

Öffentlicher koordinierter Schlussbericht

Vorhaben: HYDRA-RoS - Entwicklung einer Demonstrations-Rohrbiegeanlage mit zugehöriger Fügetechnik für ein neuartiges Rohrregister ohne Sammlerrohre

Akronym: HYDRA RoS

Förderkennzeichen: 03ETW023A und 03ETW023B

Laufzeit: 01.06.2020 bis 31.12.2023

Berichtszeitraum: wie zuvor

Gefördert vom

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungspartner: Ritter Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG
(Verbundprojektkoordinator - REUT)
Thomas Weidemann
Kuchenäcker 2
72135 Dettenhausen

Technische Universität Dresden
Institut für Energietechnik
Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung
(Koordinator innerhalb TUDD)
Dr.-Ing. Karin Rühling
Helmholtzstraße 14
01069 Dresden

Datum: Stand 22. Jul. 2024

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren!

Inhaltsverzeichnis

Bearbeiter und Autoren	6
Danksagung	8
Symbolverzeichnis	9
1 Motivation und Struktur	12
2 AP 1: Konzeption des modifizierten VRK 19/49 mit RoS (REUT, GEVV, FTM)	14
2.1 Thermo-hydraulische Simulationen	14
2.1.1 Ziele und Methodik der Simulationstudie	14
2.1.2 Programmbeschreibung und Aufbau der numerischen Modelle	15
2.1.3 Simulationsergebnisse Rohrregisters 19/49 und Trommelanschlüsse	17
2.1.4 Modellierung und relevante Ergebnisse	21
2.1.5 Ableitung vereinfachter Druckverlustberechnungen auf Basis der Simulationen, Abgleich der Simulationsmodelle mit den Messungen an realem Rohrregister	22
2.2 Fügeverfahren und Fugestellenanalyse	27
2.2.1 Motivation und Zielstellung	27
2.2.2 Anforderungen an die Fugestelle	27
2.2.3 Zusammenfassung und Auswahl des Fügeverfahrens	28
2.3 Konstruktive Umsetzung (REUT)	28
2.3.1 Vorbereitung der Konstruktion mit Hinblick auf eine teilautomatisierte Fertigung.	30
2.4 Design Tool – neue Kollektoren und Systeme	31
2.4.1 Allgemeine Anforderungen	31
2.4.2 Druckverlustberechnungen	32
3 AP2: Biegetechnologie Register (FF, REUT; Biegeanlagenhersteller)	34
3.1 Charakterisierung der Werkstoffe und abgeleitete Materialmodelle	35
3.1.1 Rohrdurchmesser D_{KK}	35

3.1.2	Rohrdurchmesser D_{GK}	36
3.2	Experimente zum Biegeprozess	37
3.2.1	Anfertigung von Querschliffen und Vermessung	37
3.3	Aufbau der Simulation und Auswertung	42
3.3.1	Rotationsbiegeprozess	42
3.3.2	Abbildung des Gesenkbiegens der z-Etage	46
3.3.3	Erweiterung der Simulation zur Nachverfolgung von Fehlern im realen Prozess	48
3.3.4	Die Lage der Schweißnaht und deren Einfluss	48
3.4	Erstellung des Lastenhefts und der Biegespezifikation (REUT)	49
4	AP3: Fügetechnologie (FTM, REUT)	50
4.1	Erprobung von Fügeverfahren im Labor	50
4.1.1	Induktionslöten	50
4.1.2	Erwärmungsdokumentation des Trommelanschluss	50
4.1.3	Schutzgaskammer	53
4.2	Weiterentwicklung des Fügeverfahrens für den Praxiseinsatz	54
4.3	Trommelanschlusskonstruktion (REUT)	57
5	AP4: Registerfertigung (REUT, FF)	60
5.1	Auslösung Bestellung Biegemaschine	60
5.2	Optimierung von Biegeprozessen	60
5.3	Begleitung der Serienfertigung / Fehleranalyse und QS	60
5.3.1	Analyse der Fehlerbilder und Abbildung mithilfe der FEM	60
5.3.2	Einsatz einer profilierten Gleitschiene	70
5.3.3	Optische Vermessung der Biegeproben	70
5.3.4	Gefügeuntersuchungen	72
5.3.5	Begleitung der Vor-Ortuntersuchungen	73
5.3.6	Überführung der Ergebnisse auf den D_{GK} Werkzeugsatz	73

6	AP5: Fertigungsablauf Gesamtkollektor (REUT, FF, FTM, Biegeanlagenhersteller)	77
6.1	Zuarbeit zur FMEA	77
6.1.1	Induktionslöten	77
6.2	Vorbereitung der Maschinenstandorte	78
6.3	FMEA Lötanlage	85
6.4	FMEA Löten	86
7	AP6: Begleittests (GEVV, REUT, FF, FTM)	87
7.1	Laborprüfstand Sonnensimulator (REUT)	87
7.2	Planung und Durchführung Begleittests (REUT)	87
7.2.1	Innendruckprüfung	88
7.2.2	Druckwechselprüfung	88
7.2.3	Hochtemperaturbeständigkeit	89
7.2.4	Interner thermischer Schock	89
7.2.5	Torsionsversuch Anzugsdrehmoment	89
7.2.6	Stabilität beim Röhrentausch	90
7.2.7	Frostbeständigkeit	91
7.2.8	Innere Korrosionsbeständigkeit	91
7.2.9	Innere Korrosionsbeständigkeit Glykol	93
7.2.10	Äußere Korrosionsbeständigkeit	94
7.2.11	Eignungsnachweis der Registermaterialien für den Einsatz im Druckgerät Kollektor	94
7.2.12	Interne Warmzugversuche	95
7.2.13	Externe Prüfungen der Warmzugfestigkeit	101
7.2.14	Prüfungen der Berstdruckfestigkeit externen Prüfstelle	102
7.3	Externe Leistungsprüfung nach DIN EN ISO 9806	102
7.4	Druckverlustbestimmung am Laborprüfstand (GEVV)	106
7.4.1	Ziel der Prüfung und wichtige Randbedingungen	106

7.4.2	Aufbau des Prüfstandes	107
7.4.3	Messdatenerfassung und –aufbereitung, Sensorik	107
7.4.4	. Prüfablauf, Prüflinge, Ergebnisse	110
7.5	Feldanlagen REUT	117
7.6	Feldtestanlage ZET	119
7.6.1	Ziele und Grundlagen	119
7.6.2	Anlagentechnische Umsetzung der NEST-W 2.0	120
7.6.3	Betrieb, Shortterm-Tests und Ertragskontrolle	124
7.6.4	Fazit und Ausblick ZET-Feldtestanlage	132
8	Zusammenfassung und Ausblick	133
9	Quellen	135
9.1	Literaturverzeichnis	135
9.2	Normen und Regelwerke	136

Bearbeiter und Autoren

An der Erarbeitung der Projektergebnisse waren beteiligt:

REUT	Thomas Weidemann; Thomas Althaus, Oliver Kreis, Johannes Brodbeck, Roy Hliza, Sebastian Bonk, Dominik Bestenlehner (REUT) Stefan Abrecht (Solar Experience)
TUDD	Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung (GEWV) Karin Rühling, Ralf Gritzki, Markus Rösler, Jan Löser, Stefan Hoppe, Jörg Niese, Philipp Kobert, Thomas Unger, Theo Sell Professur für Formgebende Fertigungsverfahren (FF) Alexander Brosius, Alexander Wolf Professur für Fügetechnik und Montage (FTM) Jörg Zschetzsche, David Köberlin (bis 31.10.2021), Tony Richter (ab 03.01.2022)

Die bearbeitende Institution sowie die verantwortlichen Autoren der Kapitel sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 0-1 Übersicht Autoren

Institution	Autoren	Kapitel-Nr.	Kapitel
REUT + TUDD	Alle	1	Motivation und Struktur
TUDD-GEWV	Gritzki, R.; Rösler, M.	2.1	Thermo-hydraulische Simulationen
TUDD-FTM	Köberlin, D.; Zschetzsche, J.; Richter, T	2.2	Fügeverfahren und Fügestellenanalyse
REUT	Weidemann, T.	2.3	Konstruktive Umsetzung (REUT)
REUT	Abrecht, S.	2.4	Design Tool – neue Kollektoren und Systeme
TUDD-FF	Wolf, A.	3.1	Charakterisierung der Werkstoffe und abgeleitete Materialmodelle
TUDD-FF	Wolf, A.	3.2	Experimente zum Biegeprozess
TUDD-FF	Wolf, A.	3.3	Aufbau der Simulation und Auswertung
REUT	Weidemann, T. Kreis, O.	3.4	Erstellung des Lastenhefts und der Biegespezifikation (REUT)
TUDD-FTM	Köberlin, D.; Zschetzsche, J.	4.1	Erprobung von Fügeverfahren im Labor

Institution	Autoren	Kapitel-Nr.	Kapitel
TUDD-FTM	Köberlin, D.; Zschetzsche, J.; Richter, T	4.2	Weiterentwicklung des Fügeverfahrens für den Praxiseinsatz
REUT	Abrecht, S.; Hliza, R.	4.3	Trommelanschlusskonstruktion (REUT)
REUT	Althaus, T.; Kreis, O.	5.1	Auslösung Bestellung Biegemaschine
REUT	Kreis, O.	5.2	Optimierung von Biegeprozessen
TUDD-FF	Wolf, A.	5.3	Begleitung der Serienfertigung / Fehleranalyse und QS
TUDD-FTM	Köberlin, D.; Zschetzsche, J.	6.1	Zuarbeit zur FMEA
REUT	Kreis, O.	6.2	Vorbereitung der Maschinenstandorte
REUT	Althaus, T.; Weidemann, T	6.3	FMEA Lötanlage
REUT	Althaus, T.; Weidemann, T	6.4	FMEA Löten
REUT	Hliza, R.; Brodbeck, J.	7.1	Laborprüfstand Sonnensimulator (REUT)
REUT	Althaus, T.; Hliza, R., Weidemann, T.	7.2	Planung und Durchführung Begleittests (REUT)
REUT	Althaus, T.	7.3	Externe Leistungsprüfung nach DIN EN ISO 9806
TUDD-GEWV	Löser, J., Rühling, K.	7.4	Druckverlustbestimmung am Laborprüfstand (GEWV)
REUT	Weidemann, T.	7.5	Feldanlagen REUT
TUDD-GEWV	Rühling, K.; Sell, T.	7.6	Feldtestanlage ZET
Alle		8	Zusammenfassung und Ausblick
Alle		9	Quellen

Danksagung

Das Verbundvorhaben „HYDRA-RoS - Entwicklung einer Demonstrations-Rohrbiegeanlage mit zugehöriger Füge-technik für ein neuartiges Rohrregister ohne Sammlerrohre“ ist gemeinsam von den Partnern Ritter Energie- und Umwelttechnik, GmbH & Co. KG (REUT) und den Professuren für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung, Formgebende Fertigungsverfahren sowie Füge-technik und Montage der Technische Universität Dresden (TUD) durchgeführt worden. Das Projekt wurde finanziell aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) auf Grund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert und in allen Projektphasen vom Projektträger Jülich (PTJ) begleitet.

Das Projektbearbeitungsteam möchte sich auf diesem Wege nicht nur beim BMWK für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens, sondern ebenso für die fachliche Begleitung des Vorhabens bedanken. Besondere Anerkennung gilt hierbei Frau Kerstin Krüger vom Projektträger Jülich. Sie verfolgte die wichtigen Meilensteine des Vorhabens fachinhaltlich und überzeugte sich in ausgewählten Projektmeetings in Dettenhausen vom Status der wissenschaftlichen und vor allem praktischen Umsetzung.

Dank gesagt sei an dieser Stelle aber auch den vielen engagierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bei REUT und an der TUD sowie den Akteuren der zahlreichen externen Prüfinstituten und Firmen, die die iterativen Prozesse bis zum Projekterfolg begleiteten, ja mit Ihren Teilleistungen ermöglichten. Gleiches gilt für alle Eigentümer der Feldanlagen in der Realität der solarthermischen Wärmebereitstellung vom Einfamilienhaus bis zur Wärmenetzeinspeisung, ohne die eine so weit gefächerte Validierung der systemischen Wirkungen des neuen RoS-Konzeptes im Prototypstatus nicht möglich gewesen wäre.

Gerade die regen Diskussionen nach der Präsentation der Ergebnisse im HYDRA RoS-Workshop sowie den Vorträgen und Postern zum diesjährigen Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme im Kloster Banz haben das Interesse der Fachwelt deutlich gezeigt.

Für uns Verbundprojektpartner war es eine spannende Zusammenarbeit und wir freuen uns, mit dem vorliegenden Bericht den erreichten Stand der Fachöffentlichkeit zu präsentieren und einen echten Beitrag zu innovativen solarthermischen Lösungen für die Wärmewende geleistet zu haben.

Dettenhausen und Dresden im Juni 2024

Im Namen des gesamten Projektteams

Dr.-Ing. Karin Rühling

Symbolverzeichnis

Formelzeichen mit gebräuchlichen Einheiten und stoffunabhängige Konstanten

Zeichen	Bezeichnung	Wert und Einheit
A	Fläche	mm^2, m^2
c_p	Isobare spezifische Wärmekapazität	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
D	Rohr Außendurchmesser	mm
d	Rohr Innendurchmesser	mm
f	Faktor	1
K	Rauigkeit	mm
GK	Großkollektor	1
KK	Kleinkollektor	1
p	Druck	bar, mbar, Pa
Q	Thermische Energie (Wärme)	Wh
$\dot{Q}$	Thermische Leistung (Wärmeleistung)	W
r	Biegeradius	mm
Re	Reynolds-Zahl	1
V	Volumen	m^3
$\dot{V}$	Volumenstrom, Durchsatz	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \frac{\text{m}^3}{\text{h}}, \frac{\text{L}}{\text{h}}, \frac{\text{L}}{\text{min}}$
$\dot{v}$	flächenspezifischer Volumenstrom	$\frac{\text{L}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$
w	Geschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
α	Winkel	°
η	dynamische Viskosität	$\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$
ϑ	Celsiustemperatur	°C
λ	Rohrreibungszahl	1
ν	kinematische Viskosität	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
π	Kreiszahl Pi	$\approx 3,141\,59$
ϱ	Dichte	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Indizes

Index	Bezeichnung
1,2,3, ...	Zustand 1,2,3, ...
Ap	Apertur-
dyn	dynamisch
Einzelregister	das Einzelregister betreffend
Fil	Filter
ges	Gesamt-
Kollektor	den gesamten Kollektor betreffend
l	längenspezifisch, auf eine Lauflänge bezogen
p	primär (primärenergetisch)
pr	erzeugt, produziert
RL	Rücklauf
S	Siede-
stat	statisch
U	Umgebungs-
VL	Vorlauf

Zeiger

Zeiger	Bezeichnung
.	zeitspezifisch, -strom
—	Mittel-, mittlere
	Betrag, Absolutwert
d	Differenzial, linearisierter Zuwachs einer Variablen oder Funktion bei Änderung ihres Argumentes
Δ	Differenz, Änderung

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AGFW	AGFW Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.
AP	Arbeitspaket
FEM	Finite Elemente Methode
FW	Fernwärme
GEG	Gebäudeenergiegesetz
HANEST	Hausanschluss- und Netzeinspeisestation
HAST	Hausstation
M	Meilenstein
NEST	Netzeinspeisestation
PEF	Primärenergiefaktor
SNE	SachsenEnergie AG, Dresden
SPSFW	Speicherprogrammierbare Steuerung Fernwärme der Ritter XL GmbH und gleichzeitig Akronym des BMWK- FuE-Projektes FKZ: 03ETW008
ST	Solarthermie
WMZ	Wärmezähler
WP	Wärmepumpe
WÜ	Wärmeübertrager
WÜST	Wärmeübergabestation

1 Motivation und Struktur

Gegenstand des Verbundprojektes ist es, eine Demonstrations-Rohrbiegeanlage mit zugehöriger Fügetechnik für ein **neuartiges Rohrregister ohne Sammelrohre (RoS)** für einen dadurch auch hydraulisch optimierten Vakuumröhrenkollektor (**HYDRA**) zu entwickeln und erste Prototypen seriennah herzustellen sowie in ersten Dauertests unter realen Bedingungen zu erproben. Insgesamt ist beabsichtigt, den Weg in eine kostengünstige und sinnvoll teilautomatisierte Fertigung mit hoher Flexibilität bezüglich der Fertigungsmenge für einen saisonal und projektbezogen schwankenden Markt für Sonnenkollektoren aufzuzeigen und REUT in die Lage zu versetzen, schnell auf einen stark anwachsenden und auch wechselnden Bedarf zu reagieren.

Solarthermische Kollektoren sind die effizientesten Lieferanten erneuerbarer und CO₂-freier Wärme für Einzelgebäude, Nieder- und Mitteltemperatur-Prozesswärme sowie Wärmenetze. Vakuumröhrenkollektoren mit CPC-Reflektor liefern dabei die höchsten Wärmeerträge pro m² Bruttokollektorfläche und können auch leicht Temperaturen bis 120 °C bereitstellen. Sie gehören damit zu den wichtigsten Energieerzeugern der Zukunft, um die Energiewende direkt vor Ort auch im Wärmesektor voranzubringen, ohne die Stromnetze zu belasten. Förder- und ordnungspolitische Maßnahmen im solarthermischen Bereich berücksichtigen derzeit noch nicht die flächeneffiziente Nutzung bzw. die CO₂-Einsparung bei der Wärmeerzeugung. Daher werden heute vielfach ertragsschwache Produkte eingesetzt, um gesetzliche Mindestanforderungen zu erfüllen. In der Folge werden wertvolle Solarflächen nur unzureichend genutzt und die vorhandenen Potenziale zur möglichen CO₂ Einsparungen oft für Jahrzehnte limitiert. Hocheffiziente CPC-Vakuumröhrenkollektoren hingegen können nicht nur das vorhandene Solarenergie-Potenzial besser nutzen, sondern benötigen deutlich weniger Fläche und Speichervolumen, um sehr hohe solare Deckungen zu erzielen. Sie sind damit auch hinsichtlich Materialeinsatz und Flächenverbrauch besonders nachhaltig, jedoch auch noch etwas teurer. Bisherige Registerkonzepte sowohl bei Flach-, als auch bei direkt durchströmten Röhrenkollektoren benötigen typischerweise sogenannte „Harfen“, um eine Reihe von Rohren/Mäandern mit Hilfe von je einem Verteil- und Sammelrohr^a parallel zu verschalten. Damit wird der Druckverlust geringgehalten, und es können hydraulisch vorteilhaft und kostengünstig größere Kollektorflächen seriell in einem Strang zusammengefasst werden. Nachteilig ist die durch das Sammelrohr unvermeidlich induzierte Asymmetrie bei der Durchströmung, die bei ungünstiger Verschaltung und ungünstigen Bedingungen (z.B. geringer Durchfluss) zu partieller Stagnation und Ausfall von Teilen oder des gesamten Kollektorfeldes führen kann.

^a Vereinfachend soll im Folgenden von zwei Sammelrohren gesprochen werden.

Zudem sind viele einzelne kostenintensive Produktionsschritte und arbeitsaufwändige Lötprozesse notwendig.

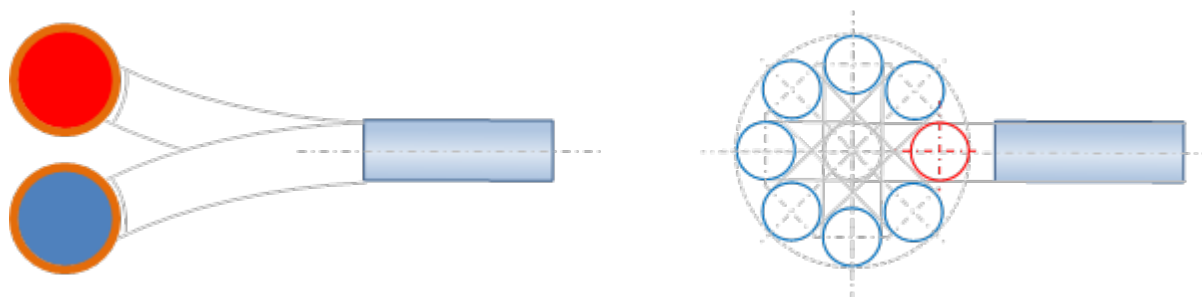


Abbildung 1-1 Vergleich altes Sammlerrohr und neues Konzept Register ohne Sammler RoS
 Links Harfe: Mäander münden in 2 Sammelrohre (blau Verteil- und rot Sammelrohr)
 Rechts Trommelanschluss: Mäander gebündelt und kreisförmig angeordnet

Das neue sogenannte „Trommelanschlusskonzept“ verzichtet vollständig auf ein Sammelrohr, indem es komplexe, 3-dimensional gebogene Rohrmäander auf einen Kreisring (Trommelanschluss) so zusammenführt, dass sie nur an den beiden Enden jeweils idealerweise in einem Produktionsschritt zusammengefügt werden können. Die komplexen Biegungen sind dabei nur mit einer automatischen Rohrbiegemaschine produktionstechnisch und wirtschaftlich sinnvoll umsetzbar. (Abbildung 1-1)

Der Bericht folgt der Struktur der Arbeitspakete aus der Vorhabenbeschreibung (s. a. Abbildung 1-2).

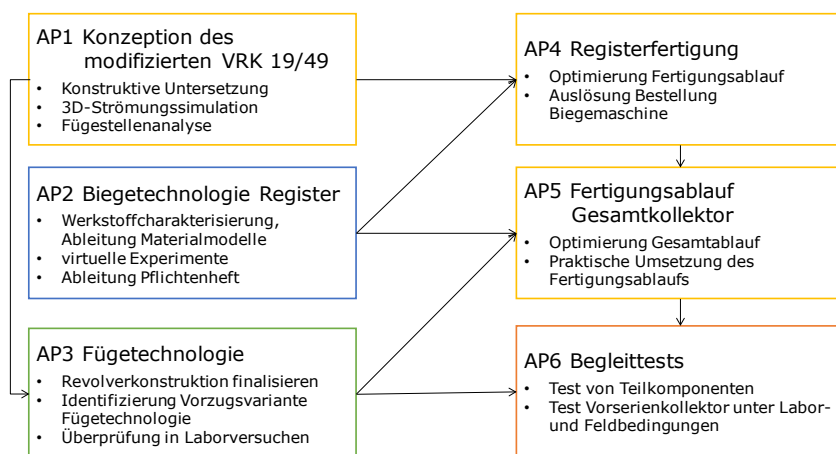


Abbildung 1-2 Hauptinhalte und strukturelle Verknüpfung der Arbeitspakete

2 AP 1: Konzeption des modifizierten VRK 19/49 mit RoS (REUT, GEWV, FTM)

2.1 Thermo-hydraulische Simulationen

2.1.1 Ziele und Methodik der Simulationstudie

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 galt es, dass „ideale“ Rohrregisters des 19/49 RoS (bestehend aus sieben Dreifachmäandern und den zwei Trommelanschlüssen) in einer geeigneten Simulationsumgebung zu modellieren und für ausgewählte Betriebspunkte am Eintritt in den Kollektor die thermohydraulischen Kennwerte (z. B. Druck, Strömungsgeschwindigkeit und –richtung) orts aufgelöst zu bestimmen. Die Auswertung der Daten soll Aufschluss geben, ob das Erreichen der Druckverlustreduktionsziele möglich ist und der Erschließung konstruktiven Optimierungspotentials dienen.

Die Simulationsstudie gliedert sich in folgende Teilschritte:

Teilschritt 1: Grundmodell 19/49 RoS

- Modellierung der kompletten Innenkontur des Rohrregisters
- Diskretisierung der daraus entstehenden Teilvolumina
- Simulation einer Matrix von 11 ausgewählten Betriebspunkte (mittlere Rohrgeschwindigkeiten von 0,2 m/s bis 1,2 m/s) und je vier thermischen Betriebszuständen (Aufheizen sowie mittlere Wassertemperaturen von 20 °C, 50 °C und 90 °C),
- Ermittlung der resultierenden Strömungsfelder sowie der Druckverluste, sowohl über dem Register als auch über ausgewählten Bauteilen (Trommelanschlüsse, Bögen usw.)

Teilschritt 2: Simulationsstudie Trommelanschlussvarianten

- Anpassung des Simulationsmodelles an die konzipierten Variationen der Trommelanschlüsse
- Aufbau und Diskretisierung der numerischen Modelle
- Simulation ausgewählter Betriebspunkte und Bewertung hinsichtlich des Druckverlustes und der Strömungssituation

Die Ergebnisse dieser Teilschritte sind mit den parallellaufenden Arbeiten zu den fertigungstechnischen Details abzugleichen, Anpassungen an der Modellierung der Kontur vorzunehmen und erneut zu simulieren. Diese iterative Abarbeitung wurde mehrfach durchlaufen.

Schlussendlich erfolgte die Ableitung vereinfachter Druckverlustberechnungen auf Basis der numerischen Simulationen sowie der Abgleich der Ergebnisse mit den Druckverlustmessungen (s. Abschnitt 7.4) in den Teilschritten

- Sichtung der Ansätze in der Literatur
- Erstellung und Anpassung des Berechnungsverfahrens
- Vergleich mit den Messungen, gegebenenfalls Anpassung

2.1.2 Programmbeschreibung und Aufbau der numerischen Modelle

Die geometrisch hoch aufgelösten numerischen Simulationen der Strömungs- und Temperaturverhältnisse in den Rohrregistern und in ihren Komponenten erfolgen auf Basis von Ansys Workbench [1]. Dieses Programmsystem ermöglicht die Erstellung der geometrischen Modelle (auf Basis von Spaceclaim), die Diskretisierung der Modelle (Ansys Meshing) sowie die numerischen Berechnungen der zu untersuchenden strömungsmechanischen und thermodynamischen Phänomene (Ansys Fluent).

Das für die durchzuführenden numerischen Untersuchungen eingesetzte Programm Ansys Fluent bietet umfangreiche Möglichkeiten der detailgetreuen und räumlich hoch aufgelösten Analyse und Prognose von Strömungsvorgängen aller Art bis hin zur Brandsimulation. Das Programm umfasst eine große Anzahl von Modellen zur Nachbildung verschiedener Strömungstypen und Strömungszustände. Zudem sind kombinierte Festkörper-Fluid-Berechnungen realisierbar. Einen Überblick über Anwendungsbeispiele sowie zahlreiche Referenzen findet man unter www.ansys.com. Neben mehreren Ein- und Ausgabemöglichkeiten bietet das Programm über sogenannte „user defined functions“ (UDF) eine komfortable Schnittstelle an. Für die Berechnungen wurde das Programm in der Version 2020R1 benutzt.

Im Zuge der Diskretisierung werden Netze auf Basis hybrider Elemente mit entsprechender Auflösung der Wandgrenzschichten erstellt. Details zu den Netzen erfolgen in den jeweiligen Abschnitten.

Die numerischen Simulationen der einzelnen Betriebspunkte des Rohrregisters sowie der Trommelanschlussvariationen erfolgen auf Basis nachstehender Modellansätze:

- Stationäre und instationäre Untersuchungen bis zum Erreichen quasistationärer Zustände
- Berechnung nichtisothermer Wasserströmung und vereinfachter dreidimensionaler Wärmeleitung in den Rohren über „Shell Conduction“
- Berechnungen sowohl laminar (Betriebspunkte mit niedrigeren Wassermasseströmen) als auch turbulent auf Basis eines k-omega-SST-Turbulenzmodells, mit Low-Reynolds-Ansätzen
- Diskretisierungsansätze der Erhaltungsgleichungen zweiter Ordnung
- Solarer Wärmeeintrag in die Rohre approximiert über flächenspezifischen Wärmestrom

In Abbildung 2-1 ist das geometrische Modell des Rohrregisters in Auszügen dargestellt. Das Modell entstand als Nachbildung der Verrohrung und der Innenkontur auf Basis der vorliegenden CAD-Zeichnungen und wurde in ca. 250 Teilvolumen unterteilt, um die erforderliche strukturierte Diskretisierung sicherzustellen. Zudem ist es so einfacher, bei Bedarf die in diesem Modell modellierten idealen Bögen durch reale

Bogen-Geometrien zu ersetzen. Das komplette Rohrregister besteht aus einem in weiten Bereichen strukturierten Netz, um die relativ großen Lauflängen der Rohre bei trotzdem sehr guter numerischer Auflösung der Wandgrenzschichten sicherstellen zu können. Es wurde angestrebt, in jedem Falle eine entsprechende Grenzschichtauflösung zu generieren, siehe auch Abbildung 2-1. Der dimensionslose Wandabstand der ersten Gitterpunkte liegt in etwa bei 1, was einer numerischen Auflösung der Grenzschichten bis hin zur laminaren Unterschicht entspricht. In Bereichen mit größeren Wandabständen kommen im Falle der turbulenten Berechnungen Wandfunktionen zum Tragen. Das komplette Netz des Rohrregisters mit Trommelanschlüssen besteht aus 3,2 Millionen Elementen und 2,8 Millionen Knoten.

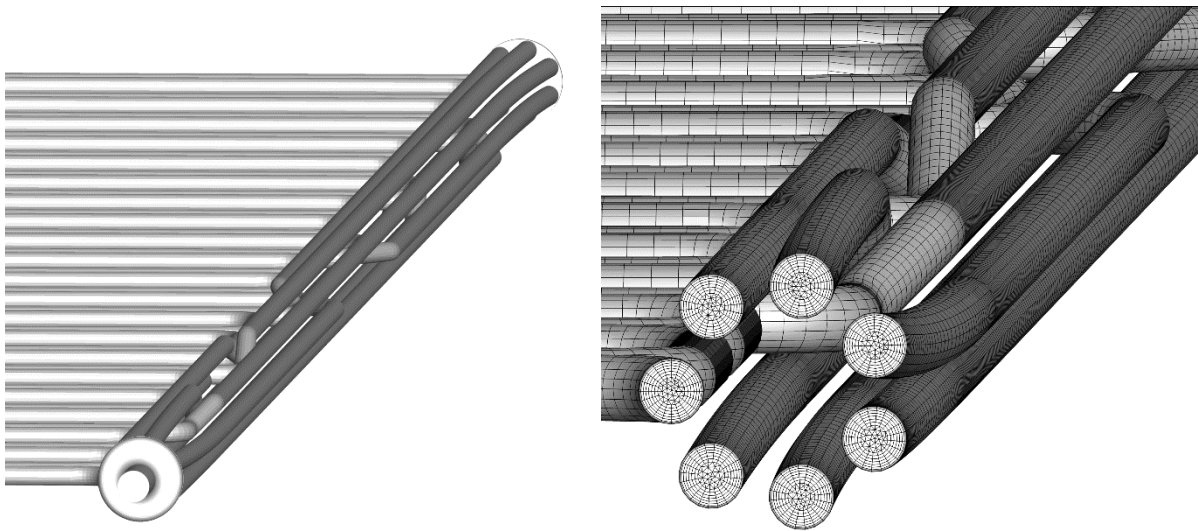


Abbildung 2-1 Geometrisches Modell des Rohrregisters, links mit Trommelanschlüssen, rechts ohne Trommelanschlüsse, jedoch mit Oberflächendiskretisierung

Die Variation der Betriebsparameter fand wie folgt statt:

- Eintrittstemperatur: 20 °C
- Wärmeübergabe an Rohre: 0 ... 35 ... 54 W/m, „shell conduction“ aktiv,
- Austrittsparameter: freie Strömung
- Geschwindigkeit: 0,05; 0,5; 1,00 m/s

Tabelle 2-1 zeigt anhand der resultierenden Bandbreite an Reynoldszahlen eindrucklich, dass es gilt alle Strömungsgebiete von laminar über transient bis turbulent simulativ hinreichend genau abzubilden.

Tabelle 2-1 Definition der Fälle A bis C und Parameterbereich (bezogen auf das Einzelrohr) für die Simulationsstudie

Fall	Massestrom in kg/s	Geschwindigkeit in m/s	Reynoldszahl bei 20 °C	Reynoldszahl bei nahe 100 °C
A	0,013	0,05	350	1.100
B	0,134	0,50	3.500	11.500
C	0,268	1,00	7.000	23.000

Um den Diskretisierungs- und Berechnungsaufwand für die Simulationsstudie zu den Trommelanschlüssen zu reduzieren, wurden zusätzliche Untersuchungen auf Basis eines verkleinerten Modelles durchgeführt. Hierzu sind hinter dem jeweiligen Eintrittsanschluss sieben lediglich kurze gerade Rohrstücke (mit einer Länge von je 0,1 m) angebunden. Diese reduzierten Modelle sind insofern statthaft, da hier primär die Strömungs- und Druckverhältnisse im Inneren der Trommelanschlüsse von Interesse sind.

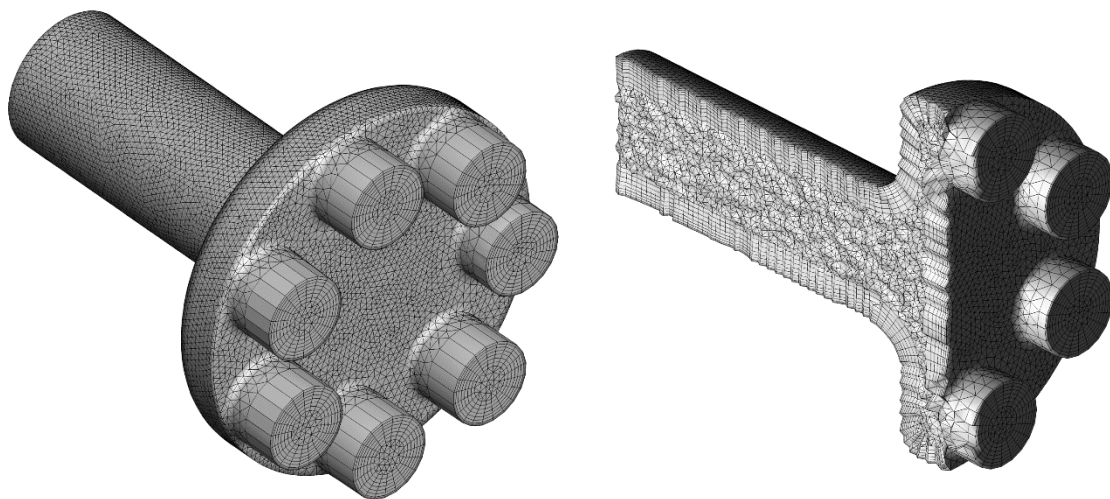


Abbildung 2-2 Geometrische Details der Innenkontur des Trommelanschlusses Ausgangsvariante, links, Oberflächennetz, rechts Mittelschnitt durch den Anschluss mit Diskretisierung des Volumens

Abbildung 2-2 zeigt beispielhaft für die Ausgangsvariante der Trommelanschluss-Geometrie die Diskretisierung, die Rohre sind hier ausgeblendet. Der Trommelanschluss in der gegebenen Ausgangsvariante ist sowohl mit seiner Oberflächenvernetzung als auch in einem Längsschnitt zu sehen. Ziel dieser geometrischen Variationen war stets neben einer möglichst gleichmäßigen Durchströmung der Trommelanschlüsse die Reduzierung des lokalen Druckverlustes, wobei in allen Fällen sichergestellt ist, dass der ursprüngliche Platzbedarf des Trommelanschlusses erhalten bleibt.

2.1.3 Simulationsergebnisse Rohrregisters 19/49 und Trommelanschlüsse

Nach diversen Voruntersuchungen bezüglich der einzustellenden Programmparameter und bezüglich der als sinnvoll einzuschätzenden Turbulenzmodellierung erfolgte die Berechnung der Durchströmung des ge-

samten Rohrregisters sowohl für laminare als auch für turbulente Strömungsverhältnisse. Im Falle der laminaren Durchströmung wurden mittlere Wassergeschwindigkeiten in den Rohren von 0,05 m/s bis 0,2 m/s berücksichtigt, im Falle der turbulenten Durchströmung variierten die mittleren Rohrgeschwindigkeiten in Schritten von 0,1 m/s von 0,2 m/s bis 1,2 m/s.

Da der Fokus der Untersuchungen hier auf den Druckverlusten und der gleichmäßigen Durchströmung der Registerrohre lag, werden in diesem Bericht hauptsächlich die Resultate der turbulenten Berechnungen vorgestellt.

Die Simulationen erfolgten nichtisotherm und jeweils quasistationär. Nachfolgend sind einige strömungstechnische Details, hier jeweils für mittlere Wassergeschwindigkeiten in den Registerrohren von 0,5 m/s wiedergegeben ($Re = 3500$).

Abbildung 2-3 zeigt die in resultierender Geschwindigkeit eingefärbten Vektoren des Strömungsfeldes im Eintrittsbereich des Rohrregisters in verschiedenen Schnittebenen. Anhand der Darstellungen erkennt man sehr gut die entstehenden Rezirkulationsgebiete sowie die durch den Trommelanschluss hervorgerufene Staupunktströmung.

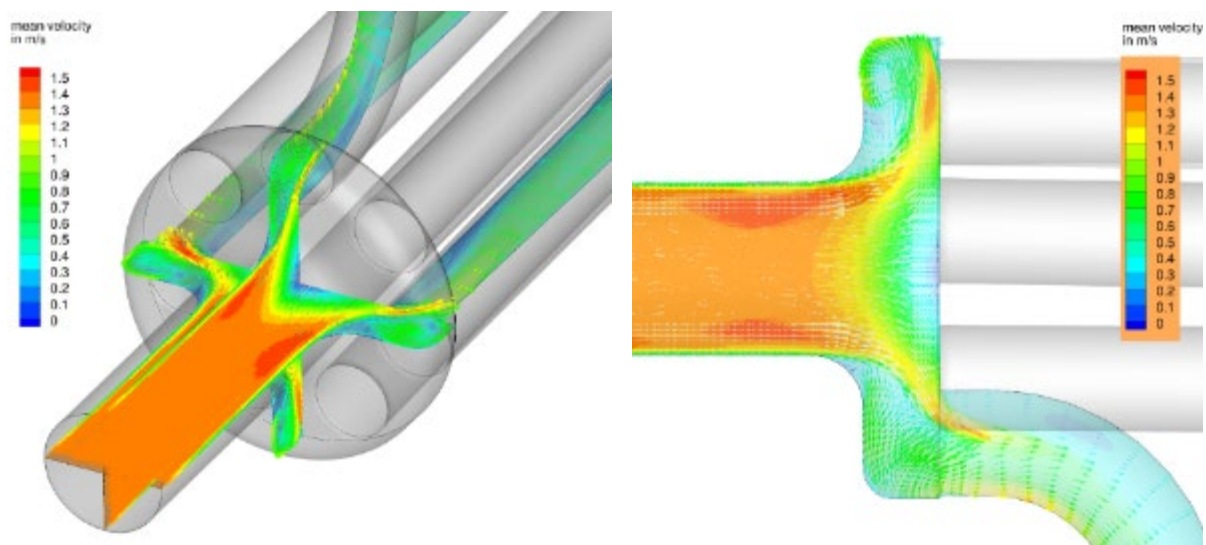


Abbildung 2-3 In resultierender Geschwindigkeit eingefärbte Vektoren des Strömungsfeldes im Eintrittsbereich des Rohrregisters in verschiedenen Schnittebenen, mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den Rohren 0,5 m/s, Wärmeeintrag 35 W/m^2 ($Re=3500$)

Darüber hinaus ist anhand der dargestellten Stromlinien in Abbildung 2-4 deutlich erkennbar, dass es zu erheblich stärkeren Verwirbelungen des Wassers im Eintrittsbereich (linkes Bild) kommt. Die Strömung im Austrittsbereich ist dagegen deutlich gleichmäßiger.

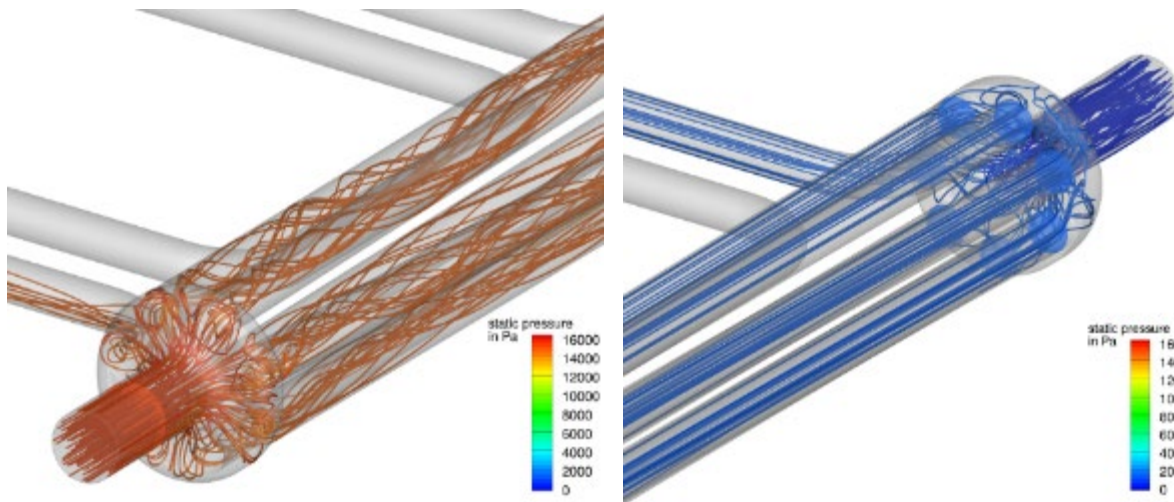


Abbildung 2-4 Stromlinien, links im Ein- und rechts im Austrittsbereich des Rohrregisters (in Farbe des statischen Druckes), mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den Rohren $0,5 \text{ m/s}$, Wärmeeintrag 35 W/m^2 ($Re=3500$)

In Abbildung 2-5 ist auf der linken Seite der statische Druck im gesamten Rohrregister auf Höhe der Trommelanschlüsse dargestellt, auf der rechten Seite sieht man die Wassertemperatur. Beide Darstellungen vermitteln einen guten Eindruck bezüglich der strömungstechnischen Details des Rohrregisters. Während der statische Druck in den einzelnen Rohrbögen aufgrund des Druckverlustes stetig abnimmt, kommt es erwartungsgemäß aufgrund der solaren Energieeinträge zu einer Zunahme der Wassertemperaturen mit zunehmendem Strömungsweg des Wassers.

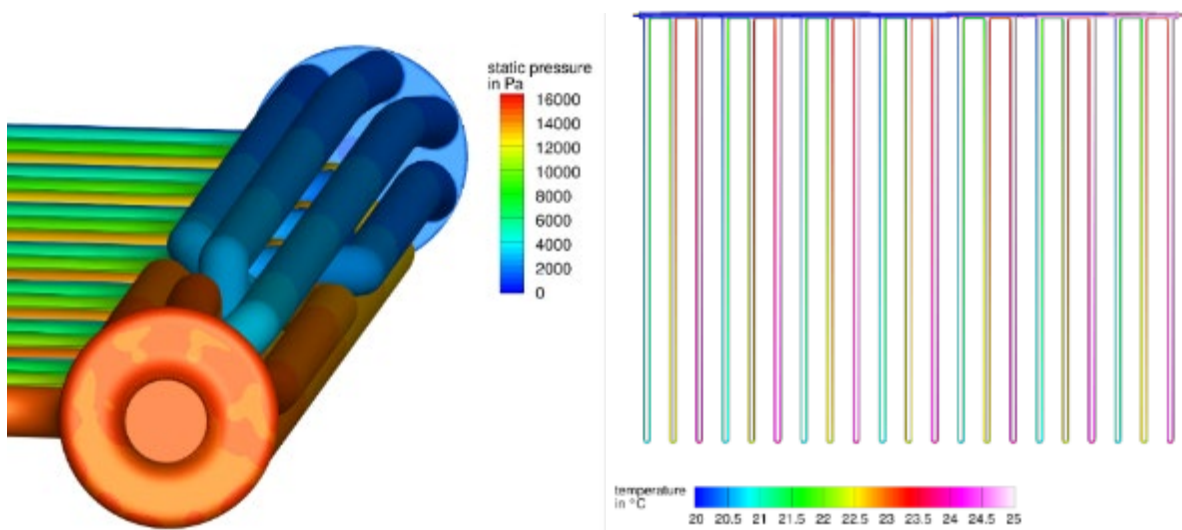


Abbildung 2-5 Links: Statischer Druck im Rohrregister in Pa, rechts: mittlere Wassertemperatur mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den Rohren $0,5 \text{ m/s}$, Wärmeeintrag 35 W/m^2 ($Re=3500$)

Da der Fokus der Untersuchungen primär auf der Untersuchung des Druckverlustes in den einzelnen Komponenten des Rohrregisters liegt, erfolgt eine separate Auswertung der Druckverluste für die zwei Trommelanschlüsse, das Rohrregister sowie die jeweils drei 180°-Bögen. In Abbildung 2-6 erfolgt die prozentuale Gegenüberstellung der jeweiligen Werte der Komponenten, bezogen auf den Gesamtdruckverlust des Rohrregisters. Anhand des Diagramms ist deutlich erkennbar, dass die Rohre des Registers den überwiegenden Anteil am Gesamtdruckverlust beisteuern. Der Druckverlust (Total Pressure als Referenz in Fluent) über dem Eintrittstrommelanschluss beträgt etwa 10 % vom Druckverlust über den Rohrregistern. Zudem erkennt man einen deutlichen Anstieg des prozentualen Druckverlustanteils über dem Eintrittstrommelanschluss bei zunehmender Wassermassestrom.

Der Druckverlust über dem Austrittsanschluss beträgt weniger als 50 % vom Druckverlust über dem Eintrittsanschluss (da das Wasser aus den Mäanderrohren langsamer in den Trommelanschluss strömt und durch die Anschlussform besser geleitet wird). Somit sind strömungstechnische Optimierungen des Trommelanschlusses im Austrittsbereich von geringerer Bedeutung.

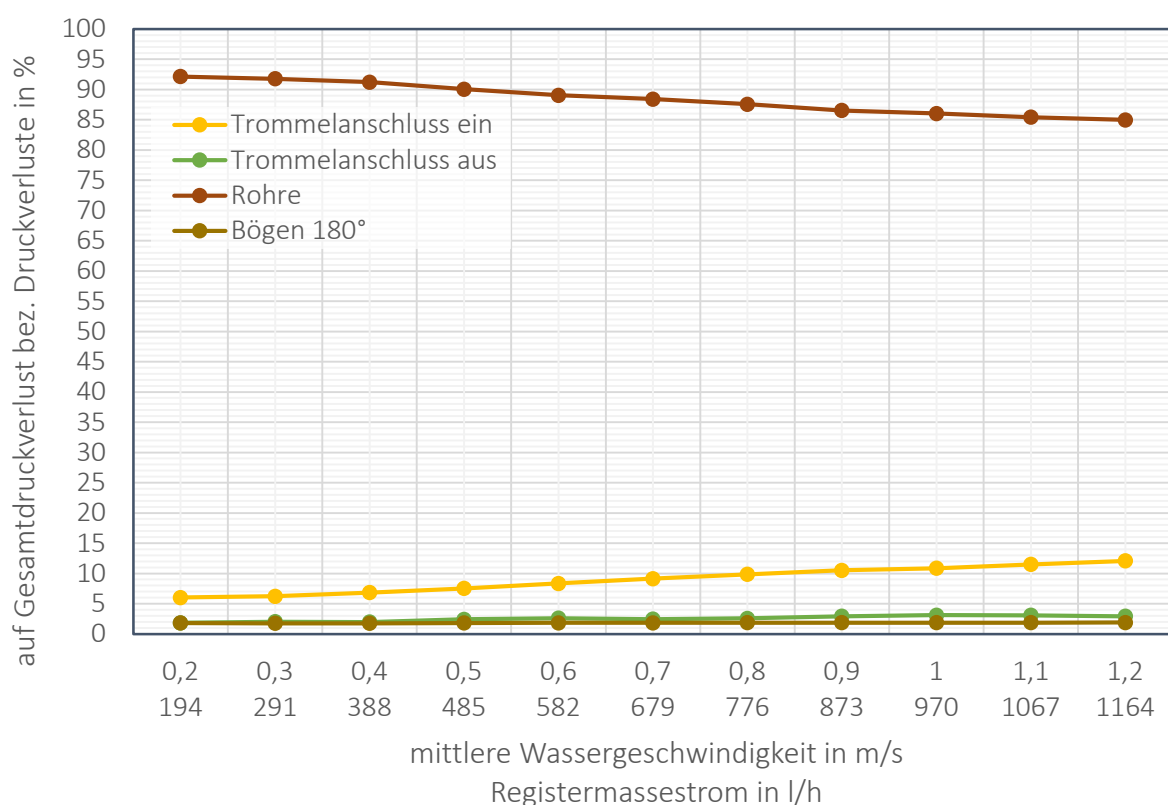


Abbildung 2-6 Auf Gesamtdruckverlust bezogene Druckverluste der einzelnen Komponenten in Abhängigkeit der mittleren Wassergeschwindigkeit in den Rohren, turbulente Berechnung auf Basis des k -Omega-SST Turbulenzmodelles

Mit der Simulationsstudie zu insgesamt 6 Trommelanschlussvarianten konnte erreicht werden, dass der Druckverlust in den Trommelanschlüssen signifikant reduziert ist. Abbildung 2-7 zeigt exemplarisch den Vergleich von Ausgangs- und optimierter Variante für die Eingangstrommel bei einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s und einen Wärmeeintrag von 35 W/m². Optisch gut zu erkennen ist die deutliche Minimierung der roten Bereiche im Eintrittsbereich mit Geschwindigkeiten von 1,5 m/s. Diese zeigen sich in der optimierten Variante minimiert und sind u. a. Grund für die Druckverlustreduktion, die in diesem Arbeitspunkt 47 % ggü. der Basisvariante beträgt.

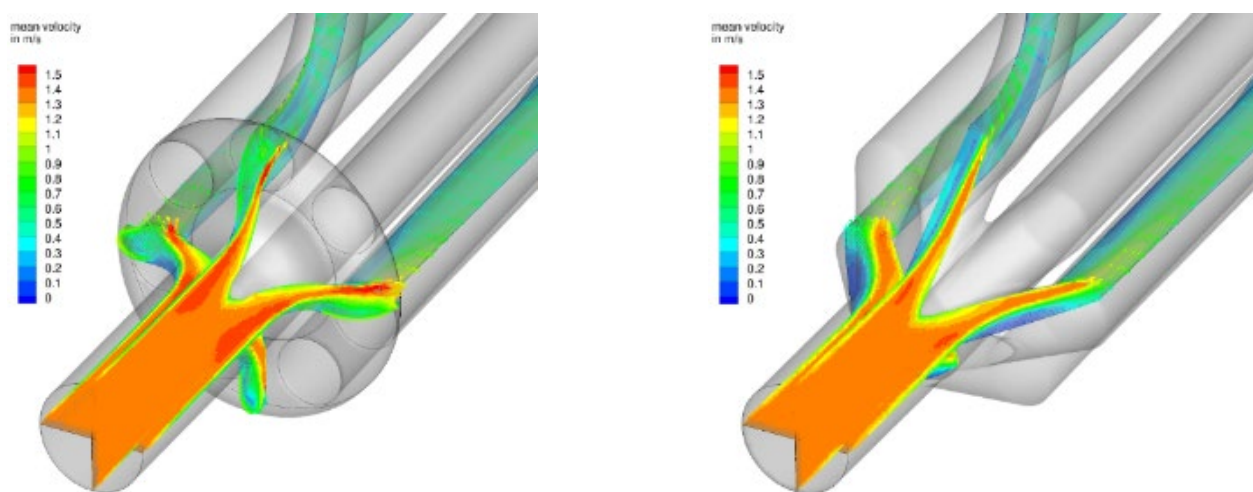


Abbildung 2-7 Beispiel für simulationsbasierte Optimierung der Trommelanschlussgeometrie bei 0,5 m/s und Re 3500 - links: Basisvariante; rechts: optimierte Variante

2.1.4 Modellierung und relevante Ergebnisse

Die bisher ausgeführten Arbeiten umfassen die Erstellung des Simulationsmodells der kompletten Rohrregister sowie darauf aufbauend die numerische Untersuchung der strömungstechnischen Verhältnisse in den einzelnen Komponenten der Register.

Als Ergebnis wurden die Strömungsstrukturen und die Druckverluste über den einzelnen Komponenten der Register für typische Betriebsbereiche ermittelt und mit vereinfachten Modellen der Druckverlustberechnung von Rohrnetzen abgeglichen. Hierbei zeigte sich, dass die numerisch ermittelten Druckverluste gut zu den bisher durchgeführten messtechnischen Untersuchungen der Projektpartner passen. Da die Druckverluste über dem Trommelanschluss im Eintritt in der Ausgangsvariante ca. 10 % des Gesamtdruckverlustes betragen, erfolgten darüber hinaus numerische Untersuchungen diverser geometrischer Variationen Trommelanschlüsse, mit dem Ziel der Reduktion der lokalen Druckverluste. Im Zuge dieser Untersuchungen konnten Varianten gefunden werden, die bei gleichen Außenabmessungen eine Reduktion des Druckverlustes bei gleichzeitig homogenerer Strömung in den einzelnen Rohren ermöglicht.

Auf Basis der umfangreichen messtechnischen Untersuchungen des Prototypen XL 19/49 RoS in Abschnitt 7.4 wurden zudem die Simulationsparameter der numerischen Berechnungen dieses Prototyps adaptiert, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Messergebnisse auch im numerischen Modell sicherstellen zu können.

Hierzu erfolgte die Anpassung der Wassermasseströme und Wassertemperaturen im Eintritt sowie der entsprechenden Stoffdaten im numerischen Modell entsprechend der protokollierten Messpunkte. Erste Untersuchungen zeigten, dass die im numerischen Modell auf Basis idealer Rohrgeometrien und hydraulisch glatter Rohre durchgeführten Simulationen im Bereich höherer Wassermasseströme (um 17 L/min) insgesamt etwas zu gering simulierte Druckverluste zur Folge hatten. Dementsprechend erfolgte die Berücksichtigung der realen Rohrgeometrie durch eine erhöhte Wandrauigkeit im Turbulenzmodell, was bei höheren Wassermasseströmen zu einer sehr guten Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Druckverlusten führt.

Auf Basis des modifizierten Modelles erfolgten ergänzend zu den Messungen weitere Simulationen für deutlich über die messtechnischen Untersuchungen hinausgehende Betriebstemperaturen von 4°C bis 110°C und weitere Untersuchungen des Modellverhaltens für sehr geringe Wassermasseströme.

2.1.5 Ableitung vereinfachter Druckverlustberechnungen auf Basis der Simulationen, Abgleich der Simulationsmodelle mit den Messungen an realem Rohrregister

Da die Druckverlustberechnungen auf Basis vereinfachter Abschätzungen und Berechnungsformeln von den Projektpartnern sehr ausführlich betrachtet werden, liegt der Fokus in diesem Abschnitt auf der Anpassung der numerischen Modelle, um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen den Strömungssimulationen und den Druckverlustmessungen an den realen Prototypen sicherzustellen. Die hier zu Beginn des Forschungsprojekts genutzten vereinfachten Formeln und Ansätze zur Druckverlustberechnung entstammen der sehr umfangreiche Formelsammlung auf <https://www.schweizer-fn.de/> und zeigten auch schon eine relativ gute Übereinstimmung mit den numerischen Resultaten.

Bezüglich der Anpassung des geometrisch detaillierten Simulationsmodelles an die reale Registerkontur wurden die in Kapitel 7 vorgestellten Druckverlustmessungen des Prototypen K3, 19/21 RoS genutzt. Hierzu erfolgte zuerst ein Abgleich der simulierten Betriebspunkte mit den messtechnisch erfassten Betriebspunkten.

Dementsprechend wurden die Volumenströme in einer Abstufung von 1 L/min von 1 L/min bis 17 L/min variiert. Die Wahl der Einheit L/min erfolgte für die einfachere Vergleichbarkeit zwischen Messungen und

Simulationen. Die Vorgabe von Volumenströmen erforderte eine entsprechende Adaption der Wassermassenströme entsprechend der betrachteten Betriebstemperaturen. In den Messungen wurden Betriebstemperaturen von 35 °C, 50 °C, 75 °C und 90 °C untersucht, zusätzlich erfolgten in den Simulationen auch noch Modellierungen für Betriebstemperaturen von 4 °C, 10 °C und 20 °C sowie 110 °C.

Als erster Ansatz, die reale Rohrinnegeometrie im geometrisch idealen Simulationsmodell zu adaptieren, wurde die Nutzung erhöhter Rauigkeiten k in der Wandfunktion des Turbulenzmodells eingesetzt. Zur Verdeutlichung der Einflüsse dieses Parameters sind in Abbildung 2-8 die entsprechenden Resultate für eine Betriebstemperatur von 35 °C zusammengefasst.

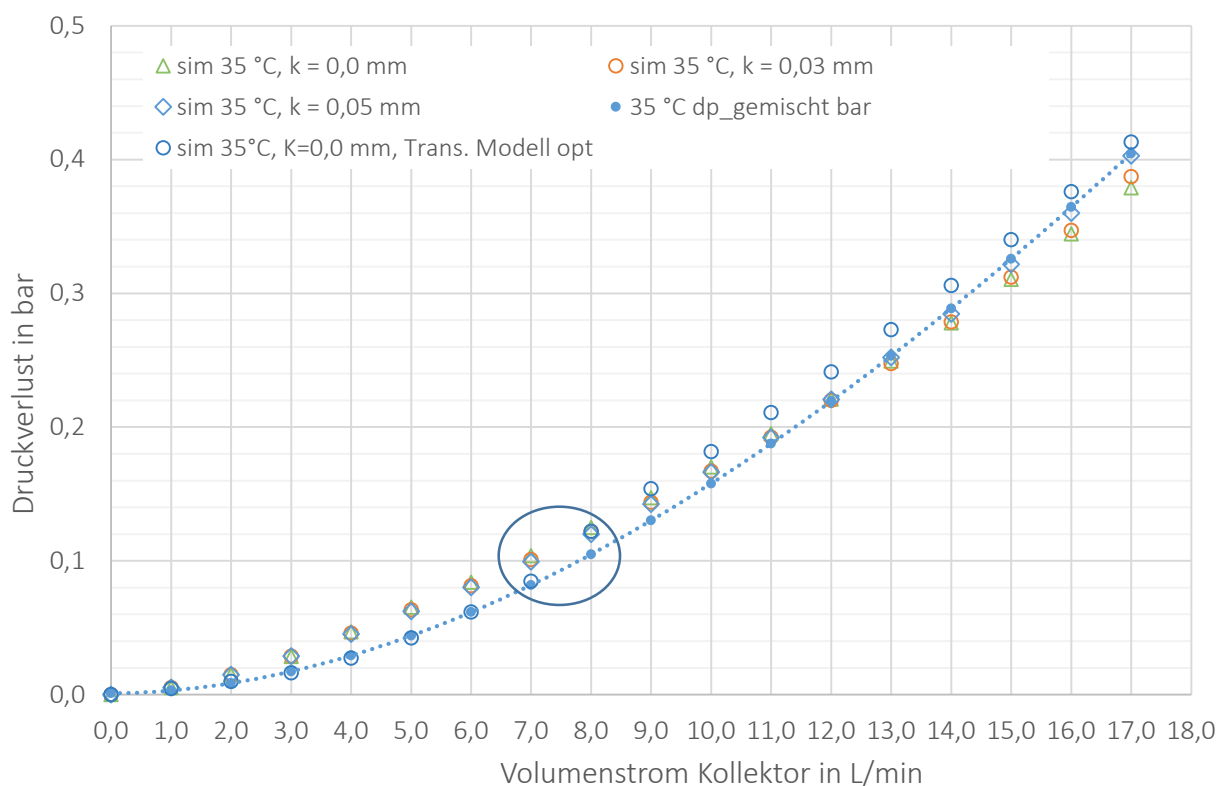


Abbildung 2-8 Gemessene und simulierte Druckverluste des K3 (XL 19/49 RoS) für unterschiedliche Volumenströme bei Betriebstemperatur 35 °C, Variation verschiedener Parameter des k -Omega-SST Turbulenzmodells

Anhand der Daten erkennt man sehr gut, dass für die im realen Betrieb zu erwartenden Volumenströme von etwa 10 bis 17 L/min eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsdaten erzielt werden kann, wenn $k = 0,05$ mm gesetzt wird. Bei geringeren Volumenströmen sinkt der Einfluss von k deutlich, dafür liegen die Druckverluste zwischen 1 und 10 L/min in den Simulationen deutlich über den Messwerten. Ein Vergleich mit weiteren Untersuchungen auf Basis laminarer Simulationen, siehe auch Ab-

bildung 2-9, zeigte klar, dass diese Überbewertung im Transitionsbereich (Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung, hier ab ca. 4 L/min) durch das genutzte Turbulenzmodell hervorgerufen wird. Die bisherigen Einstellungen, um auch laminare Bereiche angemessen abzubilden, reichten also eindeutig nicht aus. Demzufolge erfolgten weitere Untersuchungen auf Basis des k -Omega SST Turbulenzmodells, speziell für den Einsatz im Transitionsbereich (Kurve Trans. Modell opt). Mit Hilfe dieses Modells lässt sich der Transitionsbereich sehr gut nachbilden. Allerdings kommt es bei ca. 8 L/min zu einem deutlichen Sprung in den ermittelten Druckverlusten und somit zu einer Überschätzung der Druckverluste bei höheren Volumenströmen. Eine durchgängige Berechnung aller Betriebspunkte ohne Anpassungen im Modell konnte dementsprechend nicht gefunden werden.

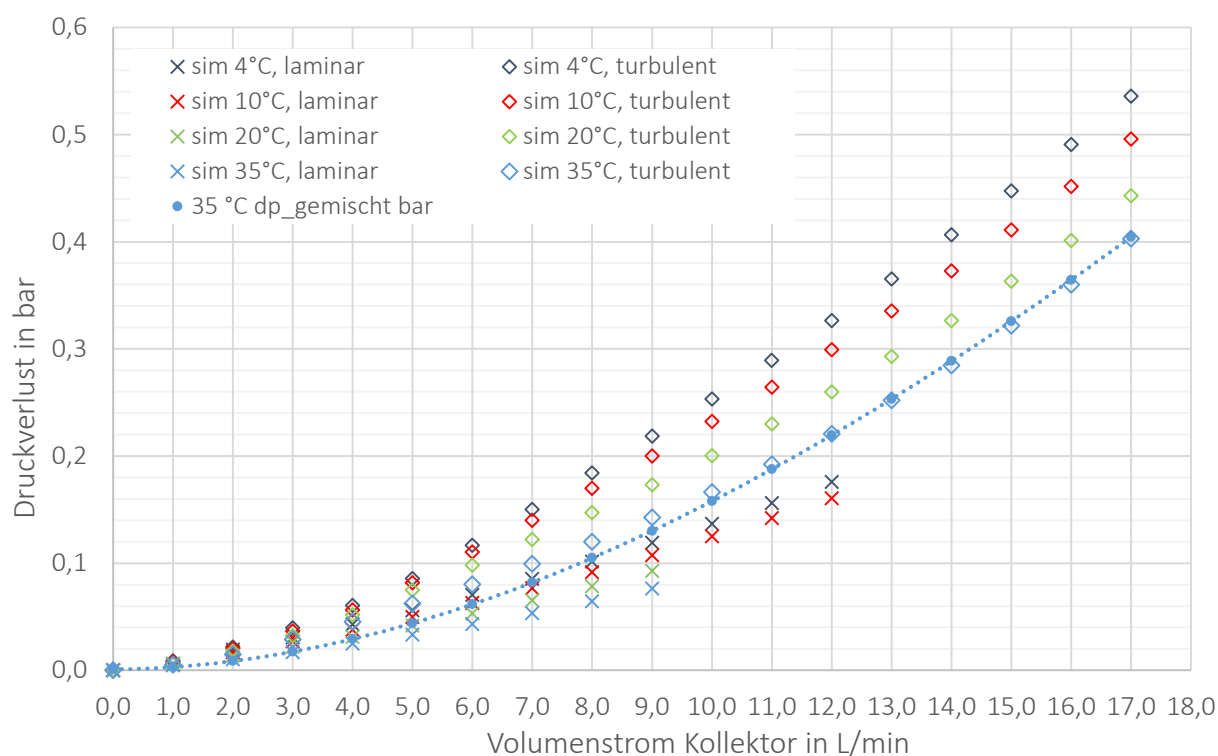


Abbildung 2-9 Gemessene und simulierte Druckverluste des K3 (XL 19/49 RoS) für unterschiedliche Volumenströme bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen, Vergleich laminar und turbulent

Der Vergleich der Druckverluste bei einer Betriebstemperatur von 90 °C, siehe auch Abbildung 2-10, zeigt eine deutlich geringere Abhängigkeit der Simulationsergebnisse vom Turbulenzmodell bei geringeren Volumenströmen und eine deutlich höhere Abhängigkeit von k bei größeren Volumenströmen. Der Einfluss des Modells für die Modellierung des Transitionsbereiches ist ebenfalls geringer. Insgesamt sind diese Effekte auf die hier auftretenden deutlich höheren Reynoldszahlen und somit auf die bereits ab ca. 2 L/min turbulente Strömung zurückzuführen.

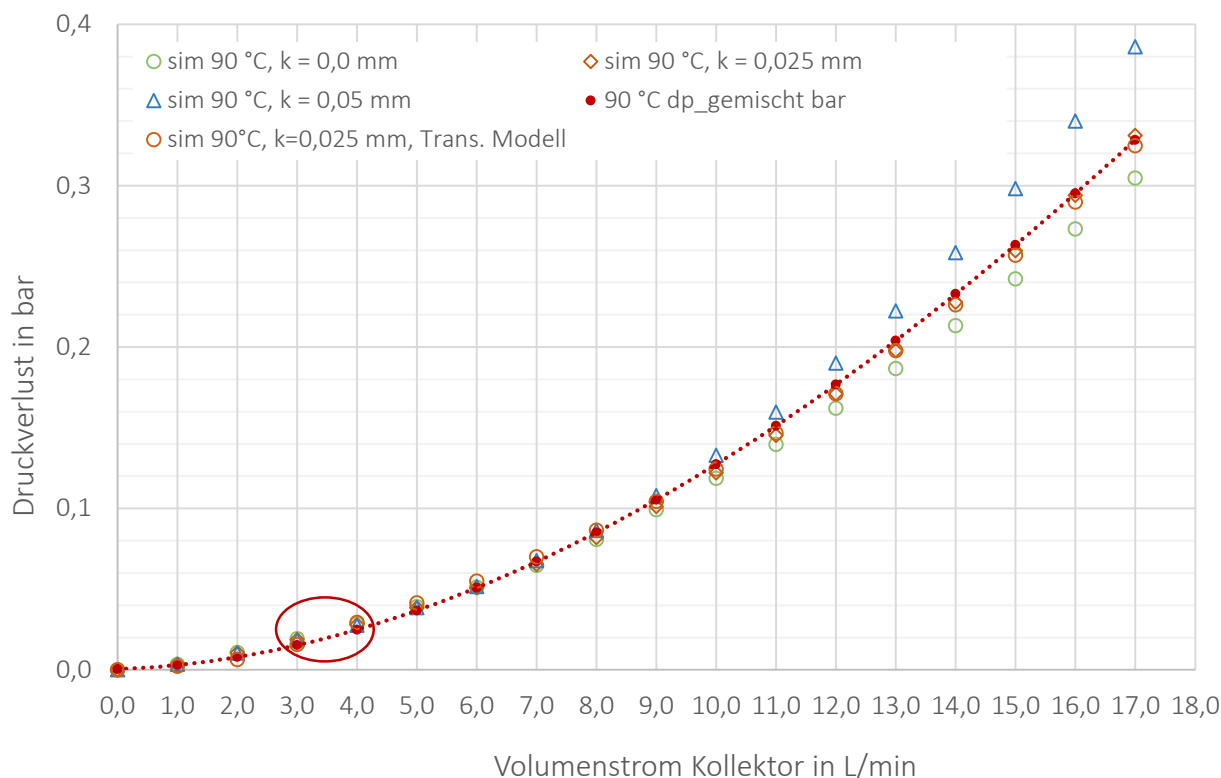


Abbildung 2-10 Gemessene und simulierte Druckverluste des K3 (XL 19/49 RoS) für unterschiedliche Volumenströme bei Betriebstemperatur 90 °C, Variation verschiedener Parameter des k -Omega-SST Turbulenzmodells

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es mit geeigneten Werten für die Wandrauigkeit k zwischen 0,02 mm und 0,06 mm sehr gut möglich ist, die Messwerte bei höheren Volumenströmen zu reproduzieren, ohne die realen Rohrbögen tatsächlich geometrisch nachbilden zu müssen.

Die bei niedrigeren Volumenströmen und geringeren Systemtemperaturen, also bei niedrigeren Reynoldszahlen zu hohen Druckverlusten infolge des Turbulenzmodells, lassen sich mit Hilfe eines verfügbaren Transitionsmodells ebenfalls vermeiden.

Bei höheren Betriebstemperaturen stimmen Druckverluste in allen Betriebspunkten sehr gut mit den Messwerten überein, siehe auch Abbildung 2-11. Beim Betriebspunkt 4 °C und 17 L/min ist der Druckverlust 35 % höher als bei 35 °C und 17 L/min. Bei 4 °C bleibt die Strömung im Register bis zu einem Volumenstrom von 8 L/min noch laminar, bei 35 °C bis ca. 4,5 L/min, bei 90 °C wird die Strömung bereits ab 2 L/min turbulent.

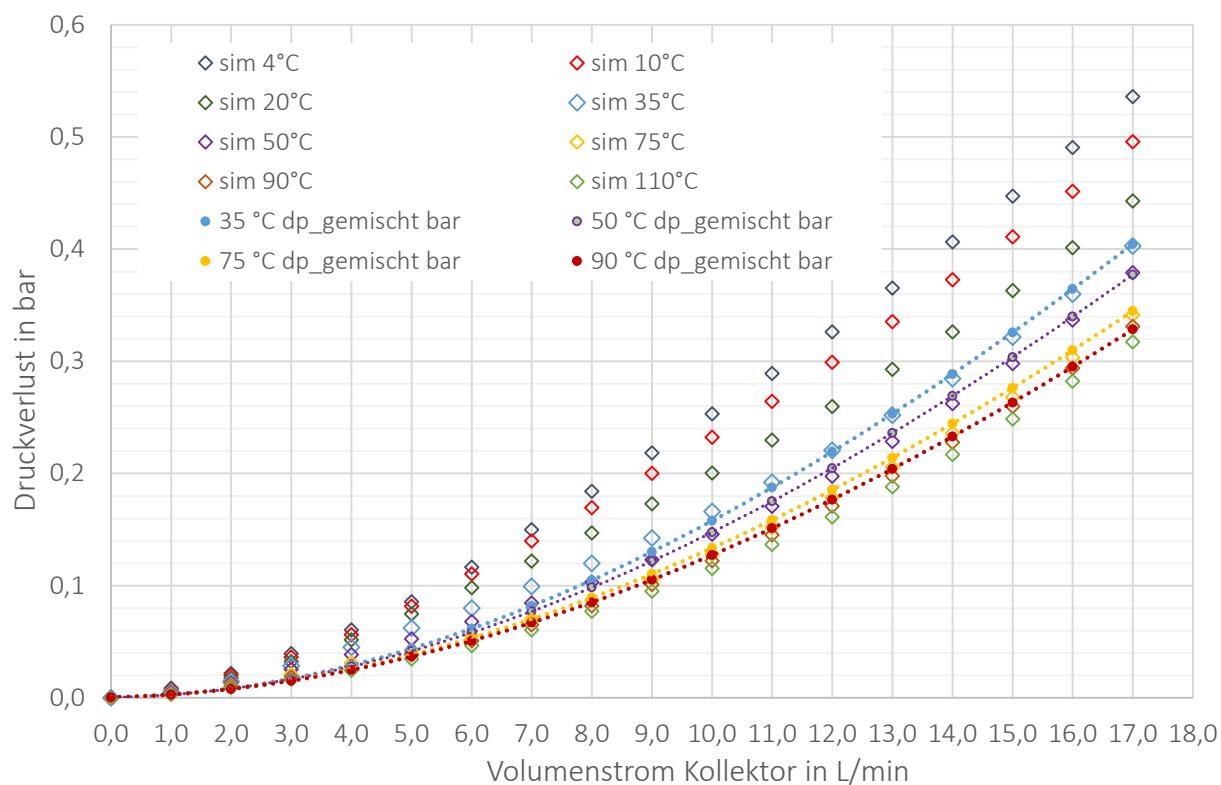


Abbildung 2-11 Gemessene und simulierte Druckverluste des K3 (XL 19/49 RoS) für unterschiedliche Volumenströme und Betriebstemperaturen

2.2 Fügeverfahren und Fügstellenanalyse

2.2.1 Motivation und Zielstellung

Zur Ermittlung des geeignetsten Fügeverfahrens wird eine Fügstellenanalyse durchgeführt. Die Fügstellenanalyse stellt eine Methode zur systematischen Auswahl von Fügeverbindungen dar. Ausgehend vom IST-Stand (Konstruktionsdaten, Konstruktive Anforderungen, technologischer Anforderungen) werden Fügeverfahren unter Einbezug der Werkstoffdaten, Geometrie, Beanspruchung und Funktion ausgewählt. Im speziellen Fokus stehen hierbei Lötverfahren und die Realisierung einer seriellen Umsetzbarkeit. Die Konstruktion wird entsprechend der Fügeverfahren optimiert.

2.2.2 Anforderungen an die Fügstelle

Die Fügeaufgabe besteht im Verbinden der Registerrohre jeweils auf der Ein- als auch Austrittsseite mit einem Sammelrohr. Folgende Randbedingungen sind maßgebend als konstruktive Anforderung an die Fügstelle gestellt:

Tabelle 2-2: Konstruktive Randbedingungen und Anforderungen an die Fügstelle

Mechanische Belastung		
Belastung in nachfolgenden Fertigungs-/Montageschritten	vernachlässigbar	
Dauerlast im Betrieb	vernachlässigbar	
Spitzenbelastung im Betrieb	vernachlässigbar	
Thermische Belastung		
Belastung in nachfolgenden Fertigungs-/Montageschritten	nicht vorhanden	
Dauerlast im Betrieb	5 °C	130 °C
Spitzenbelastung im Betrieb	nicht bekannt	350 °C
Mediale Belastung		
Öle/Fette	nein	
Wasser/Dampf	5 bar	20 bar
Chemikalien	ja	
Weitere Belastungen		
Witterung	ja	

Weitere Herausforderungen an die Fügeverbindung und den -prozess bestehen darin, dass die Dichtheit der Verbindung, die Zugänglichkeit der Fügstelle, die Automatisierbarkeit mit geringer Prozesszeit und Maßhaltigkeit zu gewährleisten sind.

2.2.3 Zusammenfassung und Auswahl des Fügeverfahrens

Die permanente Dichtheit fordert ein stoffschlüssiges Verbinden der Bauteile. Die thermische und mediale Belastung bedingt das Löten oder Schweißen. Aufgrund des simultanen Verbindens mehrerer Fügestellen sowie der Zugänglichkeit der Fügestelle ist das Löten das geeignetste Verfahren. Um die Maßhaltigkeit zu gewährleisten, entfallen Verfahren, welche das gesamte Bauteil erwärmen. Zur Automatisierung des Prozesses wird elektrischer Strom als Energieträger verwendet, sodass Induktionslöten als geeignetster Lötprozess identifiziert werden konnte. Induktionslöten ist ein Verfahren mit reproduzierbaren und sicheren Prozessablauf. Es stellt eine berührungslose Fügeoption dar, welche schnell und gleichmäßig bei konstanter Energieeintragsleistung erwärmt. Bei korrekter Einstellung ist Induktionslöten gut automatisierbar und für eine Serienfertigung mit hoher Stückzahl geeignet. Zudem ist es wartungsarm. Das Verfahren bietet die Möglichkeit eines robusten Fügeprozesses gerecht zu werden.

2.3 Konstruktive Umsetzung (REUT)

Variantenübersicht

Die Kollektoren mussten im ersten Schritt neu konstruiert werden. Hierbei wurde die RoS-Registerkonstruktion ohne Sammler als neues Bauteil adaptiert und eine Kollisionsanalyse durchgeführt. Die Variantenzahl wurde zunächst auf die bestehende XL-Kollektorfamilie übertragen. Sie besteht aus 4 Kollektoren. Jeweils 2 Kollektoren mit einer Röhrenlänge von 1503 mm und 2 Kollektoren mit jeweils 1920 mm Röhrenlänge. Die Kollektoren unterscheiden sich zusätzlich in der Anzahl der Röhren mit jeweils 14 und 21 Stück.

Ein CAD-Dienstleister wurde mit einer -Konstruktion und Kollisionsanalyse beauftragt. Insgesamt besteht die zuvor genannte, noch vorläufige RoS- Kollektorfamilie aus 16 Mäandervariationen. Die jeweils zu RoS Registern zusammengefügt werden. Die Konstruktion wurde so umgesetzt, dass die Register in die bestehenden Gehäuse der XL-Kollektorfamilie mit RmS Register passen (s. a. Abbildung 2-12).

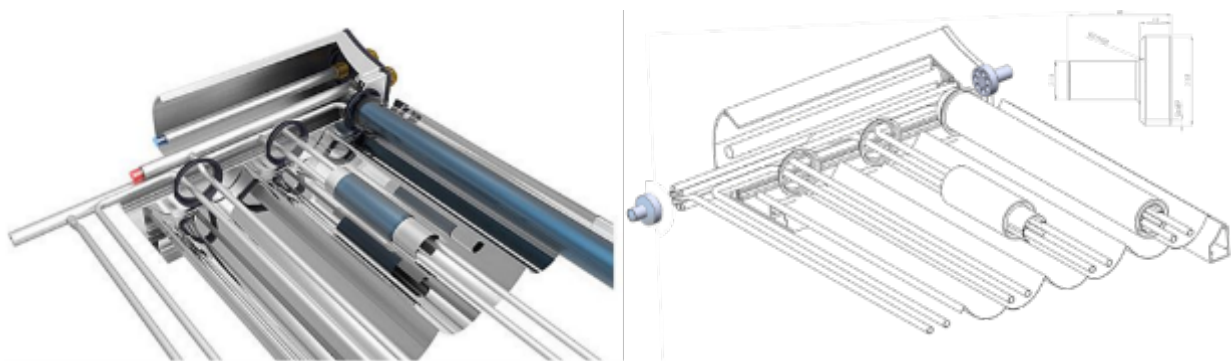


Abbildung 2-12 Schnittdarstellungen Kollektoraufbau. links: RmS, rechts: RoS

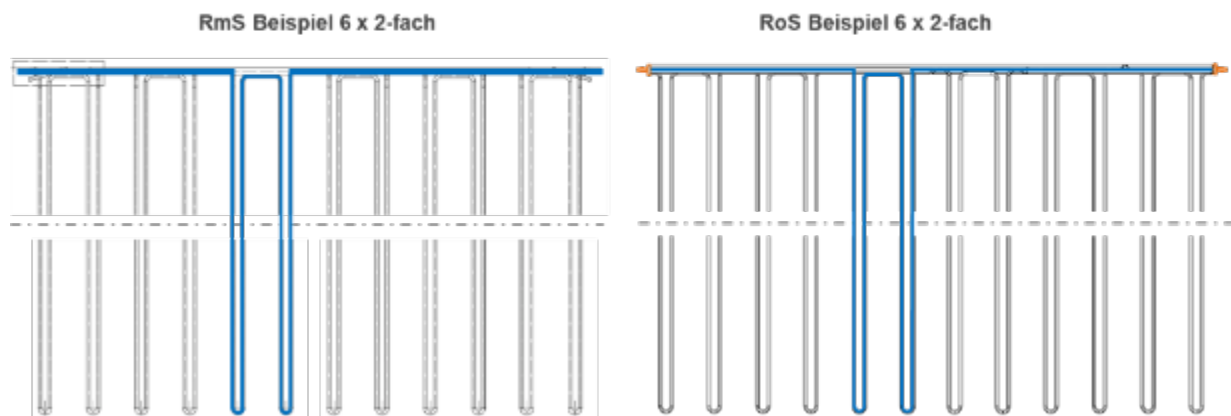


Abbildung 2-13 Registeraufbau. links: RmS, rechts: RoS

Diese 16 Mäandervariationen dienen als Grundlage für die Spezifizierung der Biegeaufgabe.

Die Kollisionsanalysen zeigen klar auf, dass das neue RoS Register rückwärtskompatibel in die bestehende Kollektorkonstruktion der Kollektorfamilien von REUT eingesetzt werden kann. Zusätzlich zur Kollektorkonstruktion wurden auch die Anschlusstechnik, Verbindung der Kollektoren untereinander und die Fühlerpositionierung untersucht und konstruktiv so abgestimmt, dass die Kollektoren wie bisher montiert und der Fühler exakt an der gleichen Position platziert werden kann

2.3.1 Vorbereitung der Konstruktion mit Hinblick auf eine teilautomatisierte Fertigung.

Im weiteren Verlauf wurde nochmals konstruktiv überprüft ob an einzelnen Mäandern eine zusätzliche Etage die Torsion der Mäander abmindern kann. Außerdem wurden der äußeren Trommelanschlusskontur Positionierungshilfen für die punktgenaue Platzierung in der Lötanlage hinzugefügt.

Die Abminderung der Torsion wird durch eine zusätzliche Etage an Mäander Typ 4 vorgenommen.

Alle Mäander Typen 1 bis 3 des RoS Registers besitzen 2 Etagen, um von der Mitte des Rohrbündels an die jeweilige Position am Trommelanschluss zu springen und eine gleiche Anzahl von 90 und 180 ° Bögen. Der Typ 4 Mäander hingegen läuft durch das Rohrbündel hindurch und lenkt lediglich über einen 90 ° Bogen in die Position zum Trommelanschluss ein. Dementsprechend erfährt dieser Mäander die größte Biegespannung beim Einfädeln.

Über eine zusätzliche Etage wurde diese Positionierung optimiert, um das Einfädeln zu erleichtern. Somit auch das Risiko einer etwaigen Kollision bei der Automatisierung entgegen wirkt. Die Abweichung wurde zunächst konstruktiv ermittelt, in der praktischen Umsetzung nochmals korrigiert und zeichnerisch umgesetzt. Alle Mäander Typen 1- 4 besitzen nun die gleiche Anzahl an Etagen sowie 90 ° und 180° Bögen. Sie sind somit auch strömungsseitig identisch. Das einfachere Einfädeln konnte im Versuch nachgewiesen werden.

2.4 Design Tool – neue Kollektoren und Systeme

2.4.1 Allgemeine Anforderungen

Da die neue RoS Registervariante eine Vielzahl an Kollektorvariationen ermöglicht, ist es zielführend die konstruktive Umsetzung in einem Designtool für neue Kollektoren und Systeme zu entwickeln. Das Design-tool ist Excel-basiert und beinhaltet folgende Eckpunkte:

- Neue Register für gleiche Druckverluste bei unterschiedlichen Stranglängen
- Neue Kollektoren verschiedener Größen mit angepasstem Druckverlust für die gewünschte Anwendung
- Physikalisch basierte und validierte Druckverlustberechnung für verschiedene Wärmeträger und Temperaturen
- Vereinfachte praxisnahe Näherung des Druckverlustes als Datenbank
- Überschlägige Systemberechnungen für Druck- und Wärmeverlust
- Darstellung der Ergebnisse als Tabelle und Grafik

Tabelle 2-3 Übersicht Design-Tool geplante Struktur

Übersicht Design-Tool - geplante Struktur				
Bereich	Name Tabellenblatt	Tabellenblatt-Typ	Anwender	Aufgabe
System	System	Input/Output Formblatt	Planer	Systemplanung verschiedene Stranglängen
		Berechnung/Daten ausgeblendet	Entwickler	Druckverlust, Wärmeverlust
		Diagramm Druckverlust	Planer	Planungshilfe Druckverlust
		Diagramm Wärmeverlust	Planer	Planungshilfe Wärmeverlust
Kollektor	Kollektor-Datenbank	Berechnung/Daten ausgeblendet	Planer	Datenbank Druck- und Wärmeverluste
	Kollektor-Design	Berechnung/Daten ausgeblendet	Entwickler	Röhre, Spiegel, Dimensionen, Druckverlust
	Kollektor-Dia	Diagramm	Planer	Kollektordarstellung - visuell
Komponenten	Vakuümrohre	Berechnung/Daten ausgeblendet	Entwickler	Berechnungsbasis für Kollektorgroße und Register
	CPC	Berechnung/Daten ausgeblendet	Entwickler	Berechnungsbasis für Kollektorgroße und Register
	Register	Berechnung/Daten ausgeblendet	Entwickler	Berechnungsbasis für Druckverlust
	Wärmeträger	Berechnung/Daten ausgeblendet	Entwickler	Berechnungsbasis für Druckverlust, Wasser, Glykol, Öl
Bauteile	gerade Rohre	Berechnung/Daten ausgeblendet	Entwickler	Datenbank Druck- und Wärmeverluste von Kollektor- und Systemrohren
	Verteiler-/Sammler-Stück	Berechnung/Daten ausgeblendet	Entwickler	Datenbank Druckverluste
	Formstücke (Bögen, Etagen etc.)	Berechnung/Daten ausgeblendet	Entwickler	Datenbank Druckverluste
Literatur	z.B. Grundlagen Druckverlust	Quellenauszüge ausgeblendet	Entwickler	Info

2.4.2 Druckverlustberechnungen

Für die Implementierung einer praxisgerechten und einfachen Druckverlustbestimmung wurden die Ergebnisse aus den Druckverlustmessungen an den Einzelkomponenten gerades Rohr, Bögen, Etagen, Trommelanschlüsse sowie der Messung am fertigen Register XL 19/49 RoS (s. a. 7.4.4.3) mit den durchgeführten Strömungssimulationen verglichen. Um eine universelle Einsetzbarkeit des Design-Tools in Zukunft auch bei unterschiedlichen Rohrwerkstoffen und Rauigkeiten zu gewährleisten, fließt die Rauigkeit K als variabler Parameter in die Berechnung ein, obwohl das derzeit eingesetzte Rohr D_{KK} aus Edelstahl in guter Näherung als glatt bezeichnet werden kann. Der zugehörige Verlustbeiwert ζ wird also nicht mit der typischen Formel für glatte Rohre bestimmt, sondern mit einer 5-fachen Iteration und einem Startwert von $\zeta = 0,05$ nach der Colebrook and White Formel für den Übergangsbereich zwischen glatter und rauer Strömung:

$$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = -2 \log \left[\frac{2,51}{Re\sqrt{\xi}} + \frac{k}{3,71} \right] \quad \text{mit der relativen Rauigkeit } k = \frac{K}{d_i}$$

Für das gerade Rohr wurde durch den Vergleich von Rechnung mit der Messung an einem 15 m langen Coil eine Rauigkeit von $K=0,005$ m bestimmt und damit für den gewählten Rohrwerkstoff und die weiteren Berechnungen festgelegt.

Mit zusätzlicher Hilfe aus einer Datenbank (<https://www.schweizer-fn.de>) wurden für die realen Register-Bauteile praxisgerechte ζ – Werte bestimmt. Dabei wird für ein Trommelpaar, nachfolgend vereinfacht Trommel genannt und bestehend aus einem Verteiler und einem Sammler, die jeweils baugleich sind, ein einziger ζ – Wert ermittelt.

Basierend auf dieser Datengrundlage ist es nun möglich für verschiedene Varianten des Registers den Druckverlust mit guter Genauigkeit vorzubestimmen. Da die Druckverluste temperaturabhängig sind und die Viskosität des verwendeten Wärmeträgers ebenfalls erheblichen Einfluss hat, wurde das Design Tool mit einer Wärmeträger-Datenbank ausgestattet. In einem Drop-down Menü kann dort zwischen Wasser, Ethylenglykol, Propylenglykol und einem speziell für solarthermische Anlagen entwickeltem Silikonöl (Helisol 5) ausgewählt werden. Bei den glykolbasierten Wärmeträgern kann zudem die Konzentration in einem Bereich von 25 bis 60% eingestellt werden.

Tabelle 2-4 Beispiel Auswahlmenü Wärmeträger

Randbedingungen	Auswahl ↓	Ergebnis		
Wärmeträger	Propylenglykol	Dichte	Kin. Viskosität	Wärmekapazität
Temperatur	35 °C	ρ	ν	cp
Konzentration Glykol	33 %	1021,5 kg/m ³	1,94E-06 m ² /s ²	3,895 kJ/(kg·K)

Mit Hilfe dieser Annahmen wurden nun die bei verschiedenen Temperaturen durchgeführten Druckverlustmessungen am Register XL 19/49 RoS mit dem Design-Tool nachgerechnet.

Auch der gemessene Druckverlust eines Großkollektor-Demonstrators XL 20/ konnte mit dem Datensatz für 3-fach Mäander mit sehr guter Genauigkeit mit dem Design-Tool nachgerechnet werden. So konnte gezeigt werden, dass es geeignet ist, die Druckverluste auch anderer RoS Registerdesigns mit abweichenden Längen und Rohrdurchmessern über einen großen Temperaturbereich genügend genau zu bestimmen. Da das Berechnungsmodell auch die Viskosität des Mediums beinhaltet, kann man auch ohne Validierung davon ausgehen, dass die Druckverlustberechnungen mit abweichenden Medien wie z.B, Glykol/Wasser-Gemischen oder auch Thermoölen praxisnahe Ergebnisse erzielt.

3 AP2: Biegetechnologie Register (FF, REUT; Biegeanlagenhersteller)

Bei dem eingesetzten Biegeverfahren zur Herstellung der 90 ° sowie der 180 ° Bögen handelt es sich um das Rotationszugbiegen nach VDI-Richtlinie 3430. Ziel ist es dabei die Biegungen möglichst ohne eine Querschnittsreduzierung auszuformen. Das Verhältnis Biegeradius r zu Rohrdurchmesser D , auch Biegefaktor genannt, liegt hier jedoch speziell bei Rohrdurchmesser D_{KK} bei 1,4375 was aus Fertigungsgründen unterhalb der Grenze der realisierbaren Biegung liegt. Eine Verringerung der Rohrwandstärke erschwert die Aufgabe, da es dann leichter zu Faltenbildung und Einschnürungen kommt, die den Querschnitt nicht tolerierbar verengen, den Druckverlust erhöhen. Eine konventionelle Maßnahme zur Vermeidung von Einfallstellen ist die Verwendung eines Biegedorns als Löffel- oder Kugelgelenkdorn, um eben jene Einfallstellen zu vermeiden. Diese technische Lösung kann aufgrund der Fertigung vom Coil in diesem Fall nicht realisiert werden, was zugleich die Schwierigkeit der Aufgabe verdeutlicht.

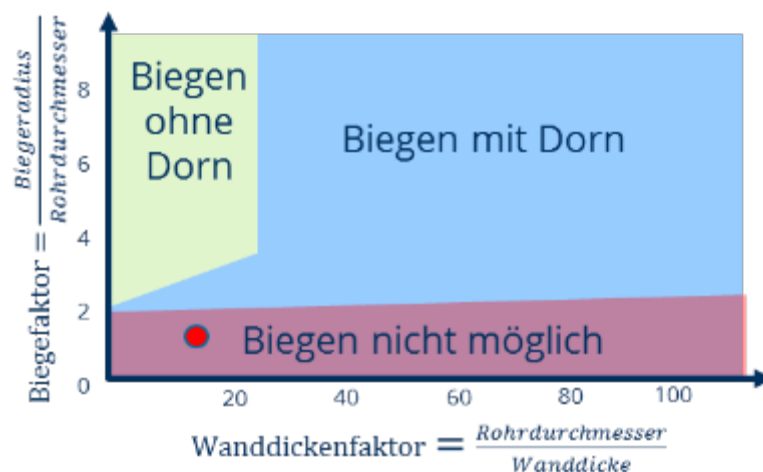


Abbildung 3-1 Prozessfenster für das Biegen von Rohren mit der Einteilung Biege- bzw. Waddickenfaktor und dem D_{KK} -Rohr (roter Punkt)

Für die Lösung der Aufgabe gibt es verschiedene Ansätze, wie eine Vorverformung des Rohrs oder die Verwendung eines speziell auf die Biegeoperation angepasste Biegeschablone, um die Querschnittsveränderung zu minimieren. Dabei gibt es in der Literatur zwei bekannte Lösungsansätze. Einerseits wird durch eine vorgelagerte Vorverformung (Ovalisierung) des Rohrs einen Einfall vorgebeugt [2]. Andererseits wird über einen geregelten Vorschub ein Knicken sowie auch dem Einfall des Rohrs vorgebeugt [3]. Ein konstanter Querschnitt über den kompletten Verlauf kann jedoch nicht garantiert werden [4]. Einen Sonderfall stellt die sog. Etage oder Etagerung dar. Dieser Absatz zur Führung der Rohrmäander voneinander wird als freies Gesenkbiegen mit einer geradlinigen Werkzeugbewegung ausgeführt. Durch die Festlegung auf die ge-

nannten Verfahren erfolgte die Recherche alternativer Verfahren nur reduziert. Auch machen die Restriktionen, wie die 13 m Rohrlänge und die Verarbeitung vom Coil ein Füllen oder anderweitige Stützoptionen zur Querschnittserhaltung schwierig [5]. Für die Nutzung der FEM zur Simulation des Biegeprozesses wird zuerst der verwendete Werkstoff charakterisiert, um verlässliche Kenndaten für die rechnerische Umsetzung der Biegeoperation mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) zu erhalten. Diese werden anschließend in eine Materialkarte eingepflegt und für die Simulation der Biegeoperation verwendet.

3.1 Charakterisierung der Werkstoffe und abgeleitete Materialmodelle

3.1.1 Rohrdurchmesser D_{KK}

Für die Charakterisierung des verwendeten Edelstahl-Werkstoffs werden vom Coil Rohrproben D_{KK} mit einer definierten Länge von 150 mm entnommen. Die Prüfung wurde mit einer statischen Universalprüfmaschine inspekt 250 der Fa. HEGEWALD & PESCHKE GMBH durchgeführt. Die Proben wurden eingespannt und je bis zum Bruch der Probe gezogen. Die Zugversuche wurden dabei gemäß der geltenden Norm für Zugversuche DIN EN ISO 6892-1 durchgeführt. Die freie Länge betrug $L_c = 100$ mm, die Dehngeschwindigkeit $d\varepsilon/dt = 0.00025$ 1/s bis R_p bzw. 0.0067 1/s bis zum Bruch der Probe. Um den bekannten Materialschwankungen, auch innerhalb einer Charge, zuvorzukommen, wurde mit $n = 7$ eine genügend hohe Stichprobenanzahl aus verschiedenen Abschnitten geprüft. Der erhaltene, gemittelte Kraft-Weg-Verlauf wurde in eine Fließkurve umgerechnet (vgl. Abbildung 3-2). Dabei ist der aufgenommene Bereich als blaue Linie bis zum Bruch der Probe abgebildet. Die Verfestigungsansätze extrapolieren den Verlauf der Fließkurve darüber hinaus, da beim Biegen neben den einachsigen Spannungszustand noch weitere Spannungszustände auftreten. Dies ermöglicht für konventionelle Umformoperationen eine Umformung über dem, beim Versagen der Probe ermittelten Umformgrad. Die Festlegung der Fließkurve bis zum Umformgrad $\phi = 1.0$ entspricht dem Stand der Technik. Für die Übertragung in die Materialkarte wurde sich für den Ansatz nach Swift entschieden, da dieser die Steigung der aus dem Zugversuch ermittelten Fließkurve am besten nachbildet. Weitere Versuche zur Charakterisierung, wie z. B. Biaxiale Zugversuche oder Druckversuche, welche im Rahmen von konventionellen Untersuchungen bei Blechwerkstoffen üblich sind, sind aufgrund der Geometrie nicht möglich.

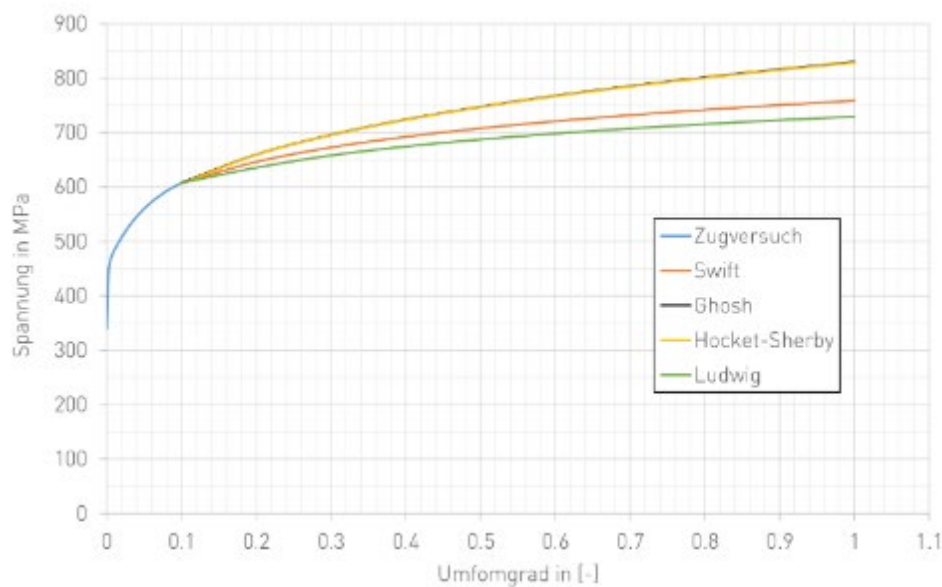


Abbildung 3-2 Fließkurve (Edelstahl, D_{KK}) der getesteten Rohrabsehnitt und die extrapolierten Verläufe basierend auf den verschiedenen Extrapolationsansätzen

Im Rahmen der Zugversuche konnten weitere mechanische Kenndaten ermittelt werden. Diese sowie die ermittelte Fließkurve wurden anschließend in eine Materialkarte der Programms simufact forming 2018 der Fa. SIMUFACT ENGINEERING GMBH übertragen.

Mithilfe dieser Kenndaten ist das Materialmodell für die numerische Annäherung an die Biegeoperation vollständig erarbeitet. Für eine Vergleichbarkeit der errechneten Lösung zur Validierung wurden verschiedene Ansätze verfolgt, auf welche im folgenden Abschnitt noch detaillierter eingegangen wird.

Im Rahmen der Inbetriebnahme der Anlage kam es fortlaufend zu Abweichungen beim Biegeprozess, so dass der Werkstoff als potenzielle Fehlerquelle in den Fokus rückte. Hierfür wurden die Zugversuche für den D_{KK} ergänzt und Tests mit unterschiedlicher Dehnrates und verschiedenen Fabrikationsdaten untersucht.

Es wird deutlich, dass die Dehnrates bzw. die Geschwindigkeit bei der Umformung keinen signifikanten Einfluss auf den Prozess haben wird. Bei den verschiedenen Chargen ist hingegen eine Diskrepanz bei den Proben erkennbar. Hier weicht speziell die Probe aus dem September 2018 von den neueren Fabrikaten ab. Es wird empfohlen, die Werkstoffkernwerte im Blick zu behalten und stichprobenartig Proben vor und während des Prozesses durchzuführen.

3.1.2 Rohrdurchmesser D_{GK}

Für die Charakterisierung des verwendeten Werkstoffs Edelstahl werden vom Coil Rohrzugproben D_{GK} mit einer definierten Länge von 150 mm entnommen. Um die Untersuchungen statistisch abzusichern und etwaige Chargenschwankungen auszugleichen, wurden 12 Proben gezogen und der Verlauf gemittelt (vgl. Abbildung 3-3).

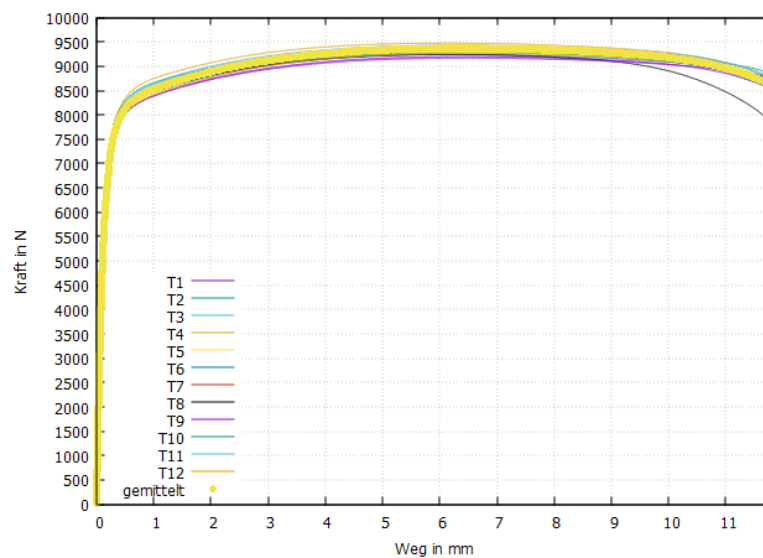


Abbildung 3-3 Kraft-Weg-Verlauf der Zugproben D_{GK} (Edelstahl)

Aus der gemittelten Kurve wurde äquivalent dem Vorgehen bei D_{KK} die Fließkurve ermittelt und der weitere Verlauf mit dem Ansatz nach Swift extrapoliert und in die FE-Umgebung integriert.

3.2 Experimente zum Biegeprozess

Zur Optimierung des Biegeprozesses konnte auf Proben der Hersteller der Biegemaschine zurückgegriffen werden. Diese ersten Prototypen der späteren Biegungen im Gesamtmäander konnten an der Professur tiefgreifend untersucht werden.

3.2.1 Anfertigung von Querschliffen und Vermessung

Die Rohrbögen wurden in Absprache mit dem Institut GEWV für eine spätere Strömungssimulation anhand der realen Querschnitte in 30 ° Segmente unterteilt. Dies ist beispielhaft in Abbildung 3-4 für den aufgetrennten Rohrboden dargestellt. Anhand dieser Segmente waren anschließend verschiedene Optionen zur Vermessung gegeben. Einerseits war über die Aufgaben der Querschnittsfläche eine Aussage zu den Querschnittsveränderungen möglich. Andererseits konnte über die erhaltenen Querschliffe und den Verlauf beim Teilungsquerschnitt die Flächen in eine 3D-Nachbildung des realen Querschnittsverlaufs überführt werden, um diese anschließend für die Überprüfung in einer Strömungssimulation zu nutzen.

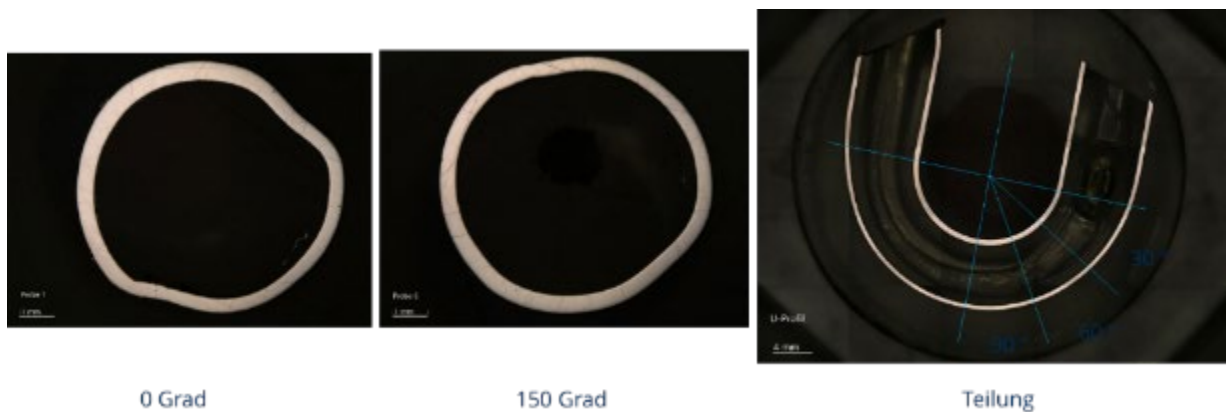


Abbildung 3-4 Darstellung der Querschliffe als Segmente für einen 180° Boden mit der Teilung als Querschliff sowie der Segmente bei 0° und 150°

Um die Schliffe hinsichtlich der Qualitätsanforderungen an die Rohrbögen zu bewerten, sind durch die Vorgaben an den späteren Einsatzzweck bzw. die im Antrag formulierten Herausforderungen Vorgaben existent. Diese wurden mit der geltenden VDI-Richtlinie 3430 zum Rotationszugbiegen bzw. der VDI Richtlinie 3431 abgeglichen und angepasst. Neben dem möglichst konstanten Querschnitt waren die geometrischen Anforderungen (Biegewinkel und –radius), war die Vermeidung von Ausschusskriterien, wie übertriebenen Einfall an der Biegeaußenseite sowie Faltenbildung am Innenbogen des Rohrs.

Zur weiteren Bewertung der Probiebungen der Rohrbiegenanlage wurden dies hinsichtlich weiterer Kenngrößen charakterisiert- Dabei standen der Rauheitskennwerte in verschiedenen Bereichen nach der durchgeführten Biegung sowie der Härteverlauf innerhalb des Rohrbogens bzw. im Querschnitt im Fokus. Auf die ermittelten Werte und deren Nutzen, wie z. B. der Einfluss der Rauigkeit auf die Korrosion, wird nachfolgend noch detailliert eingegangen

3.2.1.1 Messung von Kontur und Ermittlung der Rauigkeitskennwerte

Die Vermessung der Rauheitskennwerte erfolgte am Konfokalmikroskop der Fa. KEYENCE GMBH. (zur Messung zur Verfügung gestellt von der Prof. FTM). Abbildung 3-5 verdeutlicht hierbei den Ablauf. Anhand eines gewählten Rasters wird schrittweise Linie für Linie die Kontur des gewählten Bogens mit einer ausreichend hohen Genauigkeit für eine parallele Ermittlung der Rauheitskenndaten aufgenommen.

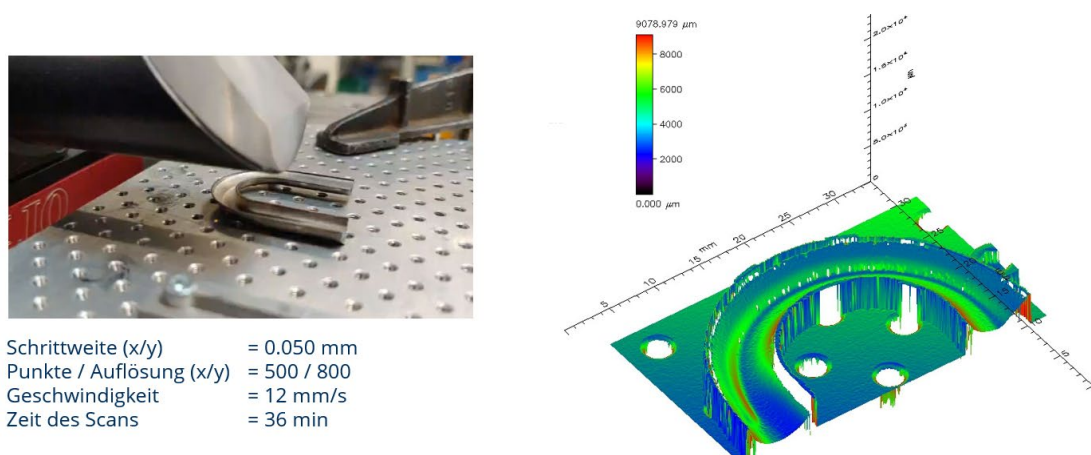


Abbildung 3-5 Darstellung eines Scans mithilfe des Konfokalmikroskops - Gewählte Parameter (links unten) sowie exemplarisches Ergebnis für einen 180 ° Bogen (rechts)

Die Aufnahme der Kontur der Rohrhälften für eine potentielle Überführung in eine 3D-Abbildung der Rohrbögen wurde anhand verschiedener Vermessungsmethoden realisiert. Einerseits wurde die Kontur über die Konfokalmikroskopaufnahme ermöglicht. Vorab wurde die Messung über die Tastspitze einer T8000 der Fa. JENOPTIK HOMMELWERKE GMBH durchgeführt (vgl. Abbildung 3-6).

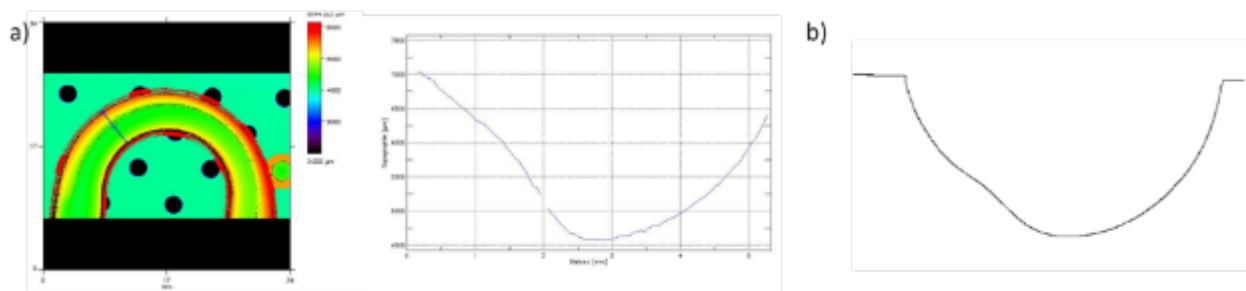


Abbildung 3-6 Ausgewertete Konturen der Rohrbögen: a) Konfokalmikroskopmessung sowie b) über die Nutzung der Tastspitze eines Hommelwerke Tastgeräts

Die Überführung der Konturen wurde jedoch verworfen. Durch den Trennprozess der Abschnitte durch Erodieren konnte nicht sichergestellt werden, dass die Mitte des Rohrabschnitts zuverlässig getroffen wurde. Weiterhin ist prozessbedingt durch den Draht ein Abtrag im Durchmesser des Drahtes unvermeidbar. Somit wurde eine Nutzung der Segmente präferiert und die Konfokalmikroskopie nur für die Ermittlung der Oberflächenrauheitskennwerte genutzt. Das Messverfahren ist eine optische Rauheitsmessung mithilfe eines Konfokalmikroskops der Fa. MAHR. Dieses ermittelt im festgelegten Messfeld eine 3D-Oberflächenstruktur. Daraus werden die zweidimensionalen Oberflächenkenngrößen nach ISO 25178 bestimmt. Aus diesen ermittelten Daten heraus können dann in dem Programm PRETITEC Optronik Mark III (Version 3.9) die Rauheitskenngrößen über ein Tastschnittverfahren nach DIN EN ISO 4287 bestimmt werden. Die (Einzel-)Messstrecke ist dabei in Anlehnung an die Norm auf $L_c \approx 0,4$ mm gewesen. Es wurden in jedem

Bereich einerseits Messungen ($n \geq 7$) in Rohrichtung und andererseits quer zum Rohr durchgeführt. Weiterhin wurden für die Ermittlung der Werte wurden damit entlang des Bogens mehrere Messabschnitte definiert (Einlauf- und Auslaufbereich, Mittelteil) und anschließend gemittelt.

Als Ergebnis ergeben sich die Werte aus Abbildung 3-7. Hierbei ist deutlich erkennbar, dass die Rauheitswerte aufgrund der Verformung ansteigen.

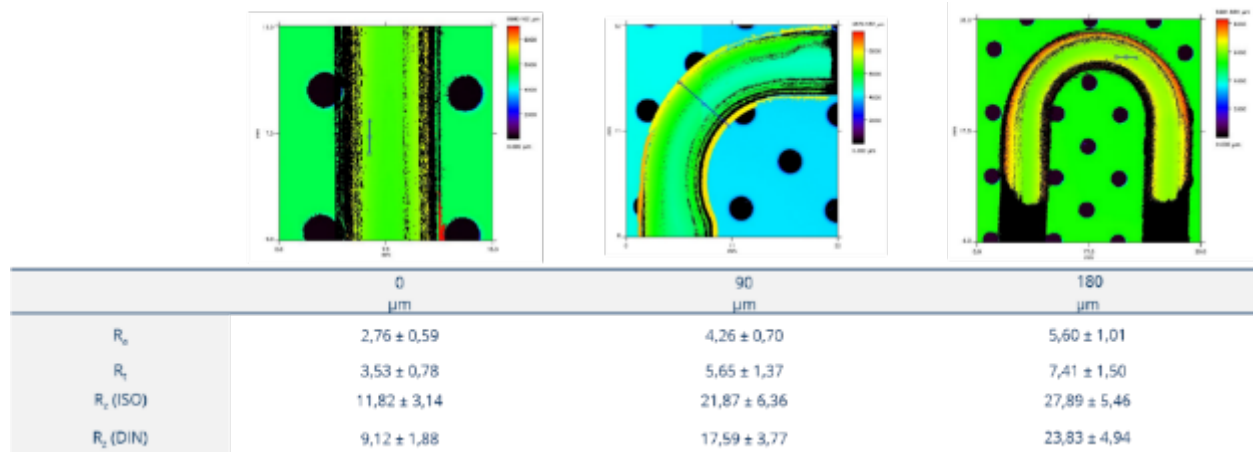
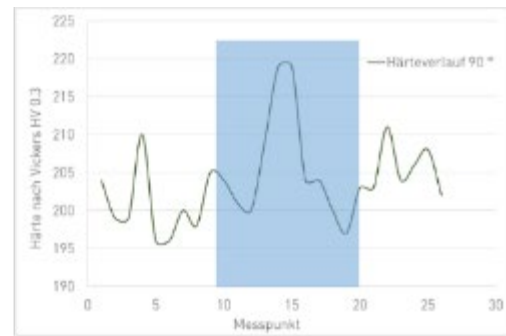
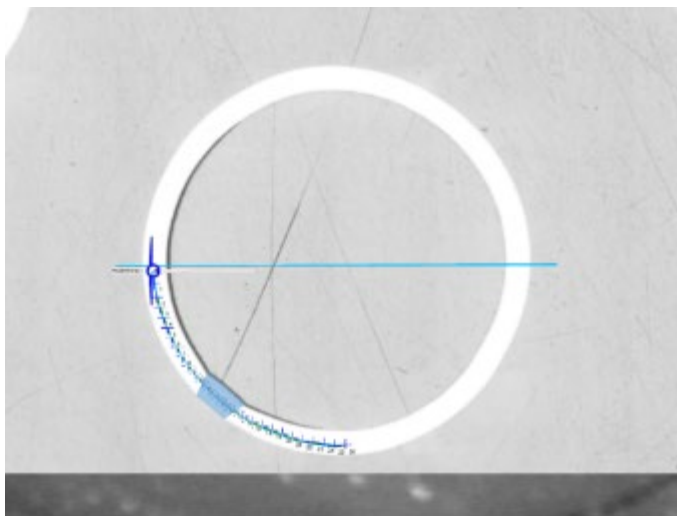


Abbildung 3-7 Ermittelte Rauigkeitskenngrößen für die verschiedenen Abschnitte (unverformt, 90 °und 180 °)

Für die z-Etage ergab sich ein ähnliches Bild, wie bei den vorangegangenen Proben. Mit erhöhter Umformung steigt die Rohrrinnenrauigkeit an. Die abschließenden Werte sind in der folgenden Tabelle fixiert. Die Messwerte der einzelnen Überprüfung sind im Anhang zu finden.

3.2.1.2 Ermittlung der Härtekennwerte

Da es sich bei dem Rohr um ein längsnahtgeschweißtes Halbzeug handelt, sind für den Biegeprozess die Lage und die Eigenschaften der Schweißnaht relevant. Zu dieser Thematik ist die Literatur rar gesät, ein Großteil der Quellen nutzt nahtlose Rohr und nimmt ein homogenes Materialverhalten über das komplette Rohr an. Beispiele für die Charakterisierung der Schweißnaht und deren Einbindung in die Simulation werden als Beispiel von Ren et al. [Ren2012]. Aufgrund der kleinen Dimensionen des verwendeten Rohrs mit D_{KK} ist eine Charakterisierung der Schweißnaht nicht möglich. Aus diesem Grund wird vorerst auf eine separate Simulation verzichtet und diese nur für den Bereich der Etage angedeutet. Über die Ermittlung der Härtekennwerte soll eine Bestimmung der Abweichungen zum Grundwerkstoff abgeschätzt werden. Nach dem Einbetten der Segmente in Epoxidharz und dem anschließenden Schleif- und Polierprozess wurde ergänzend eine Härteverlaufsprüfung am Querschnitt durchgeführt. Dies wurde am Mikrohärtemessgerät der Fa. QNESS (für Messungen zur Verfügung gestellt vom FTM) durchgeführt. Dafür wurde ein Abschnitt eines unverformten Rohrs verwendet.



Härte gemittelt = $203,9 \text{ HV } 0.3 \pm 6.02$
 Schwankungsbreite 23 HV 0.3

Abbildung 3-8 Messung des Härteverlaufs im Viertelbogen eines Segments über die Schweißnaht (blau) hinweg sowie der resultierende Härteverlauf für D_{KK}

Es wird deutlich, dass eine markante Wärmeeinflusszone einer Schweißnaht anhand des Härteverlaufs ausgebildet hat. Die Härte hat ihr Maximum mit einer Abweichung von ca. 20 HV0.3 mittig bei einer durchschnittlichen Härte im Halbzeug von $204 \pm 6.02 \text{ HV0.3}$ (vgl. Abbildung 3-8). Anhand dieser Ergebnisse muss von einem Einfluss der Schweißnaht auf die Biegeoperation ausgegangen werden. Inwieweit dieser sich auf die realen Ergebnisse niederschlägt, muss untersucht werden. Über eine Abbildung anhand der Simulation muss anschließend entschieden werden.

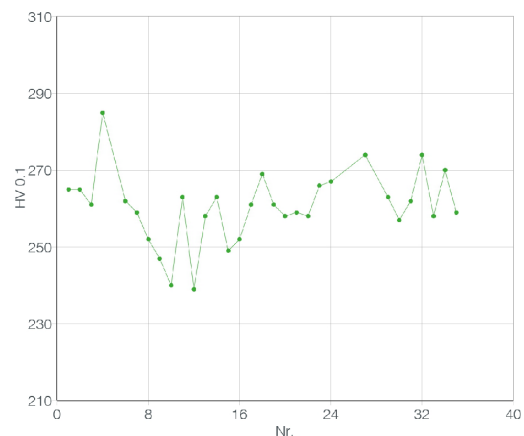
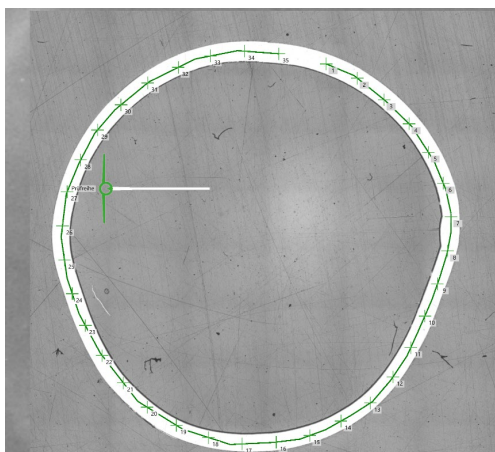


Abbildung 3-9 Härteverlauf D_{GK}

Die Überprüfung der Härteverlaufs für D_{GK} wurde ebenfalls vorgenommen. Dabei ist die durchschnittliche Härte im Halbzeug bei $260 \pm 9.4 \text{ HV0.1}$. für die Schweißnaht konnte im vorliegenden Fall keine signifikante Veränderung des Härteverlaufs festgestellt werden, so dass die Schweißnaht nicht mehr in die FEM einbezogen wird.

3.2.1.3 Auswertung der Querschliffe und Erstellung eines 3D-Modells

Die eingebetteten Segmente wurden anhand eines Mikroskops mit einem kalibrierten Maßstab aufgenommen. Anschließend erfolgte eine Überführung in das CAD – Programm SOLIDWORKS 2019. Hier wurde der Skizzenmaßstab dem Bildmaßstab angeglichen und die Innenkontur über Spline abgenommen. Diese wurde in der resultierenden Querschnittfläche übersetzt und dem idealen Querschnitt gegenübergestellt.

Während im ersten Bereich die Querschnittsreduzierung mit -2,83 % im Vergleich zum idealen Querschnitt noch im vertretbaren Bereich weisen die nachfolgenden Abschnitte mit ca. 16 % eine hohe Reduzierung sowie eine nicht zu vernachlässigende Deformation auf. Für eine Überprüfung der resultierenden Druckverluste für eine Nutzung der obigen Bögen als Mäander wurden die Querschnitte anhand der Teilung aneinandergefügt und als 3D-Modell exportiert.

3.3 Aufbau der Simulation und Auswertung

3.3.1 Rotationsbiegeprozess

Für die Simulation wurde sich an konventionelle Werkzeugaufbauten für das Rotationszugbiegen orientiert. Weiterhin gab es hierbei eine Abstimmung mit dem späteren Hersteller der Biegeanlage. Um eine Simulation bzw. die Berechnungszeit einem überschaubaren Zeithorizont zu realisieren, ist die Rechnung immer eine Vereinfachung der Realität durch eine Reduzierung auf die wesentlichen Prozessbestandteile zum Biegen und der Festlegung bestimmter Annahmen. Hierbei wurde zuerst das Werkzeug als solches auf die relevanten Bestandteile und Wirkflächen reduziert. Nachfolgende Abbildung 3-10 zeigt das vereinfachte und angepasste Modell für den Rotationsbiegeprozess.

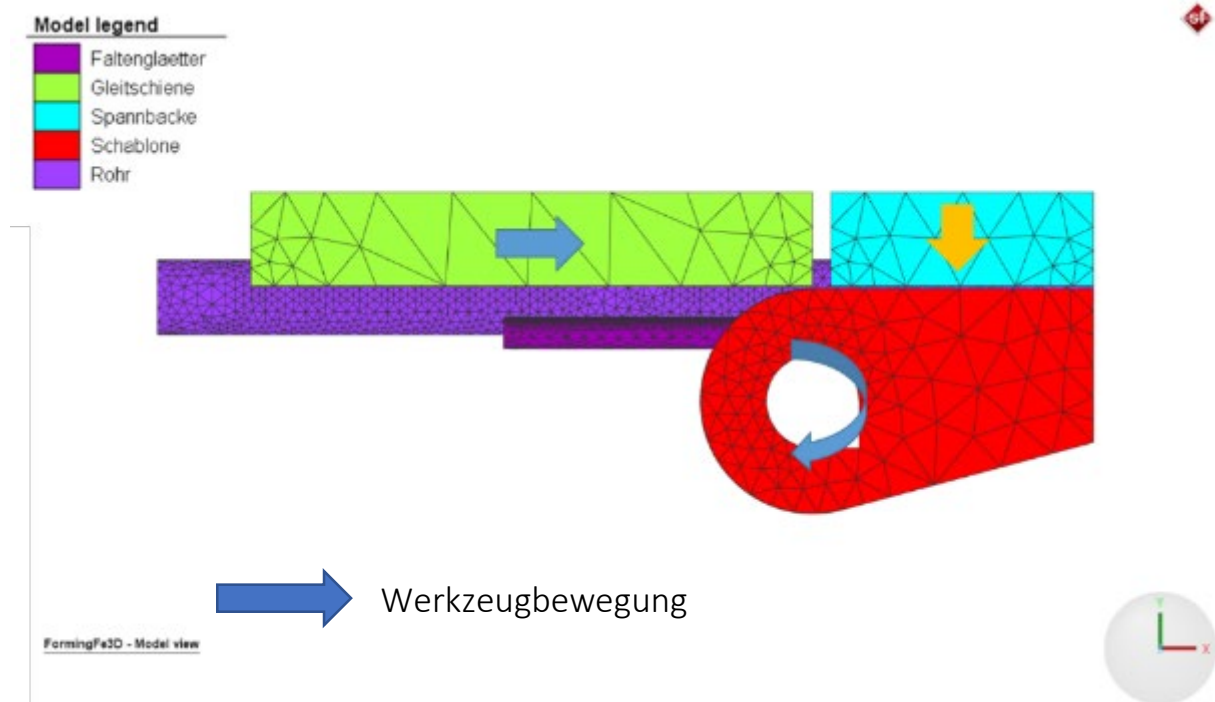


Abbildung 3-10 Darstellung des für die Simulation vereinfachten Modells zur Simulation des Biegeprozesses für die Umformung der 90 ° und 180 ° Bögen

Hierbei handelt es sich um die grundlegenden Werkzeugbestandteile. Auf die Funktion und die Bewegung im Prozess wird kurz eingegangen: Das Rohr (lila) ist hierbei nicht als Endlosrohr abgebildet, sondern als Rohrabschnitt. Diese Vereinfachung ist für eine vertretbare Berechnungszeit notwendig. Das Rohr wird dabei zwischen Spannbacke (blau) und Schablone (rot) geklemmt. Anschließend erfolgt die Rotationsbewegung der Schablone in die abgebildete Richtung. Während des Umformprozesses kommt es parallel zur ursprünglichen Rohrachse zu einer Bewegung der Gleitschiene (grün) zur Unterstützung der Umformbewegung. Der abgebildete Falterglätter (violett) ist stillstehend und optional für einen faltenfreien Innenbogen in die Berechnung integrierbar. Für die vollumfängliche Untersuchung der anpassbaren und einstellbaren Parameter und deren Einfluss auf die Ausführung der Biegeoperation und das Ergebnis ist mithilfe der Methode der statischen Versuchsplanung eine Untersuchung im Gange. Die Einflussparameter (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) wurden in einer Darstellung zusammengestellt und im Anhang zur Verfügung gestellt. Hierbei spielen neben den bloßen Einstellparametern für die allg. Werkzeugbewegung, geometrische Varianten der Schablone, die Reibpaarungen sowie die Vernetzung eine Rolle. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Symmetrisches, homogenes Werkstoffverhalten

Der Einfluss der Schweißnaht wird vorerst vernachlässigt. Durch die nicht mögliche Charakterisierung kann das Fließverhalten im Bereich der Naht nur abgeschätzt werden und ist eher eine Fehlerquelle für

die Simulation. Der vorläufige Ausschluss der Schweißnaht erlaubt die Nutzung der Symmetrie für die Simulation sowie ein gleichbleibendes Werkstoffverhalten über den kompletten Rohrabschnitt.

- Verkürzung des Rohrabschnitts auf 100 mm

Eine Simulation des kompletten Mäanders bzw. der einzelnen Register ist nicht zielführend, da die interessanten Bereiche für die Fertigung die Biegungen um 90° sowie 180°, sowie die Ausführung der Etage. Aus diesem Grund wird das Rohrabschnitt auf 100 mm verkürzt.

- Reduzierung der Werkzeuge auf die Wirkflächen, Inkompressible Werkzeuge

Für die Simulation des Rotationszugbiegens ist die Ausführung der Werkzeuge auf ein Minimum reduziert. Weiterhin werden die Werkzeuge als ideal inkompressibel angenommen, was bedeutet, dass eventuelle Verformungen des Werkzeugzugs im Prozess nicht mit abgebildet werden.

- Dehnratenunabhängiges Werkstoffverhalten

Werkstoffe weisen allgemein ein dehnratenabhängiges Verhalten auf, was bedeutet, dass sie einer Umformung bei höheren Umformgeschwindigkeiten $\dot{\varphi}$ einen höheren Widerstand bzw. eine größere Fließspannung k_f entgegensetzt. Für den gewählten Werkstoff ist dieser Effekt aber vernachlässigbar.

- Keine anderweitigen Einflüsse auf den Prozess

Dies ist die komplexeste Vereinfachung. Im Prozess unterliegt das Rohr bis zur letztendlichen Fertigungsbereich Vorbehandlungen, Richtprozess und sonstigen Einflüssen. Diese Einflüsse, wie z. B. Abnutzung der Werkzeuge, Fehlstellungen bei der Zuführung, Materialschwankungen im Coil und andere Fehlerquellen werden nicht betrachtet.

Nach der Festlegung der Grundlagen wurden die für die Simulation relevanten Parameter festgelegt bzw. nach einer Recherche zum Stand der Technik der Parameterraum festgelegt. Folgende Parameter wurden für die Nachbildung der Biegeoperation variiert:

- Elementart und -größe bei der Vernetzung
- Rotation (in Grad – zeitabhängig eingestellt)
- Reibungsverhältnisse zwischen den einzelnen Werkzeugen und dem Rohrabschnitt
- Vorschubgeschwindigkeit des Nachschubs
- Ovalität des Werkzeugs
- Bewegung der Gleitschiene

Tabelle 3-1 Startwerte der Simulationsuntersuchungen

Rotationsgeschwindigkeit	7.5	RPM
Vorschub Nachschub#1	10	mm
Reibwerte μ Faltenglätter/Gleitschiene	0.1	
Reibwerte μ Spannbacke/Biege- schablone zur Rohr	0.2	

Für eine Auswertbarkeit der simulierten Ergebnisse wurde ein Algorithmus mit relevanten Parametern festgelegt. Hier wurde die VDI-Merkblatt 3431 als maßgebliche Bewertungsrichtlinie hinzugezogen und die wesentlichen Kriterien zur Überprüfung der Simulation festgelegt.

- Biegewinkel
- Querschnitt (schließt die Bewertung von Einfallstellen und Faltenbildung im Innenbogen ein)
- Wanddickenänderung Innen- sowie Außenbogen

Neben den klar ersichtlichen Biegefehlern wie den Falten im Innenbogen oder einen massiven Blecheinfall im Außenbogen sind die weiteren Kriterien über eine Messung bewertbar. Beispielhaft ist der Ablauf anhand des 90 ° Bogens in der nachfolgenden Abbildung 3-11 a dargestellt. Hierbei können die resultierenden Wanddicken im Außen- und Innenbogen ermittelt werden. Parallel sind eine vorausschauende Messung und Bewertung des Rohreinfalls möglich, was sich direkt in eine Reduzierung des Querschnitts in diesem Bereich niederschlägt. Für die Bewertung des Querschnitts bestehen zwei Optionen. Einerseits ist über den Querschnitt eine Vermessung der Querschnittsfläche in den vorab definierten Segmenten und identisch zu der Vermessung der Schliffproben des realen Bogens möglich. Präferiert man ein zerstörungsfreies Verfahren, kann auf die Unrundheit nach VDI 3432 zurückgegriffen werden. Dabei wird aus dem maximalen und dem minimalen Durchmesser der Außenkontur ein Referenzwert gebildet. Dieser kann für einen späteren, schnellen Abgleich von Simulation und Experiment eine weitere Option sein. Risse können anhand der Simulation nicht vorhergesagt werden. Hierbei wird auf die Vergleichsspannung (engl. Effective plastic strain, vgl. Abbildung 3-10 a) bzw. auch die Blechausdünnung (vgl. Abbildung 3-11 b, Messung am Außenbogen) zurückgegriffen.

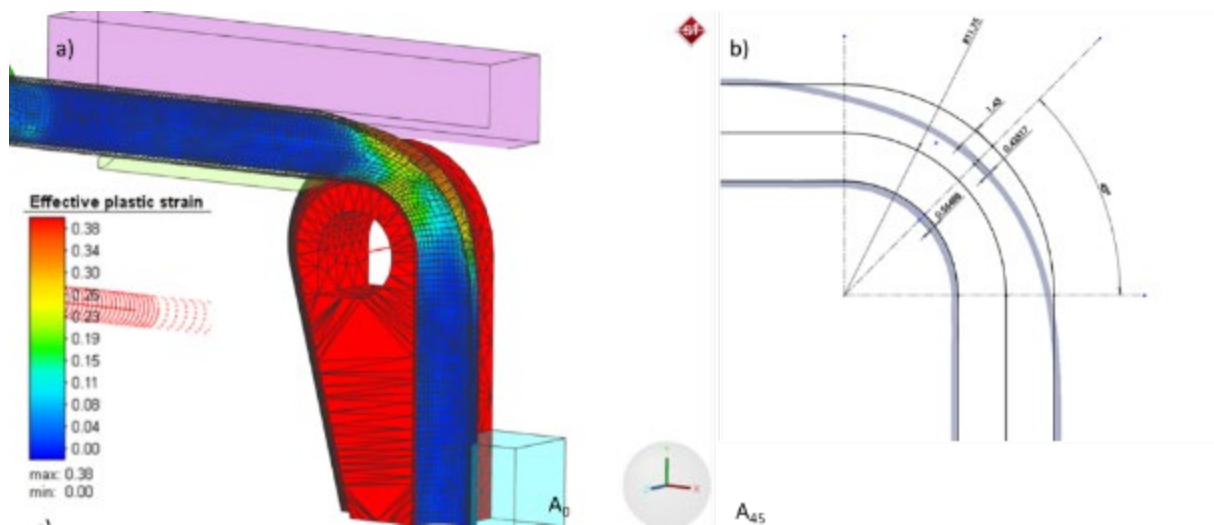


Abbildung 3-11 Darstellung der auszuwertenden Kriterien anhand eines 90 ° Bogens:
a) Simulationsergebnis, b) Ausgabe des Querschnitts als Vergleich zum optimalen Querschnitt mit Messung der Wanddicke sowie des Einfalls

3.3.2 Abbildung des Gesenkbiegens der z-Etage

Die Ausformung der z-Etage ist in das Biegeverfahren Gesenkbiegen einzuordnen, wobei das Rohr, ähnlich wie das Blech von einem formgebenden Stempel in eine Matrize geprägt wird. Maßgeblich ist hierbei die Formgebung der Werkzeuge sowie deren Winkelversatz zur Kompensation der werkstoffbedingten Rückfederung.

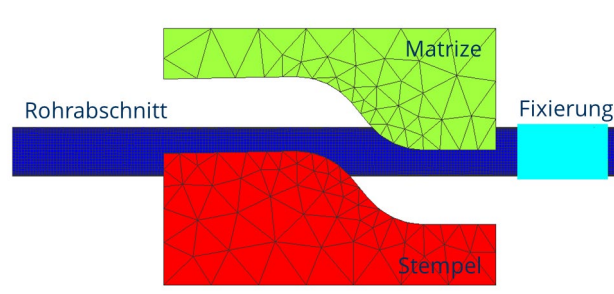


Abbildung 3-12 Grundlegender Aufbau der Simulation für die z-Etage

Neben den von der Rotationszugbiegung bekannten Querschnittsdeformationen, welche auf ein Minimum zu reduzieren sind, sind zwei weitere Dinge für die Ausführung der Etage relevant. Einerseits muss sichergestellt werden, dass die Etage ohne Winkelversatz aus der Formgebung hervorgeht, andererseits muss der Lateralversatz erreicht werden, um die Enden spannungsfrei in den Trommelanschluss einführen zu können. Beide Fehler sind exemplarisch in Abbildung 3-13 dargestellt.

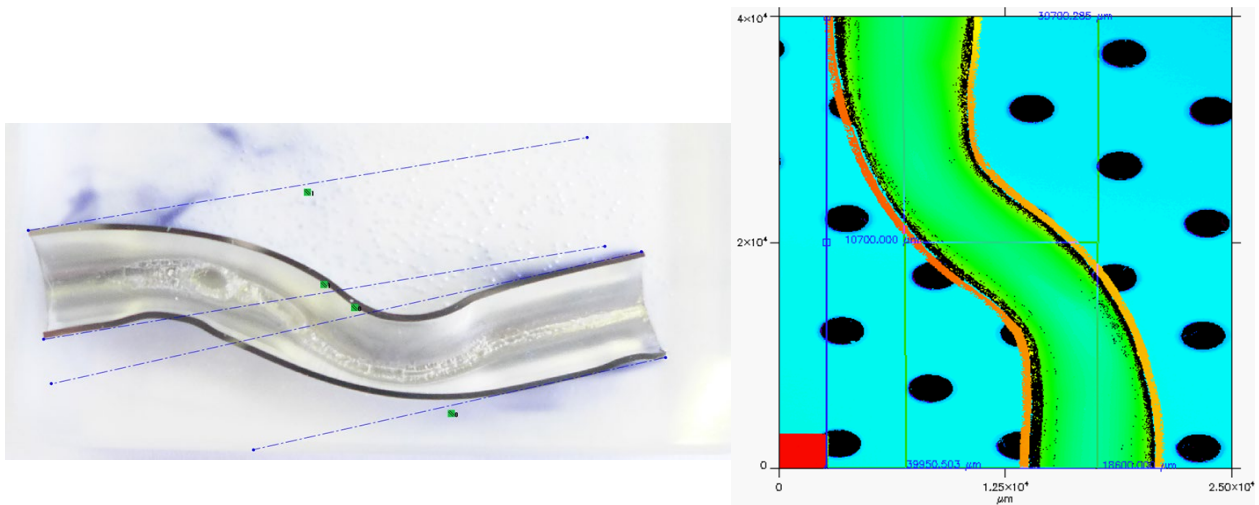


Abbildung 3-13 links: Winkerversatz einer Schliffprobe der z-Etage von 3 Grad
rechts: Aufnahme des Konfokalmikroskops

Äquivalent den Untersuchungen der Werkzeuge zum Rotationszugbiegen wurden die Werkzeuge zur Ausformung der z-Etage fortlaufend angepasst und sukzessive weiterentwickelt.

Hinsichtlich der Abbildung in der Simulation konnten die Ergebnisse der Schliffe den Ergebnissen der Simulation angenähert werden. Abweichungen gab es speziell bei Abschnitt 3 der z-Etage, welche im Vergleich zu der Simulation einen wesentlich stärkeren Einfall der Rohroberseite aufweist, als in der Simulation abgebildet werden kann.

Über eine Anpassung der Werkzeugkontur, vor allem durch die Reduzierung der Kontaktstellen auf die Biegestellen und eine freie Formgebung im Bereich E3 zwischen den Biegestellen konnte eine Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit sowie eine Verringerung der Querschnittreduktion erreicht werden (vgl. Abbildung 3-14). Ergänzend ist der exemplarische Kraft-Weg-Verlauf abgebildet, welcher deutlich die Kontaktsituation im Stempel darstellt. Jeder Absatz verdeutlicht hier das Aufsetzen des Rohrabschnitts auf Stempel oder Matrize, was das zu einer neuen Situation und einer weiteren Erhöhung der Kraft aufgrund des zusätzlichen Biegeprozesses führt.

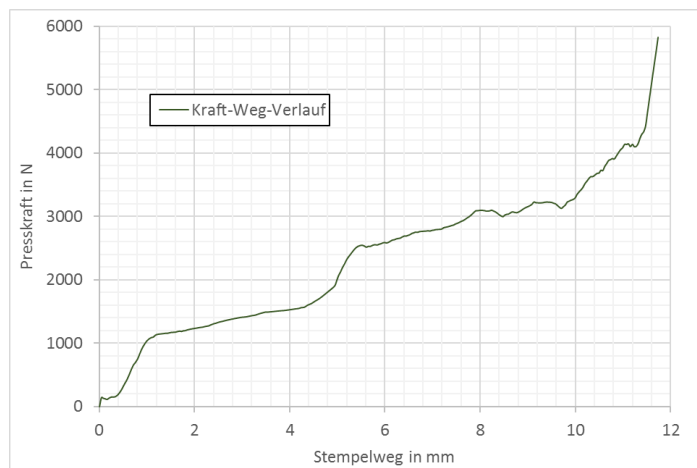
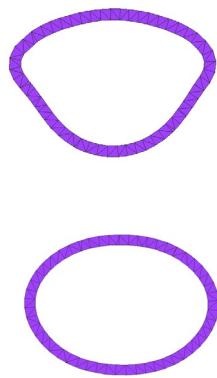


Abbildung 3-14 links: Angepasste Werkzeugkontur und daraus resultierende Verbesserung der Ausformung von E3
rechts: resultierender Kraft - Weg - Verlauf aus der Simulation der z-Etagierung

3.3.3 Erweiterung der Simulation zur Nachverfolgung von Fehlern im realen Prozess

Im Rahmen des Aufbaus der Simulation wurde auf die gewählten Annahmen und deren Sinn eingegangen. Durch das Auftreten von geometrischen Abweichungen in Form einer Verdrehung des Mänders im realen Prozess, kam es zu einer partiellen Anpassung der Parameter sowie dem Aufbrechen bestimmter Annahmen. Dabei war das Biegen der Bögen bei der auftretenden Torsion der erste Untersuchungsschwerpunkt. Dies wird weiterführend in Abschnitt 5.2 thematisiert.

3.3.4 Die Lage der Schweißnaht und deren Einfluss

Wie im vorangegangenen Kapitel zur Härtemessung schon kurz erläutert, ist der Einfluss der Schweißnaht auf die Umformung nicht zu vernachlässigen. Hierbei wird durch den Hersteller Biegeanlage eine Lage in der Neutralen Faser der Biegezone angestrebt (vgl. Abbildung 3-15 b, c). Beim Abgleich der Simulation mit den Schliffen der Prototypen konnte jedoch nur teilweise eine Übereinstimmung festgestellt werden. Während die Ergebnisse für Winkel, Einfall und Blechdicke innerhalb vertretbarer Abweichungen lagen gab es hinsichtlich des Querschnitts starke Abweichungen bei der grundlegenden Form. Während die Simulation bedingt durch eine Symmetrieebene zur Optimierung der Berechnungsgeschwindigkeit ein ebenfalls symmetrisches Ergebnis liefert, ist bei den Proben (vgl. Abbildung 3-15 a) ein klarer Abfall in Richtung der Schweißnaht ersichtlich. Hierbei lag die Vermutung nah, dass diese Änderung auf die variierenden Eigenschaften der Schweißnaht zurückzuführen ist. Für einen ersten Stichversuch wurde dabei die Gesenkbiegesimulation der Stufe als Testumgebung genutzt. Bei dieser Rechnung ist die Eliminierung der Symmetrie im Hinblick auf die Rechenzeiten vertretbar.

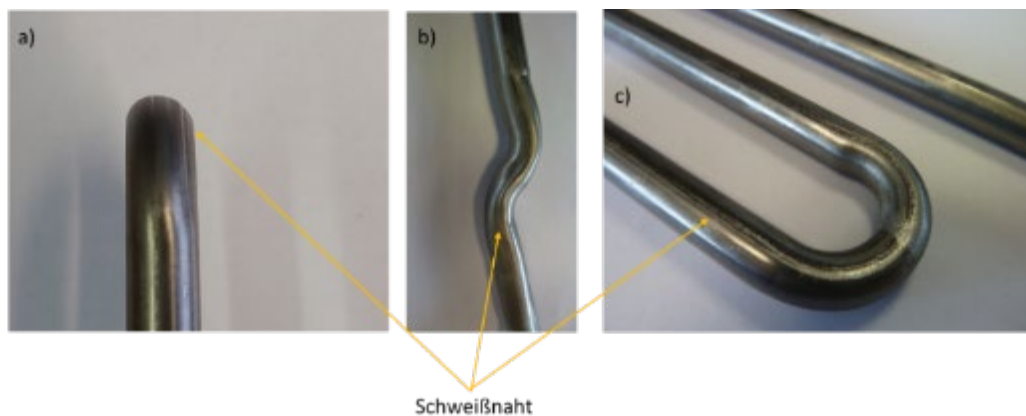


Abbildung 3-15 Proben der Biegungen für die Stufe (b) sowie den 180 ° Bogen mit der Lage der Schweißnaht

3.4 Erstellung des Lastenhefts und der Biegespezifikation (REUT)

Das Lastenheft für die Biegeanlage wurde unter Berücksichtigung der internen Anforderungen an Maschinenelemente, der Versorgungsinfrastruktur und Platzverhältnisse bei Ritter Energie erstellt. Aktueller Stand der Technik auf Basis von Lieferantengesprächen, Online-Recherchen sowie das Know-How von Ritter Energie bildeten die breite Basis. Für die eigentliche Biegeaufgabe wurde eine separate Spezifikation erstellt. Diese Spezifikation dient dem Lieferanten der Biegeanlage dazu alle forschungsbezogenen Prüfungen bei der Entwicklung eines neuen Registerkonzepts beim Bau der Anlage zu berücksichtigen, weshalb die Spezifikation der Biegeaufgabe weiter gefasst werden musste.

4 AP3: Fügetechnologie (FTM, REUT)

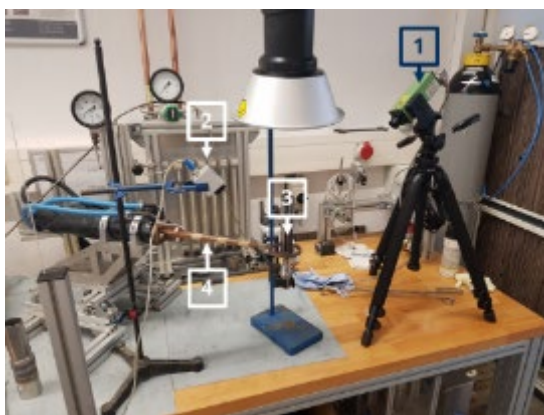
4.1 Erprobung von Fügeverfahren im Labor

4.1.1 Induktionslöten

Als Anlagentechnik steht ein Mittelfrequenzgenerator mit 30 kW Leistung zur Verfügung. Der Mittelfrequenzgenerator arbeitet in einem Frequenzbereich von 15 – 20 kHz. Am Koaxtrafo mit innenliegendem Schwingkreis wird ein einwindiger Induktor angeschlossen. Die Anlage kann auf Leistung, Temperatur und/oder Zeit gesteuert werden

4.1.2 Erwärmungsdokumentation des Trommelanschluss

Induktion erwärmt den Trommelanschluss am äußeren Rand seiner Geometrie. Die fortlaufende Erwärmung ins Innere erfolgt durch Wärmeleitung des Grundwerkstoffs. Zum Löten ist eine gleichmäßige Temperatur im gesamten Lötspalt notwendig. Mit diesen Versuchen wird die Erwärmung des Trommelanschlusses im Magnetfeld visualisiert. Abbildung 4-1 zeigt den allgemeinen Versuchsaufbau.



- 1) regelndes Pyrometer
IMPAC Electronoic GmbH IGA100 350-1800 °C
- 2) IR-Kamera
Optris PI 16020 T1500
- 3) Trommelanschluss
- 4) Induktor
s. Abbildung 4-2, rechts

Abbildung 4-1 Versuchsaufbau zur Erwärmungsdokumentation

Abbildung 4-2 den Trommelanschluss in der Spulenwindung des Induktors sowie den Aufbau des Induktors. Der Induktor ist einwindig, hat einen Innendurchmesser von $\varnothing 70$ mm und einen Außenquerschnitt von 8 x 8 mm. Typspezifische Anschlussmaße sind in Abbildung 4-2 aufgeführt. Der Trommelanschluss wurde zur Einstellung eines festen Emissionswerts mit schwarzen Ofen-Spray der Marke Senotherm (<https://www.senotherm.com/technologie/spraydosen>) eingesprüht.

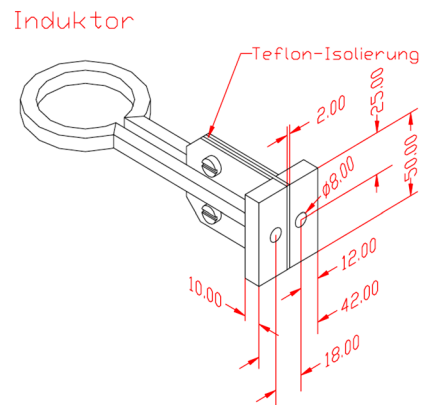


Abbildung 4-2 Links: Trommelanschluss zentrisch in Induktorwindung positioniert; Rechts: Induktoraufbau

Zunächst sind Erwärmungskurven ohne eingesteckte Registerrohre durchgeführt worden. Das Regeln des Pyrometers auf dünnsten Querschnitt ausgerichtet (s. ●). Die Anlage wurde mit 100 % freigegebener Leistung betrieben. Als Zieltemperatur wurde die Löttemperatur des Lotwerkstoffs 1 festgelegt. Abbildung 4-3 zeigt die Erwärmungskurve des Trommelanschlusses.

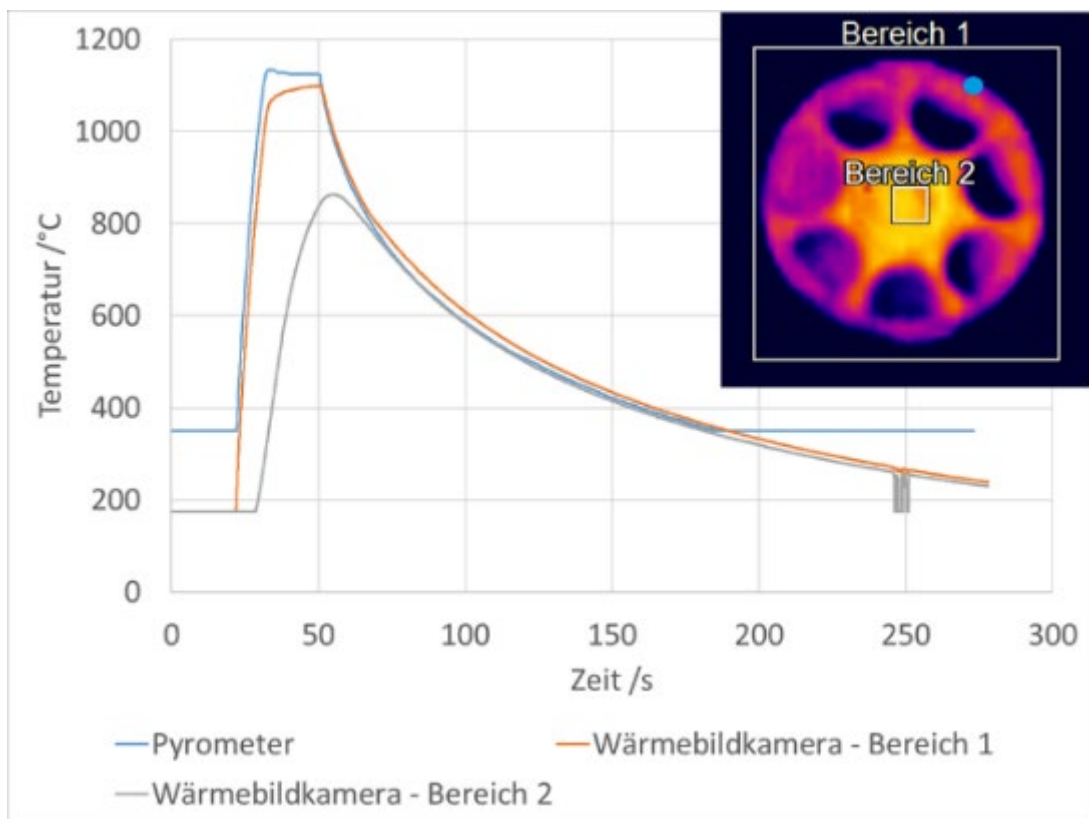


Abbildung 4-3 Erwärmungskurve des Trommelanschlusses mit Wärmebilddarstellung

Die Kurve „Pyrometer“ ist das regelnde Pyrometer. „Wärmebildkamera – Bereich 1“ zeigt die höchste Temperatur in „Bereich 1“. „Bereich 1“ umschließt, wie aus der Wärmebilddarstellung zu entnehmen, den kompletten Trommelanschluss. „Wärmebildkamera – Bereich 2“ zeigt die höchste Temperatur im Bildausschnitt „Bereich 2“, welcher sich im Inneren des Trommelanschlusses befindet.

Die Regelung und Erwärmung des geschwärzten Trommelanschlusses erfolgten problemlos. Aus den Versuchen kann abgeleitet werden, dass die freigegebene Leistung sowie die vorgegebene Zeit ausreichend sind zum Erreichen der Zieltemperatur. Die Videoaufnahme der Wärmebildkamera visualisiert zudem die Wärmeausbreitung vom Rand zur Mitte des Trommelanschlusses, wodurch sich eine Temperaturdifferenz zwischen Randbereich und Mitte ergibt.

Die Versuche sind mit eingesteckten Registerrohrabschnitten wiederholt worden, um die Erwärmung der Registerrohre zu dokumentieren. In den Versuchen mit eingestecktem Rohr ist die Perspektive auf „schräg von oben“ angepasst worden, da in dieser Ansicht Rohroberfläche und Mantelfläche des Trommelanschlusses zugänglich für die Datenaufzeichnung sind (s. Abbildung 4-4).

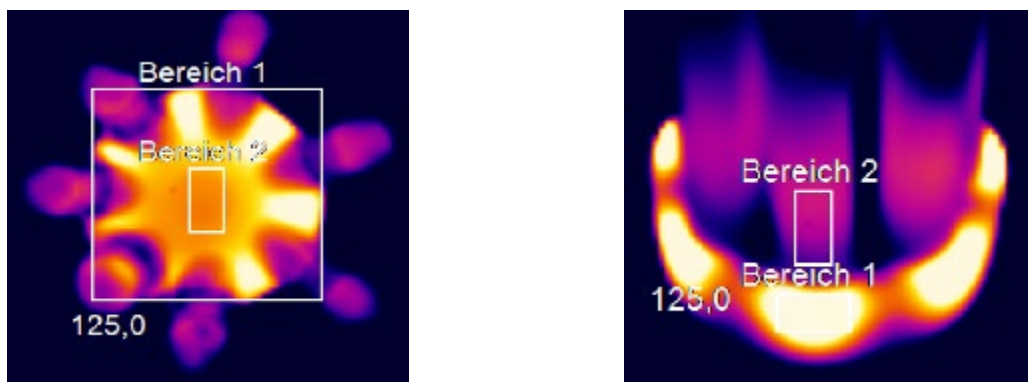


Abbildung 4-4 Rechts: Wärmebildkamera senkrecht über Trommelanschluss positioniert;
Links: Wärmebildkamera in schräger Draufsicht

Die Temperatur im Inneren des Trommelanschlusses konnte für diese Versuche nicht dokumentiert werden. Es ist erneut mit einer zu 100 % freigegebenen Leistung und der Zieltemperatur geprüft worden. Die Zeit wurde in mehreren Versuchen variiert. Es werden zum Vergleich mit Abbildung 4-3 die Zeitstufe mit 30 s Haltezeit und eine Rampe mit Gesamtdauer von 60 s gezeigt. Die Haltezeit bleibt bei dem Erwärmungsverlauf mit Rampe ebenfalls 30 s.

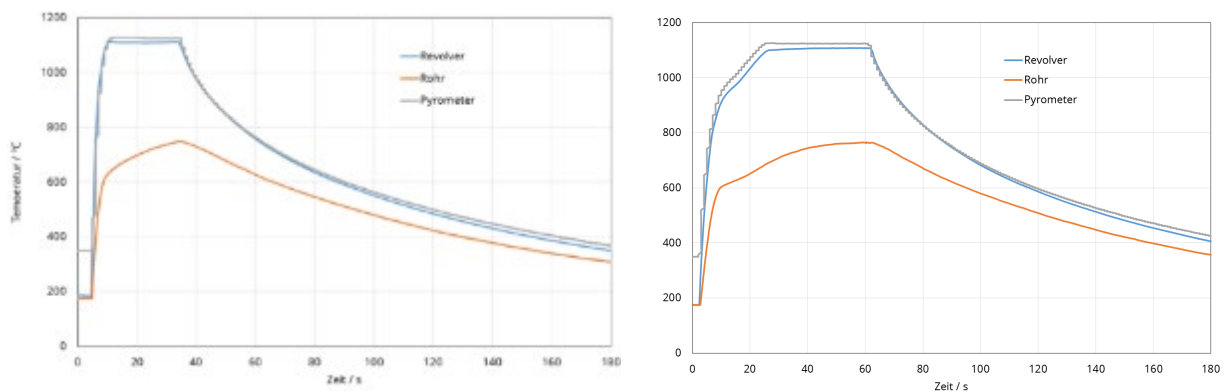


Abbildung 4-5 Rechts: Wärmeentwicklung mit eingesteckten Rohren ohne Rampe;
 Links: Wärmeentwicklung mit eingesteckten Rohren mit Rampe

Allgemein wird aus den Versuchen gefolgert, dass am Außenrand des Trommelanschluss eine Temperatur von 1000 °C in ca. 8 s erreicht wird. Die Temperaturregelung erfolgt ohne Übersteuerung am geschwärzten Trommelanschluss. Die Rohre weisen an der Fügestelle eine Temperaturdifferenz von ca. 400 – 500 K zur Temperatur an der Regelstelle des Trommelanschluss auf und überhitzen nicht.

Für den Lötprozess ist es notwendig ein Lotdepot im oder am Trommelanschluss vorzusehen. Schmilzt das Lot durch den Wärmeübergang ausgehend vom Trommelanschluss auf Lot und die Rohre, stellt das Lot bereits eine Wärmebrücke in der Fügestelle und somit auf die Rohre im relevanten Fügespalt dar. Für die weitere Bearbeitung ist es zielführend eine auf die Fügeaufgabe im Labor angepasste Schutzgaskammer aufzubauen und die Zeit zum Erreichen der Löttemperatur im kompletten Lotspalt zu ermitteln.

4.1.3 Schutzgaskammer

Zu Forschungszwecken ist eine anwendungsnahe Schutzgaskammer aufgebaut worden. Die Schutzgaskammer ermöglicht die separate Regelung des Durchflusses im Inneren und Äußeren des Trommelanschluss. Das Konzept ermöglicht somit den kühlenden Einfluss des Schutzgasstroms und notwendige Vorspülzeiten zum Erreichen einer lötgeeigneten Atmosphäre zu ermitteln und aufeinander abzustimmen. Die Messung des O₂-ppm Gehaltes mit einer Sauerstoffsonde ist beim Einsatz von Argon als Schutzgas möglich. Die Zeiten bis zum Erreichen der gemessenen Sauerstoffgehalte können als Erfahrungswerte für den Einsatz andere Schutzgaszusammensetzungen dienen.

- 1) Abgedichtete Verschlusskappe mit Möglichkeit zur Einbringung einer Sauerstoffsonde.
- 2) Borosilikatglasrohr mit Transmissionbereich von 400 – 2000 μm , welcher die Regelung mit entsprechenden Pyrometern ermöglicht.
- 3) Trommelanschlusssaufnahme mit Innen- und Außenspülung. Der gerichtete Schutzgasstrom wird durch Sinterbronzeelemente gedämpft und diffus in die Schutzgaskammer geleitet.
- 4) Prallkammer zur diffusen Schutzgaszuführung im Außenbereich
- 5) Schutzgasanschluss mit Standfuß. Der Standfuß ist mit Lochmuster zur Befestigung auf Profilen versehen

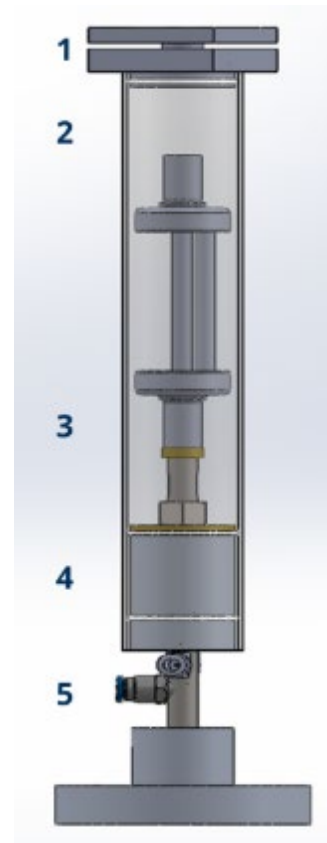


Abbildung 4-6 Schutzgaskammer TU Dresden

4.2 Weiterentwicklung des Fügeverfahrens für den Praxiseinsatz

Ziel ist es ein Fügeverfahren zu entwickeln bei dem auf anschließendes Reinigen, wie das Beseitigen von Anlauffarben oder Flussmittel, verzichtet werden kann. Für Versuchszwecke wurde bei REUT eine Induktionslötanlage aufgebaut.

Für die Versuche wurden die Grundwerkstoffe 1 und 2 sowie die Lotwerkstoffe 1,2 und 3 verwendet. Lötungen wurden unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt. Dabei standen Gasverteilung und gleichmäßige Erwärmung im Vordergrund. Die Anlage wurde schrittweise erweitert und mit einer getrennt regelbaren Schutzgasführung zusätzlicher Mastercontrollerhardware sowie Software ausgestattet. Somit können Temperaturrampen programmiert und das Erwärmen des Bauteils in Echtzeit verfolgt werden.

Während der Versuche mit dem Grundwerkstoff 1 in Kombination mit Lotwerkstoff 1 sind Heiß- und Lötrisse entstanden, sodass zunächst der Grundwerkstoff 1 ersetzt wurde. Mit Hilfe des Grundwerkstoffs 2 wurden die ersten dichten Lötverbindungen erzeugt, welche einer Druckwechselprüfung erfolgreich unterzogen wurden. Aufgrund der Bauteilgeometrie und einhergehenden Nachteilen wurde der Lotwerkstoff

1 ersetzt. In weiteren Versuchen werden Trommelanschlüsse aus Grundwerkstoff 2 mit Lotwerkstoff 2 gelötet, um diesen zu qualifizieren. Zudem wurde das Regime der Schutzgaseinleitung angepasst, um die Oxidation (Anlauffarben) zu vermeiden und den Gasstrom als Kühlstrom zu verwenden. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

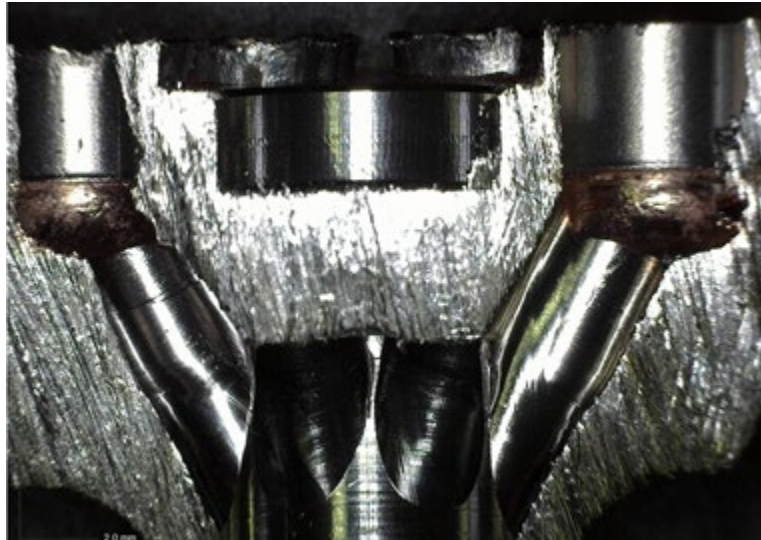


Abbildung 4.19 Trommelanschluss aufgesägt ohne Anlassfarben

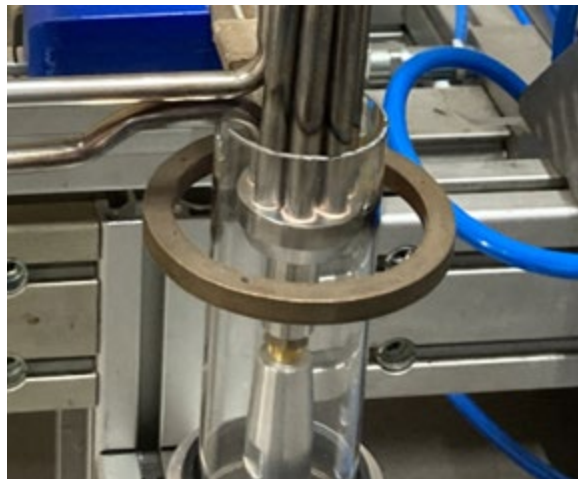


Abbildung 4.20 Trommelanschluss direkt nach dem Löten ohne Anlassfarben

In Versuchen mit Lotwerkstoff 2 kam es immer wieder zu unerwünschten lokalen Aufschmelzungen des Grundwerkstoffs 2, was auf Zusätze im Lotwerkstoff zurückzuführen war. Die Folge war der Einsatz von Lotwerkstoff 3. Die Kombination von Grundwerkstoff 2 und Lotwerkstoff 3 wurde qualifiziert indem dichte Verbindungen erzeugt wurden. Da keinerlei werkstoffliche Probleme festgestellt wurden, erfolgte die weitere Prozessentwicklung mit diesen Werkstoffen.

Nach mehreren Iterationsschleifen bestehend aus Induktionslötversuch, metallografischer Präparation, Bewertung der Lötverbindung und Anpassung des Temperatur-Zeit-Verlaufes ergab sich eine Prozessführung, die fehlerfreie und reproduzierbare Lötverbindungen erzeugte. Parallel wurde das Schutzgasregime angepasst, um dessen Kühleffekt zu berücksichtigen. Beide Verläufe sind qualitativ in Abbildung 4-7 abgebildet. Die wichtigsten Erkenntnisse sind einerseits die Notwendigkeit mehrerer Durchwärmphasen, um den Lotfluss in den Innenbereich und andererseits die Reduzierung des Schutzgasvolumenstroms während des Lötprozesses ohne eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts zu ermöglichen.

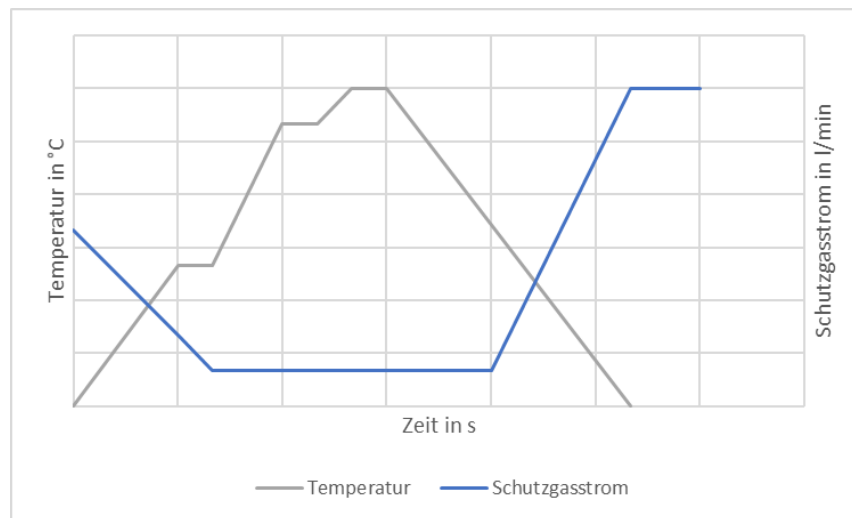


Abbildung 4-7 Zeitlicher Temperatur- und Schutzgasstrom-Verlauf des Induktionslötprozesses

In Abbildung 4-8 wird das Ergebnis des Induktionslötprozesses gezeigt. Sie beinhaltet eine Draufsicht des mit Lotwerkstoff 3 gelöteten Bauteils und den Querschliff einer der sieben Lötverbindungen. Nach DIN EN ISO 18279 existieren sieben Gruppen von Unregelmäßigkeiten (bspw.: Hohlräume, Risse sowie Form- und Maßabweichungen). Derartige Unregelmäßigkeiten sind in allen sieben Lötverbindungen des Rohrregisters in Abbildung 4-8b nicht vorzufinden. Demnach sind die Lötverbindungen der höchsten Bewertungsklasse zuzuordnen.

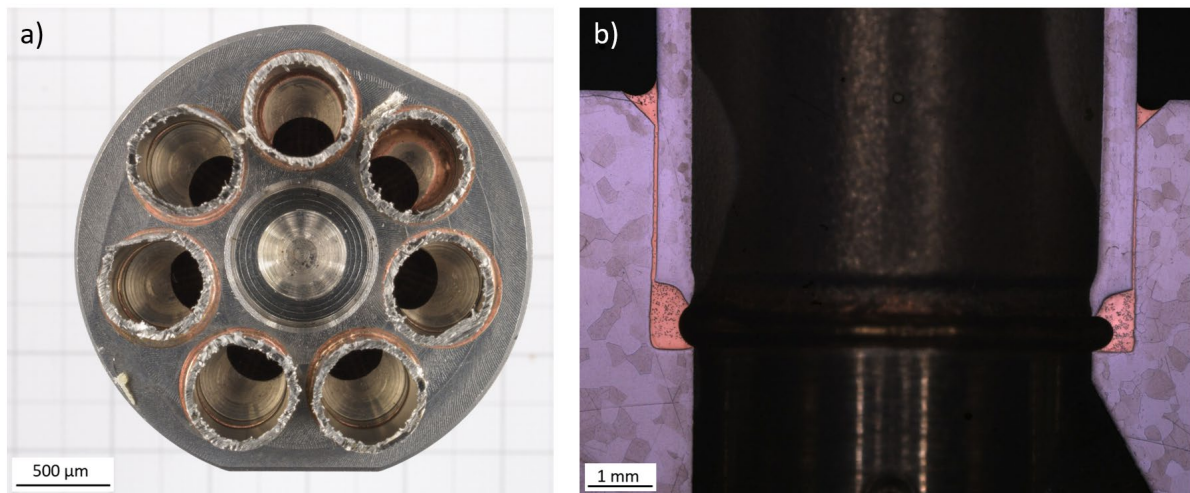


Abbildung 4-8 Lötverbindungen mit Lotwerkstoff 3 als a) Draufsicht und b) Querschliff.

Es konnte aufgezeigt werden, dass mit dem Lötprozess eine Lötspaltbreite von bis zu 1 mm kompensiert werden kann. Eine Variation der Rohrlänge von + 1mm bis zu – 2,5 mm kann ebenfalls durch den Lötprozess kompensiert werden und zeigten positive Ergebnisse bei der Dichtheitsprüfung. Als Qualitätsmerkmal für eine als sehr gut bewertete Lötverbindung wurde eine vollständige Lotkehle festgelegt.

Es wurde erfolgreich das Rohrregister mit dem Trommelanschluss gefügt sowie die notwendige Prozessführung aus der Kombination von Generatorleistung und Schutzgaszufuhr entwickelt. Die Anforderungen (Dichtheit, Maßhaltigkeit, Automatisierung und geringerer Prozesszeit) an die Fügeverbindung und Fügeprozess konnten durch Einsatz des Induktionslötverfahrens vollständig erfüllt werden. Es wurde erfolgreich ein Fügeprozess inklusive Qualitätsmerkmal für die Serienproduktion von neuartigen Rohrregistern entwickelt.

4.3 Trommelanschlusskonstruktion (REUT)

Die Konzeption der hydraulischen Verteil- und Sammelbauteile (Trommelanschluss) muss verschiedene Anforderungen erfüllen:

- Möglichst symmetrische Strömungsverteilung
- Reduzierung der Anzahl der Rohrquerschnitte um ein Rohr (=Mäanderrohr) von z.B. beim 7x 3-fach Register, von einer dichten 8-er Packung ohne Rohrabstand über die gesamte Sammelkastenlänge auf ein 7-er Lochbild am Trommelanschluss mit einem Abstand von ca. 2 mm
- Berücksichtigung der Einbausituation mit sehr beengten Verhältnissen

Insbesondere der 2. Punkt mit der Reduzierung der Anzahl Rohrquerschnitte erfordert bei sehr kompakter Bauweise eine leichte Verdrehung (Typ: „Torsion“, s. a. Abbildung 4-9) der Rohrenden, die ggf. zu Schwierigkeiten bei der Vorbereitung zum Löten oder bei der Biegeaufgabe führen könnte. Daher wurde eine alternative Lösung ohne Verdrehung erarbeitet (Typ: „Aufweitung“, s. a. Abbildung 4-10), bei der die Rohre in Längsrichtung lediglich geringfügig nach außen geführt werden, ohne im Winkel um die Mittelachse verdreht zu werden. Dadurch entsteht eine Asymmetrie im Lochbild des Trommelanschluss und ein größerer Durchmesser. Beide Varianten wurden durch TUD-GEVV als vernetztes 3D-Modell für die Strömungssimulationen umgesetzt. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 2.1 ausführlich dokumentiert.

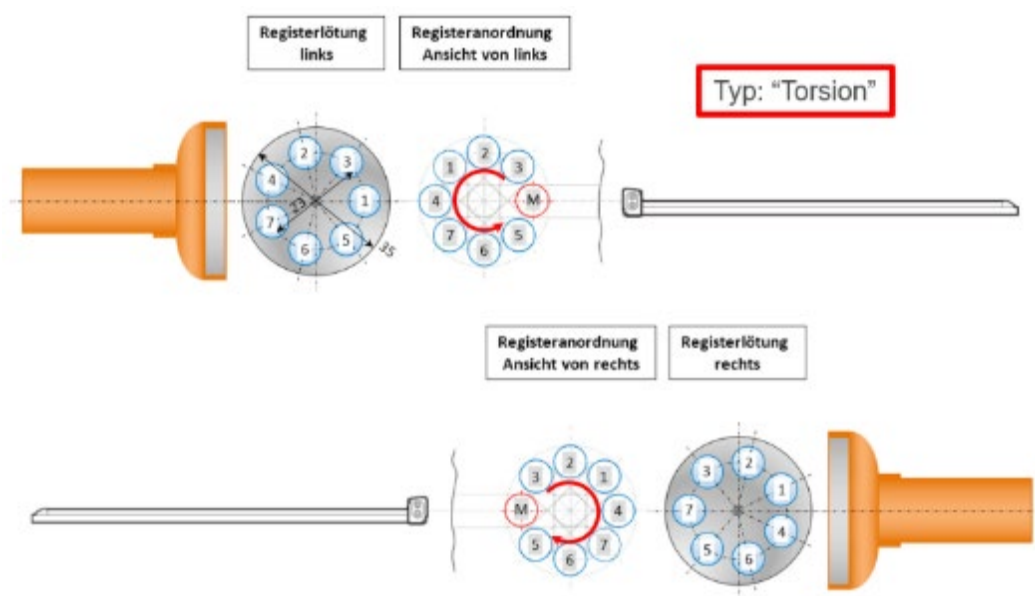


Abbildung 4-9 Detail Trommelanschluss – Typ „Torsion“

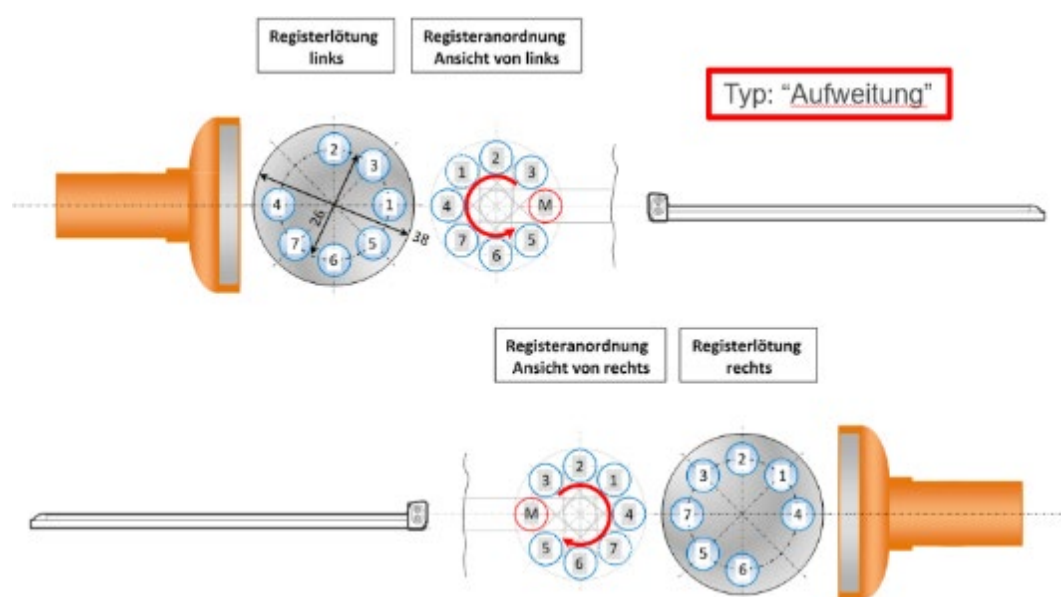


Abbildung 4-10 Detail Trommelanschluss – Typ „Aufweitung“

5 AP4: Registerfertigung (REUT, FF)

5.1 Auslösung Bestellung Biegemaschine

Zwei Lieferanten standen zur Auswahl. Auf Basis einer Matrix zur Lieferantenauswahl wurde der favorisierte Lieferant zu einem Treffen im Hause Ritter eingeladen. Nach Klärung der offenen Punkte aus dem Angebot wurde die Bestellung von Ritter ausgelöst. Die Vorabnahme wurde beim Lieferanten durchgeführt.

Anlieferung und anschließende Montage der Anlage bei Ritter erfolgte im 1. Quartal 2022.

5.2 Optimierung von Biegeprozessen

Nachdem Ritter Mitarbeiter durch den Hersteller an der Anlage geschult wurden, wurde die Anlage eingefahren.

Am Aufstellort der Anlage wurden weitere Maßnahmen zur Sicherstellung der Biegequalität und zur Herstellung reproduzierbarer Ergebnisse durchgeführt. Zu diesen Maßnahmen gehörten:

- Optimierung des Preßwerkzeugs
- Aussteifung der Anlage
- Aufbau einer Beruhigung nach der Haspel
- Trennung der Prozesse Richten und Biegen

Die Biegeanlage ist somit nun in der Lage ohne regelmäßige Rüstzeiten kontinuierlich zu produzieren. Der einzige planmäßige Stillstand an der Biegeanlage ist die Zeit, die der Werker benötigt, um das fertige Mäander zu entnehmen und den Sicherheitsbereich der Biegeanlage wieder freizugeben.

Während der Biegezeit der Maschine hat der Werker je nach Mäandertyp ca. eineinhalb Minuten Zeit das Register vom Biegetisch der Anlage zu nehmen und es zu der automatischen Lötstation zu tragen. Dort wird es vom Werker der Biegeanlage in die Haltevorrichtung eingelegt.

5.3 Begleitung der Serienfertigung / Fehleranalyse und QS

5.3.1 Analyse der Fehlerbilder und Abbildung mithilfe der FEM

Abweichung der Mäander von der Nachhaltigkeit stellt im Fertigungsprozess ein großes Problem dar, da für einen robusten Prozess und die fehlerfreie Funktion der Sonnenkollektoren die Mäander die Grundlage bilden und möglichst spannungsfrei in die vorgesehenen Fixierbleche, sowie die Glasröhre eingeführt werden müssen. In der Abbildung 5-1 ist hierbei ein auf der Biegeanlage bei REUT gefertigtes Mäanderbauteil mit einem typisch auftretenden Fehler abgebildet.



Abbildung 5-1 Biegefehler: Erkennbare, sich verstärkende Torsion der Mäander im Bereich der 90 °-Bögen

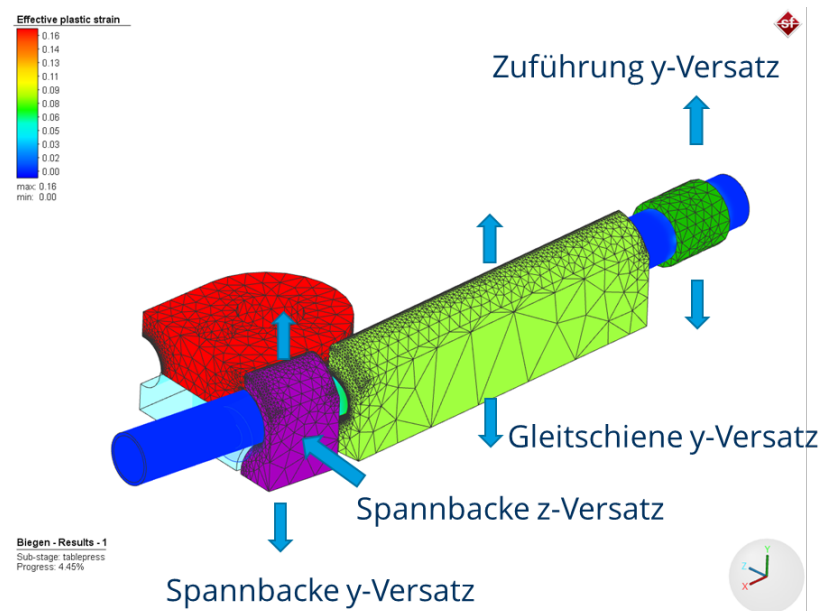


Abbildung 5-2 Untersuchte Werkzeugverschiebungen für den Biegeprozess

5.3.1.1 Lateralversatz von Gleitschiene und Spannbacke | D_{KK} Werkzeugsatz

Für die Untersuchungen wurden die Fehlerquellen in Absprache mit dem Hersteller der Biegeanlage auf vorerst vier Primärfehlerquellen reduziert. Dabei sind speziell die Möglichkeiten des Versatzes von Werkzeugen und Hilfsvorrichtungen im Biegeprozess betrachtet worden. Im Rahmen einer vollfaktoriellen Untersuchung (vgl. Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1 Vollfaktorielle Untersuchungsmatrix von Werkzeugversatz im Biegeprozess des 180 ° Bogens

	-1	0	1
Zuführung (y-Versatz)	-2 mm	0 mm	+2 mm
Spannbacke (z-Versatz)	+0.7 mm	+0.5 mm	+0.3 mm
Spannbacke (y-Versatz)	+1 mm	0 mm	-1 mm
Gleitschiene (y-Versatz)	+1 mm	0 mm	-1 mm

Für die Untersuchungen wurde eine Linie auf der Blechoberseite in der Biegeebene definiert und ausgewertet. Über diese konnte im Anschluss an den Biegeprozess eine potenzielle Verdrehung erkennbar gemacht werden und eine Aussage zum Einfluss auf den Gesamtmäander getroffen werden.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass jeder Versatz einer der untersuchten Werkzeuge bzw. Biegeprozess unterstützenden Element zu einem Fehler in der Anordnung der Bögen führt. Dabei kann der Versatz der Zuführung als entscheidender Grund für die Verdrillung weitestgehend ausgeschlossen werden. Ein Versatz von ebenjener Zuführung führte in der Simulation meist zum Abbruch, da der Rohrabschnitt dadurch in die Schiene gepresst wurde und es eine undefinierte Deformation erfolgte.

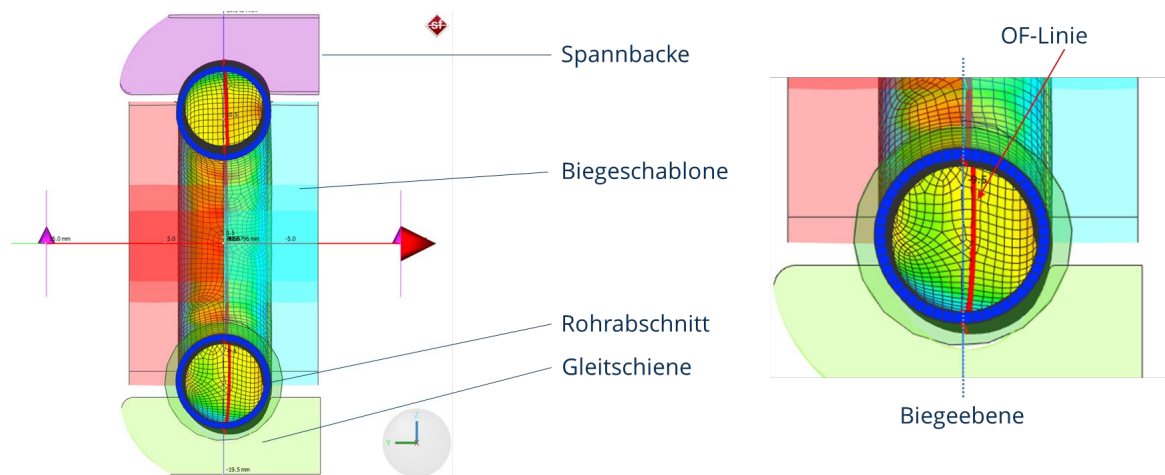


Abbildung 5-3 Versuch 1-23 Versatz der Gleitschiene um -1 mm als Gesamtansicht sowie in Detaildarstellung (rechts) des Versatzes der Oberflächenlinie von der Biegeebene

Ein Versatz der Gleitschiene führte zu einer Änderung der Auswölbung im Rohrbogen entsprechend der Richtung des Versatzes. In Abbildung 5-3 ist dabei ein Versuch der Versuchsreihe abgebildet, bei welchem die Gleitschiene in negativer y-Richtung im 1 mm versetzt war. In der Detailansicht ist hierbei die deutliche Verschiebung der Auswölbung erkennbar. In der Auswertung der Oberflächenlinie ist im Bereich des Bo-

gens eine deutliche Erhöhung der Auswölbung erkennbar. Diese ist aufgrund der Prozessführung ungleichmäßig ausgeführt und kann somit ein wesentlicher Grund für das Auftreten der Torsion sein. Neben dem Versatz der Gleitschiene wurde der Versatz der Greifbacke analysiert. Hierbei konnte ein maßgeblicher Einfluss der Gleitschiene bzw. auch des Schließens der Biegeschablone festgestellt werden, was durch eine Anpassung des Ablaufs (Schließen Schablone, Spannen des Rohrs) resultierte. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass durch einen Versatz der Spannbacke eine Vorverformung in das Rohr induziert werden kann, was sich dann im Verlauf des Umformvorgangs bzw. nachdem Lösen der Werkzeuge in eine Ausprägung der veranschaulichten Torsion führen kann (vgl. Abbildung 5-1)

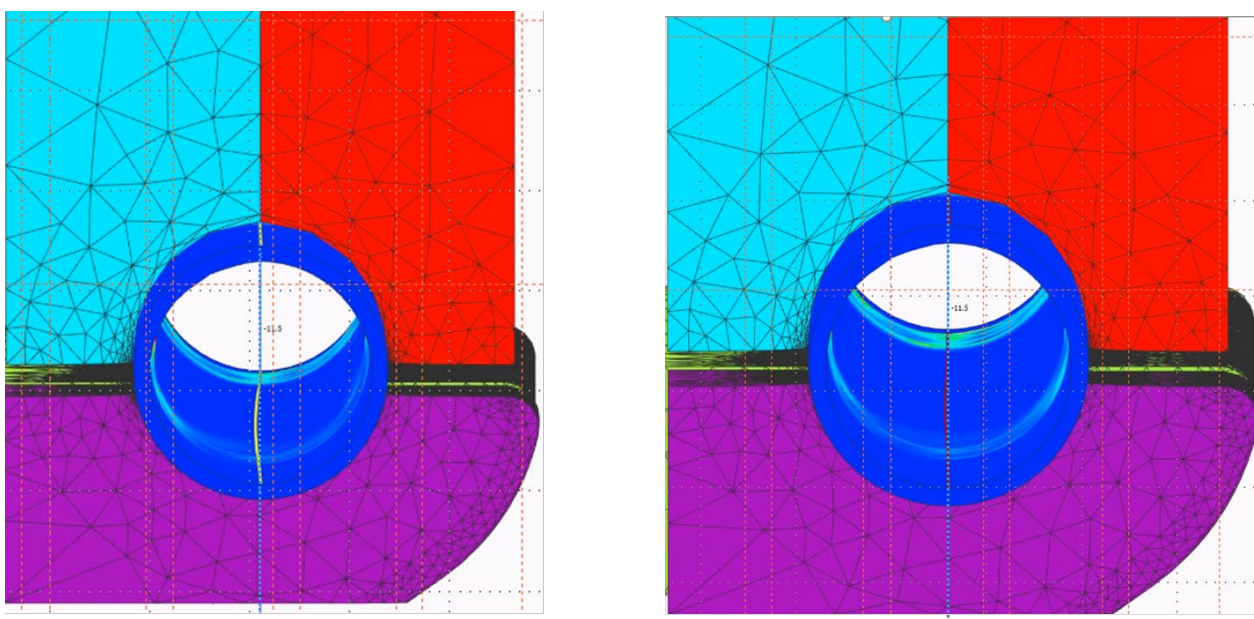


Abbildung 5-4 Versatz der Oberflächenlinie durch verschiedene Positionen der Spannbacke (links: $x = +1 \text{ mm}$, rechts $x = 0 \text{ mm}$)

In der Abbildung 5-4 wird deutlich, dass eine Vergrößerung des Spannwegs zwangsläufig zu einer Querschnittsveränderung führt. Je nach Stärke und Richtung der Wölbung (links gelb) kann eine solche vor dem eigentlichen Prozess eingebrachte Verspannung sich während des Umformens einseitig verstärken und zu Profilierfehlern, wie der Torsion führen. Zusammenfassend lässt sich in der, mit den untersuchten Parametern durchgeführten Studie feststellen, dass die Ausrichtung der Werkzeuge entscheidenden Einfluss auf die Ausführung der Biegeoperation hat. Hierbei können bereit kleine Abweichungen, z. B. durch Verkipfung, unzureichende Zustellung oder mangelnde Steifigkeit der Werkzeuge, Fehler im hergestellten Mäander auftreten. Auch Fehler in der Fertigung durch fehlende Planparallelität, Maßabweichungen durch den Härteprozess oder ungleichmäßige Rauigkeiten im Kontaktbereich können den Prozess beeinflussen. Diese Variationen sind jedoch durch die Simulation nur unzureichend abbildbar, da die Schwankungsbreite tlw. zu hoch ist bzw. die Parameter nicht genau genug eingrenzbar. Für die auftretende Torsion ist auf Basis

der Untersuchungen mit den getroffenen Annahmen vermutlich ein Versatz der Spannbacke und / oder ein Versatz der Gleitschiene als potenzielle Fehlerquelle zu nennen.

Eine Erhöhung der Steifigkeit und Anpassung der Werkzeuge, basierend auf den ersten Untersuchungen in Abschnitt 3.3.2 führte letztendlich zu zeitweise, fehlerfreien Mäandern.

5.3.1.2 Produktionsfehler im Rahmen der Inbetriebnahme und deren Nachbildung in der FEM

Im Rahmen der erweiterten Inbetriebnahme traten weitere Fehler auf. Aufgrund der Validierung der Simulationsergebnisse wurde partiell der Fehler mithilfe der FEM nachgebildet und Lösungsoptionen vor der Umsetzung getestet.

Nachfolgend wird stichpunktartig auf einzelne Fehler, wie Rohreinfall (Abbildung 5-6), Falten (Abbildung 5-5 und Abbildung 5-7) und Torsion, sowie die begleitenden Untersuchungen eingegangen.



Abbildung 5-5 Fehlerhaft ausgeprägte 180° - Bögen D_{KK}

Hinsichtlich der Ursache wurden systematisch verschiedene Theorien getestet. Auch ein Druckverlust der Spannbacke im Prozess wurde über eine hinterlegte Kurve (vgl. Abbildung 5-6, rechts) getestet

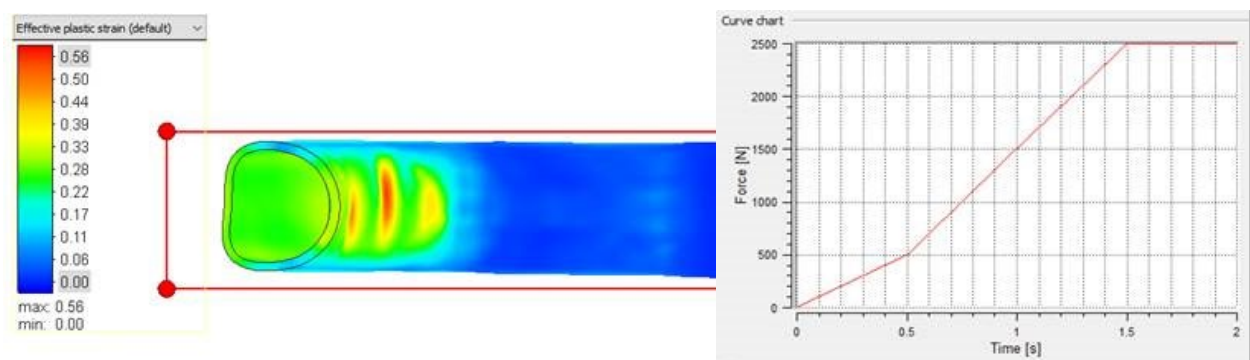


Abbildung 5-6 Querschnitt der Prozesssimulation (links) D_{KK} mit nachlassendem Druck auf der Gleitschiene (rechts) während des Umformprozesses

Die Option des Druckverlusts wurde durch die eine Anpassung der Anlagentechnik behoben.

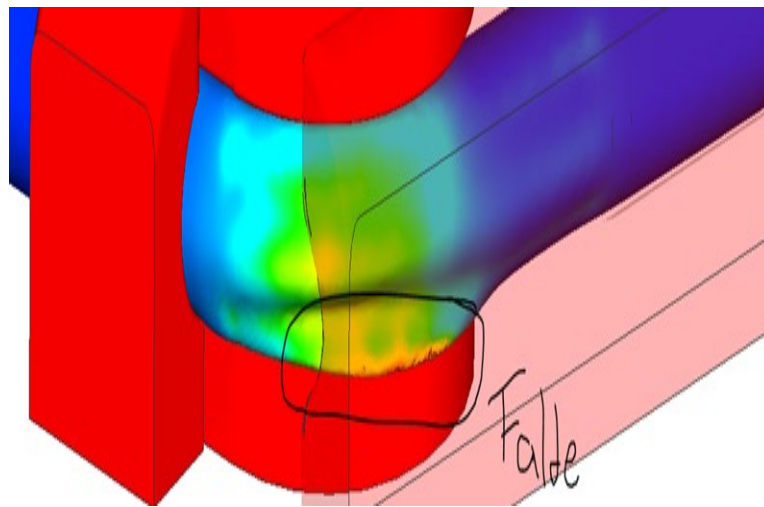


Abbildung 5-7 Faltenbildung durch Versatz/Verdrehung der Gleitschiene

Fortgesetzte Untersuchungen zum Versatz, ergänzt durch eine Verdrehung der Gleitschiene zeigten in der Simulation eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Hierbei war ein Auffedern der Werkzeuge zueinander als mögliche Fehlerquelle identifiziert wurden. Ob es dabei zu einem Öffnen der Biegeschablonen aufgrund zu geringer Kraft des Zugzylinders der Biegeschablone oder dem seitlichen Öffnen durch den Druck der Gleitschiene kam, konnte nicht abschließend geklärt werden.

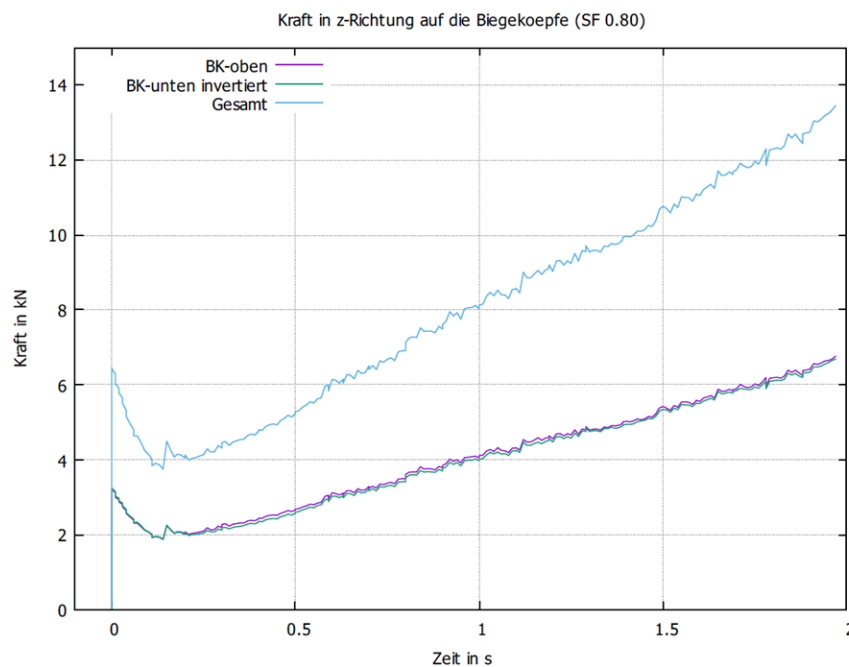


Abbildung 5-8 Spannkraftverlauf für das Schließen der Biegeschablonen (D_{KK})

Die FEM wurde für eine Vorhersage der auftretenden Kräfte genutzt, um diese mit den Werten der Auslegung zu vergleichen. Für das Schließen der Biegeschablone wurden die Kräfte in z-Richtung ausgegeben und für beide Hälften addiert (Abbildung 5-8). Hierbei wird erkennbar, dass zum Geschlossenhalten der Schablone eine Minimal wirkende Kraft von 14 kN am Ende des Prozesses existent sein muss. Die Untersuchung wurde durch einen Abgleich für die Biegemomente ergänzt, um die erfolgte Auslegung zu überprüfen (Abbildung 5-9).

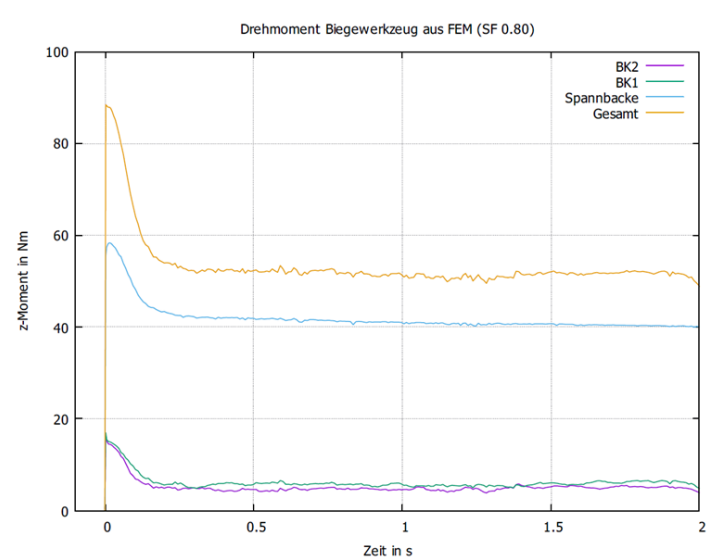


Abbildung 5-9 Biegemomentenverlauf aus der FEM D_{KK}

Abbildung 5-10 zeigt den Test unterschiedlicher Positionen der profilierten Gleitschiene im Spannprozess. Dabei sollte ein Versetzen an die Spannbacke (violett) heran ein besseren Werkstofffluss gewährleisten. Jedoch zeigte sich, dass durch die Vorovalierung des Rohrabchnitts der Werkstoff so teilweise unkontrolliert fließt und tlw. die Bildung von Falten zwischen Biegekopf (gelb-grün) und Gleitschiene begünstigt. Durch einen definierten Abstand kommt es zwar zum Aufbauchen des Werkstoffs (rechts, schwarzer Kreis), dies ist jedoch unkritisch.

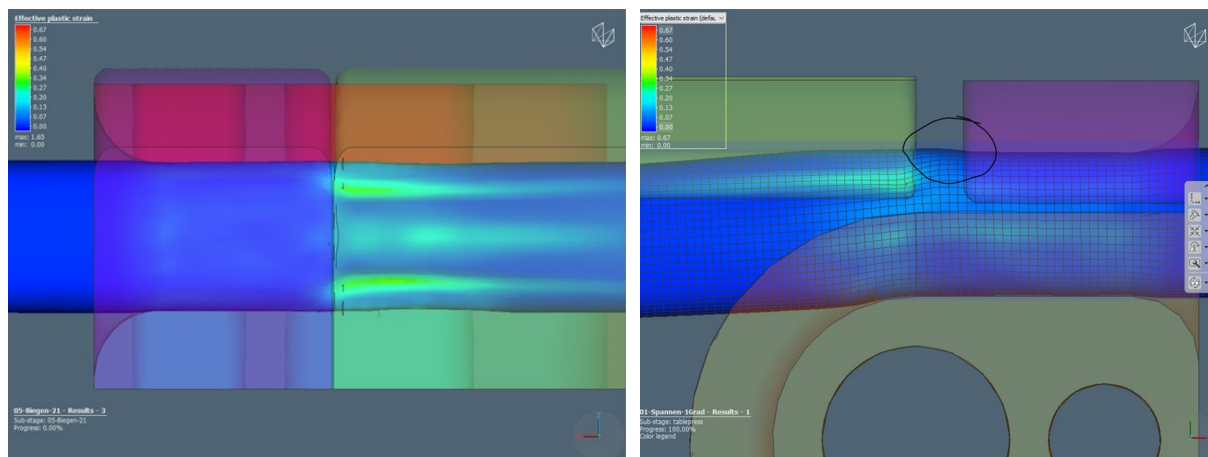


Abbildung 5-10 Variation der Position der Gleitschiene beim Spannprozess
(rechts mit Abstand zur Spannbacke, links ohne Abstand)

Analog wurde bei der iterativen Anpassung der Etageumformung vorgegangen. Hier wurde als erster Schritt der auftretende Fehler auf Grundlage der aktuellen Werkzeuge nachgebildet, was bis auf geringe Abweichungen gut gelang. Über eine Analyse der Kontaktpunkte sowie der Spannungsverteilungen im Rohrabschnitt konnte das Werkzeug anschließend schrittweise angepasst werden (Abbildung 5-11) und die Querschnittsreduktion in der Etage auf ein Minimum beschränkt werden.

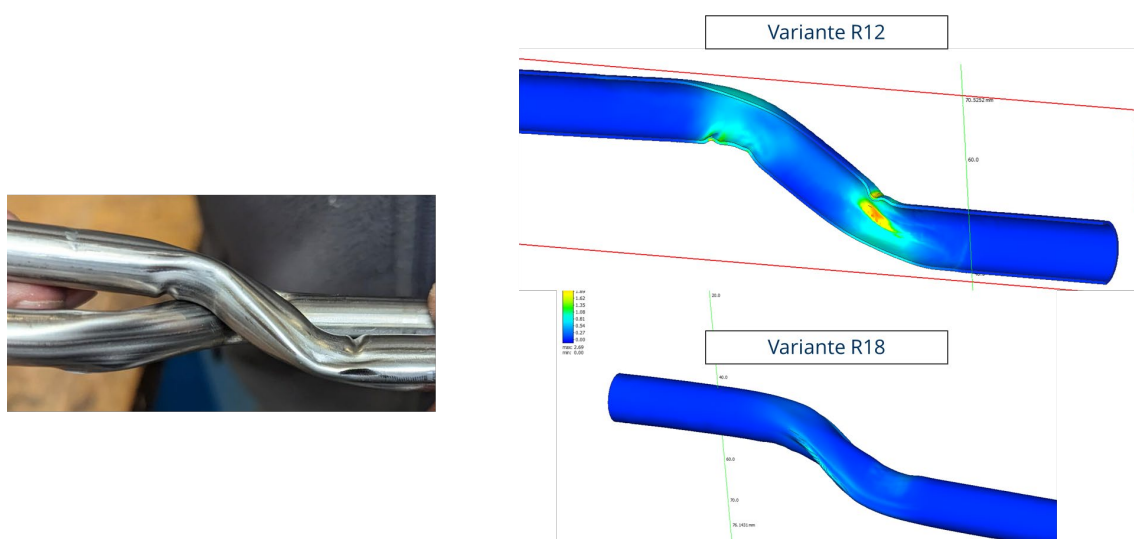


Abbildung 5-11 Reales Fehlerbild und verschiedene Iterationsstufen zur Optimierung als Ergebnis der FEM

Im Rahmen der fortlaufenden Fehleranalysen und Parameterstudien wurde ein Ishikawa-Diagramm zur besseren Übersichtlichkeit der Fehlerquellen angelegt. Dabei fließen sowohl die gesammelten Fehlerquellen aus Voruntersuchungen sowie die Fehler im Produktionsmodus mit ein. Fokus liegt jedoch in diesem

Fall vermehrt auf den im Rahmen der FEM betrachteten Einheiten der Gesamtanlage, sodass kein Anspruch auf Vollständigkeit besteht.

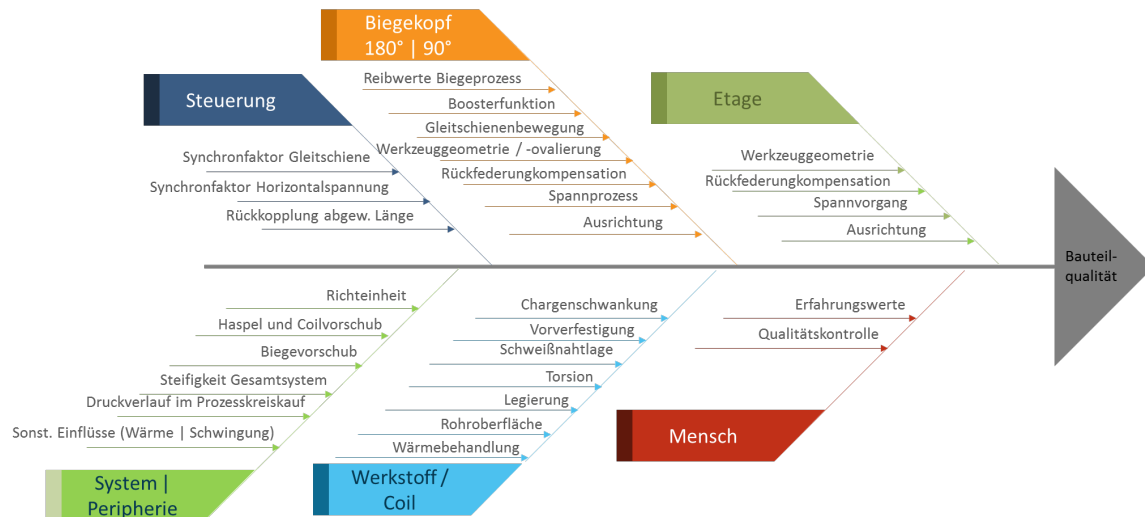


Abbildung 5-12 Ishikawa-Diagramm potentieller Fehlerquellen

5.3.1.3 Messung der Eigenspannungen im Rohrabschnitt vor und nach der Biegung der Etage

Um eine Verdrehung des Halbzeugs durch fertigungsbedingte (verbliebene Spannungen durch den Schweiß- und / oder Biegeprozess) oder ablaufbedingte Einflüsse (Reibkontakt beim Vorschub, Spannung durch Abwicklung des Coils) auszuschließen, wurden Untersuchungen zur Ermittlung der Eigenspannung durchgeführt. Dafür wurde die Anlage an der Professur Formgebende Fertigungsverfahren von der Fa. STRESSTECH PRISM verwendet. Die Anlage verwendet die Bohrlochmethode zur Ermittlung von Eigenspannungen und kann dabei mit verschiedenen Bohrer-Durchmessern in variablen Stufen der Bohrtiefe eingesetzt werden (vgl. Abbildung 5-13).

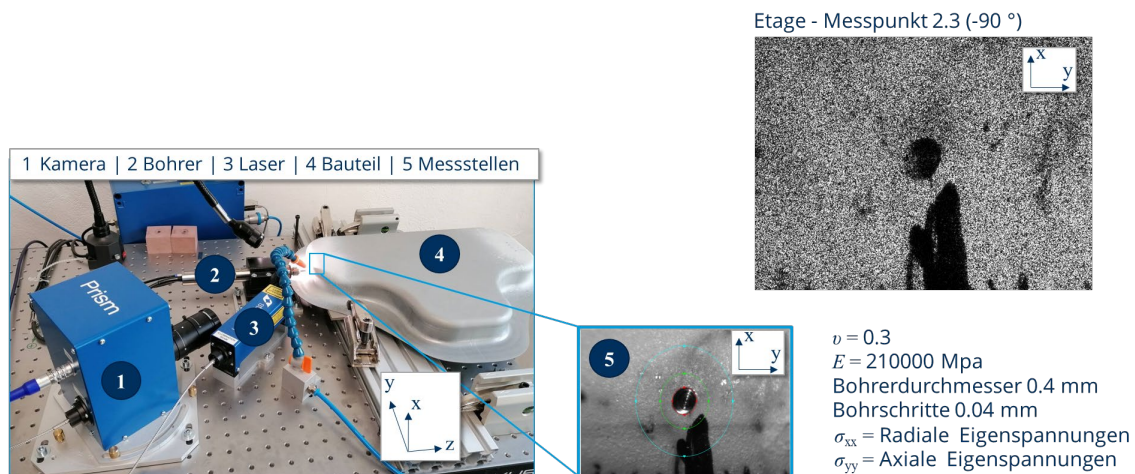


Abbildung 5-13 Prüfvorrichtung zur Ermittlung der Eigenspannungen anhand der Bohrlochmethode

Als Untersuchungsstelle ist die Etage ausgewählt. Hierbei wurde ausgehend von der Schweißnaht jeweils im 45° Abschnitt ein Messpunkt gesetzt. Weiterhin wurde in einem Abstand von 10 mm Schritten nach dem Biegeradius der Etage ein Messpunkt im gesetzt, um potenzielle Änderungen vor und nach der Biegung zu detektieren (vgl. Abbildung 5-14).



Abbildung 5-14 Messstellen für die Eigenspannungsmessung an der z-Etage D_{KK}

Als Referenz wurde ein nach dem Richtprozess entnommener, unverformter Rohrabschnitt vermessen und für den Vergleich herangezogen (vgl. Abbildung 5-15).

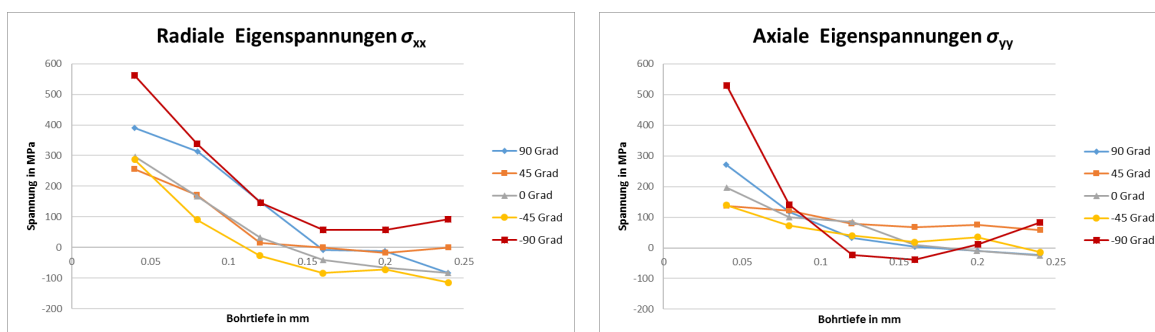


Abbildung 5-15 Eigenspannungsmessung für den Referenz-Rohrabschnitt D_{KK}

Es wird deutlich, dass herstellungsbedingt vorwiegend Zugspannungen vorliegen. Dies folgt aus dem Biegeprozess hin zur Rohrgeometrie, welche anschließend mit der Schweißnaht verbunden wird sowie dem Zugprozess im Rahmen der Herstellung. Einflüsse, welche durch den Abcoil- und Richtprozess auftreten, können nicht separiert werden. Damit können herstellungsbedingte Eigenspannungen als Ursache für die Verdrehung der Mäander bzw. auch Schwankungen im Prozess weitestgehend ausgeschlossen werden.

5.3.2 Einsatz einer profilierten Gleitschiene

Für die Erhöhung der Prozessfähigkeit wurde der Einsatz einer profilierten Gleitschiene integriert. Hier wurden optische Vermessung sowie wiederum Schliffbilder angefertigt und verglichen, um Abweichungen im Querschnitt und damit strömungstechnische Problemstellen zu detektieren.

5.3.3 Optische Vermessung der Biegeproben

Zur Verifizierung der Querschnittsvermessung wurde eine optische Vermessung ergänzend durchgeführt. Diese wurden mit dem GOM Atos System durchgeführt und anschließend mithilfe von GOM inspect suite 2020 verglichen.

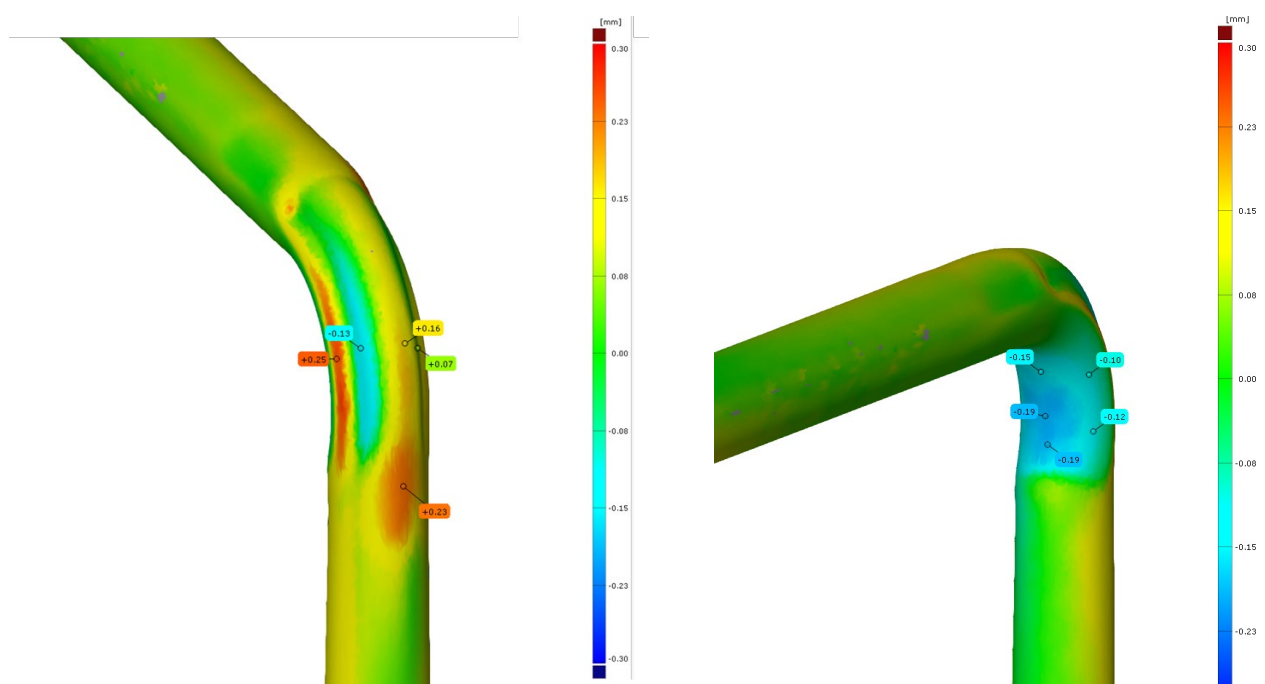


Abbildung 5-16 Vergleich der 90° Bögen mit profilierter Gleitschiene mit zwei Edelstählen für D_{KK}

Hierbei wird durch das eher einsetzenden Plastische Fließen des Werkstoffs in die Gleitschiene ein Versatz im Bereich der Profilierung deutlich. Im Rahmen der Tests im Produktionszyklus wurde ein komplettes Re-

gister u. a. für die Prüfung der Prozessrobustheit gefertigt. Dieses wurde zerlegt und die einzelnen Biegungen einzeln untersucht bzw. untereinander hinsichtlich des Verlaufs ausgewählter geometrischer Referenzen untersucht.

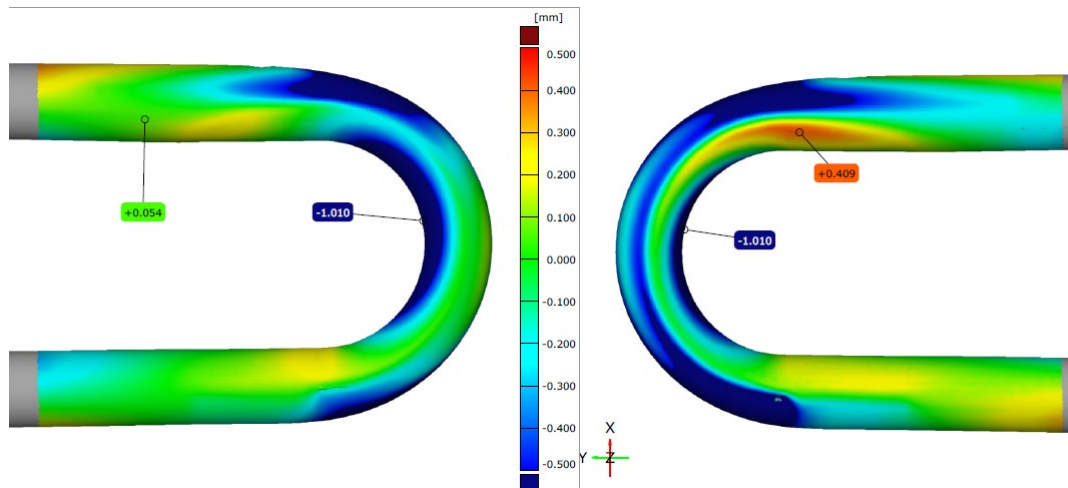


Abbildung 5-17 180° Bogen beidseitig vermessen mit aufgezeigter Abweichung von Ideal-CAD

Eine grundlegende Betrachtung erfolgt dabei zuerst im Vergleich mit der Idealkontur (CAD-Modell), welches logischerweise keine Querschnittsreduktion aufweist (vgl. Abbildung 5-17). Hier sind deutlich die Abweichungen durch die profilierte Gleitschiene sowie die ovalierte Biegeschablone erkennbar. Durch die optische Messtechnik sind dabei noch weitere Untersuchungen umsetzbar, welche im Folgenden beispielhaft aufgeführt sind.

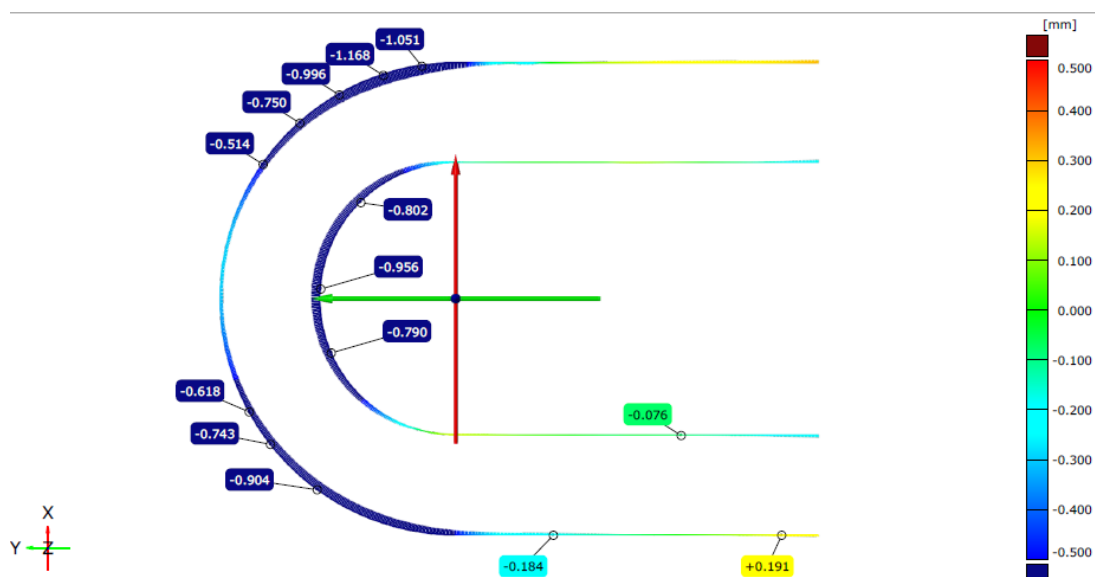


Abbildung 5-18 Schnitt in z-Ebene = 0 - Abweichung der Durchmesser von der Idealkontur (u. a. zur Bestimmung des Einfalls der Rohrbögen)

Die Biegungen der einzelnen Mäander eines Registers wurden fortlaufend von Mäander 1 bis 9 erfasst. Dabei wurde je eine 180° Biegung und eine 90° Biegung entnommen und vermessen. Neben der Abweichung zur Idealkontur wurde eine Ebene im Scheitelpunkt definiert und der vorhandene Querschnitt mit dem Idealquerschnitt verglichen.

5.3.4 Gefügeuntersuchungen

Für die Untersuchung der Gefüge wurden die Schliffproben der Querschnitte poliert und mit Nital-Lösung geätzt, um potenzielle Problemstellen, u. a. für die Korrosion zu detektieren. Nachfolgend sind die Abbildungen der verschiedenen Abschnitte dargestellt. Dabei ist jeweils der unbeeinflusste Bereich mit dem Innen- und Außenbogen der 90° und 180° Biegung verglichen. Es ist erkennbar, dass keine Schädigungen auftreten und die Gefügeveränderungen, bedingt durch den Umformprozess unkritisch sind.

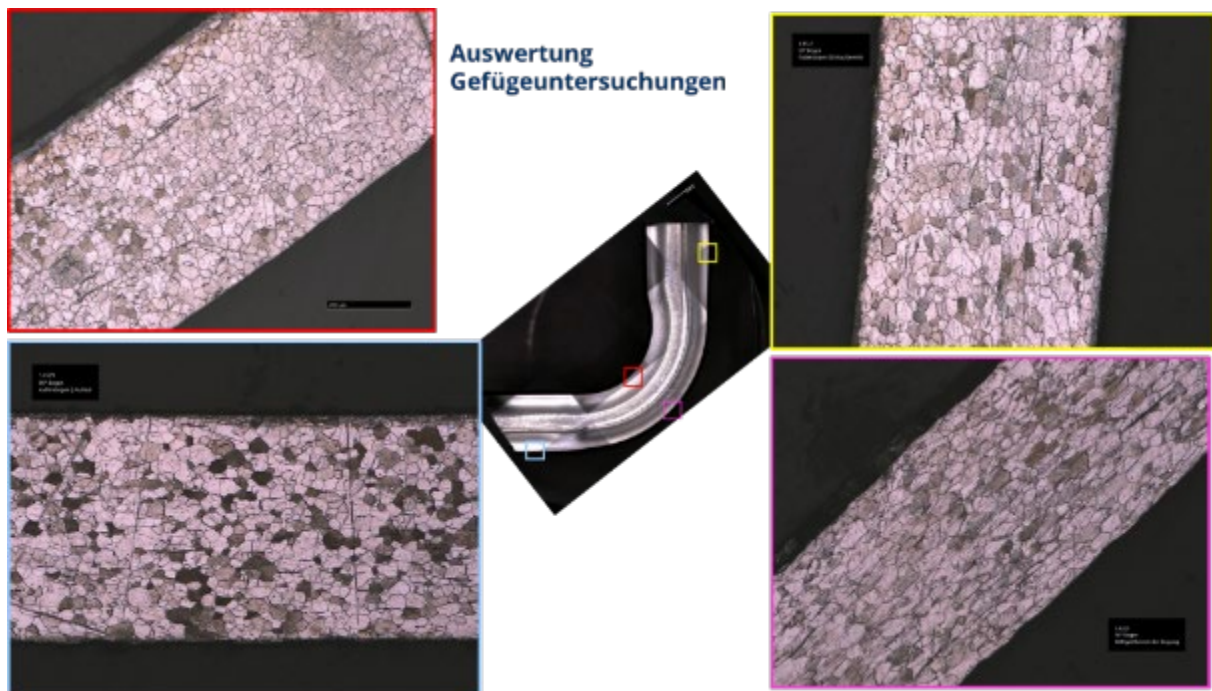


Abbildung 5-19 Gefügebilder des 90° Bogens aus Edelstahl, D_{KK}

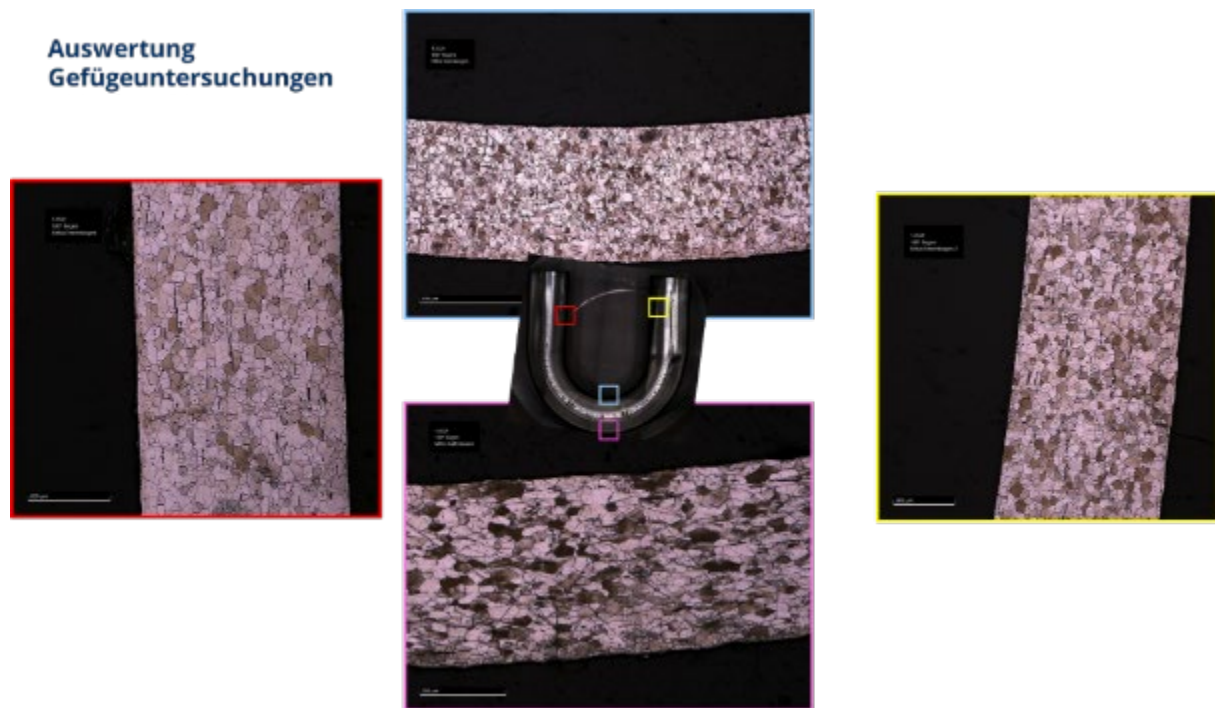


Abbildung 5-20 Gefügebilder des 180° Bogens aus Edelstahl, D_{KK}

5.3.5 Begleitung der Vor-Ortuntersuchungen

Im Rahmen des Besuchs von REUT wurden Untersuchungen zum Abgleich der Ergebnisse aus Simulation mit den experimentellen Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde vorwiegend der Geschwindigkeitsfaktor SF geändert, welcher die Relativgeschwindigkeit von Biegeschablone zu Gleitschiene darstellt. Es konnte ein Prozessfenster definiert und experimentell bestätigt werden.

5.3.6 Überführung der Ergebnisse auf den D_{GK} Werkzeugsatz

Zur Etagerung eines robusten Prozesses und, bei Bedarf, einer schnellen Reaktion auf Fehler wurde die virtuelle Berechnung für Parameter, wie Reibwerte, Vorschub von Spannbacke und Gleitschiene erweitert und eine Parameterstudie durchgeführt.

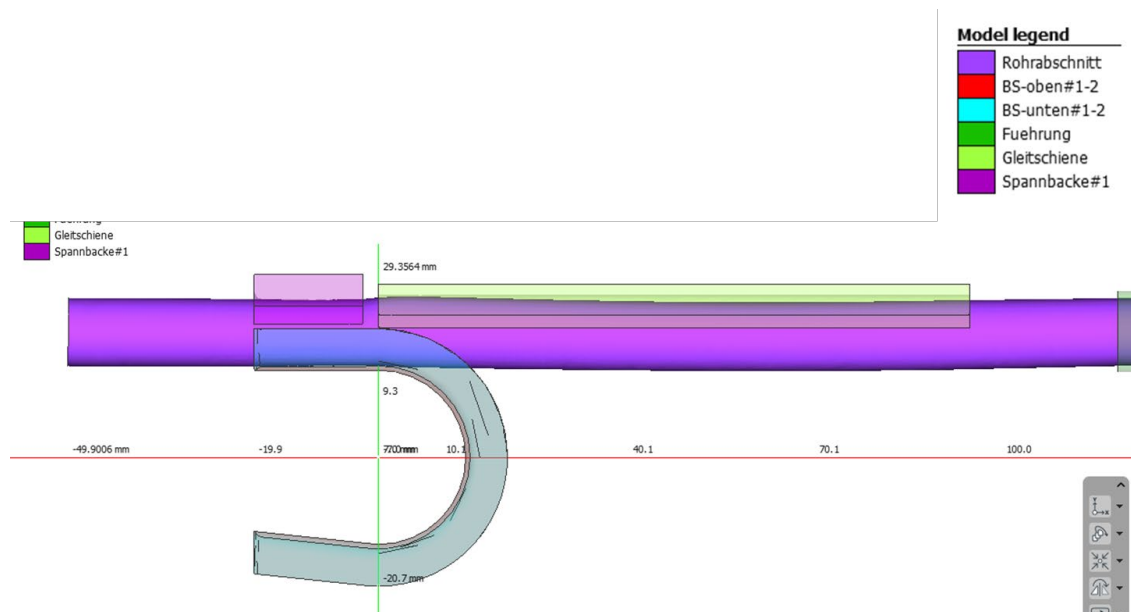


Abbildung 5-21 Aktueller Werkzeugsatz (Juni2022) für die Simulation vereinfacht

5.3.6.1 Parameterstudie (Ausschnitt)

Für die Fertigung der Register mit Rohrdurchmesser D_{GK} wurde äquivalent eine Parameterstudie durchgeführt. Die Reibwerte wurden dabei nach der vorangegangenen Berechnung als fix angenommen und für Biegekopf und Gleitschiene mit $\mu = 0.15$ definiert. Die Spannbacke wird zur Realisierung des Haftens mit $\mu = 0.5$ definiert. Die Reibung hat jedoch auch hier signifikanten Einfluss, wie anhand Abbildung 5-22 erkennbar wird. Biegewinkel ist vorerst konstant 182.4° , der Synchronfaktor liegt bei 0.85.

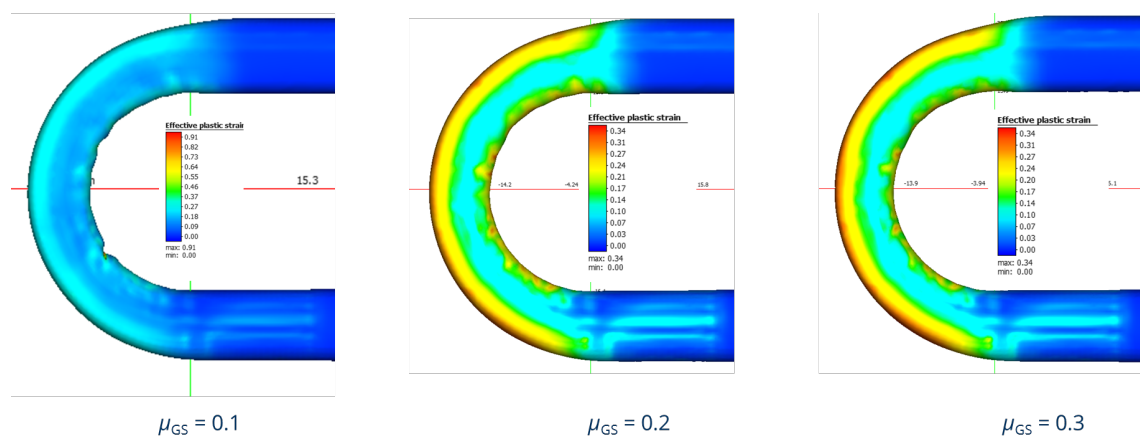


Abbildung 5-22 Stichprobenartige Überprüfung des Reibungseinflusses D_{GK}

Es wird deutlich, dass bei $\mu = 0.1$ Faltenbildung im Innenbogen durch ein Rutschen des Rohrs aus dem Biegekopf heraus begünstigt wird. Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedenen Synchronfaktoren (0.7 – 1.0) sowie variierende Anpresswege der Gleitschiene geprüft.

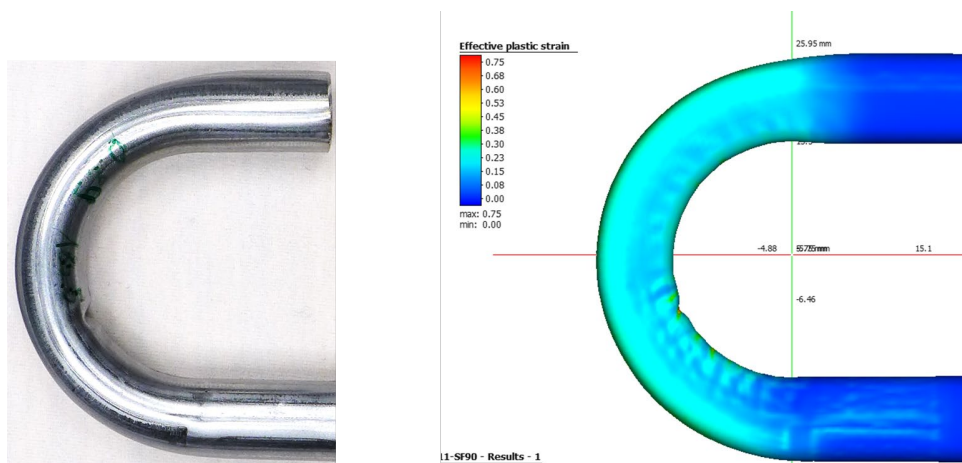
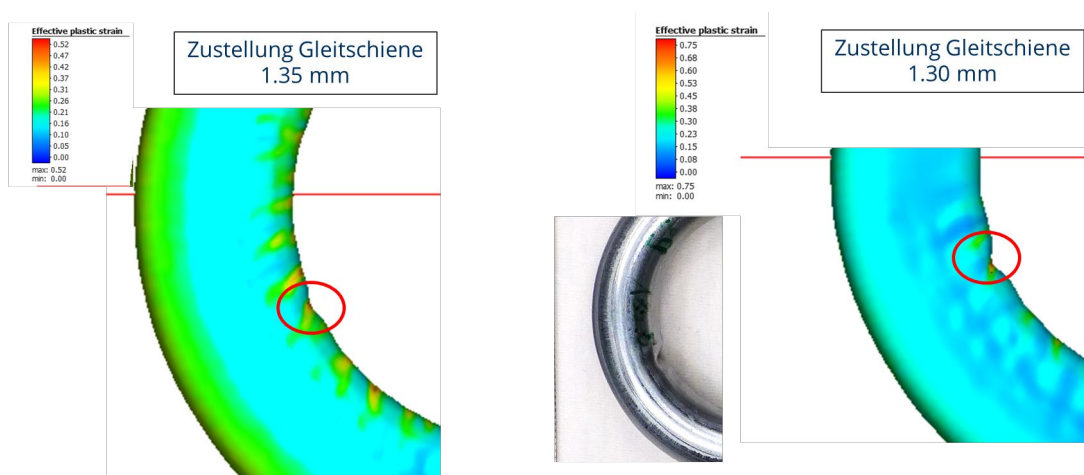


Abbildung 5-23 Abgleich der FEM mit experimentell hergestellten Bögen

Zur Absicherung der Ergebnisse konnte glücklicherweise trotz laufender Fertigung auf die Anlage zugegriffen werden und im Rahmen von Validierungsuntersuchungen die FEA mit experimentell hergestellten Bögen abgeglichen werden (Abbildung 5-23).



Konstante Parameter: $\mu_{BS} = 0.15$ | $\mu_{GS} = 0.15$ | $\mu_{SB} = 0.5$ | $SF = 0.90$ (FEM) | Biegewinkel = 182.4°

Abbildung 5-24 Abgleich der FEM mit experimentell hergestellten Bögen

Es konnte eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt werden, wobei die Vorhersage der Position der Faltenbildung bei variierenden Zustellungen der Gleitschiene (Abbildung 5-24) und wechselnden Synchronfaktoren (Abbildung 5-25) annähernd exakt vorhergesagt werden kann. Kleinere Diskrepanzen sind den Vereinfachungen bzw. nicht beeinflussbaren Maschineneigenheiten zuzuschreiben. Damit ist das FE-Modell als bestätigt anzusehen und kann als Auslegungsmodul zur Variantenbeurteilung sowie zur Sicherstellung einer bleibenden Einhaltung der Bauteilspezifikationen für die Biegeteile für ausgewählten Werkstoffe und Durchmesser während der Serienfertigung genutzt werden.

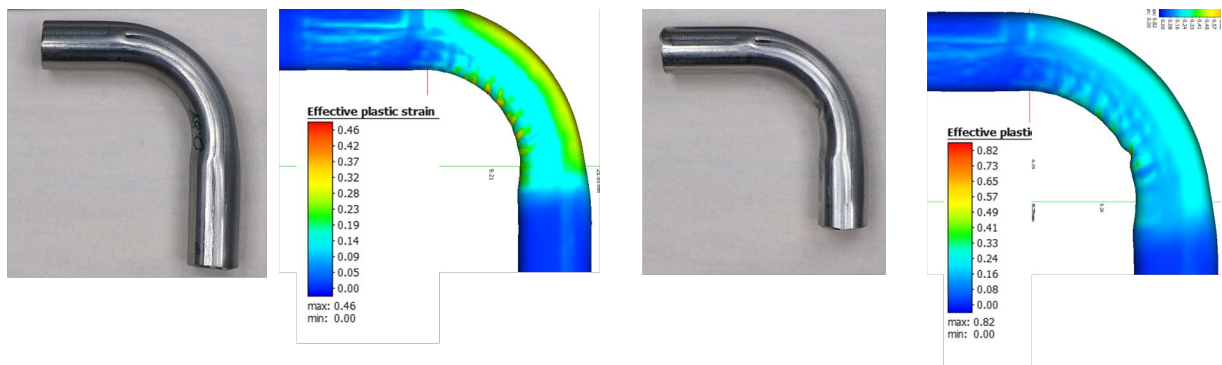


Abbildung 5-25 Biegung der 90° Bögen mit verschiedenen Synchronfaktor | Abgleich FEM - Exp.

6 AP5: Fertigungsablauf Gesamtkollektor (REUT, FF, FTM, Biegeanlagenhersteller)

6.1 Zuarbeit zur FMEA

6.1.1 Induktionslöten

6.1.1.1 Fehlerbehaftete Induktor-/Trommelanschlusspositionierung und Pyrometerausrichtung

Eine Fehlermöglichkeit im Fügeprozess stellt die fehlerbehaftete Induktor- und Trommelanschlusspositionierung sowie die Pyrometerausrichtung dar. Diese drei Fehlerquellen bedingen sich gegenseitig. Tabelle 6-1 zeigt die durchgeführte Versuchsmatrix. Das Ziel war ein visuelles Verdeutlichen des Einflusses der verschiedenen Positionierfehler auf die Wärmeentwicklung. Der Einfluss auf die optimale Regelstelle (Position 1 in Abbildung 6-1) ist in der Tabelle mit Bezug auf eine richtige Positionierung dargestellt durch Pfeile, welche die Wärmeentwicklung und erreichte Temperatur angeben. Steigt der Einfluss im Vergleich zu anderen gezeigten Einflussfaktoren in einer Zeile an, ist auch dies durch die Zahl der Pfeile angegeben.

Tabelle 6-1 Versuchsmatrix zur fehlerbehafteten Induktor-/Trommelanschlusspositionierung und Pyrometerausrichtung

Anlagenparameter: Leistung 50 %; Zieltemperatur 800 °C; Haltezeit 30 s					
Induktor-/Trommelanschlusspositionierung					
Radialversatz	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
	-	-	-	↓ ca. 50 K	↓ ca. 50 K
Axialversatz	0 mm	2 mm	4 mm	5 mm	
	Bezug	↑ ca. 50 K	↑ ca. 50 K	↑ ca. 50 K	
Winkelversatz d. Induktors	0 °	5 °			
	Bezug	-			
Pyrometerausrichtung (s. Abbildung 6-1)					
auf schwächsten Quer-schnitt (Position 1)	auf stärksten Quer-schnitt (Position 2)		auf stärkste Stirnfläche (Position 3)	Auf Registerrohr (Position 4)	
Bezug	↑↑ ca. 150 K		↑ ca. 100 K	↑↑↑ ca. 200 K	

Abbildung 6-1 zeigt die überprüften Pyrometermessstellen. Auf die Rückmeldung des Pyrometers regelt der Generator die Induktionsleistung und somit die Temperatur am Werkstück.

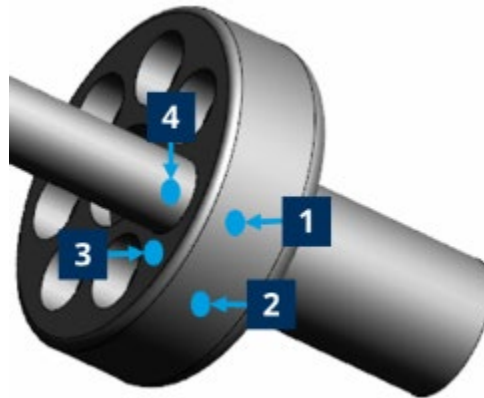


Abbildung 6-1 Pyrometermessstellen; 1 – richtige Messstelle am dünnsten Querschnitt; 2 – auf dem Mantel versetzte Messstelle am dicksten Querschnitt; 3 – Messung auf der Stirnfläche an dicken Querschnitt; 4 – Messung am Registerrohr

Aus Tabelle 6-1 kann abgeleitet werden, dass der Einfluss der reproduzierbaren Positionierung des Induktors oder Trommelanschluss geringere Effekte auf die Wärmeentwicklung hat als das Verstellen der Pyrometermessstelle. Die Auswertung der Versuche erfolgte mit der Wärmebildkamera, welche fortlaufend dieselbe Stelle betrachtet hat.

6.2 Vorbereitung der Maschinenstandorte

Die Auswahl des Maschinenstandortes erfolgte auf Basis der vorgeschalteten und nachgelagerten Produktionsabläufe. Dabei musste bei der Planung der Umbaumaßnahmen auch der laufende Produktionsbetrieb berücksichtigt werden, um für die neue Anlage Platz zu schaffen. Um freie Bodenfläche zu generieren, wurde ein neues Hochregal beschafft und in der Fertigung aufgebaut.

Da dies für die neue Biegeanlage an Bodenfläche allerdings nicht reichte, wurden Lagerbühnen in der Produktion benötigt. Durch die Lagerbühnen wurde die Höhe der Halle besser genutzt, um Lagermaterial vom Boden wegzubekommen. U.a. wurde das TH- und Marketinglager auf die Lagerbühne gelagert. Der gewonnene Bodenplatz stand dann für die Isolierstationen zu Verfügung

Die Arbeitsplätze "Register isolieren" befanden sich in der Produktion an der Stelle, an der die neue Biegeanlage aufgestellt wird. Aus diesem Grund mussten diverse infrastrukturelle Maßnahmen wie eben erwähnt durchgeführt werden, um zum einen Platz für die neue Anlage zu schaffen und zum anderen den laufenden Produktionsprozess aufrechtzuerhalten. Die Isolierstationen waren ein wesentlicher Bestandteil der Infrastrukturmaßnahme, da diese erstens mehrmals umziehen mussten und zweitens der neue

Standort idealerweise so eingerichtet wird, dass er auch in den späteren Produktionsablauf mit den neuen RoS-Registern passt.

Zusätzlich wurden bestehende Produktionsarbeitsplätze umgezogen beziehungsweise die Produktionsfläche weiter verdichtet. Die Medienversorgung (Strom, Druckluft, Netzwerk) wurde am Aufstellort der Biegeanlage sichergestellt. Die Planung und Vor-Ort Abstimmung bezüglich der Anlieferung der Anlage gewährleistet nun einen Aufbau bei laufendem Betrieb.

Mit Hilfe des Versuchsaufbaus zum Löten, bestehend aus einer Registeraufnahme, einer Dreh- und Positioniervorrichtung und dem Induktionslötgerät, wurden verschiedenen Optionen untersucht das Handling zwischen Biegetisch und der Lötstation zu optimieren. Dabei wurde die Größe der Hilfsvorrichtungen, die notwendige Aufstellfläche sowie die Lauf- und Transportwege berücksichtigt.

Als geeigneter Standort (Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3) für die finale Lötvorrichtung wurde zunächst eine Fläche in der Nähe des aktuellen Lötraums untersucht, da diese Fläche relativ einfach zur Verfügung gestellt werden könnte. Die Gaszuleitungen und die Luftabsaugung des bereits bestehenden Produktionsanlagen befinden sich in unmittelbarer Nähe. Ein Anschluss der neuen Induktionslötanlage an die bestehende Medienversorgung wäre somit ebenfalls leicht realisierbar. Was gegen diesen Standort gesprochen hat, war die Distanz bzw. der Aufwand im Zusammenhang mit dem Transport.

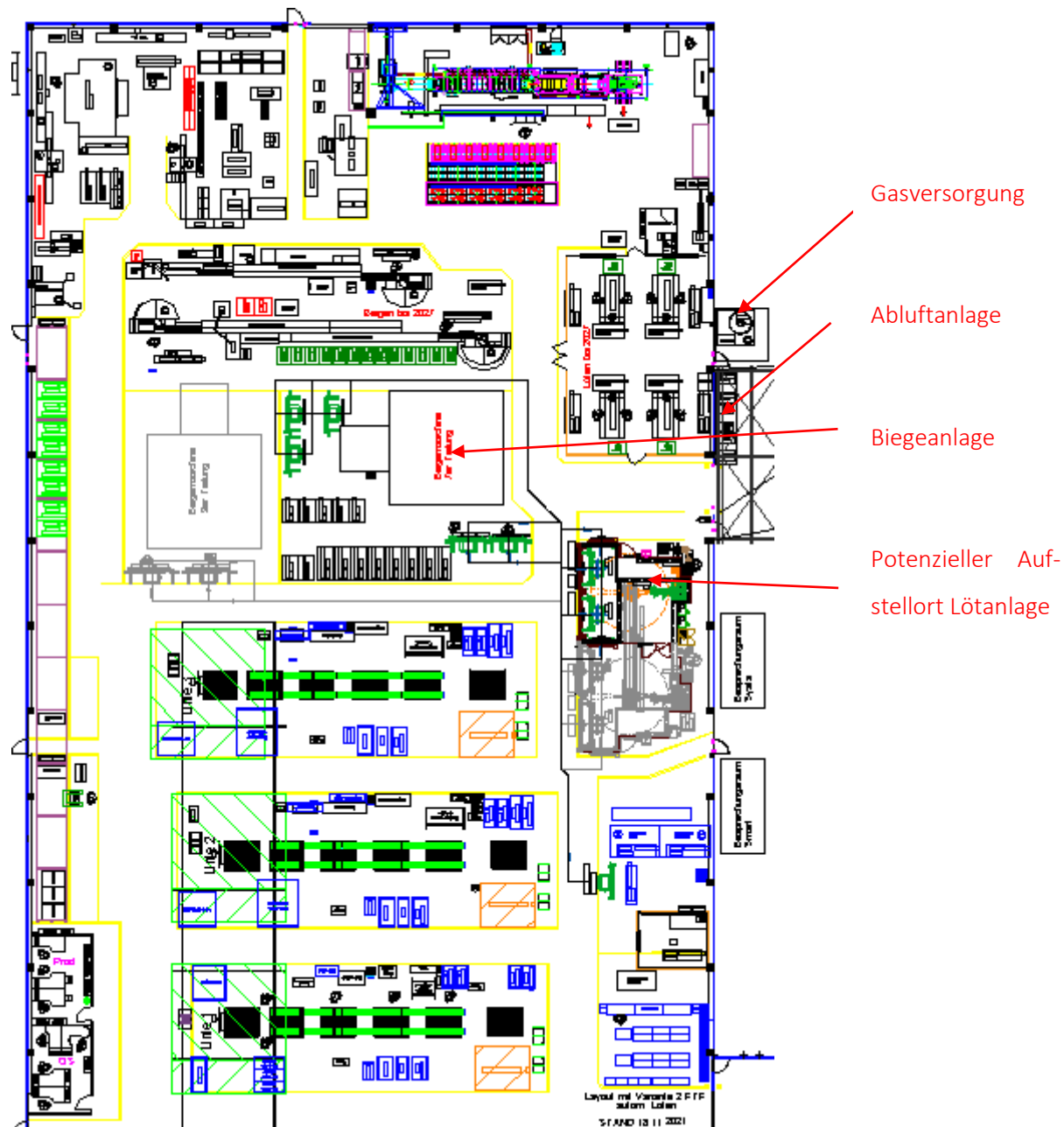


Abbildung 6-2: Gesamtübersicht Produktionshalle REUT

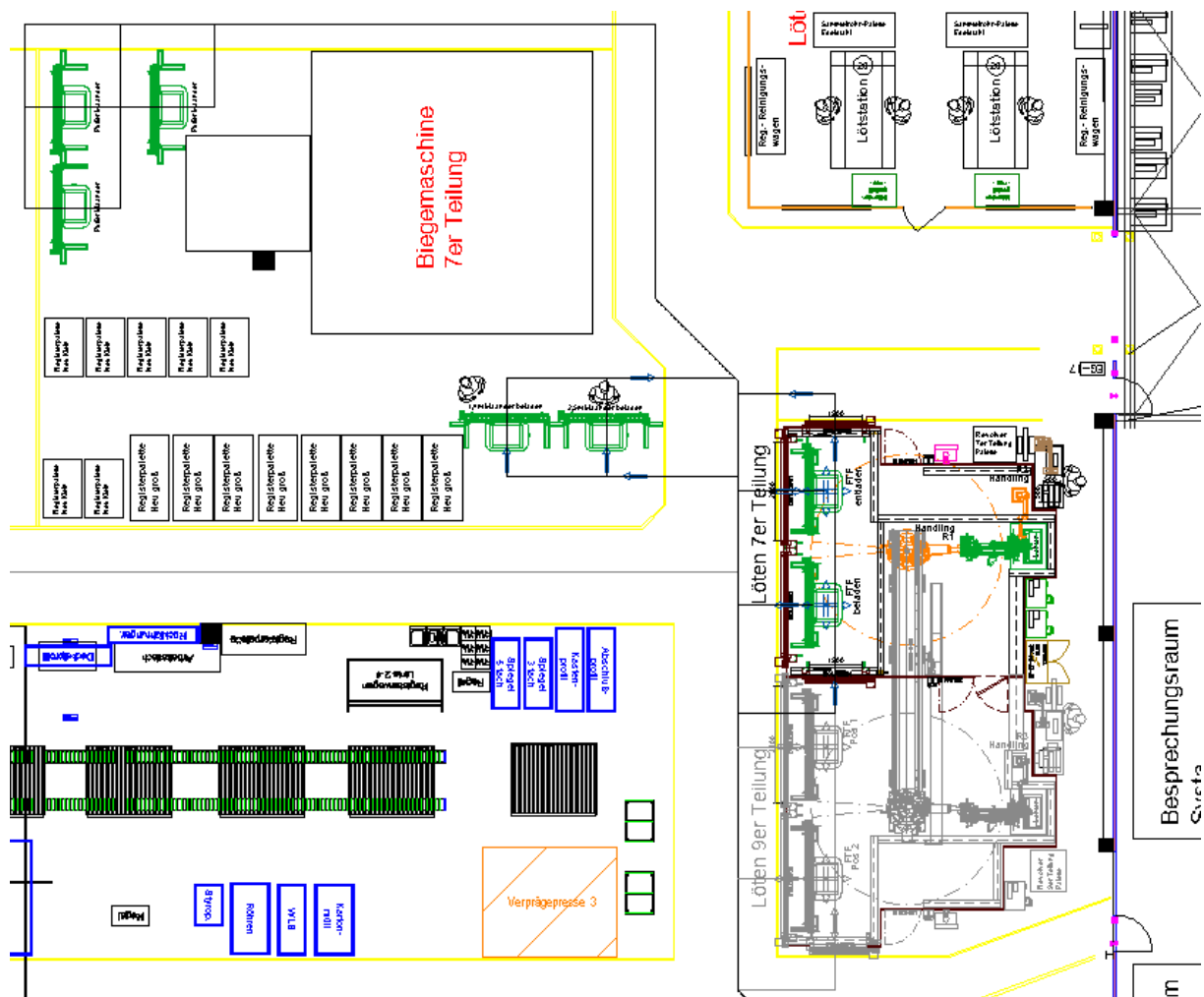


Abbildung 6-3 Transportwege zwischen Biegen und Lötten

Nachdem ein kompletter Mändersatz gebogen und auf der Registeraufnahme aufgespannt ist muss dieser zur Lötanlage gebracht werden. Der leere Rahmen muss nach dem Lötten wieder zurück zur Biegeanlage. Bei der angestrebten Taktzeit von unter 10 min müsste der Werker mindestens 6-mal in der Stunde die Wagen hin und her transportieren. In dieser Zeit steht der Werker zum Biegen nicht zur Verfügung.

Deshalb wurde untersucht, ob der Transport durch fahrerlose Transportsysteme (FTS) übernommen werden könnte. In Abbildung 6-3 sind grün dargestellt die Rahmen und die als schwarze Linien die Fahrwege dargestellt. Da sich zwischen der Biegeanlage und der angedachten Lötanlage jedoch ebenfalls der Versorgungsweg befindet der zum einen für die Materialversorgung innerhalb der Produktion genutzt wird als auch für den Materialtransport zwischen den verschiedenen Hallen wurde diese Idee zurückgestellt.

Als Alternative wurde die Option einen Schienentransportsystem unter der Hallendecke zu installieren, welches für den Transport der Register und Rahmen zwischen Biegen und Lötten genutzt werden kann,

näher betrachtet. Da dieser Transport unter der Hallendecke jedoch über Arbeitsplätze sowie Lauf- und Fahrwege hinweg geschehen müsste wären umfangreiche Sicherungsmaßnahmen wie Fallschutz und Absturzsicherungen notwendig. Aus Kosten- und Platzgründen für diese Systeme wurde auch diese Option nicht weiterverfolgt.

Letztendlich ist die weitere Untersuchung und Optimierung des Gesamtablaufes dahingehend ausgelegt die Lötanlage wie in Abbildung 6-4 dargestellt zu platzieren.

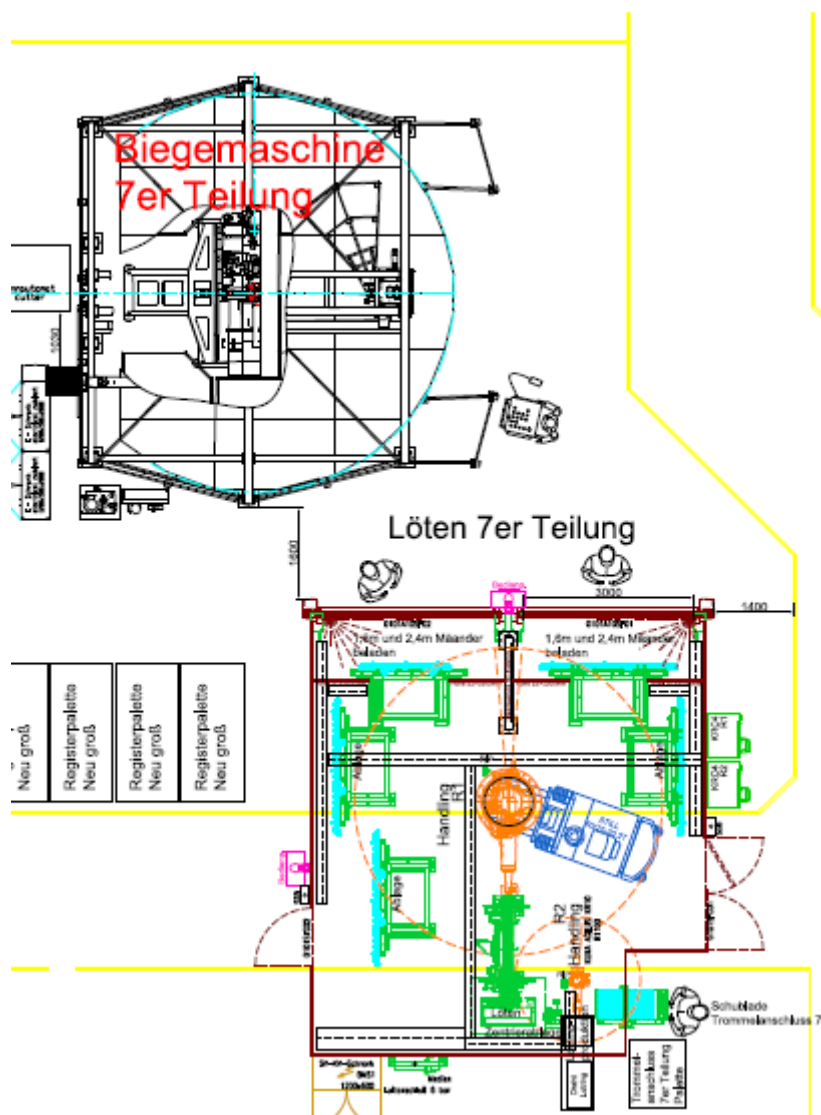


Abbildung 6-4 Standort Lötanlage unterhalb des Biegetisches

Das Fügen der einzelnen Mäander zu einem Register erfolgt weiterhin direkt an der Biegeanlage. Jedoch befindet sich der Rahmen bereits in der Lötstation und verbleibt auch dort. Die Transportwege entfallen

somit komplett. Es werden zwei Rahmen in der Lötstation vorgesehen. Während ein Rahmen bestückt, wird befindet sich der 2te in der Lötung.

Die Prozesse Löten und Biegen müssen jetzt dahingehend optimiert werden das die beiden Taktzeiten Biegen und Löten im Zusammenhang mit dem Handling so funktionieren, dass keine Wartezeiten entstehen zwischen Register ist fertig gelötet und nächstes Register ist fertig gebogen.

Der reale Testbetrieb des Handlings der Register zwischen der Biegeanlage und der Lötanlage kann in kürze starten, nachdem die Lötzelle jetzt wie oben beschrieben neben der Biegeanlage aufgebaut wurde. Das heißt es werden die Zeiten gemessen die die einzelnen Mäander/Register brauchen um gebogen zu werden, den Zeitbedarf zum Einhängen der ein Löt fertig zu fixieren, der Zeitbedarf für das Löten und das anschließende abhängen aus der Lötstation.

Nach dem Testlötungen an den realen Fertigungsanlagen deutlich einfacher durchgeführt werden können als am Versuchsaufbau finden jetzt häufiger und mehr Versuchsläufe, statt das Register direkt aus der Biegeanlage in der Lötvorrichtung einzulegen und zu verlöten. Im Moment werden noch verschiedenen Szenarien durchspielt was die ideale Reihenfolge der Prozessschritte und Laufwege angeht. Die Schnittstelle zwischen dem Werker der Biegeanlage und dem Werker der Lötzelle ist das Einhängen der Mäander in der Registeraufnahme, dass noch durch den Werker der Biegeanlage passiert.

Sobald der entsprechende Mäander eingehängt wurde, übernimmt der Werker der Lötzelle.

Der Mäander muss nun, nachdem es oben eingehängt wurde, unten in den entsprechenden Aufnahmen eingelegt und arretiert werden. Der Werker muss genau auf die genaue Lage der einzelnen Kragarme achten, damit später beim Fügen des Trommelanschlusses alle 7 Rohrenden maßgenau in die Position der Bohrung passen. Des Weiteren dient die Mäanderaufnahme auch nochmal dazu die Maßhaltigkeit der gebogenen Mäander zu überprüfen. Die Aufnahme ist so präzise eingestellt, das kleinste Längenabweichung, insbesondere bei den Rohrenden im Zehntelbereich erkennbar werden.

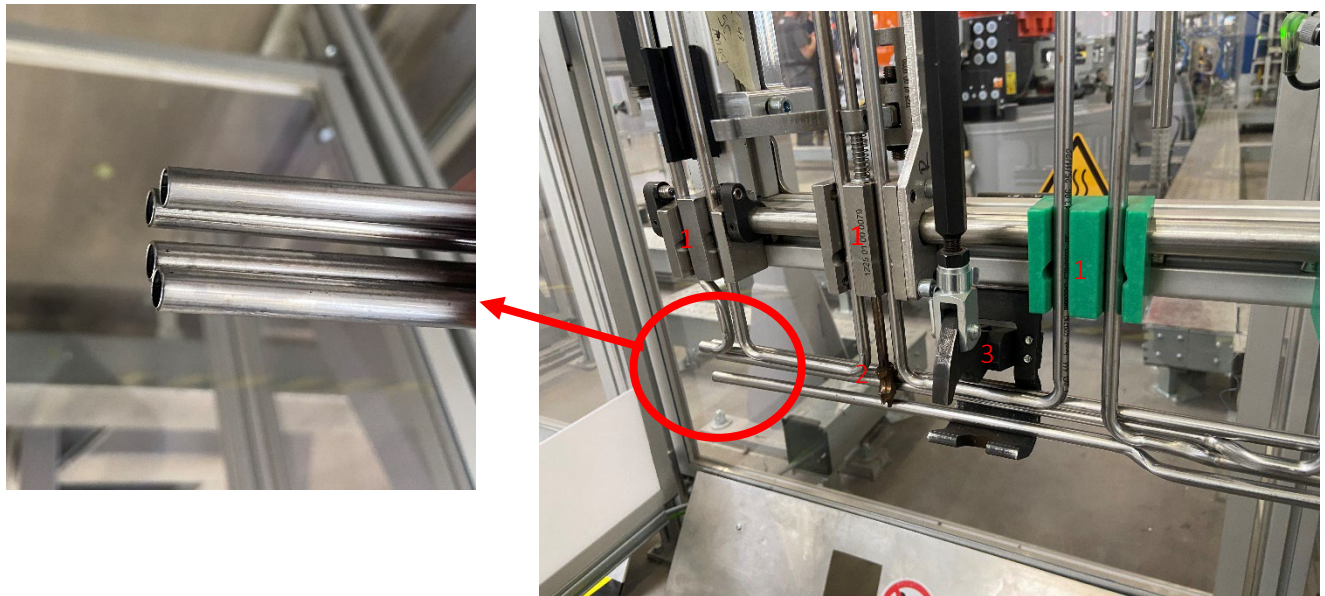


Abbildung 6-5 Links: Detailansicht der Endlage der Rohrenden
 Rechts: Beschreibung der Rohraufnahmepunkte in der Registeraufnahme

- | | |
|-------------|--|
| Position 1 | Halteklötze zur Arretierung der Mäander, um die Endlage der Rohrenden zu gewährleisten |
| Position 2: | Distanzscheibe, um die Lageposition der Rohrenden in Bezug auf die Kreisanordnung zu gewährleisten |
| Position 3: | Haltekralle, um durch das Register bei Bewegung des Aufnahme in Position zu halten |

Diese Überprüfung ist wichtig, um sicherzustellen, dass zum einen die erforderliche Einstecktiefe der Rohrenden in der Lötstelle gewährleistet ist und zum anderen um sicherzustellen, dass die Rohrenden keinen Druck auf den Lotring ausüben und diesen beim Aufschmelzen verdrängen könnten.

Sind alle 7 Mäander eingehängt kann der Werker den Sicherheitsbereich der Lötzelle freigeben und den Lötprozesses mittels Tastendrucks außen an der Anlage starten.

Die Lötanlage entnimmt das zu lötfende Register selbständig und führt dieses der eigentlichen Lötstation zu. Die die Bestückung der Trommelanschlüsse mit Lotringen, das Fügen des Trommelanschlusses und den Seitenwechsel führt die Anlage komplett eigenständig durch, ohne dass nochmal ein Eingriff durch den Werker notwendig ist. Am Ende des Lötvorgang wird das fertige Register wieder an den Übergabepplatz gestellt und er Werker kann das Register aus der Station entnehmen. Die Entnahme der gelöteten Register erfolgt mit Hilfe eines Transportwagens, welcher in der Produktion bereits vom Flammlöten existiert. Sobald der Transportwagen voll ist, werden die Register den nachgelagerten Prozessen Dichtheitsprüfung

und Isolieren zugeführt. Diese Prozesse existieren bereits und mussten für das neuen RoS Register nicht angepasst werden.

Die Dauer des Lötprozesses ist unabhängig von der Größe des Registers. Jedes Register ob kurz oder lang ob schnell oder breit verfügt über die gleiche Anzahl von Mäandern und somit wird bei allen Registertypen der gleiche Trommelanschluss und folglich der gleiche Lötprozess verwendet.

Die Dauer des Lötens eines kompletten Registers beträgt von der Startfreigabe durch den Werker bis zum Ablegen der fertigen Registers 800 Sekunden. Zum Vergleich die Zeiten beim Biegen gemäß Tabelle xyz beträgt je nach Registertyp zwischen 665 -819 Sekunden.

6.3 FMEA Lötanlage

Begleitend zum Aufbau und dem Probetrieb im Technologiezentrum der REUT der Lötanlage erfolgt die Erstellung einer Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA Lötanlage) zum Aufbau und der Inbetriebnahme der Anlage. Der Prozess der FMEA Lötanlage wird bis zur Fertigstellung der Anlage am vorgesehenen Einsatzort die Arbeiten weiter begleiten.

Zu Beginn der FMEA erfolgte die Feststellung, dass die Lötanlage als Ganzes in den Anwendungsbereich der Maschinen-Richtlinie (2006/42/EG) fällt und die dort verankerten Grundsätze für die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen zum Tragen kommen.

In Zusammenarbeit mit der TU-Dresden erfolgte eine Recherche die relevanten Normen und Richtlinien, die zur Beurteilung herangezogen werden können. Ein Projektteam der REUT führt die konkrete Ausarbeitung der FMEA durch. Zu Beginn wurden die Grenzen der Maschine festgelegt, sowie die zu betrachtenden Lebensphasen definiert. Im Rahmen der FMEA werden die folgenden 7 Lebensphasen betrachtet:

1. Verladen und Transport (vor Nutzung)
2. Aufbau und Montage (vor der Nutzung)
3. Inbetriebnahme und Probelauf
4. Normalbetrieb: Produktion und Entstören
5. Sonderbetrieb: Einrichten, Rüsten, Warten, Instandhalten, Reparieren
6. Abbau und Demontage (nach der Nutzung)
7. Verschrottung, Recycling (nach der Nutzung)

Ab Juli 2020 wurden im Projektverlauf alle 7 Lebensphasen betrachtet und bewertet. Hieraus wurden konkrete Maßnahmen und Hinweise abgeleitet. Diese wurden an die verantwortlichen Bearbeiter weitergeleitet und werden im Zuge der weiteren Projektbearbeitung verarbeitet.

6.4 FMEA Löten

Als weitere FMEA wurde der Prozess „Löten“ betrachtet. Hier wurde systematisch Fehlereinflüsse ermittelt und in Ihrem Risiko bewertet. Es erfolgte eine Betrachtung von möglichen Fehlern durch die Bauteile der Lötanlage, systematische Einflüsse beispielweise durch geometrische Gegebenheiten (am Lötspalt) sowie weitere Einflüsse durch (z.B. Reinigungsprozesse). Die gefundenen Fehlermöglichkeiten und Einflüsse wurden entsprechend ihrem möglichen Einfluss bewertet und Maßnahmen zur Reduzierung oder Vermeidung erarbeitet.

Mögliche Gegenmaßnahmen wurden entweder definiert oder an den jeweiligen verantwortlichen Bearbeiter weitergeleitet. Die offenen Punkte werden im Projektverlauf weiter berücksichtigt und Gegenmaßnahmen definiert.

7 AP6: Begleittests (GEVV, REUT, FF, FTM)

7.1 Laborprüfstand Sonnensimulator (REUT)

Für die weiterführenden Begleittests der RoS-Registerkonstruktion war es notwendig, den bestehenden Sonnensimulator instand zusetzen und zu erweitern. Es konnten die folgenden Verbesserungen erreicht werden:

- Verbesserung der mittleren Strahlungsintensität
- Vergrößerung des Lichtfelds
- Verbesserung der Strahlungshomogenität

7.2 Planung und Durchführung Begleittests (REUT)

Planung der Begleittests

Da die Begleittests bereits mit den ersten Prototypen (ab April 2021) beginnen mussten, wurde eine Planung für die Prüfungen erstellt. Sie beinhaltete den zeitlichen Ablauf, die durchzuführenden Prüfungen sowie Anzahl der Prüflinge. Die Begleittests erstreckten sich von der Überprüfung der grundlegenden Spezifikationen bis hin zu Lebensdauertests, um die Robustheit des Produkts nachzuweisen. Folgende Tabelle zeigt die Prüfplanung und den Stand der Arbeiten zum Datum der Berichtserstellung.

Tabelle 7-1 Prüfplan für Begleittests zu den Kollektoren mit RoS

Prüfplanung für neue Rohrregister													
auf Basis einer Lebensdauererwartung von 30 Jahren													
Prüfmuster	Register Hydra RoS												
Material													
Thema	Prüfung	Test notwendig	Kategorie	Status	Prüftage indoor	Prüftage outdoor	Bemerkung	Prototyp	O-Serie	Serie	FMEA	Norm/Labe	
	Prüfnummer							Intern Extern	Lieferant	Intern Extern	Lieferant	Intern Extern	Lieferant
Prüfungen													
Betriebsverhalten	1 Innendruckprüfung	x	1	2			ISO 9806; DGR	x		x	x		
	2 Druckwechselprüfung	x	1	24			Lebensdauertest (LT)	x		x	x		
	3 Hochtemperaturbeständigkeit	x	1	8	64		ISO 9806 + (LT- Feldversuch) S			x	x		
	4 Interner thermischer Schock	x	1	8	2		ISO 9806 + (LT) S			x	x		
	5 Druckverlustmessung	x	1	60			ISO 9806 / TU-D	x		x			
	6 Frostbeständigkeit		3	3	3		ISO 9806 + (Feldversuch)	x		x			
Montage und Wartung	7 Anzugsdrehmoment (Torsion)	x	1	1			Montagetest (MT)				x		
	8 Stabilität bei Röhrentausch	x	2	2			Montagetest (MT)			x			
Korrosion	9 Innere Korrosionsbeständigkeit	x	1	94			Lebensdauertest (LT) S; TU-D			x	x		
	10 Innere Korrosionsbeständigkeit Glykol		3		60		Lebensdauertest (LT)				x		
	11 Äußere Korrosionsbeständigkeit	x	1	60	180		Lebensdauertest (LT) / TU-D				x		
Konstruktion	12 Toleranzen; Ausführung	x	1	40			Bennusterung; QS-Freigabe / TU-D			x	x		
Lötqualität	13 Schliffbilder / Auszugsversuch warm	x	2	65			TU-D / DGR	x		x	x		
	14 Auszugsversuch kalt	x	2	8			DGR	x		x	x		
Leistung	15 Thermische Leistungsfähigkeit	x	2		30		ISO 9806			x			
Prüfdauer					375	339							
Prüfkategorie													
1 = Kritisch (Grundvoraussetzung um Produkt zu vertreiben) 2 = Notwendig (kann zu Reklamationen führen) 3 = Ergänzung (weiterführende Prüfungen um Know How abzurufen) S = Sonnensimulator							Legende						
							Keine Prüfung Notwendig						
							 Prüfung durchgeführt, erfolgreich bestanden und dok.						
							 Prüfung durchgeführt und erfolgreich bestanden						
							 Prüfung wird durchgeführt						
							 Prüfung nicht begonnen oder nicht bestanden						
							RPZ Risiko-Prioritäts-Zahl						

7.2.1 Innendruckprüfung

Die Innendruckprüfung soll die Druckbeständigkeit bei statischen Drücken bis 25 bar nachweisen.

Eine hydraulische Innendruckprüfung wurde an 2 Register mit jeweils 2 induktiv gelöteten Trommelanschlüssen durchgeführt (Registerbezeichnung RoS 15/14 und 19/21). Für den Versuch wurden die Register an eine Präzisionspumpe angeschlossen und mit einem Innendruck belastet.

Beide Register haben die Innendruckprüfung ohne Beschädigungen bestanden.

7.2.2 Druckwechselprüfung

Die Druckwechselprüfung soll die Innendruckbeständigkeit bei dynamischem Druckwechsel bis 25 bar nachweisen.

Eine hydraulische Druckwechselprüfung wurden an 2 Register mit jeweils 2 induktivgelöteten Trommelanschlüssen durchgeführt. Für die Druckwechselprüfung von den Registern wurde die Standardeinstellungen verwendet. Beide Register haben die Druckwechselprüfung dicht und ohne Beschädigungen am Trommelanschluss bestanden. Als ergänzenden Versuch, wurde bei dem Register (Registerbezeichnung RoS 15/14) die Druckwechselprüfung wiederholt mit einen Druckwechsel von 0 - 38 bar. Register und Trommelanschluss haben diesen Versuch ebenfalls dicht und ohne Beschädigung bestanden.

7.2.3 Hochttemperaturbeständigkeit

Ein Kollektor (19/49 RoS) wurde unter dem Sonnensimulator montiert.

Temperatursensoren wurden am Mäander 3, 7 und 11 zwischen Wärmeleitblech und Mäander, 30 cm unterhalb des Sammelkastens befestigt. Die Datenerfassung erfolgte mit einem Almemo Datenlogger. Der Versuch wurde im Prüfplan mit 36 Stunden angegeben, und wurde über eine Dauer von 40 Stunden durchgeführt, um die erste Aufheizstunde auszugleichen.

Der Kollektor wurde 5 Tage je 8 Stunden durch der Sonnensimulator bestrahlt. Nach ca. 30 Minuten wurde die angestrebte Temperatur von 380 °C erreicht. Die Temperatur wurde konstant über die Gesamtzeit von 8 Stunden gehalten. Es konnten keine Beschädigungen oder Verdrehung des Mäanders festgestellt werden. Alle Wärmeleitbleche waren ohne Verformung. Ein „Einfallen“ des Wärmeleitbleches konnte nicht festgestellt werden. Somit kann der Versuch als erfolgreich gewertet werden.

7.2.4 Interner thermischer Schock

Die Überprüfung auf das Verhalten auf interne thermische Schocks erfolgt im Rahmen der internen Korrosionsprüfung (Kapitel 7.2.8). Bei dieser Prüfung wird der Prüfkollektor in Zyklen auf ca. 200 °C, bis zur Verdampfung des Wärmeträgermediums, aufgeheizt. Der Kollektor wird dann schlagartig wieder auf 40 °C abgekühlt, um die flüssige Phase des Wärmeträgermediums zu erreichen. Es sind keine Leckagen, keine Verformungen am Register und kein Glasbruch an den Vakuumröhren aufgetreten.

7.2.5 Torsionsversuch Anzugsdrehmoment

Die Robustheitsprüfung soll die Beständigkeit des Registers bei Montagefehlern durch falsches Anziehen an der Kollektor-Verbindung nachweisen.

Eine Anschlussverschraubung wurde vormontiert (15 mm gerade Verschraubung) und handfest angezogen. Die Anschlussverschraubung wurde mithilfe eines Drehmomentschlüssels angezogen wie im Prüfplan beschrieben. Die Anschlussverschraubung wurde mit dem Drehmomentschlüssel in 5 Nm Schritten bis 20 Nm ohne gegenhalten angezogen. Ein Verdrehen der hydraulischen Verbindung ohne Gegenhalten soll bis mindestens einem Drehmoment von 20 Nm bestehen.

Der Versuch wurde bis 20 Nm erfolgreich durchgeführt. Das Drehmoment wurde danach auf 30 Nm und weiter auf 40 Nm erhöht (s.a. Abbildung 7-1. Bei einem Drehmoment von 40 Nm drehte die Anschlussverschraubung mit. Die Verbindung war noch fest, eine Verformung oder Verdrehung am Register hat nicht stattgefunden. Die Konstruktion ist somit auch bei Montagefehlern ohne gegenhalten stabil.



Abbildung 7-1 Markierter Trommelanschluss am Register nach Torsionsversuch mit einer Belastung von 40 Nm.

7.2.6 Stabilität beim Röhrentausch

Der Robustheitstest soll nachweisen, dass die Lötverbindung bei mehrmaligem Röhrentausch nicht geschwächt wird und der Mäander nicht abknickt.

Für die Prüfung wurde ein Kollektor auf eine Flachdachmontageset mit einer Neigung von 45° montiert. Vor dem Röhrentausch wurde der Kollektor einen Tag im Freien thermisch belastet (Trockenstagnation). Als erfolgreich wurde ein Versuch gewertet, wenn die Röhren, nach unten gezogen und um 45° nach oben gebogen werden konnte, ohne dass die Röhre bricht, der Mäander abknickt, oder eine Verdrehung des Rohrbündels stattfindet. Jedes Rohr muss diesen Tausch zweimal bestehen.



Abbildung 7-2 Messungen an der Vakuumröhre während der Versuche für den Röhrentausch

Es wurden 3 Röhren wie im Prüfplan beschrieben getestet und die Wiederholungen wurden von 2- auf 5-mal erhöht.

Es konnte in keinem Fall ein Verdrehen festgestellt werden. Der Kollektor wurde mit 24 bar über eine Dauer von 15 Minuten abgedrückt und alle Lötungen waren dicht und ohne Beschädigungen.

7.2.7 Frostbeständigkeit

Die Prüfung soll die Frostbeständigkeit des Rohrmaterials im Vergleich zu den bisher eingesetzten Werkstoffen zeigen. Für die Prüfung wurden drei Rohrmäander aus den verschiedenen Werkstoffen hergestellt. Die Prüfdurchführung erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 9806:2018. Jedes Rohrmäander wurde mit Wasser und einem Fülldruck von 0,5 bar gefüllt und durchspült bis die Luft aus den Mäandern verdrängt war. Die Mäander wurden verschlossen und bei -20 °C eingefroren. Die Temperatur am Mäander für mindestens eine Stunde bei -20 °C gehalten. Anschließend erfolgte das Auftauen der Mäander bis mindestens + 10 °C. Der jeweilige Mäander wurde visuell begutachtet und es folgte ein weiterer Gefrierzyklus. Dieses wurde fortgeführt, bis sich an den Mäandern deutliche Veränderungen zeigten.

Es wurde Folgendes festgestellt:

- Das erste Register war nach zwei Einfrierzyklen an drei Stellen gebrochen. Die Aufdehnung des Rohraußendurchmessers lag bei 0,5%.
- Das zweite Register war nach zwei Einfrierzyklen an zwei Stellen gebrochen. Die Aufdehnung des Rohraußendurchmessers betrug 3,8%.
- Das dritte Register aus Edelstahl war nach drei Einfrierzyklen ohne Beschädigung. Aufdehnung des Rohraußendurchmessers wurde mit 8,8% bestimmt.

7.2.8 Innere Korrosionsbeständigkeit

Die Prüfung soll eine dauerhafte Beständigkeit gegenüber innerer Korrosion in Bezug auf die von Paradigma vorgegebene Wasserqualität und gegenüber sehr schlechter Wasserqualität nachweisen.

Für die Prüfung wurde der Kollektor mit Trinkwasser aus Dettenhausen, mit einem Salzgehalt von 0,5 g/l NaCl (ca. 1000 µS/cm) und natürlichem Sauerstoffgehalt gefüllt. Der Druck lag bei 6 bar.

Eine Gesamtprüfdauer von 500 Stunden oder bis zum Versagen der Register wurde angesetzt. Ein Zyklus innerhalb der Prüfung beträgt eine Dauer von 15 Minuten und der Zyklus wurde wie im Prüfplan festgelegt.

Vor dem Versuch wurden zur Temperaturerfassung an unterschiedlichen Stellen des Registers Temperaturfühler Typ K angebracht, und um eine Verformung oder Bewegung am Register zu erkennen, wurde das Registerbündel mit Umlaufmarkierungen versehen (siehe Abbildung 7-3).

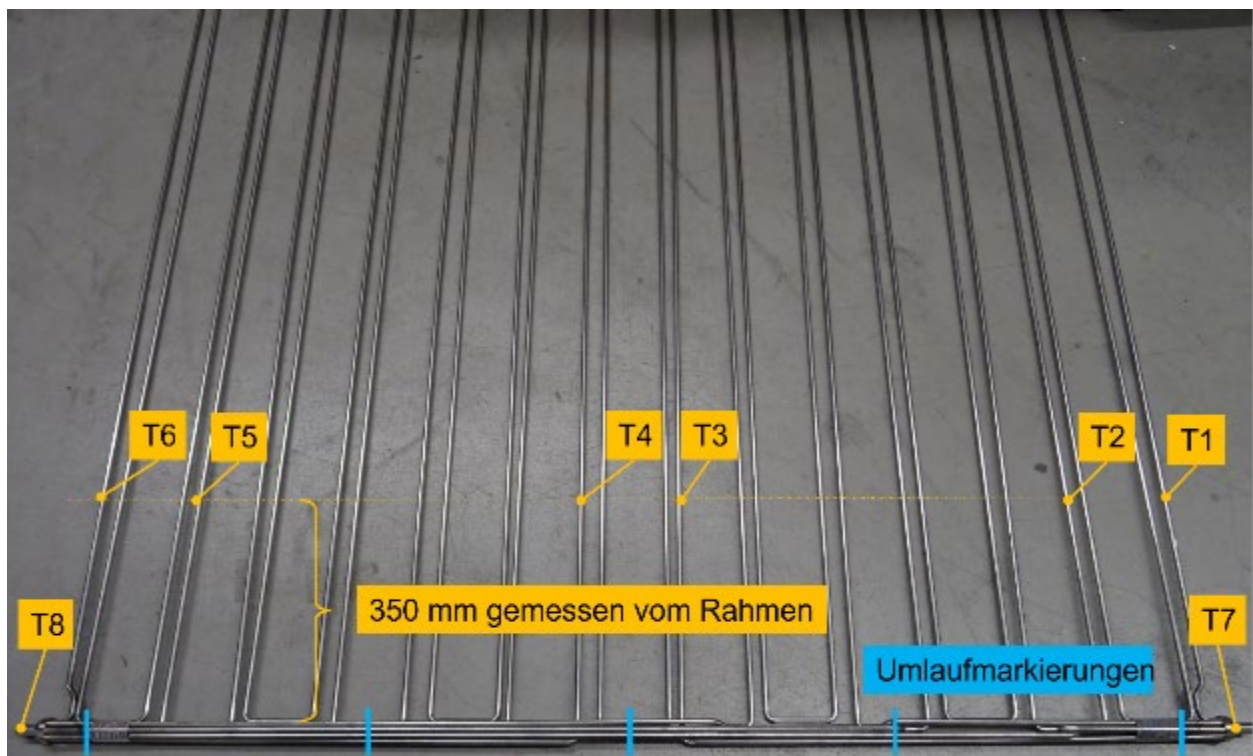


Abbildung 7-3 Position der Temperaturmessstellen (gelb) und der Umlaufmarkierungen (blau) am Testregister

Alle Zyklen wurden ohne Auffälligkeiten durchgeführt. Nach einer visuellen Prüfung des Registers konnten an den Umlaufmarkierungen keine Veränderungen festgestellt werden. Am Register waren auch keine undichten Stellen zu erkennen. Anschließend wurde eine Probe des Wassers entnommen und wieder analysiert.

Trommelanschlüsse und ausgewählte Mäanderbiegungen wurden an die Technische Universität Dresden zur Schliffbildanalyse verschickt. Das Ergebnis der Universität zeigte keine Korrosionserscheinungen auf.

Da kein Korrosionsangriff erkennbar war wurde der Versuch mit einem Leitwert von 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und kontinuierlich hohem Sauerstoffgehalt wiederholt. Ziel des Versuchs war es durch einen erzwungenen Korrosionsangriff die Schwachstelle des Registers zu finden. Hierbei wurde der Sauerstoffgehalt sowie pH und Leitwert regelmäßig erfasst und auf Niveau gehalten. Insgesamt wurden wiederum 1021 Verdampfungszyklen bei 6 bar durchgeführt. Eine Wasserprobe wurde vor und nach dem Versuch entnommen um pH, und Leitwert unabhängig zu verifizieren. Ein Schliffbildanalyse (Abbildung 7-4) der TU-Dresden zeigte nur einen sehr geringen und unkritischen Korrosionsangriff am Mäanderrohr, ohne die Lötstelle zu unterwandern. Insgesamt kann damit festgehalten werden, dass die Registerkonstruktion aus Edelstahl auch mit salzhaltiger Fahrweise (Leitwert: über 100 -1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$; Sauerstoffgehalt < 0,02 mg/l) betrieben werden kann, ohne Schaden zu nehmen.

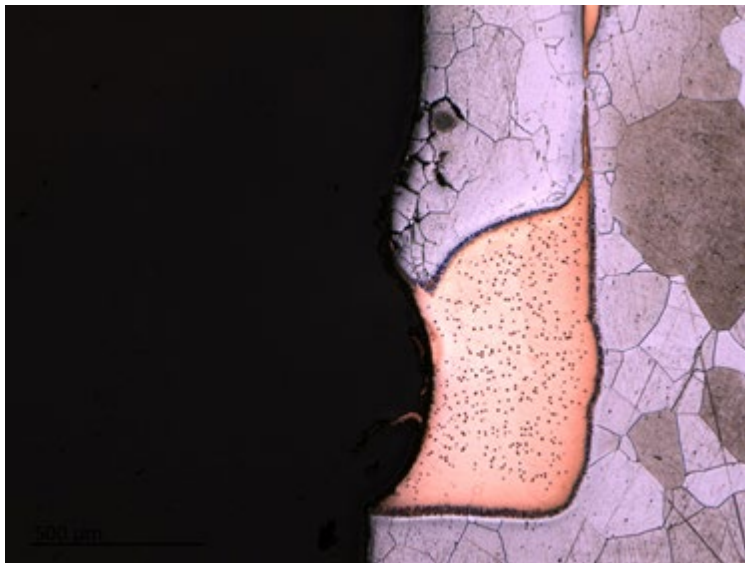


Abbildung 7-4 Schliffbild nach Versuch 3000 μ S/cm

7.2.9 Innere Korrosionsbeständigkeit Glykol

Die Überprüfung der Materialverträglichkeit gegen das glykolhaltige Frostschutzmittel TYFOCOR LS erfolgte beim Hersteller TYFO im Rahmen eines Autoklaventests. Für den Test wurden mehrere Proben Hersteller zur Verfügung gestellt.

Die Proben wurden beim Hersteller für die Prüfung gereinigt und über 7 Tage in einen Autoklav bei einer Dauertemperatur von 170°C und einem Druck von 6 bar mit dem Frostschutzmittel belastet.

Im Ergebnis wurde festgestellt, dass bei allen Proben ohne sichtbare Korrosionspuren und die Oberflächen nur leicht angelaufen waren. Die Gewichts differenzen lagen innerhalb des Grenzwertes von ± 2 mg. Die Prüflösung zeigte eine nur geringfügige und tolerierbare Veränderung.

7.2.10 Äußere Korrosionsbeständigkeit



Abbildung 7-5 Fotos vom Kollektor in der Outdoor-Exponierung

Als Versuchsstandort wurde das Expositionsfeld in Dettenhausen verwendet. Ein RoS-Register wurde in einen Kollektorrahmen inkl. Spiegelblechen montiert. 6 Röhren ohne Vakuum, davon 2 zersplittert, 2 nach unten gezogen, und 2 normal montiert. 4 Mäander -Rohre ohne Glasröhre davon 2 ohne Wärmeleitblech. Insgesamt wurden 14 Röhren montiert, Abbildung 7-5 zeigt den exponierten Kollektor. Der Kollektor wurde Outdoor auf 45° und ungefüllt aufgeständert exponiert.

Der Expositionsstart ist am 11.10.2022 erfolgt. Die Expositionszeit, seit dem Start, beträgt ungefähr 280 Tage. Bisher sind keine besonderen Ereignisse vorgekommen, am Kollektor traten keine Farbveränderungen auf.

7.2.11 Eignungsnachweis der Registermaterialien für den Einsatz im Druckgerät Kollektor

Der Kollektor als Produkt fällt durch die den gewählten maximalen Betriebsdruck von 24 bar in den Anwendungsbereich der europäischen Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU). Die technischen Voraussetzungen für die Druckgeräterichtlinie werden im Regelwerk AD2000 beschrieben. Für die eingesetzten Registermaterialien und Lote gibt es keine allgemeingültige Freigabe für die Verwendung als drucktragendes Bauteil bei der vorgesehenen maximalen Betriebstemperatur. Um die Einsatzfähigkeit für Druckgeräte „Kollektor“

nachzuweisen, erfolgt die Überprüfung der Materialien mit Zugversuchen bei einer festgelegten maximalen Betriebstemperatur von 350 °C für die Druckstufen PN16 und PN25.

Die Überprüfung der Einsatzfähigkeit soll in einem unabhängigen Prüfinstitut erfolgen, um die Einsatzfähigkeit vorab einzuschätzen, wurden die folgend beschriebenen Untersuchungen durchgeführt. In einem zweiten Schritt erfolgten Prüfungen in der unabhängigen Prüfstelle.

7.2.12 Interne Warmzugversuche

7.2.12.1 Prüfstand

Der Prüfstand für die Zugversuche besteht aus der Materialprüfmaschine MPZ-10k-X700 sowie einem Probenofen zur Erwärmung der Proben für die Warmauszugversuche. In Abbildung 7-6 ist links die Materialprüfmaschine und rechts der Probenofen gezeigt.



Abbildung 7-6 Materialprüfmaschine (links) mit Probenofen (rechts)

Die auftretenden Kräfte werden von der Lastzelle der Materialprüfmaschine gemessen und mit Hilfe einer Software erfasst und ausgewertet. Bei den Warmauszugversuchen wird die Temperatur der Heizelemente sowie im Innern der Probe gemessen.

7.2.12.1.1 Materialprüfmaschine

Die Zugversuche werden mit folgender Materialprüfmaschine durchgeführt:

Hersteller	LUDWIG mpk
Typ	MPZ-10k-X700
Max. Kraft	10 kN
Max. Geschwindigkeit	600 mm/min
Min. Geschwindigkeit	1 mm/min
Verfahrweg	700 mm
Lichte Weite	400 mm

7.2.12.1.2 Probenofen

Der Probenofen besteht aus zwei Keramik-Heizelementen mit einer Leistung von jeweils 500 Watt. Die Temperatur der Heizelemente wird mit einem Temperaturregler über einen Typ K Temperaturfühler im Heizelement geregelt. Mit einem weiteren Temperaturfühler des Typ K und dem Messgerät Almeno 2590 wird im Inneren der Probe die Temperatur gemessen. Dafür wird der Temperaturfühler wie in Abbildung 7-7 gezeigt durch die Probenfassung in die Mitte der Probe geführt.

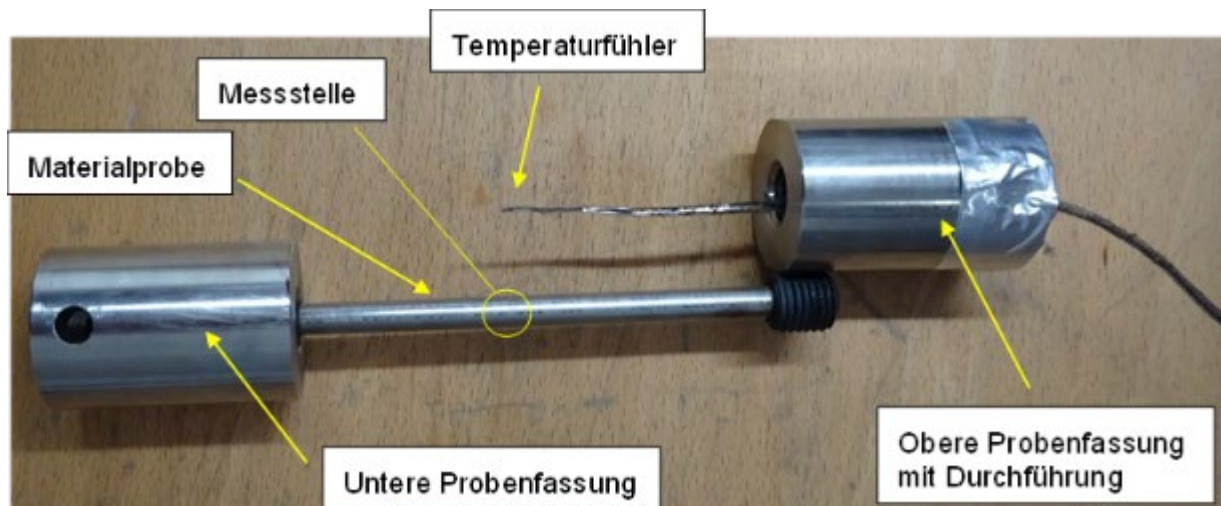


Abbildung 7-7 Anordnung des Temperaturfühlers im Inneren der Probe

Abbildung 7-8 zeigt den aufgeklappten Probenofen mit den Keramik-Heizelementen (1), einer eingesetzten Probe (2) in dessen Inneren die Temperatur mit dem Temperaturfühler (5) gemessen wird. Des Weiteren ist das wärmegeämmte Gehäuse (3) sowie das Hitzeschutzblech (4) zum Schutz der Lastzelle (6) abgebildet.



Abbildung 7-8 Aufgeklappter Probenofen mit Heizelementen (1), Probe und Temperaturmessstelle (2), wärmege-dämmtes Gehäuse (3), Hitzeschutzblech (4), Temperaturfühler (5), Lastzelle (6)

7.2.12.2 Materialproben

Für die Messungen werden aus den angelieferten Materialien Proben für die Beurteilung erstellt. Die Abbildung 7-9 zeigt die die Probenform für das Registermaterial (links) sowie die Probenform zur Überprüfung vom Lot und der Lötstelle (rechts). Die Proben mit Lötstellen wurden auch induktiv gelötet, das Lötregime orientierte sich dabei Lötregime vom Trommelanschluss. Um temperaturbedingte Vorschädigungen an den Proben zu vermeiden erfolgten händische Anpassungen der Lötzeiten.

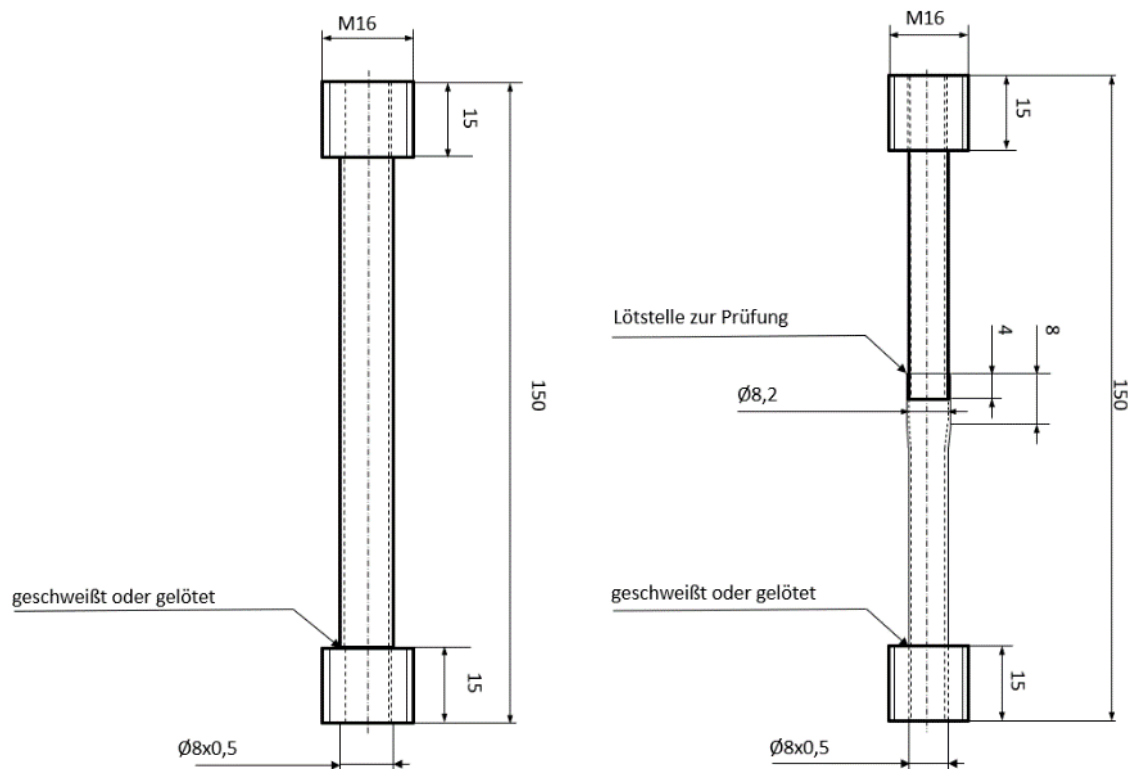


Abbildung 7-9 Skizzen der Proben für die Zugversuche, Probe für Registermaterial (links), Probe für Lotmaterial und Lötung (rechts)

7.2.12.3 Versuchsablauf

Zur Bestimmung der Materialkennwerte werden Zugversuch-Reihen bei Raumtemperatur und bei 350 °C durchgeführt. Die Zugversuche werden in Anlehnung an die DIN EN ISO 6892ff Metallische Werkstoffe – Zugversuch durchgeführt. Von jeder Probe werden für jeweils drei Exemplare bei Raumtemperatur und drei Exemplare bei 350 °C die Materialkennwerte ermittelt und anschließend gemittelt. Die Zuggeschwindigkeit u_z ist abhängig von der ungedehnten Probenlänge $l_0=120$ mm und wird nach untenstehender Formel berechnet.

$$u_z = 0,001 \frac{1}{s} \cdot l_0 = 7,2 \frac{mm}{min}$$

mit:

u_z	Zuggeschwindigkeit in mm/min
l_0	Ungedehnte Probenlänge in mm

Bei den Warmauszugversuchen wird die Probe vor dem eigentlichen Zugversuch für 5 Minuten bei 350 °C gehalten, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung in der Probe zu gewährleisten.

7.2.12.4 Ergebnisse der Versuche

7.2.12.4.1 Versuchsergebnisse Rohrmaterial ohne Lötstelle

Die ermittelten Materialkennwerte der Zugversuche aus dem Registermaterial Edelstahl ohne Lötstelle bei 350 °C sind in Tabelle 7-2 eingetragen. Abbildung 7-10 zeigt das dazugehörige Spannung-Dehnungs-Diagramm.

Tabelle 7-2 *Ermittelte Materialkennwerte der Proben aus Edelstahl ohne Lötstellen bei 350 °C*

	Probe 1(1)	Probe 1(2)	Probe 1(3)	Mittelwerte
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	395	400	380	392
R_m [N/mm ²]	470	460	450	460

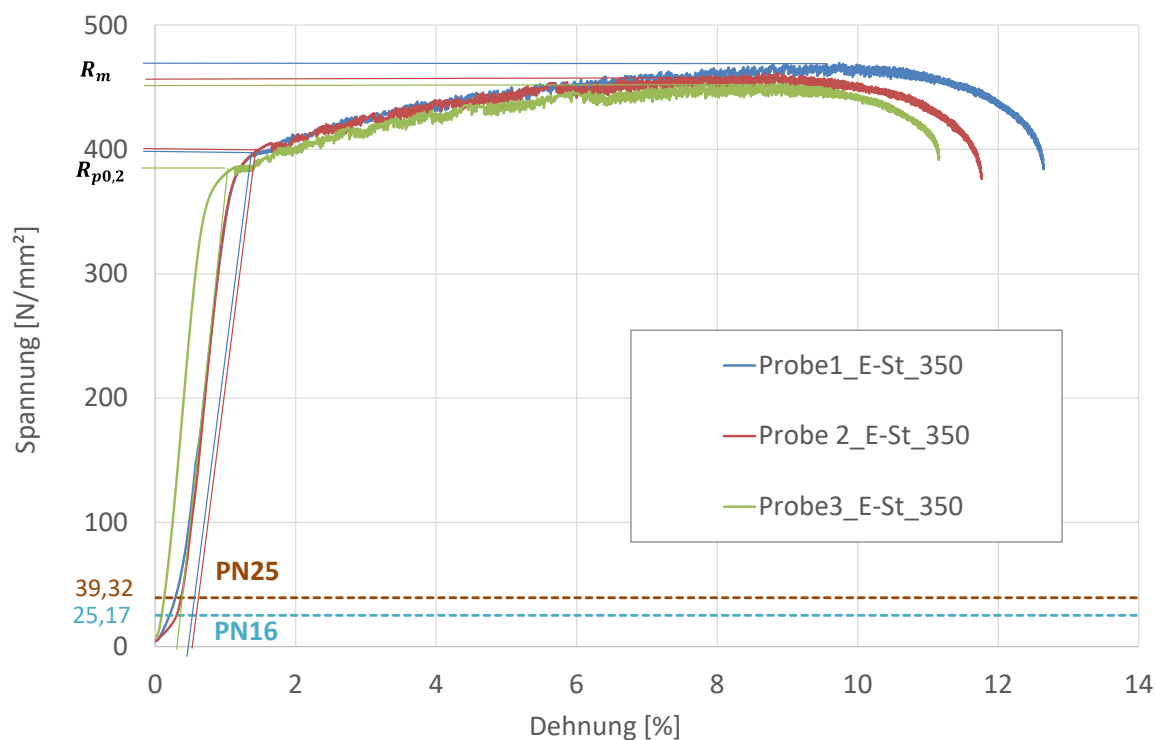


Abbildung 7-10 Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben aus Edelstahl bei 350 °C

7.2.12.4.2 Versuchsergebnisse Rohr mit Lötstelle

Die ermittelten Materialkennwerte aus den Zugversuchen bei Raumtemperatur mit den 3 gelöteten, sind in

Tabelle 7-3 eingetragen. Abbildung 7-11 zeigt das dazugehörige Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Das Versagen der Proben erfolgte in keinem Fall an der Lötstelle, sondern außerhalb der Wärmeeinflussbereichs der Lötung, daher erfolgt die Ermittlung der Materialkennwerte für das Rohrmaterial.

Tabelle 7-3 Ermittelte Materialkennwerte der gelöteten Proben bei 350 °C

	Probe 3(1)	Probe 3(2)	Probe 3(3)	Mittelwerte
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	289	288	280	286
R_m [N/mm ²]	448	441	439	443

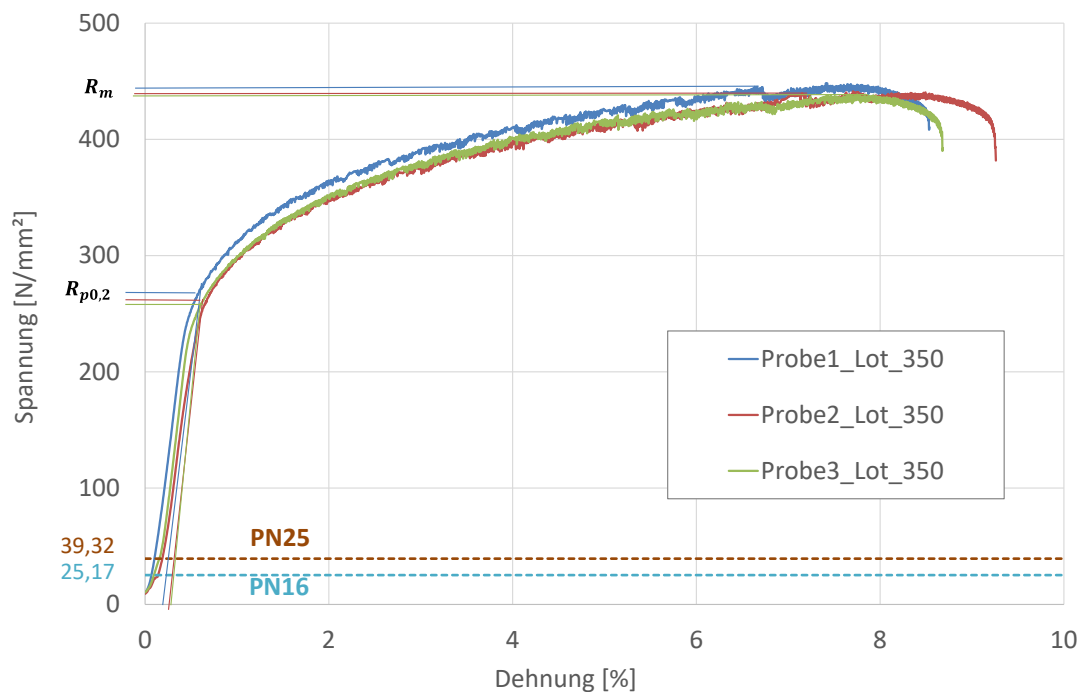


Abbildung 7-11 Spannung-Dehnungs-Diagramm der Proben mit Lot bei 350 °C

7.2.13 Externe Prüfungen der Warmzugfestigkeit

In einer externen Prüfstelle soll eine unabhängige Prüfung der Warmzugfestigkeit erfolgen. Ziel ist es, mit diesen Prüfungen eine Einzelzulassung für die verwendeten Werkstoffe für den Einsatz im Bereich von Druckgeräten zu erwirken. Geprüft werden sollen, jeweils 3 Proben Rohrmaterial D_{KK} mit einer Wandstärke von 0,5 mm, sowie 3 weitere Proben aus demselben Material mit einer Lötstelle. Die Proben entsprechen der Abbildung 7-9 in Abschnitt 7.2.12.2. Die Zugversuche sollen entsprechend den Normen DIN EN ISO 6892-2 sowie DIN EN ISO 4136 bei einer Temperatur von 350 °C durchgeführt werden.

Tabelle 7-4 zeigt die Ergebnisse für die 3 Proben, die ausschließlich aus dem Rohmaterial bestehen.

Tabelle 7-4 Ergebnisse der Warmzugversuche an 3 Proben aus Edelstahl ohne Lötung

Probennr.	$R_p 0,2/1,0$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
1	306 / 349	418	12,5
2	301 / 338	406	13,0
3	302 / 336	405	11,0

Tabelle 7-5 zeigt die Ergebnisse für die 3 Proben aus dem Rohrmaterial mit Lötstelle.

Tabelle 7-5 Ergebnisse der Warmzugversuche an 3 Proben mit Lötstelle

Probennr.	R_p 0,2/1,0 [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
1	---	397	---
2	---	398	---
3	---	399	---

Die Prüfung kann im Sinne der Druckgeräterichtlinie positiv bewertet werden.

7.2.14 Prüfungen der Berstdruckfestigkeit externen Prüfstelle

Durch eine unabhängige Prüfstelle erfolgte eine sogenannte Berstdruckprüfung. Hierzu wird ein beispielhaftes Register, in diesem Fall Register 15/14 RoS, mit Wasser bis zu dem maximal möglichen Überdruck gefüllt.

Es wurden zwei Prüfabschnitte durchgeführt. Beim ersten Versuch konnte ein maximaler Druck von 286 bar aufgebracht werden, dann versagte die vom TÜV angebrachte Klemmringverschraubung. Für einen zweiten Versuch wurde Klemmringverschraubung erneut installiert und mit höherem Kraftaufwand montiert. Hierbei konnte ein maximaler Druck von 343 bar erreicht werden. In keinem Fall traten Beschädigungen oder Verformungen am geprüften Register auf.

Daher kann die Prüfung im Sinne der Druckgeräterichtlinie positiv bewertet werden.

7.3 Externe Leistungsprüfung nach DIN EN ISO 9806

Nach Herstellung der ersten Kollektoren in einem serienreifen Zustand, erfolgte die Beauftragung eines externen Prüflabors für die Überprüfung der Anforderungen nach DIN EN ISO 9806. Für die Prüfungen wurden insgesamt 4 Kollektoren dem Prüfinstitut zur Verfügung gestellt, zwei Kollektoren mit der kleinsten Bruttofläche (AQUA PLASMA 15/27 RoS) sowie zwei Kollektoren mit der größten Bruttofläche (AQUA PLASMA 19/50 RoS).

Entsprechend dem Angebot sollten die folgenden Messungen entsprechend der DIN EN ISO 9806 durchgeführt werden:

- Prüfungen der Wärmeleistung am kleinsten sowie am größten Kollektor
- Prüfung der Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit an einem Kollektor

In der folgenden Tabelle 7-6 werden die Prüfergebnisse der Prüfungen auf Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit der Kollektoren AQUA PLASMA AZ 19/50 (mit RmS-Register) aus dem Prüfbericht Nr. 11COL1007Q/4 mit Datum vom 15.12.2014 mit den Ergebnissen des Kollektors AQUA PLASMA 19/50 (mit RoS-Register), Bericht Nr. 21COL1624Q mit Datum vom 22.09.2022 verglichen. Dabei ist zu beachten, dass die Prüfungen auf Grundlage von unterschiedlichen Normen durchgeführt wurden. Die Messungen am AQUA PLASMA AZ 19/50 RmS wurden auf Grundlage von EN 12975.2:2006 sowie ISO 9806:2013 durchgeführt. Die neuen Messergebnisse erfolgten nach EN ISO9806:207 und EN 12975-1:2006+A1:2000. Die Anforderungen, die Durchführung und die Bewertung können sich daher in Details unterscheiden.

Tabelle 7-6 Vergleich der Prüfungsergebnisse für Qualität und Zuverlässigkeit von den Kollektoren mit RmS-Register und RoS-Register

Prüfung	Ergebnis AQUA PLASMA AZ 19/50 RmS	Ergebnis AQUA PLASMA 19/50 RoS
Innendruckprüfung an Wärmeträgerkanälen	Prüfdruck: 15 bar; Prüfdauer: 15 min; Ergebnis: bestanden	Prüfdruck: 15,01 zwischen 15,05 bar; Prüfdauer: 20 min; Ergebnis: bestanden
Bestimmung der Stagnationstemperatur	$\vartheta_{\text{stg}} = 338 \text{ °C}$	$\vartheta_{\text{stg}} = 327 \text{ °C}$
Expositionsprüfung	Ergebnis: bestanden	Ergebnis: bestanden
Vor-Bewitterung	-	Ergebnis: bestanden
Prüfung des schnellen äußeren Temperaturwechsels	Prüfung: keine Schäden Prüfung: keine Schäden	Prüfung: keine Schäden Prüfung: keine Schäden
Prüfung des schnellen inneren Temperaturwechsels	Prüfung: keine Schäden Prüfung: keine Schäden	Prüfung: keine Schäden Prüfung: keine Schäden
Prüfung auf eingedrungenes Regenwasser	Ergebnis: bestanden	Ergebnis: bestanden
Mechanische Belastungsprüfung mit Überdruck	Luftdruck mit max. Druckbelastung: 1000 Pa	Luftdruck mit max. Druckbelastung: 3000 Pa
Mechanische Belastungsprüfung mit Unterdruck	nicht geprüft	Luftdruck mit max. Zugbelastung: 3000 Pa
Prüfung auf Schlagfestigkeit mit Eiskugeln	Durchmesser: 35 mm Geschwindigkeit Kugeln: 28 m/s Masse: 20,8 g Anzahl Schläge: 4 Ergebnis: bestanden	Durchmesser: 35 mm Geschwindigkeit Kugeln: 27 m/s Masse: 20,7 g Anzahl Schläge: 4 Ergebnis: bestanden
Endkontrolle	Keine Beanstandungen	Keine Beanstandungen

Für die Leistungsprüfungen wurde ein Kollektor mit der kleinsten Bruttofläche (AQUA PLASMA 15/27 RoS) sowie ein weiterer Kollektor mit der größten Bruttofläche (AQUA PLASMA 19/50 RoS) entsprechend der Vorgaben aus DIN EN ISO 9806 der Prüfung zugeführt.

Entsprechend der Regeln aus DIN EN ISO 9806 erfolgte eine sogenannte Familienprüfung der Kollektoren, dabei werden die Prüfungen an beiden Kollektoren durchgeführt, aber nur die Prüfergebnisse vom kleineren Kollektor dokumentiert. In Tabelle 7-7 sind die wichtigsten Kollektorparameter im Vergleich zueinander aufgelistet. Der Wirkungsgrad $\eta_{0,b}$ liegt mit 0,576 etwas unterhalb des bisherigen Wirkungsgrad, allerdings liegt der Wärmeverlustkoeffizient a_1 mit 0,47 W/m²K günstiger.

Tabelle 7-7 Vergleich der Kollektorparameter RmS zu RoS

	Einheit	AQUA PLASMA RmS	AQUA PLASMA RoS
$\eta_{0,b}$	-	0,611	0,576
a_1	W/(m ² K)	0,54	0,47
a_2	W/(m ² K ²)	0,003	0,003
a_5	J/(m ² K)	8780	13340
K_d	-	0,949	1,12

Daten AQUA PLASMA konvertiert entsprechend Scheme Rules

- Basis Prüfkollektor AQUA PLASMA 19/17
- Prüfbericht Nr. 21COL1623 vom 22.09.2022

Entscheidend sind allerdings nicht die Leistungsdaten die direkt aus den Kollektor-Kennwerten berechnet werden, viel wichtiger sind die berechneten jährlichen Erträge der Kollektoren. In Abbildung 7-12 sind für den Standort Würzburg die berechneten jährlichen Wärmeerträge für die AQUA PLASMA-Kollektoren in den Varianten RmS und RoS miteinander zum Vergleich aufgeführt. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die RoS-Kollektoren im Ertrag immer oberhalb der entsprechenden RmS-Varianten liegen. Im Mittel über alle Kollektorgößen liegt die jeweilige Differenz für eine mittlere Temperatur von 25 °C bei 2,38 %, für eine Temperatur von 50 °C bei 3,11 % und bei 75 °C bei 3,53 %.

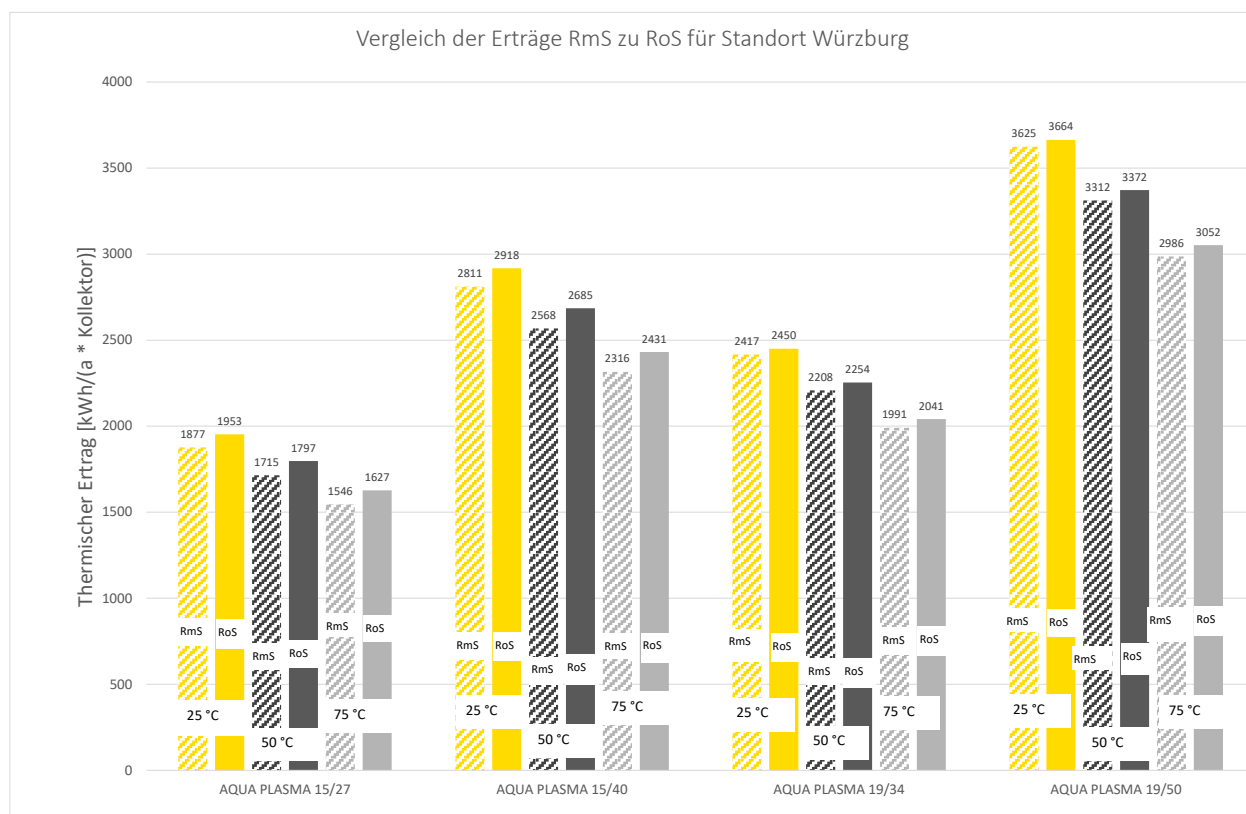


Abbildung 7-12 Gegenüberstellung der jährlichen Wärmeerträge der AQUA PLASMA-Kollektoren im Vergleich RmS zu RoS, für den Standort Würzburg für die mittleren Temperaturen 25°C, 50°C und 75°C.

7.4 Druckverlustbestimmung am Laborprüfstand (GEVV)

7.4.1 Ziel der Prüfung und wichtige Randbedingungen

Die tatsächlich erreichbare Senkung des Kollektordruckverlustes durch Übergang zum Registerkonzept ohne Sammler RoS gilt es in Laborexperimenten nachzuweisen. Das Ziel der Laborprüfung ist folgerichtig die Feststellung des Gesamtdruckverlustes Δp_{ges} des jeweiligen Prüflings in einem den praktischen Erfordernissen entsprechenden Volumenstrombereich $\dot{V}$. Der Test erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 9806:2018 heißt:

- ohne Wärmezufuhr im Bereich des Prüflings selbst, jedoch
- abweichend nicht bei $\vartheta = 20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$, sondern für die im praktischen Solarthermie-Einsatz relevanten Temperaturen am Prüflingseintritt von $\vartheta = 35\text{ °C}$ und $\vartheta = 90\text{ °C}$ mit einer Regelgüte von $\pm 2\text{ K}$.

Die besondere Herausforderung besteht in der großen Bandbreite des zu realisierenden Volumenstrombereichs entsprechend der Geschwindigkeitsbandbreite. In Analogie zur Simulationsstudie in Abschnitt 2.1 ergibt sich aus der Prüfung von Einzelelementen $0,2\text{ m}^3/\text{h}$ als minimaler Wert. Die größten Kollektorprüflinge erfordern bei der höchsten Prüfgeschwindigkeit $43\text{ m}^3/\text{h}$ (bezogen auf 20 °C)

Der statische Überdruck des Mediums im Prüfling wird mit $p_{\text{stat}} = 3 \dots 4\text{ bar}$ gewählt. Abweichungen von $\pm 0,5\text{ bar}$ waren bisher die Praxis und werden dabei wegen des sehr geringen Einflusses des Druckes auf die Stoffwerte im Temperaturbereich der Prüfung toleriert.

Als Füllwasser und Wärmeträgermedium wird salzarmes Wasser (zentrale Enthärtung und Umkehrosmose im ZET) mit folgenden hinreichend stabilen physikalisch-chemischen Kennwerten verwendet:

- pH-Wert: ca. 7,0 ... 7,5
- Leitfähigkeit: 50,0 ... 80,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Nach Einbau der jeweiligen Prüflinge wird die Anlage gründlich gespült und mit einem Unterdruckentgaser das Wärmeträgermedium entgast. Aus Versuchsreihen mit dem eingesetzten Entgaser ist bekannt, dass folgende Restgasgehalte erreicht werden:

- O_2/Ar : 0,1 ... 0,5 mg/kg
- N_2 : 0,5 ... 1,0 mg/kg
- kein CH_4 , H_2 und CO

7.4.2 Aufbau des Prüfstandes

Das R&I-Schema in Abbildung 7-13 zeigt schematisch den aktuellen Aufbau des Kollektorprüfstandes im Endausbau.

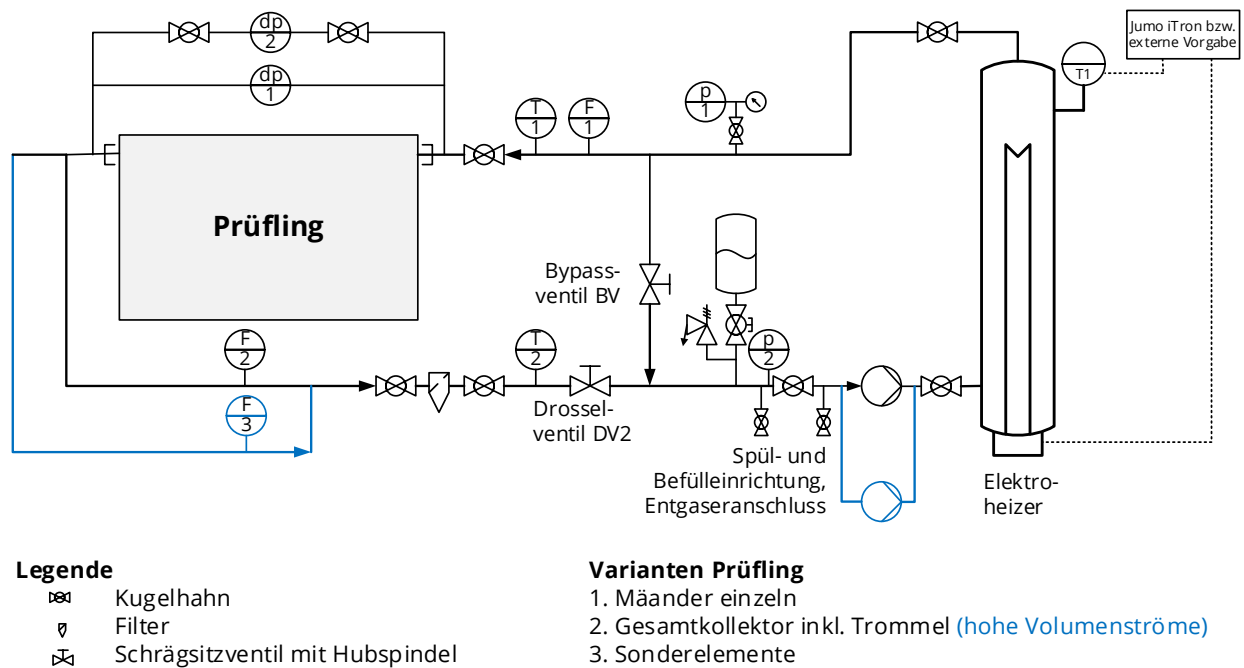


Abbildung 7-13 R&I-Schema Druckverlustprüfstand TUD-GEWV, Stand Juni 2023

7.4.3 Messdatenerfassung und –aufbereitung, Sensorik

Die Messdatenerfassung erfolgt mit dem bewährten Datenlogger ALMEMO® 2890-9 des Herstellers AHL-BORN. Die so erfassten Daten werden in MS Excel visuell und mathematisch-statistisch aufbereitet. Sämtliche in den einzelnen Versuchsfahrten erhobenen Rohdaten werden separat gespeichert. Tabelle 7-8 stellt die verwendeten Sensoren zusammen.

Tabelle 7-8 Übersicht Sensorik Druckverlust-Prüfstand

Messgröße	Bez.	Hersteller	Typ	Kl.	Messbereich	Fehler	Anschluss	Bemerkung
Druck	p1	Keller	piezoresistiver Druckaufnehmer, PR-23S/80549.55	-	(0 ... 9) bar, Überdruck	$\pm 0,2 \% MEW$ (typisch) relativer Messfehler: $f_r = \pm \frac{0,2 \% \cdot MEW}{MW}$	G ½"	kalibriert
Druck	p2	WIKA	Rohrfedermanometer, 111.12, Standard	2,5	(0 ... 16) bar, Überdruck	Eigenabweichung: 2,5 % MEW relativer Messfehler: $f_r = \pm \frac{2,5 \% \cdot MEW}{MW}$	G ¼" B	werkskalibriert
Differenzdruck	dp1	Afriso	piezoresistiver Differenzdruckaufnehmer, DeltaFox DMU 11 D	-	(0 ... 0,6) bar	$\leq \pm 1 \% FSO$ (Spanne) Spanne hier = MEW: $f_r = \pm \frac{1 \% \cdot MEW}{MW}$	G ½" B	kalibriert
Differenzdruck	dp2	ICS Schneider Mess-technik GmbH	piezoresistiver Differenzdruckaufnehmer, IDPT100	-	(0...175) mbar	$\pm 0,1 \% FSO$ (Spanne) (hier auch MEW) $f_r = \pm \frac{0,1 \% \cdot MEW}{MW}$	¼"-18 NPT F	werkskalibriert
Temperatur	T1	Electronic Sensor GmbH, Heilbronn	Mantel-Widerstandsthermometer PT100, Ø 1,50 mm	A	(-50 ... + 400) °C	$d\vartheta = \pm (0,15 \text{ °C} + 0,002 \cdot \vartheta)$ ϑ ... Messwert in °C	Klemmring	kalibriert, 4-Leiter-Anschluss
Temperatur	T2	Electronic Sensor GmbH, Heilbronn	Mantel-Widerstandsthermometer PT100, Ø 1,50 mm	A	(-50 ... + 400) °C	$d\vartheta = \pm (0,15 \text{ °C} + 0,002 \cdot \vartheta)$ ϑ ... Messwert in °C	Klemmring	kalibriert, 4-Leiter-Anschluss

Messgröße	Bez.	Hersteller	Typ	Kl.	Messbereich	Fehler	Anschluss	Bemerkung
Volumenstrom	F1/ F2	ifm electronic GmbH, Essen	MID, SM 6100,	-	(0 ... 25) L/min	$d\dot{V} = \pm (0,8 \% \cdot MW + 0,5 \% \cdot MEW)$ <i>MW</i> ... Messwert in L/min <i>MEW</i> ... Messbereichs – endwert in L/min	G ½“, flachdich- tend	werkskalib- riert
Volumenstrom	F3	ifm electronic GmbH, Essen	MID, SM 7120,	-	(0,1 ... 75) L/min	$d\dot{V} = \pm (0,8 \% \cdot MW + 0,5 \% \cdot MEW)$ <i>MW</i> ... Messwert in L/min <i>MEW</i> ... Messbereichs – endwert in L/min	G ¾“, flachdich- tend	werkskalib- riert

7.4.4 . Prüfablauf, Prüflinge, Ergebnisse

7.4.4.1 Prüfablauf und -umfang

In Tabelle 7-9 ist der Ablauf der Prüfprozedur zur Druckverlustbestimmung zusammengestellt.

Tabelle 7-9 Prüfprozedur Druckverlustbestimmung

Version 2.0			
Es wird das vorbereitete Protokoll geführt!			
			Einhängen des Prüflings in den Träger
			Herstellen der hydraulischen Verbindungen von Rück- und Vorlauf und ggf. Wärmedämmung anbringen
			Füllen/ Spülen des Prüfkreislaufes mit salzarmem Wasser, anschließende Entgasung
			MAG-Einstellung prüfen Vordruck: 0,7 bar
			Systemdruck p_{stat} einstellen auf: 3,5 ... 4 bar
			Kontrolle aller Messwerte im Stillstand auf Plausibilität
			ggf. Ursache unplausibler Messwerte nachgehen und abstellen
			Bypassventil moderat öffnen (Stufe 1... 2)
			Drosselventil voll öffnen
			Pumpe im Prüfkreis einschalten und kleinste Leistungsstufe einstellen
			Heizung einschalten und Prüfstand auf Prüftemperatur auf und durchheizen (Handregelung)
			Beobachten und Nachregulieren der angestrebten Heizleistung über die gesamte Messfahrt. (Hinweis: Potentiometereinstellungen unter 0,2 Einheiten bewirken kein „Heizen“ äußere Einflüsse wie offene Türen, Zugluft haben Einfluss auf die Fluid-Temperatur. Störeinflüsse minimieren.
			Einstellen der Temperatur ϑ_1 (es wird mit der niedrigsten Temperatur begonnen)
			Einstellen des kleinsten Gesamtvolumenstromes für den Prüfling auf Volumenstrom $\dot{V}_x$
			Anpassen der Pumpenleistung, bis Volumenstrom $\dot{V}_x$ fast erreicht
			Feinregulierung des Volumenstroms $\dot{V}_x$ mittels Bypassventil (um Stufe 1)
			Wenn bei kleinen Volumenstrom $\dot{V}_x$ der Bypass voll offen (Stufe 7), Einregulieren über das Drosselventile
			ggf. Nachjustieren des Systemdruckes p_{stat}
			Abwarten quasistationären Zustandes, insbesondere $\vartheta_y = \text{konst.}$ und $\dot{V}_x = \text{konst.}$ Kein Auskoppeln des kleinen Differenzdrucksensors mehr (überlastsicher)
			Start der Messdatenaufzeichnung - am AHLBORN-Messsystem
			Messfahrt über 5 ... 10 min im quasistationären Zustand
			Abbruchkriterien bzgl. Δp_{ges} , $\Delta \vartheta$ und $\Delta \dot{V}$ definieren!
			- $\Delta p_{\text{ges}} = \pm 0,5 \text{ mbar}$
			- $\Delta \vartheta = \pm 2,0 \text{ K}^b$
			- $\Delta \dot{V} = \pm 0,1 \dots 0,26 \frac{\text{L}}{\text{min}}^c$
			ggf. Wiederholung der Messfahrt, erfülltes Abbruchkriterium notieren
			Stopp der Messdatenaufzeichnung

^b Abbruchkriterium bezieht sich auf die Schwankung der Temperatur T1 am Eintritt in den Prüfling. Wärmeverluste über den Prüfling – insbesondere bei den höheren Prüftemperaturen - sind in Abstimmung mit REUT kein Abbruchkriterium. Ebenso wird auf eine aufwändige Dämmung der Einzelprüflinge verzichtet.

^c siehe Übersicht Sensorik

		nächsthöhere Gesamtvolumenströme $\dot{V}_{x+1} \dots \dot{V}_n$ bei gleicher Temperatur ϑ_y einstellen, bis alle Volumenströme gefahren sind.
		Einstellen der nächsthöheren Temperatur auf Temperatur ϑ_2 und Wiederholung der Prozedur, bis alle Temperaturen $\vartheta_1 \dots \vartheta_n$ gefahren sind
		Ende der Messfahrt
		Inspektion des Filters
		ggf. Separation des Filterkuchens
		ggf. Ersetzen des Vlieseinlegers, wenn verwendet
		Sicherung der Messdaten von AHLBORN-Messsystem
		ggf. definiertes Auskühlen des Prüfkreislaufs mit eingeschalteter Kreislaufpumpe
		ggf. Ablassen des Systemdruckes
		ggf. Entleeren des Prüfkreislaufs
		ggf. Trennen der hydraulischen Verbindungen von Rück- und Vorlauf
		ggf. Aushängen des Prüflings aus dem Träger
		Das Protokoll wird geschlossen!

Der zur Verfügung stehende Kollektor des Typs Ritter XL 19/49 (im Weiteren K1) dient als Referenz und zum Nachweis der mit der HYDRA RoS-Gesamtentwicklung erreichten Veränderung der Druckverluste. Insgesamt wurden sieben Prüflinge K1 bis K7 untersucht. Exemplarisch werden folgend die Ergebnisse für den XL 19/49 RoS als Prüfling K3 diskutiert.

Zusätzlich waren für den Entwicklungsprozess Sonderprüflinge (R1 bis R4) von Interesse, für die ζ^* -Werte im Sinne einer Veränderung gegenüber dem geraden Rohr zu bestimmen waren.

7.4.4.2 Beispiele für Kollektorprüflinge (K1 und K3)

Technische Daten K1



Hersteller: RITTER
Energie- und Umwelttechnik GmbH
Typ: Kollektor XL 19/49 ohne Spiegel
als Prüflingstyp K1

Artikelnummer: 08-4043
Bruttofläche: 4,94 m²
Länge
in Röhrenachse: 2,033 m
Breite: 2,432 m
Gewicht: 77,0 kg

Abbildung 7-14 Prüfling K1

Zweck des Prüflings K1

Die Messfahrt mit **Prüfling K1** (Standard-Kollektor, Abbildung 7-14) dient der Bemessung des Prüflingsträgers und dem Test der Systemkomponenten und der Messtechnik. Außerdem wird mit dieser Prüfreihe der Gesamtaufbau beurteilt und die Kontrolle der Funktion des Prüfstandes im Vergleich zu eigenen Messungen bei REUT sowie als Referenz für den Entwicklungsprozess des neuen Kollektors mit Register ohne Sammler vorgenommen. Für den Prüfling K1 konnten die durch Vermessungen bei REUT bekannten Werte zum Gesamtdruckverlust im Betrieb bei verschiedenen Volumenströmen und Temperaturen auf dem Prüfstand verifiziert werden.

Technische Daten K3



Hersteller:	RITTER Energie- und Umwelttechnik GmbH
Typ:	Prototyp RoS als Prüflingstyp K3 (19/21)
Anzahl Mäander:	3-fach, 7 parallel
äußere Abmessungen Breite x Länge (bzgl. Trommelachse):	2 440 mm x 1 900 mm
Anzahl Röhren:	21

Abbildung 7-15 Prüfling K3

Zweck des Prüflings K3

Die Vermessung des Prüflings K3 dient der Ermittlung des Gesamtdruckverlustes Δp_{ges} des Kollektor-Prototyps *Register ohne Sammelrohr* (XL 19/21 RoS) und dem Vergleich mit Prüfling K1. Eine möglichst große Differenz zwischen den Druckdifferenzen am gleichen Betriebspunkt ist das erklärte Ziel dieses Forschungsvorhabens. Der geringere Druckverlust des Kollektors RoS ermöglicht eine größere Zahl von in Reihe geschalteten Kollektoren dieser Art bei gleichem Druckverlust.

7.4.4.3 Bestimmung von prüflingsspezifischen Druckverlustbeiwerten (ζ -Werte)

Die Grundlagen zur Ermittlung des Druckverlustbeiwertes ζ eines Bauteils erfolgt über die Bestimmung des Gesamtdruckverlustes Δp_{ges} eines definierten Massestroms $\dot{m}$ durch dieses Bauteil. Wird ein Messgerät zur Bestimmung des Volumenstroms $\dot{V}$ verwendet, so ist außerdem die Dichte des Fluides $\rho(\vartheta_m)$ und die Temperatur an der Messstelle zu bestimmen.

Druckverlustbeiwerte werden für ganze Bauteile oder Baugruppen oder auch nur für einzelne Form- und/oder Richtungsänderungen von Strömungen bestimmt, im weiteren Prüfling genannt.

Es werden die in Tabelle 7-8 zusammengestellten Messwert benötigt. Für die Oberflächen-Rohrrauigkeit k wird auf den durch TUDD-FF bestimmten Wertebereich zurückgegriffen.

Tabelle 7-10 Zusammenstellung der Messgrößen mit Erwartungsbereich, Messgerät und Messfehlerberechnung

Parameter (physikal. Größe)	Formelzeichen und Einheit		Erwartungs- werte	Messgerät	Messfehler (absolut, relativ)
Volumenstrom	$\dot{V}$	L/min	0 ... 17,0	MID, SM 6100	$d\dot{V}$ $= \pm (0,8 \% \cdot MW$ $+ 0,5 \% \cdot 20,0 \text{ L/min})$
			0 ... 45,0	MID, SM 7120	$d\dot{V} = \pm (0,8 \% \cdot MW$ $+ 0,5 \% \cdot 75 \text{ L/min})$
Vorlauftemperatur	ϑ_{VL}	°C	35, 50, 75, 90	Mantel-Widerstands- thermometer PT100 Kl. A, Durch- messer 1,60 mm	$d\vartheta$ $= \pm (0,15 \text{ °C}$ $+ 0,002 \cdot \vartheta)$
Rücklauftemperatur	ϑ_{RL}	°C	35, 50, 75, 90	Mantel-Widerstands- thermometer PT100 Kl. A, Durch- messer 1,60 mm	$d\vartheta$ $= \pm (0,15 \text{ °C}$ $+ 0,002 \cdot \vartheta)$
Gesamtdruck	p_{ges}	bar	3 ... 5	piezoresistiver Druck- aufnehmer, PR-23S/ 80549.55	$f_r = \pm \frac{0,2 \% \cdot 9 \text{ bar}}{MW}$
Differenzdruck über dem Prüfling	$\Delta p_{ges,1}$	mbar	0 ... 175	piezoresistiver Diffe- renzdruck-aufnehmer, IDPT100	f_r $= \pm \frac{0,1 \% \cdot 0,175 \text{ bar}}{MW}$
	$\Delta p_{ges,2}$	mbar	0 ... 600	piezoresistiver Diffe- renzdruck-aufnehmer, DeltaFox DMU 11 D	$f_r = \pm \frac{1 \% \cdot 0,6 \text{ bar}}{MW}$
Oberflächenrauig- keit	k	µm	2,76 ... 4,26	makroskopische Auf- nahmen, optische Rauheits- messung mithilfe eines Konfokal-mikroskops, Hersteller Mahr, Rau- heits-kenngrößen über Tastschnittverfahren nach DIN EN ISO 4287	dk $= \pm (0,59 \dots 0,70) \text{ µm}$

Tabelle 7-11 Stoffwertapproximation und Vergleich mit IAPWS-IF97

Parameter (physikal. Größe)	Formelzeichen und Einheit		für die Erwar- tungswerte	Quelle	Gültigkeitsbereich
Dichte	$\varrho(\vartheta_m)$	kg/m ³	$p_{ges} = 3 \dots 5 \text{ bar}$ $\vartheta_m = \vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}$	Glück., Bernd: Zustands- und Stoffwerte, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage,	$10 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 200 \text{ °C}$ Fehler: $\pm 0,09 \%$ ggü. IAPWS-IF97
dynamische Vis- kosität	$\eta(\vartheta_m)$	Pa · s	$p_{ges} = 3 \dots 5 \text{ bar}$ $\vartheta_m = \vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}$	Berlin: Verlag für Bauwesen, 1991, ISBN 3- 345-00487-9	$10 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 200 \text{ °C}$ Fehler: $\pm 0,13 \%$ ggü. IAPWS-IF97

Zur Berechnung von Vergleichskennzahlen werden Dichte ϱ und dynamische Viskosität η benötigt. Die Druckabhängigkeit von Dichte ϱ und dynamischer Viskosität η entgasten Wassers ist im Erwartungsbereich

$p_{\text{ges}} = 3 \dots 5 \text{ bar}$ gering (s. a. Tabelle 7-11, letzte Spalte), weshalb auf eine druckabhängige Berechnung verzichtet und mit den Approximationsformeln für $p_{\text{ges}} = 5 \text{ bar}_{\text{abs}}$ agiert werden kann. Als Approximationsformeln sind in den Auswertungen folgende Gleichungen integriert:

$$\varrho(\vartheta_{\text{m}}, p_{\text{ges}} = 5 \text{ bar}) = 1002,045 - 0,1029905 \cdot \vartheta_{\text{m}} - 0,003698162 \cdot \vartheta_{\text{m}}^2 + 0,000003991053 \cdot \vartheta_{\text{m}}^3$$

$$\eta(\vartheta_{\text{m}}, p_{\text{ges}} = 5 \text{ bar}) = (554,7781 + 19,726936 \cdot \vartheta_{\text{m}} + 0,1282308 \cdot \vartheta_{\text{m}}^2 - 2,686914 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta_{\text{m}}^3)^{-1}$$

7.4.4.4 Auswertung der Messdaten

Die Ergebnisse der Bestimmung der Druckverlustbeiwerte sind je Prüfling in umfangreichen Excel-Mappen zusammengestellt und enthalten nachvollziehbare Auswerteprozeduren.

Im ersten Schritt werden je Temperatur- und Volumenstromstufe die durch Messung gewonnenen Werte für

- Volumenstrom $\dot{V}$,
- Gesamtdruckverlust Δp_{ges} ,
- Ein- und Austrittstemperatur ϑ_{VL} und ϑ_{RL} und
- Systemüberdruck p_{ges}

durch Mittelwertbildung über alle Messwerte vergleichmäßig.

Nach Übertragung aller so bearbeiteten Messpunkte in ein nächstes Auswerteformular wird die grafische Darstellung der Druckverluste über dem Volumenstrom je Differenzdruckmessgerät erarbeitet.

Außerdem werden zur grafischen Darstellung die Resultate der Differenzdruckmessgeräte dp_1 und dp_2 bei $\Delta p = 0,166 \text{ bar}$ miteinander verschnitten. Dieser Wert stellt das Ende der aus dem Differenzdruckmessgerät 1 nutzbaren Messwerte als $95 \% \cdot 0,175 \text{ bar} = 0,166 \text{ bar}$ (Messbereichsende) dar. Aus diesen Darstellungen werden Regressionen mittels Polynoms 3. Grades ermittelt, wobei der Anspruch an das Bestimmtheitsmaß hoch bei $R^2 > 0,995$ ist.

7.4.4.5 Ergebnis der Druckverlustbestimmung am Beispiel

Als Beispiel für Ergebnisse der experimentellen Ermittlung der Druckverluste eines Gesamtkollektors seien die für den Gesamtdruckverlust des Kollektor-Prototypen XL 19/49 RoS als Prüfling K3 dargestellt. Die K3-Ergebnisse sind grafisch in Abbildung 7-16 aufbereitet und die Regressionsformeln Tabelle 7-12 zu entnehmen.

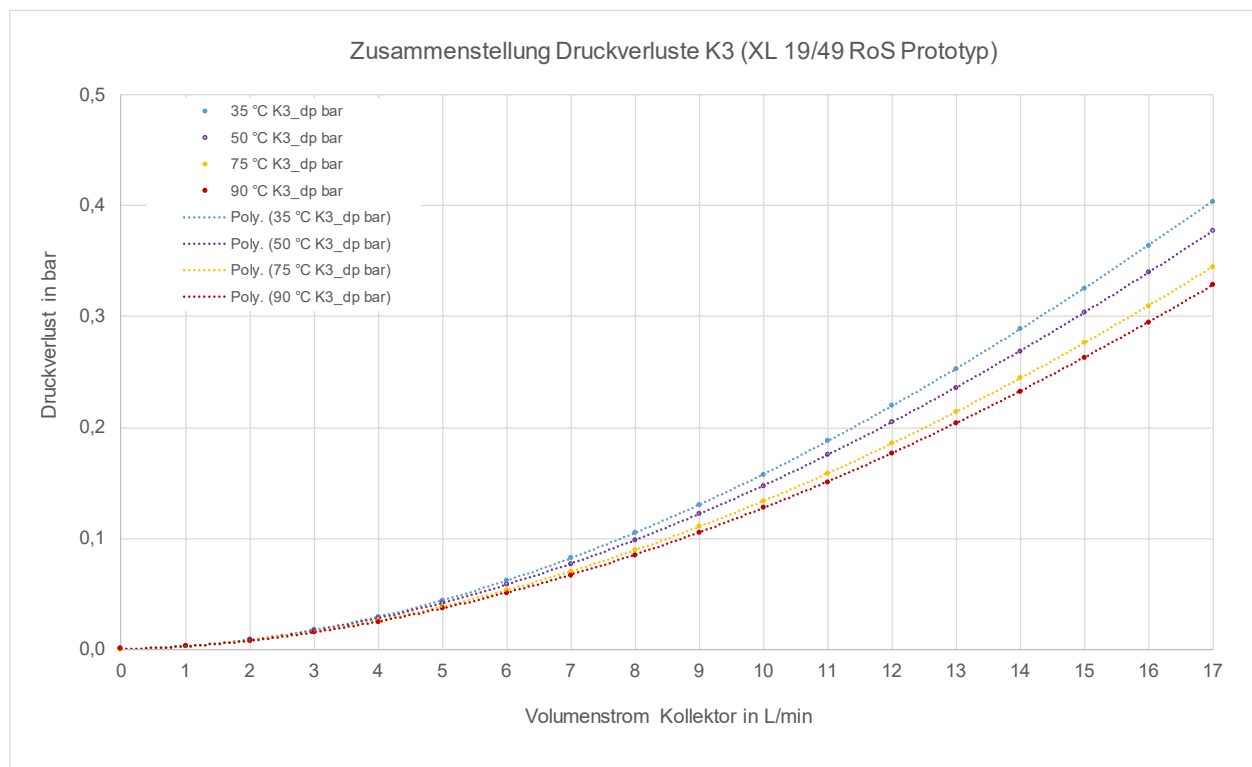


Abbildung 7-16 Darstellung der Gesamtdruckverluste in Abhängigkeit des Volumenstroms des Prüflings K3 (Kollektor-Prototyp RoS)

Tabelle 7-12 Regressionsformeln für Prüfling K3 (Kollektor-Prototyps RoS)

Temp.	Regressionsformeln (genullt) des Druckverlustes des Kollektor-Prototyps 19/21 RoS und zugehöriges Bestimmtheitsmaß (Prüfling K3)
35 °C	$\Delta p_{K3}(\dot{V}) = -0,0000013927 \cdot \dot{V}^3 + 0,0002557957 \cdot \dot{V}^2 + 0,0000019493 \cdot \dot{V}$ $R^2 = 0,9999163599$
50 °C	$\Delta p_{K3}(\dot{V}) = 0,0000001088 \cdot \dot{V}^3 + 0,0002277163 \cdot \dot{V}^2 + 0,0000071756 \cdot \dot{V}$ $R^2 = 0,9998341365$
75 °C	$\Delta p_{K3}(\dot{V}) = -0,0000011837 \cdot \dot{V}^3 + 0,0002371761 \cdot \dot{V}^2 - 0,0000228250 \cdot \dot{V}$ $R^2 = 0,9999497830$
90 °C	$\Delta p_{K3}(\dot{V}) = 0,0000004134 \cdot \dot{V}^3 + 0,0001971235 \cdot \dot{V}^2 + 0,0000758714 \cdot \dot{V}$ $R^2 = 0,9999277415$

Die vier Funktionsverläufe $\Delta p = f(\dot{V})$ sind in Ihrem Verlauf ähnlich, was auf eine in sich schlüssige Messwerterfassung und Auswertung hindeutet. Erwartungsgemäß verursacht das kühlere Fluid gegenüber dem jeweils wärmeren Fluid bei gleichem Volumenstrom einen größeren Gesamtdruckverlust.

7.5 Feldanlagen REUT

Insgesamt umfasst der Feldversuch 12 Versuchsanlagen von 8 m² bis 27 m² Bruttofläche. Sie dienen zur Untersuchung des Stagnationsverhaltens und dabei im speziellen der Entleerungsdauer der Kollektoren während der Stagnation und des Regelverhaltens bei Frostschutz im praktischen Betrieb. Die Datenerfassung erfolgt bei allen Anlagen über SD-Karten. Alle Anlagen funktionieren seit Ihrer Inbetriebnahme störungsfrei. Anlagen, die während der Frostperiode 2021/2022 und 2022/23 betrieben wurden, zeigen keine Auffälligkeiten. Die Wasseranalysen mit Probenentnahme 4 Wochen nach der Inbetriebnahme sind durchgeführt. Der Feldversuch soll außerdem den Nachweis der Rückwärtskompatibilität zu Bestandsanlagen liefern.

Es werden mehrere Kollektorentleerungsvarianten während der Stagnation untersucht:

- Nur über Vorlauf (Standard bei Paradigma): **VE**
- Über Vor- und Rücklauf mit Bypass. (XL-Solar): **VREB**
- Über Vor- und Rücklauf mit separater Rücklaufeinbindung in den Speicher (XL-Solar): **VRES**
- Nur über Rücklauf mit 3 Wege Umschaltung in den Vorlauf am Speicher (zukünftig Paradigma): **RE3W**

Unterschiedliche Installationsvarianten runden die Untersuchung ab:

- Kollektorfelder mit einem Strang: **1S**
- mit einem Strang und 2 Felder übereinander: **1SÜ**
- mit 2 Strängen parallel: **2S**
- mit 2 Strängen parallel und zugleich mit 2 Felder übereinander in einem Strang: **2S1SÜ**
- mit einem Strang und zugleich mit 2 Felder übereinander Ost-West: **1SÜOW**

Die Installation der Anlagen begann im November 2021 und konnte bis Juni 2022 abgeschlossen werden. In

Tabelle 7-13 und Tabelle 7-14 sind die Ergebnisse von 10 Anlagen zusammengefasst. 7 der Anlagen wurden von Kollektoren mit RmS Register auf Kollektoren mit neuen RoS Registern umgebaut. Bei einer Anlage 4JNK wurde zusätzlich die Kollektorverschaltung geändert, da mit der neuen RoS Variante mehr Kollektoren in Reihe geschaltet werden können. 3 der Anlagen wurden neu errichtet. Davon 2 Anlagen mit Kollektorfläche >15 m² wie bisher bei RmS zulässig. Bei der Anlage 8TWN konnte ein Vergleich zwischen den Entleerungsvarianten VE, VRES und RE3W durchgeführt werden.

Tabelle 7-13 Anlagenübersicht 1

Anlage Bruttofläche	1SAT 26 m ²	9KWR 31 m ²	2CBR 20 m ²	3WHN 20 m ²	4JNK 20 m ²	7UVT 10 m ²
Installationsvariante	2S	2S	2S1SÜ	1SÜOW	RmS: 2SÜ RoS: 1SÜ	1S
Entleerungsvariante	VE	VE	VREB	VREB	VREB	VE
Entleerungsdauer RmS [min]	41	33	20	21	14	25
Entleerungsdauer RmS/RoS gemischt [min]	40	-	-	-	-	-
Entleerungsdauer RoS [min]	-	24	18	18	19	19

Tabelle 7-14 Anlagenübersicht 2

Anlage Bruttofläche	7VGT 8,5 m ²	8.0TWN 18,7 m ²	8.1TWN 18,7 m ²	8.2TWN 18,7 m ²	5SBK 18,4 m ²	10MMT 10 m ²
Installationsvariante	1S	1S	1S	1S	1S	1S
Entleerungsvariante	VE	VE	VRES	RE3W	VE	VE
Entleerungsdauer RmS [min]	25	-	-	-	-	-
Entleerungsdauer RmS/RoS gemischt [min]	-	-	-	-	-	-
Entleerungsdauer RoS [min]	20	20	16	12	19	21

Die Entleerungsdauer nach Umrüstung auf die RoS Registervariante hat sich bis auf die Anlage 4JNK bei jeder Anlage leicht verbessert. Die Verbesserung war umso prägnanter, je einfacher die Installationsvariante war. Für den Vergleich wurden ähnliche Tage aus den Jahren 2021 und 2022 verglichen. Ausschlaggebend waren die Jahreszeit und die Tageszeit, während der die Stagnation stattfand.

Die durchschnittliche Entleerungsdauer bei RmS-Anlagen lag bei 26 Minuten. Bei RoS-Anlagen liegt die durchschnittliche Entleerungsdauer bei 19 Minuten. Bei der Vorlaufentleerung VE liegt die Durchschnittliche Entleerungsdauer bei 24 Minuten. Das beste Entleerungsverhalten zeigen die VRE- und RE-Varianten, hier lag die durchschnittliche Entleerungsdauer bei 17 Minuten. Die Entleerungsdauer ist nahezu unabhängig von der Feldgröße. Das RoS Register verbessert das Stagnationsverhalten geringfügig.

7.6 Feldtestanlage ZET

7.6.1 Ziele und Grundlagen

Hauptziel der Feldtestanlage im ZET ist es nachzuweisen, dass die eingesetzten Materialien direkt in salzarmen Fernwärmewässern nach AGFW FW 510 eingesetzt werden können, die nach Vermutungen der AGFW auch bislang analytisch nicht erfasste Mikroplastik enthalten könnten. Die erzeugten Geometrien und Fügestellen dürfen dabei keine Risiken bezüglich des Versagens durch Korrosion bei üblichen Netzparametern aufzeigen. Die Konzeption der Feldtestanlage sieht einen Solarkreislauf mit ca. 90 m² Kollektorfläche vor, die es unter Nutzung der Bedingungen in realen Fernwärmesystemen erlaubt, die Funktionalität des neuen HYDRA RoS Gesamtkollektors nachzuweisen. Hierzu werden u.a. Stresstests im Sinne des Short-Term-Konzeptes (künstlich herbeigeführte Stagnation überlagert mit einem intermittierenden Austausch des Wassers im Solarkreislauf) durchgeführt. Unterstützend soll die faseroptische Temperaturmesstechnik (distributed temperature sensing = DTS-Messung) in ausgewählten Abschnitten des Kollektorfeldes detaillierte Einblicke in die Ausbreitung von Temperaturfronten bei Stagnation, Frostschutz sowie im An- und Abfahrprozess ermöglichen.

Aufgrund des Versuchsbetriebs wird die Anlage keine komplette Jahresbilanz der Erträge und Hilfsenergie für einen Normalbetrieb vorlegen können. Insofern konzentrieren sich energetische Auswertungen des Betriebs der Anlage auf ausgewählte Tage und Wochen im Jahresverlauf sowie auf die In-situ-Bewertung der Druckverlustveränderung der Kollektoren ohne Sammler gegenüber dem bisherigen Kollektorkonzept mit Sammler.

Im August 2021 war der erreichte Fortschritt bei der Produktion von Prototypen des neuen Vakuumröhrenkollektors mit dem Register ohne Sammler-Konzept so weit gediehen, dass mit der Konzeption von Feldtests begonnen werden konnte (GEWV-TUDD und REUT gemeinsam). Die im Projekt SOLSTAND [10] umgesetzte Feldanlage 1 (Prototyp-Kollektoren VRK mit speziellem Heatpipe-Prinzip, Arbeiten mit Wasser als Wärmeträgermedium auch auf der Solarthermieseite, Einspeisung hydraulisch indirekt in das Fernwärme-Primärnetz der SachsenEnergie AG – früher DREWAG - mit Soll-Vorlauftemperatur von bis zu 110 °C auf der Fernwärme-Vorlaufseite) ist grundsätzlich für ein Repowering geeignet. Das Repowering bezieht sich dabei insbesondere auf:

- Tausch des Kollektorfeldes inkl. Verrohrung
- Neukonzeption Stagnation und Frostschutz nach REUT-Methodik
- Neue Pumpengruppe Solarthermie-Seite aufgrund höherer Druckverluste im Kollektor

- SPS-basiertes Steuer- und Regelkonzept inkl. Messwerterfassung (im Weiteren analog zum parallelen FuE-Projekt (FKZ: 03ETW008) als SPSFW bezeichnet)

7.6.2 Anlagentechnische Umsetzung der NEST-W 2.0

Die 18 Kollektoren des neuen Typs 19/21 RoS von REUT konnten im April 2022 auf den Sheddächern des ZET montiert werden. Die Umsetzung des Weiteren Repowering zur NEST-W 2.0 gestaltete sich wegen der extrem langen Lieferzeiten für die neuen Komponenten (z. B. solarthermieseitige Pumpen) sowie den speziellen Anforderungen der SachsenEnergie AG für die Realisierung der Fernwärmewasser-Abspeisung für die Extremtests als langwierig. Die Probleme konnten im Team und mit studentischer Unterstützung gelöst werden, sodass die Befüllung der Anlage mit Fernwärmewasser aus dem Primärnetz im 3. Quartal 2022 stattfinden konnte. Wiederverwendung konnten u. a. finden:

- Große Teile der Komponenten der Netzeinspeisestation NEST-W, insbesondere auf der Fernwär-meseite
- Teilweise Sensorik und Aktorik inkl. Stromversorgung und Signalleitungsanbindung sowie Hard-ware-Schaltschrank inkl. SPS
- Ankopplung an Leitwarte der SachsenEnergie

Die Umsetzung der Anlage erfolgte als Mix aus Eigenleistung der Forschungspartner und einem beauftragten Unternehmen für die Realisierung der Rohrleitungs- und NEST-W-seitigen Umbauten. Gerade die Anpassung der Verkabelung der Sensoren und Aktoren sowie des Schaltschranks an den neuen SPSFW-Ansatz für die Regelung, Steuerung und Messwerterfassung erwies sich als herausfordernd und zeitaufwändig.

Wiederverwendet werden konnte auch das für Temperaturen bis 300 °C geeignete Glasfaserkabel für die DTS-Messung. Abbildung 7-17 zeigt den Grundaufbau des im Juni 2022 umgesetzten Kabelverlaufs im Westfeld der Anlage. Detaillierte Einblicke werden so in die Kollektoren K1 und K9, ausgewählten Abschnitten der verbindenden Rohrleitungen sowie in den Bereich der Sammlerkästen möglich. Abbildung 7-18 zeigt die ersten DTS-Messergebnisse mit Kennzeichnung der wichtigen Punkte im Zustand abgedeckter Kollektoren im „trockenen Zustand“ (Befüllung der Anlage konnte erst im 3. Quartal 2022 nach Fertigstellung der SPSFW erfolgen). Eindrucksvoll zeigten sich aber bereits im abgedeckten Zustand die Temperaturpeaks innerhalb der Kollektoren K1 und K9 ab.

Am 01. Dezember 2022 erlaubte der Umsetzungsfortschritt das sogenannte „Abplanen“ der Kollektoren und den Beginn der Inbetriebnahmephase mit Automatikbetrieb für den Frostschutz. Abbildung 7-19 zeigt Fotos vom Kollektorfeld sowie die Hauptkennndaten der Feldanlage ZET.

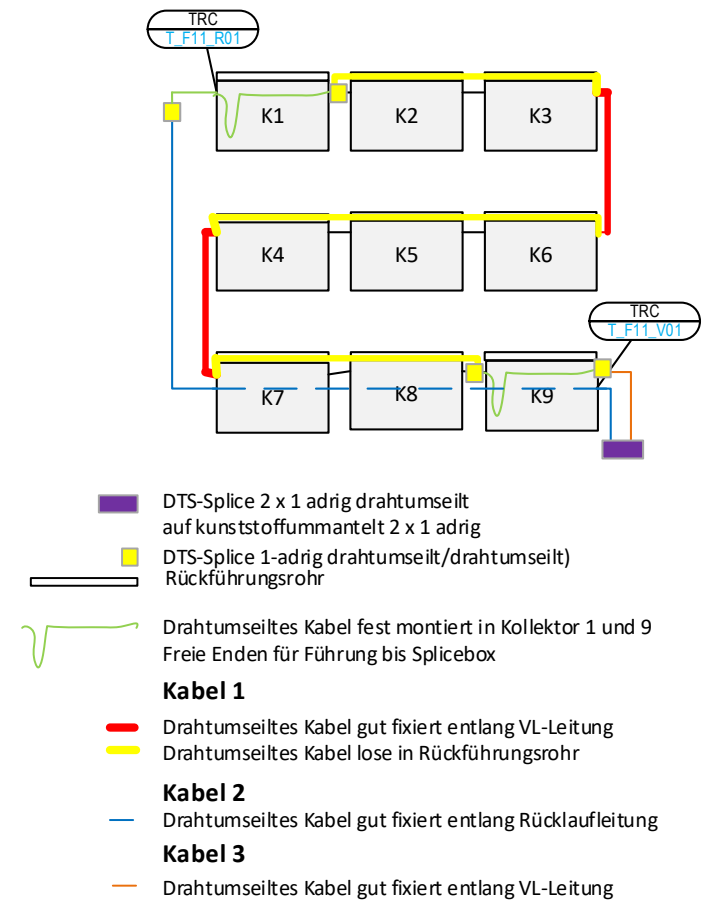


Abbildung 7-17 Konzept der Umsetzung (links) sowie Verlauf der Glasfaserkabel für DTS-Messung (rechts) auf der Feldanlage ZET

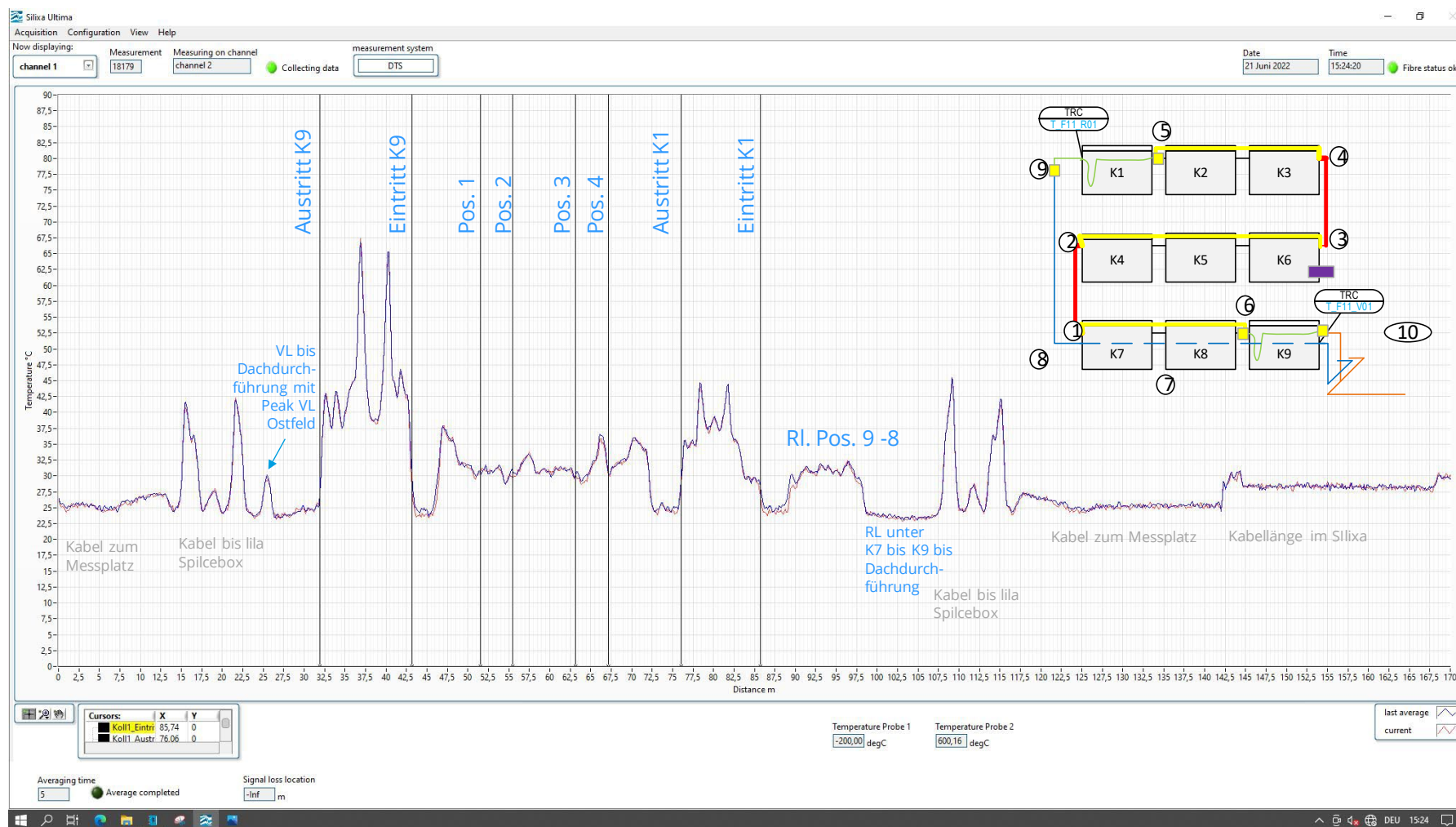


Abbildung 7-18 DTS-Messergebnisse mit Kennzeichnung der wichtigsten Positionen entlang des Kabelverlaufs (trockener, abgedeckter Zustand der Kollektoren)



Hauptkennndaten Feldanlage ZET NEST-W 2.0

Kollektortyp	Ritter XL 19/49 RoS
Anzahl Kollektoren	18
Verschaltung	2 parallele Reihen a 9 Koll.
Bruttokoll.-fläche	88,92 m ²
Inklination	25 °
Azimut	- 4,81 ° (SSO)
Einspeisetemp.	$\vartheta_{FW,VI} = 90 \dots 110 \text{ °C}$
Nennleistung	49,5 kW
	(bei 1000 W/m ² und 60/110 °C FW)
Nenndruckstufen	Solarthermie PN10
	Fernwärme PN25

Abbildung 7-19 Feldanlage ZET; oben: Kollektorfeld Ost während und nach Abplanen 01.12.2022; unten: Ansicht von Südwest März 2023 und Hauptkennndaten

Sowohl für die Konzeption der SPSFW als auch die Beurteilung des Anlagenbetriebes hat sich die Unterteilung der Anlage in Funktionsgruppen gemäß Abbildung 7-20 bewährt.

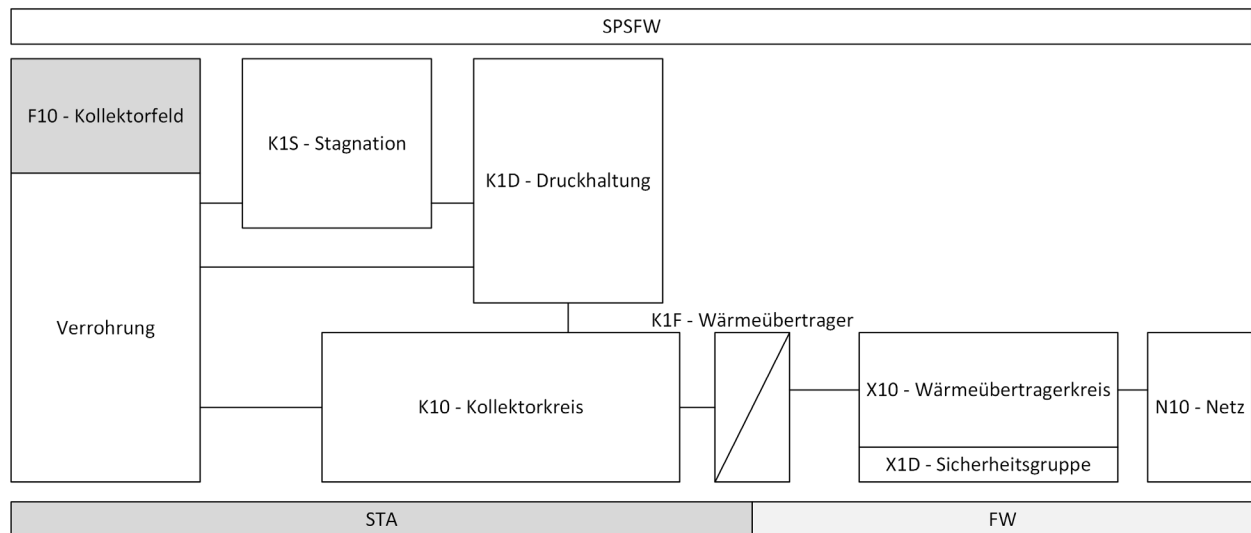


Abbildung 7-20 Feldanlage ZET : Einteilung in Funktionsgruppen

7.6.3 Betrieb, Shortterm-Tests und Ertragskontrolle

7.6.3.1 Überblick

Ab Januar 2023 wurde die Feldanlage ZET in einer erweiterten Inbetriebnahmephase betrieben. Ziel waren neben dem Arbeiten im Regelbetrieb – jahreszeitbedingt zunächst fast ausschließlich der Frostschutzbetrieb – folgende:

- Weiterentwicklung der auf die Anlage angepassten SPSFW-Software durch REUT,
- Etablierung des Datentransfers aus der SPSFW in die INFLUXDB der TU Dresden,
- Aufsetzen einer grafischen Benutzeroberfläche in GRAFANA,
- Etablierung einer Methode zur Auswertung der energetischen Effizienz nach DIN EN ISO 24194
- Durchführung von Shortterm-Tests über künstlich herbeigeführte Stagnationen mit anschließendem Spülen mit Fernwärmewasser (hier Wasser aus dem Primärnetz der SNE Fernwärmewasserqualität salzarm I gemäß AGFW FW 510; s. Tabelle 7-15) als Stresstest, primär mit Fokus HYDRA RoS-Prototyp-Kollektoren inkl. Fügestellen, aber auch Rohrleitungssystem sowie Sensorik und Aktorik.

Das GEVV-Team hat gemeinsam mit Herrn Theo Sell (studentische Hilfskraft und im Rahmen seiner Projektarbeit im Forschungspraktikum [6]) die Arbeiten vorangetrieben. Die umfängliche Dokumentation der Anlage, des Vorgehens und der Ergebnisse im Regelbetrieb und bei Stagnation wurde in [6] begonnen und

wird kontinuierlich über gezielte Versuche und Auswertungen in GRAFANA weitergeführt. Folgend sollen wesentliche Ergebnisse zusammenfassend dargestellt werden.

Tabelle 7-15 Messwerte der Beschaffenheit des Fernwärmewassers im Primärnetz der DREWAG (jetzt achsen Energie AG) am Standort Nossener Brücke

Messgröße	Einheit	09.11.21 RL	09.11.21 VL	23.05.22 RL	23.05.22 VL	23.05.22 RL Deionat- Nachsp.	23.05.22 VL Deionat- Nachsp.	09.11.23 RL	09.11.23 VL	Richtwert (R) bzw. Empfehlung (E) *
Sauerstoff	mg/L	0,009 ± 0,001	0,002 ± 0,001	0,001 ± 0,001	0,003 ± 0,001	0,001 ± 0,001	0,001 ± 0,001	0,0004 ± 0,001	0,0006 ± 0,001	≤ 0,020 (R)
Stickstoff	mg/L	9,0 ± 10 %	8,9 ± 10 %	2,8 ± 10 %	< 0,1 ± 10 %	2,8 ± 10 %	< 0,1 ± 10 %	1,7 ± 10 %	1,6 ± 10 %	≤ 10 (E)
Methan	mg/L	0,01 ± 10 %	0,01 ± 10 %	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	k. A.
Wasserstoff	mg/L	0,04 ± 10 %	0,03 ± 10 %	0,02 ± 10 %	n. n.	0,02 ± 10 %	n. n.	0,02 ± 10 %	0,02 ± 10 %	k. A.
CO ₂	mg/L	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	k. A.
CO	mg/L	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	k. A.
pH-Wert**	-	9,4	9,5	9,5	9,6	9,4	9,2	9,5	9,5	9,0 ... 10,0(R) (salzarm I)
Elektrische Leitfähigkeit**	µS/cm	7,7	7,7	7,85	7,84	7,4	2,9	7,3	7,7	10 ...30(R) (salzarm I)

n.n. – nicht nachweisbar; k. A. – keine Angaben; * - nach FW 510; ** - von DREWAG bestimmt

7.6.3.2 Funktionsüberprüfung Fernwärme-Einspeisung

Die Funktionsüberprüfung der Kernbetriebsart Fernwärmeeinspeisung erfolgte durch gezielte Beobachtung der Tagesverläufe in GRAFANA. Grundsätzlich ist die zuverlässige Funktionsweise der Anlage bei Einspeisung zu konstatieren. Exemplarisch zeigt Abbildung 7-21 den Messwertverlauf am 05. Juni 2023 - einem wechselhaft bewölkten Sommertag mit einem Sollwert für die Einspeisetemperatur von 90 °C. Die Anlage erreicht bereits um 07:55 Uhr Temperaturen von 65 °C im Kollektorfeld, sodass das Vorwärmen des Solar-kreislaufs aktiviert wird. Um 08:09 Uhr wird die notwendige Temperatur von 95 °C überschritten und der Einspeisebetrieb beginnt. Dieser wird wegen Unterschreitung der unteren Grenze von 85 °C und in Überlagerung mit dem Wolkendurchzug von 08:20 Uhr bis 08:29 Uhr nochmals kurz unterbrochen (Standby-Modus). Gestartet wird dann sofort die Betriebsart Einspeisung, da alle Kollektorfeldtemperaturen bereits ein ausreichend hohes Temperaturniveau aufweisen. Wie grafisch dargestellt erfolgt dann ab 08:40 Uhr bis 16:25 Uhr – lediglich mit kurzer Unterbrechung von einer Minute in zeitverzögerter Wirkung des Strahlungseinbruchs um 08:40 Uhr - eine stabile Einspeisung beim Sollwert von 90 °C mit hoher Regelgüte von überwiegend ± 3 K. Selbst die Nutzung der Restwärme am Nachmittag im Zeitraum 16:49 bis 16:56 Uhr erfüllt diese Regelgüteforderung. Lediglich infolge der starken, schlagartigen Einbrüche der Strahlung um die Mittagszeit und im Zeitraum 14:15 bis 15:20 Uhr treten Sollwertunterschreitungen bis 82 °C auf.

Grundsätzlich erwiesen sich folgende Restriktionen als relevant für das Einstellen höherer Sollwerte für die Einspeisetemperaturen bei gleichzeitiger Beibehaltung der Regelgüte:

1. Zu geringe Wärmeübertragerfläche des Plattenwärmeübertragers (PWÜ)
2. Instabile Messung des Volumenstroms durch den installierten Typ von Inline-Ultraschallsensoren

Ein stabiler Betrieb konnte 2023 nur dadurch erreicht werden, dass die Volumenstrommessung durch eine Messung mittels Clamp-on-Ultraschalldurchflusstechnik ersetzt wurde.

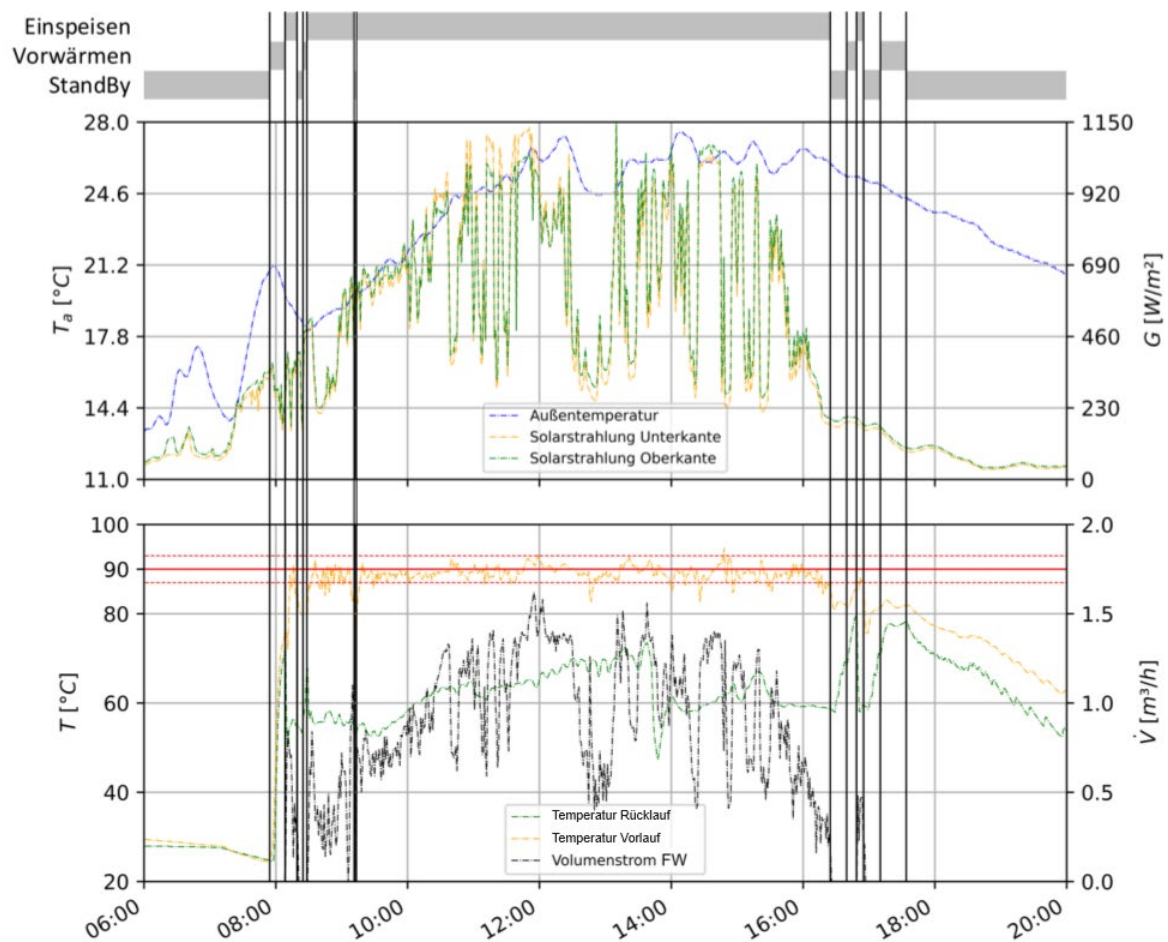


Abbildung 7-21 Feldanlage ZET: Übersicht Monitoringdaten 05. Juni 2023 mit FW-Einspeisung bei Sollwert 90 °C

7.6.3.3 Stagnations-Shortermtests

Zentrales Ziel der Shortterm-Stagnationstest war das Prüfen der Eignung der XL 19/49 RoS -Kollektoren für die perspektivisch geplante direkte Einbindung in Fernwärmesysteme, die eine Wasserqualität nach AGFW FW 510 aufweisen. Deshalb sollten manuell Stagnationen ausgelöst und mit einem Wechsel des Wärmeträgermediums im Solarthermiekreis nach Ende der Stagnation verbunden sein. Weiterhin galt es zu untersuchen:

- Stagnations- und Entleerungsverhalten Kollektoren
- Vergleich verschiedener Entleerungsstrategien

Insgesamt wurden bis Ende September 2023 vier Vorversuche und 41 Stagnationsversuche nach einem einheitlichen Vorgehen durchgeführt. Generell ist für die ZET-Feldanlage zu konstatieren:

- Im Sinne der Bauteillebensdauer negativ zu bewerten ist das Auftreten kritischer Temperaturen von bis zu 112 °C an der Pumpengruppe bei dem nach der SPSFW-Routine durchgeführten Umwälzen vor dem Übergang in die Stagnation.
- Es erfolgt eine zuverlässige und schnelle Entleerung der Kollektoren.

Von Interesse war die Veränderung der wasserchemischen Parameter im Bereich des MAG der Pumpendruckhaltung durch die Überströmung von Wärmeträgermedium aus dem Dissipationsgefäß in der Stagnationsphase bzgl. pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit. Wie Abbildung 7-22 zeigt, sind die pH-Werte verglichen mit dem Wert von 9,5 des als Füllwasser verwendeten Fernwärmewassers erniedrigt. Nach anfänglich niedrigen pH-Werten von 7,5 bis 8 stabilisiert sich im Verlauf der Versuche das Niveau bei pH-Werten von 8,8. Die elektrische Leitfähigkeit zeigt sich nur im Bereich des unteren Teils der Membran (Ablassen auf Füllstand 60 %) etwas erhöht im Bereich von 40 bis 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hier ist vermutlich die Interaktion Wasser – Membranmaterial ursächlich, welche auch für die pH-Wertveränderung in Betracht zu ziehen ist. Das andere Inhaltswasser des MAG zeigt dann die elektrische Leitfähigkeit des Fernwärmewassers.

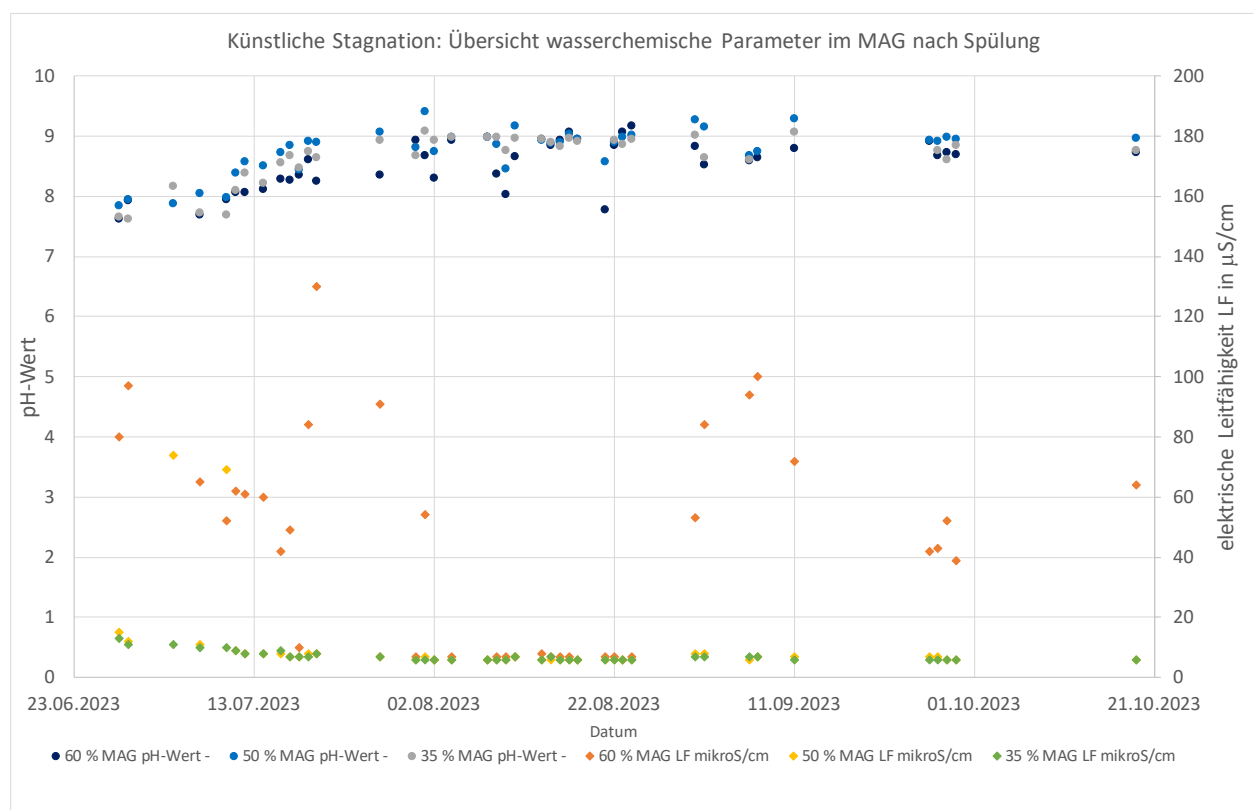


Abbildung 7-22 Feldanlage ZET - Übersicht wasserchemische Parameter im MAG nach gezielt herbeigeführter Stagnation

7.6.3.4 Ergebnisse Leistungs- und Tagesertragskontrolle

Im Rahmen von [6] erfolgte für ausgewählte Stunden und Tage des Zeitraums April bis Juni 2023 die Leistungs- bzw. Tagesertragskontrolle, da im Anschluss daran die gezielten Stagnationsexperimente starteten. Die Berechnungen setzten konsequent die Vorgaben der ISO 24194:2022 bzw. DIN EN ISO 9806:2018 um. Hier seien nur die relevanten Ergebnisse vorgestellt. Details der Berechnungen sind in Kapitel 5 der Studienarbeit von Theo Sell [6] umfänglich dokumentiert

Randbedingungen für die gezielte Auswahl von 1-Stunden-Blöcken für die Leistungskontrolle sind: $G_{\text{hem}} > 800 \text{ W/m}^2$, Windgeschwindigkeit $< 10 \text{ m/s}$, $\vartheta_a > 5 \text{ }^\circ\text{C}$, keine Verschattung und Schwankungen der mittleren Kollektortemperatur $\Delta\vartheta_m \leq 5 \text{ K}$. Die theoretisch zu erwartende Leistung wird nach folgender Gleichung für nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren ermittelt.

$$\dot{Q}_{\text{estimate}} = A_{\text{GF}} \cdot \left(\eta_{0,\text{hem}} K_{\text{hem}}(\Theta_L, \Theta_T) G_{\text{hem}} - a_1(\vartheta_m - \vartheta_a) - a_2(\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - a_5 \left(\frac{d\vartheta_m}{dt} \right) \right) \cdot f_{\text{safe}}$$

Die Bruttofläche des Kollektorfeldes A_{GF} sowie die Koeffizienten $\eta_{0,\text{hem}}$ und $a_1 \dots a_5$ sind dem Solar Key-mark-Datenblatt für den Einzelkollektor – z. B. [7] – zu entnehmen. Der sogenannte Sicherheitsfaktor f_{safe} sollte nicht kleiner als 0,9 sein und berücksichtigt die Genauigkeit der Messgeräte sowie den Einfluss der Feldverrohrung – stellt also eine Art Abminderungsfaktor dar. Die Berechnung der realen Leistung erfolgt gemäß

$$\dot{Q}_{\text{real}} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (\vartheta_{\text{ein}} - \vartheta_{\text{aus}})$$

Das linke Bild in Abbildung 7-23 zeigt für zehn in dem kurzen Zeitraum ermittelbare Stundenwerte die Ergebnisse für f_{safe} -Werte von 0,9 und 0,95. Die Leistungskontrolle ist für $f_{\text{safe}} = 0,90$ vollumfänglich bestanden. Der reale Sicherheitsfaktor liegt zwischen 0,90 und 0,95.

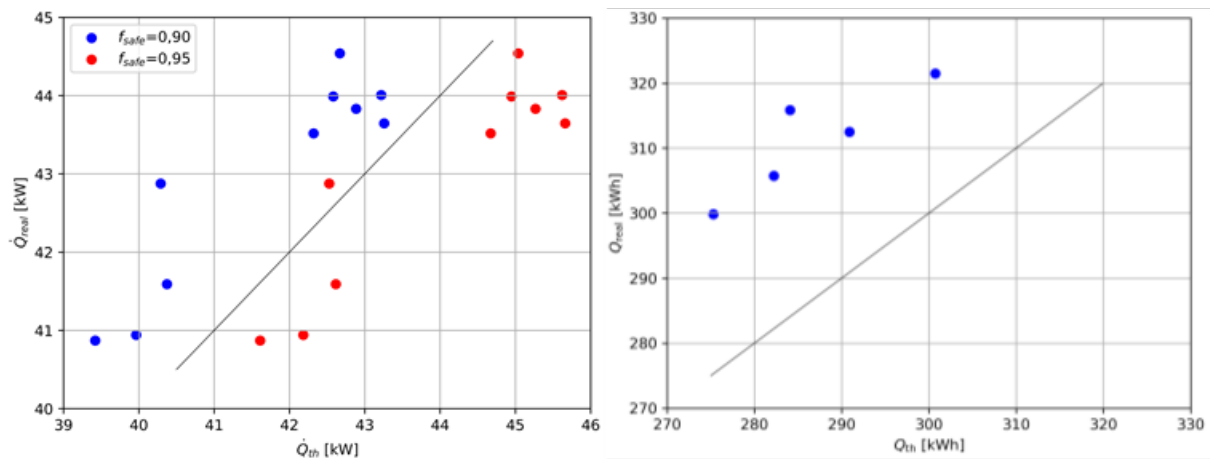


Abbildung 7-23 Feldanlage ZET: Testergebnisse nach DIN ISO 24194:2022; links: 10 Datenpunkte Leistungskontrolle für $f_{safe} = 0,9 \wedge 0,95$ (gemessene Leistung $\dot{Q}_{real}$; erwarteter Leistung $\dot{Q}_{th} = \dot{Q}_{estimate}$); rechts: Tagesertragskontrolle an der Bilanzstelle Wärmeübertrager zum Fernwärmenetz für 5 Tage mit $f_{safe} = 0,9$ (gemessener Tages-Feldertrag Q_{real} ; theoretische erwarteter Systemertrag $Q_{th} = \dot{Q}_{th-sys,d}$)

Eine Tagesertragskontrolle nach ISO 24194:2022 war für fünf Tage möglich, an denen die Randbedingung akkumulierte Einstrahlung $> 5,5 \text{ kWh/m}^2$ bei mind. 100 W/m^2 erfüllt waren. Die Ermittlung des theoretischen Tagesertrages zwischen den Zeitpunkten Start t_s und Ende t_e ist vorzunehmen nach:

$$\dot{Q}_{th-sys,d} = [(\dot{Q}_{th-col,d} - \dot{Q}_{pipe,d}) \cdot (t_e - t_s) - Q_{cap,d}] \cdot f_{safe}$$

Der theoretische Feldertrag $\dot{Q}_{th-col,d}$ wird anhand der Tagesmittelwerte $\bar{x}$ der Messwerte am Kollektorfeld und einem Korrekturfaktor für die Verschattung von $f_{sh} = 0,98$ ermittelt.

$$\dot{Q}_{th-col,d} = A_{GF} \cdot (\eta_{0,hem} K_{hem,av} f_{sh} \overline{G_{hem}} - a_1(\overline{\vartheta_m} - \overline{\vartheta_a}) - a_2(\overline{\vartheta_m} - \overline{\vartheta_a})^2)$$

$\dot{Q}_{pipe,d}$ berücksichtigt die Feldverrohrungsverluste zum/von den Kollektorfeldern bis zum Wärmeübertrager, $Q_{cap,d}$ die Differenz der Kapazität der Kollektoren und des Wärmeträgermediums durch die ggf. bei Start- und Endzeitpunkt unterschiedliche mittlere Medientemperatur ϑ_m . Die Berechnung des realen Ertrags erfolgt wiederum aus gemessenen Temperaturen und Volumenströmen über die Summenbildung der Messintervalle $i = 1 \dots n$ im zu berücksichtigenden Zeitraum.

$$\dot{Q}_{real} = \sum_{i=1}^n \dot{V}_i \cdot \rho_i \cdot c_{p,i} \cdot (\vartheta_{ein,i} - \vartheta_{aus,i}) \cdot \Delta t_i$$

Die Tagesertragskontrolle gilt erfüllt, wenn der Faktor f_{safe} mindestens den Wert von 0,9 erreicht. Die rechte Grafik in Abbildung 7-23 zeigt eindrücklich, dass bei Berechnung von $\dot{Q}_{th-sys,d}$ mit dem Sicherheitsfaktor von 0,9 die Tagesertragskontrolle für alle fünf Tage als bestanden gilt, der reale Sicherheitsfaktor sogar bei etwa 0,96 liegt.

7.6.4 Fazit und Ausblick ZET-Feldtestanlage

Zusammenfassend kann konstatiert werden:

- Die neuen HYDRA RoS-Prototyp-Kollektoren arbeiten hinsichtlich hydraulischer und energetischer Kennwerte einwandfrei.
- Durch iterative Verbesserung der SPSFW-Routinen kann bei $90\text{ °C} \pm 3\text{ K}$ ein stabiler Einspeisebetrieb als nachgewiesen gelten. Ein Anheben auf $100 \dots 105\text{ °C}$ als Sollwert kann erst nach dem Einbau eines in der Übertragungsfläche deutlich größeren Plattenwärmeübertragers in der NEST-W 2.0 erfolgen. Dies ist nunmehr nach Projektende im April 2024 erfolgt.
- Die Stagnations-Stresstests können nach etablierten Abläufen realisiert werden. In insgesamt 41 Stresstestzyklen sind keine Auffälligkeiten an Kollektoren, Sensoren oder Aktoren zu konstatieren. Auch die Spülprozesse mit Fernwärmewasser laufen nach vorbestimmtem Prozedere ab. Als wasserchemische Parameter werden der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit erfasst, die sich bis auf die ersten wenigen Liter direkt aus dem Ausdehnungsgefäß der Pumpendruckhaltung im zulässigen Bereich für salzarme Fahrweise nach AGFW FW 510 bewegen.

Die Anlage wird weiter im Dauerbetrieb arbeiten und steht mithin für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten und Auswertungen zum Langzeittest zur Verfügung. Im nächsten Schritt wird eine Bewertung der Wirkungen des Umbaus des Plattenwärmeübertragers erfolgen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Verbundprojektes wurde ein hydraulisch optimierter Vakuumröhrenkollektor mit einem neuartigen Rohrregister ohne Sammelrohre entwickelt und in Begleitprüfungen qualifiziert. Die seriennahe Herstellung erster Register-Prototypen mit einer Demonstrations-Rohrbiegeanlage und zugehöriger Fügetechnik konnte innerhalb der Projektlaufzeit umgesetzt werden. Das neuartige Register wurde in ersten Dauertests im Labor und in Kollektoren in Feldanlagen unter realen Bedingungen erprobt. Die Ergebnisse lassen auf eine gute und zeitnahe Verwertbarkeit schließen. Eine Überführung des neuen Register-Konzepts in die Serie ist geplant.

Das neue sogenannte „Trommelanschlusskonzept“ verzichtet vollständig auf ein Sammelrohr, indem es komplexe, 3-dimensional gebogene Rohrmäander auf einen Kreisring (Trommelanschluss) so zusammenführt, dass sie nur an den beiden Enden jeweils idealerweise in einem Produktionsschritt zusammengefügt werden können.

In Vorbereitung der fertigungstechnischen Detailumsetzung und der Beauftragung der neuen Produktionslinie erfolgten strömungsmechanische Simulationsstudien unter Nutzung von ANSYS WORKBENCH. Geometrisch hoch aufgelöste numerische Simulationen der Wärmeträgerseite der neuen Kollektoren konnten die Strömungs- und Temperaturverhältnisse im Rohrregister bzw. den einzelnen parallelen Mäandern und Trommelanschlüssen sehr gut abbilden. Die Ergebnisse der Parameterstudie in einem weiten Volumenstrom- und Temperaturbereich trugen sowohl zur Identifikation von strömungstechnischem Optimierungspotential als auch zur Prognose der zu erwarteten Druckverlustreduktion bei.

Die komplexen Biegungen der Mäander konnten mit einer automatischen Demonstrations-Rohrbiegemaschine produktionstechnisch und wirtschaftlich sinnvoll umgesetzt werden. Mit dem Induktionslötverfahren wurde eine Technologie zur langzeitstabilen Verbindung der Rohrmäander mit den Trommelanschlüssen gefunden und qualifiziert.

Feldanlage am Zentrum für Energietechnik

Das Kollektorfeld arbeitet mit dem Wärmeträger Wasser und speist die solarthermisch bereitgestellte Wärme indirekt in das Fernwärmenetz der SachsenEnergie AG ein. Die Auswertung des regulären Einspeisebetriebes für ausgewählte Stunden und Tage des Jahres 2023 nach DIN ISO 24194:2022 dokumentieren sehr gute f_{safe} -Werte sowohl an der Bilanzstelle Kollektorfeld als auch der Fernwärmeeinspeisung.

Außerdem wurden gezielt Stresstests (eine Vielzahl künstlich herbeigeführte Stagnationen mit häufigem Wechsel des Wärmeträgers) durchgeführt, die die Prototypkollektoren und die Gesamtanlage ohne jegliche Leckagen und Glasbruch absolvierten. Die ZET-Feldanlage speist auch nach Projektende im SPSFW-Automatikmodus weiter solarthermisch bereitgestellte Energie in das Fernwärmenetz der SachsenEnergie AG ein und steht für weiterführende Untersuchungen zur Verfügung.

9 Quellen

9.1 Literaturverzeichnis

- [1] A. F. INC., ANSYS FLUENT USER'S GUIDE FOR FLUENT. RELEASE 20.0., ANSYS FLUENT INC., 2020.
- [2] K. Hasanpour, M. Barati, B. Amini und M. Poursina, The effect of anisotropy on wrinkling of tube under rotary draw bending, 2013.
- [3] H. Li, H. Yang, M. Zhan und Y. L. Kou, „Deformation behaviors of thin-walled tube in rotary draw bending under push assistant loading,“ *Journal of Materials Processing Technology*, 2010.
- [4] A. Mentella und M. Strano, „Rotary draw bending of small diameter copper tubes: predicting the quality of the cross-section,“ *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012.
- [5] R. a. A. K. Safdarian, „Experimental investigation of effective parameters in the tube rotary draw bending process,“ *Materials Research Express*, 2019.
- [6] T. Sell, „Beitrag zur Inbetriebnahme und ersten funktionellen und energetischen beurteilung der NEST-W 2.0,“ TU Dresden, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung, Dresden, 2023.
- [7] D. Certo, *Solar Keymark Certificate* Licens No. 011-7S2434 R, <https://www.dincertco.tuv.com/?locale=de>, 2023.
- [8] J. Löser, M. Klemm und A. Hiller, Technische Thermodynamik in ausführlichen Beispielen, München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2018, p. 447.
- [9] A. Brosius und T. Cwiekala, „Fast Semi-analytical Approach for Deep Drawing Processes,“ in *60 Excellent Inventions in Metal Forming*, A. Tekkaya, W. Homberg und A. Brosius, Hrsg., Springer Verlag, 2015.
- [10] A. Brosius, N. Küsters und M. Lenzen, „New method for stress determination based on digital image correlation data,“ *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Bd. 67, Nr. 1, 2018.

- [11] Arlows GmbH, „www.arlows.de/“, Arlows GmbH, [Online]. Available: <https://www.arlows.de/Auspuff-Zubehoer/Sammler/6-in-1-Sammler/6-in-1-Kruemmersammler-Edelstahl-T4-Flansch-42mm::7690.html>. [Zugriff am 1 Februar 2021].
- [12] Stainless Headers Mfg. Inc., „www.racemufflers.com/“, Stainless Headers Mfg. Inc., [Online]. Available: <https://www.racemufflers.com/1-1-2-Primary-8-into-1-Straight-Exit-Merge-Collec-p/8s-1.5-304.htm>. [Zugriff am 1 Februar 2021].
- [13] SAACKE GmbH, „www.saacke.com/“, SAACKE GmbH, [Online]. Available: <https://www2.saacke.com/de/anwendungen/gta-zusatzfeuerungen/>. [Zugriff am 1 Februar 2021].
- [14] V. H. Matthias Hermes, „Qualitätsrückführungsstandard für die Profil- und Rohr-biegetechnik“ (Kurtitel: " QuaBiRu"), 2016.
- [15] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik , „VDI/VDE 3511 Blatt 4 - Technische Temperaturmessung - Strahlungsthermometrie,“ Beuth Verlag, Berlin, 2011-12.

9.2 Normen und Regelwerke

AD2000	AD-2000 Regelwerk, Wesentliche Sicherheitsanforderungen nach der europäischen Druckgeräterichtlinie; VdTÜV (Hrsg.)
AGFW FW 510	AGFW Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., „Arbeitsblatt AGFW FW 510: Anforderungen an das Kreislaufwasser von Industrie- und Fernwärmeheizanlagen sowie Hinweise für den betrieb,“ Frankfurt am Main, Dezember 2013.
DIN EN ISO 6892-1	Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2019
DIN EN ISO 9806	Deutsche Norm, Solarenergie – Thermische Sonnenkollektoren – Prüfverfahren (ISO 9806:2018); Deutsche Fassung EN ISO 9806:2018
DIN EN ISO 24194	Solar energy - Collector fields - Check of performance Sonnenenergie - Kollektorfelder - Überprüfung der Leistungsfähigkeit. Änderung 1 (ISO 24194:2022/DAM 1:2023),". EN ISO 24194:2022/prA1:2023, Berlin (Deutsche Norm), Beuth Verlag GmbH, 2023
VDI 2035 Blatt 1	Verein Deutscher Ingenieure, „Vermeidung von Schäden in Warmwasser-Heizungsanlagen. Steinbildung und wasserseitige Korrosion“; Vorabzug zum Weißdruck geplant April 2021

Richtlinie 2014/68/EU	Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt. (Druckgeräte-Richtlinie)
SKN_N0444R5	SOLAR KEYMARK Scheme Rules, Edition 2021-07-09
VDI 3430	Verein Deutscher Ingenieure, Rotationszugbiegen von Profilen - Rotary draw bending of profiles, 06:2014

