

Abschlussbericht

zum Verbundvorhaben SING - Silicone Fluid Next Generation

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZE	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Teilvorhaben	Loop-Demonstration von HELISOL® XLP; internationale Standardisierung von Silicon-Fluiden in CSP; Untersuchung von Wärmeträgereigenschaften
Förderkennzeichen	03EE5047A
ZE	Wacker Chemie AG (Wacker)
Teilvorhaben	Untersuchungen zum Langzeitverhalten von HELISOL® XLP; insbesondere thermische Stabilität und thermodynamische Eigenschaften
Förderkennzeichen	03EE5047B
ZE	flucon fluid control GmbH (flucon)
Teilvorhaben	Entwicklung und Integration von Viskosität- und Wassergehaltsensoren
Förderkennzeichen	03EE5047C
ZE	Senior Flexonics GmbH (Senior Flexonics)
Teilvorhaben	REPA-Entwicklung und Lebenszyklustest mit HELISOL® XLP sowie Untersuchung einer verbesserten thermischen Isolierung
Förderkennzeichen	03EE5047D
ZE	Dickow Pumpen GmbH & Co. KG (Dickow)
Teilvorhaben	Aufbau/Betrieb mobiler Pumpen- und Wärmeträger-Teststand für siliconölbasierte Wärmeträger bis 450°C
Förderkennzeichen	03EE5047E

ZE TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG (TÜV Nord)
Teilvorhaben Sicherheitsbetrachtungen für Wärmeträger unter Anwendungstemperaturen
Förderkennzeichen 03EE5047F

Autoren

Christoph Hilgert, Dr. Christian Jung, DLR
Dr. Kai Schickedanz, Dr. Maximilian Moxter, Wacker
Simon Hausner, Maik Schröder, flucon
Mirko Saur, Maximilian Conrad, Senior Flexonics
Andreas Russ, Florian Fischer, Dickow
Dr. Christoph Wasserfuhr, TÜV Nord

Förderzeitraum 01.09.2020 – 30.06.2024

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

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel SING - Silicone Fluid Next Generation		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Hilgert, Christoph; Jung, Christian; Schickedanz, Kai; Moxter, Max; Hausner, Simon; Schröder, Maik; Saur, Mirko; Conrad, Maximilian; Russ, Andreas; Fischer; Florian; Wasserfuhr, Christoph	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2024	
	6. Veröffentlichungsdatum 31.08.2024	
	7. Form der Publikation	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 51170 Köln; Wacker Chemie AG, 81737 München; flucon fluid control GmbH, 37431 Bad Lauterberg, Senior Flexonics GmbH, 34121 Kassel; Dickow Pumpen GmbH & Co. KG, 84478 Waldkraiburg; TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG, 22525 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 03EE5047A - F	
	11. Seitenzahl: 80	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 10115 Berlin	13. Literaturangaben: keine	
	14. Tabellen: 7	
	15. Abbildungen: 75	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Jülich, Juli 2024		

Berichtsblatt

8. Kurzfassung

Durch das Projekt SING wurden wichtige Grundlagen für die breite Nutzung von Silicon-basierten Wärmeträgern (SHTF) in Parabolrinnenkraftwerken geschaffen. Die bisher nur abgeschätzte weitere Reduktion der Stromgestehungskosten wurde im Projekt fundiert bestimmt.

Das Projekt SING hatte vier zentrale Schwerpunkte:

1. Die Demonstration des Wärmeträgermediums HELISOL® XLP im Loop-Maßstab bei 440 °C. HELISOL® XLP hat gegenüber den Vorgängerprodukten aus der HELISOL® Familie den Vorteil einen deutlich geringeren Dampfdruck aufzuweisen und kann zudem dauerhaft bei 430 °C betrieben werden. Für die Demonstration wurde der vorhandene Test-Loop „PROMETEO“ auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) verwendet.
2. Die internationale Standardisierung von Silicon-basierten Wärmeträgermedien für die Anwendung in Parabolrinnenkraftwerken. Damit wurde an ein erfolgreiches SolarPACES Project mit dem Namen „Silicone-Based HTF in Parabolic Trough Applications“ angeknüpft. Diese Vorarbeiten waren die Grundlage für die gelungenen Standardisierung von Silicon-basierten Wärmeträgermedien in linienfokussierenden CSP Anwendungen.
3. Die Untersuchung von Wärmeträgereigenschaften unter relevanten Betriebsbedingungen an der Anlage und im Labor, gemäß der Mitteilung des Forschungsnetzwerks Energie. Die genaue Kenntnis der sicherheits- und betriebsrelevanten Fluideigenschaften ist Grundlage für die erfolgreiche Markteinführung.
4. Der Industrie geführte Aufbau eines mobilen Pumpen- und HTF-Teststandes (MoPuW). Diese Einrichtung diene und dient auch zukünftig der Erprobung von HTF-Pumpen im Bereich bis 480 °C, der Wärmeträgereigenschaften und des Anlagenverhalten im Technikums Maßstab. Mit dieser Versuchsanlage wurden zentrale übertragbare Fragestellung wie HTF-Degradation, Pumpen-Beständigkeit, Gasentwicklung und Korrosion untersucht.

19. Schlagwörter

Concentrated Solar Power, CSP, Parabolic Trough Collector, PTC, HELISOL® XLP, Loop Demonstration, Proof of Concept, RotationFlex, Drehflex, Parabolrinnen-Kollektor; Wellschlauch, Flex-hose; Drehdurchführung, REPA, PROMETEO, Siliconöl, Wärmeträgerfluid, HTF, Viskositätssensor, Q-Vis, Wassersensor, H2Online, Hochtemperaturpumpe, MoPuW

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title SING - Silicone Fluid Next Generation	
4. author(s) (family name, first name(s)) Hilgert, Christoph; Jung, Christian; Schickedanz, Kai; Moxter, Max; Hausner, Simon; Schröder, Maik; Saur, Mirko; Conrad, Maximilian; Russ, Andreas; Fischer; Florian; Wasserfuhr, Christoph	5. end of project 30.06.2024
	6. publication date 31.08.2024
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 51170 Köln; Wacker Chemie AG, 81737 München; flucon fluid control GmbH, 37431 Bad Lauterberg, Senior Flexonics GmbH, 34121 Kassel; Dickow Pumpen GmbH & Co. KG, 84478 Waldkraiburg; TÜV NORD Systems GmbH & Co. KG, 22525 Hamburg	9. originator's report no.
	10. reference no. 03EE5047A - F
	11. no. of pages: 80
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 10115 Berlin	13. no. of references: none
	14. no. of tables: 7
	15. no. of figures: 75
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projektträger Jülich, Jülich, July 2024	

Document Control Sheet

18. abstract

The SING project has laid important foundations for the widespread use of silicone-based heat transfer fluids (SHTF) in parabolic trough power plants. The further reduction in the levelized cost of electricity, which had previously only been estimated, was determined in the project.

The SING project had four central focal points:

1. the demonstration of the heat transfer medium HELISOL® XLP on a loop scale at 440 °C. HELISOL® XLP has the advantage over the predecessor products from the HELISOL® family of having a significantly lower vapor pressure and can also be operated permanently at 430 °C. The existing "PROMETEO" test loop at the Plataforma Solar de Almería (PSA) was used for the demonstration.
2. the international standardization of silicone-based heat transfer media for use in parabolic trough power plants. This followed on from a successful SolarPACES project called "Silicone-based HTF in Parabolic Trough Applications". This preliminary work was the basis for the successful standardization of silicone-based heat transfer media in line-focusing CSP applications.
3. the investigation of heat transfer medium properties under relevant operating conditions at the plant and in the laboratory, in accordance with the communication of the Energy Research Network². Precise knowledge of the safety and operationally relevant fluid properties is the basis for a successful market launch.
4. the industry-led construction of a mobile pump and HTF test stand (MoPuW). This facility was and will continue to be used to test HTF pumps in the range up to 480 °C, the heat transfer properties and the system behavior on a pilot plant scale. This test facility was used to investigate key transferable issues such as HTF degradation, pump resistance, gas development and corrosion.

19. keywords

Concentrated Solar Power, CSP, HELISOL® XLP, Loop Demonstration, Proof of Concept, RotationFlex, Drehflex, Parabolic trough collector, Corrugated hose, Flex hose, Swivel joint, Rotary joint, REPA, PROMETEO, HTF, silicone oil, heat transfer fluid, viscosity sensor, Q-Vis, water sensor, H2Online, high temperature pump, MoPuW

20. publisher

21. price

Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung	9
1.1	Aufgabenstellung	9
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	10
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	12
1.4	Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde	14
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14
2	Eingehende Darstellung der Arbeiten aller Partner	15
2.1	Übergeordnete Arbeiten zu AP1(DLR)	15
2.2	Task 1.1 - Anpassung und Installation des Durchflusskalorimeters KONTAS-cp (DLR)	17
2.3	Task1.2 - Auslegung und Einbau eines Mess-Wärmeübertragers (Wacker)	20
2.4	Task1.3 - Entwicklung und Installation von Viskositäts- und Wassergehaltsensoren (flucon, DLR)	24
2.5	Task1.4 - Installation eines Dichtesensors (Wacker, DLR)	33
2.6	Task 2.1 - Befüllung und Herstellung von Betriebsbereitschaft (DLR Ciemat)	33
2.7	Task 2.2 - Solarer Testbetrieb bei 430 °C – „Proof of concept“ (DLR, Ciemat)	34
2.8	Task 2.3 REPA-Entwicklung und Lebenszyklustest mit HELISOL® XLP (Senior)	36
2.9	Task 2.4 Inbetriebnahme und Auswertung von Viskositäts- und Wassergehaltssensor (DLR)	39
2.10	Task 2.5 - Bewertung von Risiken und Kleinstleckagen (TÜV, DLR)	39
2.11	Task 2.6 - Wärmekapazitätsmessung mit Durchflusskalorimeter (DLR)	44
2.12	Task 2.7 - Wärmeübergangsmessungen mit dem Mess-Wärmeübertrager (DLR, Wacker)	45
2.13	Task 2.8 - Hoch aufgelöste Gasanalysen am PROMETEO-Loop (DLR)	45
2.14	Task 3.1 - Untersuchung sicherheitsrelevanter Eigenschaften / Gasentstehung (DLR)	45
2.15	Task 3.2 - Korrelation von Wasserstoffdruck und –konzentration im Wärmeträger (DLR)	46
2.16	Task 3.3 - Studie zu kritischen Reaktionen zwischen HELISOL® XLP und Speichersalz bzw. Wasser (DLR)	48
2.17	Task 3.4 - Korrosions- und Kompatibilitätsanalyse von HELISOL® XLP und Legierungen (TÜV, DLR)	48
2.18	Task 3.5 - Bestimmung von Dichte, Wärmekapazität / Enthalpieänderung und Druck im DLR HTF Labor (DLR)	51
2.19	Task 3.6 - Vergleich der Dichtebestimmungen am PROMETEO mit den Laboruntersuchungen (DLR, Wacker)	54
2.20	Task 4.1 - Auslegung des Pumpen- und HTF-Teststandes (Dickow, DLR, Wacker, TÜV,)	54

Inhaltsverzeichnis

2.21	Task 4.2 - Aufbau und Inbetriebnahme des Pumpen- und HTF-Teststandes (Dickow, DLR)	54
2.22	Task 4.3 - Betrieb des Pumpen- und HTF-Teststandes (DLR, Wacker)	60
2.23	Task 5.2 - Stakeholder Zusammenarbeit (Wacker, DLR)	61
2.24	Task 5.3 - Entwicklung eines internationalen Standards für die Anwendung von SHTF in Parabolrinnenkraftwerken (Wacker, DLR)	62
3	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	62
3.1	Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	63
3.2	Verwertbarkeit des Ergebnisses	63
3.3	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.	64
3.4	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	64

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die folgenden Aufgaben wurden im Rahmen des Vorhabens durch die einzelnen Partner betreut:

DLR

- Anpassung und Installation des Durchflusskalorimeters KONTAS-cp (Task 1.1)
- Befüllung und Herstellung der Betriebsbereitschaft des Prometeo-Loop mit Ciemat (Task 2.1)
- Begleitung des solaren Testbetrieb bei 430 °C – „Proof of concept“ mit Ciemat (Task 2.2)
- Inbetriebnahme und Auswertung des Viskositäts- und des Wassergehaltsensors (Task 2.4)
- Unterstützen der Bewertung von Risiken und Kleinstleckagen (Task 2.5)
- Wärmekapazitätsmessung mit Durchflusskalorimeter (Task 2.6)
- Unterstützung der Wärmeübergangsmessungen (Task 2.7)
- Hoch aufgelöste Gasanalysen am PROMETEO-Loop (Task 2.8)
- Untersuchung sicherheitsrelevanter Eigenschaften / Gasentstehung (Task 3.1)
- Korrelation von Wasserstoffdruck und –konzentration im Wärmeträger (Task 3.2)
- Studie zu kritischen Reaktionen zwischen HELISOL® XLP und Speichersalz bzw. Wasser (Task 3.3)
- Korrosions- und Kompatibilitätsanalyse von HELISOL® XLP und Legierungen (Task 3.4)
- Bestimmung von Dichte, Wärmekapazität / Enthalpieänderung und Druck im Wärmeträgerlabor (Task 3.5)
- Vergleich der Dichtebestimmungen am PROMETEO mit den Laboruntersuchungen (Task 3.6)
- Unterstützung der Auslegung des Pumpen- und HTF-Teststandes (Task 4.1)
- Betrieb des Pumpen- und HTF-Teststandes (Task 4.3)
- Ökonomische Bewertung von HELISOL® XLP in PTC Anwendungen (Task 5.1)
- Austausch mit Interessensgruppen (Task 5.2)
- Entwicklung eines internationalen Standards für die Anwendung von SHTF in Parabolrinnenkraftwerken (Task 5.3)

Wacker

- Produktion und Lieferung von 9 Tonnen HELISOL® XLP für den Betrieb der PROMETEO-Anlage, ca. 400 kg HELISOL® XLP für den Betrieb der MoPuW Anlage.
- Auslegung und Einbau eines Messwärmeübertragers (Task 1.2)
- Installation eines Dichtesensors (Task 1.4)
- Planung und Auswertung der Wärmeübergangsmessungen (Task 2.7)
- Vergleich der Dichtebestimmungen am PROMETEO mit den Laboruntersuchungen (Task 3.6)
- Unterstützung der Auslegung des Pumpen- und HTF-Teststandes (Task 4.1)
- Unterstützung des Betriebs des Pumpen- und HTF-Teststandes mit Analysen (Task 4.3)
- Austausch mit Interessensgruppen (Task 5.2)
- Entwicklung eines internationalen Standards für die Anwendung von SHTF in Parabolrinnenkraftwerken (Task 5.3)

SING Abschlussbericht

flucon

- Entwicklung und Installation von Viskositäts- und Wassergehaltssensoren (Task 1.3)

Senior Flexonics

- REPA-Entwicklung und Lebenszyklustest mit HELISOL® XLP (Task 2.3)

Dickow

- Auslegung und Aufbau des Pumpen- und HTF-Teststandes (Task 4.1 – 4.2)

TÜV Nord

- Bewertung von Risiken und Kleinstleckagen (Task 2.5)
- Unterstützung der Korrosions- und Kompatibilitätsanalyse von HELISOL® XLP und Legierungen (Task 3.4)
- Unterstützung der Auslegung des Pumpen- und HTF-Teststandes (Task 4.1)

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

DLR

Die Laboruntersuchungen zu den Hochtemperatureigenschaften, der Alterung und zur Analytik von HELISOL® XLP bauen auf den Vorgängerprojekten zu synthetischen und zu Siliconöl-basierten Wärmeträgern auf. Insbesondere stehen Experimente zur isothermen Alterung über mehrere 1000 Stunden, Laborautoklaven für druckkontrollierte Untersuchungen und zahlreiche Analysensysteme zur Untersuchung der Zusammensetzung inklusive der Gasgehalte und zur Bestimmung der wichtigsten Eigenschaften (Druck, Dichte, Wärmekapazität, Gaslöslichkeit) bis deutlich oberhalb der vorgesehenen Betriebstemperaturen zur Verfügung.

Die Demonstration des HELISOL® XLP in der bestehenden PROMETEO-Testanlage auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) baut auf einer bestehenden Kooperation zwischen Ciemat und DLR auf. Dabei kommen insbesondere die im Rahmen des Vorhabens SITEF implementierten Anlagenerweiterung dem Vorhaben SING zu Gute. Das Personal vor Ort hat einschlägige Betriebserfahrung im Bereich der Parabolrinnentechnologie und der Anlagentechnik unter Verwendung von HELISOL® XA während des Vorhabens Simon sammeln können. Des Weiteren steht die notwendige Infrastruktur für die Wartung und Instandhaltung der PROMETEO-Testanlage zur Verfügung. Weiterhin steht auf der PSA der REPA-Teststand zur Verfügung, an dem HTF-Betrieb und die REPA-Testzyklen möglich sind.

Wacker

Im BMU geförderten Verbundprojekt SiHTF mit den Kooperationspartnern DLR, Wacker und der TU München wurde eine fundierte Charakterisierung von ausgewählten Siliconölen und siliciumhaltigen Salzschnmelzen durchgeführt, und darauf basierend das Siliconöl-basierte HTF HELISOL® 5A entwickelt, welches Einsatztemperaturen von mindestens 425 °C erlaubt und einem Stockpunkt von <-55 °C aufweist. In weiterer Folge wurden im Rahmen des o.g. Förderprojektes die relevanten chemisch physikalischen Stoffdaten in Abhängigkeit von Temperatur und Druck ermittelt (Dampfdruck, Dichte, Viskosität, spez. Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit etc.) und entsprechende Datenblätter (TDS, MSDS) erstellt. Entsprechende thermische Stabilitätsuntersuchungen wurden durchgeführt und daraus Degradationsmechanismen abgeleitet, um ein Verständnis des Einflusses der chemischen Struktur aufzubauen. Zudem wurden ausführliche Untersuchungen zum Brandverhalten beim TÜV-Nord und bei DMT durchgeführt. Untersucht

SING Abschlussbericht

wurden beispielweise Leckage-Fälle und Zündpunktsbestimmung bei Kontakt auf heißen Oberflächen. Die Siliconöle zeigten dabei im Vergleich zu BP/DPO deutlich gutmütigeres Brandverhalten. Der im Rahmen dieses Vorgängerprojekts SiHTF entwickelte und erprobte Wärmeträger HELISOL® 5A weist gegenüber der bisher großtechnisch als Wärmeträger eingesetzte eutektischen Mischung von Biphenyl (BP) und Diphenylether (Diphenyloxid, DPO) nachweislich erhebliche Vorteile auf. Zu nennen sind deutlich verbesserte Eigenschaften resultierend aus einer höheren Einsatztemperatur, geringerer Neigung zur Freisetzung von Wasserstoff und sehr gute Umweltverträglichkeit im neuwertigen Zustand bei vergleichbaren Kosten.

Im Förderprojekt „SITEF“ (DLR, Wacker, TSK FLAGSOL, SENIOR FLEXONICS, TÜV-Nord) wurde die Demonstration der Funktionalität und Praxistauglichkeit des Silicon-Wärmeträgeröls HELISOL® 5A im Zusammenspiel mit allen spezifischen Komponenten eines Parabolrinnenkraftwerks im Kollektor-Loop Maßstab bei Betriebstemperaturen bis 425 °C (bzw. bis zu 450 °C im Rahmen eines Überhitzungsszenarios). Das Silicon-Wärmeträgeröl HELISOL® 5A zeigt dabei die erwartete Praxistauglichkeit.

Im Förderprojekt „SIMON“ (DLR, Wacker, TSK FLAGSOL, SENIOR FLEXONICS, TÜV-Nord, flucon, Rioglass, CIEMAT) wurde die Demonstration der Funktionalität und Praxistauglichkeit des Silicon-Wärmeträgeröls HELISOL® XA an der im SITEF vorbereiteten PROMETEO Anlage im Kollektor-Loop Maßstab bis 425 °C durchgeführt (bzw. bis zu 450 °C im Rahmen eines Überhitzungsszenarios). Dabei wurde im Speziellen die Freisetzung bei 420 °C betrachtet.

flucon

Die flucon fluid control GmbH mit Sitz in Bad Lauterberg beschäftigt sich mit der Erfassung und Verarbeitung von Flüssigkeitseigenschaften, insbes. von der Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit. Sowohl Entwicklung, Bau und Vertrieb von Messgeräten zur Erfassung dieser Stoffeigenschaften als auch Dienstleistungen – durch Fluidanalysen im hauseigenen Hochdruck-Labor – werden von dem Unternehmen wahrgenommen.

flucons Quarzviskosimeter QVis basiert auf einem als Torsionsschwinger genutzten Quarzkristall und kann sowohl als Labor- als auch als Prozessmessgerät eingesetzt werden. Im Projekt soll eine Hochtemperatur-Variante (QVis HT) entwickelt und qualifiziert werden. Ferner wurde ein neuer Wassersensor (H2Online) auf der Basis einer Impedanzmessung entwickelt und erprobt. Ziel war die Inline-Überwachung von Verunreinigungen und von Alterungseffekten bei Flüssigkeiten geringer Leitfähigkeiten (<1 mS/m).

Senior Flexonics

Durch ständige Weiterentwicklung gemäß den technologischen Eigenschaften konnte sich die Senior Flexonics GmbH mit ihren speziell entwickelten REPA Systemen RotationFlex I und RotationFlex II als einer der führenden Lieferanten auf dem internationalen Markt etablieren. Für den Test der REPAs im nicht durchströmten Zustand verfügt Senior Flexonics über einen eigenen REPA Teststand. Der Einsatz dieser Systeme war bisher auf eine Temperatur von 400 °C begrenzt. Das im Rahmen der Projekte SITEF und SIMON weiterentwickelte REPA System kann bei Temperaturen bis 450 °C betrieben werden. Es bildete die technische Grundlage für die Weiterentwicklung in SING mit der Zielsetzung die Zuverlässigkeit des REPA Systems weiter zu steigern und zu dem die thermische Isolierung weiter zu verbessern.

SING Abschlussbericht

Dickow

Dickow ist ein Pumpenersteller, der bisher Pumpen bis 450 °C Betriebstemperatur entwickelt, herstellt und vertreibt. Dazu betreibt Dickow Teststände im eigenen Haus, die in ihrer maximalen Betriebstemperatur begrenzt sind. Dickow fertigte im Projekt SING eine an diesen Temperaturbereich angepasste Kreiselpumpe, testete sie in einem hierzu aufgebauten Pumpen- und Wärmeträgerteststand (MoPuW) bis 470 °C mit HELISOL® XLP. Die HELISOL®-Grade sind derzeit die einzigen Wärmeträgeröle, die dauerhaft bei Temperaturen im Bereich von 400 bis 450 °C eingesetzt werden können.

TÜV Nord

Der TÜV NORD führt als Sachverständigen-Organisation technische Prüfungen unter sicherheitsrelevanten Aspekten durch. Für CSP-Anlagen mit organischen oder anorganischen Wärmeträgerölen kann der TÜV NORD die gesamte Bandbreite an Prüfdienstleistungen durchführen. Beginnend bei der Entwurfsprüfung des Detail-Engineerings über begleitende Untersuchungen in Herstellerwerken und auf der Baustelle bis hin zu Abnahmeprüfungen der fertigen Anlage deckt der TÜV NORD alle Aspekte ab. Hierbei kann er auf ein breites Expertenwissen zurückgreifen, welches nicht zuletzt beim Bau und Inbetriebnahme der CSP-Anlage ANDASOL 3 erlangt wurde. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Untersuchung des Brand- und Explosionsverhalten von HTF, die seit vielen Jahren in einem eigens hierfür errichteten Brandversuchshaus durchgeführt wurden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

DLR

Der Betrieb der PROMETEO-Anlage erfolgte nach kleineren Reparaturen leicht verspätet im Frühjahr 2021. Erhebliche technische Probleme im Sommer 2022 mit der herkömmlichen HTF Pumpe führten zu einem Betriebsausfall von insgesamt zwei Jahren und verhinderten den weiteren Betrieb von PROMETEO in SING. Technische Probleme am REPA-Teststand bei der Durchführung der REPA-Lebenszyklustests im Rahmen des Vorhabens REPA-Guideline führten zu erheblichem Verzug und somit konnten letztlich die in SING vorgesehen REPA-Tests auf der PSA nicht mehr im Rahmen des Vorhabens SING durchgeführt werden. Der MoPuW-Teststand konnte mit etwa einem halben Jahr Verzug in Betrieb genommen werden. Der nachfolgende Betrieb ab dem Frühjahr 2022 wurde zügig und erfolgreich abgeschlossen. Die Korrosionsuntersuchungen und Gasentwicklungs-untersuchungen wurden parallel durchgeführt.

Das Durchflusskalorimeter KONTAS-cp wurde erfolgreich umgebaut, strukturell verbessert und mit Wasser validiert, konnte aber nicht mehr am PROMETEO eingesetzt werden, weil die Anlage außer Betrieb war.

Der Enthalpie-Loop / Kompressionsloop aus dem SIMON Vorhaben wurde technisch optimiert und für Messungen von HELISOL® XLP genutzt.

Der Teststand für die Wasserstoff-Permeations-Untersuchungen wurde während des Vorhabens thermisch verbessert und Validierungsmessungen für das angeschlossene Sektorfeld Massenspektrometer etabliert. Die Untersuchungen konnten aber nicht final abgeschlossen werden.

Der Testbetrieb mit HELISOL® XLP am MoPuW Teststand zum Zweck der Korrosionsuntersuchungen und des Dauerbetriebs konnte wie geplant umgesetzt werden.

SING Abschlussbericht

Insgesamt führten die Ereignisse zu einer kostenneutralen Verlängerung des Vorhabens um 22 Monate.

Die Lebenszyklustest der Senior-Flexonics-REPAs am REPA-Teststand auf der PSA konnten bis zum Ende des Vorhabens nicht beginnen, weil die Anlage immer wieder technische Problem hatte und über die letzten 1,5 Jahre außer Betrieb war.

Wacker

Wacker-interne Laboruntersuchungen des verwendeten Wärmeträgeröls HELISOL® XLP erfolgten betriebsbegleitend zum Anlagenbetrieb in Spanien (PROMETEO ab Winter 2021) und in Köln (MoPuW ab Frühjahr 2022). Mithilfe etablierter analytischer Methoden wurden die Proben bei Wacker hinsichtlich ihres Alterungszustandes eingehend untersucht und evaluiert.

Die Auslegung und der Aufbau des Mess-Wärmeübertragers wurde aus administrativen und technischen Gründen etwa 2 Jahre verzögert und konnte aufgrund der nicht funktionalen PROMETEO-Anlage nicht mehr im Vorhaben betrieben werden.

Der internationale Standard zur Verwendung von Silicon-basierten Wärmeträgerflüssigkeiten in linienfokussierenden CSP-Anwendungen wurde im Rahmen von SING international vorgeschlagen (2021), zweimal angepasst (2022 und 2023) und letztlich über IEC veröffentlicht (2024).

flucon

Zu Projektbeginn erfolgte die Prozessintegration. Dazu wurde beide Messgeräte (QVis und H2Online) im flucon eigenen Labor im Durchflussbetrieb mit unterschiedlichen Fluiden erprobt und zu dem Zweck eine Messkammer entwickelt und verwendet. Später erfolgte die Erprobung der beiden Sensorsysteme beim DLR im Wärmeträgerlabor mit HELISOL® XLP bei Temperaturen bis 55 °C. Letztlich wurden beide Systeme auf die PSA geliefert und dort mit den Messkammern in den Messbypass integriert.

Senior Flexonics

Zu Projektbeginn erfolgte die Überarbeitung der REPAs und deren thermische Isolierung. Die verbesserten REPA-Baugruppen wurden dann auf dem Senior Flexonics internen Teststand eingebaut und nachfolgend dem Testzyklus unterzogen. Für die zwei hausinternen Testzyklen bei Senior Flexonics wurde das Medium HELISOL® XA und letztlich HELISOL® XLP eingesetzt.

Dickow

Die Auslegungs-, Fertigungs- bzw. Aufbauarbeit an der neuen NMX Pumpe und auch am MoPuW Teststand konnten zügig beginnen und wurden im zweiten Projektjahr abgeschlossen. Der Testbetrieb der Pumpe wurde im dritten Projektjahr erfolgreich abgeschlossen.

TÜV Nord

Die im Vorhaben beschriebenen Freisetzungsversuche zu Kleinstleckagen wurden unter der Leitung des TÜV Nord vollständig und pünktlich durchgeführt. Weiterhin wurde die Sicherheitsarchitektur der MoPuW-Teststand mitgestaltet und die Betriebssicherheit im Wesentlichen unter den Aspekten Brand- und Explosionsschutz sichergestellt bzw. dazu Maßnahmen ergriffen.

1.4 Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde

Vorgängervorhaben

Das Vorhaben SING gründet auf den Arbeitsergebnissen aus den Vorgängervorhaben SIMON, SITEF, EDITOR und SiHTF.

Patentlage

Es wurden keine Patente angemeldet.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Als assoziierte Partner haben zusätzlich Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), TSK Flagsol Engineering GmbH, Rioglass Solar SCH S.L., heat11 GmbH, STEAG Energy Services GmbH und die RWE Renewables GmbH teilgenommen. Zur Kalibrierung eines Coriolis-Sensors bei Temperaturen oberhalb von 300 °C wurde eine Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) eingegangen.

Bei der Erstellung des Siliconölstandards wurde insbesondere mit dem International Electro-technical Commission (IEC) und den beteiligten Gremien kooperiert.

2 *Eingehende Darstellung der Arbeiten aller Partner*

Der jeweils leitend ausführende Partner ist in Klammern hinter den Arbeitspaketen genannt. Beim Mitwirken anderer Partner sind diese nachfolgend entsprechend dem Anteil ihrer Beiträge aufgeführt.

2.1 *Übergeordnete Arbeiten zu AP1(DLR)*

Nachdem die Lage und das Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der neu zu installierenden Messtechnik aus Task 1.1 und 1.2 und deren Anordnung in der PROMETEO-Anlage definiert waren, wurde das Fundament zur Aufstellung der Komponenten gegossen.



Abbildung 1: links: Lage der neuen Messtechnik an der PROMETEO-Anlage (Luftbild), rechts: fertiges Fundament

Die Installation der kurzen Rohrleitungsverbindung zum hydraulischen Anschluss der Messtechnik erfolgte nachfolgend siehe Abbildung 2. Die beiden Messsysteme (Mess-Wärmeübertrager und Wärmekapazitätsmessung) verfügen jeweils über ein eigenes Datenerfassungssystem, an die die übrige Sensorik (flucon-Sensoren) angeschlossen wurde. Die Verbindung zur Messwarte wurde über Ethernet hergestellt.



Abbildung 2: 2"-Rohrleitungsanschlüsse ohne thermische Isolierung für die Verbindung der PROMETEO-Anlage mit dem Mess-Bypass

Das Flusschema des Mess-Bypasses mit allen Bauteilen ist in Abbildung 3 dargestellt.

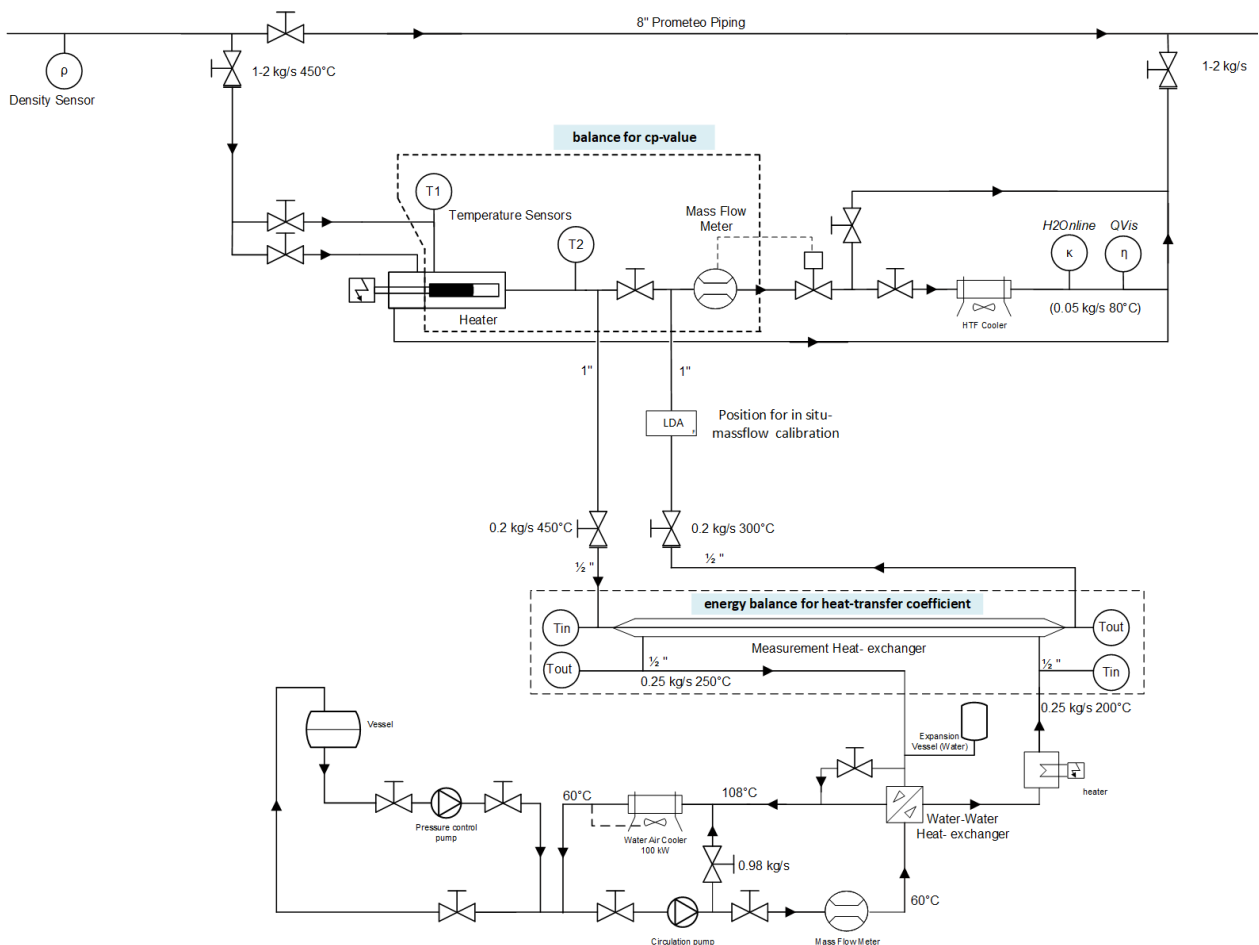


Abbildung 3: PID des gesamten Mess-Bypasses mit allen fünf Messsystemen (KONTAS-cp, Mess-Wärmeübertrager, H2Online, QVis und Dichte-Sensor) und relevanten Bauteilen



Abbildung 4: PID des gesamten Mess-Bypasses mit allen fünf Messsystemen (KONTAS-cp, Mess-Wärmeübertrager, H2Online, QVis und Dichte-Sensor) und relevanten Bauteilen

2.2 Task 1.1 - Anpassung und Installation des Durchflusskalorimeters KONTAS-cp (DLR)

Der Umbau von KONTAS-cp richtete sich nach dem Fortschritt der Auslegung und des Aufbaus des Mess- Wärmeübertragers, weil beide Geräte hinsichtlich, Massenstrom, Geometrie und Temperaturen aufeinander angepasst werden mussten.

Der gesamte Bypass (siehe Abbildung 3, oben) wurde für max. 25 bar ausgelegt. Wobei der Cp-Bypass hinter dem Rückfluss aus dem Mess-Wärmeübertrager auf 350 °C in seiner Temperatur begrenzt wurde. Der restliche Bypass kann bis 450 °C betrieben werden. Dadurch werden Coriolis-Sensor und Regelventil vor zu hohen Temperaturen geschützt. Die Druckbegrenzung auf 25 bar wird über eine lokale Druckmessung am Bypass-Eintritt mit einem automatischen Anlagenstopp bei der Überschreitung von 25 bar kombiniert. Da sich der Bypass in der Solarfeldrückleitung relativ nahe an der Pump- und Expansionseinheit (balance of plant, BOP) befindet, ist im Testbetrieb eine Drucklimit-Überschreitung praktisch nicht möglich, weil im BOP der Druck auf ca. 20 bar geregelt wird, so dass sich der Druck im Bypass auf maximal 23 bar einstellt (Erfahrungswerte aus dem Anlagenbetrieb).

Für den Umbau des Kalorimeters KONTAS-cp hat diese Parameteranpassung folgende Konsequenzen:

- Bestehende Handventile am Eintritt des Kalorimeters wurden durch warmfeste Ventile für 25 bar / 450 °C ausgetauscht
- Die verbaute Rohrleitung musste nicht erneuert werden, da bereits warmfester Stahl (16Mo3) verwendet wird
- Das vorhandene Regelventil kann unter Berücksichtigung der Druck- und Temperaturlimitierung weiterhin eingesetzt werden
- Der (teure) Coriolissensor konnte ebenfalls aufgrund der Druck- und Temperaturlimitierung weiterhin eingesetzt werden (Coriolissensoren für 450 °C sind auf dem Markt nicht verfügbar)

Die generelle Temperatursicherheit (<450 °C) ist durch die PROMETEO-Kollektorregelung automatisch gegeben. Die Begrenzung der Temperatur auf 350 °C im Teilbereich des Mess-Bypasses wird durch den Mess-Wärmeübertrager erreicht. Dieser wird im Heißbetrieb (350 °C – 450 °C) die

Thermoöl-Eintrittstemperatur auf unter 350 °C abkühlen. Ein Temperatursignal detektiert eine mögliche Überschreitung des Temperaturlimits und löst automatisch das Schließen des Bypass-Regelventils und einen Betriebsstopp der PROMETEO-Anlage aus.

Der im Messbypass benötigte Kühler für die zu untersuchenden flucon-Sensoren, der aufgrund seiner hohen Betriebstemperatur eine Sonderanfertigung sein muss, wurde in der DLR-Werkstatt auf der Plataforma Solar de Almería hergestellt (siehe Abbildung 5).

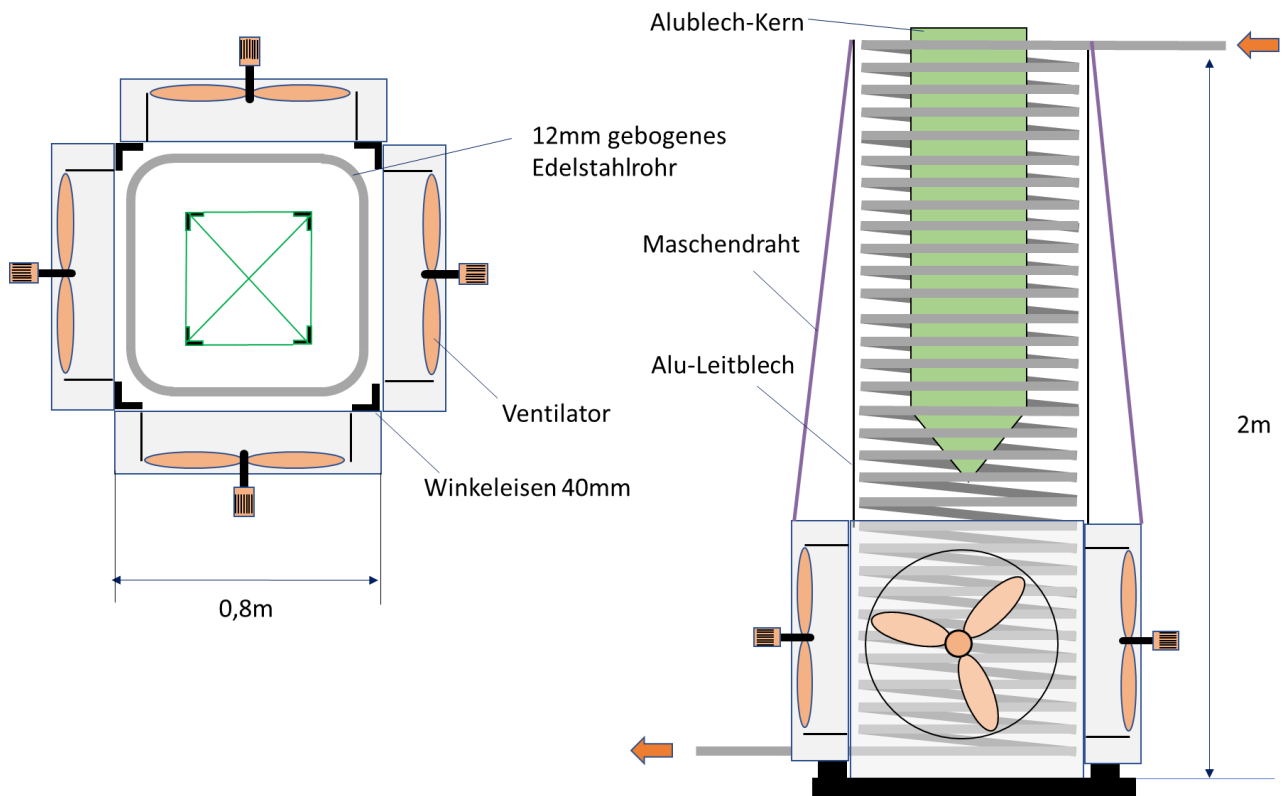


Abbildung 5: Designskizze des SING-Bypass Kühlers

Zur Kalibrierung des Coriolis-Sensors bei Temperaturen oberhalb von 300 °C, wurde eine Kooperation mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) eingegangen, deren LASER-Doppler-Anemometer-Verfahren am Mess-Bypass zum Einsatz gebracht werden kann (siehe LDA-Position in Abbildung 3). Der Umbau von KONTAS-cp wurde so realisiert, dass er den Anforderungen (Ein- und Auslaufstrecken) an die LDA Messung mit der PTB genügt.

Nach dem Abschluss der Umbauarbeiten von KONTAS-cp wurde das Messgerät einer Validierung unterzogen (vgl. Abbildung 6). Hierbei wird die Wärmekapazität von Wasser im Bereich der Umgebungstemperatur gemessen und mit anerkannten Referenzwerten verglichen. Dieser Schritt galt der Identifikation möglicher systematischer Einflüsse auf die Wärmekapazitätsmessung.

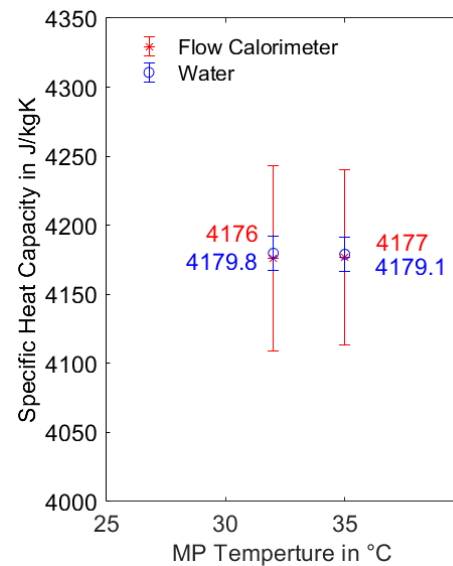


Abbildung 6: links: Durchflusskalorimeter KONTAS-cp bei der Validierungsmessung mit Wasser ohne thermische Isolierung, rechts: Messergebnisse im Vergleich zu den Literaturwerten von Wasser

In Südspanien übliche Netzspannungsschwankungen wirken sich direkt auf die eingestellte Heizleistung des Kalorimeters aus. Zum Ausgleichen dieser Spannungsschwankungen wurde die Leistungsregelung des Kalorimeters so verbessert, dass sich auch unter transienten Netzsituationen mit deutlich reduzierten Leistungsschwankungen bzw. Messunsicherheiten stationäre Leistungszustände einstellen lassen. Abbildung 7 zeigt analoge Leistungsverläufe mit und ohne Verwendung der Leistungsregelung.

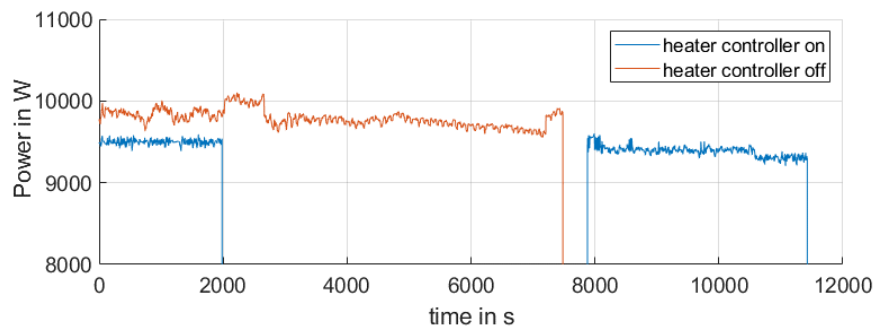


Abbildung 7: Leistungsmessung des Durchflusskalorimeter KONTAS-cp mit und ohne Regelung der elektrischen Leistung der Heizung bei vergleichbaren Netzspannungsschwankungen

Nach dem Abschluss aller Modifikationen und der kalten Inbetriebnahme mit Wasser wurde das Durchflusskalorimeter KONTAS-cp zur PROMETEO-Anlage verbracht und dort angeschlossen (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8: Durchflusskalorimeter KONTAS-cp an der PROMETEO-Anlage

2.3 Task1.2 - Auslegung und Einbau eines Mess-Wärmeübertragers (Wacker)

Ziel des Mess-Wärmeübertrager ist es, den Wärmeübergangskoeffizienten auf der HTF-Seite bei definierter Wärmeübertragungsfläche und Bilanzierung der übertragenen Wärme auf der Wasserseite - bei exakt bekannten Stoffdaten - möglichst genau bei Temperaturen bis 450 °C bestimmen zu können.

Die Vorauslegung des Mess-Wärmeübertragers erfolgte durch Wacker und DLR, während die Detaillauslegung und die Fertigung im Unterauftrag durch heat11 erfolgten. Für das detaillierte Design wurden Wacker-intern die Parameter und Anforderungen an den primären Wärmeübertrager (HTF-Seite – Wasserseite) simuliert und an die Partner übermittelt.

Auf Basis des Labormessstandes (Kompressions-Loop) vom DLR wurden folgende Vorgaben zum Wärmeübertrager berücksichtigt:

- Messung der isobaren Enthalpie-Änderungen
- Wärmetransfer von HTF-Seite auf den Wasserkreislauf bei konstantem Massenstrom (Druck und Temperatur werden auf beiden Seiten bestimmt)
- Bestimmung der übertragenen Wärme über die Temperaturveränderungen auf der Wasserseite und die sehr genau bekannte Wärmekapazität des Wassers.

Der schematische Aufbau des Mess-Wärmeübertragers ist auf dem Prozess und Instrumentierungsdiagramm in Abbildung 9 zu erkennen.

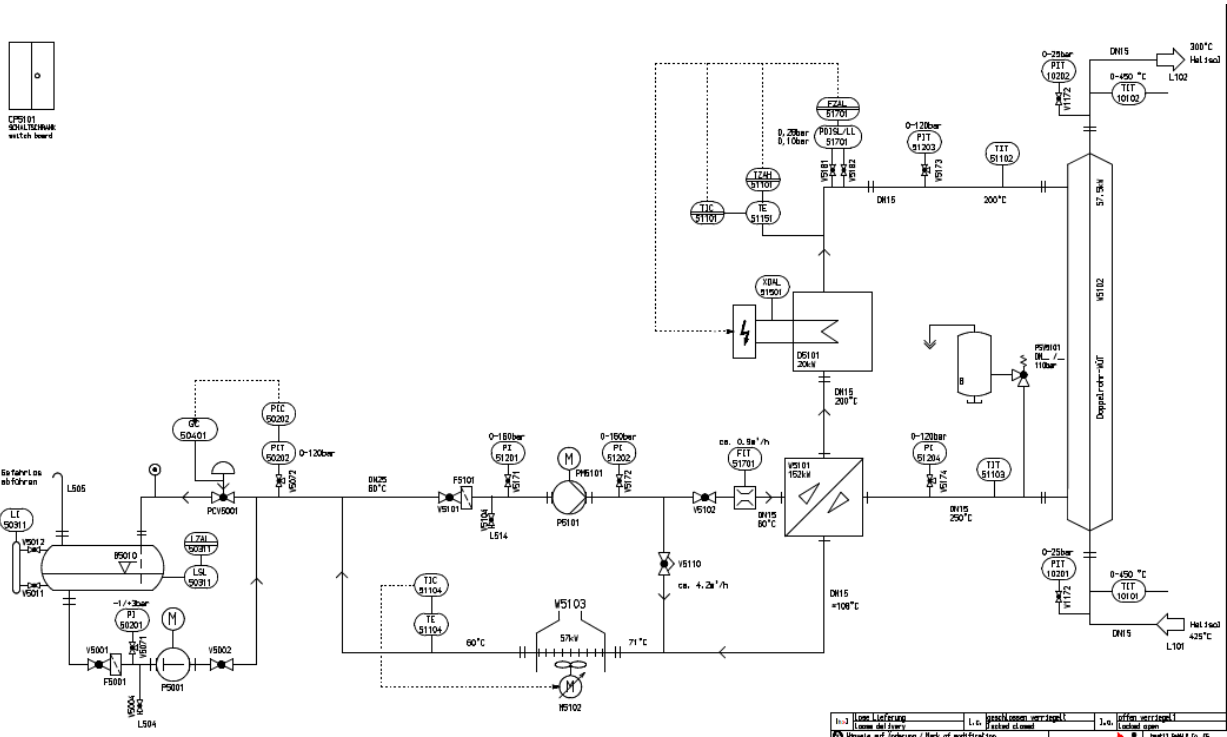


Abbildung 9: PID des Mess-Wärmeüberträgers

Die folgenden Designmerkmale fanden bei der Auslegung Berücksichtigung:

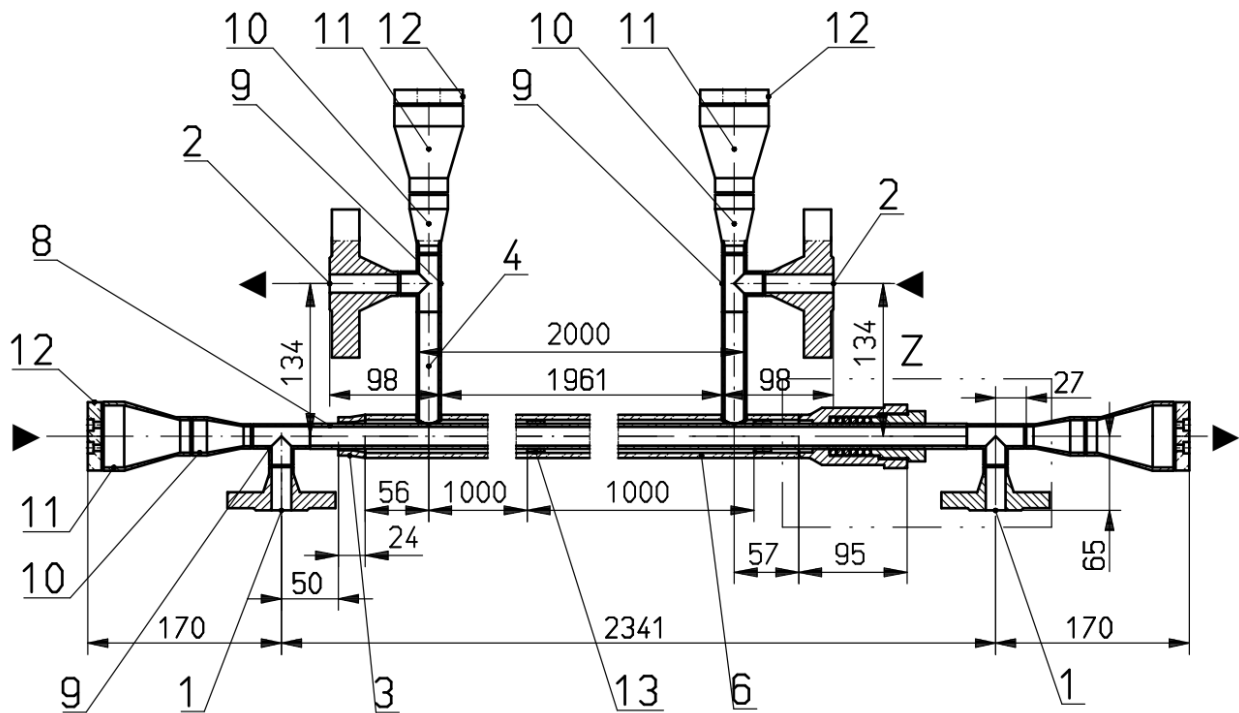
- Ausführung als Doppelrohr-Wärmeübertrager (Edelstahl)
- HELISOL® auf der Rohrseite, Wasser mit Druckaufschlag bis ca. 85 bar auf der Mantelseite (der Druckaufschlag wird benötigt, um ein Sieden des Wassers zu verhindern, weil ein Phasenwechsel die Messgenauigkeit der Versuche beeinträchtigt).
- Der Druckaufschlag wird nicht durch Inertgas, sondern durch eine zusätzliche Druckhaltepumpe auf der Wasserseite eingestellt
- Erwärmung Wasser jeweils von 200 °C auf 250 °C (ergibt Massenströme von ca. 450 kg/h bzw. 900 kg/h)
- Abkühlung auf der HTF-Seite von 425 °C auf bis zu 300 °C ($\Delta T = 125 \text{ °C}$) möglich
- die Planung des Wärmeübertragers bietet Flächenreserve für Fouling-Effekte (obwohl diese nach den bisherigen Erfahrungen bei HELISOL® nicht auftreten sollten)
- Dimensionierung des Wärmeübertragers: vier Rohre DN15/25 mit je 2 m Wärmeübertragungsfläche ($4 \times 0,135 \text{ m}^2$)
- Dämmdicke (60-80 mm Mineralfaser) für die Isolierung, um Wärmeverluste zu minimieren

Die folgenden Anforderungen an die Sensorik wurden umgesetzt:

- HTF-Seite: Druck + Temperatur gemessen vor/nach Wärmeübertrager
- Wasserseite: Druck + Temperatur gemessen vor/nach Wärmeübertrager
- Bestimmung des HTF Massenfluss über einen Coriolis Massenstromsensor.
- Bestimmung des Wasser Massenfluss auf der kalten Seite des Wasserkreislaufs gemessen. Da bei gängigen Massenstromsensoren im Hochtemperaturbereich ($>200 \text{ °C}$) die Messunsicherheit deutliche zunimmt, muss ein weiterer sekundärer Kühlkreislauf eingebaut werden.

Eine HAZOP-Analyse unter Leitung des TÜV Nord galt der Identifizierung und Vermeidung von Risiken beim Betrieb der Anlage. Die Auslegung des Wärmeübertragers erfolgte basierend auf einer detaillierte Unsicherheitsanalyse. Dabei wurden im Speziellen die Temperaturmessstellen des Mess-Wärmeübertragers und dessen thermische Längenkompensation vom DLR erarbeitet. Das detaillierte Design des Wärmeübertragers ist nachfolgend in Abbildung 10 zu sehen. Folgende Anforderungen an das Design wurden umgesetzt:

- Möglichst geringer Wärmeverlust an die Umgebung
- Notwendigkeit eines möglichst kleinen Axialkompensators
- Reduktion der Totvolumen an den Enden
- Bestmögliche Ausführung der thermischen Isolation
- Vermeidung von Flanschen im Bilanzvolumen
- Statische Mischer an Ein- und Auslass
- Vermeidung von Tauchhülsen
- redundante Temperatursensoren



Pos.	St.	Benennung	Maße (↔abgew. Länge)	L [mm]	Norm / Z.-Nr.	Werkstoff / Zeugnis	(St.×) kg
							22.0
16	6	Dichtring	ø-i 22×6			PTFE	0.0
15	1	Stopfbuchsenbrille			Beistellung Kunde	1.4571	0.3
14	1	Stopfbuchse			Beistellung Kunde	1.4571	0.7
13	8	Fl. 15×5		3	EN 10058	1.4571	0.0
12	4	Rd. 60		12	EN 10060	1.4571	1.1
11	4	Reduzierstück, konzentr., DN50/25	ø60.3×2.9/ø33.7×2.6		EN 10253-2-Typ B	1.4571 / W4	1.2
10	4	Reduzierstück, konzentr., DN25/15	ø33.7×2.6/ø21.3×2.0		EN 10253-2-Typ B	1.4571 / W4	0.4
9	4	T-Stück, DN15	ø21.3×2.0		EN 10253-2-Typ A	1.4571 / W4	0.3
8	1	Präzisionsstahlrohr, nahtlos	22×2.8	2291	EN 10305-1	1.4571 / W4	3.0
6	1	Präzisionsstahlrohr, nahtlos	38×4.5	2095	EN 10305-1	1.4571 / W4	7.8
4	2	Rohr, nahtlos, DN15	ø21.3×2.6	100	EN 10216-2	1.4571 / W4	0.1
3	1	Reduzierstück, konzentr., DN32/25	ø42.4×5.0/ø33.7×4.5		EN 10253-2-Typ B	1.4571 / W4	0.1
2	2	Vorschweißflansch, DN15, PN250	ø21.3×2.6		EN 1092-1/11/B/PN250	1.4571 / W9	4.9
1	2	V-Flansch, DN15, PN40	ø21.3×2.0		EN 1092-1/11/B/PN40	1.4571 / W9	2.0

Abbildung 10: oben: Fertigungszeichnung des Mess-Wärmeübertragers mit Stopfbuchse (Z) und Temperaturmessstellen (10, 11, 12), schwarze Pfeile zeigen die Flussrichtung, unten: Stückliste der Einzelteile

Der Aufbau der Mess-Wärmeübertrager mit seiner Peripherie ist in Abbildung 11 dargestellt. Auf der rechten Seite sind die vier in Reihe geschalteten Wärmeübertrager (WÜ) zu erkennen (horizontale Rohre). Der oberste WÜ ist der Mess-Wärmeübertrager, mit der entsprechenden Instrumentierung.

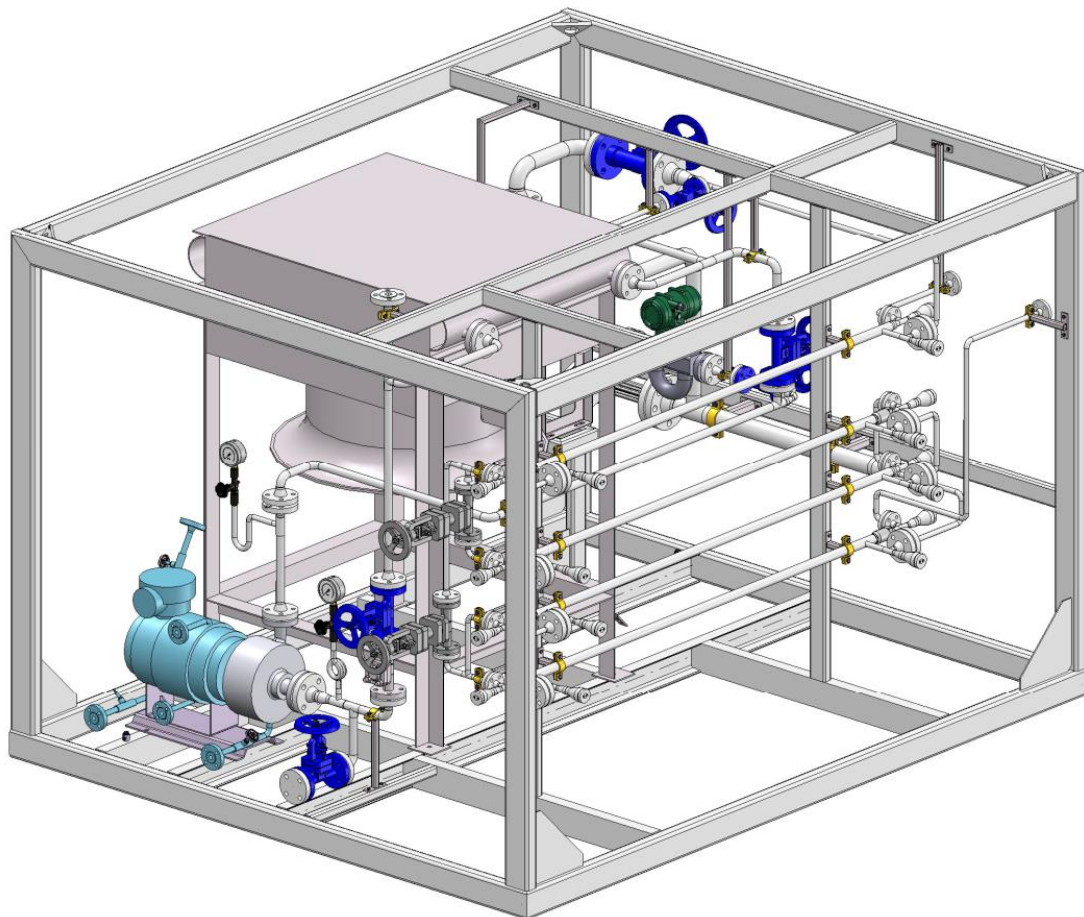


Abbildung 11: 3D CAD Modell des Mess-Wärmeübertragers, Darstellung ohne thermische Isolierung und ohne Druckhalteeinrichtung

Der Mess-Wärmeübertrager wurde in einem Rahmen für den mobilen Einsatz ausgeführt. Dies ermöglicht den Wärmeübertrager nach Abschluss der Arbeiten im SING-Projekt auch an anderen Wärmeträgeranlagen flexibel anzuschließen (z.B. im Rahmen von weiteren Forschungsprojekten), um dort Messungen durchzuführen.



Abbildung 12: links (blau): Durchflusskalorimeter KONTAS-cp, rechts (rot): Mess-Wärmeübertrager an der PROMETEO-Anlage, die hydraulische Verbindung zwischen den Maschinen fehlt noch.

Aufgrund von unterschiedlichen Verzögerungen (höherer Auslegungsaufwand als erwartet, Zugangseinschränkungen während der Corona Pandemie, Lieferengpässen und vor allem erhebliche Fertigungsverzögerungen) konnte der Mess-Wärmeübertrager bis zur Abgabe des Abschlussberichts nicht heiß in Betrieb genommen werden, so dass es noch keine Messergebnisse gibt.

2.4 Task1.3 - Entwicklung und Installation von Viskositäts- und Wassergehaltssensoren (flucon, DLR)

Zur Überwachung der Wärmeträgerqualität bietet sich insbesondere bei Siliconölen die Viskosität an, die hier ein Maß für den Vernetzungsgrad darstellt. Ein Online-Sensor hat das Potential, unerwartete Änderungen frühzeitiger anzuzeigen als bspw. die Untersuchung von Ölproben. Hierdurch kann die Betriebssicherheit des Wärmeträgers erhöht werden.

Der von flucon konzipierte Viskositätssensor $QVis$ wurde zunächst im Labor mit HELISOL® XLP getestet. Für den späteren Messbereich des $QVis$ -Sensors wird aufgrund der größeren Absolutwertdifferenzen in der dynamischen Viskosität ein gemäßiger Temperaturbereich unterhalb 200 °C, bzw. idealerweise $T \leq 80$ °C, präferiert. Das Gerät bzw. dessen HTF führendes Gehäuse (Messkammer) erfüllt dennoch die Anlagendesignparameter von 450 °C und 40 bar, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten.

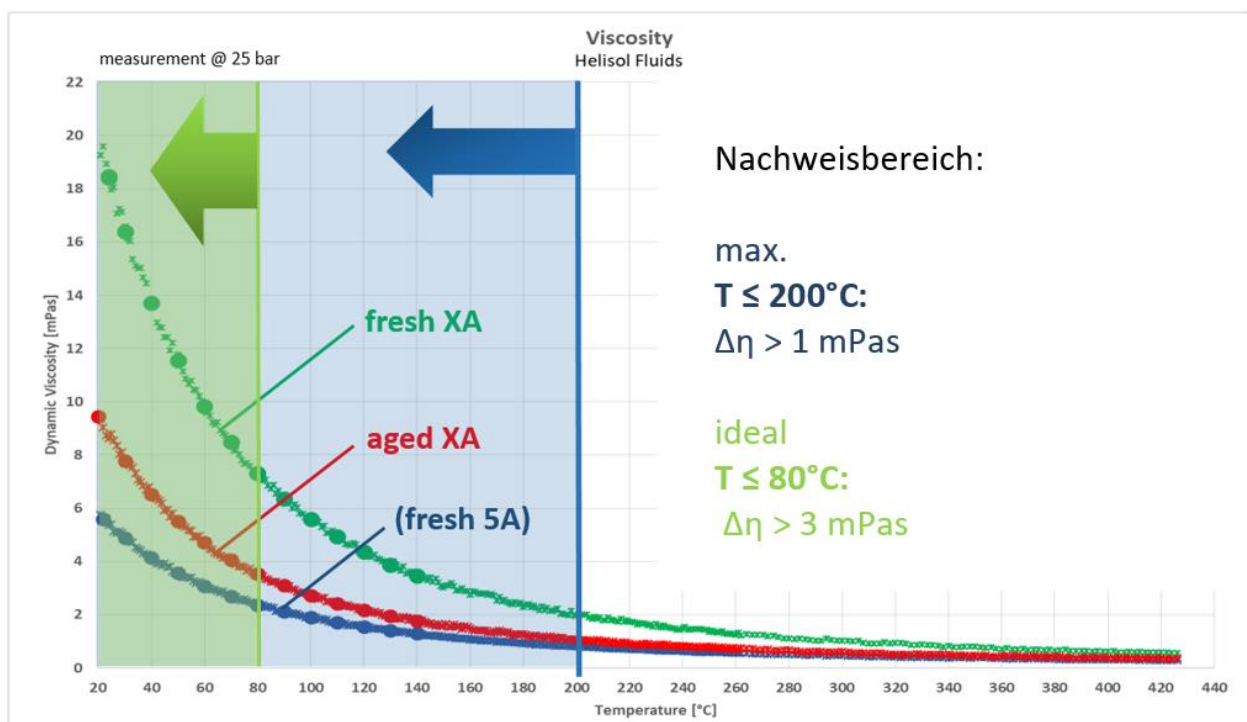


Abbildung 13: Temperaturbereich für Viskositätssensor $QVis$, grün: optimale Betriebstemperatur, blau: gesteigerte Messunsicherheiten zu erwarten

Für die Inline-Viskosimetrie im PROMETEO-Test-Loop wurde daher die Installation in einem gekühlten Bypass vorgesehen (Abbildung 4). Zum Einbau in die Leitung stellt flucon eine sondergefertigte Messkammer bereit. Somit kann über kontinuierliche In-situ-Messungen der Vernetzungsgrad des Wärmeträgeröls überwacht und somit die Betriebssicherheit der Anlage erhöht werden.

Eine weitere mögliche Betriebsunsicherheit in der Prozessführung einer Parabolrinnenanlage stellen Leckagen im Wärmeübertrager dar, infolge derer Wasser in das HTF-System eindringen kann. Um solche Leckagen zu identifizieren, kann die Wasserkonzentration im Wärmeträgers herangezogen werden.

Ziel dieser Arbeiten war es, einen Online-Sensor zu entwickeln und zu qualifizieren, der für die zeitnahe Detektion eines Schadenfalls / Wassereintruchs durch eine dauerhafte Überwachung eingesetzt werden kann. Hierdurch könnten Korrosionsschäden an der Anlage und Degradation des Wärmeträgers verhindert werden, die bei einer periodischen Wasseranalyse anhand entnommener Materialproben, aufgrund der langen Zeiträume zwischen den, bestenfalls monatlich erfolgenden Tests, resultieren könnten. Basierend auf flucons Labor-Messgerät *EPSILON+* wurde hierfür ein Einschraubsensor konzipiert, der für den Prozesseinsatz in durchströmten Rohrleitungen genutzt werden kann. Für die Konstruktion wurden die folgenden Sensor-Spezifikationen gewählt:

- Eintauchtiefe 65 mm,
- Schraubgewinde G 3/4",
- Durchmesser Außenelektrode 22 mm (siehe Abbildung 14).

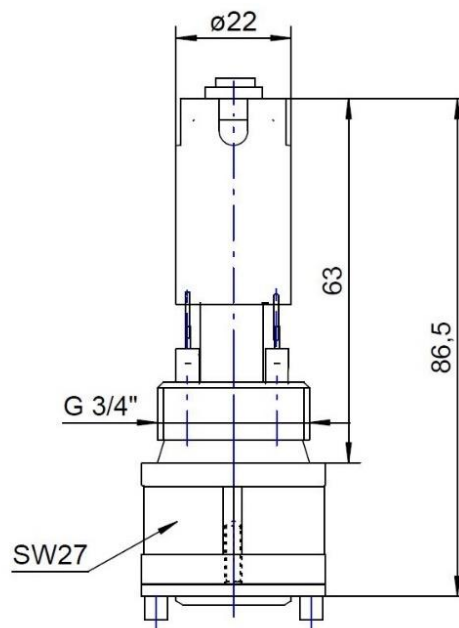


Abbildung 14: Einschraubsensor des Wasserdetektors H2Online

Zur Erleichterung der Sensor-Installation und zur Optimierung der Strömungsbedingungen stellte flucon eine eigens gefertigte Messkammer (siehe Abbildung 15) bereit, die an ihrer Oberseite über eine IG 3/4"-Sensoraufnahme sowie diagonal über 2 x 10-L ÜWM (M16 x 1,5) für eine DN 6 mm-Ermetero-Rohrverbindung auf zwei geeigneten Niveaus verfügt.

Für das System *H2Online* wurden die Rohr-Anschlüsse so konzipiert, dass der Wärmeträger-Eintritt am Messkammerboden erfolgt, um Lufteinschlüsse im Messspalt zu vermeiden. Ein- und Austrittsrohr sind für einen größtmöglichen Fluidaustausch auf radial gegenüberliegenden Kammerseiten positioniert, um den gesamten Querschnitt zu durchströmen und so auch bei geringsten Durchflussraten eine lokale Stagnation zu verhindern. Der entstehende Höhenversatz kann über die Nutzung einer zweiten, baugleichen Messkammer ausgeglichen werden, die für die Integration des Viskositätssensors *QVis* genutzt wird.

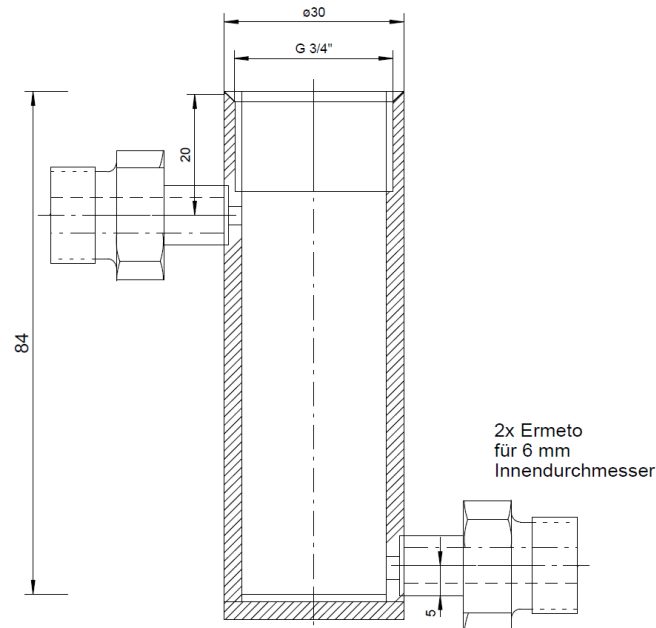


Abbildung 15: Schnittdarstellung der Messkammer für beide flucon-Sensoren

Mit Hilfe des nunmehr axial angeströmten Rohrkondensators des *H2Online* kann im Betrieb kontinuierlich die Dielektrizitätskonstante sowie ergänzend die spezifische elektrische Leitfähigkeit und der Verlustfaktor ($\tan \delta$) als temperaturabhängige Indikatoren der Fluidzusammensetzung erfasst werden.

Um eine hinreichend genaue Aussage über den Wassergehalt im HTF (als Massenanteil) treffen zu können, wurden zunächst nach erfolgter Fertigung Labor-Versuche an equilibrierten HTF-Emulsionen mit unterschiedlicher Wasserkonzentration durchgeführt, die die Herleitung einer Mischungsregel, d.h. eine dann temperaturunabhängige Angabe des Wassergehaltes im HTF ermöglichten.

Folgende Kenngrößen vom im SING-Projekt bereitgestellten Fluid HELISOL® XLP (flucon-Kennung FL2402) wurden im flucon-Fluidlabor bestimmt:

- relative Dielektrizitätskonstante (Permittivität ϵ_r),
- spezifische elektrische Leitfähigkeit bzw. spezifischer Widerstand,
- Verlustfaktor ($\tan \delta$),
- dynamische und kinematische Viskosität,
- Dichte,
- spezifische Wärmekapazität,
- Wärmeleitfähigkeit,
- Thermodynamikpaket (inkl. Schallgeschwindigkeit als Funktion der Temperatur und des Druckes).

Der Schwerpunkt lag dabei auf der Messung der (di)elektrischen Eigenschaften, die zunächst parallel mit dem Laborsystem *EPSILON+* (Kennung KN7025) und dem ersten Prototypsensor *H2Online* (Kennung KN8003) durchgeführt wurden. Für den Inline-Sensor wird ein IG $\frac{3}{4}$ "-Edelstahlgefäß angefertigt, das zur Proben temperierung in einen Block-Thermostaten eingeführt wird. Anschließend wurde durch verschiedene Versuche die Eignung der Messgrößen für eine Indikation des Wassergehalts bewertet.

V1. Reproduzierbarkeitstest und Vorabprüfung der Frischöl-Alterung infolge wiederholter Heizzyklen

Um die thermische Beeinträchtigung des HTFs hinsichtlich seiner Permittivität zu prüfen, wurde in einem Vorversuch eine Probe neues HTF in einem gasdichten Behältnis auf einer Heizplatte

konditioniert. Hierfür wurde die Probe werktags über insgesamt 400 Stunden bei 175 °C gehalten. Über Nacht sowie an Wochenenden kühlt die Probe stets auf Raumtemperatur ab.

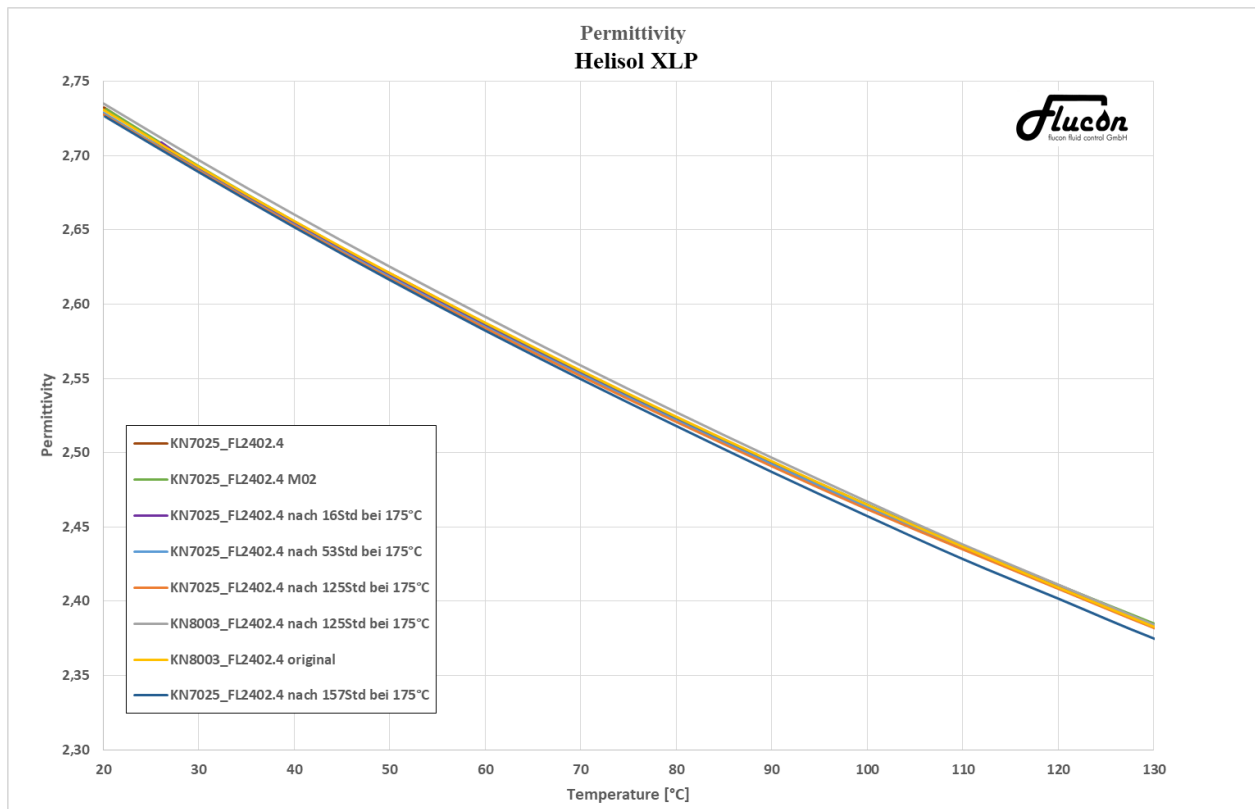


Abbildung 16: Permittivitätsmessung über die Temperatur nach 0 bis 400 Stunden bei 175 °C Auslagerung

Anhand wiederholter Messungen lässt sich eine sehr gute Reproduzierbarkeit der *ESILON+*-Messwerte mit dem neuen Prozesssensor des *H2Online* nachweisen. Ob die Messwerte auch bei einem strömenden Medium reproduziert werden können, wurde in einem Folgeversuch überprüft. Des Weiteren konnte eine sehr geringe Veränderung der Dielektrizitätszahl über die Ölbelastungsstunden nachgewiesen werden.

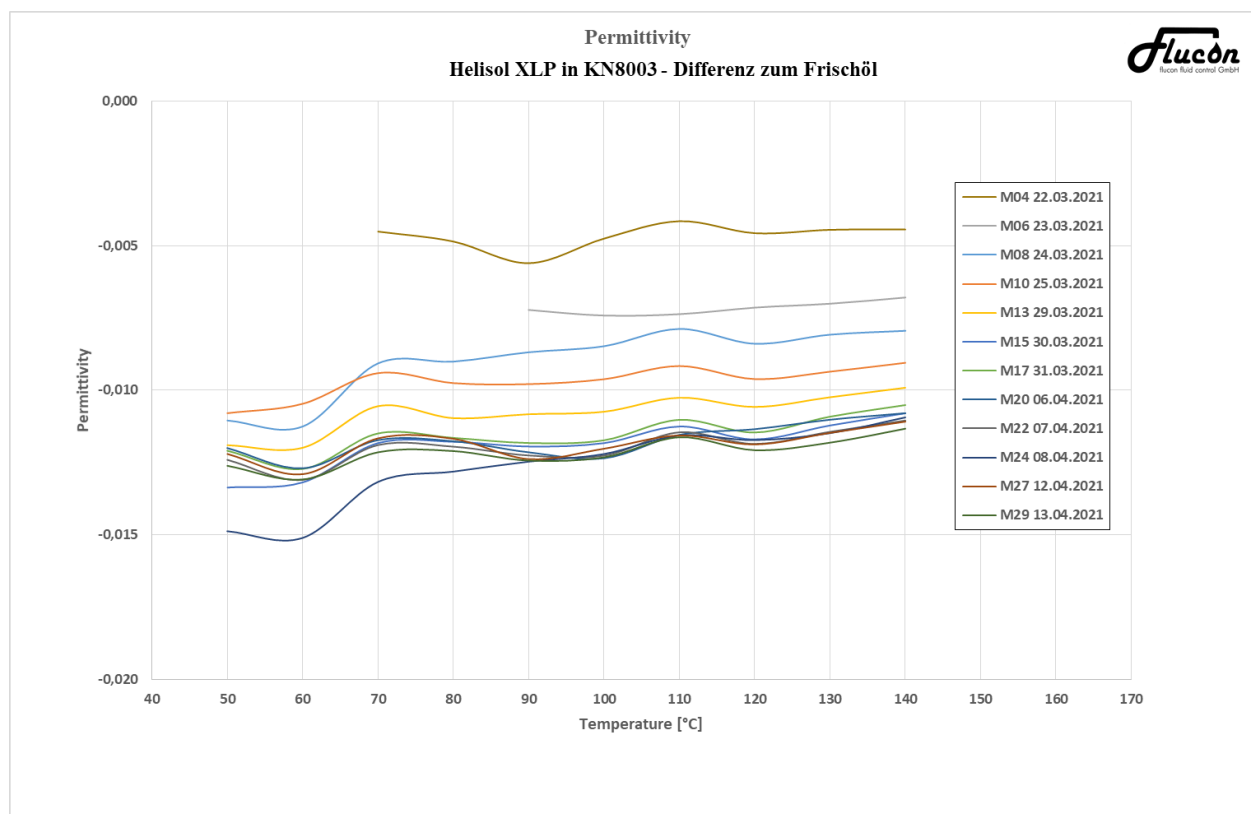


Abbildung 17: Vergleichsmessungen mit *H2Online* an HELISOL® XLP nach zyklischer Temperierung

V2. Analyse von Mischungen aus HELISOL® XLP und definierten Wasseranteilen

Mit einem Hochleistungsmixstab wurden zunächst Wasseranteile von 0,034 bis 1,12% (m/m) in HELISOL® XLP eingetragen und anschließend die Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften vorgenommen. Hierfür kamen sowohl der Prototyp *H2Online* als auch ein Referenzsystem *EPSILON+* zum Einsatz.

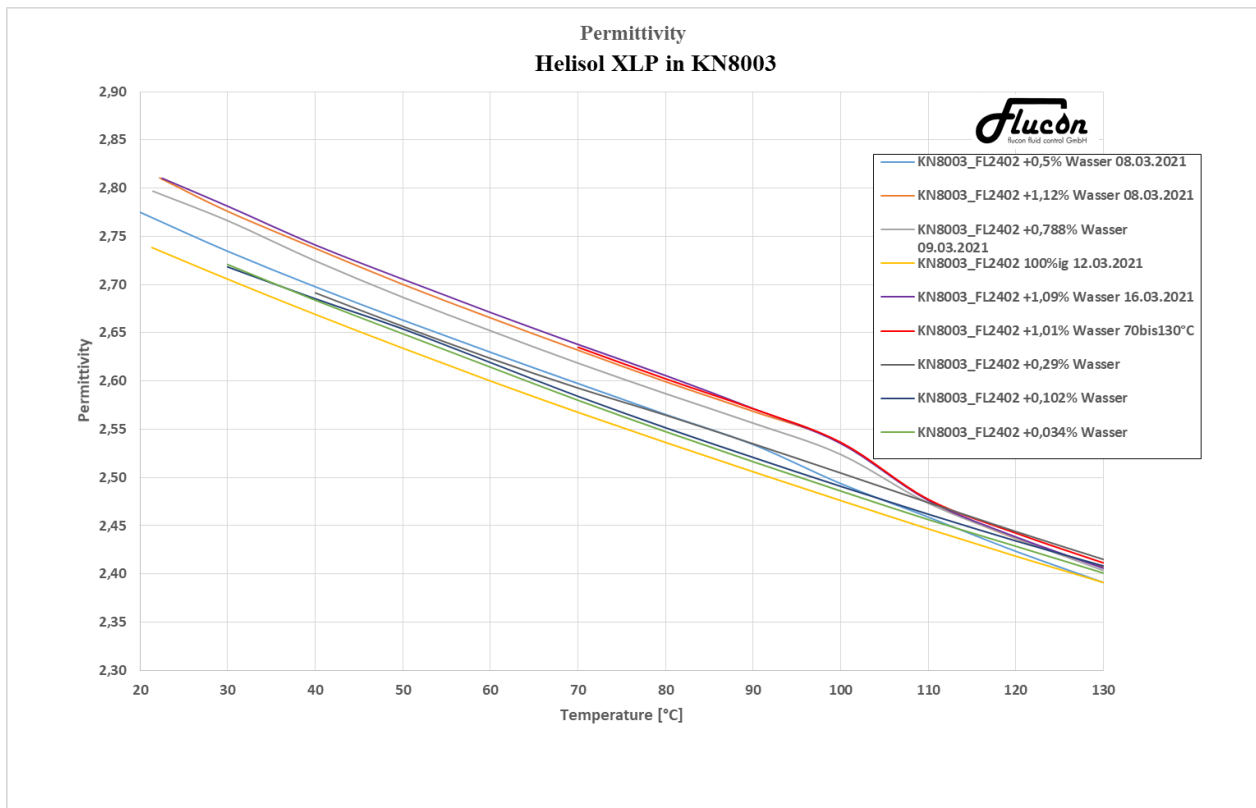


Abbildung 18: H2Online-Permittivitätsmessung über die Temperatur mit variierenden Wasseranteilen

Durch beide Messsysteme kann eine einwandfreie Korrelation der Permittivität mit der Höhe des Wasseranteils über die Temperatur nachgewiesen werden. Die spezifische Leitfähigkeit ist hingegen nur bedingt als Indikator für die Wasserkonzentration in der Größenordnung 0,0 bis 3,0% (m/m) geeignet. Als Grund hierfür wurde vermutet, dass das Wasser im Siloxan z.T. eingekapselt wird und daher im Elektrodenspalt nicht uneingeschränkt intermolekular wirksam werden kann.

Wiederholungsmessungen mit dem Messsystem *H2Online* KN8003 können die gefundenen Ergebnisse der Permittivität bestätigen. Voraussetzung hierfür war die Befüllung mit einer Frischprobe, da das Wasser infolge der Temperierung teilweise ausdampft. Weiterhin ist festzustellen, dass die Messung oberhalb von 100 °C (Siedepunkt des Wassers) durch zunehmende Signalunruhe erschwert wird. Dieser Effekt konnte durch Erhöhung des Druckes (oberhalb des Dampfdruckes) beseitigt werden. Für den Prozesseinsatz wird jedoch eine Messung bei $T \leq 80$ °C angestrebt, analog zum Viskositätssensor QVis.

Nachfolgend wurde die Auflösungsgrenze des Messverfahrens experimentell ermittelt. Als Ziel für den sensorischen Nachweis wurde ein Zehntel ‰ (0,01% (m/m)) festgelegt. Ferner wurden Messungen mit strömenden Proben vorgenommen, um zu prüfen, ob die Ergebnisse der stagnierenden Proben ebenfalls reproduziert werden können. Die Durchführung der Vergleichsmessungen in einem abgeschlossenen Kreislauf erfolgte beim DLR. Dazu wurde das *H2Online*-System zusammen mit dem Q-Vis-Viskosimeter zum DLR geschickt. Abbildung 19 zeigt das Messsystem.

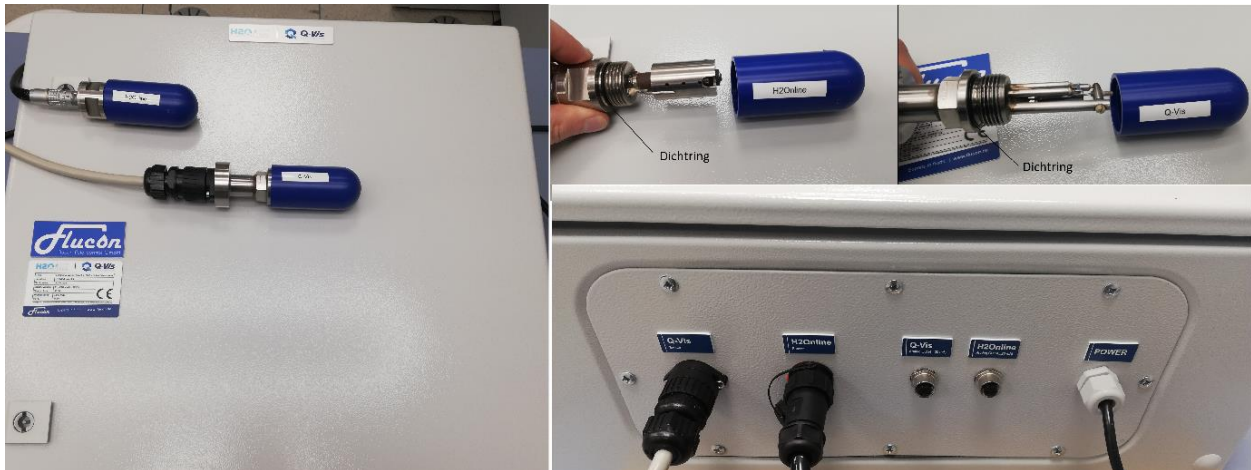


Abbildung 19: Die von flucon and das DLR verschickte Messsysteme H2Online und Q-Vis

Im Wärmeträgerlabor des DLR in Köln wurden die von flucon gelieferten Sensoren in einen temperierbaren Pumpkreislauf integriert. Der Aufbau gestattete das Anströmen der Sensoren mit feuchteconditioniertem HELISOL® XLP bei einer definierten Temperatur. Ferner konnten jederzeit HTF Proben entnommen und mit coulometrischer Karl-Fischer-Titration bzgl. des Wassergehalts und bzgl. der Viskosität (zzgl. Dichte) mittels Stabinger-Viskosimeter als Referenzmethoden untersucht werden.

Der Feuchtegehalt konnte mittels Trockenmittel auf praktisch Null und durch die Zugabe von wasserhaltigem Wärmeträger dosiert erhöht werden. Durch die Zugabe von Wasser war die Simulation eines plötzlichen Wassereintruchs möglich. Nach der Inbetriebnahme wurde ein Testprogramm durch das DLR in Abstimmung mit flucon durchgeführt. Der eigens für die Messungen beim DLR in Köln aufgebaute Kreislauf ist in Abbildung 20 dargestellt. Der Kreislauf bestehend aus einem temperierten Vorlagegefäß mit integrierter Rührung sowie einem Abgang zu einer Laborkreiselpumpe, die das konditionierte Fluid durch die beiden Sensoren zurück in die Vorlage fördert. Der Aufbau wurde mehrfach optimiert bis eine blasenfreie Förderung erreicht wurde. Die Sensoren wurden schließlich auf dem Kopf stehend betrieben, um eine Ansammlung von Gas in den Sensorarmaturen zu verhindern.



Abbildung 20: Testaufbau beim DLR für flucon-Messsysteme H2Online und Q-Vis, links: erste Version vom 6.2.2023 – Sensoren aufrecht montiert, rechts: letzte Version vom 10.5.2023 – Sensoren kopfstehend, mit thermischer Isolierung

Diese Sensororientierung wirkte sich auf die Messungen des QVis aus, das nach der Drehung deutlich höhere Viskositätswerte als zuvor anzeigte (s. Abbildung 21).

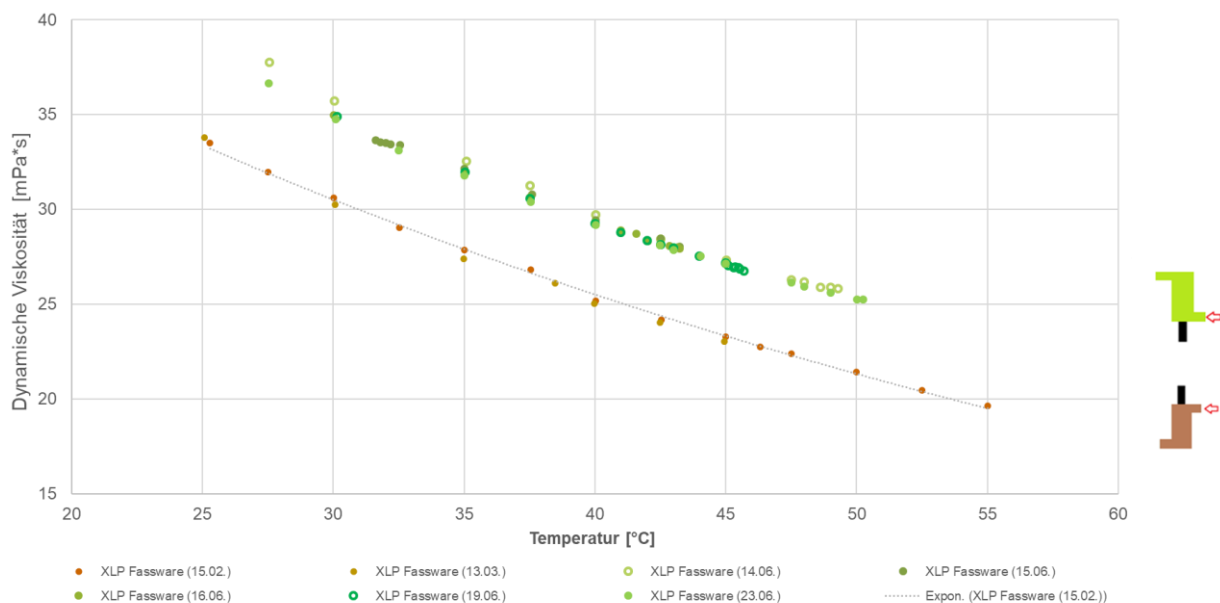


Abbildung 21: Dynamische Viskositätsmessung von HELISOL® XLP (Fassware) mit dem QVis je nach Orientierung des Sensors (grün = auf dem Kopf stehend)

Die Messungen des H2Online-Sensors wurden zunächst mit einer Karl-Fischer-Titration (Ofenmethode) verglichen. Dies geschah anhand der Messungen von regulär feuchter HELISOL® XLP Fassware sowie nach Trocknung desselben Siliconöls mittels Molekularsieb. Die Messungen des H2Online Sensors weichen bei dem normal feuchten Siliconöl etwas von der Karl-Fischer-Titration ab (s. Tabelle 1), liegen jedoch in der gleichen Größenordnung. Bei voll getrocknetem Siliconöl ließ sich mit der verwendeten Kalibrierung kein Wassergehalt mit dem Sensor feststellen. Dessen Messwert „Epsilon R“ lag deutlich unterhalb der Werte im Vergleich zu dem normal feuchten Öl.

Tabelle 1 Vergleichende Feuchtemessungen von normal feuchtem und getrocknetem HELISOL® XLP mit Karl-Fischer-Titration (KF) und mit dem H2Online-Sensor

		KF Ofenmethode		Sensor H2Online		Version
		Temp. [°C]	Wasser [ppm]	Epsilon R	H2O	
HELISOL® XLP	15.02.2023 10:45	32,7	106,9	2,6854	0,155	V1
	15.02.2023 14:45	56	95,5	2,6513	0,1084	V1
	16.02.2023 10:45	32,7	89,9	2,6854	0,1548	V1
	13.03.2023 10:55	37	87,1	2,6690	0,1135	V1
	13.03.2023 13:55	43,1	89,3	2,6473	0,0888	V1
	17.03.2023 11:30	34,4	80,05	2,6789	0,1460	V1
	22.03.2023 11:45	34,8	64,74	2,6763	0,0976	V1
	22.03.2023 14:30	35,5	53,48	2,6749	0,1325	V1
HELISOL® XLP getrocknet	28.03.2023 10:45	38,8	45,2	2,6463	---	V2
	28.03.2023 14:00	43,8	32,9	2,6324	---	V2
	31.03.2023	22	34,9			
	31.03.2023 11:45	38,3	64,2	2,6475	---	V3
	04.03.2023 13:30	42,1	34,1	2,6315	---	V3b
	13.04.2023 14:20	36,0	Keine Daten	2,6512	---	V4

Die eigentliche Aufgabe des H2Online ist jedoch keine möglichst exakte Bestimmung des Wassergehalts, sondern die zuverlässige Detektion von höheren Wasserkonzentrationen. Daher wurden vor allem Messungen mit erhöhtem Wasserzusatz oberhalb der Löslichkeitsgrenze im Öl

durchgeführt (s. Abbildung 22). Hier ist keine repräsentative Probenentnahme und somit keine Vergleichsuntersuchung mit der Karl-Fischer-Titration mehr möglich, weil das Wasser nicht mehr vollständig in Lösung geht.

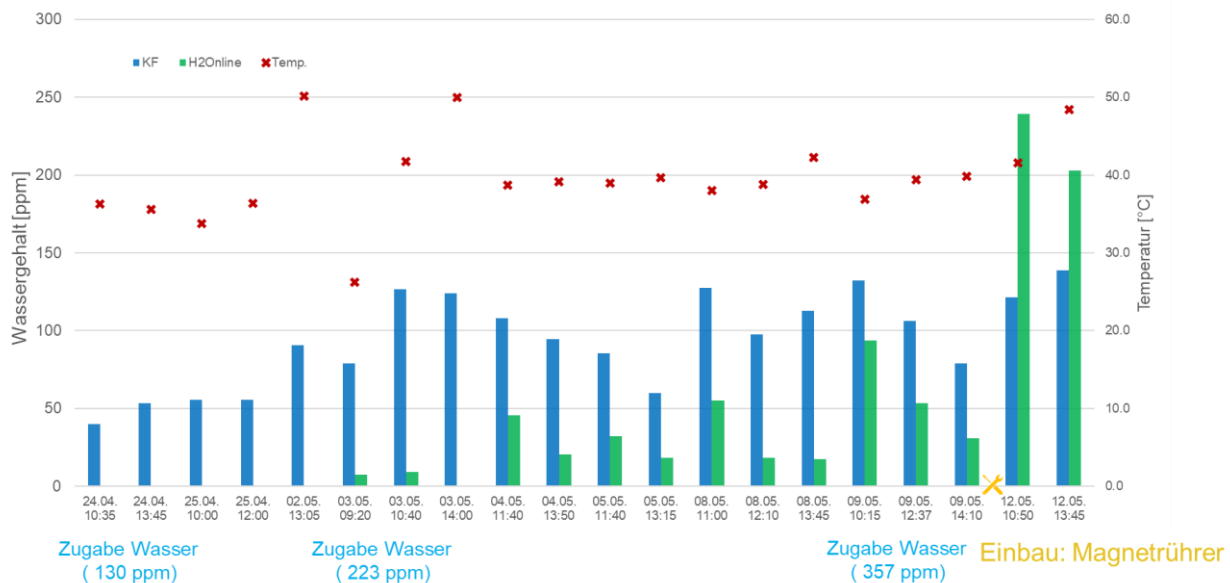


Abbildung 22: Vergleichende Feuchtemessungen an HELISOL® XLP mit Karl-Fischer-Titration (KF) und mit dem H2Online-Sensor bei zunehmender Zugabe von Reinstwasser (zuletzt bei zusätzlichem Einbau eines Magnetrührers zur Verteilung des ungelösten Wassers im Vorlagegefäß)

Der Vergleich zeigt, dass die Karl-Fischer-Titration ab einer bestimmten Wasserzugabe keine weitere Zunahme des Wasserbefunds anzeigt, was aufgrund des Erreichens einer gesättigten Lösung zu erwarten ist. Beide Messverfahren zeigen allerdings ein Nachlassen der Wasserkonzentration nach einer Zugabe an. Vermutlich ist zunächst Wasser im Öl dispergiert und setzt sich in der Folgezeit an Oberflächen der Apparatur ab. Nach Einbau eines zusätzlichen Rührers stiegen die Wasserbefunde bei beiden Methoden deutlich an, wobei der H2Online-Sensor erwartungsgemäß deutlich stärker reagiert, was aufgrund des unmittelbaren Kontakts mit der durchmischten Probe zu erwarten ist. Die Messungen waren im Labor auf maximal 60 °C begrenzt, da die eingesetzte Pumpe nicht mit höheren Temperaturen kompatibel war. Bis zu dieser Temperatur scheint der H2Online gut geeignet, um die Gegenwart von nicht gelöstem Wasser gegenüber einem normalen Wassergehalt anzuzeigen.

Der QVis-Sensor reagierte plausibel auf temperaturbedingte Viskositätsänderungen. Wobei sich herausstellte, dass die Kalibrierung in der genutzten Einbaulage durchgeführt werden sollte.

Die beiden Messsysteme wurden für die Messungen mit HELISOL® XLP im PROMETEO-Kreislauf an das Messsystem KONTAS-cp angebaut und hydraulisch verbunden. Abbildung 23 zeigt den Aufbau während der Installation.



Abbildung 23: H2Online-System und Q-Vis-Viskosimeter während der Installation an KONTAS-cp

Aufgrund der oben genannten Verzögerungen konnten die beiden flucon Messsysteme bis zur Abgabe des Abschlussberichts nicht bei 80 °C mit HELISOL® XLP im PROMETEO Kreislauf in Betrieb genommen werden, so dass es noch keine Messergebnisse mit diesem Aufbau gibt.

2.5 Task1.4 - Installation eines Dichtesensors (Wacker, DLR)

Die Dichte von HELISOL® XLP ist bei hohen Temperaturen voraussichtlich zunehmend druckabhängig. Um die Dichte online unter technischen Betriebsbedingungen messen zu können, sollte am südlichen Kollektorausstritt der PROMETEO-Anlage ein nicht-invasiver radiometrischer Dichtesensor installiert werden. Die Beschaffung des Dichtesensors sollte durch Wacker erfolgen. Einbau und Kalibrierung waren durch den Lieferanten vor Ort vorgesehen. Die Erfassung und Aufbereitung der Feldmessdaten der Dichtemessung sollte durch das DLR erfolgen, während die Diskussion der Ergebnisse in Zusammenarbeit mit Wacker vorgesehen war. Die Tatsache, dass der Sensor einen Gamma-Strahler enthält, machte die administrativen Erfordernisse um ein Vielfaches aufwendiger als eingangs erwartet. Letztlich musste diese Aktivität abgebrochen werden. Man entschied sich innerhalb der Projektpartner diese Aktivität nicht weiter zu verfolgen, auch weil der Aufbau für die isobare Dichtemessung in Köln beim DLR zwischenzeitlich zuverlässige Ergebnisse lieferte.

2.6 Task 2.1 - Befüllung und Herstellung von Betriebsbereitschaft (DLR Ciemat)

Der PROMETEO-Test-Loop wurde für den Betrieb vorbereitet. Dazu wurde die mit HELISOL® XA gefüllte Anlage entleert und defekte Absorberrohre durch neuwertige ausgetauscht. Weitere Absorberrohre wurden zwecks der Analyse der Wasserstoffbeladung der Getter an RIOGLASS

übermittelt (Aktivität aus SIMON-Projekt). Ferner wurden alle Verschleißteile kontrolliert und kleinere Reparaturen durchgeführt. Abschließend wurde die Anlage mit HELISOL® XLP befüllt, Feuchtigkeit ausgetrieben und die Stickstoffüberlagerung aufgebracht. Vor dem ersten Betrieb Mitte Februar 2021 wurde eine initiale HTF Probe (Nullprobe) gezogen und an Wacker und das DLR HTF-Labor übermittelt.

2.7 Task 2.2 - Solarer Testbetrieb bei 430 °C – „Proof of concept“ (DLR, Ciemat

Der erste solare Betrieb mit HELISOL® XLP wurde am 16. Februar 2021 begonnen. Nachfolgend wurde die Anlage an allen sonnigen Tagen betrieben und erreichte im Mai 2022, 296 Stunden solaren Betrieb bei 425 °C und 1189 solare Betriebsstunden insgesamt. Im Sommer 2021 wurde die Betriebstemperatur auf 440 °C erhöht. Neben kleinen Reparaturen an der Anlage selbst verlief der Betrieb mit HELISOL® XLP bis dahin grundlegend unauffällig.

Seit der beabsichtigten Dekompression zum Austausch des HTF (Winter 2020 2021) wurde die Anlage als geschlossenes System betrieben. Die Gaskonzentrationen hatten sich seit der durch die Dekompression und erneute Befüllung mit Stickstoff bedingten Konzentrationsabnahme nicht signifikant verändert.

Das Gaspolster über dem Öl enthielt Anfang April 2022 mehr als 95% Stickstoff und der Wassergehalt des Wärmeträgers hatte auf unter 10 ppm abgenommen (DLR-Messung). Im April 2022 wurde die Anlage zum Austausch der Wärmeträgerpumpe außer Betrieb genommen. Die bis dahin gewonnenen Gas- und HTF-Proben sind in Tabelle 2 gelistet.

Tabelle 2: Informationen zu den PROMETEO Fluidproben

Probenkenndaten	Entnahme	Betrieb / Stunden	bei 440 °C / Stunden
DRIED HELISOL PSA_PROMETEO_SING	04.02.2021	0	0
PROMETEO_3:09 H @ 425°C_24:15 OF OPERATION		24	3
PROMETEO_19:22 H @ 425°C_87:50 H OF OPERATION	22.03.2021	87	19
PROMETEO_36:16 H @ 425°C_165:57 H OF OPERATION	19.04.2021	165	36
PROMETEO_99 H @ 425°C_381 H OF OPERATION	20.06.2021	381	99
HELISOL XA Prometeo_128 h_469 h OP_09.07.2021	09.07.2021	469	128
PROMETEO_164 H @ 425°C_614 H OF OPERATION	08.09.2021	614	164
PROMETEO_186 H @ 425°C_723 H OF OPERATION	11.10.2021	723	186
HELISOL XA Prometeo_195 h_778 h OP_25.10.2021	25.10.2021	778	195
PROMETE(BLAU)_209 H / 876 H_JJT160304715 / 09-12-21	13.12.2021	876	209
PROMETEO 219 h / 921 h_18.01.2022	18.01.2022	921	219
PROMETEO 230 h / 961 h_01.02.2022	01.02.2022	961	230
PROMETEO 280 h / 1125 h_07.04.2022_JJT160304715	01.04.2022	1125	278

Die Ergebnisse der HTF- und Gas-Analysen sind nachfolgend dargestellt.

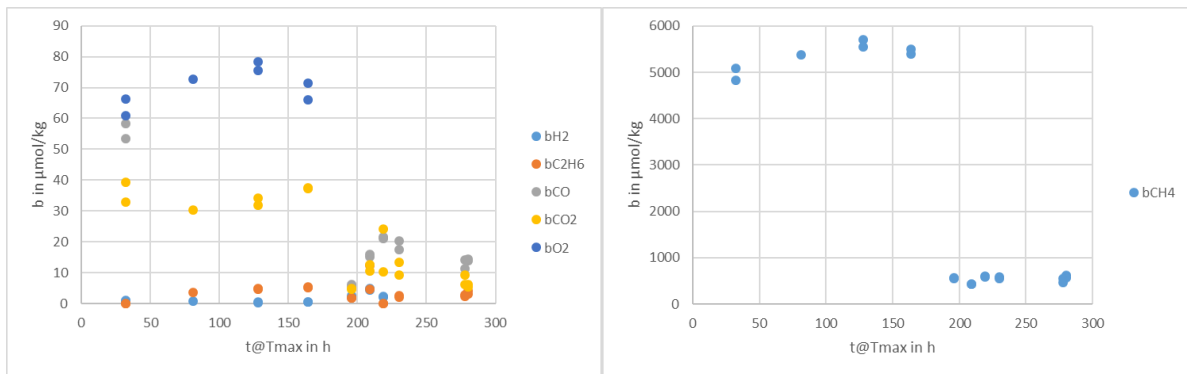


Abbildung 24: Molare Konzentrationen gelöster Gase in den Wärmeträgerproben aus der Durchflusentnahmestelle am PROMETEO.

Seitens Wacker wurden weitere Parameter der Ölproben untersucht. In den ersten 100 Betriebsstunden sank die Viskosität von 33 mPa s auf ca. 16 mPa s aufgrund der Äquilibrierung und blieb später nahezu konstant.

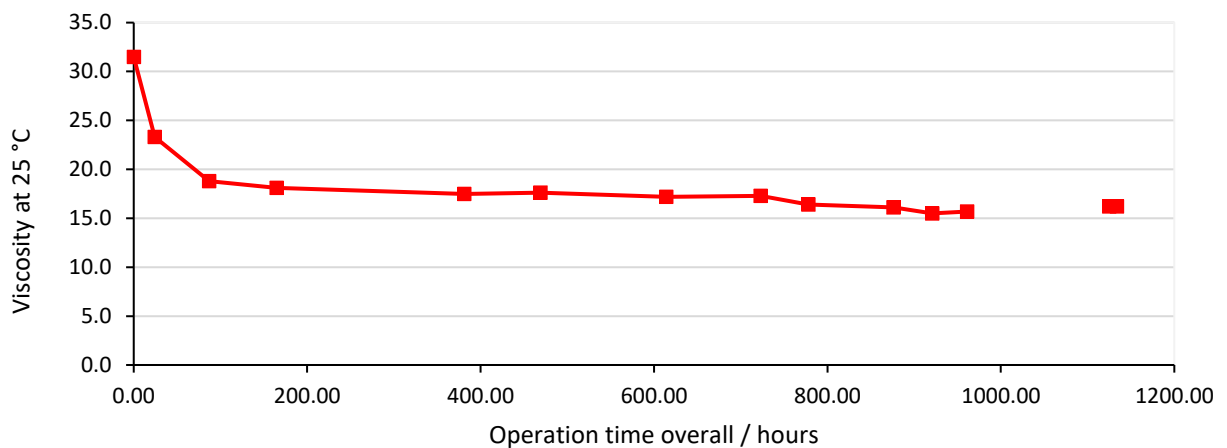


Abbildung 25: Verlauf der Viskositäten aus den PROMETEO Fluidproben

Auch der Flammpunkt sank von initial 120 °C auf ca. 70 °C in den ersten 100 Betriebsstunden und blieb dann über den gesamten restlichen Betriebszeitraum konstant. Dieser Verlauf spiegelt die Äquilibrierung wider, wie es anhand der vorangegangenen Labormessungen zu erwarten war.

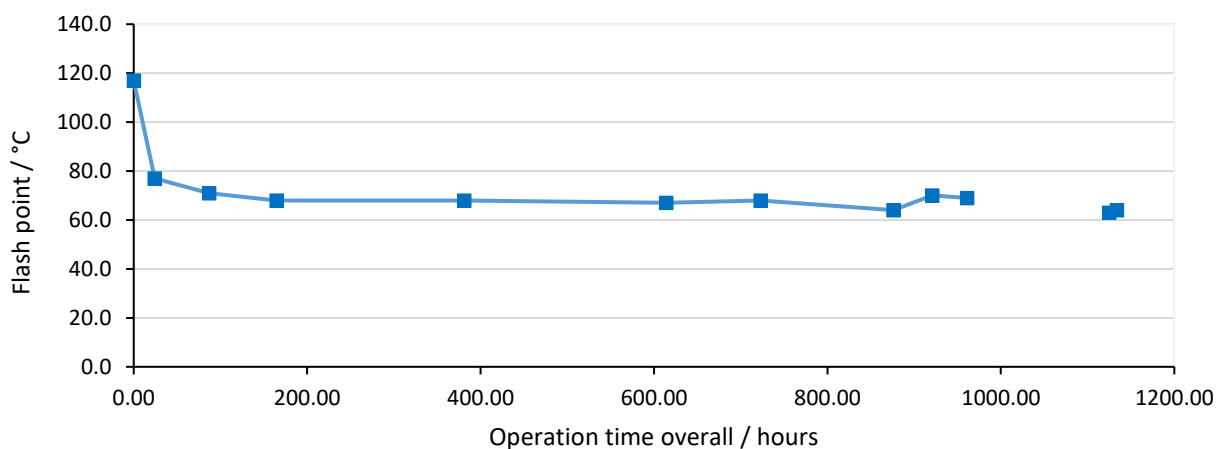


Abbildung 26: Verlauf des Flammpunktes aus den PROMETEO Fluidproben

Die Wasserwerte lagen im gesamten Betriebszeitraum auf einem niedrigen Niveau (<100 ppm) und wurden als unkritisch bewertet. Der erhöhte Wert bei ca. 500 Betriebsstunden kann auf eine höhere

Luftfeuchtigkeit bei der Entnahme hindeuten (vermutlich durch adsorbiertes Wasser durch längeres Stehen der Probe).

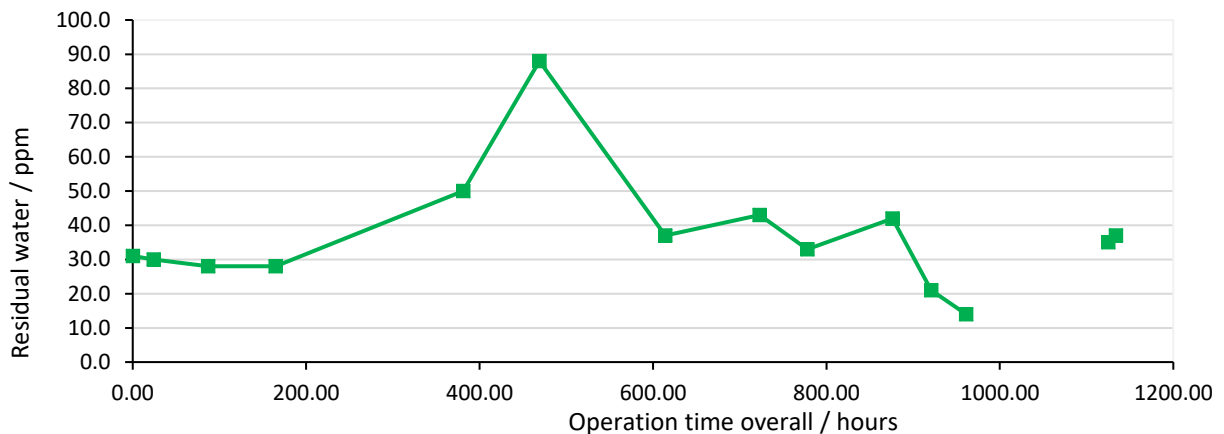


Abbildung 27: Verlauf des Wassergehaltes aus den PROMETEO Fluidproben

Auch die thermische Alterung war sehr gering und befand sich am unteren Rand der Detektionsschwelle (ca. 0,3%). Die Schwankungen können daher im Rahmen der Messungenauigkeit vernachlässigt werden. Auffällig ist, dass es scheinbar in den ersten Betriebsstunden einen leichten Anstieg der Zersetzungsprodukte gab, der sich im Laufe der weiteren Betriebszeit auf ein konstantes Niveau einpendelte. Da auch diese Werte nahe am Detektionslimit lagen, war eine abschließende Bewertung bis zum Abschluss des Vorhabens nicht möglich, da insgesamt lediglich 301 Stunden bei Arbeitstemperaturen zwischen 425 – 440 °C betrieben wurde.

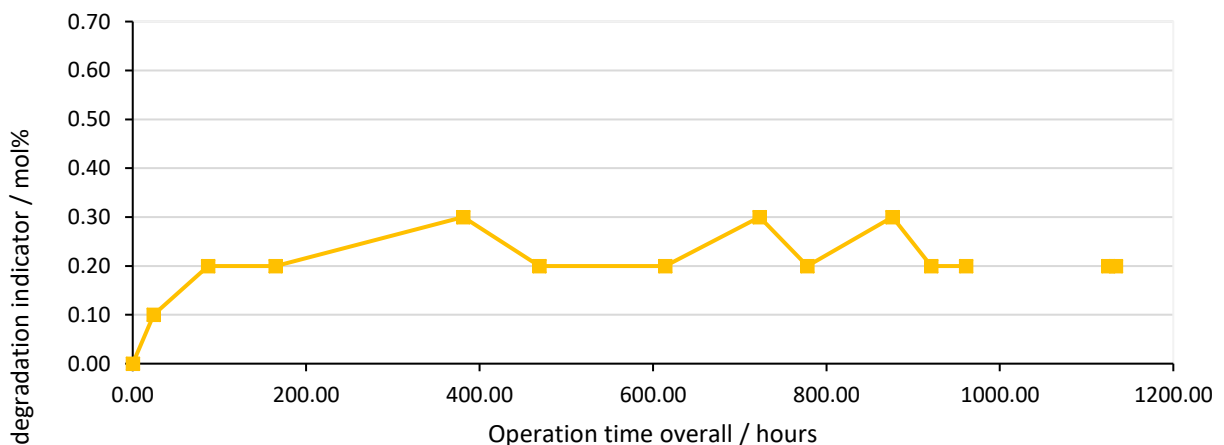


Abbildung 28: Verlauf der Degradation aus den PROMETEO Fluidproben

Anfang September 2022, etwa fünf Betriebstage nach der Integration einer neuen magnetgekoppelten Pumpe durch das DLR bzw. durch lokale Unterauftragnehmer, erlitt die neue Pumpe einen erheblichen internen Schaden und ließ sich nicht mehr betreiben.

2.8 Task 2.3 REPA-Entwicklung und Lebenszyklustest mit HELISOL® XLP (Senior)

Zunächst wurden die Ergebnisse des vorherigen Vorhabens SIMON betrachtet und analysiert, um daraus technische Verbesserungen abzuleiten. Dazu wurden die Baugruppen (REPAs) von der PSA zurück an Senior Flexonics gesendet, um demontiert und auf Bauteilebene analysiert zu werden. Die erneuten Tests mit den verbesserten Bauteilen wurden im Q2 und Q3 2022 durchgeführt.

Nachfolgend wurde seitens Senior Flexonics die Drehdurchführung für die erhöhten Betriebsbedingungen von max. TS = 450 °C unter Verwendung eines neuen Dichtungskonzeptes

weiterentwickelt. Dieses besteht aus einer Kombination von drei Dichtungsringen auf Graphitbasis, welche sich in Härte und Zusammensetzung voneinander unterscheiden. In dieser Entwicklung wurden die Erkenntnisse aus den Analysen des Vorhabens SIMON explizit berücksichtigt.

Die verbesserten Baugruppen wurden auf dem Senior Flexonics internen Teststand eingebaut und nachfolgend dem Testzyklus unterzogen. Für die zwei hausinternen Testzyklen bei Senior Flexonics wurde das Medium HELISOL® XA und letztlich HELISOL® XLP eingesetzt.

Testzyklus 1

Medium: HELISOL® XA
 Betriebsdruck: max. 35 bar, (Wellschlauch und Drehdurchführung)
 Temperatur: max. 450 °C in der Drehdurchführung / - Wellschlauch gefüllt mit Wasser bei Umgebungstemperatur
 Testbedingungen: ohne Durchfluss (Medium statisch) / Geschwindigkeit Zyklus ca.50/Stunde (gleichförmiger Zyklus)

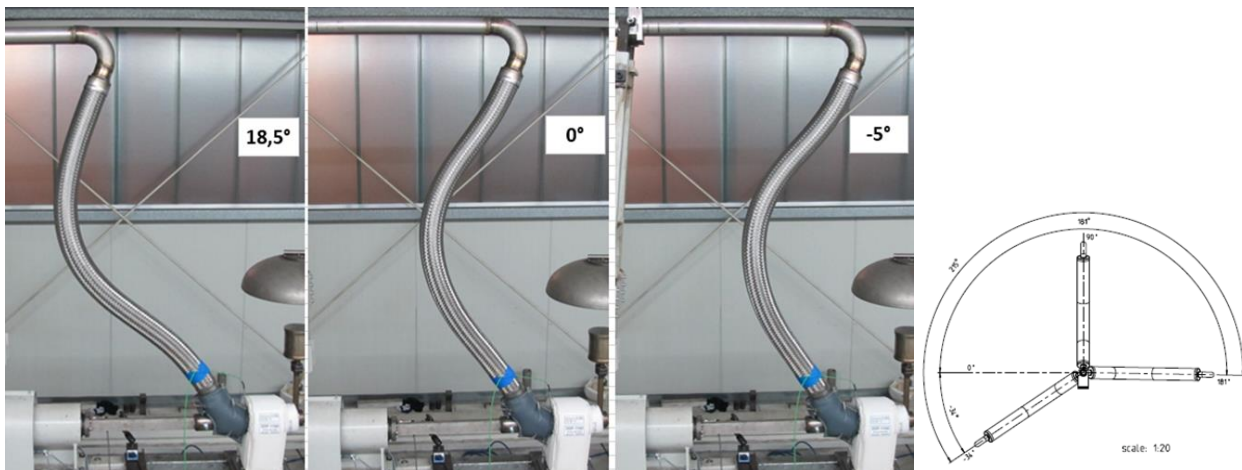


Abbildung 29: Testzyklus 1, links: Nachstellung der thermischen Dehnung des Absorberrohrs im Kollektor, Aufbau auf dem REPA-Teststand bei Senior Flexonics, rechts: Rotationsbewegung des abgebildeten Kollektors bzw. des REPA-Teststandes von insgesamt 215° (-34° bis 181°)

Im ersten Entwicklungsstand konnte mit dem in Abbildung 29 dargestellten Aufbau 18644 Zyklen erreicht werden. Im Anschluss an den Test wurde der Verschleiß der Drehdurchführung analysiert. Die Erkenntnisse der Analyse flossen in die zweite Entwicklungsstufe der Drehdurchführung ein. Der Start des zweiten Testzyklus lag im Q1/2023. Des Weiteren wurde begleitend die Entwicklung einer verbesserten thermischen Isolierung für den flexiblen Wellschlauch abgeschlossen.

Bewertung der thermischen Isolierung

In gesonderten Testreihen wurde die neue Isoliervarianten in Bezug auf Funktion und Isolierwirkung getestet und bewertet. Bei einer Medium-Temperatur von 400 °C im Wellschlauch konnte mit dieser verbesserten Isolierung eine äußerer Oberflächentemperatur im Bereich 50-60°C erzielt werden siehe Thermographie in Abbildung 30.



Abbildung 30: IR-Aufnahmen des REPA mit thermischer Isolierung während des Betriebs auf dem Senior Flexonics eigenen Teststand

Testzyklus 2

- Medium: HELISOL® XLP
- Betriebsdruck: max. 35 bar, (Wellschlauch und Drehdurchführung)
- Temperatur: max. 450 °C in der Drehdurchführung / - Wellschlauch gefüllt mit Wasser bei Umgebungstemperatur
- Testbedingungen: ohne Durchfluss (Medium statisch) / Geschwindigkeit Zyklus ca.50/Stunde (gleichförmiger Zyklus)

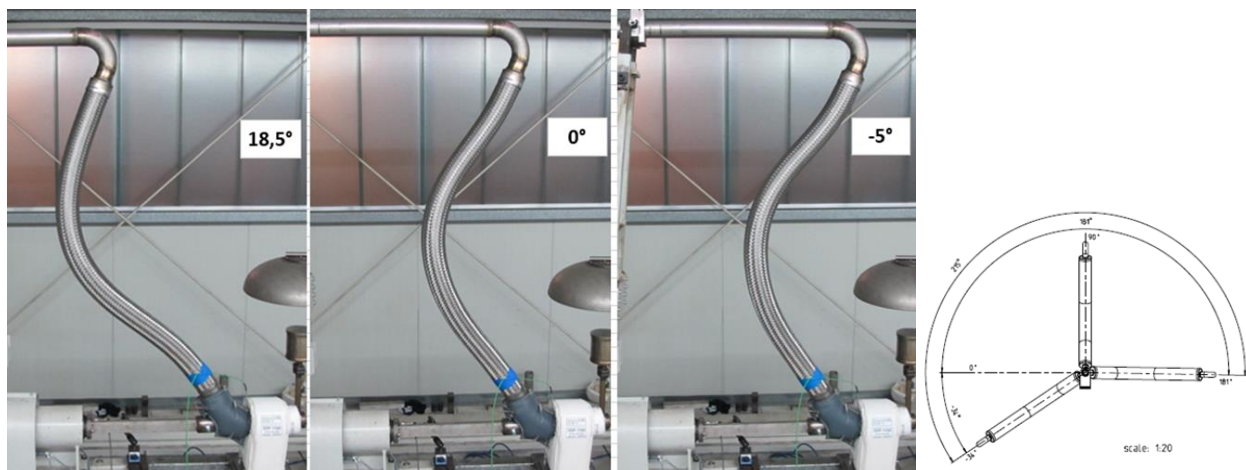


Abbildung 31: Testzyklus 2, links: Nachstellung der thermischen Dehnung des Absorberrohrs im Kollektor, Aufbau auf dem REPA-Teststand bei Senior Flexonics, rechts: Rotationsbewegung des abgebildeten Kollektors bzw. des REPA-Teststandes von insgesamt 215° (– 34° bis 181°)

Das von Senior Flexonics angestrebte Testziel von 50.000 Rotations- und Expansionszyklen wurde im zweiten Testzyklus ohne eine Leckage erreicht (s. Aufbau in Abbildung 31). Damit konnte die Zyklenzahl gegenüber dem ersten Entwicklungsland mit 18 644 Zyklen mehr als verdoppelt werden. Während dieser Testreihen wurde zudem die verbesserte Isoliervariante in Bezug auf Abrasion getestet (s. Abbildung 32).



Abbildung 32: REPA-System mit montierter thermischer Isolierung vor dem Einbau in den Senior Flexonics REPA-Teststand



Abbildung 33: Demontierte thermische Isolierung des Wellschlauchs - Innenansicht nach 50.000 Zyklen. Deutlich zu erkennen sind dunkle Stellen an denen Wellschlauch und Isolierung aneinander gerieben haben.

An der Isolierung konnte ein als normal einzuordnender Verschleiß festgestellt werden, der aus der Relativbewegung des Wellschlauches und der umgebenen thermischen Isolierung resultiert. Die innere Gewebelage der Isolierung, die gezielt mit einem zusätzlichen Edelstahlgeflecht verstärkt wurde, hielt den Belastungen stand. Damit wurden die Senior Flexonics hausinternen Testzyklen erfolgreich absolviert.

Nach der Fertigung der beiden REPA-Innovationen aus dem SING-Vorhaben in Q1/Q2 2023 erfolgte die Lieferung der beiden REPA-Systeme - inklusive thermischer Isolierung - für die Lebensdauerests mit HELISOL® XLP auf der PSA in Q3 2023. Die Tests konnten im Rahmen von SING nicht mehr durchgeführt werden, weil die REPA Anlage auf der PSA nicht betriebsbereit war.

2.9 Task 2.4 Inbetriebnahme und Auswertung von Viskositäts- und Wassergehaltssensor (DLR)

Diese Arbeiten konnten wie unter 2.4 dargestellt nur im Rahmen von Laboruntersuchungen qualifiziert werden.

2.10 Task 2.5 - Bewertung von Risiken und Kleinstleckagen (TÜV, DLR)

Kleinstleckagen wie z.B. tropfende bzw. dampfende Ventile oder Flanschverbindungen können in großtechnischen kommerziellen Parabolrinnenanlagen mit einigen Tausend Armaturen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Sie könnten eine Gefahr für das Betriebspersonal und auch für die Anlagensicherheit darstellen. Aus diesem Grund werden die Folgen (z.B. bei Selbstentzündungen) dieser Leckagen grundlegend untersucht und der Umgang damit detailliert dokumentiert. Dazu wurde zwischen Wacker, TÜV und DLR ein Testprozedere ausgearbeitet, das die Freisetzung von kleinen Mengen Wärmeträger in die thermische Isolierung einer heißen Rohrleitung vorsieht. Insbesondere waren identischen Versuche mit BP/DPO und mit HELISOL® XLP vorgesehen, um eine vergleichende Bewertung der Brandverhalten zu ermöglichen.

Der Rohrleitungsabschnitt (Abbildung 34) dient ausschließlich der Untersuchung von kleinen Leckagen und wird elektrisch beheizt. Damit ist dieses Gerät unabhängig und unter Berücksichtigung von Sicherheitsabständen z.B. zu Gebäuden zu betreiben. Das Gerät wurde von Wacker auf die PSA verbracht.



Abbildung 34: Testgerät mit innenbeheiztem 2"-Stahlrohr, zwei Schichten Wärmedämmung und Metalldeckel. Die Temperatur kann mittels eines Temperaturreglers eingestellt werden.

Für die erneute Verwendung des Testgeräts zwecks der Untersuchung von Kleinstleckagen wurde die mechanische Struktur stabilisiert, eine Auffangwanne bereitgestellt und die Temperaturregelung überarbeitet. Letztere Maßnahme galt der Reduzierung der Hysterese der Temperaturregelung (siehe Abbildung 35).



Abbildung 35: links: Testgerät mit innenbeheiztem 2"-Stahlrohr ohne thermische Isolierung, darunter die Auffangwanne; rechts oben: Temperaturregler mit PT100-Sensor und Heizung angeschlossen; rechts unten: neu aufgebauter Schaltkasten mit PID-Temperaturregler und Peripherie.

Die Bewertung der Risiken von Kleinstleckagen wurde mit dem in Abbildung 34 dargestellten Aufbau im Q2 2022 durchgeführt. Die folgenden drei Vergleichstests wurden jeweils mit HELISOL® 5A und mit BP/DPO durchgeführt (beide Fluide im gealterten Zustand, um ein Worst-Case-Szenario zu simulieren). Jedes Szenario stellt eine mögliche Leckage-/Gefährdungssituation in Parabolrinnenkraftwerken mit Thermoöl dar.

1. Löschen eines mit HTF gespeisten Feuers - mittels eines Wassersprühers - das auf der Oberfläche einer Steinwolle-Isolierung mit einem Durchmesser von 260 mm auf einer Länge von 500 mm brennt (Metallabdeckung entfernt).
2. Beobachtung des zeitlichen Brandverhaltens des oben genannten Isolierabschnitts bei entferntem Blech und ohne jegliche Fremdeinwirkung über einen Zeitraum von 30 Minuten.
3. Untersuchung der Folgen des Austretens von unter Druck stehendem HTF bei Betriebstemperatur in einen Isolierspalt in Gegenwart von Luft-Sauerstoff. Hierbei war das Ziel eine andernfalls unerwünschte Selbstentzündung zu provozieren.

In allen drei Fällen wurde das 2"-Rohr auf Temperaturen zwischen 400 °C und 500 °C aufgeheizt. Für die Szenarien 1 und 3 wurde das Rohr umgebende Isolationsmaterial zunächst mit vier Litern des entsprechenden HTFs getränkt. Während einer 15-minütigen Aufheizphase des HTFs in der Isolierung - vor dem jeweiligen Versuch - tropften etwa zwei Liter HELISOL® 5A aus der Isolierung wieder heraus.

Bei der Verwendung von BP/DPO verblieb unter sonst identischen Bedingungen fast die gesamte Menge HTF in der Isolierung. Das Volumen des Isolierungsmaterials betrug jeweils etwa 27 Liter.

Für die Versuche 1 und 2 wurde der oben beschriebene Aufbau so weit aufgeheizt, bis die Solltemperatur des Stahlrohrs erreicht wurde. Dann wurde der Mittelteil des Außenblechs geöffnet, um 4 Liter des entsprechenden HTF in die 50 cm lange Wärmedämmung zu gießen (siehe Abbildung 36). Anschließend wurde gewartet bis der stationäre Zustand wieder erreicht war, bevor die äußere Blechabdeckung vollständig entfernt wurde. Während der Brandversuche wurde eine mit Wasser gefüllte Wanne unter das Feuer gestellt. Das Wasser diente dazu, brennende HTF-Tropfen oder mit HTF getränkte Asche zu löschen, die aus dem brennenden Abschnitt fallen und ein zweites Feuer darunter entzünden könnten. Außerdem verhindert die Wanne, dass HTF den Boden verunreinigt.



Abbildung 36: Links: drei 50-cm-Abschnitte der Wärmedämmung mit dazwischen liegenden Trennplatten vor der Montage der Dämmstoffdecke und der äußeren Blechabdeckung. Mitte: Aufgießen von HTF auf die Dämmung zur Vorbereitung von Test 1 und 2, rechts: 5-Liter-Druckwassersprüngerät

Zusätzlich zu dem oben beschriebenen Aufbau wurde für Test 1 ein Wassersprüngerät verwendet, dessen Verwendung dem Betriebspersonal beispielhaft demonstrierte, wie man diese spezielle Art von Feuer effizient löschen kann. Das Sprüngerät war mit Wasser gefüllt und stand unter Druck, um einen kontinuierlichen Wasserstrom durch einen Zerstäuber zu erzeugen. Es ist wichtig zu beachten, dass explizit heiße Ölsammlungen in offenen oder geschlossenen Behältern nicht auf diese Weise gelöscht werden dürfen, da es zu plötzlichen und gefährlichen Verdampfungen kommen kann.

Versuch 1 - Löschen eines mit HTF gespeisten Feuers, das auf einer Steinwolleoberfläche brennt

Nach dem Aufheizen des Rohrs und nach dem Erreichen der stationären Solltemperatur in der mit HTF getränkten Steinwolle wurde das Blech entfernt und 3 Minuten lang offengelassen, bevor das Feuer vorsichtig entzündet wurde. Nach einer Brenndauer von 2 Minuten wurde das Feuer mit dem Wassersprüngerät gelöscht. Der Vorgang wurde auf Video aufgezeichnet, die verwendete Wassermenge und die Zeit festgehalten.

Bei einem vergleichbaren Sprühwasser-Massenstrom und einer ähnlichen Aufbringung auf das Feuer dauerte es 90 Sekunden bei der Löschintervention mit BP/DPO bis die letzte Flamme gelöscht war, während HELISOL® 5A in etwa 40 Sekunden gelöscht werden konnte. Diese Tendenz zeigte sich auch beim Löschen anderer Brände mit dem gleichen Aufbau in Vorbereitung auf diesen Test. Es wurden also ca. 50 % weniger Wasser benötigt, um einen HELISOL® 5A Brand mit den oben erwähnten Abmessungen zu löschen. Was den Löschmechanismus betrifft, so erzeugt der Wassersprüher einen lokalen Wassernebel, der in die Flammen und auf die Oberflächen gesprüht wird, wo er teilweise verdampft und so die mit HTF getränkten Oberflächen auf eine Temperatur abkühlt, die unter der Entzündungstemperatur des HTF liegt. Vor allem der durch den Sprühnebel begünstigte

Phasenwechsel und die flächige Ablagerung des Nebels auf den brennenden Oberflächen macht diese Methode in Anbetracht der eingesetzten Löschmittelmenge (Wasser) sehr effizient und zielgerichtet. Durch den Einsatz des Wassersprühers wird in beiden Fällen ein Großteil der lose abgelagerten Brandrückstände entfernt, die entweder herunterfallen oder mit der aufsteigenden Luftströmung um das Feuer herum mitgerissen werden.

Versuch 2 - Observation des Brennverhaltens über 30 Minuten

Das Brandverhalten wurde über 30 Minuten mit Temperatursensoren und per Video beobachtet. Schließlich wurde das Feuer mit Sprühwasser unter Messung der aufgetragenen Menge abgelöscht.

Es zeigt sich, dass die anfängliche Flammengröße, der Abbrand und die Asche-/Rußansammlung im Laufe der Zeit für beide Fluide in der gleichen Größenordnung liegen. Die Ansammlung von SiO_2 , das sich bei der Verbrennung von HELISOL® 5A bildet, kann die weitere Verbrennung im oberen Teil der Isolierung behindern. Stattdessen brennt der untere Teil weiter, da sich dort Schwerkraft bedingt HTF ansammelt. BP/DPO zeigt Flammen um den gesamten Umfang der Isolierung.

Versuch 3 - Austritt von HTF Dampf bei Betriebstemperatur in einen Isolierspalt

Für Test 3 wurde eine 1/8"-Kapillare um die 2"-Leitung gewickelt bevor die Wärmedämmung endgültig angebracht wurde. Ein Ende der Kapillare wurde an einem Druckbehälter angeschlossen, der 5 Liter HTF enthielt und mit einem Druck von 5 bar beaufschlagt wurde. Zwischen Druckbehälter und Kapillare war ein Handventil angebracht, das dazu diente, das unter Druck stehende HTF in die Kapillare abzulassen. Mehrere Thermolemente wurden an der Oberfläche des Rohrs angebracht, um die Temperatur an verschiedenen Stellen zu erfassen. Ein Sensor wurde im Inneren der Kapillare in der Nähe ihres Endes angebracht (siehe Abbildung 37).

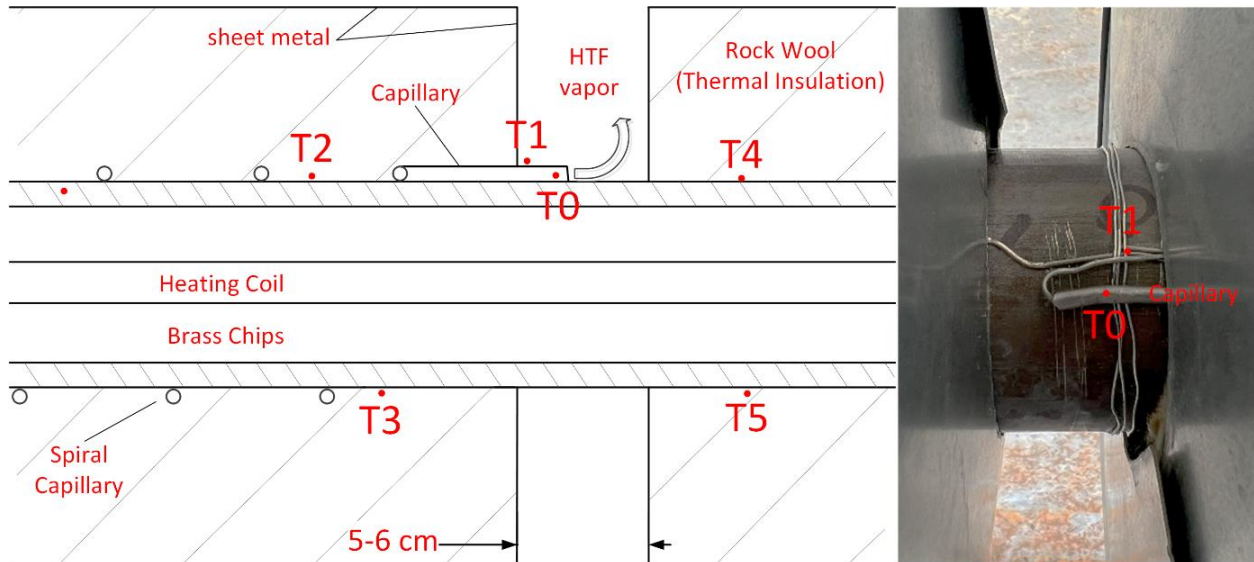


Abbildung 37: Links: Schnitt durch den Versuchsaufbau mit dem beheizten Innenrohr, den Positionen der Temperatursensoren und der Anordnung der Kapillare. Rechts: Nahaufnahme des beheizten 2" Rohrs und des 1 mm-Thermolementes, das in die Spitze der 1/8"-Kapillare angebracht wurde.

Dieser Test dient der Simulation einer kleinen Leckage, die beispielsweise an einer HTF führenden Flanschverbindung oder einer Armatur bei Betriebstemperatur und -druck auftreten kann. Im vorliegenden Fall wurde das HTF mit einem Massenstrom von ca. 0,01 kg/s durch die Kapillare rausgedrückt, sobald die äußeren Sensoren im Spalt und in der Nähe des Spaltes (T0, T1, T2 und T3) die für HELISOL® typische Betriebstemperatur (425 °C bis 440 °C) erreicht hatten. Es gilt die Annahme, dass der temperaturbedingte Phasenwechsel des HTF einsetzt, sobald der Druck unter den entsprechenden Dampfdruck fällt. Im Falle einer undichten Armatur geschieht dies in unmittelbarer

Nähe der Armatur, während der vorliegende Aufbau den Phasenwechsel in einer vorgewärmten Kapillare von ca. einem Meter-Länge ermöglicht. Dies hat zur Folge, dass der aus der Kapillare austretende HTF-Dampf tatsächlich die Betriebstemperatur hat. Dies stellt bewusst eine Situation dar, die aufgrund der erhöhten Temperatur viel anfälliger für eine Selbstentzündung ist als eine reale Leckage wie oben beschrieben.

Im vorliegenden Fall wurde die Kapillare im Bereich der Sensoren T2 und T3 montiert, wo das Rohr tatsächlich etwa 100 K heißer war als der Spalt und die benachbarten Sensoren T4 und T5. Dies führte zu einer Freisetzungstemperatur des HTF-Dampfes von etwa 550 °C (siehe Abbildung 38) beim Austreten aus der Kapillare. Um den Spaltabschnitt gleichmäßig vorzuheizen, wurde er vollständig mit Isolationsmaterial gefüllt, das erst unmittelbar vor dem Freisetzungsversuch entfernt wurde. Die Freisetzung dauerte jeweils etwa 20 Sekunden und wurde mehrmals wiederholt. Bei keinem der beiden Fluide wurde eine Selbstentzündung beobachtet.

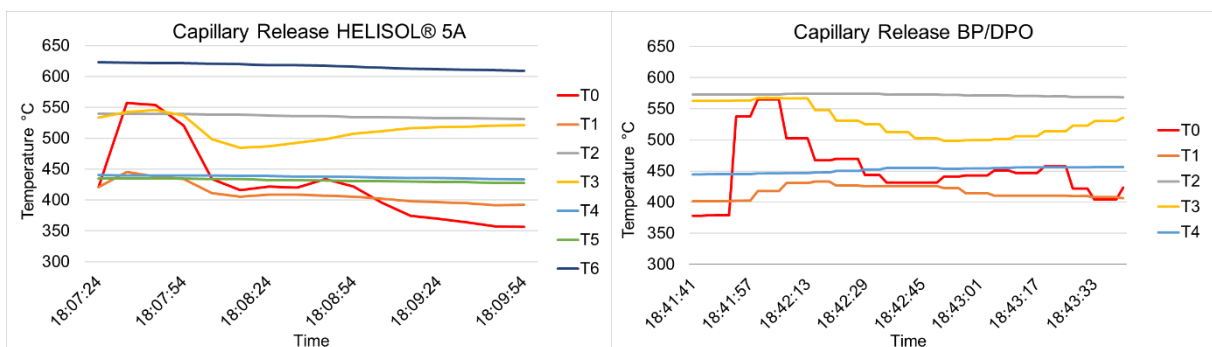


Abbildung 38: Temperatursensormessungen über die Zeit während der Freisetzungsversuche, links HELISOL® 5A, rechts BP/DPO, für die Sensorpositionen siehe Abbildung 37

Abbildung 39 zeigt zwei Fotos der HTF-Freisetzungen aus der Kapillare bei sehr ähnlichen Bedingungen. Der Aufbau wurde vor den Freisetzungen auf vergleichbare Temperaturen aufgeheizt, um den direkten Vergleich zu ermöglichen.



Abbildung 39: Links: HELISOL® 5A-Dampf bei ca. 550 °C, der aus der Kapillare in einem vorgewärmten Isolationsspalt entweicht, rechts: BP/DPO-Dampf bei ca. 550 °C, der aus der Kapillare in einem vorgewärmten Isolationsspalt entweicht

2.11 Task 2.6 - Wärmekapazitätsmessung mit Durchflusskalorimeter (DLR)

Die Durchführung der Wärmekapazitätsmessung mit Durchflusskalorimeter war bis zum Abschluss des Vorhabens aufgrund der in Abschnitt 2.7 genannten Gründen nicht möglich.

2.12 Task 2.7 - Wärmeübergangsmessungen mit dem Mess-Wärmeübertrager (DLR, Wacker)

Die Durchführung der Wärmeübergangsmessungen mit dem Mess-Wärmeübertrager war bis zum Abschluss des Vorhabens aufgrund der in Abschnitt 2.7 genannten Gründen nicht möglich.

2.13 Task 2.8 - Hoch aufgelöste Gasanalysen am PROMETEO-Loop (DLR)

Die Durchführung der Aufgabe war bis zum Abschluss des Vorhabens aufgrund der in Abschnitt 2.7 genannten Gründen nicht möglich.

2.14 Task 3.1 - Untersuchung sicherheitsrelevanter Eigenschaften / Gasentstehung (DLR)

Für die Untersuchungen im Kölner Wärmeträgerlabor wurde das seitens Wacker zur Verfügung gestellte HELISOL® XLP chargenweise in einem Autoklav bei 425 °C für 30 Tage äquilibriert.

Zur Untersuchung der Gasbildungsrate gemäß dem bereits im SiHTF-Projekt beschriebenen Testprotokoll wurden drei Sets von jeweils 20 Proben in Duranglasampullen hergestellt. Diese wurden bei 400, 425 und 450 °C in Karussellöfen eingelagert und paarweise zeitlich versetzt entnommen, um die Alterung über 5000 Stunden zu ermitteln. Zusätzlich wurde eine weitere Untersuchung bei 433 °C bis 3300 h als zusätzlicher Versuch ausgewertet. Diese Messreihe resultierte aus einer Temperaturabweichung und war ursprünglich nicht geplant.

Die Versuche zeigen auf, dass das HELISOL® XLP weniger schnell Wasserstoff bildet als die bisher untersuchten Siliconöle. Wie bei HELISOL® 5A und XA zeigt sich anfänglich eine relativ schnelle Wasserstoffbildung, die nach wenigen Stunden erheblich nachlässt (s. Abbildung 41). Bei 400 °C wurde sogar eine signifikante Abnahme der spezifisch gebildeten Wasserstoffmenge beobachtet, die aufgrund der geringen Permeation durch die verwendeten Glasampullen auf eine chemische Reaktion schließen lässt. Die kontinuierliche Wasserstoffbildung ist selbst bei 425 °C und 433 °C sehr langsam. Das sich andeutende Nachlassen der Wasserstoffbildung bei 450 °C müsste durch eine Wiederholung der Alterung in diesem Bereich verifiziert werden (s. Abbildung 40, links). Einige der Proben bei längerer Alterung gingen bei den höheren Temperaturen verloren, so dass keine Auswertung möglich war und bisher nur das Gasbildungsverhalten bei 400 °C über 5000 Stunden belegt ist.

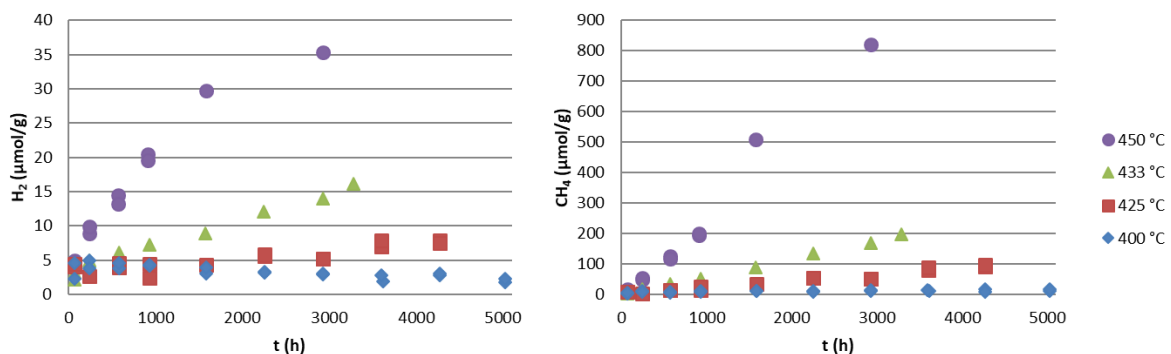


Abbildung 40: Spezifische Bildung von Wasserstoff (links) und Methan (rechts) bei der Alterung von HELISOL® XLP bei 400 – 450 °C

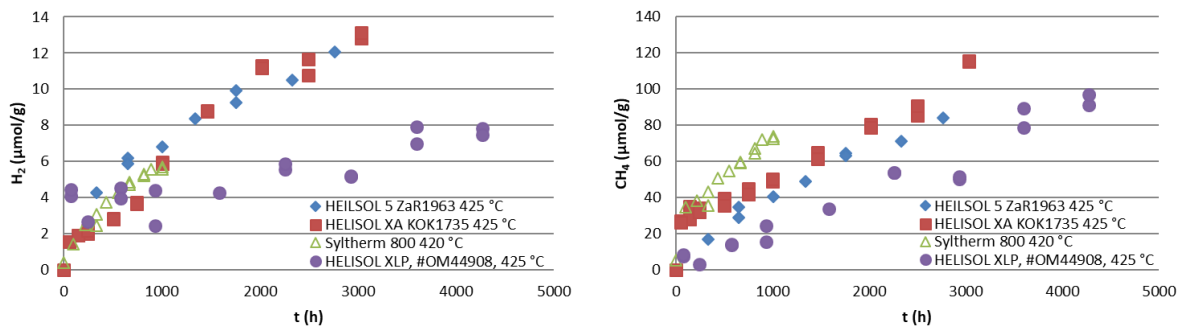


Abbildung 41: Spezifische Bildung von Wasserstoff (links) und Methan (rechts) bei der Alterung von unterschiedlichen Siliconölen bei 425 °C

Die Methanbildung ist beim HELISOL® XLP kleiner als bei den anderen Siliconölen. Im Vergleich zum HELISOL® 5A und HELISOL® XA ist vor allem die anfänglich gebildete Methanmenge kleiner. Da die Bildungskurven in erster Näherung parallel verlaufen, ist jeweils die gleiche kontinuierliche Methanbildung zu erwarten.

2.15 Task 3.2 - Korrelation von Wasserstoffdruck und -konzentration im Wärmeträger (DLR)

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde der Permeationsteststand aus dem Arewa-Projekt eingesetzt, um die Wasserstoffpermeation aus der Gasphase in einen Receiver-Annulus zu messen. Durch Vergleichsmessungen mit Wasserstofflösungen in Wärmeträgermedien kann eine Korrelation von Drücken und Konzentrationen erstellt werden.

Bei der erneuten Inbetriebnahme des Permeationsteststands im Rahmen des Projektes wurde zunächst das Temperaturprofil im Innenraum des strahlungsbeheizten Testaufbaus ermittelt. Da eine erhebliche Temperaturspreizung festgestellt wurde, konzentrierten sich die Arbeiten zunächst auf eine Verbesserung der thermischen Homogenität, um signifikante Permeationsmessungen durchführen zu können.

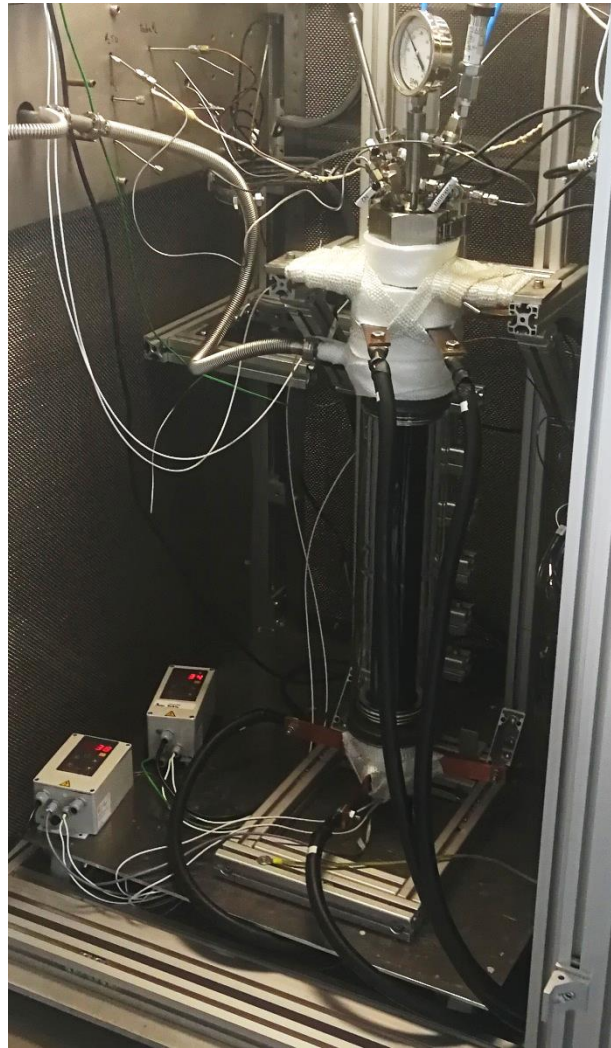
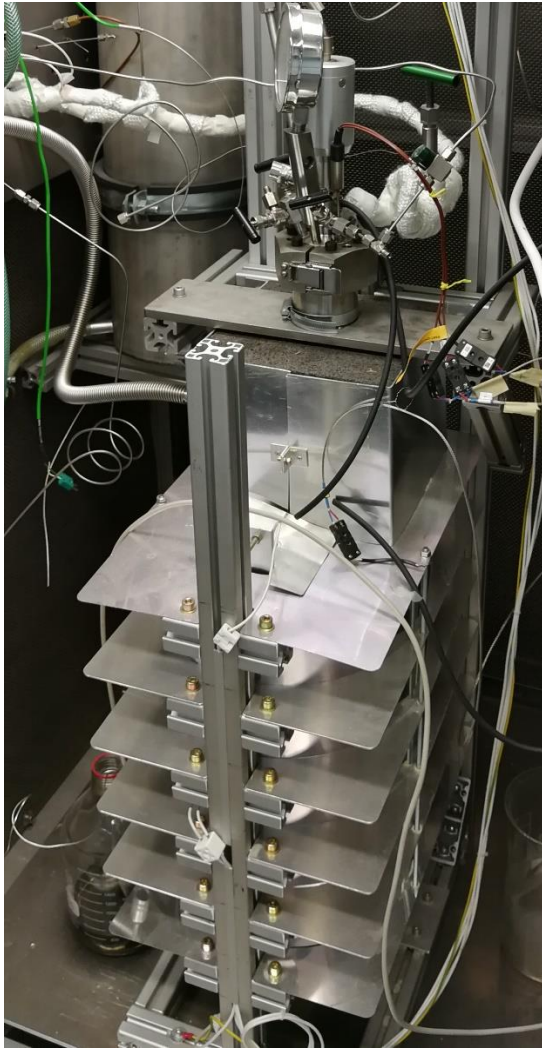


Abbildung 42: Permeationsexperiment mit Infrarot- (links) und mit Widerstandsbeheizung (rechts)

Durch Einrichten einer direkten Widerstandsbeheizung über den Receiverstahl konnte einerseits eine gleichmäßigere Beheizung und andererseits Temperaturmessung der gesamten Oberfläche des Stahlrohres mittels einer Wärmebildkamera ermöglicht werden. Nach dem Einrichten und Einregeln zusätzlicher Begleitheizungen am Kopf und am Boden des Teststands konnte das Rohr zwischen 370 und 410 °C mit einer Standardabweichung von 3- 4 K auf die jeweilige Zieltemperatur über die beheizte Länge eingestellt werden.

Die Permeation von Wasserstoff aus dem Stahlrohr in den Annulus kann mit einem Sektorfeldmassenspektrometer quantifiziert werden. Die Kalibrierung des Massenspektrometers erfolgte mit Testlecks in dem zu erwartenden Messbereich (vgl. Abbildung 43).

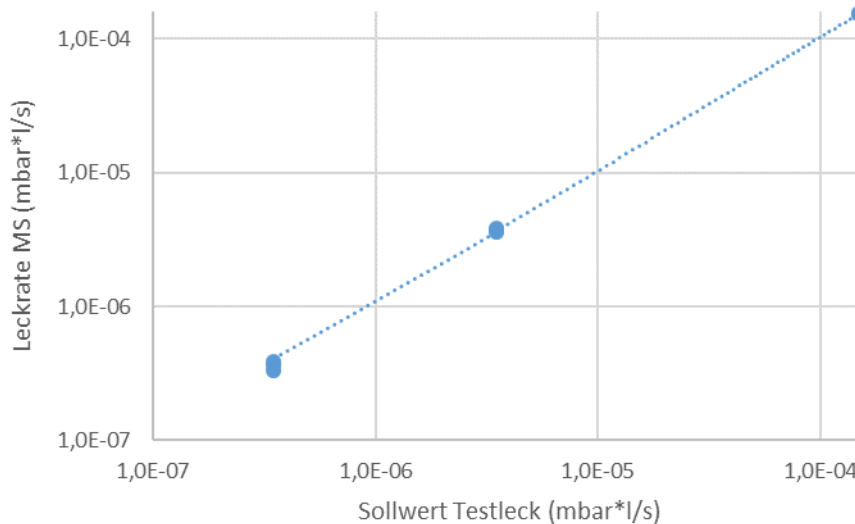


Abbildung 43: Vergleich der Leckrate laut Massenspektrometer mit den Sollwerten der Testlecks

Aufgrund der sehr aufwändigen Experimentgestaltung und Kalibrierung konnten während der Projektlaufzeit noch keine abschließend validierten Permeationsmessungen durchgeführt werden.

2.16 Task 3.3 - Studie zu kritischen Reaktionen zwischen HELISOL® XLP und Speichersalz bzw. Wasser (DLR)

Die Reaktion von HELISOL® XLP mit Wasser wurde analog zu den Untersuchungen in SIMON erprobt, es konnten jedoch keine signifikanten Konzentrationsänderungen nachgewiesen werden. Für die Untersuchungen mit Speichersalz waren zunächst DSC-Messungen vorgesehen, die jedoch aufgrund eines Geräteausfalls nicht im Rahmen der Projektlaufzeit ausgeführt werden konnten.

2.17 Task 3.4 - Korrosions- und Kompatibilitätsanalyse von HELISOL® XLP und Legierungen (TÜV, DLR)

Während des sechs monatigen Testbetriebs bei 450 °C bzw. höheren Temperaturen mit HELISOL® XLP (Task 4.3) wurde ein Rohrsegment durchströmt, das einen Korrosionsprobenträger beinhaltete (s. Abbildung 44).

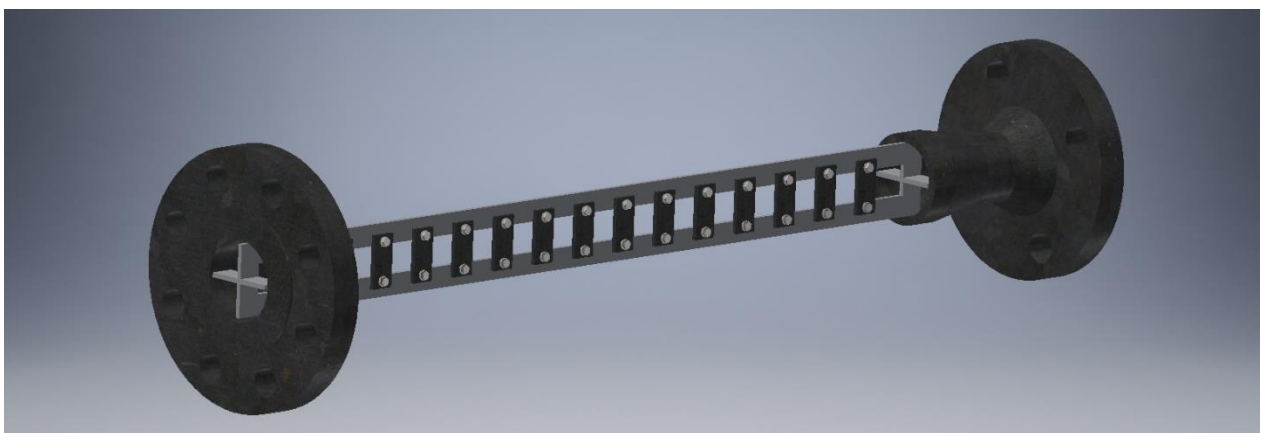


Abbildung 44: Korrosionsteststrecke mit eingeschobenem Probenträger, rechteckige Proben sind mit keramischen Schraubverbindungen auf und hinter dem Probenträger angebracht. Das umgebende Rohr ist nicht dargestellt. Durchströmung erfolgt von links nach rechts. Die konzentrische Reduzierung verhindert, dass der Probenträger in Strömungsrichtung verrutscht.

In diesem demontierbarem Rohrabschnitt wurden zwölf Proben anwendungsrelevanter Werkstoffe / Legierungen und deren Kombinationen eingebracht (siehe Tabelle 3), im heißen Fluidstrom ausgelagert und dabei definiert vom Wärmeträger bei Betriebsbedingungen umströmt.

Tabelle 3: Übersicht zu den ausgelagerten Materialproben

US Nummer	Werkstoff Nummer
A 210 Gr. C	1.0481
A 335 P11	1.7338
A 335 P91	1.4903
SS 312 TP 304	1.4301
A217 WC6	1.7357
A216 WCB	1.0619

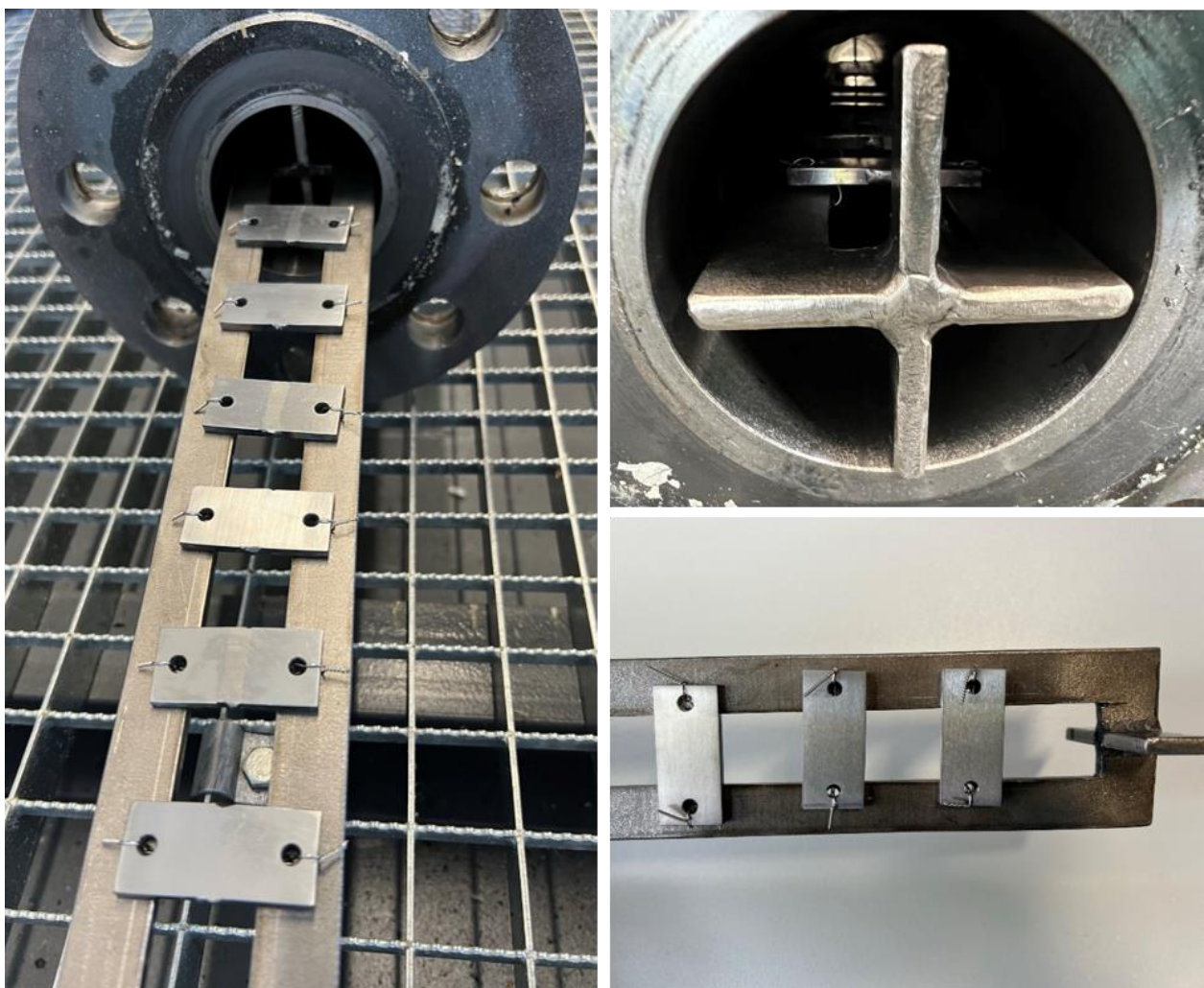


Abbildung 45: links Korrosionsteststrecke mit herausgezogenem Probenträger. Oben rechts: eingeschobener Probenträger in demontierter Korrosionsteststrecke. Unten rechts: Draufsicht auf Proben, die mit Draht am Probenträger befestigt sind, vor der Auslagerung.

Die Proben wurden insgesamt viermal ausgelagert für 50, 450, 1200 und 1300 Stunden. Auf den Proben wurden Ablagerungen nachgewiesen. Aus dem Grund hat man sich entschieden, die Entwicklung dieser Ablagerungen über 3000 Stunden zu beobachten und erst nach der vierten Untersuchung die Ablagerungen sehr vorsichtig mit einem Lösungsmittel und einem Textiltuch zu

entfernen, um ggf. die darunter verborgene Korrosion nicht zu beeinträchtigen und anschließend die Proben ohne Ablagerungen zu betrachten.

Zur Identifikation des Ursprungs der schwarzen Substanz (Ablagerungen) wurde während der 470 °C Betriebsphase eine der beiden Heizungen demontiert, um sie einer Sichtkontrolle zu unterziehen. Abbildung 46 zeigt die demontierte Heizung und eine Detailansicht der Heizstäbe.



Abbildung 46: links: herausgezogene Heizung nach etwa 5000 h Betrieb bei Temperaturen ≥ 450 °C, rechts: Draufsicht auf die Heizstäbe mit den schwarzen weichen Ablagerungen auf den Heizstäben

Aufgrund der gefundenen Ablagerungen auf den Heizelementen (etwa 1 mm Schichtdicke) lag es nahe, dass die schwarze Substanz aufgrund lokaler Überhitzung bei dem Hochtemperaturbetrieb entstand war. Gemäß der Elementaranalyse einer entfetteten Partikelprobe bestand die Trockenmasse zu 99,8 % aus den Elementen Kohlenstoff (50,41 %), Sauerstoff (14,76 %), Eisen (13,85 %) und Silicium (20,80 %). Vergleichbare Partikel haben sich in den früheren Laboruntersuchungen bspw. im Rahmen des Projekts Si-HTF in Glasampullen bis 465 °C nicht gebildet. Voraussichtlich wurden wesentlich höhere Oberflächentemperaturen an den Heizstäben erreicht, die zu den Ablagerungen führten.

Die Korrosionsuntersuchen bestand im Kern aus dem lagegetreuen mikroskopischen Vergleich jeweils identischer Materialproben vor und nach der 3000 stündigen Auslagerung bei 450 °C in strömendem HELISOL® XLP.

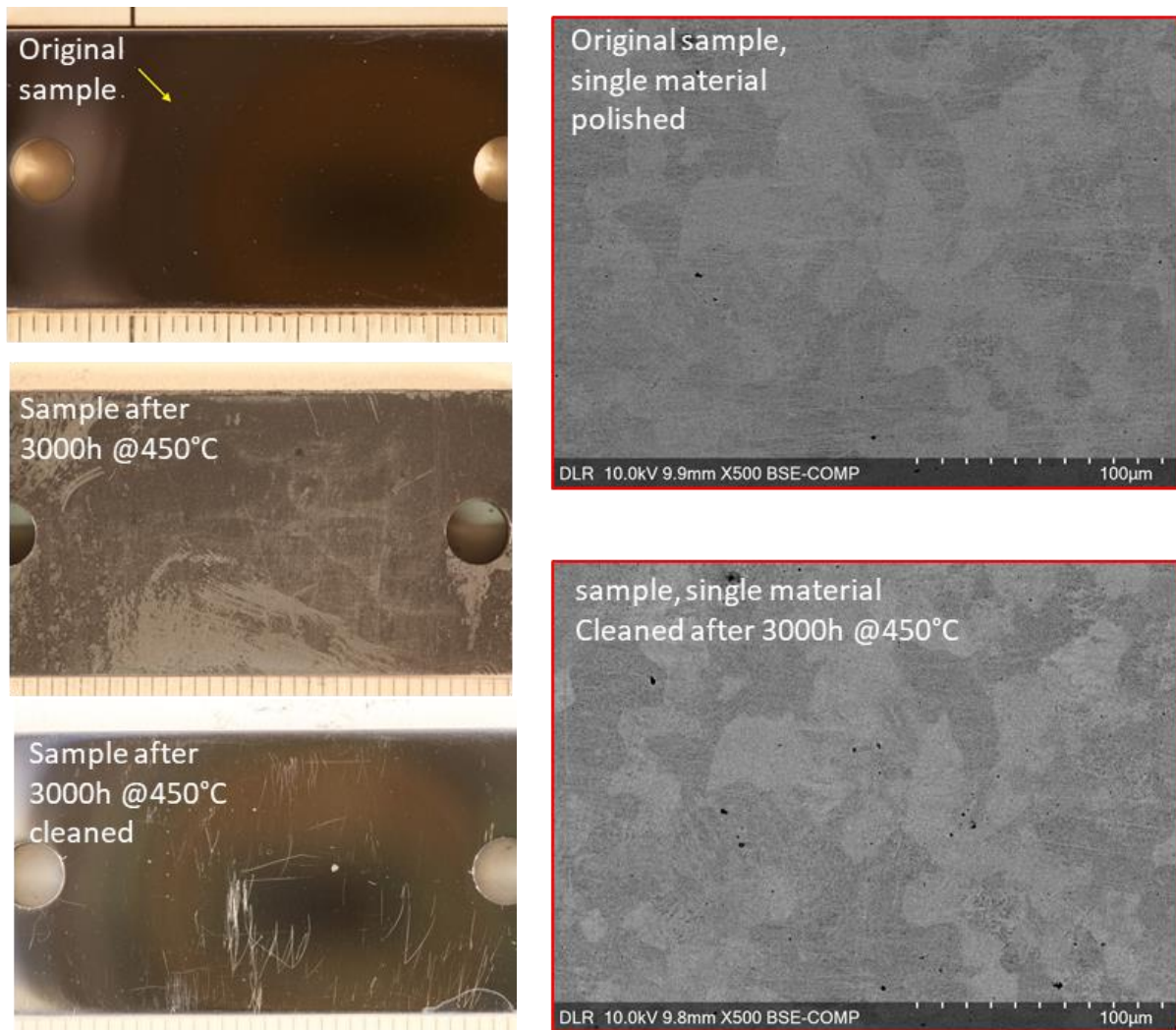


Abbildung 47: links: Aufnahmen mit dem Auflichtmikroskop vor der Auslagerung (oben), nach der Auslagerung / vor der Reinigung (Mitte) und nach der Reinigung (unten). Rasterelektronenmikroskop Aufnahmen der identischen Stelle auf der Probe vor der Auslagerung (oben) und nach der Auslagerung (unten)

Die Aufnahmen in Abbildung 47 sind qualitativ repräsentativ für die anderen fünf ausgelagerten Materialien bzw. Materialpaarungen, die jeweils keinen anderen Befund aufwiesen. Die Aufnahmen mit dem Lichtbildmikroskop geben zu erkennen, dass die Probe neben oberflächlichen Kratzern, die vom Ein- und Ausbau der Proben herrühren, keine signifikanten anderen Änderungen der Oberflächen aufweisen. Die REM Aufnahmen zeigen jeweils die identische Stelle und erlauben jeweils das Wiedererkennen derselben Korngrenzen. Es ist festzustellen, dass weder innerhalb der Körner noch an den Korngrenzen Veränderungen der Oberfläche zu erkennen sind. Anders ausgedrückt, nach der Auslagerung wurden mikroskopisch unveränderte Oberflächen vorgefunden. Damit konnte die Korrosion der gängigen / ausgewählten Materialien in HELISOL® XLP bei Temperaturen bis 450 °C ausgeschlossen werden.

2.18 Task 3.5 - Bestimmung von Dichte, Wärmekapazität / Enthalpieänderung und Druck im DLR HTF Labor (DLR)

Für die isobare Dichtebestimmung wurde ein Experiment zur isobaren Expansion eingesetzt. Ein homogen beheizbares und exakt bekanntes Testvolumen wird hierbei mit dem zu untersuchenden Fluid befüllt (vgl. Abbildung 48). Beim Aufwärmen expandiert das Fluid über eine Kapillare in eine Kolbenpumpe, die eine sehr genaue Messung der Expansion und die Druckkontrolle ermöglicht.

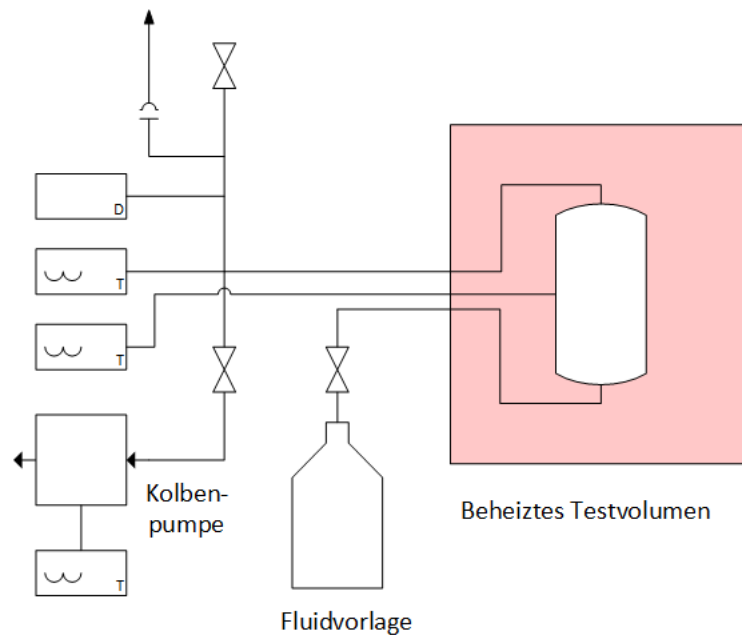


Abbildung 48: Schematischer Aufbau des isobaren Expansionsexperiments, rote Zone beheizt

Zum Vergleich wurde zunächst Dowtherm A untersucht. Dieser Wärmeträger zeigt leichte Dichtezunahmen bei höheren Drücken und somit ist dieses Fluid im Betriebstemperaturbereich solarthermischer Parabolrinnenkraftwerke signifikant kompressibel (vgl. Abbildung 49).

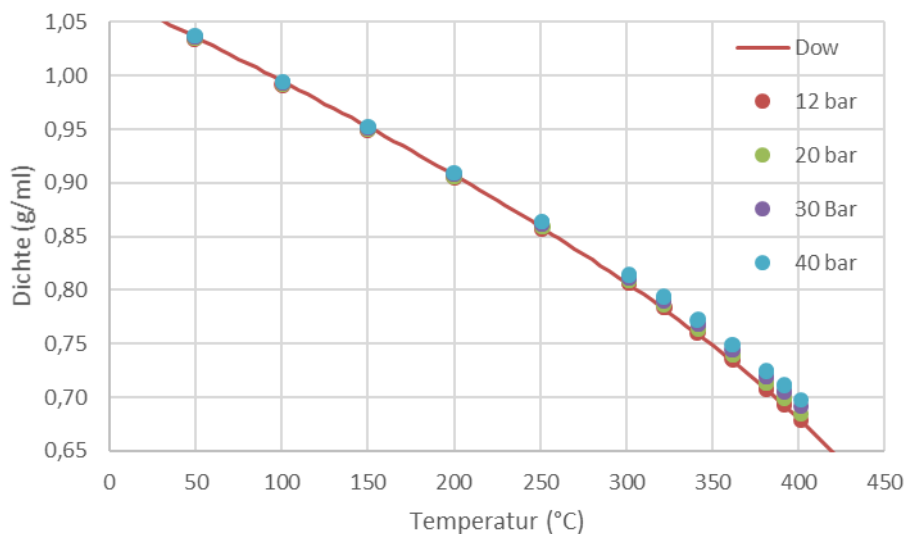


Abbildung 49: Dichte von Dowtherm A laut Herstellerangabe (rote Linie) und isobar gemessene Werte bei 12, 20, 30 und 40 bar (Punkte).

Die isobare Dichtemessung von HELISOL® XLP zeigt eine etwas deutlichere Kompressibilität insbesondere bei hohen Temperaturen auf (vgl. Abbildung 50).

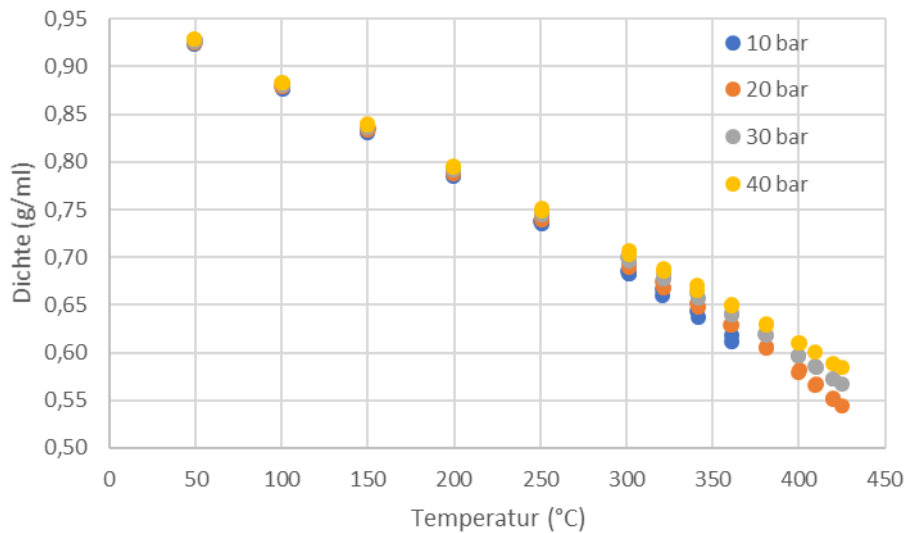


Abbildung 50: Dichte von HELISOL® XLP bei 10, 20, 30 und 40 bar zwischen 50 – 425 °C (bei 10 bar nur bis 361 °C).

Für die Messung der isobaren Enthalpieänderung von HELISOL® XLP wird eine optimierte Version des im SIMON-Projekt entwickelten Kompressionsloops genutzt. Wie bereits beim HELISOL® XA ist beim HELISOL® XLP eine deutlich kleinere Druckabhängigkeit als bei dem früher untersuchten HELISOL® 5A festzustellen (s. Abbildung 51).

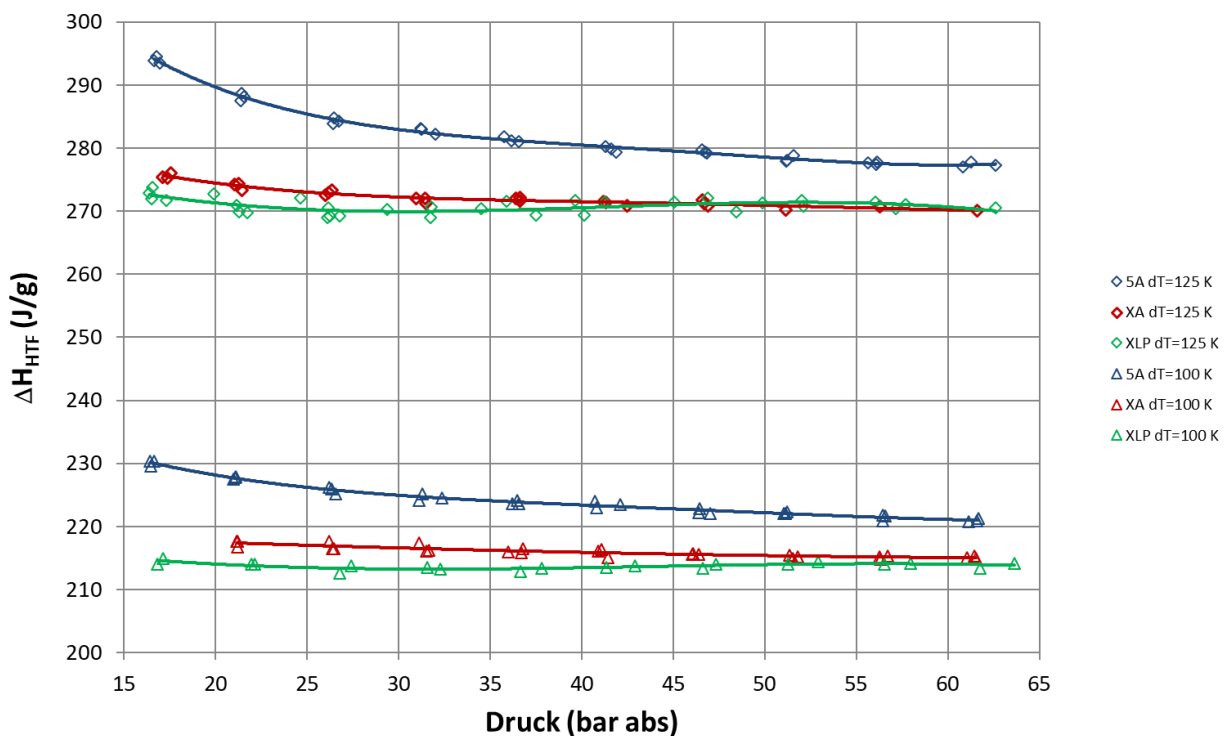


Abbildung 51: Vergleich der Enthalpieänderung von HELISOL® 5A, XA und XLP bei der isobaren Abkühlung von 425 °C und 400 °C auf 300 °C im Kompressionsloop im Kölner Wärmeträgerlabor.

Vergleichsmessungen mit der Calvet-DSC ermöglichen grundsätzlich die Bestimmung der Wärmekapazität von HELISOL® XLP beim jeweiligen Sättigungsdampfdruck. Aufgrund eines Defektes am DLR-eigenen Gerät wurden die Messungen in einem externen Labor durchgeführt. Es wurden drei unterschiedliche Füllmengen pro Tiegel untersucht, um etwaige Beeinträchtigungen der Messung

aufgrund von Überlagerungen der Messung mit Verdampfungsenthalpie bei zu geringer Befüllung zu prüfen. Die Messungen weisen recht deutliche Streuung auf (vgl. Abbildung 52). Zudem weichen die einzelnen Messungen mit Variation der Probenmenge pro 130- μ l-Tiegel untereinander nicht systematisch mit der Füllmenge voneinander ab.

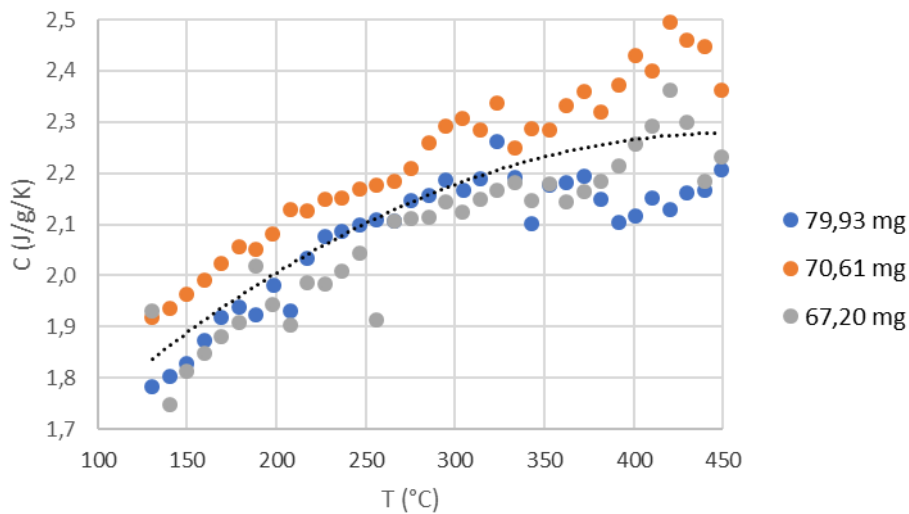


Abbildung 52: Wärmekapazitätsbestimmung von HELISOL® XLP mittels Calvet-DSC in drei Einzelbestimmungen mit Variation der Probenmenge pro 130- μ l-Tiegel mit Ausgleichspolynom zweiter Ordnung über alle Messungen (schwarze Punktklinie).

Die drei Messungen wurden gemittelt an ein Polynom zweiter Ordnung angepasst (schwarze Punktklinie in Abbildung 52):

$$C \text{ (in J/g/K)} = -4,18341\text{E-}06 \cdot T(\text{°C})^2 + 3,81008\text{E-}03 \cdot T(\text{°C}) + 1,41104$$

Das Ausgleichspolynom kann zur Abschätzung der Wärmekapazität von HELISOL® XLP zwischen 130 – 450 °C verwendet werden. Durch Integration ist daraus die Wärmeänderung bei der Temperaturänderung zugänglich. Für die Abkühlung von 425 °C auf 300 °C ergibt sich ein Wert von 267 J und bei 400 °C auf 300 °C ein Wert von 216 J. Obgleich die DSC-Messungen stark streuen, lagen diese Prognosen sehr nahe an den isobar ermittelten Messwerten.

2.19 Task 3.6 - Vergleich der Dichtebestimmungen am PROMETEO mit den Labor-untersuchungen (DLR, Wacker)

Die Aufgabe wurde nicht durchgeführt, weil der Dichte-Sensor nicht installiert werden konnte (siehe Kapitel 2.5).

2.20 Task 4.1 - Auslegung des Pumpen- und HTF-Teststandes (Dickow, DLR, Wacker, TÜV,)

Die Anforderungen an den HTF-Prüfstand wurden seitens DLR, Dickow und heat11 in mehreren Schritten festgelegt und als „technisches und kommerzielles Angebot für einen mobilen Thermoöl-Hochtemperatur-Teststand“ ausgearbeitet. Basierend darauf erarbeitete heat11 die detaillierte Auslegungs- und Fertigungsdokumentation, die später im Rahmen einer HAZOP-Analyse in Zusammenarbeit mit den beteiligten Partnern DLR, heat11, Dickow und TÜV-Nord geprüft und dokumentiert wurde.

2.21 Task 4.2 - Aufbau und Inbetriebnahme des Pumpen- und HTF-Teststandes (Dickow, DLR)

Dickow entwickelte und baute die HTF-Pumpe, die im Anschluss an heat11 zum Einbau in den Teststand übersendet wurde. Ausgehend von der festgelegten Auslegung der HTF-Pumpe mit 500 °C und 50 bar, wurde die bisherige Standardausführung (Abbildung 53) für Magnetpumpen bei Thermalölanwendungen verworfen.

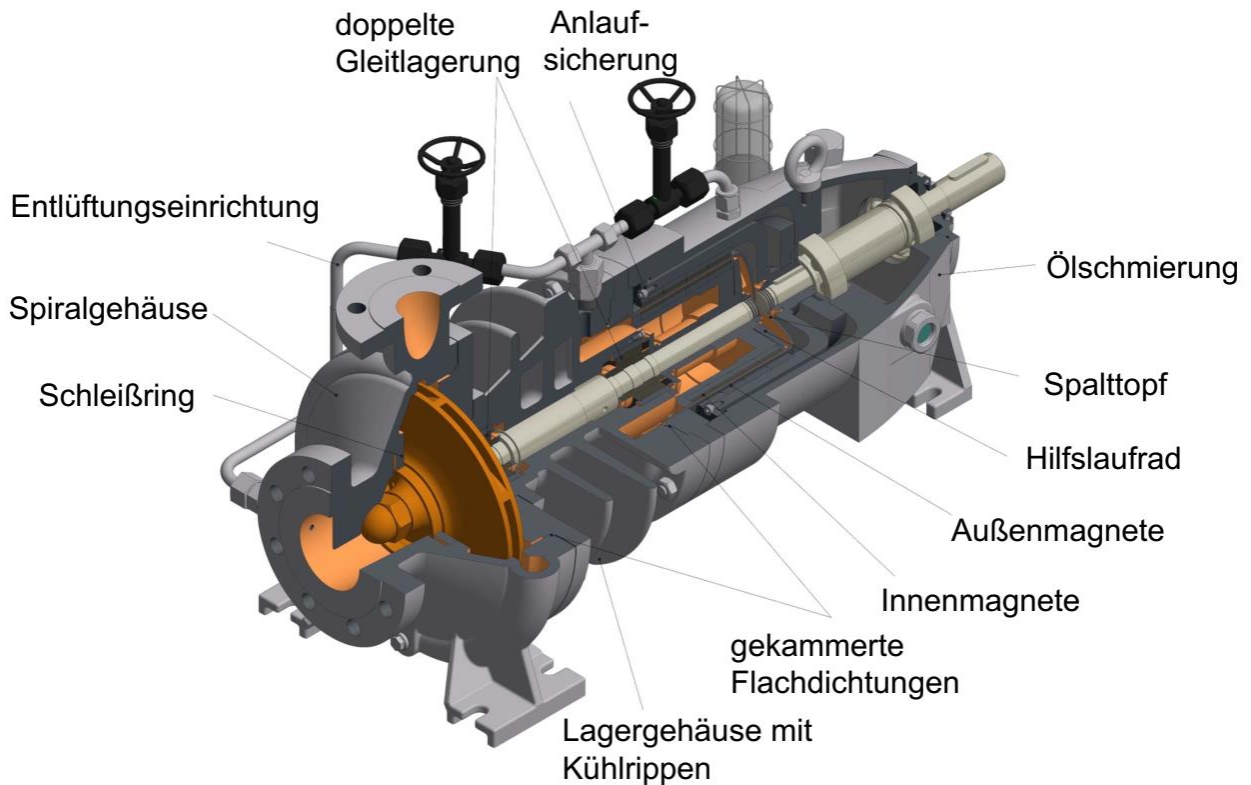


Abbildung 53: Verworfenes / nicht realisierte Standardausführung der Dickow Magnetpumpe

Die notwendige manuelle Entlüftung des Magnetraumes sowie die Kühlung dieses Raumes durch einen angebauten Etagenkühler (Abbildung 54) erschien für diese Anwendung nach einer Gefahrenanalyse nicht mehr sinnvoll.

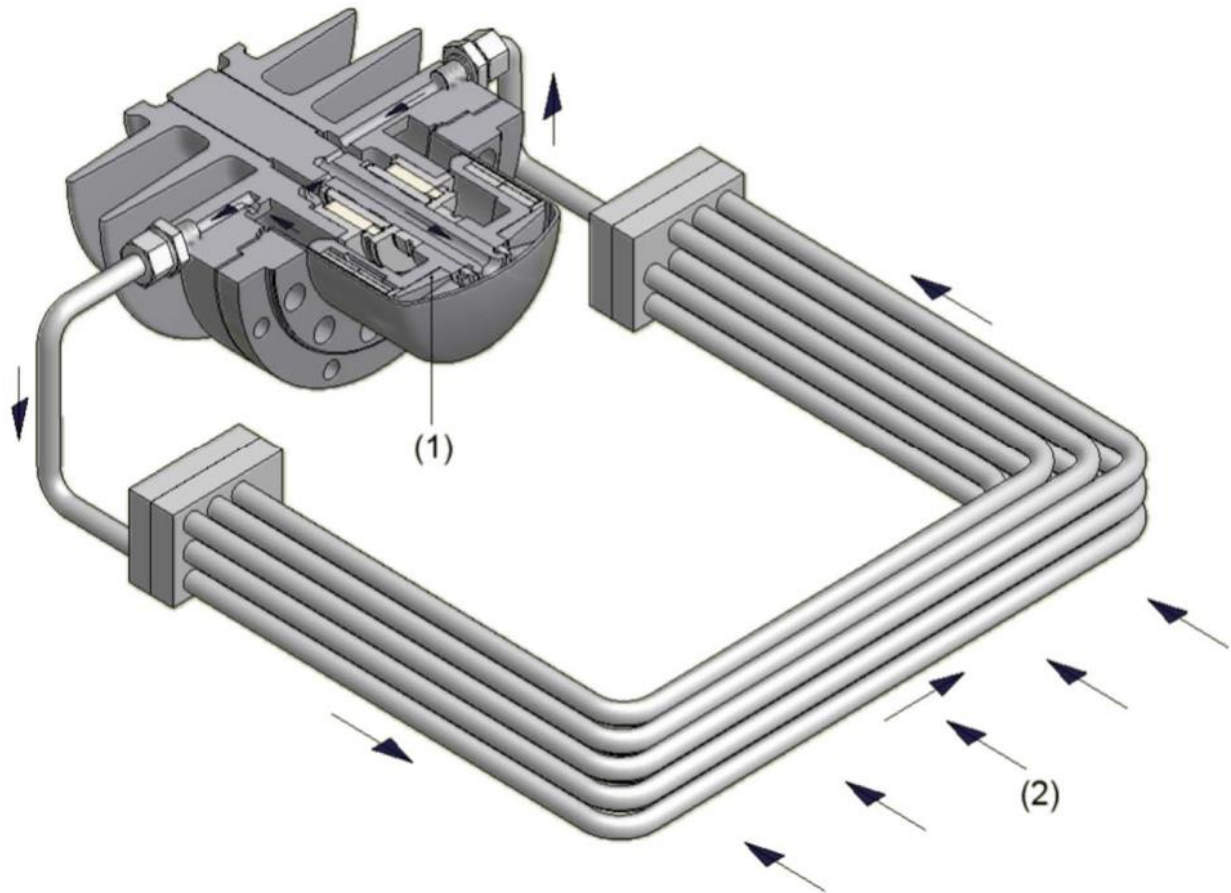


Abbildung 54: verworfener / nicht realisierter Etagenkühler mit Darstellung der Strömungsrichtung (wird nicht realisiert/ verworfen); Ein geführter interner Zirkulationsstrom über den Etagenkühler führt die in den metallischen Spalttöpfen durch Wirbelströme erzeugte Erwärmung ab. Der erforderliche Druckunterschied wird durch Rückenschaufeln (1) auf den inneren Magnetträgern erzeugt, die Motorluft (2) kühlt den internen Zirkulationsstrom außerhalb des Gehäuses rück.

Daraufhin wurde in einem ersten Schritt die Wärmeübertragung vom hydraulischen Bereich der Pumpe in den Magnetbereich für verschiedene Wellenwerkstoffe und deren Kombination untersucht. Weiterhin wurden verschiedene Wälzlagergehäuse (Lagerträger) als Prototypen gebaut, um die Wärmeübertragung von der Vorlauftemperatur der Pumpe in den Wälzlagerbereich zu untersuchen. Alle diese Temperaturuntersuchungen wurden bis zu einer maximalen Temperatur von ca. 400 °C durchgeführt. Höhere Temperaturen waren leider nicht möglich. Allerdings ließen sich die zu erwartenden Temperaturen bei einer Vorlauftemperatur von 500 °C durch Extrapolation abschätzen. Weiterhin wurde auch die bestehende Hochtemperatur-Gleitlagerung weiter untersucht und an die Gegebenheiten der geplanten Pumpenausführung (500 °C) angepasst und erweitert.

Insbesondere wurden hierbei die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Werkstoffpaarungen und die damit verbundenen unterschiedlichen Ausdehnungen berücksichtigt. Abschließend wurde für dieses Projekt das Design der Pumpe festgelegt und ein Ausführungsentwurf erstellt (Abbildung 55). Dieser Pumpentyp erhielt die Dickow-interne Bezeichnung NMX. Das „N“ steht für Normabmessungen nach ISO 2858, das „M“ steht für magnetgekuppelte Ausführung und das „X“ steht für Hochtemperaturanwendung.

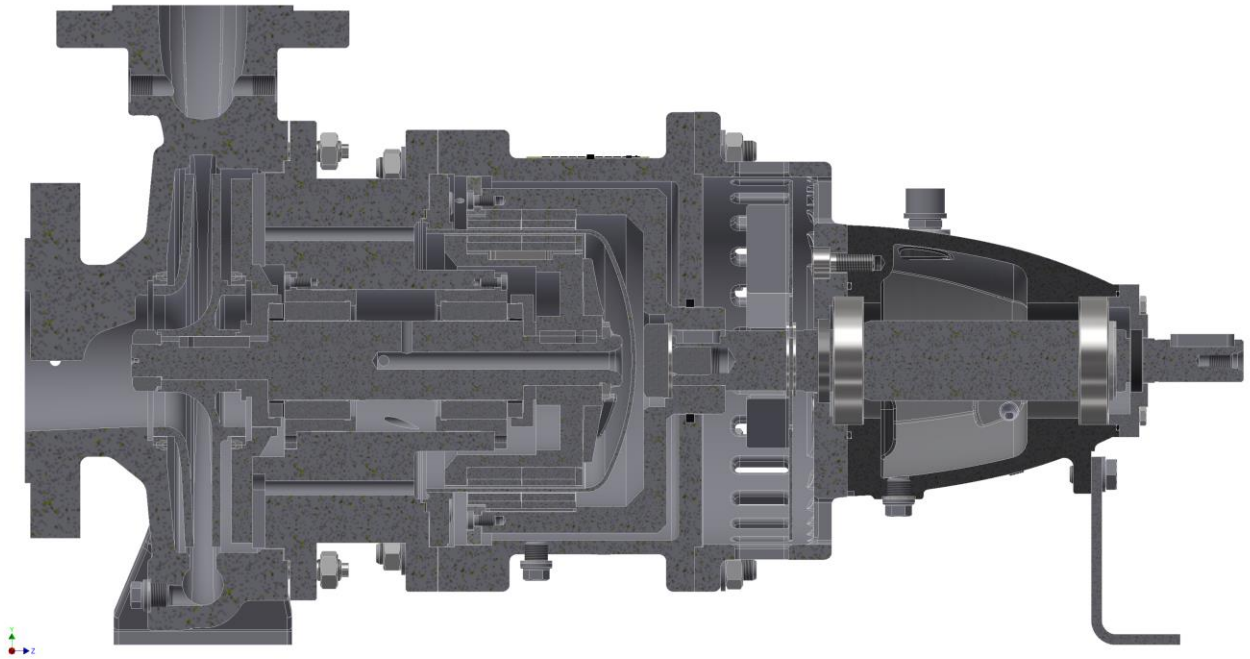


Abbildung 55: 3D Zeichnungsentwurf, Habschnittdarstellung, Pumpentyp NMX

Die Designmerkmale sind:

- Keine Trennung von hydraulischem Bereich und Magnetkupplung
- Keine manuelle Entlüftung und nur eine Entleerung am Spiralgehäuse. Die Pumpe ist selbstentlüftend.
- Temperaturreduzierung im Wälzlagerbereich durch integriertes Lüfterrad.

Aus diesem Zeichnungsentwurf heraus wurden die Einzelteile der Pumpe detailliert und insbesondere die vorgesehenen Werkstoffe hinsichtlich Verfügbarkeit und Verwendbarkeit genauer analysiert. Das betraf im Wesentlichen alle druckbelasteten Gehäuseteile, deren Verschraubung sowie die notwendigen internen Dichtungswerkstoffe. Mit ausführlichen Gehäuse-, Schrauben- und Flächenpressungsberechnungen wurden die einzelnen Werkstoffe ausgewählt und im weiteren Verlauf festgelegt. Die für die Auswahl als Grundlage dienenden Normen waren u.a.

- EN 10213 – Technische Lieferbedingungen für Stahlguss für Druckbehälter
- AD2000 Merkblätter
- EN 10269 – Stähle für Befestigungselemente bei erhöhten oder tiefen Temperaturen
- VdTÜV-Werkstoffblätter

Nach Beendigung der Detaillierung und der Festlegung der zu verbauenden Werkstoffe konnte die für die Fertigung der Pumpe erforderliche Ressourcenliste und eine Schnittzeichnung werden.

Die Seriennummer der im MoPuW eingebauten Pumpe lautet PB2021457. Die Fertigung und Beschaffung der Einzelteile und Komponenten des Pumpen- und HTF-Teststandes sowie die Erstellung der elektrischen Schaltpläne wurde rechtzeitig abgeschlossen. Abbildung 21 zeigt den im Aufbau befindlichen Pumpen und HTF-Teststand mit den Einzelteilen und der integrierten Pumpe. Die Auslieferung der HTF Pumpe an heat11 wurde im Juli 2021 realisiert, während der fertige MoPuW (Container) im Oktober 2021 nach Köln zum DLR verbracht wurde. Abbildung 56 zeigt den Aufstellungsort am DLR Standort in Köln Porz. Die eingebaute Pumpe des TYP NMX ist in der Abbildung 57 dargestellt.



Abbildung 56: Aktueller (weil mobil) Aufstellungsort von MoPuW am DLR Standort in Köln Porz

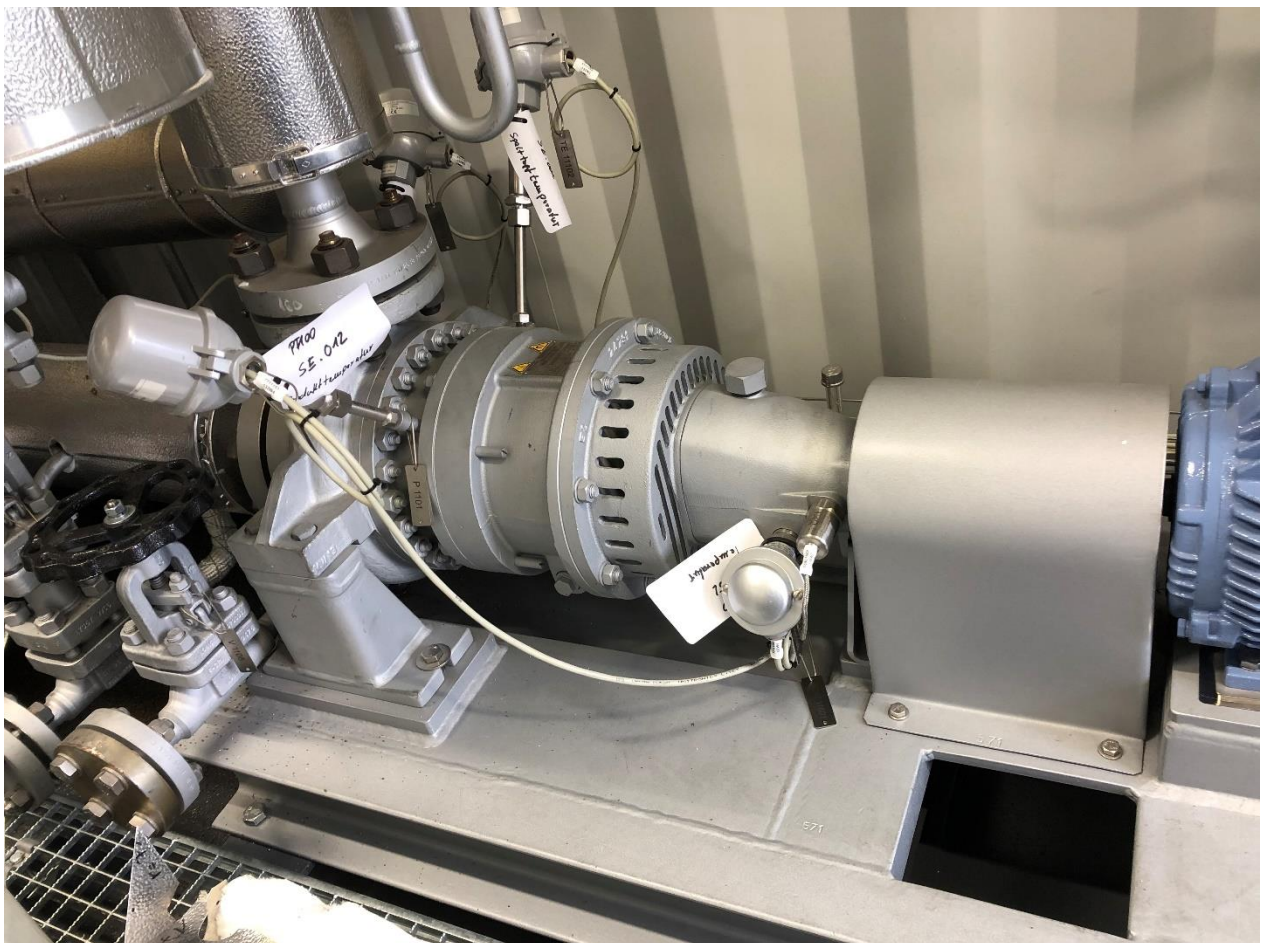


Abbildung 57: Im MoPuW eingebaute NMX-Kreiselpumpe ohne thermische Isolierung am Spiralgehäuse

Die Inbetriebnahme des MoPuW erfolgte zunächst bis auf 445 °C ohne direkte Auffälligkeiten. Im kalten Zustand hatte sich die Pumpe jedoch verklemmt und ließ sich nicht mehr drehen. Fertigungstechnische Toleranzen an einem wichtigen, neu entwickeltem federelastischen

Gleitlagerträgeerteiles machten es notwendig, die einzelnen Fertigungsschritte im Detail zu untersuchen, um die Fehlerquelle einzukreisen. Diese Entwicklung war im Vorfeld nicht absehbar, da betriebstemperaturbedingt eine Leistungsprüfung der Pumpe auf dem Dickow-eigenen Prüfstand in Waldkraiburg vor Auslieferung nicht möglich war, was im Übrigen den Nutzen von MoPuW ausmacht. Durch zusätzliche umfangreiche Versuche wurde herausgefunden, dass die Tolerierung und die entsprechende Fertigung des federelastischen Bereiches ausschlaggebend für die Funktionsfähigkeit bzw. Haltekraft des keramischen Gleitlagers sind. Nach der Überarbeitung der Pumpe und des Pumpendesigns erfolgte die Inbetriebnahme des MoPuW bis zur maximale Betriebstemperatur von 470 °C.

Die folgenden technischen Aufgaben wurden unabhängig voneinander bearbeitet:

- Anpassung der Steuerung, um die Selbstabschaltung bei tolerierbar fluktuierenden Massenströmen am Durchflusswächter zu verhindern
- Der Austausch von defekten Temperaturtransmittern an der Pumpe
- Einbau einer Fernwartungseinrichtung
- Auslegung einer lokalen Beheizung des Rohrstücks zwischen Ausgleichsbehälter und Sicherheitsventil, um die lokale Kondensation von zyklischen Bestandteilen aus dem HTF zu verhindern. Derartige Zyklen können zur Verstopfung von Rohrleitungen führen und sind im speziellen am Sicherheitsventil unbedingt zu vermeiden
- Nacharbeitung der thermischen Isolierung an manchen Stellen, um die HTF Beprobung zu ermöglichen und die thermischen Verluste der Anlage zu verringern.
- Installation der Brandmeldeeinrichtung
- Behebung mehrere schleichenden Leckagen an der Stickstoffüberlagerung mittels eines Helium-Lecksucher-Tests

2.22 Task 4.3 - Betrieb des Pumpen- und HTF-Teststandes (DLR, Wacker)

Der Dauerbetrieb des MoPuW bei 450 – 470 °C begann im Juli 2022 und wurde nach einer Betriebsdauer von insgesamt 7288 Stunden abgeschlossen. Es gab kleinere technische Probleme mit dem Temperatursensor am Auslass der Heizung und der Messblende an eben dieser Stelle, die zu kurzzeitigen Ausfällen führten. Meist ließen sich die Probleme innerhalb von einem Tag lösen. Ansonsten verlief der Testbetrieb, was die Pumpe und den Wärmeträger anbelangt, unauffällig. Nach 936 Stunden bei 470 °C traten jedoch zunehmend Undichtigkeiten an verschiedenen Flanschverbindungen der Pumpe auf. Den Untersuchungen nach zu urteilen gerieten die eingesetzten Dichtungsmaterialien an ihre Grenzen. Aus dem Grund wurde der Versuch bei höheren Temperaturen nicht mehr fortgesetzt, weil nur eine Umrüstung auf besser geeignete Dichtungsmaterialien die Voraussetzung für einen Betrieb bis zu 480 °C geschaffen hätte. Seitens des Fluids, der Pumpe an sich oder anderer Aggregate hat sich bei Temperaturen bis 470 °C noch keine Begrenzung der Einsatzfähigkeit ergeben.

Die bisher an der Durchflussentnahmestelle entnommenen Wärmeträgerproben wiesen nach fünf Stunden bei 450 °C eine erhöhte Methankonzentration auf, die während der ersten 1500 Betriebsstunden gesunken ist. Der Wasserstoff stieg zunächst an und stagnierte bis ca. 4000 Stunden (s. Abbildung 58). Ab 4000 Stunden war ein kontinuierlicher Anstieg von Methan und Wasserstoff festzustellen. Weitere Zersetzungsprodukte wurden nur in sehr geringer Menge nachgewiesen. Die Stickstoffatmosphäre enthielt keine signifikant per μGC nachweisbare Sauerstoffmenge. Erwartungsgemäß wurde auch keine signifikante Bildung von Oxidationsprodukten wie Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid festgestellt. Nach Steigerung der Temperatur auf 460 °C und insbesondere nach der Anhebung auf 470 °C haben die Konzentrationen von Methan und Wasserstoff jeweils deutlich zugenommen.

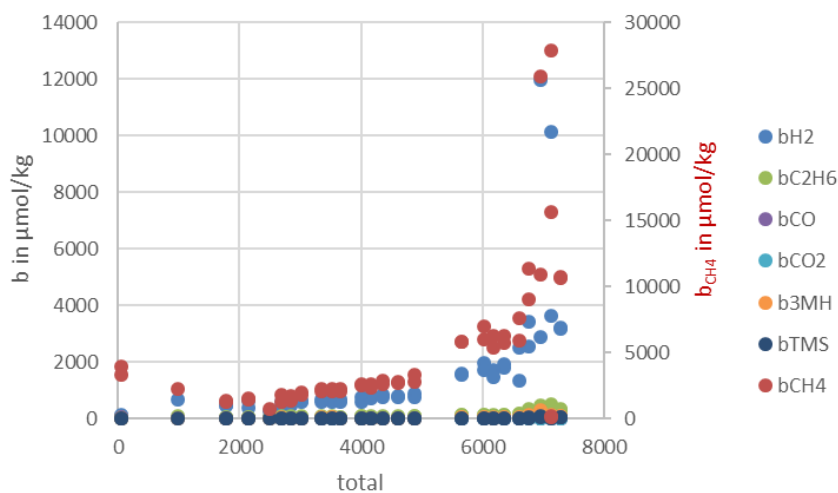


Abbildung 58: Molare Konzentrationen gelöster Gase in den Wärmeträgerproben aus der Durchflussentnahmestelle am MoPuW bis 7288 Gesamtbetriebsstunden bei bis zu 470 °C.

Bei jeder Beprobung wurden zwei übereinander eingebaute Probenzylinder nach längerer Durchströmung (von unten nach oben) entnommen. Bei korrekter Probenentnahme wurden in beiden Zylindern nahezu gleiche Gaskonzentrationen festgestellt.

Die jüngeren Proben wurden beim DLR zusätzlich bzgl. Viskosität und Dichte mit einem Stabinger-Gerät untersucht (s. Abbildung 59 und Abbildung 60).

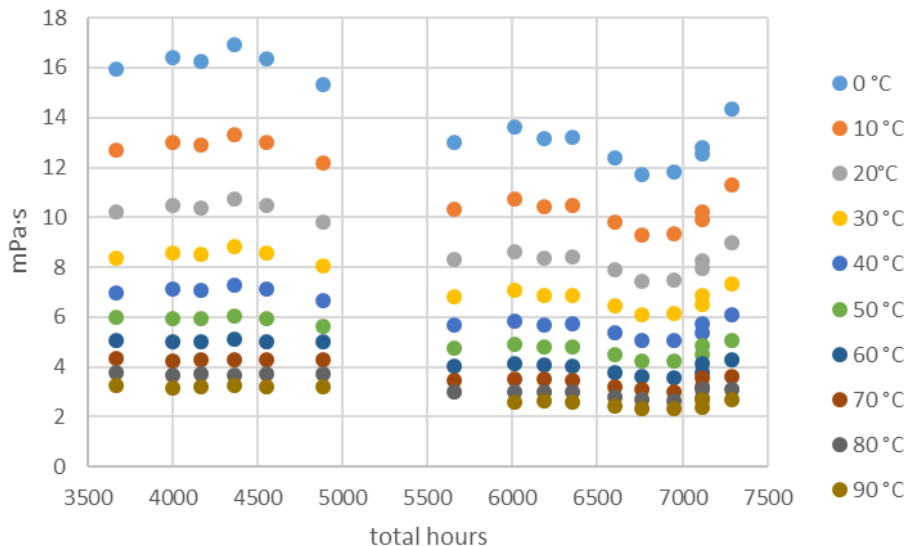


Abbildung 59: Dynamische Viskosität der Wärmeträgerproben aus der Durchflussentnahmestelle am MoPuW nach 3500 Stunden bis 7288 Stunden zwischen 0 – 90 °C.

Aufgrund der temperaturabhängigen Verlagerung des Äquilibriumsgleichgewichts des Siliconöls hin zu kleineren Molekülen nimmt die Viskosität bei einer Temperatursteigerung im MoPuW zunächst stark ab. Bei 470 °C deutet sich jedoch im Verlauf eine Zunahme an.

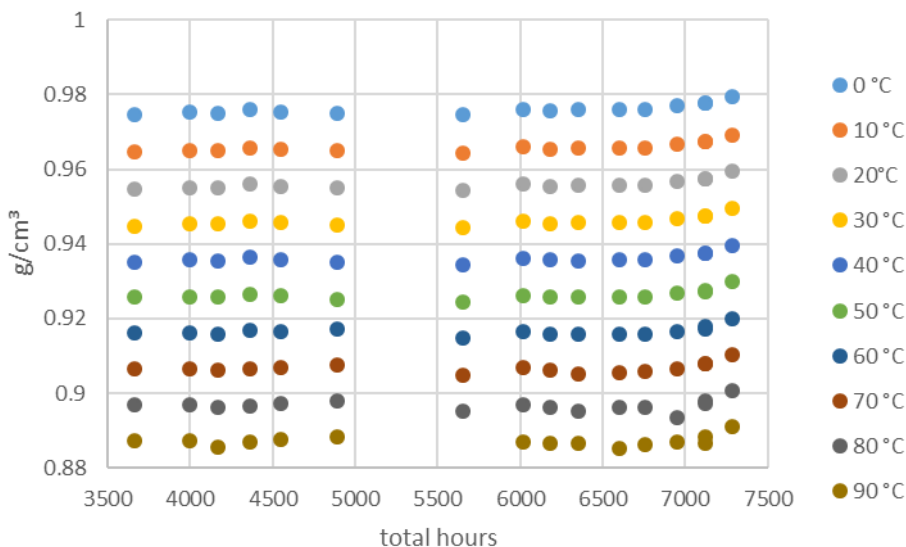


Abbildung 60: Dichte der Wärmeträgerproben aus der Durchflussentnahmestelle am MoPuW nach 3500 Stunden bis 7288 Stunden zwischen 0 – 90 °C.

Im Gegensatz zur Viskosität hat sich die Dichte über die Betriebsdauer kaum verändert (s. Abbildung 60). Tendenziell ist eine Zunahme zu erkennen, die sich ab ca. 7000 Stunden bzw. seit dem Betrieb bei 470 °C etwas deutlicher abzeichnet.

2.23 Task 5.2 - Stakeholder Zusammenarbeit (Wacker, DLR)

Die Stakeholder-Zusammenarbeit wurde im Projekt SIMON erfolgreich etabliert. Sie beinhalten den Dialog zwischen den Projektpartnern und zentralen CSP-Firmen und Organisationen wie z.B. Fichtner, Abengoa, Allianz Versicherung. Diese zumeist bilateralen Dialoge wurden während des Vorhabens fortgesetzt. Beide Firmen erkannten keine technischen Hürden mehr, die dem Einsatz

von HELISOL-Produkten in neuen CSP-Kraftwerken im Wege stünden. In anderen Worten, man ist der Überzeugung, bei zukünftigen Projekten Silicon-basierte Wärmeträger berücksichtigen zu können. Seitens Suntrace sieht man den Austausch von HTF in existierenden Kraftwerken als ein ebenso relevantes Anwendungsszenario an.

2.24 Task 5.3 - Entwicklung eines internationalen Standards für die Anwendung von SHTF in Parabolrinnenkraftwerken (Wacker, DLR)

Eine internationale Arbeitsgruppe wurde im Rahmen des SolarPACES Projektes „Silicone-Based HTF in Parabolic Trough Applications“ etabliert. Die Guideline als Grundlage für die Erstellung eines internationalen Standards lag Anfang 2021 vor. Die Guideline ist auf der Seite der SolarPaces zu finden: <https://www.solarpaces.org/silicone-based-heat-transfer-fluids-guidelines/>

Der Vorschlag für den Standard wurde im Frühjahr 2021 unter dem Namen „*Silicone-based heat transfer fluids for the use in line focusing CSP Applications*“ auf IEC-Ebene an die nationalen Komitees zur Abstimmung verteilt. Die Veröffentlichung des fertigen Standards erfolgte im Mai 2024 hier: <https://www.vde-verlag.de/iec-normen/252870/iec-62862-1-6-2024.html>

3 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

DLR

Die Zuwendung wurde im Wesentlichen zur Finanzierung des für die Aufgabenbearbeitung notwendigen Fachpersonals und die erforderlichen Materialien für die experimentellen Arbeiten benötigt und ausgegeben. Ferner wurde der Betrieb von PROMETEO durch CIEMAT im Unterauftrag des DLR finanziert.

Wacker

Die Zuwendung wurde bei Wacker im Wesentlichen zur Teilfinanzierung des für die Aufgabenbearbeitung notwendigen Fachpersonals (Labor-/Analytikbetrieb inkl. innerbetriebliche Leistungen wie Raumkosten, IT-Kosten, Lager Chemikalien, etc.) und die erforderlichen Materialien für die experimentellen Arbeiten benötigt und ausgegeben. Zusätzlich wurde ein großer Teil der Finanzierung für das interne Design des Messwärmeüberträgers sowie die damit verknüpfte Materialbeschaffung aufgewendet (Instrumentierung, Rohrleitungen etc.). Die Detailplanung und Fertigung erfolgte im Unterauftrag durch die Firma heat11. Ein Teil der Betriebskosten von PROMETEO (Unterauftrag Ciemat) wurde durch die Zuwendung finanziert.

flucon

Die Zuwendung wurde zur Teildeckung der angefallenen Kosten für die Materialbereitstellung der Prototyp-Sensoren sowie für geleistete Entwicklungsstunden (Lohnkosten) aufgewendet.

Senior Flexonics

Die Zuwendung wurden zur Teilfinanzierung des für die Aufgabenbearbeitung notwendigen Fachpersonals und die erforderlichen Materialien für die experimentellen Arbeiten benötigt und ausgegeben.

Dickow

Die Zuwendung wurde zur partiellen Deckung der angefallenen Kosten für die Auslegung und die Fertigung der NMX Pumpe sowie Herstellung des MoPuW Teststandes verwendet. Ferner wurde

die Zuwendung für die anteilige Deckung der geleisteten Arbeitsstunden (Lohnkosten) aufgewendet.

TÜV Nord

Die Zuwendung wurde im zur anteiligen Finanzierung des für die Aufgabenbearbeitung notwendigen Fachpersonals verwendet.

3.1 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die eingehend dargestellten Arbeiten der einzelnen Zuwendungsempfänger waren erforderlich, um die Aufgabenstellung zu bewältigen. Die Fördermittel wurden ausschließlich zur Bearbeitung der in Kapitel 1.1 dargestellten Aufgabenstellung verwendet.

3.2 Verwertbarkeit des Ergebnisses

a) Wissenschaftliche Verwertung

Eine Vielzahl der Ergebnisse wurde bereits in wissenschaftliche Veröffentlichungen wie Zeitschriftenartikel, Konferenzbeiträge oder Patenanmeldungen umgesetzt (s. Kapitel 3.4).

b) Wirtschaftliche Verwertung

Wacker

Durch das Vorhaben wurde der „proof of concept“ in Bezug auf die Kompatibilität des neuen Wärmeträgers HELISOL® XLP erfolgreiche abgeschlossen (5000 h Betrieb in MoPuW). Hierdurch wurde eine wesentliche Hürde genommen, die der Markteinführung von HELISOL® XLP bzw. anderen Silicon-basierten Wärmeträgerölen im CSP und Industrie Bereich entgegenstanden.

Die im Laufe des Vorhabens erzielten Ergebnisse, unter anderem zur thermischen Stabilität bei wesentlich höheren Betriebstemperaturen als 450 °C stellen ebenfalls wichtige Schritte auf dem Weg zur Markteinführung insbesondere in Hinblick auf sicherheitstechnische Fragestellungen dar.

flucon

Mit der Auslegung, Konstruktion, Fertigung und der Demonstration temperaturfester und „feldtauglicher“ Sensorvarianten für die Messsysteme QVis und H2Online ist eine Ausweitung des Produktspektrums von flucon erfolgt. Zukünftig können Nachfragen zur online-Viskosimetrie und Online-Wassergehaltbestimmung bei Feld-Prozessbedingungen bedient werden.

Senior Flexonics

Durch das Vorhaben verfügt die Senior Flexonics GmbH über ein verbessertes und erprobtes REPA-System der Produkt-Familie der flexiblen Rohrverbinder zur Anbindung von Receiver-Rohren für solarthermische Parabolrinnen-Kraftwerke die in dem Betriebsbereich bis 450 °C eingesetzt werden können. Die Verwendung dieser Ausführung für bestehende Technologie bis 400 °C ist ebenfalls von großem Interesse, da die Erfahrung im Betrieb eine Überhitzung der 400 °C ein relevantes Thema war. Durch dieses für das Medium HELISOL® XLP geeignete System erweitert Senior Flexonics die Produktpalette bis zu den erhöhten Einsatzbedingungen von 450 °C mit einer dafür angepassten thermischen Isolierung.

Dickow

Dickow hat sein Pumpenportfolio im Vorhaben SING um die magnetgekoppelte Pumpe der Serie NMX erweitert, die serienmäßig bis 450 °C betrieben werden kann und ohne einen externen

Kühler oder andere Aggregate auskommt. Die Haltbarkeit der Pumpe wurde im Vorhaben SING im Zusammenspiel mit der Wärmeträger HELISOL® XLP bis 470 °C nachgewiesen.

TÜV Nord

Der TÜV Nord hat seine Expertise im Bereich der Betriebssicherheitsbewertung von Wärmeträgeranlagen mit Silicon-basierten Wärmeträgerölen erweitert. Im Speziellen die Anlagenauslegung und deren Betrieb oberhalb von 400 °C und die Bewertung von kleinen Leckagen und Brandereignissen standen dabei im Fokus.

3.3 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.

Bei Informationsrecherchen im Laufe des Vorhabens wurde flucon auf den Feuchtesensor „Liquidew I.S.“ der Firma Michell Instruments GmbH aufmerksam. Das Messsystem verwendet einen keramischen Impedanz-Taupunktsensor und ist für Temperaturen bis 50 °C einsetzbar und ggf. anfällig für Verunreinigungen im HTF.

3.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Folgende projektrelevante Veröffentlichungen wurden bereits publiziert:

Bereits publizierte Zeitschriftenartikel (Peer-Reviewed):

Bisher keine

Publikationen in Vorbereitung:

Bisher keine

Erfolgte Patentanmeldungen:

Im Rahmen des SIMON Projektes wurden keine Patente angemeldet

Geplante Patentanmeldungen:

Bisher keine

Konferenzbeiträge:

- (1) C. Hilgert, C. Jung, N. Janotte, J. Dersch, M. Röger, G. Saliou, L. Valenzuela Gutiérrez, K. Kelm, "Development of Novel Silicone-Oil Based Heat Transfer Fluids for High Temperature Applications," Helmholtz Energy Konferenz „Tackling the Challenges of the Energy Transition“, 12.-13.06.2023, Koblenz.
- (2) C. Jung, O. Smirnova, C. Spenke, "Solubility of Gases in Heat Transfer Fluids," SolarPACES conference 2024, 8.-11. Oktober 2024, Rom, Italien.
- (3) C. Jung, C. Spenke, "Isobaric Density of Heat Transfer Fluids," SolarPACES conference 2024, 8.-11. Oktober 2024, Rom, Italien.

Veröffentlichungen:

- (1) IEC 62862-1-6:2024, Solar thermal electric plants - Part 1-6: Silicone-based heat transfer fluids for use in line-focus concentrated solar power applications.