipe ermöglicht, wodurch Umgebungsluft in die Receiverrohre nachströmen kann.

Sollte die Drainage in einem Notfall eingeleitet werden – beispielsweise bei Stromausfall, Pumpenversagen oder sonstigen Anlagenschäden – ist eine vollständige Drainage erforderlich. Die salzführenden Leitungen des Solarfelds und der Verbindungsleitungen sind entsprechend mit einer Neigung von 0,15 % ausgeführt, wobei bestimmte Abschnitte der festen Feldverrohrung größere Neigungswinkel aufweisen. Kritische Bereiche mit bekannten Gefahren potenzieller Salzurückstände, etwa flexible REPA-Schläuche, wurden mit zusätzlichen Stützstrukturen ausgestattet, um ein Durchhängen zu verhindern und somit eine vollständige Entleerung auch dort zu ermöglichen.^{[17][19][44]}

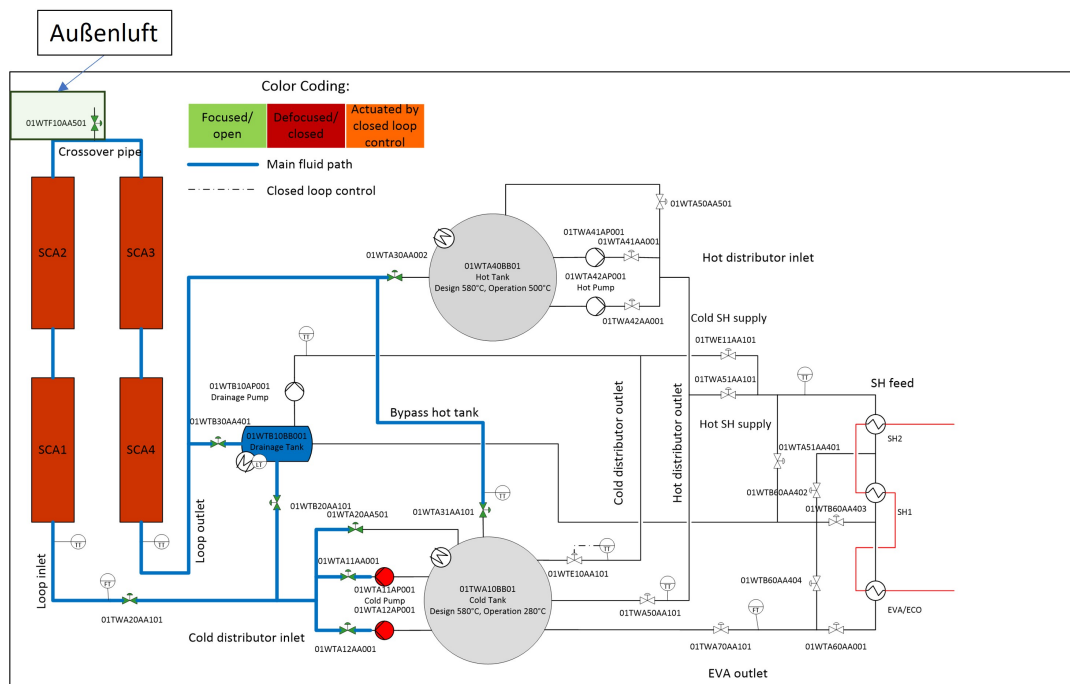


Abbildung 2.11.: Schematische Darstellung des Drainage-Prozesses an der HPS2-Anlage^[44]

2.6. Analyse marktverfügbarer Füllstandssensorik

Die zuverlässige Überwachung des Füllstands in Receiverrohren von Parabolrinnenanlagen erfordert eine präzise und robuste Messtechnik – insbesondere im Rahmen von Drainagevorgängen.

Die besonderen Anforderungen an die Sensorik ergeben sich aus den extremen Temperaturbedingungen, der chemischen Aggressivität des Salzes und der komplexen Anlage sowie der Geometrie der Receiverrohre. Die Sensoren müssen daher nicht nur hochtemperaturbeständig und korrosionsresistent sein, sondern auch ausreichend genau, um Füllstandsschwankungen in den schmalen, geneigten Rohren zuverlässig zu detektieren. Nur so kann der Drainageprozess sicher überwacht und potenziellen Betriebsstörungen wie Salzverfestigungen oder Verstopfungen frühzeitig entgegengewirkt werden.

Da marktübliche Füllstandssensoren primär für konventionelle Flüssigkeiten in großvolumigen Behältern entwickelt wurden, ist ihre Eignung für Parabolrinnenanlagen mit Flüssigsalz – insbesondere im Hochtemperaturbereich bis 565 °C – kritisch zu hinterfragen. Die besonderen Anforderungen dieser Anwendung, wie enge Geometrien, aggressive Medien und thermische Belastung, erfordern eine gezielte Auswahl geeigneter Messprinzipien. Im Folgenden werden daher neun etablierte Messverfahren systematisch vorgestellt und im Hinblick auf ihre Praxistauglichkeit für die Drainageüberwachung in Receiverrohren im nachfolgenden Kapitel (3.2) bewertet. Eine grundlegende Unterscheidung erfolgt dabei zwischen kontinuierlichen und diskreten Messmethoden, wobei Kriterien wie, Umgebungsbedingungen, Messgenauigkeit und Kosten in die Betrachtung einfließen.

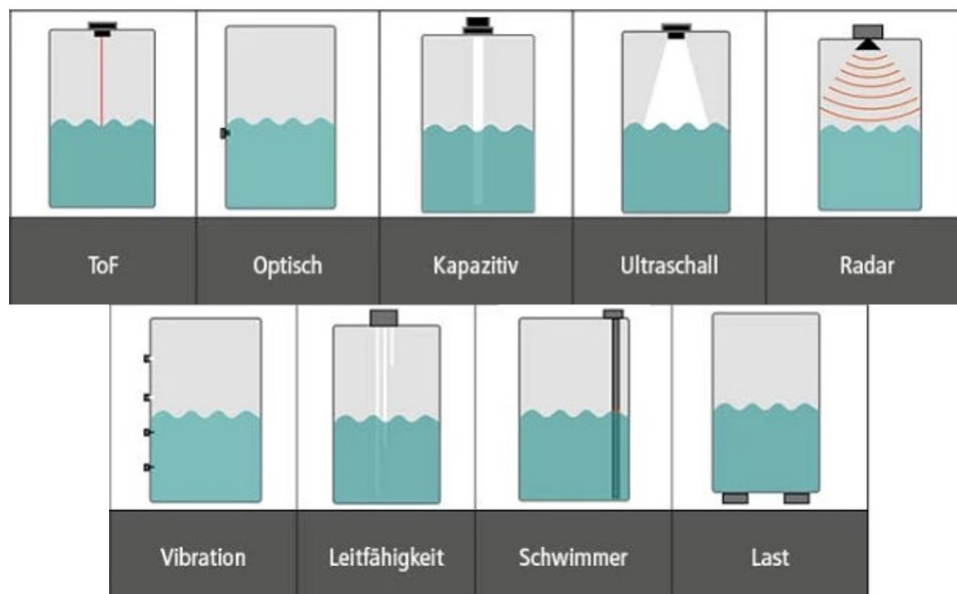


Abbildung 2.12.: Übersicht der wichtigsten Technologien für Füllstandsmessung^[3]

1. Time-of-Flight (ToF):

ToF-Sensoren messen die Laufzeit einer Welle (meist Ultraschall, Laser oder Radar), die ausgesendet, an der Medienoberfläche reflektiert und vom Empfänger registriert wird. Die Laufzeit korreliert direkt mit dem Abstand zur Oberfläche. Das Verfahren ermöglicht berührungslose, kontinuierliche Füllstandsmessung mit hoher Präzision, selbst in druckbeaufschlagten oder staubigen Umgebungen. Typische Anwendungen finden sich in der chemischen Industrie oder in Silos mit staubigen Schüttgütern.^{[3][16]}

2. Optische Sensoren:

Diese arbeiten mit Lichtwellen, die reflektiert oder gebrochen werden, wenn sie auf eine Grenzfläche zwischen Medium und Luft treffen. Verwendet werden sie vor allem zur punktuellen Grenzstanddetektion – z.B. bei transparenten Flüssigkeiten in kleinen Behältern. Die Lichtleitertechnologie erfordert Medienkontakt und ist anfällig für Verschmutzungen oder Trübungen. Optische Sensoren sind sehr kompakt und günstig, was sie für medizinische Analysegeräte oder Getränkeabfüllanlagen geeignet macht.^[3]

3. Kapazitive Sensoren:

Kapazitive Sensoren messen Änderungen in der Dielektrizität, wenn sich ein Medium zwischen Sensorelektrode und Behälterwand befindet. Sie ermöglichen

diskrete sowie kontinuierliche Messungen und funktionieren für viele Medien, inklusive Flüssigkeiten und Schüttgut. Sie benötigen jedoch Mediumskontakt und müssen spezifisch auf die Dielektrizitätskonstante kalibriert werden.^{[3][39]}

4. Ultraschall:

Ultraschallsensoren funktionieren nach demselben Prinzip wie ToF, jedoch mit Schallwellen statt Licht oder Radar. Sie sind kostengünstig, wartungsarm und für viele Standardanwendungen geeignet. Probleme entstehen bei schäumenden Medien, vakuumierten Behältern oder stark reflektierenden Innenwänden. Typische Einsatzfelder sind die Wasserwirtschaft, Lebensmittelproduktion oder Kunststoffverarbeitung.^{[3][39]}

5. Radar:

Radarfühler nutzen elektromagnetische Wellen im GHz-Bereich (z. B. 24 GHz oder 80 GHz), die von der Oberfläche reflektiert werden. Sie bieten eine sehr hohe Messgenauigkeit und sind weitgehend unempfindlich gegenüber Staub, Druck, Vibration und Temperaturschwankungen. Moderne Geräte arbeiten auch in engen Behältern mit beweglichen Oberflächen, jedoch ist die Technik im Vergleich zu Ultraschall teurer.^{[3][16][39]}

6. Vibration:

Diese Sensoren bestehen aus einer vibrierenden Gabel oder einem Stab, deren Schwingungsverhalten sich verändert, wenn sie von einem Medium bedeckt wird. Sie arbeiten zuverlässig für Grenzstandüberwachung, etwa bei Schüttgütern oder Flüssigkeiten mit Schaum. Die Messgenauigkeit ist gering, jedoch sind sie kostengünstig, kompakt und robust.^[3]

7. Leitfähigkeitssensoren:

Diese Methoden messen die elektrische Leitfähigkeit zwischen Elektroden. Sie erkennen diskrete Füllstände (z. B. über/unter Pegel) in leitfähigem Medium wie Wasser. Sie sind kostengünstig, doch stark abhängig von stabiler Medienleitfähigkeit und anfällig für Korrosion.^[40]

8. Schwimmer:

Schwimmerbasierte Sensoren detektieren Grenzstände mittels eines schwimmenden Elements, das mechanische Signale liefert. Sie sind einfach, robust und unabhängig von Schaumbildung oder Temperaturschwankungen. Allerdings sind sie groß, werden in der Praxis verschmutzungsanfällig und bieten nur diskrete Schwellenmessung.^{[3][39]}

9. Last (Wägezellen):

Lastzellen messen das Gewicht des Behälters, um den Füllstand basierend auf der Massenzunahme zu bestimmen. Sie funktionieren für flüssige und feste Medien mit konstanter Dichte, jedoch können Zuleitungen und strukturelle Belastungen die Genauigkeit beeinträchtigen.^[3]

Tabelle 2.1.: Vergleich kommerzieller Füllstandsmessverfahren

Verfahren	Vorteile	Nachteile	Mediums-kontakt	Messart
ToF / Radar	hohe Genauigkeit, robust	Totbereiche, kostenintensiv	Nein	Kontinuierlich
Optisch	kompakt, preiswert	einzelne Schwellen; hoher Installationsaufwand	ggf. ja	Diskret
Kapazitiv	vielseitig, für viele Medien	braucht Mediums-kontakt sowie Kalibrierung	Ja	Diskret/kontin.
Ultraschall	kostengünstig; einfach installierbar	schaum- und geometrieempfindlich	Nein	Kontinuierlich
Vibration	miniaturisiert, preiswert	geringere Genauigkeit	Ja	Diskret
Leitfähigkeit	sehr günstig	nur für leitfähige Medien, korrosionsanfällig	Ja	Diskret
Schwimmer	hohe Präzision, robust	sperrig, verschmutzungsanfällig	Ja	Diskret
Last	medienunabhängig	Einflüsse durch mechanische Belastung	Nein	Kontinuierlich

2.7. Messtechnologien zur Füllstandserfassung der Feldverrohrung an der HPS2-Anlage

Die Überwachung des Drainageprozesses in der HPS2-Anlage erfolgt derzeit in der Praxis auf Grundlage einer indirekten Analyse durch Temperatur- und Drucksensoren in den Receiverrohren sowie durch die Füllstandserfassung im Drainagetank. Da die Salzsäure aufgrund ihres niedrigen Dampfdrucks nahezu kein Volumen verliert, kann über die Füllstandsänderung im Drainagetank entweder auf eine erfolgreiche Drainage oder Verstopfung in Rohrleitungen geschlossen werden.

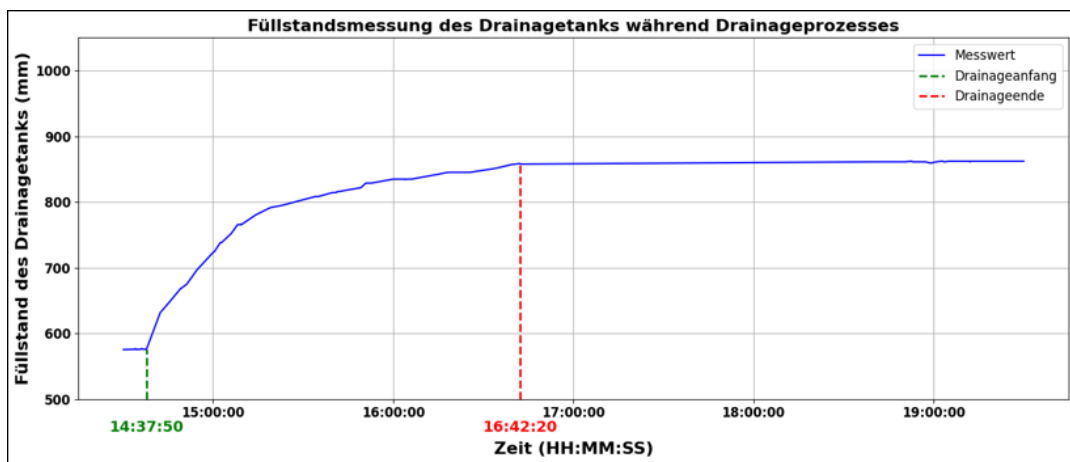


Abbildung 2.13.: Füllstandserfassung vom Drainagetank bei einer erfolgreichen Drainage^[35]

Das Diagramm 2.13 zeigt den zeitlichen Verlauf des Füllstands im Drainagetank. Während der Drainagephase steigt der Füllstand kontinuierlich an, bis er ab 16:42:20 konstant bleibt. Dieser Zeitpunkt wird als Indikator für das Ende der Drainage interpretiert.

Zusätzlich liefern punktuell installierte Temperatursensoren entlang der Receiverrohre, welche die Temperaturverläufe erfassen, Rückschlüsse auf den Abfluss der Salzsäure.

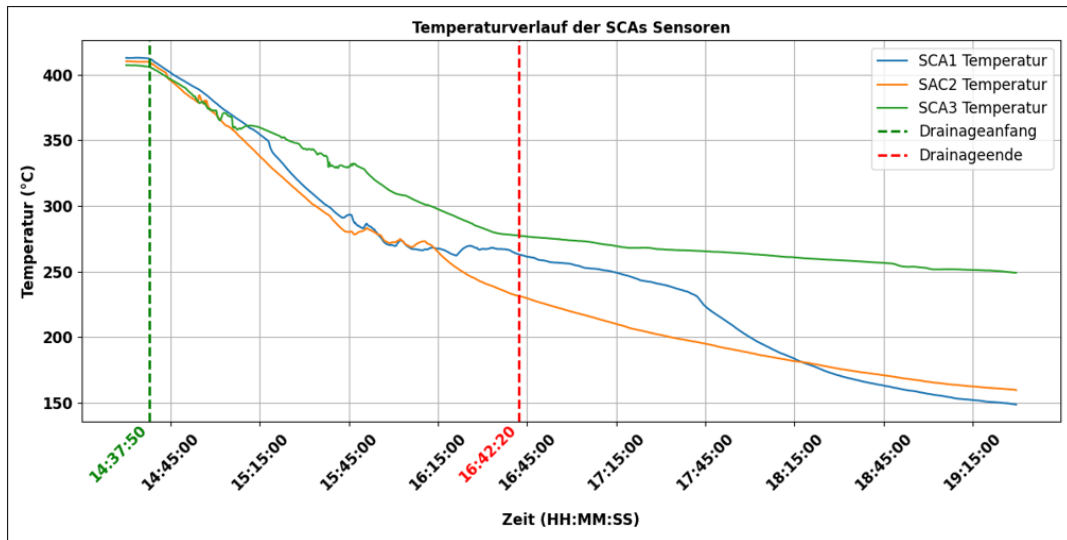


Abbildung 2.14.: Temperaturverläufe der Thermoelemente während der Drainage (SCA1, SCA2, SCA3)^[35]

In dem Diagramm ist ab 14:37:50 ein deutlicher Temperaturabfall in den mittleren Receiverrohren der Kollektoren SCA1, SCA2 und SCA3 erkennbar. Dies zeigt, dass die Salzschnmelze sukzessive abfließt und die Sensoren nicht mehr mit der Salzschnmelze im Kontakt stehen. Das Ende der Drainage ist laut Abbildung 2.13 um 16:42:20, dies ist anhand der Temperaturdaten jedoch nicht eindeutig zu identifizieren.

Außerdem werden in der Überwachungsstrategie die Drucksensoren 01WTF10CP001 (Eintritt) und 01WTF10CP401 (Austritt) verwendet (Siehe Anhang A.1). Diese Sensoren liefern punktuelle Druckwerte, aus denen auf das momentane Vorhandensein von einer Salzschnmelzesäule an den Messstellen geschlossen werden kann. Sie liefern jedoch nur schlechte Information über den Füllstand, sondern dienen primär als Indikatoren für den Volumenstrom.

Zudem weisen die Drucksensoren einen Totbereich auf. Unterhalb eines bestimmten Füllstands liefern sie fälschlicherweise Nullwerte, obwohl sich noch geringe Mengen Salz in der Leitung befinden. Dieser Effekt erschwert die präzise Bestimmung des tatsächlichen Füllstands während der Drainage.

Während des Wiederbefüllens der Anlage kann der Verlauf der Druckwerte trotzdem grobe Rückschlüsse auf die Bewegung der Salzfront liefern. Z. B. ein ansteigender Druck am Eintrittssensor weist auf das Auffüllen der geneigten Kollektoren SCA1 und SCA2 hin. Ein längerer, konstanter Druckverlauf kann darauf hindeuten, dass sich die Salzfront an einem Hochpunkt (Crossover Pipe) staut. Erst wenn auch der

Austrittssensor einen Druckanstieg zeigt, kann eine vollständige Durchströmung des Solarfelds angenommen werden.

Die Druckmessung stellt somit eine kontinuierlich verfügbare, jedoch nur eingeschränkt interpretierbare Informationsquelle dar, die bei der Steuerung von Drainage- und Befüllvorgängen unterstützend wirkt. Ihre Aussagekraft ist durch lokale Druckverluste, Totzonen in der Sensorik sowie die punktuelle Installation begrenzt; zudem ist ein derartiger Sensor mit Kosten von 10.000 € verbunden und kommt daher nur an wenigen Stellen der Anlage zum Einsatz.

3. Entwicklung geeigneter Messtechnik zur Drainageüberwachung

In diesem Kapitel werden zunächst die Anforderungen an die Messtechnik zur wissenschaftlich fundierten Überwachung des Drainageprozesses in der HPS2-Anlage erläutert. Darauf aufbauend wird der Aufbau des Messsystems sowie die Durchführung von Vorversuchen mit verschiedenen Sensorprinzipien detailliert beschrieben.

3.1. Anforderung an die Messtechnik

Die Aufgabenstellung impliziert, dass die eingesetzte Messtechnik sowohl eine Überwachung des Drainagevorgangs als auch eine Lokalisierung von Salzpfpfen im Leitungssystem ermöglichen soll. Eine kontinuierliche Überwachung des gesamten Verrohrungssystems der HPS2-Anlage ist erforderlich, da eine Notfall-Drainage jederzeit eingeleitet werden kann. Die Messtechnik kann jedoch bedarfsgerecht ausgewertet werden, sodass bestimmte Signale nur bei der Lokalisierung von Verstopfungen vertieft analysiert werden müssen.

Ein zentrales Kriterium für die Messtechnik in wissenschaftlichen Kontext ist eine hohe Messgenauigkeit. Ziel ist es, nicht nur den Beginn oder das Ende des Füllvorgangs zu erkennen, sondern auch Zwischenfüllstände zuverlässig zu erfassen. Die Messtechnik soll beispielsweise in der Lage sein zu detektieren, ob ein Receiverrohr zu etwa 77% gefüllt ist. Eine reine Binärinformation im Sinne von ‚voll‘ oder ‚leer‘ ist hingegen eher für kommerzielle Anlagen geeignet.

Darüber hinaus darf die Installation der Messtechnik die Funktionalität des Solarfeldes nicht beeinträchtigen. Sofern eine Integration innerhalb der Receiverrohre vorgesehen ist – etwa durch Bohrungen oder Modifikationen am Stahlrohr – muss die Dichtheit des Systems nach der Installation uneingeschränkt gewährleistet bleiben. Eventuelle Eingriffe in das bestehende Rohrleitungssystem sind daher besonders sorgfältig auszulegen, um sicherheits- und betriebsrelevante Anforderungen einzuhalten.

Nicht zuletzt ist auch der wirtschaftliche Aspekt zu berücksichtigen. Die Messtechnik sollte in einem angemessenen Verhältnis zwischen Funktionalität, Installationsaufwand und Kosten stehen. Sowohl Investitions- als auch Betriebskosten (z.,B. für Wartung, Kalibrierung oder Ersatzteile) müssen bei der Auswahl berücksichtigt werden. Eine Lösung, die zwar technisch präzise, aber mit unverhältnismäßigem Aufwand oder hohen Kosten verbunden ist, kann im praktischen Betrieb schwer umsetzbar sein. Ziel ist daher eine technisch zuverlässige und gleichzeitig ökonomisch vertretbare Lösung.

Tabelle 3.1.: Anforderungen an die Messtechnik zur Drainageüberwachung

Anforderungskategorie	Beschreibung
Funktionalität	Überwachung des Drainageprozesses und Lokalisierung von Salzpfpfen.
Überwachungsart	Die Messtechnik muss eine kontinuierliche Überwachung gewährleisten.
Messgenauigkeit	Eine hohe Auflösung zur Detektion von Teilfüllständen ist in wissenschaftlichen Kontexten erforderlich. In kommerziellen Anlagen genügen hingegen Aussagen wie ‚voll‘ oder ‚leer‘.
Installationskompatibilität	Keine Beeinträchtigung der Solarfeldfunktion bei der Messtechnik-Installation.
Wirtschaftlichkeit	Angemessenes Verhältnis von Kosten zu Nutzen; überschaubarer Installationsaufwand sowie vertretbare Betriebs- und Wartungskosten.

3.2. Auswahl der Sensorik für Drainage-Überwachung

Die Auswahl geeigneter Sensorik zur Überwachung des Drainageprozesses basiert auf den in Kapitel 2.6 untersuchten Messprinzipien sowie den zuvor definierten Anforderungen (Kapitel 3.1). Ziel ist es, ein Messsystem zu identifizieren, das verlässlich Auskunft über den Fortschritt der Drainage gibt – einschließlich Teilfüllständen und möglicher Salzpfpfen.

Ein Vergleich marktverfügbarer Technologien (siehe Tabelle 3.2) zeigt, dass die meisten konventionellen Verfahren für den speziellen Anwendungsfall der HPS2-Anlage nicht geeignet sind. Hauptgründe hierfür sind:

- die Notwendigkeit eines optischen oder direkten Zugangs zur Flüssigkeitsoberfläche (Installationskompatibilität),
- die Unverträglichkeit mit hohen Temperaturen bis 565 °C (Funktionalität),
- die hoher Einbauaufwand bzw. Notwendigkeit zur mechanischen Modifikation des Rohrsystems (Wirtschaftlichkeit sowie Installationskompatibilität),
- die unzureichende Auflösung bei strömendem Fluid (Messgenauigkeit).

Tabelle 3.2.: Technologischer Eignungsvergleich gängiger Messverfahren zur Drainageüberwachung

Messprinzip	Funktionalität	Mess- genauigkeit	Installations- kompatibilität	Wirtschaft- lichkeit	Gesamt- eignung
Time-of-Flight (ToF)	✗	✓	✗	✗	✗
Optische Sensoren	✗	✓	✗	✓	✗
Kapazitive Sensoren	✗	✓	✗	✓	✗
Ultraschall	✗	✓	✗	✓	✗
Radar	✗	✓	✗	✗	✗
Vibration	✗	✗	✗	✓	✗
Leitfähigkeitssensoren	✗	✗	✗	✓	✗
Schwimmer	✗	✗	✗	✓	✗
Last (Wägezellen)	✓	✓	✓	✓	✓

Die Tabelle 3.2 zeigt, dass lediglich die Messung über Lastzellen alle definierten Bewertungskriterien erfüllt. Die Begründung liegt darin, dass der Füllstand der Receiverrohre unmittelbar mit der Masse des enthaltenen Salzvolumens korreliert. Diese Masseänderung wirkt sich direkt auf die mechanische Belastung der Tragstrukturen aus und kann damit zuverlässig erfasst werden. Das Verfahren ist installationskompatibel, da keine Eingriffe in die Rohrleitungen notwendig sind, und bietet zudem eine hohe Genauigkeit bei vergleichsweise geringen Kosten.

Neben der Gewichtsmessung wurden weitere Messgrößen identifiziert, die ebenfalls Rückschlüsse auf den Füllstand ermöglichen und als ergänzende Ansätze dienen können (siehe Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3.: Potentielle Korrelation zwischen Füllstand und physikalischen Größen

Parameter	Beschreibung
Temperatur	Das Rohrmaterial erwärmt sich durch den Kontakt mit der heißen Salzschnmelze sukzessive.
Druck	Der Innendruck variiert mit der Strömung und dem Fortschritt der Befüllung.
Gewicht	Die Masse des Rohrabschnitts nimmt proportional zum Volumen der eingefüllten Salzschnmelze zu.

Auf dieser Basis fiel die Wahl auf drei Sensortechnologien, die im Rahmen der Arbeit untersucht werden:

- **Thermoelemente und Infrarotkamera** zur Erfassung des Temperaturverlaufs entlang der Rohrwand,
- **Dehnungsmessstreifen (DMS)** zur indirekten Bestimmung der Gewichtskraft über die mechanische Dehnung der Tragstruktur,
- **Wägezellen** als Referenzverfahren zur direkten Bestimmung der Salzmasse.

Diese Auswahl stellt sicher, dass verschiedene physikalische Effekte – thermisch, mechanisch und gravimetrisch – berücksichtigt werden und erlaubt eine differenzierte Untersuchung ihrer Eignung für die Drainageüberwachung.

Bei der Auswahl der Messprinzipien wurde gezielt auf die im QUARZ-Labor des Instituts für Solarforschung vorhandene Messtechnik zurückgegriffen, um die Untersuchungen mit möglichst geringem Kostenaufwand durchführen zu können. Da jedoch keine geeigneten Sensoren zur Erfassung von Druckänderungen in den Receiverrohren verfügbar waren, wurde dieser Ansatz im Rahmen der Arbeit nicht weiter verfolgt.

3.3. Ziel, Aufbau und Durchführung der Vorversuche

Basierend auf den in Kapitel 3.2 identifizierten physikalischen Einflussgrößen und der daraus abgeleiteten Sensorik wurden im Rahmen der Voruntersuchungen experimentelle Messanordnungen entwickelt. Dabei wurden vorhandene Testinfrastrukturen am Institut für Solarforschung genutzt, um die prinzipielle Eignung der Sensoren zur Überwachung des Drainagevorgangs zu evaluieren. Ziel war es, unter realitätsnahen Bedingungen die Korrelation zwischen dem Füllstand und den gemessenen Temperatur- sowie Dehnungswerten infolge der Gewichtszunahme beim Befüllen der Receiverrohre mit Salzschnmelze systematisch zu untersuchen.

Im Folgenden werden die Vorversuche für jede der drei Sensorarten vorgestellt sowie die jeweiligen Zielstellungen der einzelnen Versuchsreihen erläutert.

3.3.1. Infrarotkamera

Ziel dieser Messreihe ist es, den Füllstand eines Receiverrohrs indirekt über die Temperaturverteilung innerhalb des Rohrquerschnitts mit Hilfe einer Infrarotkamera zu erfassen. Die zugrunde liegende Hypothese basiert auf der Annahme, dass sich

die Temperaturverteilung innerhalb des Rohrs in Abhängigkeit vom Füllstand der Salzschnelze verändert.

Das beispielhafte Bild 3.1 zeigt ein exemplarisches zylindrisches Stahlrohr, das zur Hälfte mit heißer Salzschnelze befüllt ist. In diesem Fall befindet sich im oberen Bereich des Rohrs ein Luftraum, der mit heißer Luft gefüllt ist. Aufgrund der besseren Wärmeleitung und der höheren Wärmekapazität im flüssigkeitsgefüllten unteren Bereich ist davon auszugehen, dass die gemessene Temperatur dort höher ist als im oberen gasgefüllten Abschnitt. Es ergibt sich somit ein vertikaler Temperaturgradient, der in der Infrarotaufnahme als ein von oben nach unten zunehmender Temperaturverlauf dargestellt werden soll.

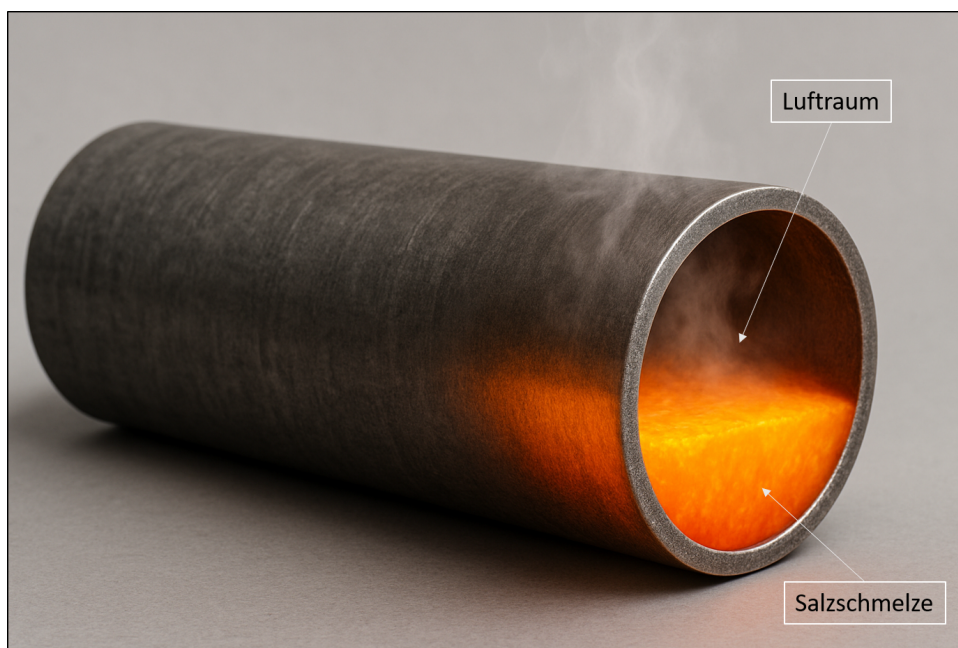


Abbildung 3.1.: Visualisierung eines halb mit Salzschnelze gefüllten Stahlrohrs^[35]

Die zentrale Annahme dieser Versuchsanordnung ist daher, dass zwischen dem gemessenen Temperaturprofil im Rohrquerschnitt und dem tatsächlichen Füllstand eine nachvollziehbare Korrelation besteht. Insbesondere soll untersucht werden, ob sich der Füllstand anhand charakteristischer Temperaturverteilungen reproduzierbar ableiten lässt.

Zu den zentralen Komponenten der Versuchsanordnung zählt die Infrarotkamera FLIR T1020^[41], die in Kombination mit einem geeigneten Stativ zum Einsatz kommt, sowie ein PTR-70 Rioglass Receiverrohr. Die Kamera arbeitet im langwelligen Infrarotbereich

3. Entwicklung geeigneter Messtechnik zur Drainageüberwachung

zwischen 7–14 μm und ist für hochpräzise thermografische Messungen im technischen Umfeld ausgelegt.

Zur Erzeugung definierter thermischer Zustände im Receiver wird der sogenannte ThermoRec verwendet – ein am QUARZ-Labor des Instituts für Solarforschung etablierter Temperaturprüfstand. Dieser verfügt über eine integrierte Heizlanze, die axial in das Receiverrohr eingeführt werden kann. Die Lanze ermöglicht eine kontrollierte Erwärmung des Rohrinnenen auf Temperaturen von bis zu ca. 600 °C. Auf diese Weise lassen sich realitätsnahe thermische Bedingungen erzeugen, die dem Betrieb mit heißer Salzschnmelze entsprechen.

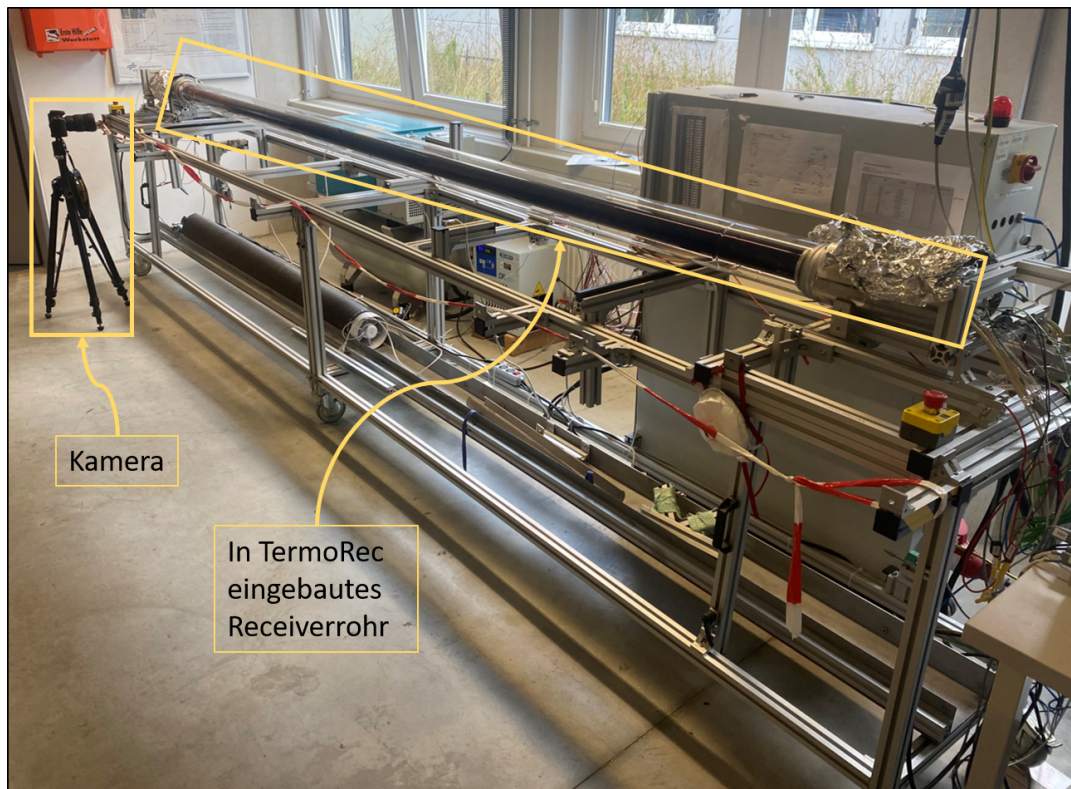


Abbildung 3.2.: Nachgestellter Versuchsaufbau zur IR-Messung mit handelsüblicher Digitalkamera^[35]

Zunächst wird das PTR-70-Receiverrohr in den ThermoRec-Prüfstand installiert. Hierzu wird die Heizlanze in das Receiverrohr eingeschoben, bevor das Rohr vorsichtig in den Prüfstand eingebracht wird. Nach dem Anschluss der Heizlanze an das Steuerungssystem des ThermoRec erfolgt die Vorgabe einer Solltemperatur von 250 °C

über das zugehörige LabVIEW-Programm. Nach einer Aufheizphase von etwa zwei Stunden ist die eingestellte Temperatur erreicht und innerhalb des Rohrs weitgehend homogenisiert.

Im Anschluss wird die Infrarotkamera auf einem Stativ montiert und so vor dem Receiverrohr positioniert, dass störende Umgebungsreflexionen im Kamerabild minimiert werden. Zur Reduktion externer Lichtquellen empfiehlt es sich, den Raum möglichst vollständig zu verdunkeln.

Nach Abschluss dieser Vorbereitungen erfolgen Infrarotaufnahmen des beheizten Receiverrohrs. Die aufgenommenen Bilddaten werden anschließend systematisch analysiert und hinsichtlich ihrer Aussagekraft für die Temperaturverteilung ausgewertet (siehe Kapitel 4.1.1).

3.3.2. Thermoelemente

Bei der Messreihe mit Thermoelementen wird dasselbe Ziel verfolgt wie bei der Infrarotmessung. Die Ableitung des Füllstands erfolgt über das thermische Verhalten des Receiverrohrs. Diese Versuchsreihe ermöglicht insbesondere einen Vergleich der beiden Messprinzipien und ihrer Aussagekraft hinsichtlich der Füllstandserkennung.

Zur Veranschaulichung wird erneut das Szenario eines halbgefüllten Receiverrohrs betrachtet. Mehrere Thermoelemente werden entlang des Rohrquerschnitts angebracht, insbesondere im oberen und unteren Bereich. Zwei Thermoelemente befinden sich an den Extrempunkten des Querschnitts und liefern charakteristische Temperaturwerte für vollständig leere oder vollständig gefüllte Zustände.

Zusätzlich werden weitere Thermoelemente gleichmäßig um den Querschnitt verteilt, um auch Zwischenfüllstände erkennen zu können. Bei leerem Receiver ist zu erwarten, dass alle Sensoren ähnliche, relativ niedrige Temperaturen erfassen. Bei vollständig gefülltem Rohr hingegen messen alle Sensoren durchgehend höhere Temperaturen der Salzschmelze.

Im teilgefüllten Zustand ergibt sich ein deutliches Temperaturgefälle. Sensoren im oberen Bereich registrieren niedrigere Temperaturen, während die Sensoren im unteren Bereich höhere Werte messen. Dieses Verhalten wird in Abbildung 3.3 veranschaulicht.

Die in der Abbildung dargestellten Temperaturwerte dienen ausschließlich der Veranschaulichung und repräsentieren keine real gemessenen Werte.

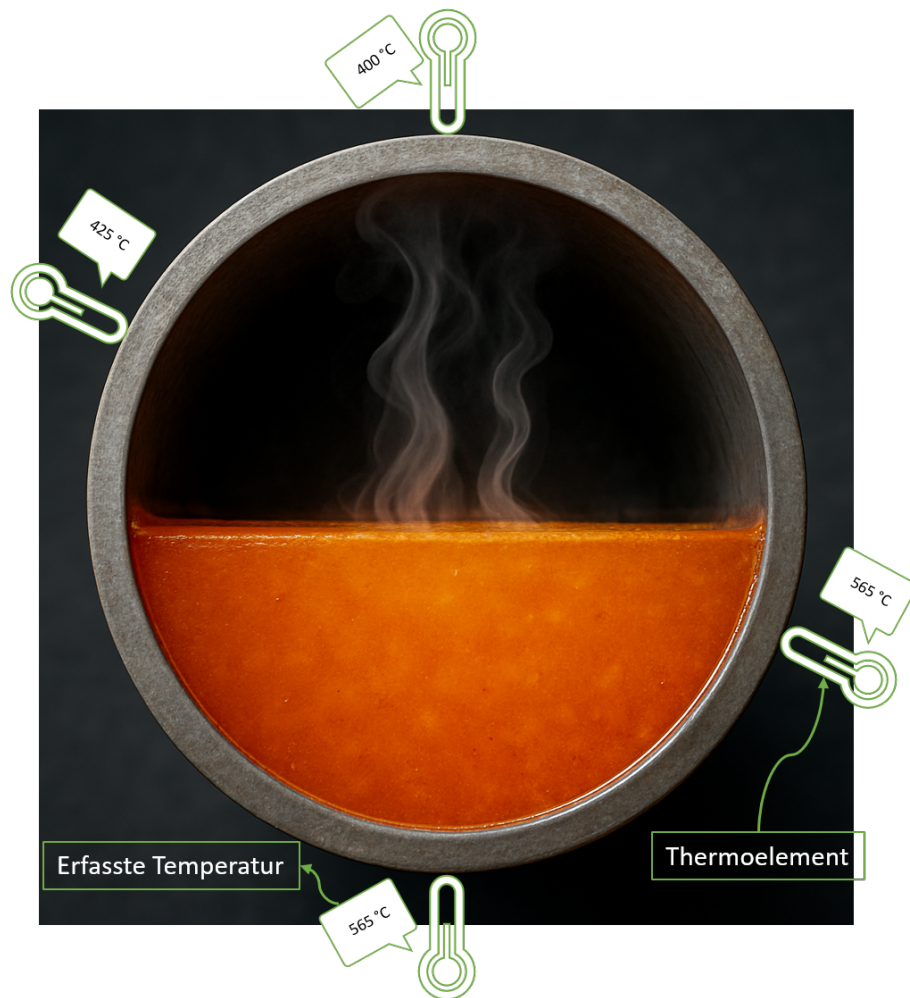


Abbildung 3.3.: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Temperaturmessung mit Thermoelementen^[35]

Zu den zentralen Komponenten dieser Versuchsreihe zählen vier Thermoelemente vom Typ N^[36], der sogenannte Alterungsprüfstand des Instituts für Solarforschung, ein PTR-70-Receiverrohr von Rioglass sowie zwei elektrische Heizelemente (auch Heizpatronen genannt)^[21].

Der Alterungsprüfstand weist eine vergleichbare Funktionsweise wie der in Abschnitt 3.3.1 beschriebene TermoRec auf. Eine Heizlanze wird axial in das Receiverrohr eingeführt, wobei sich am Ende der Lanze mehrere Öffnungen befinden, die die Aufnahme von Heizelementen ermöglichen. Um einen teilgefüllten Receiverquerschnitt

zu simulieren, werden gezielt zwei Heizelemente in die unteren Öffnungen eingesetzt (siehe Abbildung 3.4). Diese Anordnung erzeugt eine gezielte lokale Erwärmung des unteren Rohrbereichs.

Der Prüfstand ist zusätzlich mit einem LabVIEW-basierten Steuerungs- und Auslesesystem ausgestattet, das eine kontinuierliche Erfassung und Visualisierung der Temperaturdaten ermöglicht. Dies erlaubt eine präzise Überwachung der thermischen Vorgänge im Verlauf des Versuchs.

Ziel ist es, einen Temperaturverlauf zu erzeugen, der – analog zu einem tatsächlichen Füllszenario mit Salzschnelze – von oben nach unten zunimmt. Zur Erfassung dieses Temperaturprofils werden vier Thermoelemente eingesetzt. Zwei davon befinden sich im Inneren des Receiverrohrs an den oberen und unteren Scheitelpunkten, die beiden weiteren sind an der Außenwand des Rohrs positioniert.

Die äußeren Thermoelemente dienen dem Nachweis, dass sich ein charakteristischer Temperaturgradient auch außerhalb des Rohrs detektieren lässt, was den Installationsaufwand im praktischen Einsatz erheblich reduzieren würde. Um konvektive Wärmeverluste und damit Messverfälschungen zu minimieren, wird das Rohr zusätzlich mit Aluminiumfolie und Dämmstoff isoliert.

Bei dieser Untersuchung handelt es sich um eine grobe Voranalyse, deren Ziel es ist, die grundsätzliche Eignung von Thermoelementen für die Überwachung des Drainagevorgangs nachzuweisen. Aus diesem Grund wurde zunächst auf die Installation weiterer Thermoelemente zur detaillierten Erfassung verschiedener Füllstände verzichtet.

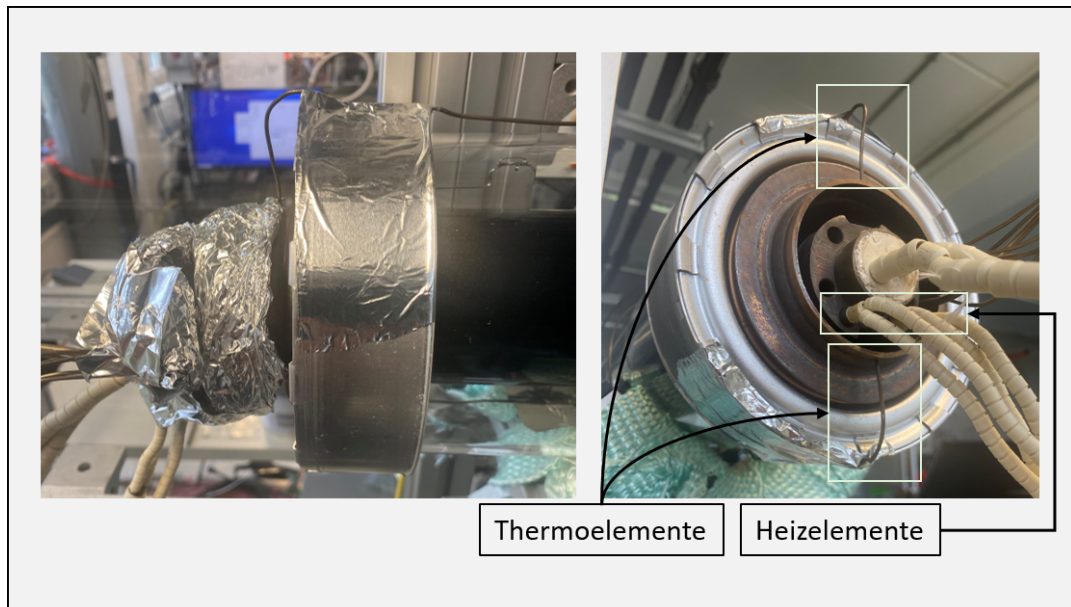


Abbildung 3.4.: Aufbau der Versuchsanordnung zur Detektion des Temperaturprofils im Receiver mit Thermoelementen^[35]

Zunächst wird das PTR-70-Receiverrohr mit der darin installierten Heizlanze in den Alterungsprüfstand eingebaut. Anschließend werden sowohl die Heizpatronen als auch die Thermoelemente mit dem Steuer- und Messsystem des Prüfstands verbunden. Über das zugehörige LabVIEW-Programm erfolgt die Ansteuerung der Heizpatronen sowie das kontinuierliche Logging der Temperaturdaten der Thermoelemente.

Nach Abschluss dieser Schritte wird im LabVIEW-System eine Solltemperatur von 250 °C für die Heizpatronen vorgegeben. Die aufgezeichneten Temperaturdaten werden im Anschluss mit Python ausgewertet, visualisiert und hinsichtlich ihrer Aussagekraft systematisch analysiert.

3.3.3. Dehnungsmessstreifen

Die Messung mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) dient der Detektion der mechanischen Dehnung am HCE-Support (Heat Collector Element Support) (siehe Abbildung 2.10) infolge von Gewichtsänderungen der Receiverrohre je nach Füllstand. Ziel dieser Messreihe ist es, das Verhalten der Struktur solarthermischen Anlagen unter variierender Last während des Drainagevorgangs zu analysieren.

3. Entwicklung geeigneter Messtechnik zur Drainageüberwachung

Vor der Einleitung der Drainage sind die Receiverrohre vollständig mit Salzschnmelze gefüllt, wodurch die maximale Gewichtskraft auf den HCE-Support wirkt. Diese verursacht eine mechanische Dehnung im Support, die durch die DMS erfasst wird. Während der Drainage reduziert sich schrittweise das Gewicht des Receiverrohrs, was zu einer sukzessiven Entlastung des Supports und somit zu einer abnehmenden Dehnung führt.

Dieses Verlaufsmuster wird im Rahmen der DMS-Messreihe systematisch untersucht. Die Messungen sollen belegen, dass eine Korrelation zwischen der Füllmenge der Receiver und der gemessenen Dehnung besteht, wodurch sich das Potenzial zur Füllstandsüberwachung mittels DMS ergibt.

Zum eingesetzten Equipment gehören zwei Dehnungsmessstreifen^[43], das Mess- und Verstärkermodule ClipX^[30], ein Netzteil mit 24 V, ein Netzkabel, ein Messrechner mit einem LabVIEW-Programm des Instituts für Solarforschung, eine ca. 20 kg schwere Masse sowie diverses Installationsmaterial für die Applikation der DMS (z. B. Klebstoff (CA80), Pinzette, etc.).

Die Versuchsdurchführung erfolgte an den Kollektoren der SOPRAN-Anlage in Köln^[31]. Dadurch konnten realitätsnahe Bedingungen für die Untersuchung geschaffen werden.

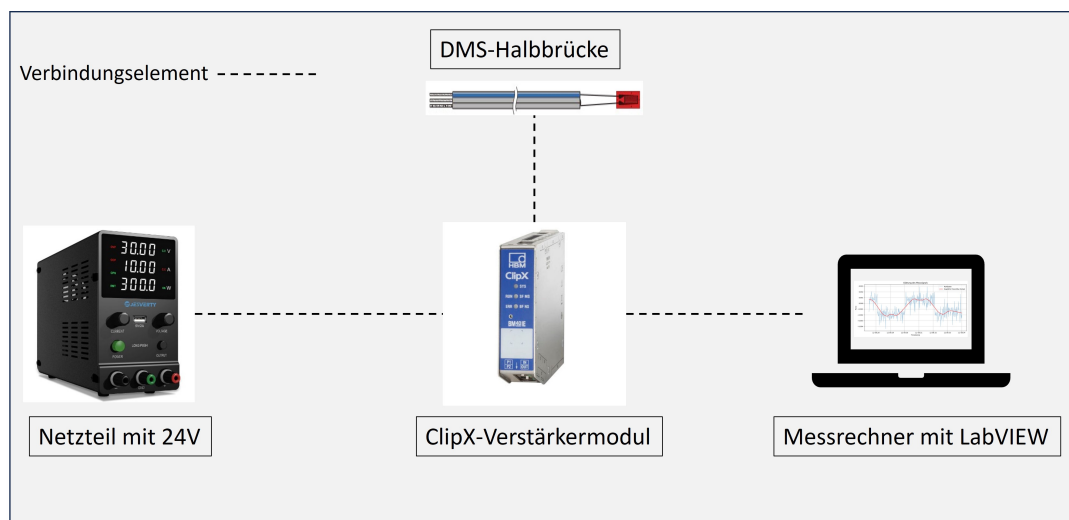


Abbildung 3.5.: Verwendete Messausrüstung zur Durchführung der DMS-Messreihe^[35]

Für eine präzise und reproduzierbare Messung ist eine fachgerechte Installation der DMS auf dem HCE-Support unerlässlich. Der Installationsprozess beginnt mit der Vorbereitung des DMS, welcher zunächst auf einem gereinigten Glasobjektträger mittels Klebefolie (z. B. Tesafilm) fixiert wird.

Anschließend wird die vordefinierte Messstelle am HCE-Support vorbereitet. Hierzu wird die Oberfläche durch Schleifen mit Schleifpapier (empfohlen eine 180 Körnung) und wiederholtes Reinigen mit Isopropanol schrittweise geglättet, bis eine homogene und saubere Fläche entsteht. Nach der Oberflächenvorbereitung wird die exakte Position der Messstelle markiert.

Der DMS wird nun mithilfe der Klebefolie vom Objektträger abgelöst und so auf dem HCE-Support positioniert, dass er beim Umklappen exakt auf der markierten Stelle zum Liegen kommt. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, den DMS nicht mit bloßen Fingern zu berühren – die Verwendung geeigneter Pinzetten wird dringend empfohlen, um Kontamination oder Beschädigung zu vermeiden.

Nach dem Positionieren wird die markierte Stelle mit dem Klebstoff benetzt und der DMS zügig auf die Klebeschicht umgeklappt. Anschließend erfolgt ein leichtes Andrücken mit dem Daumen für etwa 10 Minuten, um den initialen Kontakt herzustellen. Danach wird mithilfe eines geeigneten Werkzeugs, z. B. einer kleinen Presszange, ein definierter Druck auf die Klebestelle ausgeübt, um eine gleichmäßige Verklebung ohne Lufteinschlüsse zu gewährleisten. Die Aushärtezeit des Klebstoffs richtet sich nach dem jeweiligen Produkttyp.

Für die vorliegende Versuchsdurchführung wurde der Schnellklebstoff CA80 der Firma HBK^[20] verwendet. Dieser eignet sich besonders durch seine einfache Handhabung und kurze Aushärtezeit für Feldanwendungen. Beim Einsatz von CA80 genügt ein gleichmäßiges Andrücken des DMS für etwa 5 Minuten zur vollständigen Fixierung.

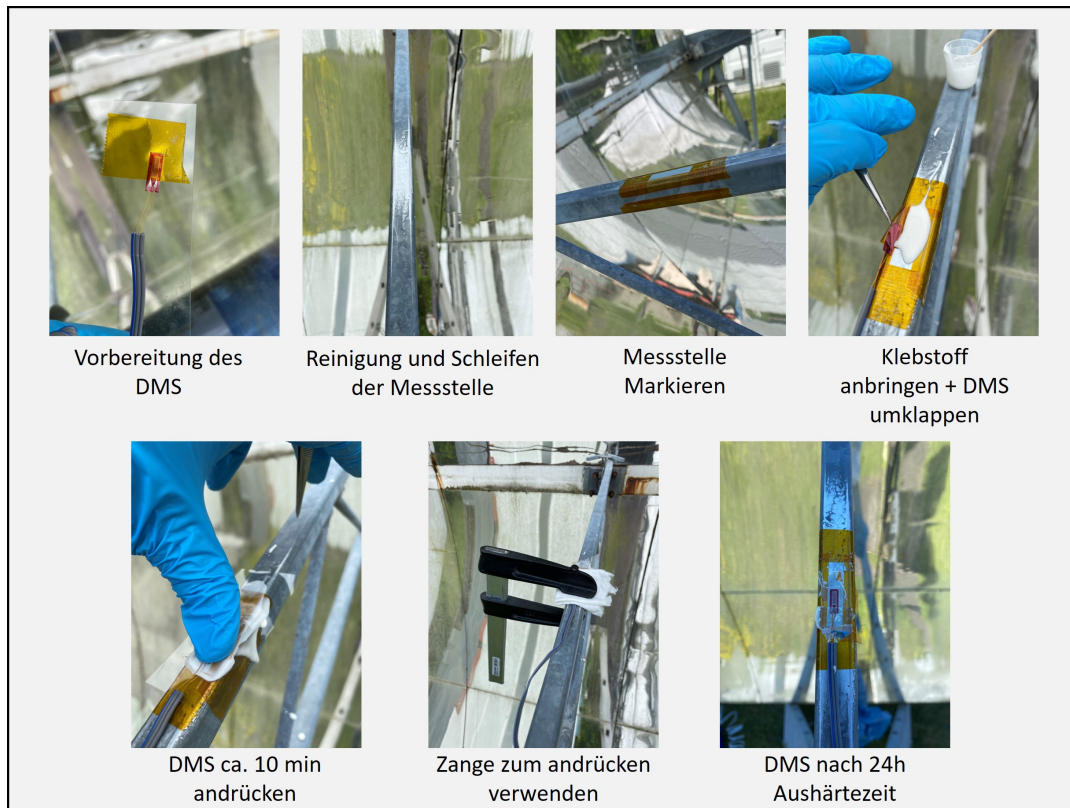


Abbildung 3.6.: Schrittweise Installation eines Dehnmessstreifens auf dem HCE-Support der SOPRAN-Anlage^[35]

Bei dieser Messreihe kam eine Halbbrückenschaltung mit Dehnmessstreifen auf Grundlage des wheatstonschen Prinzips zum Einsatz. Die Entscheidung für diese Konfiguration basierte auf drei Kriterien: geringer Installationsaufwand, geringe Kosten sowie eine grundlegende Temperaturkompensation.

Zwar bietet die Verwendung einer Viertelbrückenschaltung den Vorteil des geringsten Material- und Installationsaufwands, da lediglich ein einzelner DMS benötigt wird, jedoch fehlt hierbei eine Kompensation temperatureinduzierter Dehnungen. Diese können zu Messfehlern führen, insbesondere in Umgebungen mit wechselnden oder hohen Temperaturen, wie sie in solarthermischen Kraftwerken typisch sind.

Um dennoch eine gute Messqualität bei gleichzeitig vertretbarem Aufwand zu gewährleisten, wurde ein Kompromiss in Form der Halbbrückenschaltung gewählt. In dieser Konfiguration werden zwei DMS verwendet, einer auf der Oberseite des HCE-Supports, der auf Zug beansprucht wird, und ein zweiter auf der Unterseite,

der auf Druck belastet wird (siehe Abbildung 3.7). Durch diese Anordnung lassen sich mechanisch bedingte Dehnungen infolge der Gewichtskraft der Receiverrohre zuverlässig erfassen, während temperaturempfindliche Effekte größtenteils kompensiert werden.

Die aufzuhängende Masse von ca. 20 kg dient als Ersatzlast für die Salzschnelze in einem vollständig gefüllten Receiverrohr. Der Wert wurde auf Grundlage einer Massenberechnung ermittelt, welche im Folgenden dargestellt ist.

Abschätzung der Salzmasse im Receiverrohr: Zur Abschätzung der im Receiver enthaltenen Salzmasse bei vollständiger Füllung wird das Innenvolumen des zylindrischen Rohrs berechnet. Die Receiverlänge (PTR-70-Receiverrohr) beträgt $L = 4060 \text{ mm} = 4,060 \text{ m}$, der Innendurchmesser $d = 64 \text{ mm} = 0,064 \text{ m}$.

$$V_{\text{Receiver}} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot L = \pi \cdot \left(\frac{0,064 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 4,060 \text{ m} = 0,0131 \text{ m}^3$$

Für die Dichte der Salzschnelze bei einer Temperatur von 300°C wird ein Wert von

$$\rho = 1804 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

verwendet.^[2]

Die Salzmasse ergibt sich zu:

$$m_{\text{Salzfüllung}} = V_{\text{Receiver}} \cdot \rho = 0,0131 \text{ m}^3 \cdot 1804 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 23,63 \text{ kg}$$

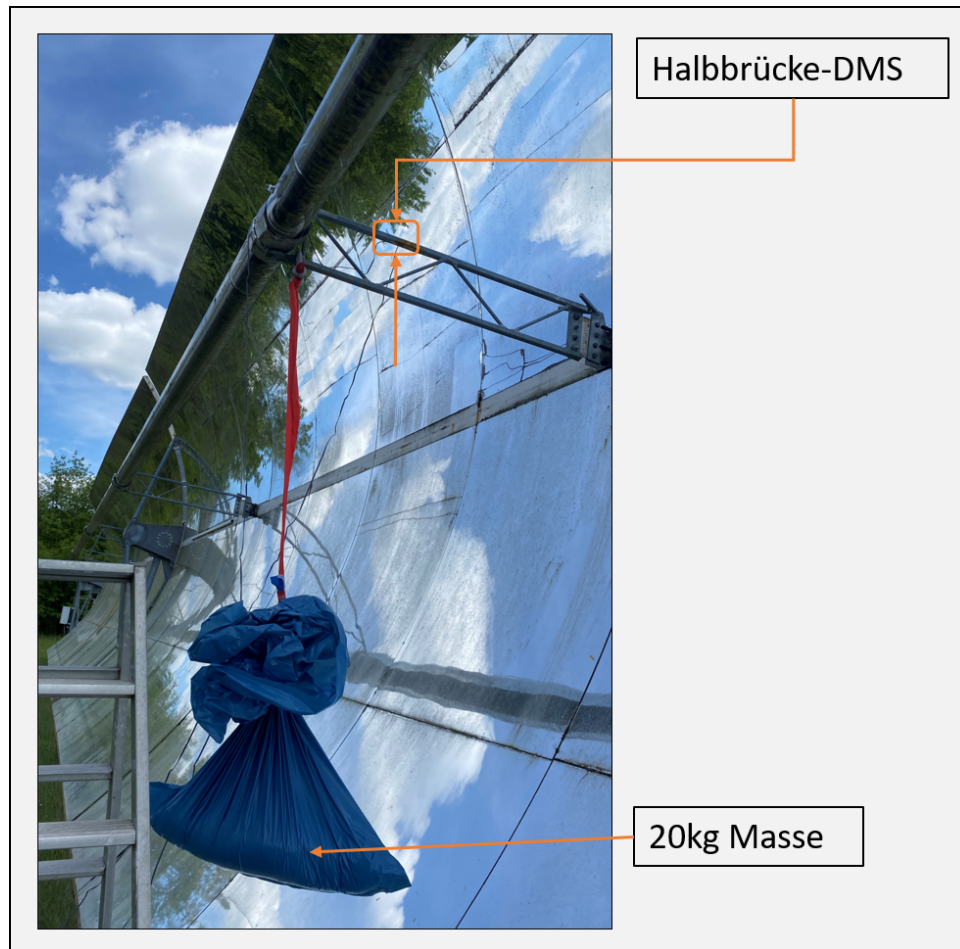


Abbildung 3.7.: Aufbau der Versuchsanordnung zur Detektion der gewichtsabhängigen Dehnung im HCE-Support mittels DMS^[35]

Die Abbildung 3.8 veranschaulicht die elektrische Anbindung der DMS im Rahmen der Messreihe. Die DMS werden über ein Netzteil mit einer konstanten Versorgungsspannung von 24 V gespeist und sind mit dem Verstärkermodule ClipX verbunden. Das ClipX-Modul übernimmt die Signalverstärkung sowie Digitalisierung der Messsignale und stellt eine präzise Erfassung der Dehnungen sicher.

Der Anschluss des ClipX an den Messrechner erfolgt über ein Netzkabel. Auf dem Messrechner ist ein LabVIEW-Programm installiert, das vom Institut für Solarforschung speziell für solche Anwendungen entwickelt wurde. Dieses Programm ermöglicht die kontinuierliche Auslesung, Darstellung und Speicherung der Dehnungsmessdaten während des Versuchs.

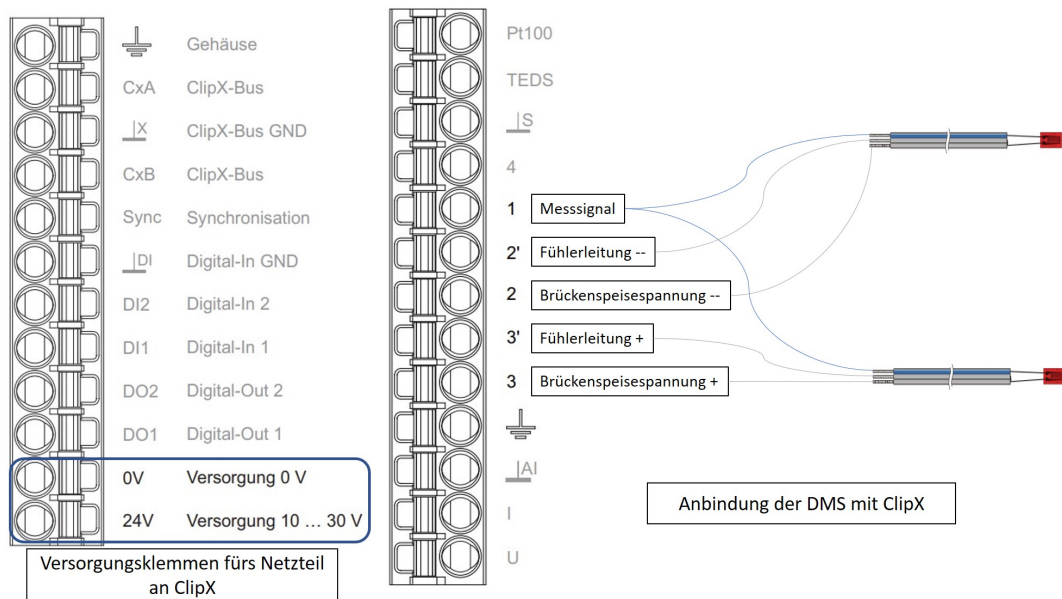


Abbildung 3.8.: Schematische Darstellung der Anschlussklemmen des ClipX sowie deren Anbindung an Netzteil und DMS^[35]

Nachdem die Installationsschritte der DMS-Halbbrücke abgeschlossen und diese mit dem ClipX-Messverstärker verbunden wurden, erfolgt die mechanische Belastung des HCE-Supports durch das Aufhängen der 20 kg Masse. Das verstärkte und digitalisierte Signal wird vom ClipX über ein Netzkabel an den Messrechner übertragen.

Das zugehörige LabVIEW-Programm erfasst die Messdaten kontinuierlich und speichert diese in einer CSV-Datei. Diese wird anschließend mithilfe eines Python-Skripts visualisiert und im Hinblick auf die Aussagekraft der Signalverläufe systematisch analysiert.

4. Bewertung der Vorversuchsergebnisse und Auswahl geeigneter Messtechnologien

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 3 durchgeführten Vorversuche hinsichtlich ihrer Messergebnisse analysiert und bewertet. Ziel ist es, die Eignung der jeweils eingesetzten Messtechnologien im Kontext der Drainageüberwachung systematisch zu vergleichen und eine begründete Auswahl zu treffen.

4.1. Analyse der Messergebnisse und Bewertung der Messtechnologien

In den folgenden Abschnitten werden die aufgezeichneten Messergebnisse analysiert und im Hinblick auf die Eignung der jeweiligen Messtechnologien zur Drainageüberwachung bewertet.

4.1.1. Infrarotkamera

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Aufnahmen aus dem Vorversuchen mit der Infrarotkamera. Links ist jeweils das reale Bild, rechts das zugehörige Wärmebild dargestellt.

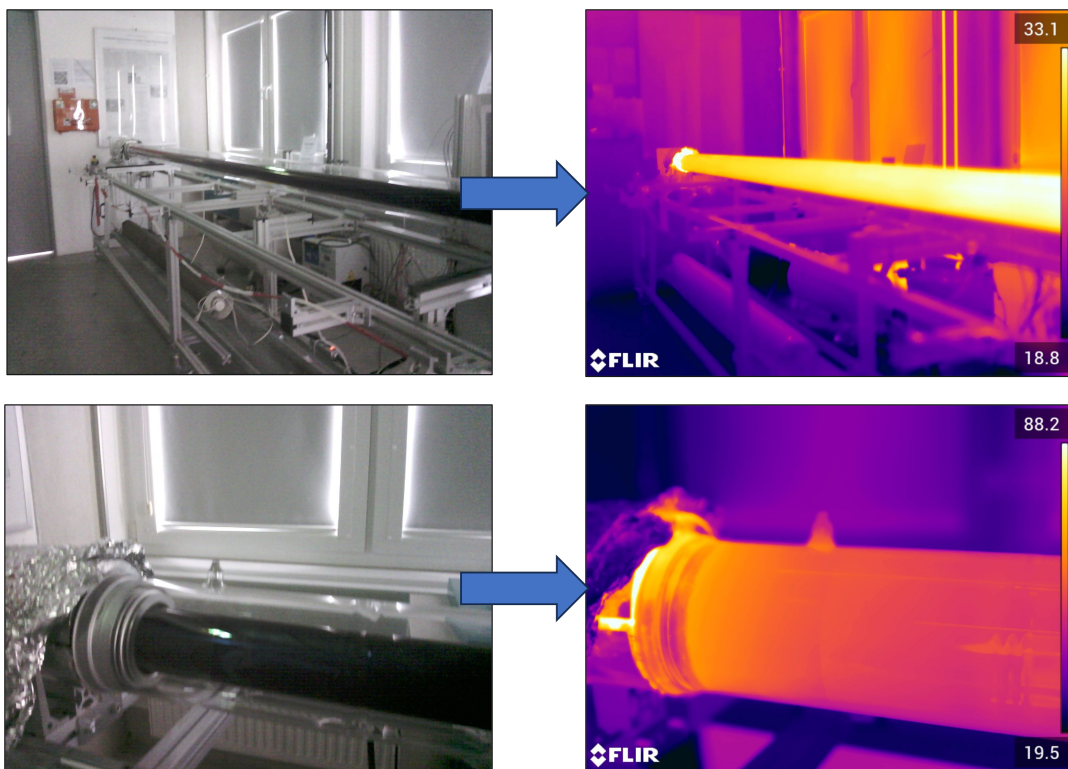


Abbildung 4.1.: Messergebnisse der Vorversuche – Messreihe Infrarot^[35]

In den aufgenommenen Wärmebildern erscheint das auf 250 °C erhitzte Receiverrohr in einer rot- bis weißlich glühenden Darstellung. In der Falschfarbendarstellung der

4. Bewertung der Vorversuchsergebnisse und Auswahl geeigneter Messtechnologien

Infrarotkamera werden Bereiche mit den höchsten Temperaturen typischerweise durch Farbverläufe von Rot bis Weiß codiert. Diese farbcodierten Zonen kennzeichnen thermische Hotspots innerhalb des Messfeldes und dienen der schnellen visuellen Identifikation lokal erhöhter Temperaturen.^[42]

Aus den Infrarotaufnahmen geht jedoch hervor, dass die Kamera hauptsächlich die Temperatur der äußeren Glasummantelung des Receiverrohrs erfasst und nicht die des dahinterliegenden Stahlrohrs. Die verwendete Infrarotkamera arbeitet im langwelligen Infrarotbereich mit einer spektralen Empfindlichkeit von $7\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$. Da Glas in diesem Wellenlängenbereich weitgehend opak ist, kann keine Temperaturmessung durch das Glas hindurch erfolgen. Um die Temperatur des innenliegenden Stahlrohrs durch die Glashülle hindurch zu erfassen, ist eine Infrarotkamera mit einer Empfindlichkeit bei $2,63\text{ }\mu\text{m}$ erforderlich, da Glas in diesem kurzwelligen Bereich eine höhere Transmissionsrate aufweist.^[34] Eine entsprechende Messung wurde auch im Solarfeld an einer Parabolrinnenanlage durchgeführt.



Abbildung 4.2.: Infrarot-Thermografie des Receiverrohrs in einer Parabolrinnenanlage auf der Plataforma Solar de Almería (PSA)^[35]

Diese Art der Messung ist mit einem hohen Installationsaufwand verbunden und erlaubt lediglich eine lokal begrenzte Erfassung der Temperatur im unteren Bereich des Stahlrohrquerschnitts. Darüber hinaus ist der Installationswinkel der Infrarotkamera in der Abbildung 4.2 für die Drainageüberwachung ungeeignet. Da die Kamera das Receiverrohr von unten erfasst, wird primär jener Querschnittsbereich abgebildet, in dem sich die Salzschnelze sammelt. Ein vollständiger Temperaturverlauf entlang des gesamten Rohrs kann unter diesen Bedingungen nicht abgebildet werden.

Für eine präzise Erfassung des Temperaturprofils ist eine frontale Ausrichtung der Kamera auf das Receiverrohr erforderlich, wie im Versuchsaufbau in Abbildung 3.2 dargestellt. Infrarotaufnahmen sind zudem erfahrungsgemäß anfällig für Reflexionen aus der Umgebung, die zu einer Verfälschung der Messdaten führen können. Um derartige Störeinflüsse zu minimieren, sollte die Kamera möglichst nah an der Messstelle positioniert werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die verwendete Infrarotkamera keine zuverlässige Erfassung des Temperaturverlaufs vom innenliegenden Stahlrohr ermöglicht. Grund hierfür sind die geringe Transmission des Glasrohrs im langwelligen Infrarotbereich sowie mögliche Störeinflüsse durch Umgebungsreflexionen. Eine Temperaturmessung durch Glas erfordert eine Infrarotkamera mit geeigneter spektraler Filterung im kurzwelligen IR-Bereich bei $2,63\text{ }\mu\text{m}$. Derartige Systeme sind jedoch mit sehr hohen Anschaffungskosten verbunden und gelten daher als wirtschaftlich nur eingeschränkt realisierbar.

Die im Solarfeld der Plataforma Solar de Almería (PSA) eingesetzte Infrarotkamera mit entsprechender Filterung bei $2,63\text{ }\mu\text{m}$ erfüllt die technischen Voraussetzungen zur Erfassung des Temperaturverlaufs des Stahlrohrs durch das Glas. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine frontale Ausrichtung der Kamera auf das Receiverrohr, um den gesamten Rohrquerschnitt erfassen zu können. Der in Abbildung 4.2 gezeigte Versuchsaufbau wurde im Rahmen eines Projekts außerhalb des SPOT-Vorhabens realisiert. Das Bild dient daher ausschließlich dem besseren Verständnis und der Veranschaulichung einer möglichen Feldinstallation der IR-Kamera.

4.1.2. Thermoelemente

Im Rahmen der Vorversuche wurden im Zuge der Messreihe mit Thermoelementen die im nachfolgenden Diagramm dargestellten Ergebnisse erzielt.

4. Bewertung der Vor Versuchsergebnisse und Auswahl geeigneter Messtechnologien

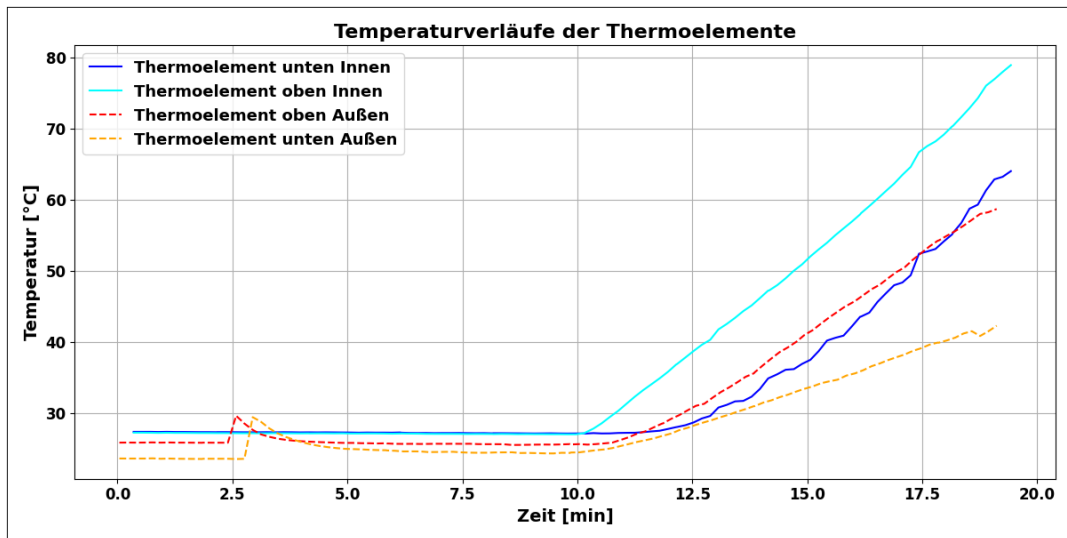


Abbildung 4.3.: Messergebnisse der Vorversuche - Messreihe Thermoelemente^[35]

Die dargestellten Kurven zeigen den zeitlichen Temperaturverlauf der einzelnen Messstellen. Den Temperaturverläufen zufolge erfasste das oberhalb, im Inneren des Receiverrohrs positionierte Thermoelement höhere Temperaturen als das untere Thermoelement. Die niedrigsten Temperaturen wurden hingegen von dem unten am Außenschale des Receiverrohrs angebrachten Thermoelement gemessen.

Die gemessenen Temperaturverläufe widersprechen den in Kapitel 3.3.2 formulierten Erwartungen. Aufgrund der Nähe der im unteren Bereich positionierten Thermoelemente zu den Heizpatronen wurde angenommen, dass diese höhere Temperaturwerte erfassen werden als die weiter oben angeordneten Sensoren.

Das beobachtete Verhalten lässt sich jedoch durch freie Konvektion erklären. Die von den Heizpatronen erwärmte Luft steigt nach oben und wird dabei von den höher gelegenen Thermoelementen erfasst. Infolgedessen zeigen diese höhere Temperaturwerte als die im unteren Bereich installierten Sensoren.

Dieser Effekt führt dazu, dass der Versuchsaufbau in Bezug auf die reale Anwendungssituation als nicht repräsentativ einzustufen ist.

Um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen, ist es erforderlich, zwei Receiverrohre miteinander zu verschweißen und das Innere der verbundenen Stahlrohre mit einem heißen, flüssigen Medium – beispielsweise heißem Wasser – zu durchströmen und zu erwärmen. Die Thermoelemente werden im Bereich der Schweißnaht installiert, sodass sie dort die lokale Temperaturentwicklung erfassen können.

4.1.3. Dehnungsmessstreifen

Nach dem Fertigstellen des Versuchsaufbaus (siehe Kapitel 3.3.3) wurde die Messung über das LabVIEW-Programm gestartet. Zu Beginn der Messung wurde der HCE-Support zunächst mit einer Masse von 20 kg belastet und anschließend wieder entlastet. Das daraus resultierende Messsignal ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

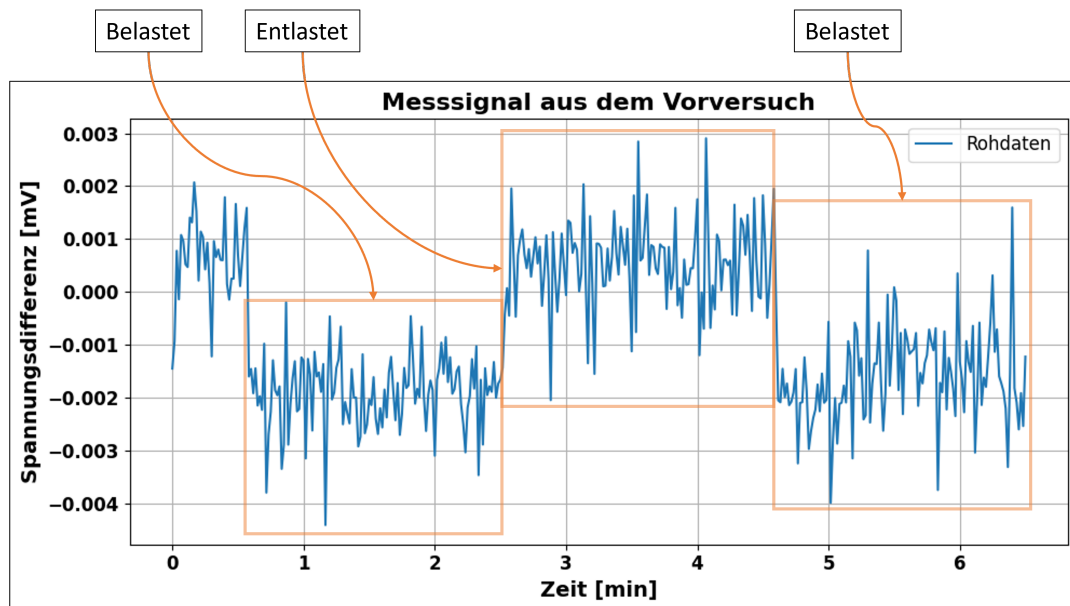


Abbildung 4.4.: Messergebnisse der Vorversuche – Messreihe Dehnungsmessstreifen^[35]

Das Messsignal zeigt die über die Zeit in Minuten aufgezeichnete Spannungsdifferenz der Wheatstone-Brücke in Millivolt. Bei einer Verformung des HCE-Supports infolge der Gewichtsbelastung wird der oben aufgeklebte Dehnungsmessstreifen auf Zug beansprucht und damit gestreckt, während der gegenüberliegend platzierte DMS auf Druck belastet und somit gestaucht wird. Diese mechanischen Dehnungen und Stauchungen führen zu einer Widerstandsänderung in den DMS, wodurch die Brücke aus dem Gleichgewicht gebracht wird. Die resultierende Spannungsdifferenz ist proportional zur Dehnung.

Zu Beginn der Messung befindet sich der HCE-Support in einem unbelasteten Zustand. Nach etwa 30 Sekunden ist eine signifikante Signalverschiebung nach unten zu erkennen, welche durch das Auflegen der 20 kg-Masse verursacht wurde. Nach ca. 2,5 Minuten wird die Masse entfernt (Entlastung), bevor sie ab Minute 4,5 erneut aufgelegt wird (Belastung).

Auffällig ist das kontinuierlich auftretende Signalrauschen, das die Unterscheidung zwischen den Belastungsphasen erschwert. Die Masse von 20 kg entspricht der Masse der Salzsämelze in einem vollständig gefüllten Receiverrohr. Aus dem Messsignal lässt sich ableiten, dass zwischen dem „leeren“ und dem „vollen“ Zustand grundsätzlich eine messbare Differenz besteht. Eine genaue Bestimmung von Zwischenständen bzw. Teillastzuständen ist aufgrund des hohen Rauschens jedoch nicht zuverlässig möglich.

Als Ergebnis dieser Messreihe lässt sich feststellen, dass mithilfe von Dehnungsmessstreifen eine grobe Unterscheidung zwischen leerem und vollständig gefülltem Receiverrohr möglich ist. Um jedoch verschiedene Füllstände zuverlässig detektieren zu können, ist eine verbesserte Signalaufösung sowie eine Reduktion des Rauschens erforderlich.

4.2. Vergleich und Bewertung der Messtechnologien

Auf Grundlage der in den Vorversuchen gewonnenen Ergebnisse lassen sich die eingesetzten Messtechnologien – Infrarotkamera, Thermoelemente und Dehnungsmessstreifen (DMS) – hinsichtlich ihrer Eignung zur Überwachung des Drainagezustands von Receiverrohren systematisch miteinander vergleichen. Zu diesem Zweck wurden Vergleichskriterien festgelegt, die in der nachfolgenden Tabelle dargestellt sind.

Die Tabelle 4.1 zeigt den qualitativen Vergleich der Messtechnologien basierend auf den in den Vorversuchen gesammelten Erkenntnissen. So zeigte sich beispielsweise beim Kriterium *Installationsaufwand*, dass die DMS-Messreihe den höchsten Aufwand verursachte, während der Einsatz der Infrarotkamera vergleichsweise unkompliziert war.

Beim Vergleichskriterium *Messaufösung / Genauigkeit* haben die DMS und die Infrarotkamera schlechtere Ergebnisse aufgewiesen als die Thermoelemente. Die DMS-Signale waren durch ein relativ hohes Rauschniveau beeinträchtigt, während bei der Infrarotkamera Umgebungsreflexionen zu fehlerhaften Messergebnissen führten. Thermoelemente hingegen lieferten präzise und stabile Temperaturwerte.

Besonders relevant für die Beurteilung der Eignung zur Drainageüberwachung sind jedoch die Kriterien *Realitätsnähe des Versuchsaufbaus* sowie die *Eignung für eine kontinuierliche Überwachung*. Anhand dieser Kriterien wurden die Messdaten im Hinblick auf ihre Übertragbarkeit auf reale Solarfeldbedingungen bewertet.

4. Bewertung der Vor Versuchsergebnisse und Auswahl geeigneter Messtechnologien

Tabelle 4.1.: Qualitativer Vergleich der Messtechnologien zur Drainageüberwachung

Vergleichskriterien	Thermoelemente	DMS	Infrarotkamera
Installationsaufwand	••	•••	•
Kosten im Vorversuch	•	••	•
Messaufösung / Genauigkeit	•••	••	••
Realitätsnähe des Versuchsaufbaus (Zielgrößenerfassung)	•	•••	•
Eignung für kontinuierliche Überwachung	•••	•••	•

Bewertungsskala: ••• = hoch •• = mittel • = gering

Bei der Messreihe mit Thermoelementen konnten zwar exakte lokale Temperaturen erfasst werden, jedoch waren die Ergebnisse durch thermische Konvektionen verfälscht und entsprachen nicht den realen Bedingungen im Solarfeld. Die Infrarotkamera hingegen verfehlte aufgrund der Beschränkungen im Versuchsaufbau das eigentliche Messziel. Die erfassten Temperaturen des Glasrohrs stehen nicht in direktem Zusammenhang mit dem Füllstand des Receiverrohrs, sodass keine verwertbaren Informationen zur Drainage abgeleitet werden konnten. Zudem ist ein kontinuierlicher Einsatz der Kamera im Freifeld wetterabhängig und somit nur eingeschränkt praktikabel.

Einzig die DMS-Messtechnologie lieferte realitätsnahe Ergebnisse. Es konnte zuverlässig zwischen „leer“ und „voll“ unterschieden werden. Um jedoch eine präzise und kontinuierliche Drainageüberwachung zu gewährleisten, ist eine Optimierung des Signals sowie eine Reduktion des Rauschens erforderlich.

Aus diesen Gründen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die DMS-Technologie als bevorzugte Messmethode betrachtet. Die anschließenden Kapitel widmen sich der Weiterentwicklung dieser Technologie und der Verbesserung ihrer Messqualität.

5. Vertiefende Untersuchung und Optimierung der ausgewählten Messtechnologie

In diesem Kapitel wird die ausgewählte Messtechnologie eingehend untersucht und es werden Optimierungsmaßnahmen vorgestellt. Hierzu werden zunächst durch eine Spannungsanalyse die optimalen Messstellen zur Signalsoptimierung identifiziert, anschließend die Füllstandsmessung unter Variation unterschiedlicher Massen analysiert und abschließend ein Drainagevorgang simuliert.

5.1. Signaloptimierung durch Spannungsanalyse

Im Rahmen der Vorversuche der DMS-Messreihe wurde zur Erprobung des Dehnungsmessstreifens als potenzielle Messtechnologie zur Drainageüberwachung zunächst eine willkürliche Messstelle am HCE-Support ausgewählt. Um die für die DMS-Messung am besten geeignete Position zu bestimmen, wurde der HCE-Support anschließend in der CAD-Software Autodesk Inventor modelliert und einer FEM-Analyse unterzogen. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

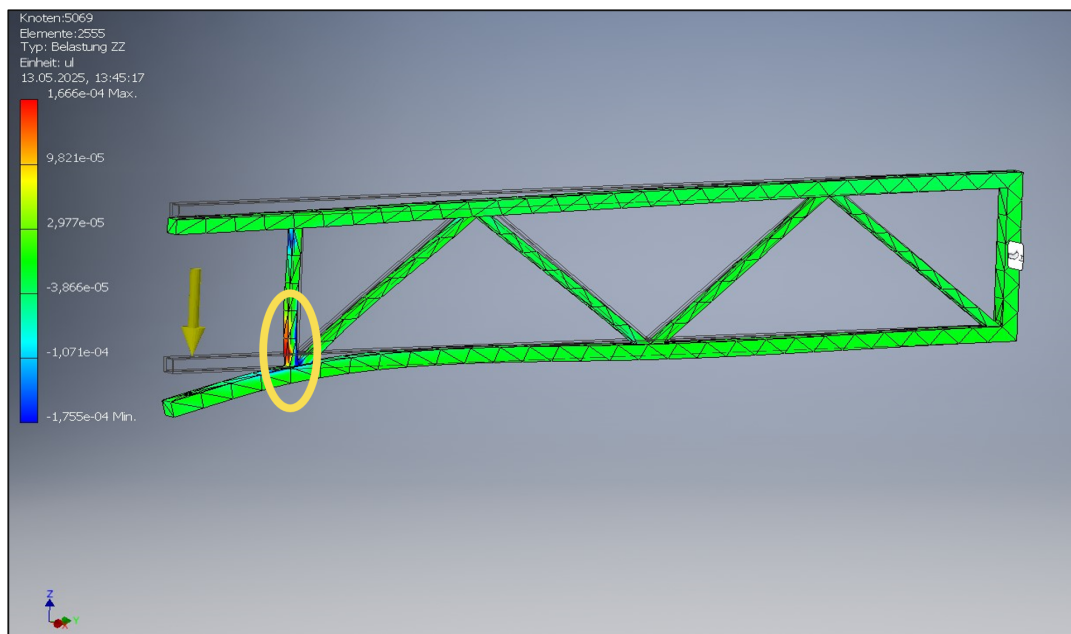


Abbildung 5.1.: Spannungsanalyse des HCE-Supports mit markierter Messstelle^[35]

Die in der Abbildung markierte Position weist die größte Dehnung auf, wenn der HCE-Support mit einer Masse von 20 kg belastet wird.

Aus diesem Grund wurde die DMS-Halbbrücke an dieser Stelle angebracht. Das Messergebnis ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

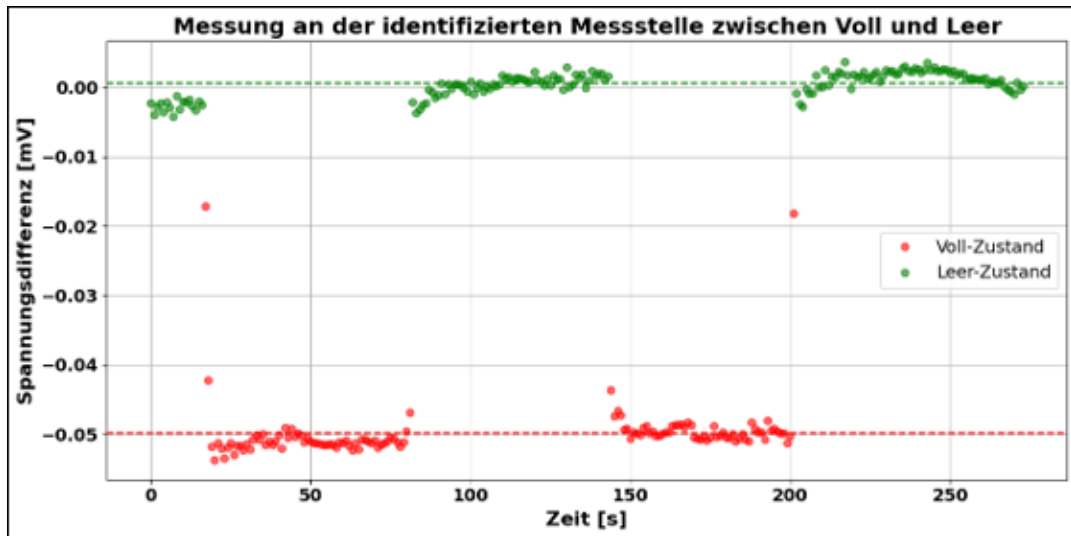


Abbildung 5.2.: Messung zwischen Voll- und Leerezustand an der durch die FEM-Analyse identifizierten Messstelle^[35]

Die grün dargestellten Messpunkte zeigen die Daten im unbelasteten Zustand des HCE-Supports, während die roten Punkte den mit einer Masse von 20 kg belasteten Zustand repräsentieren.

Das Punktediagramm veranschaulicht ein deutlich verbessertes und eindeutiges Messsignal. Im Vergleich zu Abbildung 4.4 lässt sich eine klare Differenzierung zwischen Voll- und Leerezustand erkennen. Die Messung an der Stelle mit der größten mechanischen Dehnung führte zu signifikanten Sprüngen im Messsignal zwischen Voll- und Leerezustand, was eine entscheidende Optimierung des Signals darstellt. Durch diese verstärkten Signaländerungen zwischen den beiden Zuständen wird das vorhandene Rauschen im Signal nahezu vernachlässigbar.

Durch diese Signalsoptimierung ist eine verbesserte Erkennung unterschiedlicher Füllstände möglich. Dies wird im nachfolgenden Kapitel näher untersucht.

5.2. Quantitative Füllstandserfassung unter Variation der Masse

Um zu überprüfen, ob mit der aktuellen Messtechnik an der identifizierten Messstelle unterschiedliche Füllstände erfasst werden können – und nicht nur zwischen Voll- und Leerezustand unterschieden wird –, wurde eine Messreihe mit verschiedenen Gewichten

durchgeführt. Hierfür wurde der HCE-Support mit Massen von bis zu 20 kg belastet. Die Ergebnisse dieser Messung sind im Folgenden dargestellt.

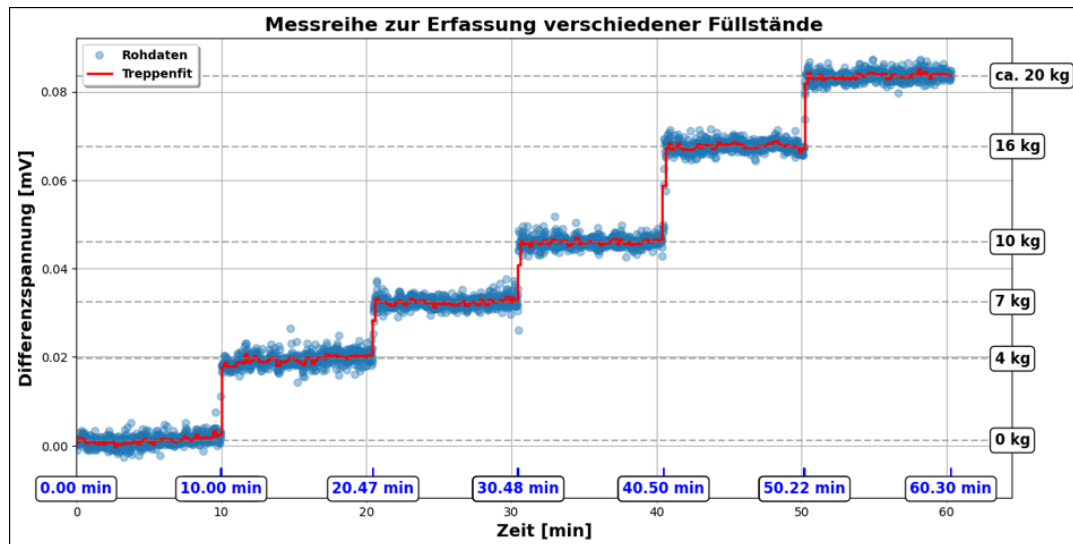


Abbildung 5.3.: Signalverlauf bei Belastung des HCE-Supports mit unterschiedlichen Massen^[35]

Im Rahmen dieser Messreihe wurden fünf verschiedene Lastmassen mit unterschiedlichen Gewichten vorbereitet. Diese Massen wurden nacheinander in aufsteigender Reihenfolge am HCE-Support aufgehängt. Jede Last wurde für einen Zeitraum von etwa zehn Minuten konstant gehalten, um eine stabile Messung des Signals zu gewährleisten.

Der Verlauf des Messsignals zeigt deutlich, dass jede Veränderung der angehängten Masse zu einer entsprechenden Änderung im Signalverhalten führt. Dies bedeutet, dass die Messtechnik in der Lage ist, selbst kleine Änderungen im Gewicht präzise zu erfassen und abzubilden. Die hohe Auflösung der Messmethode ermöglicht somit eine feine Differenzierung zwischen verschiedenen Lastzuständen.

Daraus lässt sich ableiten, dass die aktuell eingesetzte Messtechnik an der zuvor identifizierten Messstelle mit der höchsten Dehnung zuverlässig verschiedene Füllstände erkennen kann. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Wahl der Messstelle sowie die Signalqualität eine entscheidende Grundlage für die genaue Füllstandsmessung darstellen.

5.3. Simulation eines Drainagevorgangs

Im Rahmen dieser Messreihe wurde ein Beutel mit einer Wassermasse von etwa 20 kg vorbereitet. Ziel dieser Versuchsanordnung ist es, einen Drainagevorgang zu visualisieren und dessen Einfluss auf das Messsignal zu untersuchen.

Der Beutel wurde am HCE-Support aufgehängt und an der Unterseite mit einem kleinen Loch versehen, wodurch das Wasser langsam aus dem Beutel abfließen kann. Während dieses Vorgangs wurde das Messsignal kontinuierlich aufgezeichnet, um die Veränderungen im Füllstand des Beutels und die damit verbundenen mechanischen Dehnungen am HCE-Support zu erfassen.

Die aufgezeichneten Daten sind im folgenden Diagramm dargestellt und veranschaulichen den Verlauf des Drainageprozesses anhand der Signaländerungen.

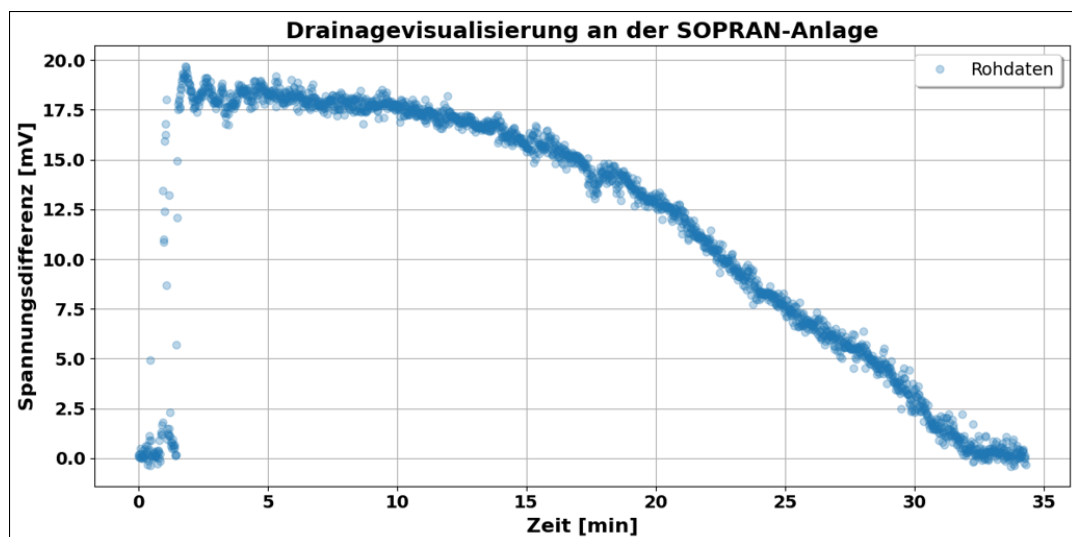


Abbildung 5.4.: Signaländerung am HCE-Support während des Ablaufs von Wasser aus einem 20 kg Beutel^[35]

Das Diagramm 5.4 zeigt, dass zu Beginn der Messung sich der HCE-Support im unbelasteten Zustand befand. Mit dem Aufhängen der rund 20 kg schweren Wassermasse am HCE-Support wurde ein deutlicher Signalsprung nach oben aufgezeichnet, der die plötzliche Belastung widerspiegelt. Nachdem die Masse angebracht war, wurde an der Unterseite des Wasserbeutels ein Loch geöffnet, sodass das Wasser langsam abfließen kann. Durch den fortschreitenden Wasserablauf und die

damit einhergehende Entlastung des HCE-Supports sinkt das Messsignal allmählich ab, bis es schließlich bei 0 mV konstant geblieben ist.

Zu Beginn ist die Abnahme des Signals relativ flach verlaufen. Im weiteren Verlauf hat die Steigung jedoch zugenommen, was darauf zurückzuführen ist, dass während der Messreihe zusätzliche Löcher in den Beutel geschnitten wurden. Dies beschleunigte den Wasserabfluss und führte zu einer schnelleren Gewichtsreduzierung.

Das zugehörige Diagramm verdeutlicht, wie das Messsignal nach vollständigem Ablauf des Wassers auf seinen Ausgangswert bei 0 mV zurückkehrt. Damit konnte nachgewiesen werden, dass die entwickelte Messtechnik eine präzise und zuverlässige Überwachung des Füllstands der Receiverrohre mit Salzschmelze ermöglicht.

Erwähnenswert ist, dass die aktuell entwickelte Messtechnik nur an eine einzelne DMS-Halbbrücke angeschlossen werden kann. Das bedeutet, dass derzeit lediglich die Belastung eines einzelnen HCE-Supports erfasst werden kann. Um jedoch den Füllstand der Receiverrohre eines gesamten Solarfelds oder eines Loops zu überwachen, muss ein geeignetes Konzept entwickelt werden, das die gleichzeitige Signalerfassung mehrerer Messstellen ermöglicht. Darüber hinaus ist die Langzeitstabilität des Messsignals von Bedeutung. Es muss untersucht werden, ob sich das Signal über längere Zeiträume durch Temperatureinflüsse, Materialermüdung oder Drift verändert und wie diese Effekte gegebenenfalls kompensiert werden können.

6. Konzeption und Auslegung des finalen Messsystems

In diesem Kapitel wird die Konzeption und Auslegung des finalen Messsystems auf Basis der HPS2-Anlage detailliert dargestellt. Zunächst erfolgt die Berechnung der Mindestanzahl an Messstellen, die notwendig sind, um eine umfassende Überwachung zu gewährleisten. Darauf aufbauend wird die Systemarchitektur mit den wesentlichen Komponenten beschrieben, die für den Messbetrieb vorgesehen sind. Abschließend wird das Konzept zur Integration der Messtechnik im Solarfeld vorgestellt, wobei die planerischen und technischen Rahmenbedingungen für eine zukünftige Implementierung erläutert werden. Ergänzend wird eine Wirtschaftlichkeits- und Kostenabschätzung des finalen Messkonzepts vorgenommen.

6.1. Berechnung der Mindestanzahl an Messstellen für die Überwachung der HPS2-Anlage

Um die geeigneten Messgeräte auszuwählen, muss zunächst die Mindestanzahl an Messstellen für die HPS2-Anlage ermittelt werden, um das gesamte Loop vollständig überwachen zu können.

Wie bereits in Kapitel 2.5 beschrieben, sind die Kollektoren mit einem Gefälle von 0,15 % angeordnet. Die Receiverrohre besitzen einen Innendurchmesser von 64 mm. Aus dem Verhältnis von Rohrdurchmesser zu Gefälle lässt sich die Länge bestimmen, über die sich der Salzschnelzespiegel bei einem Abfluss von „leerem“ zu „vollem“ Punkt erstreckt. Diese Länge $L_{\text{Leer-Voll}}$ ergibt sich aus:

$$L_{\text{Leer-Voll}} = \frac{d}{i}$$

mit

d	Innendurchmesser des Receiverrohrs	64 mm = 0,064 m
i	Gefälle der Kollektoren	0,15 % = 0,0015

Daraus folgt:

$$L_{\text{Leer-Voll}} = \frac{0,064 \text{ m}}{0,0015} \approx \underline{\underline{42,67 \text{ m}}}$$

Die folgende Abbildung veranschaulicht diesen Zusammenhang.

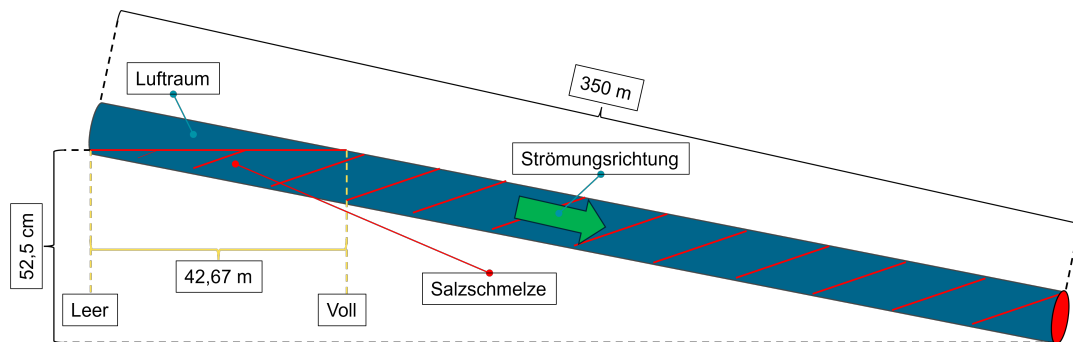


Abbildung 6.1.: Schematische Darstellung einer Loop-Hälfte der HPS2-Anlage mit 350 m Länge der verschweißten Receiverrohre und dem Gefälle von 0,15 %^[35]

In der Abbildung ist eine Loop-Hälfte der HPS2-Anlage schematisch dargestellt. Die blaue Linie zeigt die gesamte Länge der aneinandergereihten Receiverrohre von etwa 350 m. Durch das Gefälle von 0,15 % ergibt sich ein Höhenunterschied von etwa 52,5 cm zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Punkt der Loop-Hälfte.

Beim Einleiten der Drainage entsteht im Rohr zunächst ein „leerender Punkt“, also eine Stelle, an der die Salzschnelze vollständig abgelaufen ist. Von diesem leeren Punkt bis zum nächsten „vollen Punkt“ mit komplett gefülltem Rohrquerschnitt entsteht ein ansteigender Salzschnelzespiegel. Diese Strecke entspricht in etwa der berechneten Länge von 42,67 m.

Damit das gesamte Solarfeld mit DMS vollständig überwacht werden kann, muss an jedem „vollen Punkt“ beziehungsweise vollem Rohrquerschnitt eine Messstelle installiert werden. Diese Messstelle erfasst die durch die Masse der aufgestauten Salzschnelze verursachte Dehnung.

Die Mindestanzahl der Messstellen k lässt sich daher folgendermaßen berechnen:

$$k = \frac{L_{\text{Loop-Hälfte}}}{L_{\text{Leer-Voll}}} = \frac{350 \text{ m}}{42,67 \text{ m}} \approx 8,2$$

Das entspricht also eine Mindestanzahl von:

$$k = 9 \quad \text{Messstellen}$$

Das bedeutet, dass für eine vollständige Überwachung der Loop-Hälfte mindestens 9 Messstellen erforderlich sind. Für den gesamten Loop der HPS2-Anlage müssen somit insgesamt 18 Messstellen vorgesehen werden.

6.2. Systemarchitektur und Komponenten

Nachdem die erforderliche Anzahl der Messstellen berechnet wurde, besteht der nächste Schritt darin, eine geeignete Systemarchitektur zu entwickeln, die in der Lage ist, die Messsignale von 18 Messstellen zu verstärken, zu digitalisieren und zu speichern.

Für diesen Zweck wurden die 16-Kanal-Signalverstärker MX1615B-R aus der SomatXR-Reihe der Firma HBK ausgewählt.^[28] An jedes dieser Verstärkermodule können bis zu 16 Messstellen angeschlossen werden. Die Module ähneln in ihren Spezifikationen dem ClipX-System.

Ein großer Vorteil der gewählten Verstärker besteht darin, dass kein separater Schaltschrank erforderlich ist, da sie gemäß der Schutzarten IP65/IP67 nach EN

60529 geschützt sind. Dies ermöglicht den Einsatz direkt im Außenbereich des Feldes ohne zusätzlichen Schutz.

Für die gleichzeitige Überwachung aller Messstellen wird die Datenerfassungssoftware CATMAN-Easy ebenfalls von der Firma HBK verwendet.^[26] Diese Software ermöglicht die Visualisierung der Messdaten und eine einfache Überwachung der Signalqualität.

Die folgende Abbildung zeigt die Systemarchitektur sowie die verwendeten Komponenten im Überblick.

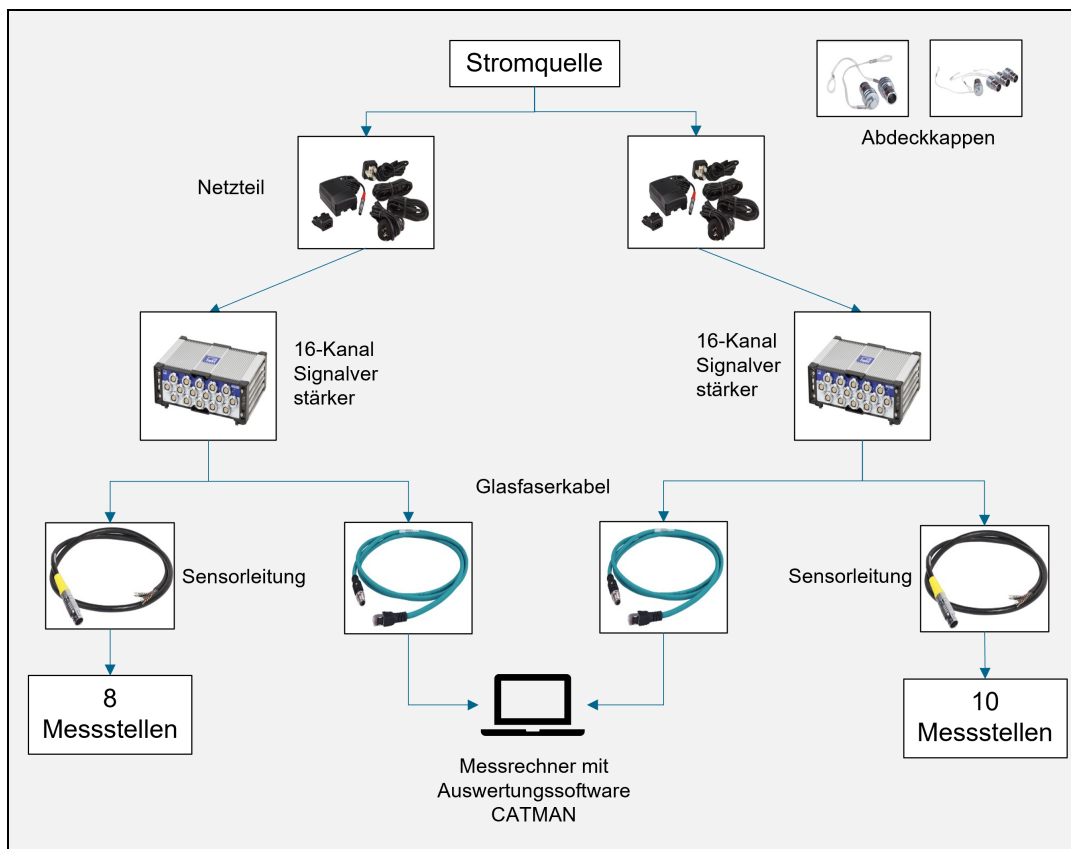


Abbildung 6.2.: Systemarchitektur und Komponenten des finalen Messsystem^[35]

Aufgrund der Anzahl der erforderlichen Messstellen werden zwei Signalverstärker benötigt. Nicht belegte Anschlüsse der Module müssen mit Abdeckklappen verschlossen werden, um den Schutz bei Verwendung im Außenbereich zu gewährleisten.

Diese Verstärkermodule werden jeweils über Netzteile vom Typ NTX002 mit

Strom versorgt.^[25] Die Messsignale der DMS-Halbbrücken werden über geeignete Sensorleitungen vom Typ KAB183-1 an die Signalverstärker weitergeleitet.^[27]

An den ersten Verstärker sind acht, am zweiten zehn DMS-Halbbrücken angeschlossen, abhängig von der jeweiligen Position der Verstärker (siehe Kapitel 6.3). Für jede DMS-Halbbrücke ist eine eigene Sensorleitung erforderlich. Die maximale Länge dieser Leitungen beträgt 100 m, was bei der Planung der Messtechnik-Integration berücksichtigt werden muss.

Die vom Signalverstärker verstärkten und digitalisierten Messsignale werden über Glasfaserkabel an den Messrechner übertragen. Auf dem Messrechner läuft die Datenerfassungssoftware CATMAN-Easy, welche die Messdaten für jede Messstelle in Form von Diagrammen visualisiert und somit eine übersichtliche Überwachung ermöglicht. Über eine entsprechende Schnittstelle können die Messdaten zudem in die übergeordnete Leittechnik des Kraftwerks integriert werden.

In der folgenden Tabelle ist die Stückliste der für die Systemarchitektur vorgesehenen Komponenten aufgeführt.

Tabelle 6.1.: Stückliste der Komponenten für das finale Messsystem

Menge	Komponente	Beschreibung
2	Netzteile	Versorgungsspannung 24 V
2	Signalverstärker	MX1615B-R, 16-Kanal Signalverstärker der Reihe SomatXR
2	Glasfaserkabel	Länge: 100 m
18	Sensorleitungen	6 × 100 m, 8 × 60 m, 4 × 20 m
1	CATMAN Easy	–
1	Messrechner	Messrechner mit installierter CATMAN Easy Software
14	Abdeckklappen	Zum Verschließen der offenen Kanäle am Signalverstärker
36	Dehnungsmessstreifen	Pro Messstelle zwei DMS

6.3. Planung der Messtechnik-Integration im Solarfeld

Nach der Erstellung der Systemarchitektur und der Auswahl der Komponenten wird im Folgenden die Integration des Messkonzepts in das Solarfeld der HPS2-Anlage beschrieben.

Wie in Kapitel 6.1 berechnet, muss pro Loop-Hälfte nach jeweils 42,67 m eine Messstelle vorgesehen werden. Diese exakte Länge lässt sich jedoch aufgrund der festen Positionen der HCE-Supports im Loop nicht einhalten.

Bei einer Gesamtlänge einer Loop-Hälfte von rund 350 m und einer Receiverrohrlänge von 4,06 m ergibt sich eine Anzahl von 92 Receivern. Da sich zwischen den Receivern 93 HCE-Supports befinden, wird die Platzierung der Messstellen an die vorhandene Struktur angepasst. Konkret bedeutet dies, dass etwa an jedem elften HCE-Support eine Messstelle vorgesehen wird. Dies entspricht einem Abstand von 41,8 m zwischen zwei Messstellen.

Die folgende Abbildung verdeutlicht die Integration des Messkonzepts in den Loop der HPS2-Anlage.

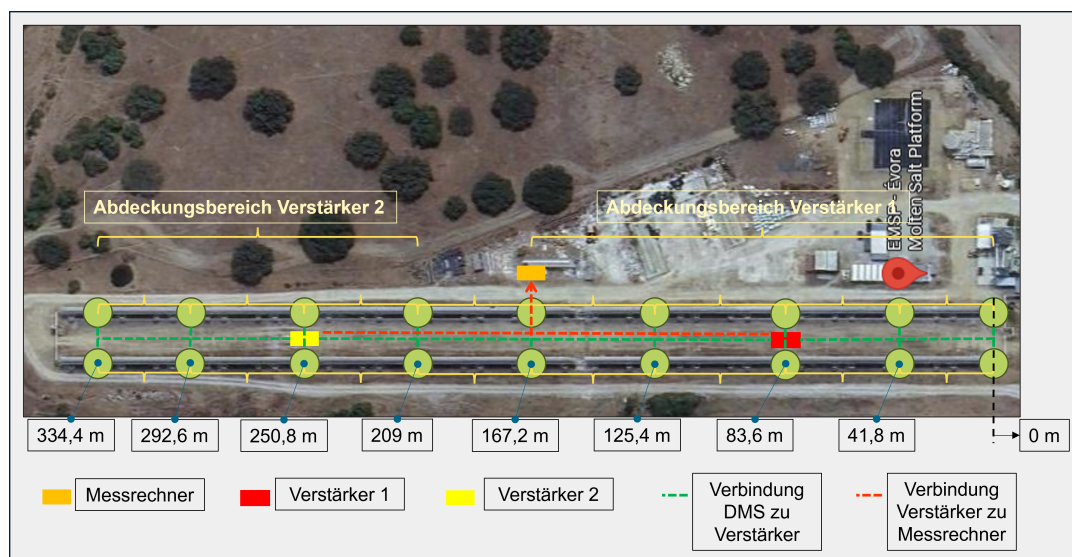


Abbildung 6.3.: Integration der Messstellen im Loop der HPS2-Anlage gemäß dem entwickelten Messkonzept^[35]

Die hellgrünen Punkte in der Abbildung markieren die 18 Messstellen. Von jeder Messstelle führt eine gestrichelte grüne Linie zu Verstärker 1 (rotes Rechteck) oder

zu Verstärker 2 (gelbes Rechteck). Diese grünen Linien stellen die Sensorleitungen dar, die die Messsignale von den Messstellen zu den jeweiligen Verstärkern übertragen. Die oberen acht Messstellen werden von Verstärker 2 erfasst, während die unteren zehn Messstellen von Verstärker 1 überwacht werden. Damit sind die jeweiligen Abdeckungsbereiche der beiden Verstärker festgelegt.

Ausgehend von einem Nullniveau am Beginn des Solarfeldes wurde Verstärker 1 in einem Abstand von 81,2 m und Verstärker 2 in einem Abstand von 243,6 m positioniert. Die Platzierung berücksichtigt die maximale zulässige Länge der Sensorleitungen von 100 m. Dabei ist ein zusätzlicher Puffer eingeplant, um eine ordnungsgemäße Kabelverlegung in den Kabelkanälen des Solarfeldes zu ermöglichen sowie die Montage an den HCE-Supports zu erleichtern.

Wichtig ist, dass die Sensorleitungen nicht unter Zugbelastung stehen, da dies zu Messungenauigkeiten führen kann.

Die rot gestrichelte Linie in der Abbildung stellt die Verbindung zwischen den Verstärkern und dem Messrechner über ein Glasfaserkabel dar. Für das Glasfaserkabel besteht keine Längenbeschränkung, was eine flexible Positionierung des Messrechners im Feld ermöglicht.

6.4. Wirtschaftlichkeit / Kostenabschätzung des finalen Messkonzepts

Nach der Festlegung der Systemarchitektur und der Auswahl der Komponenten ist es sinnvoll, die zu erwartenden Kosten für die Umsetzung des Messkonzepts zu betrachten. Die Gesamtkosten für die in der Stückliste aufgeführten Komponenten belaufen sich auf etwa 55.000 €. Diese Kalkulation basiert auf einer einheitlichen Sensorleitungslänge von 100 m pro Leitung. Da die Sensorleitungen einen wesentlichen Anteil von rund 50 % an den Gesamtkosten haben, beeinflusst ihre Länge den Gesamtpreis maßgeblich. Werden die Sensorleitungen hingegen feldspezifisch – wie in der Stückliste angegeben – in den tatsächlich benötigten Längen (100 m, 60 m und 20 m) bestellt, lässt sich der Gesamtpreis deutlich reduzieren.

Es ist zudem zu beachten, dass die genannten 55.000 € ausschließlich die in der Stückliste aufgeführten Komponenten abdecken. Die Kosten für die Installation der Messtechnik im Feld sind darin nicht enthalten und müssen separat kalkuliert und zur Gesamtsumme addiert werden.

Aufgrund der hohen Kosten eignet sich das vorgestellte Messkonzept in erster Linie für wissenschaftliche Anwendungen, bei denen höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit

erforderlich sind. Für den kommerziellen Einsatz in Solarfeldern wäre die Umsetzung in dieser Form dagegen zu kostenintensiv. Daher sollte für diesen Anwendungsbereich eine kostengünstigere Lösung in Betracht gezogen werden. Eine mögliche Alternative stellt ein Arduino-basiertes Messsystem dar, das im folgenden Kapitel näher beschrieben wird.

7. Arduino-basierte Lösung für kommerziellen Anlagen

In diesem Kapitel wird die Arduino-basierte Lösung für die Überwachung kommerzieller Solarfelder vorgestellt. Es werden die eingesetzten Komponenten und deren technische Spezifikationen beschrieben, die elektrische Verschaltung erklärt sowie die Signalverarbeitung und Datenübertragung erläutert. Anschließend werden exemplarische Messdaten dargestellt und ausgewertet. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung der Lösung, einschließlich Vor- und Nachteilen sowie Optimierungsmöglichkeiten.

7.1. Beschreibung der eingesetzten Komponenten

Als kostengünstige Alternative zu kommerziellen Messsystemen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine arduino-basierte Messtechnik für den Einsatz in kommerziellen Solaranlagen entwickelt. Für die Umsetzung wurden die folgenden Komponenten ausgewählt:

- ESP32-Entwicklungsboard
- Load Cell 2 Click
- DMS-Halbbrücke
- Programmierumgebung Arduino IDE

Das ESP32-WROOM-32 ist ein Dual-Core-Mikrocontroller mit integriertem Wi-Fi- und Bluetooth-Modul. Er bietet zahlreiche digitale und analoge Schnittstellen sowie stromsparende Betriebsmodi, wodurch er sich besonders für IoT-Anwendungen (Internet of Things) eignet.^[38] Die integrierte WLAN-Funktionalität ermöglicht die direkte Einbindung in bestehende Netzwerke, ohne dass zusätzliche Hardware erforderlich ist.

Das Load Cell 2 Click-Modul dient als präzise Schnittstelle zwischen den eingesetzten DMS und der Datenverarbeitungseinheit, in diesem Fall dem ESP32. Es basiert auf dem NAU7802-Analog-Digital-Wandler, der speziell für den Anschluss von Brückensensoren wie DMS entwickelt wurde. Der integrierte programmierbare Verstärker (PGA) ermöglicht eine Verstärkung der niederpegeligen Spannungssignale der DMS-Halbbrücke im Bereich von 1 bis 128. Anschließend werden die Signale mit einer Auflösung von bis zu 24 Bit digitalisiert.

Zur Minimierung von Netzstörungen verfügt das Modul über einen simultanen 50/60 Hz-Kerbfilter. Dieser verbessert die Signalqualität insbesondere bei Messungen unter realen Umgebungsbedingungen. Die Kommunikation mit dem Mikrocontroller erfolgt über eine I²C-Schnittstelle, was eine zuverlässige Datenübertragung sicherstellt.^[33]

Bei der Sensorik wird derselbe Typ DMS-Halbbrücke wie bei der Lösung mit ClipX verwendet, um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse sicherzustellen. Die Auswertung der Messdaten erfolgt mithilfe der Arduino IDE. Hierzu wurde ein spezifisches Programm entwickelt, das eine Datenübertragung über eine vom ESP32 generierte IP-Adresse ermöglicht. Der Mikrocontroller verbindet sich automatisch mit dem WLAN-Netzwerk und stellt die Messwerte auf einem integrierten Webserver bereit.

Befindet sich das Endgerät (z. B. Smartphone oder Messrechner) im selben WLAN wie der ESP32, genügt die Eingabe der IP-Adresse in einem beliebigen Webbrowser, um die automatisch generierte Webseite aufzurufen. Dort können die Messdaten in csv-Formaten heruntergeladen und für die weitere Analyse gespeichert werden.

7.2. Elektrische Verschaltung der eingesetzten Komponenten

Nachdem die erforderlichen Komponenten für die Messtechnik festgelegt und der Programmcode erstellt wurde (der verwendete Code befindet sich im Anhang), ist der nächste Schritt die elektrische Verschaltung der DMS mit dem Load Cell 2 Click-Modul. Ziel ist es, eine Wheatstone-Brückenschaltung aufzubauen, sodass die Messdaten korrekt vom Verstärker an den ESP32 übertragen werden können.

Zur Umsetzung einer Halbbrücke mit den verwendeten 3-Leiter-DMS wird das folgende Schaltbild zugrunde gelegt:

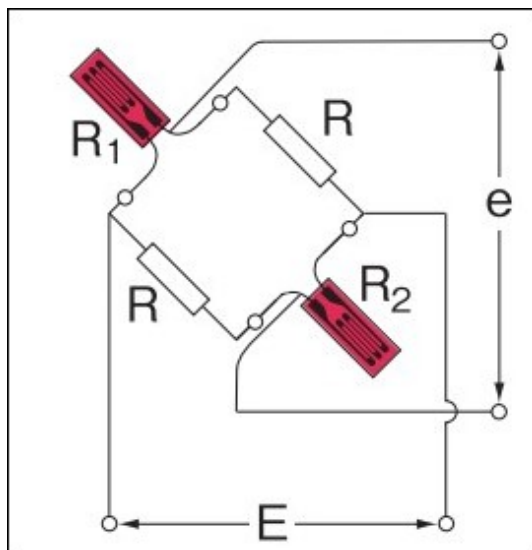


Abbildung 7.1.: Schaltbild der Wheatstone-Halbbrücke mit DMS^[43]

Das Schaltbild zeigt vier Widerstände, darunter zwei variable DMS (R_1 und R_2) und zwei feste ohmsche Widerstände (R). Alle Widerstände besitzen einen Wert von $120\ \Omega$. Das große E kennzeichnet die Versorgungsspannung von $3,3\text{ V}$, während das kleine e den Anschluss am Load Cell 2 Click-Modul markiert, an dem die Spannungsdifferenz

in Abhängigkeit von der Belastung der DMS gemessen wird. Diese Differenz wird anschließend als digitaler Wert an den ESP32 übertragen.

Zur Veranschaulichung der Verschaltung wird beispielhaft eine Verbindung zwischen einem Load Cell Click-Modul (dessen Aufbau dem Load Cell 2 Click sehr ähnlich ist) und dem ESP32 in der folgenden Abbildung dargestellt.

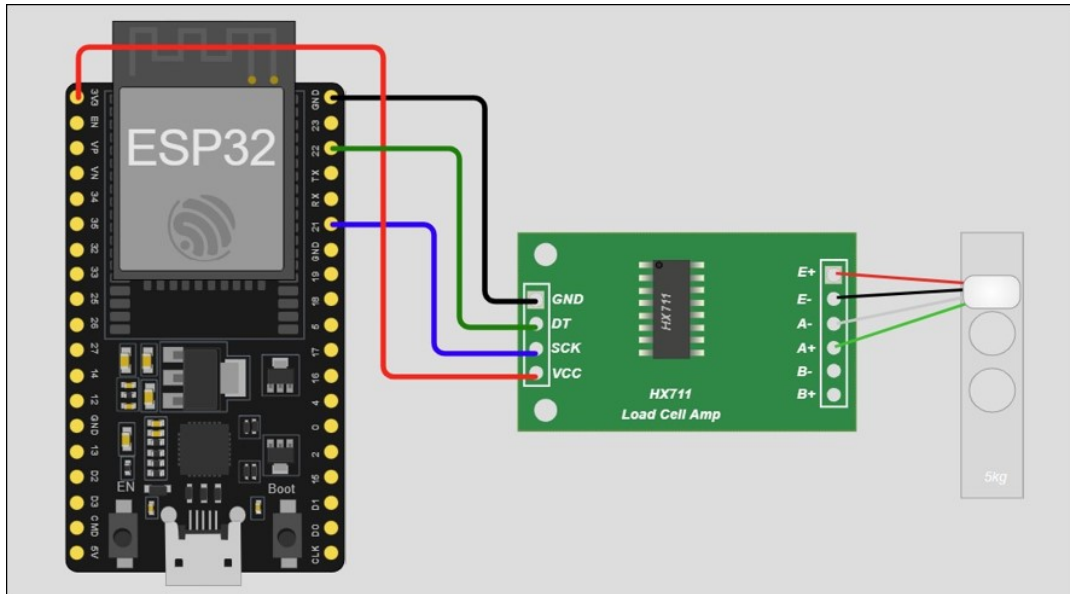


Abbildung 7.2.: Beispielhafte Verschaltung des Load Cell Click-Moduls mit dem ESP32^[35]

Nach Aufbau der Wheatstone-Brücke wird diese über die Pins E+ und E- mit der Versorgungsspannung verbunden. Über die Pins A+ und A- wird die Spannungsdifferenz der Brücke gemessen. Der HX711 (bzw. NAU7802 beim Load Cell 2 Click) wird über VCC mit der Betriebsspannung von 3,3 V versorgt. Durch das Verbinden der Masseleitungen (GND) von ESP32 und Load Cell-Modul wird eine gemeinsame Bezugsspannung hergestellt, die für eine korrekte Messung und Signalübertragung entscheidend ist.

Die digitalen Messwerte des HX711 werden über den Data-Pin (DT) an den ESP32 übertragen. Über den Serial Clock-Pin (SCK) wird der Takt der Datenübertragung gesteuert. Zusätzlich kann über SCK die Verstärkung (Gain) des HX711 eingestellt werden.

7.3. Durchführung und Auswertung einer Beispielmessung

Nachdem die Komponenten der Messtechnik wie in Kapitel 7.2 verschaltet wurden, wurde eine Messung unter Verwendung einer 20 kg Masse durchgeführt. Diese Messung entspricht der Vorgehensweise der ClipX-Messtechnik (siehe Kapitel 3.3.3). Hierbei wurden die DMS-Halbbrücken an den am stärksten belasteten Stellen des HCE-Supports installiert.

Das während der Messung aufgezeichnete Signal ist in Abbildung 7.3 dargestellt.

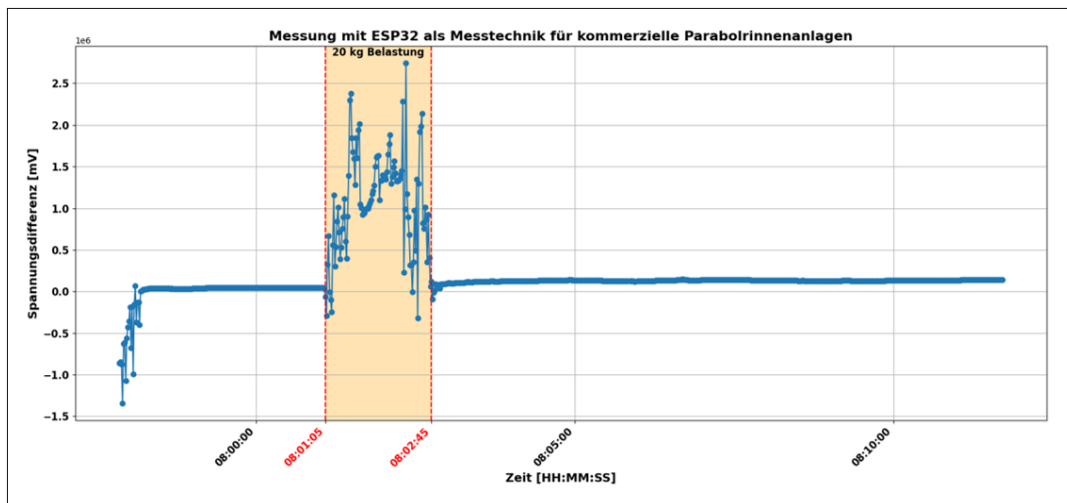


Abbildung 7.3.: Aufgezeichnetes Messsignal der Spannungsdifferenz der Arduino-basierten Lösung während der Belastung des HCE-Supports mit 20 kg^[43]

Auf der Y-Achse des Diagramms ist die gemessene Spannungsdifferenz dargestellt, während die X-Achse die Uhrzeit des Messrechners zeigt. Zu Beginn der Messung ist ein unerklärliches Rauschen erkennbar. Kurz darauf stabilisiert sich das Signal und zeigt im unbelasteten Zustand des HCE-Supports einen konstanten Verlauf.

Ab 08:01:05 wurde der HCE-Support mit der 20 kg-Masse belastet. Infolge der Belastung zeigt das Signal einen stark schwankenden Verlauf. Nach der Entlastung des HCE-Supports um 08:02:45 stabilisiert sich das Signal wieder und zeigt einen nahezu konstanten Verlauf nahe Null.

Das unregelmäßige Verhalten des Signals während der Belastung deutet auf einen möglichen Fehler bei der Installation der DMS hin. Möglicherweise entstanden beim

Aufkleben der DMS Lufteinschlüsse, die zu fehlerhaften Messwerten führten, sobald der HCE-Support belastet wurde. Außerdem wurde die Verkabelung der Komponenten

7.4. Zusammenfassung und Bewertung der Arduino-basierten Lösung

Das Arduino-basierte Messkonzept stellt im Vergleich zur entwickelten industriellen Messtechnik (siehe Kapitel 6.2) eine deutlich kostengünstigere Lösung dar. Es ist jedoch noch nicht für eine dauerhafte Installation im Feld optimiert.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Messtechnik liegt in der drahtlosen Datenübertragung über WLAN, wodurch keine Kabel verlegt werden müssen. Dies reduziert den Installationsaufwand erheblich und senkt die Anschaffungskosten. Für eine zuverlässige Anwendung im Außeneinsatz ist jedoch ein geeignetes Schutzgehäuse erforderlich, das die Messtechnik vor Wasser, Staub und direkter Sonneneinstrahlung schützt. Weiterhin muss eine zuverlässige Stromversorgung, beispielsweise über ein Solarmodul mit Batterie, sichergestellt werden.

Die überschlägigen Investitionskosten für die gesamte Messtechnik betragen etwa 100 €. Trotz der geringen Kosten zeigen die in Abbildung 7.3 dargestellten Messergebnisse, dass die aktuelle Ausführung noch nicht als voll funktionsfähige Lösung zur Überwachung der Drainage eingesetzt werden kann. Die Messgenauigkeit und Signalstabilität liegen aktuell unter den Anforderungen, was insbesondere auf Installationsfehler bei der Sensormontage und unzureichende Kalibrierung zurückzuführen sind.

Für eine Einsatzreife im Feld sind folgende Optimierungen erforderlich:

- Verbesserung der Montagequalität der Dehnungsmessstreifen (z. B. Vermeidung von Lufteinschlüssen beim Verkleben)
- Durchführung einer präzisen Kalibrierung unter definierten Belastungsbedingungen
- Integration zusätzlicher Störfilter, um Netz- und Umgebungseinflüsse zu minimieren
- Entwicklung eines robusten, witterungsbeständigen Gehäuses mit Schutzart mindestens IP65
- Implementierung eines Energiemanagementsystems zur autarken Stromversorgung

Langfristig bietet die Arduino-basierte Lösung Potenzial für eine kostengünstige und flexible Feldüberwachung. Durch Erweiterungen, wie die Implementierung einer einfachen digitalen Drainageüberwachung, bei der ein Smartphone oder Messrechner durch Verbindung mit demselben Netzwerk wie der ESP32 auf die Messdaten zugreift, kann eine unkomplizierte Vor-Ort-Überwachung realisiert werden. Diese Weiterentwicklungen konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht umgesetzt werden und sind daher Gegenstand zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

8. Fazit und Ausblick

Das abschließende Kapitel fasst die zentralen Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen und beleuchtet die daraus resultierenden Perspektiven für zukünftige Forschung und Entwicklung im Bereich der Drainageüberwachung von Parabolrinnenanlagen.

8.1. Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse

Der Drainageprozess von Parabolrinnenanlagen ist einer der kritischsten Prozesse beim Einsatz von Salz als Wärmeträgermedium. Mit bisherigen Messmethoden konnten keine zuverlässigen Aussagen über den Befüllgrad der Receiverrohre getroffen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte jedoch gezeigt werden, dass DMS als Messtechnologie grundsätzlich geeignet sind, um die Drainage von Solarfeldanlagen zuverlässig zu überwachen. Die Messungen demonstrieren, dass die DMS die mechanische Belastung des HCE-Supports präzise erfassen und somit Rückschlüsse auf den Füllstand der Rohre sowie den erfolgreichen Ablauf der Drainage ermöglichen. Die mechanische Belastung äußert sich dabei als Dehnung der HCE-Supports, die in direkter Korrelation mit dem Füllstand der Receiverrohre steht, jedoch indirekt und ohne Mediumskontakt gemessen werden kann.

Auf Basis dieser Erkenntnis wurde ein umfassendes Messkonzept für die HPS2-Anlage entwickelt, das die industriellen Somat-Verstärkermodelle integriert und eine präzise und belastbare Datenerfassung gewährleistet. Dieses Konzept erlaubt eine zuverlässige Überwachung der Drainage und liefert Daten mit einer hohen Genauigkeit, die insbesondere für wissenschaftliche Zwecke von großem Wert sind. Mit den erfassten Daten lassen sich detaillierte Drainagemodelle validieren und die bestehenden Drainagestrategien optimieren und validieren. Allerdings ist die Umsetzung des HPS2-Messkonzepts mit Kosten von etwa 55.000 € verbunden. Aufgrund dieser hohen Investitionskosten eignet sich dieses Konzept nicht für eine flächendeckende kommerzielle Umsetzung, sondern vor allem für wissenschaftliche Anwendungen, in denen hohe Messgenauigkeit und Datensicherheit im Vordergrund stehen.

Um dennoch eine praktikable Lösung für kommerzielle Anlagen zu schaffen, wurde im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich eine Arduino-basierte Messtechnik entwickelt. Diese kostengünstige Alternative nutzt ein ESP32-Entwicklungsboard in Kombination mit DMS-Halbbrücken und dem Load Cell 2 Click-Modul, um die mechanischen Belastungen der HCE-Supports zu erfassen und über WLAN direkt an ein Endgerät zu übertragen. Das Konzept zeigt, dass eine drahtlose und flexible Messdatenerfassung auch mit einfachen Mitteln realisierbar ist. Die Arduino-basierte Lösung wurde im Rahmen dieser Arbeit getestet und liefert grundsätzlich brauchbare Messdaten, jedoch konnte gezeigt werden, dass sie noch nicht für eine dauerhafte Feldinstallation geeignet ist. Insbesondere die Signalstabilität der Sensoren muss für eine zuverlässige, kontinuierliche Überwachung weiter verbessert werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Arbeit die prinzipielle Eignung von DMS für die Drainageüberwachung erfolgreich nachgewiesen hat. Gleichzeitig wurde ein hochpräzises Messkonzept für die HPS2-Anlage erstellt, das wissenschaftlichen

Anforderungen gerecht wird, aber aufgrund der hohen Kosten nur für Forschungs- und Validierungszwecke einsetzbar ist. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Arduino-basierte Lösung bietet hingegen eine kostengünstige Alternative für kommerzielle Anwendungen, deren Konzept und Funktionsweise erfolgreich demonstriert und getestet wurden, ohne jedoch bereits als vollausgereifte Feldlösung vorzuliegen. Damit liefert diese Arbeit sowohl den Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit von DMS-basierten Messungen als auch eine praxisorientierte, kostengünstige Option für kommerzielle Anwendungen, die in ihrem derzeitigen Zustand einen soliden Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen darstellt.

8.2. Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Für die Weiterentwicklung der Drainageüberwachung wurden in dieser Arbeit mehrere potenzielle Ansätze diskutiert. Zwar könnte ein Versuchsaufbau mit verschweißten Receiverrohren und dem Einsatz von Thermoelementen oder Infrarotkameras eine nähere Untersuchung erlauben, jedoch ist der damit verbundene Aufwand hoch und die zu erwartenden Ergebnisse erscheinen nur bedingt vielversprechend.

Daher sollten zukünftige Arbeiten verstärkt alternative Ansätze berücksichtigen. Besonders interessant ist der Einsatz von Wägezellen an festen Rohrleitungen. Eine solche Messtechnik könnte ähnlich wie bei den DMS realisiert werden, erfordert jedoch gegebenenfalls eine kleinere Umkonstruktion oder eine zusätzliche Konstruktion in der Tragstruktur beziehungsweise unter den Rohrleitungen. Trotz dieses Aufwands ist der Ansatz vielversprechend, da bereits gezeigt wurde, dass eine Füllstandserfassung über die Gewichtungskorrelation der Salzschnmelze grundsätzlich möglich ist.

Parallel dazu gilt es, das entwickelte Messkonzept im Solarfeld zu validieren und einem umfassenden Funktionstest zu unterziehen. Dies ist notwendig, um die Zuverlässigkeit und Praxistauglichkeit der Systeme unter realen Betriebsbedingungen zu prüfen. Das Konzept ermöglicht zudem ein besseres Verständnis des Drainagevorgangs und kann in künftigen Forschungsarbeiten genutzt werden, um numerische Drainagemodelle zu entwickeln oder bestehende Drainagestrategien zu optimieren. Ein mögliches Einsatzfeld ist die Überwachung der Salzschnmelze während des Drainageprozesses, etwa bei der Verwendung von Wasser- oder Druckluft, um die Entleerung zu beschleunigen und die Betriebssicherheit der Anlage zu erhöhen.

Darüber hinaus sollte die kostengünstige Arduino-Lösung weiterentwickelt werden, um einen sicheren Einsatz im Außenbereich zu ermöglichen. Dazu gehören eine optimierte Installation der DMS, ein vertieftes Verständnis des Signalverhaltens sowie Maßnahmen zur Stabilisierung der Messsignale. Gleichzeitig ist der Programmiercode so zu erweitern,

dass eine zeitgleiche Überwachung des Füllstands mehrerer Receiverrohre möglich wird.

Damit eröffnen sich sowohl für die wissenschaftliche Weiterentwicklung als auch für potenzielle Industrieanwendungen neue Perspektiven zur effizienten und zuverlässigen Überwachung von Solarfeld-Drainagen.

Literatur

- [1] Ignacio Javier Arias u. a. „Modeling and Hourly Time-Scale Characterization of the Main Energy Parameters of Parabolic-Trough Solar Thermal Power Plants Using a Simplified Quasi-Dynamic Model“. In: *Energies* 14.1 (2021). Zugriff am 3. Juli 2025, S. 221. DOI: 10.3390/en14010221. URL: <https://doi.org/10.3390/en14010221>.
- [2] Alexander Bonk und Thomas Bauer. *Solar Salt – Thermal Property Analysis - Extended Version*. Techn. Ber. DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2021. URL: https://elib.dlr.de/185795/1/FB_2022_04.pdf.
- [3] CAPTRON Electronic GmbH. *Füllstandsmessung – Welche Methode eignet sich am besten für mein Medium?* Zugriff am 7. Juli 2025. 2023. URL: <https://www.captron.de/blog/fuellstandsmessung-welche-methode-eignet-sich-am-besten-fuer-mein-medium/>.
- [4] Gianluca Coccia, Giovanni Di Nicola und Alejandro Hidalgo. *Parabolic Trough Collector Prototypes for Low-Temperature Process Heat*. Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-27084-5_5. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-27084-5_5.
- [5] Jürgen Dersch, Michael Karl Wittmann und Tobias Hirsch. „Comparison of Molten Salts and Thermal Oil in Parabolic Trough Power Plants: Thermodynamic and Economic Analysis“. In: *Energies* 16.2 (2023). Abgerufen am 28. Juni 2025, S. 326. DOI: 10.3390/en16020326. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/2/326> (besucht am 28.06.2025).
- [6] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Einsatz von geschmolzenem Salz im Solarkraftwerk*. Abgerufen am 27. Juni 2025. 2021. URL: https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2021/04/20211025_einsatz-von-geschmolzenem-salz-im-solarkraftwerk (besucht am 27.06.2025).
- [7] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Évora Molten Salt Platform (EMSP)*. Abgerufen am 27. Juni 2025. 2025. URL: <https://www.dlr.de/de/sf/forschung-und-transfer/forschungsinfrastruktur/evora-molten-salt-platform> (besucht am 27.06.2025).
- [8] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Facts and figures*. Abgerufen am 28. Juni 2025. 2023. URL: <https://www.dlr.de/en/dlr/about-us/sustainability/facts-and-figures> (besucht am 28.06.2025).

-
- [9] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *High Performance Solar 2 (HPS2)*. Abgerufen am 25. Juni 2025. 2016. URL: https://elib.dlr.de/110746/1/160201_HPS2_EMSP_KH%20.pdf.
- [10] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Institut für Solarforschung*. Abgerufen am 28. Juni 2025. 2025. URL: <https://www.dlr.de/de/karriere/das-dlr/institute-und-einrichtungen/institut-fuer-solarforschung> (besucht am 28.06.2025).
- [11] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Institute of Solar Research – Support for industry*. Abgerufen am 28. Juni 2025. 2025. URL: <https://www.dlr.de/en/sf/about-us/institute-of-solar-research> (besucht am 28.06.2025).
- [12] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Qualification department – Institute of Solar Research*. Abgerufen am 28. Juni 2025. 2025. URL: <https://www.dlr.de/de/sf/ueber-uns/abteilungen/qualifizierung> (besucht am 28.06.2025).
- [13] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Salz macht Solarthermie kostengünstiger – Einmalige Testanlage EMSP eingeweiht*. https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/02/20220428_salz-macht-solarthermie-kostenguenstiger. Abgerufen am 04. Juli 2025. 2022.
- [14] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Solar Towers Jülich*. Abgerufen am 28. Juni 2025. 2025. URL: <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/research-infrastructure/solar-towers-juelich> (besucht am 28.06.2025).
- [15] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Plataforma Solar de Almería*. Abgerufen am 28. Juni 2025. 2025. URL: <https://www.dlr.de/de/sf/forschung-und-transfer/forschungsinfrastruktur/plataforma-solar-de-almeria> (besucht am 28.06.2025).
- [16] Peter Devine. *Radar Level Measurement User's Guide*. Zugriff am 7. Juli 2025. URL: <https://manualzz.com/doc/31677926/vega-radar-level-measurement-user-s-guide>.
- [17] Niklas Dicke u. a. *Demonstration of 3.5 MWth Parabolic Trough with Ternary Molten Salt at the Évora Molten Salt Platform*. Abgerufen am 25. Juni 2025. 2022. URL: https://cms2022.solarpaces-conference.org/file/display_attachment/a2f9a008cca27bcd119bee11d3b8fb5?filename=Niklas+Dicke+-+Paper.pdf.

-
- [18] John A. Duffie und William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th. S. 360–390. Hoboken, NJ, Canada: Wiley, 2013. ISBN: 9781118417939. URL: [https://www.google.de/books/edition/Solar_Engineering_of_Thermal_Processes/5uDdUfMgXYQC?hl=de&gbpv=1&dq=Duffie,+J.+A.,+%26+Beckman,+W.+A.+\(2013\).+Solar+Engineering+of+Thermal+Processes+\(4th+ed.\).+Wiley.&printsec=frontcover](https://www.google.de/books/edition/Solar_Engineering_of_Thermal_Processes/5uDdUfMgXYQC?hl=de&gbpv=1&dq=Duffie,+J.+A.,+%26+Beckman,+W.+A.+(2013).+Solar+Engineering+of+Thermal+Processes+(4th+ed.).+Wiley.&printsec=frontcover).
- [19] Martin Eickhoff, Mirko Meyer-Grünefeldt und Lothar Keller. „New operating strategies for molten salt in line focusing solar fields – Daily drainage and solar receiver preheating“. In: *SolarPACES 2015 International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*. Bd. 1734. Zugriff am 6. Juli 2025. AIP Publishing, 2016, S. 070007. DOI: 10.1063/1.4949154. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4949154>.
- [20] Hottinger Brüel & Kjær GmbH. *CA80: Kalt aushärtender Schnellklebstoff für experimentelle Tests und Sensoren ohne hohe Genauigkeitsanforderungen*. Zugriff am 22. Juli 2025. 2025. URL: <https://www.hbm.com/de/10950/ca80-schnellklebstoff-fuer-dehnungsmessstreifen/>.
- [21] Tuerk-Hillinger GmbH. *Hochleistungsheizpatronen TYP HLP*. Zugriff am 17. Juli 2025. 2025. URL: <https://tuerk-hillinger.com/de/produkte/>.
- [22] Matthias Günther, Michael Joemann und Simon Csambor. *Parabolic Trough Technology*. S. 7. Kassel, Tunisia, Germany, 2010. URL: https://wecanfigurethisout.org/ENERGY/Web_notes/Solar/Solar_Thermal_Heat_Storage_Files/Parabolic%20Trough%20Technology%20-%20ENER%20-%20MENA.pdf.
- [23] Matthias Günther, Michael Joemann und Simon Csambor. *Parabolic Trough Technology*. S. 58. Kassel, Tunisia, Germany, 2010. URL: https://wecanfigurethisout.org/ENERGY/Web_notes/Solar/Solar_Thermal_Heat_Storage_Files/Parabolic%20Trough%20Technology%20-%20ENER%20-%20MENA.pdf.
- [24] Huseyin M. Guven und Richard B. Bannerot. *Solar Photochemistry Technology*. Zugriff am 2. Juli 2025. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/267961826_SOLAR_PHOTOCHEMISTRY_TECHNOLOGY.
- [25] HBM. *Bedienungsanleitung MX-Module*. Techn. Ber. Abgerufen am 12. August 2025. HBM, 2025. URL: <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/A04088.pdf>.
- [26] HBM. *Datenerfassungssoftware catman: Anschließen. Messen. Visualisieren. Auswerten*. Abgerufen am 12. August 2025. 2025. URL: https://www.hbm.com/de/2290/catman-messtechnik-software/?product_type_no=Datenerfassungssoftware%20catman.

-
- [27] HBM. *New Connection Cables for Strain-Gauge Force Sensors*. Accessed on August 12, 2025. 2025. URL: <https://www.hbm.com/en/8455/k-cab-f-connection-cables-for-load-cells/>.
- [28] HBM. *SomatXR MX1615B-R - Messverstärker für die experimentelle Spannungsanalyse im robusten Design*. Abgerufen am 12. August 2025. 2025. URL: https://www.hbm.com/de/4270/somatxr-mx1615b-r-fur-experimentelle-spannungsanalyse/?product_type_no=SomatXR%20MX1615B-R%20Modul%20f%C3%BCr%20experimentelle%20Spannungsanalyse.
- [29] Muhammad Imran Khan, Faisal Asfand und Sami G. Al-Ghamdi. „Progress in research and technological advancements of commercial concentrated solar thermal power plants“. In: *Solar Energy* 249 (2023). Zugriff am 3. Juli 2025, S. 183–226. DOI: 10.1016/j.solener.2022.10.041. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.041>.
- [30] HBM - Hottinger Brüel & Kjær. *ClipX - Der präzise und leicht-integrierbare industrielle Messverstärker*. Zugriff am 22. Juli 2025. 2025. URL: https://www.hbm.com/de/7077/clipx-praeziser-leicht-integrierbarer-messverstaerker/?product_type_no=ClipX:%20der%20pr%C3%A4zise%20und%20leicht-integrierbare%20Messverst%C3%A4rke.
- [31] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *SOPRAN*. Zugriff am 22. Juli 2025. 2025. URL: <https://www.dlr.de/en/sf/research-and-transfer/research-infrastructure/test-facilities/sopran>.
- [32] R. P. Merchán u. a. „High temperature central tower plants for concentrated solar power: 2021 overview“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 155 (2021). Zugriff am 3. Juli 2025. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111828. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121010923>.
- [33] MIKROE. *Load Cell 2 Click*. Abgerufen am 13. August 2025. 2025. URL: <https://www.mikroe.com/load-cell-2-click>.
- [34] Markus Pfänder. *Pyrometrische Temperaturmessung an solarthermischen Hochtemperatur-Receivern*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 1110. S. 53. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006.
- [35] Eigene Quelle.
- [36] TC Mess- und Regeltechnik GmbH. *Thermoelemente für die Wärmebehandlung gemäß AMS 2750*. Zugriff am 17. Juli 2025. 2025. URL: https://www.tcgmbh.de/thermoelemente_AMS2750/thermoelemente_AMS2750_miniatuur_stecker.html.

-
- [37] Sylvain Rodat und Richard Thonig. „Status of Concentrated Solar Power Plants Installed Worldwide: Past and Present Data“. In: *Clean Technologies* 6.1 (2024). Zugriff am 02.07.2025, S. 365–378. DOI: 10.3390/cleantechnol6010018. URL: <https://www.mdpi.com/2571-8797/6/1/18>.
- [38] RS. *Seeit ESP32-DEV-30P Bluetooth, Wi-Fi Entwicklungstool Microcontroller ESP32*. Abgerufen am 13. August 2025. 2025. URL: <https://de.rs-online.com/web/p/entwicklungstools-microcontroller/2863990>.
- [39] RS Components GmbH. *Füllstandsmessung*. Zugriff am 7. Juli 2025. 2025. URL: <https://de.rs-online.com/web/content/discovery-portal/produktanbieter/fuellstandsmessung>.
- [40] Bürkert Fluid Control Systems. *Typ 8222 - Leitfähigkeitsmessgerät, ELEMENT Design*. Zugriff am 7. Juli 2025. URL: <https://www.buerkert.de/de/type/8222>.
- [41] TELEDYNE FLIR. *HD - Wärmebildkamera mit Sucher FLIR T1020*. Zugriff am 17. Juli 2025. 2025. URL: <https://www.flir.de/products/t1020/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions>.
- [42] Teledyne FLIR. *Picking a thermal color palette*. Abgerufen am 5. August 2025. 2021. URL: <https://www.flir.eu/discover/industrial/picking-a-thermal-color-palette/>.
- [43] Ltd. Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co. *General Use Strain Gauge*. Zugriff am 22. Juli 2025. 2025. URL: https://tml.jp/e/product/strain_gauge/f_list.html.
- [44] Michael Wittmann u. a. „HPS2 – Demonstration of Molten-Salt in Parabolic Trough Plants – Design of Plant“. In: *SolarPACES 2018 International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*. Bd. 2126. Zugriff am 4. Juli 2025. Casablanca, Morocco, 2019, S. 120024. DOI: 10.1063/1.5117642. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2126/1/120024/701453/HPS2-demonstration-of-molten-salt-in-parabolic>.
- [45] Chunchao Wu u. a. „Concentrated Solar Thermal Power Technology and Its Thermal Applications“. In: *Energies* 18.8 (2025). Zugriff am 02.07.2025, S. 2120. DOI: 10.3390/en18082120. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/8/2120>.
- [46] H. L. Zhang u. a. „Concentrated solar power plants: Review and design methodology“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (2013). Zugriff am 01.07.2025, S. 466–481. DOI: 10.1016/j.rser.2013.01.032. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.032>.

- [47] Qing-Guo Zhao u. a. „The thermal conductivity of molten NaNO_3 , KNO_3 and their mixtures“. In: *Energy Procedia* 143 (2017), S. 774–779. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.761. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217365256>.

Anhang

Im Anhang befinden sich technische Dokumentationen und Programmcode für die Arduino-basierte Lösung.

A. Rohrleitungs- und Sensorplan des Salzkreislaufs an der EMSP

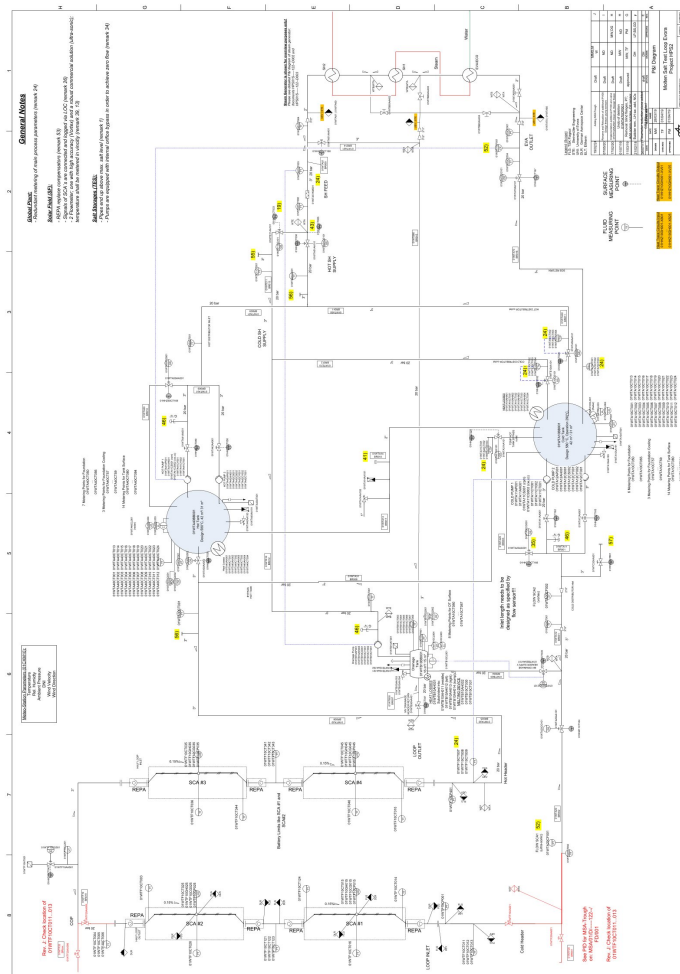


Abbildung A.1.: Rohrleitungs- und Instrumentierungsschema der HPS2-Anlage

B. Arduino-Sketch zur Gewichtserfassung

```
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <WebSocketsServer.h>
#include <Wire.h>
#include <SparkFun_Qwiic_Scale_NAU7802_Arduino_Library.h>
#include <Preferences.h>
#include <vector>
#include <time.h>

#define RDY_PIN 27

NAU7802 scale;
Preferences prefs;
WebServer server(80);
WebSocketsServer webSocket = WebSocketsServer(81);

volatile bool messwertBereit = false;
bool tareRequest = false;

unsigned long letzteMessung = 0;
const unsigned long intervall = 1000;

std::vector<String> csvDaten;

const char* ssid = ""; \\ Netzwerk-Name eingeben
const char* password = ""; \\ Passwort eingeben

// NTP Zeit synchronisieren
void setupTime() {
    configTime(0, 0, "pool.ntp.org", "time.nist.gov");
    Serial.print("Warte auf Zeitserver");
    while (!time(nullptr)) {
        Serial.print(".");
        delay(500);
    }
    Serial.println("\nZeit synchronisiert!");
}

// Aktuelle Zeit als String
String getTimeString() {
    struct tm timeinfo;
    if (!getLocalTime(&timeinfo)) return "1970-01-01_00:00:00";
```

```
char buffer[20];
strftime(buffer, sizeof(buffer), "%Y-%m-%d_%H:%M:%S", &timeinfo);
return String(buffer);
}

// Interrupt, wenn Messwert bereit
void IRAM_ATTR onDataReady() {
    messwertBereit = true;
}

// Kalibrierung der Waage
void kalibriere(float echtesGewichtGramm) {
    delay(3000);
    long rohwert = scale.getReading();
    float faktor = (float)rohwert / echtesGewichtGramm;
    scale.setCalibrationFactor(faktor);
    prefs.begin("waage", false);
    prefs.putFloat("faktor", faktor);
    prefs.end();
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    delay(1000);
    Serial.println("Starte Setup...");

    // WLAN verbinden
    WiFi.begin(ssid, password);
    Serial.print("Verbinde mit WLAN");
    unsigned long start = millis();
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
        if (millis() - start > 15000) {
            Serial.println("\nWLAN fehlgeschlagen");
            return;
        }
    }
    Serial.println("\nVerbunden!");
    Serial.println("IP: " + WiFi.localIP().toString());

    setupTime();

    // Waage initialisieren
    Wire.begin(21, 22);
    if (!scale.begin()) {
        Serial.println("NAU7802 nicht gefunden!");
        while (1);
    }
    scale.setGain(1);
}
```



```

scale.calibrateAFE();

// Kalibrierung mit 20 kg
kalibriere(20000.0);

prefs.begin("waage", true);
float faktor = prefs.getFloat("faktor", 0.0);
prefs.end();
if (faktor > 0.0) scale.setCalibrationFactor(faktor);

while (!scale.available()) delay(10);
scale.calculateZeroOffset();

// Interrupt f r Messwerte
pinMode(RDY_PIN, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(RDY_PIN), onDataReady, FALLING);

// Webserver mit CSV-Download
server.on("/", HTTP_GET, []() {
    String html = "<!DOCTYPEhtml><html><head>
    <meta charset='utf-8'><title>Waage</title></head><body>
    <h1>Waage</h1><a href='/download'>CSVherunterladen</a>
    </body></html>";
    server.send(200, "text/html", html);
});
server.on("/download", HTTP_GET, []() {
    String csv = "Zeit;Rohwert;Gewicht(g)\n";
    for (auto& z : csvDaten) csv += z + "\n";
    server.setHeader("Content-Disposition", "attachment;
    filename=messdaten.csv");
    server.send(200, "text/csv", csv);
});
server.begin();

// WebSocket f r Tare
websocket.begin();
websocket.onEvent([
    (uint8_t num, WStype_t type, uint8_t *payload, size_t length) {
        if (type == WStype_TEXT) {
            String msg = String((char*)payload);
            if (msg == "tare") tareRequest = true;
        }
    }
]);

void loop() {
    server.handleClient();
    websocket.loop();

    // Tare ausf hren

```

```
if (tareRequest) {
    scale.calculateZeroOffset();
    tareRequest = false;
}

// Messwerte lesen und speichern
if (millis() - letzteMessung >= intervall && scale.available()) {
    letzteMessung = millis();
    long raw = scale.getReading();
    float weight = scale.getWeight();
    String zeit = getTimeString();
    String zeile = zeit + ";" + String(raw) + ";" + String(weight, 2);
    csvDaten.push_back(zeile);
    Serial.println("zeile");
}
}
```