



TransHyDE-GETH2 TransHyDE

Infrastrukturelle und betriebstechnische Aspekte bei der Umstellung von Erdgastransportleitungen auf Wasserstoffbetrieb und beim Neubau von Wasserstoffnetzen

Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II: Langfassung

Stand:	31.03.2026
Einreichungsdatum (TIB):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Adlares GmbH, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT, Evonik Industries AG; Meter-Q Solutions GmbH, Nowega GmbH, Open Grid Europe GmbH, ROSEN Technology and Research Center GmbH (RTRC GmbH), RWE Generation SE, RWE Power AG, Universität Potsdam
Autorin/Autor:	Sonja Rothenbacher, Frank Graf, Till Quadflieg, Ann-Christin-Fleer, Jan Suhr, Jochen Schütz, Peter Kussin, Christof Weis, Tobias van Almsick, Fabian Unterumsberger, Sebastian Friede, Ingo Gersonde, Fabian Howe, Michael Tewes, Eva-Maria Spreckelsen, Rabea Buß
Fördertitel:	Verbundvorhaben GETH2 TransHyDE
Förderkennzeichen:	03HY207A bis J
Disclaimer:	<i>Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor/den Autoren.</i>

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Untertitel

Aufgrund der engen Vernetzung der Arbeiten wurde in Abstimmung mit dem Projektträger Jülich ein gemeinsamer Bericht angefertigt und abgegeben. Im Folgenden finden Sie die Förderkennzeichen, Zuwendungsempfänger und partnerspezifische Themen:

Förderkennzeichen	Zuwendungsempfänger	Teilvorhabenbezeichnung im Verbundvorhaben TransHyDE_UP2: GETH2: Infrastrukturelle- und betriebstechnische Aspekte bei der Umstellung von Erdgastransportleitungen auf Wasserstoffbetrieb und beim Neubau von Wasserstoffnetzen
03HY207A	RWE Generation SE	Aufbau, Betrieb und Unterstützung einer Testumgebung
03HY207B	ADLARES GmbH	Entwicklung eines luftgestützten Wasserstoff-Ferndetektionssystems
03HY207C	DVGW-Forschungsstelle am EBI des KIT	Wissenschaftliche Untersuchungen zu Aspekten der Gasbeschaffenheit und der Volumenstrommessung
03HY207D	Universität Potsdam	Luftgestützte Wasserstoffferndetektion
03HY207E	Evonik Operations GmbH	Unterstützungsleistungen Intelligente Molchung
03HY207F	MeterQ Solutions GmbH	Gasbeschaffenheitsanalysen
03HY207G	Nowega GmbH	Intelligente Molchung
03HY207H	Open Grid Europe GmbH	Gasqualität und Transportsystem
03HY207I	Rosen Technology and Research Center GmbH	Intelligente Molchung
03HY207J	RWE Power AG	Materialverträglichkeit

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	11
I. Ursprüngliche Aufgabenstellung	13
II. Vormaliger Stand des Wissens	14
III. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten	15
III.1 Arbeitspaket 1: Koordination, Kommunikation, Ergebnissynthese	15
III.2 Arbeitspaket 2: Aufbau und Betrieb der Versuchsumgebung	17
III.3 Arbeitspaket 3: Arbeitspaket Qualitäts- und Mengenmessung	23
III.4 Arbeitspaket 4: H ₂ -Verträglichkeit von Werkstoffen	40
III.5 Arbeitspaket 5: Luftgestützte Wasserstoff-Ferndetektion (Hy2ReM)	45
III.6 Arbeitspaket 6: Intelligente Molchung	58
III.6.1 Durchführung einer Nullmolchung	59
III.6.2 Entwicklung eines H ₂ -Testmolchs	65
III.7 Arbeitspaket 7: Verdichterkonzepte	90
IV. Wesentliche Ergebnisse	96
IV.1 Arbeitspaket 1: Koordination, Kommunikation, Ergebnissynthese	96
IV.2 Arbeitspaket 2: Aufbau und Betrieb der Versuchsumgebung	97
IV.3 Arbeitspaket 3: Arbeitspaket Qualitäts- und Mengenmessung	100
IV.4 Arbeitspaket 4: H ₂ -Verträglichkeit von Werkstoffen	113
IV.5 Arbeitspaket 5: Luftgestützte Wasserstoff-Ferndetektion (Hy2ReM)	124
IV.6 Arbeitspaket 6: Intelligente Molchung	128
IV.7 Arbeitspaket 7: Verdichterkonzepte	129
V. Verwendung der Zuwendung	131
V.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	131
V.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	133
VI. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans	135
VII. Fortschritt des Projektumfelds während der Laufzeit	139
VIII. Erfolgte Veröffentlichungen	140

Abkürzungsverzeichnis

Ar Argon

CH ₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CAD	Computer-Aided Design: Computergestützter Entwurf und Erstellung technischer Zeichnungen in 2D oder 3D
CARS	Coherent-anti-Stokes-Raman-Spectroscopy
CRDS	Cavity-Ring-Down-Spektroskopie
EMAT	EMAT-C-Molch: Inspektionsgerät für Pipelines, das elektromagnetisch-akustische Wellen verwendet, um Korrosion und insbesondere Risstiefen in prozentualem Verhältnis zur Rohrwanddicke zu detektieren
FEM	Finite-Elemente-Methode: Numerisches Berechnungsverfahren zur Simulation physikalischer Vorgänge in Technik und Forschung
FFM	Feldfunktionsmuster
FHG	Fourth Harmonic Generation: Nichtlinearer optischer Prozess zur Erzeugung von frequenz-vervierfachtem Laserlicht
FPI	Fabry-Pérot-Interferometer
FWA	Fixed-Wing Aircraft: Starrflügelflugzeug
GAP	Gap-Analyse: strategische Methode, der die Lücke zwischen einem aktuellen Zustand (Ist) und einem gewünschten Zustand (Soll) misst, um Verbesserungspotenziale zu identifizieren.
GDRM	Gasdruckregel- und Messanlage
HAZOP	Analyse Hazard and Operability Study: systematische Methode, um Gefahren und betriebliche Probleme in technischen Anlagen und Prozessen zu identifizieren
H ₂	Wasserstoff
He	Helium
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HTTA	High Temperature Hydrogen Attack
IBN	Inbetriebnahme
IP	Intellectual Property: Geistiges Eigentum, Patent, technische Erfindung
LFM	Laborfunktionsmuster
LHA	Local Hydrogen Analysis
LIDAR	Light Detection and Ranging: Fernerkundungstechnologie, die Laserstrahlen nutzt
LOD	Limit of Detection
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt

Gefördert durch:



Nd:YAG	Neodym-gedoppter Yttrium-Aluminium-Granat
N ₂	Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
O ₂	Sauerstoff
THT	Tetrahydrothiophen
OFCEAS	Optical Feedback Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy (<i>optisch rückgekoppelte, resonatorverstärkte Absorptionsspektroskopie</i>); hochsensitive, laserbasierte Technologie zur Messung von Spurengasen Emissionsüberwachung (CEMS) und Prozessgasanalyse
PEM	Protonenaustausch-Membran-Elektrolyse
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PTX	Gruppe von Technologien zur Umwandlung von Strom in chemische Energieträger
SDOEC	Festoxid-Elektrolysezelle
SRGS	Stimulated-Raman-Gain-Spectroscopy
WSEA	Wasserstoffeinspeiseanlage

Abbildungsverzeichnis

Abbildung III.2.1:	Wasserstofferzeugungsanlage am Standort Lingen.....	17
Abbildung III.2.2:	Unterirdische Anschlussleitung zur Anbindung der H ₂ -Erzeugungsanlage an die Versuchspipeline während der Bauzeit.....	18
Abbildung III.2.3:	Wandstärkenmessung an Rohrleitung des Testloops.....	20
Abbildung III.2.4:	Durchführung der Molchung der Bestandsleitung (links), Molche (rechts)	21
Abbildung III.2.5:	Ansicht des Testloops am Kraftwerkstandort Lingen Außenbereich	22
Abbildung III.3.1:	Apparatur zur Behälterevakuierung und Vorbereitung zur Probenahme im H ₂ -Labor (DVGW-EBI).....	23
Abbildung III.3.2:	Analytik im H ₂ -Labor (DVGW-EBI) mit Massenspektrometer (links), Probenaufgabe (ValveBox), OFCEAS (oben) und Probenbehältervorbereitung (rechts)	24
Abbildung III.3.3:	Probenahmekampagne von OGE und DVGW-EBI am Test-Loop in Lingen	25
Abbildung III.3.4:	H ₂ -Labor zur Validierung von PGCs.....	26
Abbildung III.3.5:	Chromatogramm eines H ₂ Prüfgases.....	27
Abbildung III.3.6:	MGC ^{hydrogen} -Installation in Lingen	29
Abbildung III.3.7:	Adsorptionstestanlage und die vor Ort verfügbare Analytik	32
Abbildung III.3.8:	Einbindung der Adsorptionstestanlage vor Ort in Lingen	33
Abbildung III.3.9 a:	beheizter Ammoniakzylinder mit Dosierpumpe.....	34
Abbildung III.3.9 b:	schematische Darstellung einer Durchbruchskurve mit den typisch daraus zu ermittelnden technischen Parametern [7].	34
Abbildung III.3.10:	Laboranlage-Adsorbentteststand im H ₂ -Labor des DVGW-EBI.....	35
Abbildung III.3.11:	Abweichung der Blendenmesswerte über der Reynoldszahl auf den Referenzprüfständen..	38
Abbildung III.3.12:	Ermittelte Abweichung des Referenzturbinenradzählers über der Reynoldszahl auf den Referenzprüfständen	39
Abbildung III.3.13:	Zählermessstrecke am H ₂ -Loop in Lingen	40
Abbildung III.4.1	a) Beispiel der ersten Rohrleitungs- und Instrumentenfließschemas (R&I) für die Integration des Materialprüfstands bzw. der Teststrecken; b) erste Entwürfe des Materialprüfstands mit jeweils drei warmen und kalten Teststrecken.....	42
Abbildung III.4.2:	GETH2 TransHyDE -Loop Materialprüfstand mit sechs Passtücken im Betrieb vor Einbau der Teststrecken aus betriebsbeanspruchten Rohrsegmenten	42
Abbildung III.4.3:	Eindrücke der Druckprüfung aller Teststrecken bei 1,5-fachen Betriebsdruck beim Fertiger in Anwesenheit des TÜV Nord und der RWE Power Qualitätssicherung. Alle Teststrecken erfüllten die Vorgaben für neues Material und haben die Druckprobe bestanden	43
Abbildung III.4.4:	Darstellung des Funktionsprinzips der In-situ-Wasserstoffmessungen mit der sogenannten „Local Hydrogen Analysis“ (LHA) der Ruhr-Universität Bochum. Links: verwendete elektrochemische Zellaufbau; rechts: Messkurven des Oxidationsstroms für einen Referenzzustand sowie von einem mit Wasserstoff beladenem Zustand.....	44
Abbildung III.5.1:	Quantitativer Vergleich der berechneten Signale der Raman-Streuung von Wasserstoff (0.01 Vol. %) und Wasserdampf (2 Vol. %), sowie des Tageslichts.	46

Abbildung III.5.2:	Links: LFM, rechts: Detektionssystem. Die Detektionskanäle sind mit H ₂ , Fluoreszenz, H ₂ O, N ₂ , Rayleigh bezeichnet.	48
Abbildung III.5.3:	Gesamtaufbau LFM mit Gassystem.	48
Abbildung III.5.4:	Fluoreszenz-Emissionsspektren von Quarzglas (links), Sandboden (mitte) und Weizenblättern (rechts).	49
Abbildung III.5.5:	Spektrale Strahlungsstärke [W/(sr nm)] der Fluoreszenz von Bodenmaterialien bei Emissionswellenlänge $\lambda_{em} = 300$ nm, Anregung mit $\lambda_{ex} = 266$ nm, Anregungsleistung $P_{Laser} = 1$ W.	49
Abbildung III.5.6:	Baugruppen-Funktionstest der vollständigen Empfangseinheit des FFM im Adlares Entwicklungslabor zur Überprüfung der kollinearen Lichtausbreitung im Messsystem.	50
Abbildung III.5.7:	Links: Module des Messsystems kurz nach dem Einbau in den Anhänger. Rechts: Vollständiges Messsystem kurz vor der ersten vollständigen Inbetriebnahme auf dem OGE-Testfeld in Emsbüren.	51
Abbildung III.5.8:	Links: Wassergehalt der Atmosphäre als Funktion der Temperatur für verschiedene relative Luftfeuchten nach Huang [7]. Rechts: Simulation des Limit-Of-Detection (LOD) des Messsystems als Funktion der Messzeit für verschiedene Lufttemperaturen bei 60 % rel. Luftfeuchte.	52
Abbildung III.5.9:	Links: Schema der Strahlreinigung des FHG-Lasersystems und des im Aufbau verwendeten Strahlanalyse-Setups. Rechts: Strahlreinigung im FFM.	53
Abbildung III.5.10:	Links: Simulation zum Streuverhalten des Sendestrahlens an den optischen Flächen des Periskops. Rechts: Teil eines CAD-Entwurfs zum Periskop des Messaufbaus.	53
Abbildung III.5.11:	Links: FEM-Simulation der Verspannung im Interferometer für ein Haltekonzept. Rechts: CAD-Modell eines Haltekonzepts für das Interferometer.	54
Abbildung III.5.12:	Links: CAD-Modell der Kernbaugruppen des Messsystems (unten, grün: Lasersystem, auf dem Tisch: Empfangs- und Sendeeinheit (senkrecht) und Spektralapparat (flach)). Rechts: Physischer Aufbau des Messsystems mit Steuerrechner und Datenerfassungssystem.	55
Abbildung III.5.13:	Links: CAD-Entwurf des kompletten Messsystems. Rechts: Voll integrierter und funktionstüchtiger Messanhänger auf dem OGE-Testfeld in Emsbüren.	56
Abbildung III.5.14:	Simulationen zur Lasersicherheit eines potenziellen luftgestützten wasserstoff-sensitiven Raman-LIDARS. Die Abbildung zeigt die durch einen rotierenden Laserscanner und einen Laser im Impulsbetrieb erzeugten Muster auf dem Boden unter einem sich vorwärtsbewegenden Luftfahrzeug (Vorwärtsbewegung in X-Richtung). In beiden Fällen wurde eine Vorwärtsgeschwindigkeit des Fluggerätes von 87 kts über Grund angenommen. In beiden Fällen wurde der gleiche Radius des Scan-Kreises und die gleiche Scanner-Winkelgeschwindigkeit gewählt. Rote Punkte markieren überlappende Laserspots. Links: Repetitionsrate des Lasersystems bei 200 s ⁻¹ , Rechts: Repetitionsrate des Lasersystems bei 1000 s ⁻¹	57
Abbildung III.5.15:	Oben links: FWA in der betriebswirtschaftlich abbildbaren Größenklasse. Oben rechts: Erster Entwurf eines Beladekonzepts für ein hypothetisches modularisiertes Wasserstoff-Raman-Messsystem. Unten: Laser-Tonnen-Scanner (rot, zentral), modulares Messsystem mit Energieverteilung, Infrastrukturkomponenten des Lasers (Netzteil und Kühler) und zusätzlicher Ram-Air-Einströmöffnung (rot, unten rechts).	58
Abbildung III.6.1:	Übersicht Leitung 43.	60
Abbildung III.6.2:	Messprinzip Ultraschallmolch.	61

Abbildung III.6.3:	Sendeschleuse Station Holthausen II	62
Abbildung III.6.4:	Wasserentnahme aus dem Dortmund-Ems-Kanal.....	63
Abbildung III.6.5:	Empfangsschleuse Station Schepisdorf	64
Abbildung III.6.6:	Wasseraufbereitungsanlage.....	64
Abbildung III.6.7:	Test-Proben in Autoclave.....	69
Abbildung III.6.8:	Test-Proben Nr. 1 mit Nickel-Kupfer-Nickel Beschichtung nach 24 Stunden H ₂ -Test.....	70
Abbildung III.6.9:	Test-Proben Nr. 2 geklebter Edelstahlhülle nach 24 Stunden H ₂ -Test	70
Abbildung III.6.10:	Test-Probe Nr. 3 Stahlgehäuse Laserschweißverfahren nach 24 Stunden H ₂ -Test	71
Abbildung III.6.11:	Test-Probe Nr. 4 Stahlgehäuse WIG-Schweißverfahren nach 24 Stunden H ₂ -Test	71
Abbildung III.6.12:	Test-Probe Nr. 5 Stahlgehäuse Punkt-Schweißverfahren nach 24 Stunden H ₂ -Test.....	72
Abbildung III.6.13:	Test-Probe Nr. 6 vergossenes Stahlgehäuse Laserschweißverfahren nach 96 Stunden H ₂ -Test	73
Abbildung III.6.14:	Test-Probe Nr. 7 vergossenes Stahlgehäuse WIG-Schweißverfahren nach 96 Stunden H ₂ -Test	74
Abbildung III.6.15:	Neues 10" EMAT-C Ultra Tooldesign	77
Abbildung III.6.16:	Tool-Setup #1 mit 3 Manschetten auf der Zugeinheit	78
Abbildung III.6.17:	Tool-Setup #2 mit 2 Manschetten auf der Zugeinheit	78
Abbildung III.6.18:	Tool Setup #1 Simulation bei 1.5m/s und 25bar.....	78
Abbildung III.6.19:	Tool Setup #2 Simulation bei 1.5 m/s und 25 bar.....	79
Abbildung III.6.20:	Tool Setup #1 Simulation bei 2.0 m/s und 55 bar.....	79
Abbildung III.6.21:	Tool Setup #2 Simulation bei 2.0m/s und 55bar.....	80
Abbildung III.6.22:	Maximale Molchgeschwindigkeiten anhand der durchgeführten Strömungssimulationen ..	80
Abbildung III.6.23:	Operational Limit Diagram für Tool Setup #1.....	81
Abbildung III.6.24:	Operational Limit Diagram für Tool Setup #2.....	82
Abbildung III.6.25:	Design einer 10" Wirbelstrombremse.....	83
Abbildung III.6.26:	Tool Setup #1 mit ECB Simulation bei 1.5 m/s und 55 bar.....	83
Abbildung III.6.27:	Operational Limit Diagram für Tool Setup #1 mit ECB	84
Abbildung III.6.28:	Montierter neuer 10" EMAT-C Ultra Molch.....	85
Abbildung III.6.29:	Beispielhafter Pump Test Aufbau	86
Abbildung III.6.30:	Unity-Plot zur Tiefenmessung – 10" EMAT-C Ultra	87
Abbildung III.6.31:	Umsetzungen Holthausen II.....	88
Abbildung III.6.32:	Umsetzungen Lingen West	89
Abbildung III.6.33:	Umsetzungen Schepisdorf	89
Abbildung III.7.1:	Blockschaltbild WSEA	91
Abbildung III.7.2:	Beispiele für Erdgasverdichter und Antriebe	93
Abbildung III.7.3:	Visionäres Wasserstoffnetz	94

<i>Abbildung III.7.4:</i>	<i>Schema der in der Studie empfohlenen Maschinenkonfiguration</i>	<i>94</i>
<i>Abbildung III.7.5:</i>	<i>Varianten des Transportnetzes.....</i>	<i>96</i>
<i>Abbildung IV.2.1:</i>	<i>Errichtete Wasserstoffinfrastruktur im Projekt TransHyDE am Standort Lingen</i>	<i>97</i>
<i>Abbildung IV.2.2:</i>	<i>Schematische Darstellung der Wasserstoff Teststrecke TransHyDE in Lingen sowie den Schnittstellen</i>	<i>99</i>
<i>Abbildung IV.2.3:</i>	<i>Gebläse zur Umwälzung des Wasserstoffs (links) Rohrsegmente der Teststrecke für Materialtests (rechts)</i>	<i>99</i>
<i>Abbildung IV.3.1:</i>	<i>flüssige Ammoniakdosierung.....</i>	<i>106</i>
<i>Abbildung IV.3.2:</i>	<i>Ermittelte Durchbruchskurve (DBK) für CO₂ - links in ppm - rechts normiert in %.....</i>	<i>106</i>
<i>Abbildung IV.3.3:</i>	<i>Ermittelte Durchbruchskurve für NH₃ - links in ppm - rechts normiert in %.....</i>	<i>107</i>
<i>Abbildung IV.3.4:</i>	<i>O₂-Konzentrationsverlauf ohne Durchbruch.....</i>	<i>108</i>
<i>Abbildung IV.3.5:</i>	<i>O₂-Konzentration bei 26 ppm O₂ im Feedgas (mit Trendlinie).....</i>	<i>109</i>
<i>Abbildung IV.3.6:</i>	<i>Anordnung der Adsorbentien im Mehrschichtadsorber</i>	<i>109</i>
<i>Abbildung IV.3.7:</i>	<i>Konzentrationsverläufe nach dem Mehrschichtadsorber.....</i>	<i>110</i>
<i>Abbildung IV.3.8:</i>	<i>Um die veränderte Gaszusammensetzung rechnerisch korrigierte Durchflussmessung</i>	<i>111</i>
<i>Abbildung IV.3.9:</i>	<i>Abweichung der Messwerte der Turbinenradzähler über dem Betriebsvolumenstrom für Erdgas und Wasserstoff.....</i>	<i>112</i>
<i>Abbildung IV.3.10:</i>	<i>Abweichung der Messwerte der Ultraschallgaszähler über dem Betriebsvolumenstrom für Erdgas und Wasserstoff.....</i>	<i>113</i>
<i>Abbildung IV.4.1:</i>	<i>Links einige der betriebsbeanspruchten Segmente vor den Qualifizierungsverfahren; rechts: qualifiziertes Rohrmaterial vor der Teststreckenfertigung</i>	<i>115</i>
<i>Abbildung IV.4.2:</i>	<i>Makroaufnahme eines Rohrsegments mit Stempelfeld (L360NE) sowie Halbschalen mit korrodierter und belegter Rohrinnenoberfläche. Mitte unten und rechts Gefügeaufnahme und EDX-Elementverteilungsbild für Eisen und Sauerstoff mit mit der Oxidschicht der Rohrinnenoberfläche</i>	<i>116</i>
<i>Abbildung IV.4.3:</i>	<i>Makroaufnahme eines Rohrsegments mit Stempelfeld (L360NE) sowie Halbschalen mit korrodierter und belegter Rohrinnenoberfläche. Mitte unten und rechts Gefügeaufnahme und EDX-Elementverteilungsbild für Eisen und Sauerstoff mit mit der Oxidschicht der Rohrinnenoberfläche</i>	<i>116</i>
<i>Abbildung IV.4.4:</i>	<i>Konzept der Probenhalterteststrecken mit Flanschen für Proben sowie der Teststrecken. Die Bezeichnungen der Teststrecken sind den einzelnen Rohrsegmenten in Tabelle IV.4.2 zugeordnet.....</i>	<i>117</i>
<i>Abbildung IV.4.5:</i>	<i>Links - eingebaute Teststrecken nach erfolgreicher Dichtheitsprüfung durch den TÜV Nord; rechts - erste in-situ Wasserstoffmessungen an den montierten Teststrecken durch Ruhr-Universität Bochum / Euro-Labor GmbH</i>	<i>119</i>
<i>Abbildung IV.4.6:</i>	<i>Installierte Begleitheizungen der warmgehenden Teststrecken (Meilenstein M 4.2 „Hochtemperatur Teststand aufgebaut“). Betriebsbeanspruchte (gebrauchte) Rohrsegmente wurden kontinuierlich auf eine Solltemperatur von 120 °C erhitzt und von innen mit Wasserstoff beaufschlagt</i>	<i>119</i>
<i>Abbildung IV.4.7:</i>	<i>Exemplarische Spannungs-Dehnungs-Kurven der durchgeführten im langsamen Zugversuch im Anlieferungszustand („Ref.“) und nach Auslagerung im TransHyDE GETH2-Loop bei</i>	

	<i>Betriebsdrücken zwischen 20 und 35 bar und Raumtemperatur („TS1 K“) oder bei erhöhten Temperaturen („TS4 W“)</i>	<i>122</i>
<i>Abbildung IV.4.8:</i>	<i>Werkstoff J55 (TH-001) - mechanische Eigenschaften im langsamen Zugversuch sowie die dazugehörige Fraktographie der Bruchflächen im Anlieferungszustand (oben) und unten im Bild nach zehn Wochen im TransHyDE GETH2-Loop bei Betriebsdrücken zwischen 20 und 35 bar und Raumtemperatur.....</i>	<i>123</i>
<i>Abbildung IV.5.1:</i>	<i>Oben: Schema der Geometrie der Feldexperimente in Emsbüren. Unten: Situation auf dem OGE-Testfeld in Emsbüren</i>	<i>126</i>
<i>Abbildung IV.5.2:</i>	<i>In den Feldexperimenten bei OGE-Emsbüren aufgenommene Daten des Wasserstoffkanals des FFM. Schwarz: Daten mit Wasserstoff-Ausströmung, Grau: Daten ohne Wasserstoff-Ausströmung, Hot-Pink: Differenzsignal. Links: Übersicht über die aufgenommene Datenspur, Rechts: Auf den durch die Geometrie der Messungen begrenzter, relevanter Datenausschnitt.....</i>	<i>127</i>
<i>Abbildung IV.5.3:</i>	<i>Einfluss von Druck und Temperatur und der Höhe über NN auf die Teilchenzahlen in einem Normvolumen und damit auf das Messsignal. Links: Teilchenzahl pro Normvolumen als Funktion der Temperatur für 3 verschiedene Isobaren. Die Isobaren wurden so gewählt, dass sie den Normaldruck, Tief- und Hochdruck-Wetterlagen abbilden. Rechts: Teilchenzahlen als Funktion der Höhe über NN</i>	<i>128</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle III.3.1:</i>	<i>Mögliche Verunreinigungen aus H₂-Herstellungsverfahren</i>	27
<i>Tabelle III.3.2:</i>	<i>Verunreinigungen gemäß DIN EN 17124</i>	30
<i>Tabelle III.3.3:</i>	<i>Adsorptionsteststand-Betriebsbereich</i>	36
<i>Tabelle III.3.4:</i>	<i>Getestete Komponenten und empfohlene Adsorbentien</i>	36
<i>Tabelle III.6.1:</i>	<i>Technische Daten Leitung 43</i>	59
<i>Tabelle III.6.2:</i>	<i>Tests von Materialien die auf Molchen verbaut werden</i>	65
<i>Tabelle III.6.3:</i>	<i>Test-Parameter</i>	66
<i>Tabelle III.6.4:</i>	<i>Test Ergebnisse</i>	66
<i>Tabelle III.6.5:</i>	<i>Optionen zum Schutz der Magnet Pakete vor H₂</i>	67
<i>Tabelle III.6.6:</i>	<i>Test-Muster</i>	68
<i>Tabelle III.6.7:</i>	<i>Testproben</i>	75
<i>Tabelle III.6.8:</i>	<i>Test Parameter</i>	75
<i>Tabelle III.6.9:</i>	<i>Testproben</i>	76
<i>Tabelle III.6.10:</i>	<i>Test Parameter</i>	76
<i>Tabelle III.6.11:</i>	<i>Druck und Volumenstromgeschwindigkeiten für die Strömungssimulation</i>	77
<i>Tabelle III.6.12:</i>	<i>Vergleich Strömungssimulationsergebnisse</i>	84
<i>Tabelle IV.3.1:</i>	<i>Darstellung des Einflusses der Probenahme auf die Probe (vor Anpassung der Spülzyklen)</i> 100	
<i>Tabelle IV.3.2:</i>	<i>Messergebnisse (exemplarisch) kommerzieller Flaschengase unterschiedlicher Qualitätsstufen (DVGW-EBI)</i>	101
<i>Tabelle IV.3.3:</i>	<i>Messergebnisse realitätsnaher Wasserstoffproben unterschiedlicher Herkunft, mit Gegenüberstellung zu normativ geforderten Grenzwerten gem. DVGW G 260 (A); 5. Gasfamilie, Gruppe A (DVGW-EBI)</i>	102
<i>Tabelle IV.3.4:</i>	<i>Messergebnisse realer Wasserstoffproben unterschiedlicher Herkunft, mit Gegenüberstellung zu normativ geforderten Grenzwerten gem. DIN EN 17124; Gruppe D (DVGW-EBI)</i>	103
<i>Tabelle IV.4.1:</i>	<i>Angaben zu den vierzehn für die Teststrecken vorgesehenen Rohrsegmenten aus unterschiedlichen Werkstoffen. Nicht alle Rohrsegmente haben die erforderlichen mechanischen Eigenschaften erbracht und sind somit bei der durchgeführten Qualifizierung durchgefallen</i>	115
<i>Tabelle IV.4.2:</i>	<i>Aufteilung der qualifizierten betriebsbeanspruchten Rohrsegmente auf die kalten (TS 2-K und TS 3-K) und warmen (TS 5-W und TS 6-W) Teststrecken. Fehlende Längen wurden mit neuem Material mit unterschiedlichen Innenoberfläche ergänzt</i>	118
<i>Tabelle IV.4.3:</i>	<i>Im Labor bestimmte Wasserstoffdiffusionskoeffizienten bei Raumtemperatur und bei 70 °C. Koeffizienten bei 100 °C und 200 °C wurden über Extrapolationen ermittelt</i>	120
<i>Tabelle IV.4.4:</i>	<i>Ergebnisse der Wasserstoffmessungen an im Loop ausgelagerten Analyseproben. Werte stellen den diffusiblen Wasserstoffgehalt vor der Auslagerung (Referenz) sowie nach 10 Wochen in der kalten Probenhalterstrecke (RT = Raumtemperatur) sowie nach 6 und 10 Wochen in der warmen Probenhalterstrecke. *Aufgrund der starken Kühlung durch den strömenden Wasserstoff wurde eine Temperatur 60 °C < T < 120°C für die Proben</i>	

angenommen. Als Basis für diese Abschätzung dienten Pyrometermessungen an den nicht beheizten Abschnitten der warmen Teststrecken unmittelbar an der Begleitheizung 121

I. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Im Rahmen des Umsetzungsprojektes GETH2 TransHyDE sollten infrastrukturelle und betriebstechnische Fragestellungen bearbeitet werden, die höchste Relevanz für den sukzessiven Aufbau einer sicheren und verlässlichen Wasserstofftransportinfrastruktur im öffentlichen Bereich haben. Zu nennen sind insbesondere sicherheitstechnische Aspekte wie z.B. Materialfragen bei der Umstellung von bestehenden Erdgasleitungen bzw. Verdichteranlagen oder die hubschraubergestützte Ferndetektion von Wasserstoffleckagen, die Molchung von Rohrleitungen und die Anpassung von Verdichterstationen. Auch wichtige betriebstechnische Aspekte waren Gegenstand der Untersuchungen. So wurden Gasbeschaffenheitsaspekte des Wasserstoffs an unterschiedlichen Stellen einer ehemaligen, auf Wasserstoffbetrieb umgewidmeten Erdgastransportleitung untersucht. Hierzu sollte zunächst eine umfassende, neue Wasserstoffanalytik im Labor etabliert werden, um Spurenstoffe aus der Wasserstofferzeugung, Gasbegleitstoffe und Verunreinigungen aus der Versuchspipeline zu bestimmen. Zusätzlich zu den Laborversuchen sollten geeignete Probenahmetechniken entwickelt und Vor-Ort-Mess- und Probenahmekampagnen durchgeführt werden. Des Weiteren waren Gasreinigungsverfahren zu entwickeln, um spezifische Verunreinigungen im Wasserstoff entfernen und somit normativ geforderte Reinheitsgrade erreichen zu können. Um zukünftige Abrechnungsprozesse definieren zu können, sollten in diesem Vorhaben ebenso Studien, Tests und Versuchskampagnen zu eichfähigen Gasbeschaffenheitsmessungen und eichfähigen Durchflussmessungen durchgeführt werden. Für die vorgesehenen experimentellen wissenschaftlichen Untersuchungen wurden am Kraftwerksstandort Lingen Gasleitungen eingesetzt, in denen über viele Jahre Erdgas transportiert wurde und an denen bereits gealterte Werkstoffe auf deren Wasserstofftauglichkeit untersucht wurden. Hierfür wurde zunächst die Wasserstoffversorgung aufgebaut. Die Erkenntnisse des Vorhabens sollten in Handlungsempfehlungen zur Wasserstoffanalytik, -probenahme, Gasaufbereitung und eichfähigen Gasbeschaffenheitsmessungen und Durchflussmessungen münden und eine Datengrundlage für zukünftige Regelwerks- und Normungsarbeit liefern. Des Weiteren sollten andere Teilvorhaben und Arbeitspakete weiterer Projektpartner wissenschaftlich begleitet werden.

Die zuvor beschriebenen Aufgabenstellungen wurden in 7 Arbeitspaketen bearbeitet. In **AP 1 „Ergebnissynthese und Kommunikation“** wurden die Erkenntnisse aus AP 2 - AP 7 zusammengeführt, ausgewertet, veröffentlicht und mit den anderen Teilverbänden, Projekten und Initiativen gespiegelt sowie Quartalsberichte erstellt und Verbundtreffen organisiert. In **AP 2 „Aufbau und Betrieb der Testumgebung“** wurde die für die geplanten Demonstrationsuntersuchungen benötigte Wasserstoffversorgung sowie ein Versuchspipelinesystem aus überwiegend Bestandsleitungen aufgebaut und betrieben. In **AP 3 „Qualitäts- und Mengenmessung“** wurden Untersuchungen zur Gasbeschaffenheit und zur eichfähigen Mengenmessung durchgeführt. In **AP 4 „H₂-Verträglichkeit von Werkstoffen“** wurden Materialuntersuchungen für typische Rohrleitungsmaterialien von Erdgas-transportleitungen und -anlagen durchgeführt. Gegenstand von **AP 5 „Luftgestützte Wasserstoffferndetektion“** war die Entwicklung und Erprobung eines laserbasierten Messsystems für die zukünftige luftgestützte Leckageortung an H₂-Transportleitungen. In **AP 6 „Intelligente Molchung“** wurde ein neuartiges Molchverfahren für wasserstoffführende Erdgastransportleitungen entwickelt und erprobt. In **AP 7 „Optimierung des Verdichterkonzeptes für Einspeisung und Transport“** wurden Verdichterkonzepte für die Einspeisung und den Transport von Wasserstoff evaluiert und das zukünftige Transportsystem optimiert.

II. Vormaliger Stand des Wissens

Schon einige Jahre vor Antragstellung wurde die Nutzung bzw. Teilumstellung der Erdgasinfrastruktur auf den Transport von Wasserstoff intensiv diskutiert. Hierzu wurden erste Konzeptstudien auf nationaler und europäischer Ebene entwickelt (FNB, Gas for Climate). Von den deutschen Fernleitungsnetzbetreibern (FNB) wurde ein Konzept für ein Wasserstofftransportnetz entwickelt, das eine Gesamtlänge von 5.900 km umfassen soll und zu 90 % auf existierenden Erdgastransportleitungen basiert.

Weiterhin wurde damit begonnen, netz-, sicherheits- und anlagentechnische Aspekte entlang der gesamten Gastransportprozesskette zu untersuchen (z.B. im DVGW-internen Forschungsprogramm), um die Integrität von Bestandsnetzen bei der Beaufschlagung mit Wasserstoff bewerten zu können. Hierbei wurden auch die Erfahrungen aus der Industrie bei der leitungsgebundenen Wasserstoffversorgung von Industriestandorten berücksichtigt. Während bei der Zumischung von Wasserstoff zu Erdgas in Erdgastransportnetze bereits Erfahrungen vorlagen (z.B. 2 MW-PtG-Anlage in Falkenhagen), gab es für die Umstellung von Erdgasnetzen auf reinen Wasserstoffbetrieb bisher noch keine Pilot- oder Demonstrationsprojekte. Im Folgenden wird auf den vormaligen Stand bis 02/2021 der einzelnen Themengebiete der Arbeitspakete eingegangen:

Gasbeschaffenheitsaspekte und Volumenstrommessung (AP 3): Bis zum Beginn des Projektes wurden einige Untersuchungen zu Gasbeschaffenheitsaspekten gestartet bzw. durchgeführt. Zu nennen sind insbesondere das DVGW-Vorhaben H2Qual und die britische Initiative Hy4Heat. Während Gasbeschaffenheitsanforderungen in verschiedenen Normen und technischen Regelwerken (z.B. DVGW G 260) bereits definiert wurden, waren praxistaugliche und kosteneffiziente Methoden für die Probenahme und Analyse bisher noch nicht ausreichend adressiert. Für die Volumenmessung von Wasserstoff existierten keine Prüfstände und damit keine Prüfmöglichkeiten, um Zähler für ein Transportnetz mit Wasserstoff zu kalibrieren. In der Praxis wurden unterschiedliche Zählertypen für Wasserstoff eingesetzt, die mit Luft oder Erdgas kalibriert wurden. Das Messverhalten und der Zusammenhang zwischen einer Erdgasprüfung und dem Einsatz im Wasserstoff wurde bis Antragstellung nicht untersucht und getestet. Es existierten nur einzelne Untersuchungen, bei denen das Messverhalten mit Erdgas mit einer Beimischung von 10 Vol.-% H₂ untersucht wurde.

H₂-Verträglichkeit von Rohrleitungswerkstoffen (AP 4): Zur Wasserstoffverträglichkeit von Werkstoffen gab es bereits vereinzelte Untersuchungen (z.B. Hypos-Projekt). Für vorhandene Erdgasleitungssysteme mit bereits gealterten Werkstoffen wurde die Wasserstofftauglichkeit bis Projektbeginn jedoch noch nicht systematisch untersucht. Zudem wurde in AP 4 der Fokus auf transiente Versuchsbedingungen bei Temperaturen bis 200°C und Drücken bis 60 bar gelegt. Dadurch ergänzten diese Versuche die bereits existierenden Ergebnisse, für meist statische Bedingungen bei Raumtemperatur.

Luftgestützte Wasserstoffferndetektion (AP 5):

Die luftgestützte Ferndetektion von Methan hat sich in den letzten Jahren als ein wichtiges Werkzeug zur Detektion von Leckagen in Gaspipelines etabliert. Zur Ferndetektion von Erdgasleckagen nutzen bisherige Systeme wie das CHARM®-System spezifische Absorptionsbanden von Methan zur Anwendung des Differential Absorption LIDAR-(DIAL)-Verfahrens [1], [2]. Diatomare, homonukleare Gase wie molekularer Wasserstoff besitzen aufgrund ihrer Symmetrie nur sehr schwache Absorptionsbanden im Infrarot. Das DIAL-Verfahren kann hier nicht angewendet werden, so dass eine grundsätzliche Neuentwicklung erforderlich war. Die Basis dieser Neuentwicklung bildet die lineare Raman-Spektroskopie. Zu Beginn des Projektes waren auf linearer Raman-Streuung basierende Messverfahren bekannt, die jedoch mit einem wesentlich kleineren Arbeitsabstand oder sehr großen

Messzeiten für die vorliegende luftgestützte Anwendung ungeeignet sind [3], [4], [5]. Weiterhin gab es einen im Labor untersuchten Ansatz für ein LIDAR-System, der auf stimulierter Raman-Streuung (SRGS) basiert [6]. Dieser wurde im AP 5.1 bezüglich der vorliegenden Anwendung evaluiert.

Molchung von Transportleitungen (AP 6): Intelligente Molchungen wurden bei Antragstellung bereits vielfach in der Rohrleitungstechnik eingesetzt. Gängige Verfahren wurden durch die Technologien MFL (Magnetstreulichtverfahren), EMAT (Electro-Magnetic Acoustic Transducer) sowie Ultraschallmolchungen abgebildet. Betriebene Wasserstoffleitungen wurden aber bei Antragstellung nicht im Medium selbst, sondern mithilfe von Wasser als Koppelmedium im Ultraschallverfahren gemolcht, was einen erhöhten Zeit-/Arbeitsaufwand und damit hohe Betriebskosten verursacht.

Verdichteranlagen (AP 7): Wasserstoff konnte für kleinere bis mittlere Volumenbedarfe zu Projektbeginn ohne Probleme verdichtet werden. Die Anwendung war schon weit gestreut und reichte von Raffinerieprozessen bis hin zur Wasserstoffmobilität. Hierbei wurde auf verschiedene Technologien zurückgegriffen, die alle bereits technisch verfügbar waren. Beispielsweise wurden Kolbenverdichter und Schraubenverdichter für mittlere, Membran- und ionische Verdichter in kleineren Anwendungen eingesetzt. Für große Volumenströme waren bereits große Kolbenverdichter im Einsatz. Erste Systeme mit vielstufigen Radialverdichtern waren laut Herstellern verfügbar. Bei allen verfügbaren Technologien wurde auf elektrische Antriebe zurückgegriffen. Konzepte für Wasserstoffturbinen waren in der Entwicklung, erste Demonstratoren liefen bereits.

III. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten

III.1 Arbeitspaket 1: Koordination, Kommunikation, Ergebnissynthese

Koordination

Zu Projektbeginn wurde der Kooperationsvertrag erarbeitet und bis zur finalen Unterzeichnung begleitet. Die interne Abstimmung innerhalb des Koordinationsteams erfolgte fortlaufend in monatlichen Austauschformaten zur Planung und Steuerung des Projektfortschritts. Die Verantwortung für die übergreifende Koordination, die Erstellung der Quartalsberichte sowie die Organisation sämtlicher Quartals-Verbundtreffen lag vollständig bei AP 1. Aufgrund pandemiebedingter Einschränkungen fanden zahlreiche Termine digital statt. Ergänzend wurden Präsenzsitzungen an den Standorten Karlsruhe, Goslar, Lingen und Leipzig durchgeführt.

Ferner wurden in regelmäßigen quartalsweisen Abständen gemeinsame Abstimmungen aller Koordinatoren der TransHyDE-Verbünde durchgeführt, um den Informationsaustausch zu laufenden Arbeiten und Herausforderungen sicherzustellen und inhaltliche Schwerpunkte zu vertiefen. Ebenso wurden durch AP 1 die Austauschformate mit den Verbänden „Sichere Infrastruktur“ und „Norm“ initiiert sowie der Steckbrief für AP 7 (Systemanalyse) erarbeitet.

Die jährlichen Beiträge des Verbundes zu TransHyDE-Workshops und Vollversammlungen wurden durch AP 1 konsolidiert und präsentiert. Für die Abschlusskonferenz im 1. Quartal 2025 wurde ein abgestimmtes Präsentationskonzept (einstündiger Vortrag, vier Poster, zwei Exponate) entwickelt. Die Jahresplanung für Verbundtreffen (online und vor Ort), Messeauftritte, Vorträge, Parlamentarischer Abend sowie sämtliche Termine der Gesamtkoordination erfolgten gemeinsam mit allen Partnern und wurden planmäßig umgesetzt.

Seit dem 1. Quartal 2024 beteiligte sich die Koordination zudem an der Konzeption der zweiten Säule „TransHyDE 2.0“. Hierzu wurden verbundübergreifende Treffen zur Fragebogenerstellung für

Themen- und Partnerstrukturen durchgeführt. Auf dieser Basis wurde ein Projektkonzept erarbeitet und im Rahmen des TransHyDE-Workshops in Erfurt präsentiert. Der dort vorgestellte Projektpitch bildet das zentrale Element der Säule 2 „Transportnetze & Speicher“. Die Moderation des Workshops zum Kernnetz/Transportnetz wurde ebenfalls durch AP 1 übernommen. Das finalisierte Konzept wurde anschließend konsortial abgestimmt und am 02.10.2025 beim externen Kick-off der Plattform TransHyDE 2.0 auch mit einigen neuen Projektpartnern vorgestellt.

Kommunikation

Zu Projektbeginn erfolgte eine umfangreiche Pressekonferenz zur öffentlichen Vorstellung des Projektes und seiner Zielsetzung. Ergänzend wurde gemeinsam mit der Medienagentur Cyrano eine Projektpräsentation für die Website der Initiative GETH2 konzipiert und umgesetzt. Eine Verbundgrafik wurde zur Unterstützung der öffentlichen Wahrnehmung erstellt.

Die Erarbeitung eines Hintergrundpapiers zum Ukraine-Krieg erfolgte maßgeblich durch das Koordinationsteam. Zudem wurden zweimal im Projektverlauf aktuelle Beiträge für die Verbundbroschüre (deutsch/englisch) erstellt sowie Inhalte für das digitale Exponat der Gesamtkoordination geliefert. Auf Ebene der Leitprojekte nahm GETH2 TransHyDE regelmäßig an quartalsweisen Koordinatorentreffen teil.

Im Rahmen zahlreicher Fachveranstaltungen, darunter Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfachs, gat, E-world, das 27. DVGW-Kolloquium „Gas- und Wassermessung“ sowie weitere Expertentagungen, wurden Projektinhalte präsentiert und Fachdiskussionen geführt, die größtenteils bei Youtube abrufbar sind. Darüber hinaus hielt die Koordination Impulsvorträge in weiteren Verbänden, z. B. in der H2ercules-Initiative oder bei Campfire.

Die Koordination beteiligte sich an der Erstellung ad-hoc Fachpapiere zu regulatorischen Themen sowie zum Delegierten Rechtsakt Wasserstoff. Weitere Beiträge erfolgten für Fachzeitschriften, darunter energie | wasser-praxis (09/2022), die Sonderausgabe der gwf gas+energie (2022) sowie ein Artikel zur Gasanalytik (2023).

Neben der Teilnahme an verschiedenen BMBF-Fachgesprächen und wissenschaftlichen Workshops wurde im 2. Quartal 2024 der zweitägige Stakeholder-Workshop „GET to GETher“ in Lingen geplant und gemeinsam mit der Initiative GETH2 durchgeführt. Hierbei konnte auch der Versuchsloop auf dem RWE-Gelände, ein Pipelinebau der Nowega und die bp-Raffinerie vor Ort geführt besucht werden. In Q3/2024 folgte eine digital durchgeführte Pressekonferenz, die breite mediale Aufmerksamkeit erzielte.

In enger Abstimmung mit dem Kopernikus-Projekt PtX wurde zudem eine Ringvorlesung („Infrastructure, networks and availability of resources“) vorbereitet und am 12.12.2024 durchgeführt. Darüber hinaus übernahm DVGW-EBI die Vorbereitung und Moderation zweier TransHyDE-Workshops sowie die Leitung eines Panels zur pipelinegebundenen H₂-Versorgung auf der Abschlusskonferenz.

Ergebnissynthese

Für die TransHyDE-Themenworkshops (Hildesheim, Goslar, Erfurt), die Koordinatorentreffen, Vollversammlungen, die Abschlusskonferenz, die Wasserstofftage 2024 sowie weitere nationale und internationale Fachveranstaltungen wurden jeweils der aktuelle Projektstand aufbereitet, fachliche Erkenntnisse dargestellt und durch Vorträge, Poster sowie moderierte Workshop-Formate vermittelt.

Internationale Austauschformate, u. a. mit dem HER-Netzwerk und dem ÖVGW-Expert Board, ermöglichten die Entwicklung weiterer Themenansätze und Projektideen. Zudem wurden regelmäßige Beiträge zum öffentlich verfügbaren TransHyDE-Newsletter erstellt.

Die Projektskizze, die Überarbeitung und der Vollantrag zur „H₂-Readiness von LNG-Terminals“ wurden federführend durch die Koordination erarbeitet. Die Erkenntnisse aus GETH2 TransHyDE zu Einspeisung und Transport von Wasserstoff flossen unmittelbar in dieses Ergänzungsprojekt ein, dessen Abschlussbericht mittlerweile vorliegt.

Zur Bearbeitung der Zulassungsthematik für H₂-Messgeräte (AP 3, meterQ) stellte die Koordination dem Obmann des DVGW-TK-Gasmessung die Sachlage vor, um die Weiterentwicklung der eichrechtlichen Vorgaben für Wasserstoffmesstechnik anzustoßen.

In AP 1 konnten alle geplanten Arbeiten vollständig umgesetzt werden. Sämtliche Ziele wurden erreicht bzw. werden bis zur Fertigstellung der letzten Projektergebnisse abschließend bearbeitet.

III.2 Arbeitspaket 2: Aufbau und Betrieb der Versuchsumgebung

AP 2.1: Aufbau und Betrieb der Wasserstoffversorgung

Ziel des Arbeitspakets war der Aufbau und Betrieb eines Elektrolyse-Demonstrators einschließlich der dafür erforderlichen Nebenanlagen wie etwa eines Verdichters. Ebenso umfasste das Vorhaben die vollständige Integration der Anlage in die bestehende Kraftwerksinfrastruktur, insbesondere in die Strom-, Gas-, Dampf- und Wasserversorgung (Abbildung III.2.1).

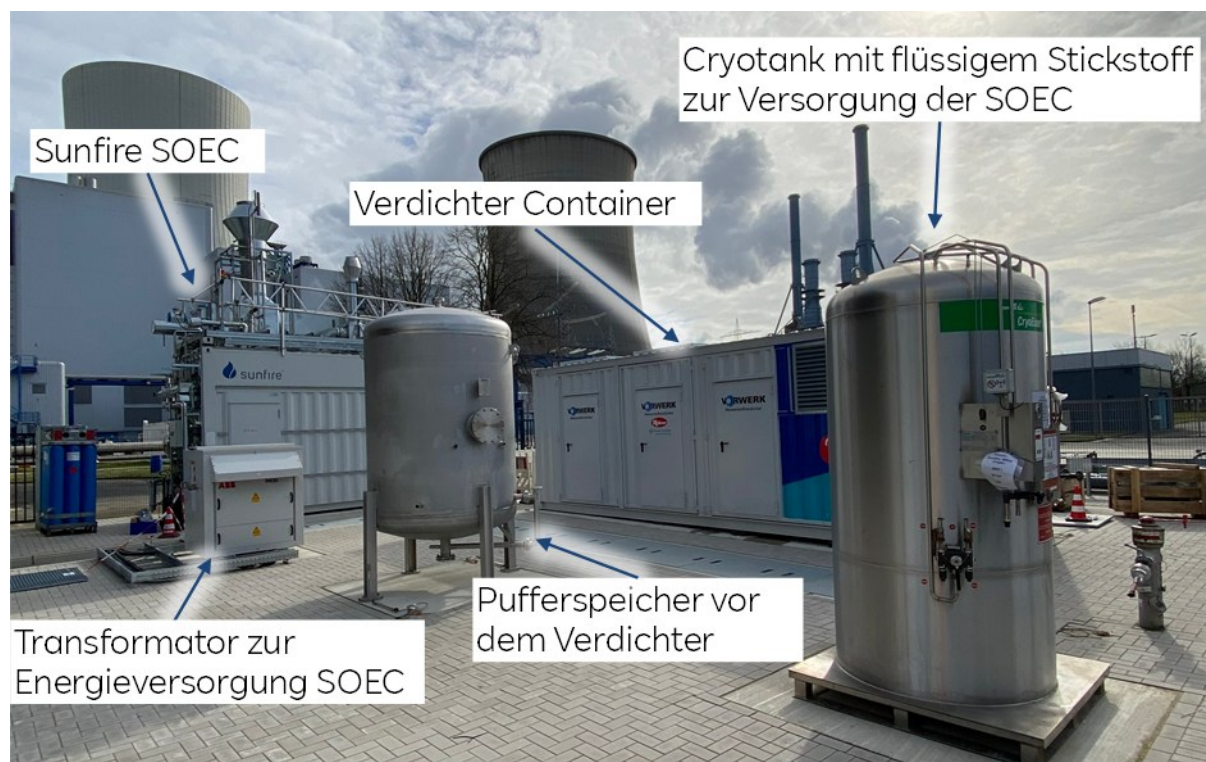


Abbildung III.2.1: Wasserstoffherstellung am Standort Lingen

Die Inbetriebsetzung des von der Firma Sunfire gelieferten Elektrolyseurs konnte Ende des dritten Quartals 2023 erfolgen, so dass erfolgreich Wasserstoff produziert wurde. Darüber hinaus erfolgten

die Anlieferung und Integration des Verdichters mitsamt zugehörigen Nebenaggregaten wie der Kühlung. Auch die unterirdische Leitungsführung, die sowohl der Einspeisung in das Kraftwerk als auch der Befüllung des geschlossenen Kreislaufs dient, wurde vollständig fertiggestellt (Abbildung III.2.2).



Abbildung III.2.2: Unterirdische Anschlussleitung zur Anbindung der H₂-Erzeugungsanlage an die Versuchspipeline während der Bauzeit

Im ersten Quartal 2024 erfolgte die behördliche Schlussabnahme im Rahmen der Baugenehmigung. Damit lagen alle baurechtlichen Voraussetzungen für den Betrieb der H₂-Produktionsanlage vor. Ebenfalls im ersten Quartal 2024 konnten die Druckprüfungen der H₂-Verbindungsleitung zwischen der Wasserstofferzeugung, der Versuchspipeline und dem Kraftwerk erfolgreich durchgeführt werden. Im Anschluss erfolgte die Abnahme durch den TÜV. Parallel dazu wurde die Montage und Inbetriebnahme der Trocknungseinheit abgeschlossen, die sich am Verdichter-Ausgang befindet und essenziell zur Ausschleusung des Wassergehalts im erzeugten Wasserstoff und zur Gewährleistung der erforderlichen H₂-Qualität für den anschließenden Betrieb ist.

Im April 2024 erfolgte zudem die erfolgreiche Inbetriebnahme des Verdichters in Verbindung mit dem Elektrolyseur, was einen weiteren wichtigen Schritt in Richtung betriebsfähige Gesamtanlage darstellt. Im zweiten Quartal 2024 konnten die letzten Restarbeiten auf dem Baufeld abgeschlossen werden. Diese Maßnahmen standen im Zusammenhang mit der Sicherstellung der Betriebssicherheit. Darüber hinaus wurde die DVGW-Abnahme sowie die erforderliche Vorabbescheinigung für die Nutzung der Ausgangsleitung am Verdichter erteilt. Diese Abnahmen bilden die Grundlage für den dauerhaften Lastbetrieb sowie für die Versorgung des Closed Loops mit Wasserstoff.

Im dritten Quartal 2024 trat ein unerwarteter Defekt am Elektrolyseur auf, der eine Reparatur der Module im Werk des Herstellers Sunfire in Dresden notwendig machte. Um eine Verzögerung bei der weiteren Inbetriebnahme der Versuchspipeline zu vermeiden und trotz des Ausfalls eine Wasserstoffversorgung sicherzustellen, wurde eine temporäre Versorgung über einen H₂-Trailer eingerichtet. Dadurch konnte die Versuchspipeline weiterhin mit Wasserstoff befüllt werden. Die Instandsetzung und Rücklieferung der Elektrolyseur-Module nach Lingen konnte schließlich Anfang 2025 abgeschlossen werden.

AP 2.2: Aufbau und Betrieb der Versuchspipeline

Ziel des Vorhabens ist die Umwidmung der bestehenden Gasinfrastruktur zum Aufbau eines Closed-Loop-Systems DN100 („CLS100“). Dieses soll mithilfe eines installierten Umwälz-Gebläses eine konstante Durchflussmenge beziehungsweise Strömungsgeschwindigkeit sicherstellen und damit die Grundlage für die in Arbeitspaket 3 geplanten Tests zur Qualitäts- und Mengenmessung sowie für die Untersuchungen zur Werkstoffverträglichkeit in Arbeitspaket 4 bilden.

Die Detailplanung der gesamten Versuchspipeline wurde abgeschlossen und gemeinsam mit den Projektpartnern hinsichtlich der Integration der vorgesehenen Teststrecken abgestimmt. Die erforderliche Baugenehmigung für die Aufstellung der Container, in denen sich unter anderem das Gebläse sowie die OGE-Testanlage befinden, wurde durch die Stadt Lingen im dritten Quartal 2023 erteilt. Herausfordernd gestalteten sich die Lieferzeiten des Gebläses. Ursache hierfür war ein technisches Problem, das bei einer vergleichbaren Anlage aufgetreten ist. Der Lieferant hat dafür eine Lösung identifiziert und setzte diese um. Aufgrund langer Lieferzeiten einzelner notwendiger Komponenten erfolgte die Lieferung dann erst im zweiten Quartal 2024. Direkt im Anschluss erfolgte die Inbetriebnahme. Die übrigen Anlagenkomponenten wurden im Verlauf des ersten und zweiten Quartals 2024 angeliefert und installiert. Die schrittweise Inbetriebnahme der gesamten Versuchspipeline „CLS100“ erfolgte im zweiten Quartal 2024.

Zu Beginn des ersten Quartals 2024 konnte die Vorproduktion der Rohrleitungen für die Versuchspipeline beim Lieferanten abgeschlossen und die Lieferung nach Lingen erfolgreich durchgeführt werden. Dadurch konnte die Montage der Versuchspipeline in Lingen beginnen. Im Zuge dessen wurden auch die Teststrecken der RWE Power, OGE und von Meter-Q Solutions mitsamt den Messkomponenten – einschließlich der Zähler, der Blendenmesstrecke und des Equipments zur H₂-Qualitätsmessung – installiert. Zudem wurden die Container der OGE für das Arbeitspaket AP3 angeliefert und anschließend an die Versuchspipeline sowie an die Stromversorgung angeschlossen.

Im Rahmen der geplanten Umwidmung der vorhandenen Bestandsleitung für den Wasserstoffbetrieb war ein enger Austausch mit der Zulässigen Überwachungsstelle (ZÜS), in dem Falle dem TÜV, essentiell. Obwohl die Dokumentation der umzuwidmenden Bestandsleitungen, die für den damaligen Kraftwerksbetrieb genutzt wurden, nun aber bereits eine längere Zeit außer Betrieb waren, größtenteils vorhanden war, wurde im Sinne des Projektes und des Erfahrungsgewinns beschlossen, zusätzliche Prüfungen durchzuführen. Eine dieser Prüfungen waren Wandstärkenmessungen an kritischen Stellen (insbesondere Rohrbögen). Dazu musste der teilweise unterirdisch führende

Leitungsabschnitts freigelegt werden, um Wandstärkenmessungen an diesen kritischen Stellen durchführen zu können (Abbildung III.2.3). Die Ergebnisse wurden durch den TÜV bestätigt.



Abbildung III.2.3: Wandstärkenmessung an Rohrleitung des Testloops

Ergänzend zu den Wandstärkenmessungen waren weitere Maßnahmen notwendig: Eine neue Druckprüfung nach DVGW-Regelwerk, die Molchung der Leitung sowie eine Kamerabefahrung. Abschließend wurden Passtücke aus der Bestandsleitung entnommen und gemäß den Vorgaben des TÜV einer materialtechnischen Untersuchung im RWE-Labor unterzogen. Vor allem die Molchung und die Druckprüfung stellten sich im Nachgang als technisch aufwändig heraus, da die Befüllung mit Wasser und die anschließende Trocknung einer bereits erdverlegten Leitung mit erheblichen Herausforderungen verbunden waren.

Im Verlauf der Untersuchungen kam es zu einer unvorhergesehenen Herausforderung, die zu einer erheblichen Verzögerung und großem Mehraufwand führte: In der Leitung, die in der Vergangenheit mit sauerstoffhaltigem Gas (Sauggas) betrieben wurde, wurde eine bislang unbekannt Substanz entdeckt. Nach eingehender Analyse durch das RWE-Labor stellte sich diese als pyrophores Eisen mit erhöhtem Quecksilbergehalt (sogenanntes „Black Powder“) heraus. Aufgrund der potenziellen Gesundheitsgefährdung wurden umgehend umfassende arbeitsschutztechnische Maßnahmen ergriffen, einschließlich eines sofortigen Baustopps. Das Anlagengebäude wurde gesperrt, und es mussten umfangreiche Untersuchungen durchgeführt werden, darunter Raumluftmessungen zur Ermittlung möglicher Quecksilberkonzentrationen sowie Klebproben zur Analyse möglicher Bodenablagerungen. Erst nach Abschluss aller Untersuchungen und der Einführung entsprechender Schutzmaßnahmen – wie dem Einsatz von Einweg-PSA und belüfteten Halbmasken bei bestimmten

Tätigkeiten – konnte die Baustelle wieder Ende des zweiten Quartals freigegeben werden (Abbildung III.2.4).



Abbildung III.2.4: Durchführung der Molchung der Bestandsleitung (links), Molche (rechts)

Im weiteren Projektverlauf konnte Ende des zweiten Quartals das Gebläse nach Lingen geliefert und aufgestellt werden. Es folgten Anschlussarbeiten an die Kraftwerksinfrastruktur, darunter die Anbindung an die elektrische Energieversorgung sowie an das Brandmeldesystem. Nach Abschluss dieser Arbeiten erfolgte der rohrleitungstechnische Anschluss des Gebläses an das Loop-System. Parallel dazu führte der Hersteller des Gebläses noch notwendige Restarbeiten durch, die sich über mehrere Wochen erstreckten.

Neben den aufgeführten Maßnahmen hat auch die Integration eines neuen Projektes in eine bestehende Erdgasinfrastruktur eines Kraftwerks, das noch dazu zur kritischen Infrastruktur gehört, erhebliche Koordinationsbedarfe nach sich geführt. So wurde für alle Tiefbauarbeiten ein sogenannter Saugbagger genutzt – eine zusätzliche Sicherheitsmaßnahme, um bei Tiefbauarbeiten auszuschließen, ungewollt auf Leitungen oder Kabel im Untergrund zu treffen und diese zu beschädigen. Trotz der Verfügbarkeit diverser Dokumente zu der Bestandsinfrastruktur im Erdreich stellte sich der Einsatz dieses Saugbaggers in Kombination mit diversen Suchschachtungen als sehr wertvoll heraus. Ein weiteres Thema, welches die herausfordernde Integration einer Wasserstoff-Infrastruktur an einem bestehenden Kraftwerk verdeutlicht, war die Implementierung der H₂-Explosionsschutz zonen in den Erdgas-Bestand. Da die Wechselwirkungen zwischen den Gasen zu berücksichtigen war, hat dies neben der engen Abstimmung mit den Standortverantwortlichen und den ATEX-Sachverständigen aufgrund einer komplizierten Planung an der Gasstation am Kraftwerk Verzögerungen nach sich gezogen.

Im dritten Quartal 2024 wurde das vollständige Loop-System durch die zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS – TÜV Nord) erfolgreich abgenommen. Die Freigabe zur Inbetriebnahme durch den TÜV setzte mehrere Einzelnachweise voraus, darunter die ATEX-Abnahme, die Abnahme der Funktionalen Sicherheit, die Prüfung gemäß Druckgeräte-Richtlinie (PVI) sowie die Abnahme nach DVGW-Regelwerk.

Mit Abschluss der Errichtungsarbeiten konnte zum Ende des dritten Quartals 2024 der Start der Testläufe erfolgen. Zunächst wurden diese mit Stickstoff (N₂) durchgeführt, wobei insbesondere die Drehzahl des Gebläses schrittweise erhöht wurde, um sich an die spätere Nenndrehzahl heranzutasten und gleichzeitig die Systemparameter kontinuierlich zu optimieren. Nach erfolgreichem Abschluss der

N₂-Tests wurde das System mit Wasserstoff befüllt, wobei der Leitungsdruck sukzessive auf den maximal vorgesehenen Betriebsdruck von 35 bar angehoben wurde (Q4).

Im Zuge der H₂-Testläufe wurde eine Undichtigkeit am Anschlussflansch der Spindeleinheit im Gebläse-Container festgestellt. Im Rahmen der Ursachenanalyse wurden verschmutzte oder möglicherweise unsachgemäß montierte Dichtungen bzw. O-Ringe ausgetauscht. Dabei zeigte sich zusätzlich, dass der Rohrbogen des Anschlussflansches werkseitig mit einem Versatz montiert worden war, wodurch Spannungen im System entstanden. Diese wurden als wahrscheinliche Hauptursache für die Undichtigkeit identifiziert. Der Rohrbogen wurde daraufhin neu gefertigt, geprüft und vom TÜV freigegeben. Die Installation des neuen Bauteils sowie der angepassten Dichtungen erfolgte durch den Hersteller Ende des vierten Quartals. Nach abschließender Bestätigung der Dichtheit konnte der Betrieb mit Wasserstoff wieder aufgenommen werden (Abbildung III.2.5). Die H₂-Testläufe wurden im Anschluss fortgesetzt und reichten planmäßig in das erste Quartal 2025 hinein.



Abbildung III.2.5: Ansicht des Testloops am Kraftwerkstandort Lingen Außenbereich

III.3 Arbeitspaket 3: Arbeitspaket Qualitäts- und Mengenmessung

Im Themenfeld der Gasqualitäts- und Gasmengenmessung wurden drei zentrale Untersuchungsbereiche definiert. Erstens wurden verschiedene Messverfahren zur Bestimmung der Gasbeschaffenheit betrachtet, einschließlich Verfahren, die eine eichfähige Gasbeschaffenheitsmessung ermöglichen. Zweitens umfasste die Arbeit die Entwicklung, Erprobung und Optimierung von Aufreinigungsverfahren, die für eine Entfernung von Verunreinigungen und Gasbegleitstoffen und damit zur Einhaltung normativ geforderter Gasqualitäten erforderlich sind. Drittens wurde die eichfähige Durchflussmessung betrachtet.

AP 3.1 Überwachung der Gasbeschaffenheit

Das Unterarbeitspaket AP 3.1 umfasste die Entwicklung, Bewertung und Validierung von Messverfahren zur Probenahme und Analyse von Wasserstoff zur Bestimmung normativ geforderter Gasqualitäten (AP 3.1.1) und Untersuchungen zur Etablierung einer eichfähigen Gasbeschaffenheitsmessung (AP 3.1.2).

Im Mittelpunkt von AP 3.1.1 stand die Etablierung robuster und reproduzierbarer Probenahme- und Analyseverfahren in den Laboren der Projektpartner OGE und DVGW-EBI. Zu Beginn wurden unterschiedliche Ansätze zur Gasprobenentnahme aus dem Wasserstoffnetz untersucht. Dabei kamen verschiedene Probenahmesysteme und -verfahren zum Einsatz, um ein verlässliches Vorgehen zur Gewinnung repräsentativer Proben zu identifizieren. Es zeigte sich, dass die Druckwechselpülung unter Verwendung einer evakuierten und ausgeheizten Gasflasche (Abbildung III.3.1) das technisch bevorzugte Verfahren darstellt.



Abbildung III.3.1: Apparatur zur Behälterevakuierung und Vorbereitung zur Probenahme im H₂-Labor (DVGW-EBI)

Parallel zur Erarbeitung der Probenahmeverfahren wurde eine umfassende Marktrecherche zu analytischen Labor- und Online-Messsystemen für wasserstoffrelevante Parameter durchgeführt. Auf Basis dieser Bewertung beschafften beide Labore Massenspektrometer mit Ionen-Molekül-Reaktion (IMR) und Elektronenstoßionisation (EI) des Herstellers V&F. Im Zuge der Inbetriebnahme wurden umfangreiche Tests und Kalibrierungen durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der Systeme unter realen Bedingungen zu evaluieren. Die Validierungsarbeiten umfassten sowohl Permanentgase (z. B. O₂, N₂, Ar, He, CH₄, CO, CO₂) als auch adsorbierende Komponenten wie NH₃ und H₂O gemäß ISO 21087. Außerdem wurden die Grenzwerte Gruppe D gemäß DIN EN 17124 (H₂ ≥ 99,97 Mol-%) geprüft. Abbildung III.3.2 zeigt den Laboraufbau für die Wasserstoffanalytik der Gruppe D im H₂-Labor des DVGW-EBI, bestehend aus dem Massenspektrometer HydrogenSense (V&F) mit Probenaufgabe (ValveBox), einem OFCEAS Spektrometer (AP2E) und der Vorbereitungseinheit der Probenahmebehälter (rechts).



Abbildung III.3.2: Analytik im H₂-Labor (DVGW-EBI) mit Massenspektrometer (links), Probenaufgabe (ValveBox), OFCEAS (oben) und Probenbehältervorbereitung (rechts)

In Ergänzung dazu wurden im Labor der OGE spektroskopische Verfahren (CRDS und OFCEAS) in die Routineanalytik integriert und ebenfalls methodisch validiert. Für die kontinuierliche Versorgung der Geräte mit hochreinem Wasserstoff wurde seitens DVGW-EBI ein PEM-basierter Laborwasserstoffgenerator beschafft, der zudem experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Elektrolyse-Wasserstoff auf die Analytik erlaubte.

Darüber hinaus wurden auch etablierte Methoden der Erdgasanalytik (z. B. gaschromatographische, titrimetrische und elektrochemische Verfahren) auf ihre Eignung für Wasserstoffqualitätsanalytik untersucht und für ausgewählte Parameter erfolgreich übertragen.

Die entwickelten und validierten Verfahren wurden anschließend im Projektbetrieb auf reale Wasserstoffproben unterschiedlicher Herkunft angewendet. Und mit Proben aus dem Test-Loop

ergänzt. Eine Akkreditierung der Verfahren nach DIN EN ISO/IEC 17025 ist bei beiden Laboren in Vorbereitung. Abbildung III.3.3 zeigt die Projektpartner DVGW-EBI und OGE bei der H₂-Probenahme am Test-Loop in Lingen.



Abbildung III.3.3: Probenahmekampagne von OGE und DVGW-EBI am Test-Loop in Lingen

Zudem wurden die Messmethoden von DVGW-EBI zur messtechnischen Begleitung der Arbeiten in AP 3.2 („Entwicklung und Optimierung von Aufreinigungsverfahren“) genutzt, inklusive der Implementierung einer permanenten Messanbindung an die dafür aufgebaute Laborapparatur.

Ergänzend erarbeitete DVGW-EBI gemeinsam mit den Projektpartnern OGE und MeterQ sowie Verbundpartnern aus dem Forschungsverbund „Sichere Infrastruktur“ ein Whitepaper zu „Aspekte der Gasanalytik im Leitprojekt TransHyDE“.

Zur Bearbeitung des Themenfelds „Eichfähige Gasbeschaffenheitsmessung“ (AP 3.1.2) wurde ein H₂-Labor geplant und am OGE-Standort in Essen aufgebaut, in dem mehrere Prozessgaschromatographen (PGCs) zur Messung der Gaszusammensetzung validiert werden konnten (Abbildung III.3.4).

Das Labor wurde speziell für die Eigenschaften von Wasserstoff konzipiert, was sich beispielweise in der Höhe der Ausbläser über Dach oder H₂-Sensoren zur Überwachung der Raumatmosfera zeigt. Neben den Prüfplätzen verfügt das Labor über zwei Elektrolysen zur Wasserstoffherstellung und einer Reinstwasseraufbereitung zur Versorgung dieser. Insgesamt wurden sechs Prüfplätze installiert mit der

Möglichkeit einer flexiblen Gasaufschaltung. Neben dieser wurden zur Spannungsversorgung und Kommunikationsanbindung diverse Möglichkeiten geschaffen, um die Messgeräte zu betreiben.



Abbildung III.3.4: H₂-Labor zur Validierung von PGCs

PGCs trennen die einzelnen Bestandteile eines Gases auf und bestimmen welche Komponenten in einer Gasprobe enthalten sind und in welchen Konzentrationen sie vorkommen. Im Anschluss können z. B. durch die ISO-Norm 6976:2016 die brenntechnischen Parameter berechnet werden. Dazu werden vier Schritte durchlaufen:

- 1) Probenahme: Eine Gasprobe wird mittels Probeentnahmesonde aus dem Prozess abgezweigt.
- 2) Trennung: Die Probe wird über einen Injektor zugeführt und dann im Trägergas (z. B. Helium, Stickstoff, Wasserstoff) weitertransportiert und durch eine Trennsäule geleitet. Unterschiedliche Gasbestandteile verweilen verschieden lange in der Säule.
- 3) Detektion: Am Ende der Säule misst ein Detektor, wann welche Stoffe austreten. Je nach Säulentyp können unterschiedlichen Komponenten detektiert werden.
- 4) Auswertung: Die Einzelkomponenten kommen an einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor an und werden vermessen. Durch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten der Gase wird bei dem Wärmeleitfähigkeitssensor eine Änderung des elektrischen Widerstandes erwirkt. Dieses Signal wird in Form eines Chromatogramms abgebildet.

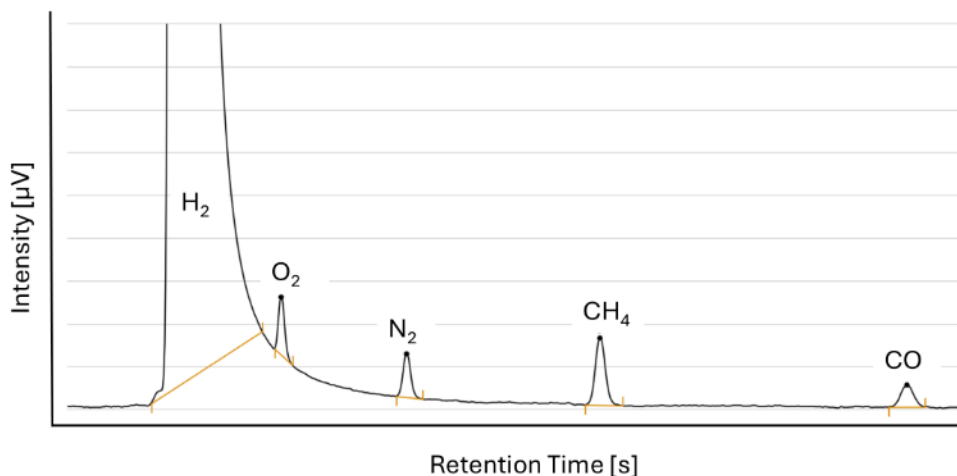


Abbildung III.3.5: Chromatogramm eines H₂ Prüfgases

In dem abgebildeten Chromatogramm (Abbildung III.3.5) erkennt man die Integration verschiedener Komponenten (H₂, O₂, N₂, CH₄, CO) eines H₂-Prüfgases. Die Fläche eines Signalausgangs (sogenannter „Komponentenpeak“) wird durch Integration bestimmt und anschließend in eine Konzentration umgerechnet. So lässt sich die genaue Zusammensetzung des zu messenden Gases bestimmen.

PGCs werden für eine kontinuierliche Prozessüberwachung und Echtzeitsteuerung eingesetzt. Oft sind es robuste Geräte, die in Industrieanlagen dauerhaft laufen. Um diesen Gerätetyp für die Abrechnung von transportierter Energie nutzen zu dürfen, müssen sie geeicht sein.

Amtliche PGCs für die Messung von Erdgas müssen einer jährlichen Richtigkeitsprüfung unterzogen werden. Hier gilt es bestimmte Prüfgase an dem PGC zu vermessen und im Zuge der Richtigkeitsprüfung gesetzlich festgelegte Fehlergrenzen einzuhalten. Die Prüf- oder auch Eichgase dienen der Überprüfung des Messverhaltens des PGC. Je nach PGC-Typ sind verschiedene Prüfgase seitens der PTB in der Baumusterprüfbescheinigung definiert. Diese Gase dienen zur Überprüfung des Messbereiches. Je nach Messgerätetyp im Bereich der Gasbeschaffenheitsmessung sind zwei bis fünf Prüfgase notwendig. Diese Gase werden nach der PTB-Anforderung 7.63 von der PTB selbst oder staatlich anerkannten Prüfstellen zertifiziert. Ein amtliches internes Kalibriergas bildet zusammen mit dem Gerät eine Einheit und wird dementsprechend amtlich versiegelt.

Es wurden sechs PGCs unterschiedlicher internationaler Hersteller gemietet, die dann im H₂-Labor getestet und verglichen wurden. Mit der PTB und BAM wurde abgestimmt, welche Gase als Prüfgase in Betracht kommen. Abgeleitet wurden die Prüfgase aus potenziellen Verunreinigungen aus den gängigen Herstellungsverfahren (Tabelle III.3.1) für Wasserstoff und dem zum Zeitpunkt der Erprobung gängigen Regelwerken.

Tabelle III.3.1: Mögliche Verunreinigungen aus H₂-Herstellungsverfahren

Verfahren	Angenommene Verunreinigungen
Wasserelektrolyse	O ₂ , N ₂ , H ₂ O
Dampfreformierung	CH ₄ , CO, CO ₂ , O ₂ , N ₂ , H ₂ O

Zusätzlich wurden alle sechs PGCs über eine Prüflaufzeit von 18 Monaten ("Langzeittest") mit H₂ aus den Elektrolysen störungsfrei betrieben. Dieser Test ist wichtig, da so ein Nachweis über die Zuverlässigkeit im Feldeinsatz erbracht werden kann. Im Rahmen der Validierung wurden herstellerseitige Anpassungen vorgenommen wie z.B. die Optimierung von Integrationsparametern.

Ziel des Arbeitspaketes war es außerdem, eine Lösung zu entwickeln, die für die abrechnungsrelevante Online-Messung der Gasbeschaffenheit von Wasserstoff und seiner relevanten Gasbegleitstoffe eingesetzt werden kann. Das Teilprojekt beinhaltete im Wesentlichen die folgenden Aspekte:

1. Grundlegende Überlegungen, welche Komponenten in welchen Messbereichen gemessen werden sollen – unter Berücksichtigung der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Anforderungen und Regulatorik
2. Auswahl einer geeigneten messtechnischen Plattform
3. Entwicklung des eigentlichen Messgeräts und der zugehörigen Applikation
4. Messtechnische Verifikation und Prüfung/Zulassung des Geräts durch die PTB
5. Teilnahme an dem durch die OGE durchgeführten Laborvergleichstest
6. Installation und Feldtest des fertigen Geräts im Wasserstoff-Loop in Lingen

Als Plattform für das neue Gerät wurde der bereits im Bereich Erdgas eichamtlich zugelassene Prozessgaschromatograph der Serie MGC eingesetzt. Die bereits bewährte Hardware erwies sich als ideal geeignet für die neue Wasserstoff-Applikation. Die wesentliche Herausforderung bestand darin, die Applikation an die im Vergleich zum Erdgas signifikant anderen Anforderungen anzupassen. Zusätzlich war eine regulatorische Grundlage für eine metrologische Zulassung zu Beginn des Projekts noch nicht vorhanden, so dass einige Anforderungen im Laufe des Projekts hinzukamen oder sich veränderten. Die Applikationsentwicklung wurde im Labor von meterQ abgeschlossen, unterstützt durch einen eigens aufgebauten Wasserstoff-Prüfstand sowie eine Reihe von VSL-zertifizierten Prüfgasen.

In der nächsten Phase sollte das Gerät metrologisch verifiziert bzw. zugelassen werden. Zu diesem Zweck wurde eine entsprechende Prüfung bei der PTB angestrebt. Diese konnte jedoch nicht abgeschlossen werden, da die für diese Prüfung benötigten rückgeführten Prüfgase nicht rechtzeitig beschafft werden konnten. Zusätzlich wurde eine metrologische Prüfung des Geräts durch NMI Certin B.V. durchgeführt. Diese Prüfung erfolgte auf Basis der OIML R-140 und der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden TR G-19 unter Verwendung der bereits zur Applikationsentwicklung angeschafften VSL-zertifizierten Prüfgase und wurde erfolgreich abgeschlossen.

In der letzten Phase sollte das Gerät im H₂-Loop in Lingen installiert und dort im Dauerbetrieb unter Feldbedingungen getestet und geprüft werden. Das Messwerk wurde hierzu in ein Transmittergehäuse eingebaut und mit einer speziellen Entnahmesonde über einen Flansch direkt auf der Loop-Leitung installiert. Als Sonde wurde eine spezielle Entnahmesonde entwickelt und eingesetzt, die es erlaubt, mit minimaler Verzögerung und ohne schädliche Bypass-Emissionen Wasserstoff zu messen. Da es sich um eine Außeninstallation handelt, wurde außerdem eine Temperaturüberwachung der Außen- und Innentemperatur des Transmittergehäuses installiert, um beide Temperaturverläufe sowie deren Einfluss auf die Messrichtigkeit bewerten zu können. Die Installation erfolgte analog zu der bereits für Erdgas zugelassenen Variante, so dass Betrieb und Sicherung des Geräts unter denselben Bedingungen stattfinden konnten wie bei der eichamtlich zugelassenen Erdgasvariante.

Nach Aufnahme des Loop-Betriebs wurde das Gerät messtechnisch geprüft und ebenfalls in Betrieb genommen (Abbildung III.3.6). Mit Erscheinen der DVGW-Information Gas Nr. 33, die den aktuellen Stand der metrologischen Grundlage für die Wasserstoff-Analyse darstellt und in wesentlichen Punkten von der TR G-19 abweicht, wurde das Messwerk ins Labor zurückgeholt und nach den neuen Anforderungen der GasInfo 33 neu kalibriert. Das Gerät wurde dann in Abstimmung mit der PTB wieder am Loop installiert und im Oktober 2025 messtechnisch geprüft, gesichert und in Betrieb genommen. Seitdem befindet sich das Gerät im Dauerbetrieb. Die PTB und meterQ haben einen dauerhaften Fernzugriff auf das Gerät, der eine Überwachung des Zustands sowie die Auswertung der Mess- und Kalibrierergebnisse erlaubt. Das Gerät läuft seitdem störungsfrei und ermöglicht der PTB eine fundierte Bewertung der Langzeitstabilität sowie der Performance.

Schließlich liegen die rückgeführten Prüfgase, die für die Richtigkeitsprüfung des Geräts nach den Anforderungen der GasInfo 33 benötigt werden, nun bei der PTB vor. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts ist die metrologische Prüfung eines zweiten Baumusters bei der PTB für März 2026 terminiert.



Abbildung III.3.6: MGC^{hydrogen}-Installation in Lingen

AP 3.2 Entwicklung, Test und Optimierung von Aufreinigungsverfahren

Zukünftige Wasserstoffabnehmer weisen je nach Anwendung unterschiedliche Reinheitsanforderungen auf und reagieren teils äußerst sensitiv auf spezifische Verunreinigungen. Daher kann eine gezielte Aufreinigung des Wasserstoffs erforderlich sein, um die Funktionsfähigkeit nachgeschalteter Prozesse oder Anlagen zu gewährleisten. In AP 3.2 wurden im ersten Schritt potenziell relevante Verunreinigungen sowie deren typische Konzentrationsbereiche systematisch identifiziert und Leitkomponenten für die Untersuchungen im Projekt definiert.

Auf dieser Grundlage erfolgten eine Analyse und Bewertung verschiedener Gasreinigungsverfahren. Hierbei zeigte sich, dass das jeweilige geeignete Verfahren stark von der Art der Verunreinigungen im Wasserstoff und den Prozessbedingungen abhängt. In Tabelle III.3.2 sind die Verunreinigungen und die hierfür verwendete analytischen Verfahren gelistet.

Tabelle III.3.2: Verunreinigungen gemäß DIN EN 17124

Stoff	Grad A [$\mu\text{mol/mol}$]	Grad D [$\mu\text{mol/mol}$]	Analytik
H ₂ O	50	5	Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS)
NH ₃	1	0,1	Gaschromatograph
CO ₂	10	2	Gaschromatograph
CO	100	0,2	Gaschromatograph
O ₂	100	5	Elektrochemischer Detektor
THT	1	0,004 (Zuordnung Schwefelverbindungen gesamt)	Gaschromatograph
Ethylen	–	2 (Summe Kohlenwasserstoffe ohne Methan aus ISO 14687, Tab. 2)	Gaschromatograph

Da in der Gaswirtschaft bereits viele adsorptive Verfahren technisch erfolgreich und wirtschaftlich eingesetzt werden, lag der Fokus der Betrachtung in erster Linie auf eben dieser Art von Verfahren.

Unter Adsorption versteht man allgemein die Anreicherung von Fluiden (Flüssigkeiten oder Gasen) an Oberflächen von Festkörpern (sog. Adsorbentien). Dieser Prozess kann auf physikalischen oder auch chemischen Bindungen beruhen, und wird auf verschiedene Weise für die Reinigung von Fluiden genutzt. Der Vorteil bei der physikalischen Adsorption (Physisorption) ist, dass das Adsorbens und die adsorbierten Verbindungen ohne Veränderungen dieser wieder voneinander getrennt werden können, was eine Wiederverwendung des Adsorbens ermöglicht. Das momentan am häufigsten verwendete Adsorptionsverfahren zur Aufreinigung von Wasserstoff ist die sogenannte Druckwechsel-Adsorption (PSA), welche auf dem Prinzip der Physisorption beruht. Demnach können beispielsweise Wasser, und langkettige Kohlenwasserstoffe besser adsorbiert werden als Methan und Kohlenstoffmonoxid. Im Falle von langkettigen Kohlenwasserstoffen wie Verdichterölen ist daher ein höherer Energieaufwand zur Desorption notwendig, weshalb das Adsorbens gegebenenfalls gewechselt werden muss. Edelgase, Stickstoff, Methan und Kohlenstoffmonoxid können aufgrund der sehr niedrigen Adsorbierbarkeit daher nach Reformierungsprozessen mit nachgeschalteter PSA weiterhin im Wasserstoff zu finden sein und sollten zum Erreichen hoher Wasserstoffreinheiten vorher abgetrennt werden. Der Wasserstoff adsorbiert nicht und wird somit von den Verunreinigungen getrennt. Der beladene Adsorber wird entspannt und gespült, wodurch sich die Partialdrücke der einzelnen Gasbestandteile reduzieren, und die Desorption der Verunreinigungen stattfindet. Dies

findet kontinuierlich statt, da mind. zwei wechselseitig be- und entladene Adsorber eingesetzt werden. Ein Nachteil der PSA sind Wasserstoffverluste verursacht bei der Regeneration der Adsorbentien über den Druckabfall.

Ein anderes Adsorptionsverfahren stellt die Temperaturwechsel-Adsorption dar, bei der die Desorption der adsorbierten Komponenten durch eine Temperaturerhöhung verursacht wird. Dadurch können auch stark gebundene Komponenten desorbiert werden, jedoch benötigen die Heiz- und Kühlprozesse Zeit. Daher wird die TSA vor allem zur Gastrocknung verwendet und könnte beispielsweise nach dem Ausspeichern von Kavernen eingesetzt werden. Die Adsorptionskapazität insgesamt ist vom verwendeten Adsorbens, der Eingangskonzentration des Wasserstoffs und der Anwesenheit konkurrierender Komponenten abhängig. Beispiele für Adsorbentien werden im Folgenden aufgezeigt.

Aktivkohle ist ein gut geeignetes Adsorbens für unpolare Verbindungen, wie bestimmte Kohlenwasserstoffe oder Schwefelverbindungen. Die Adsorption an der Kohle steigt mit zunehmendem Molekulargewicht bei sinkender Wasserlöslichkeit, Polarität und Flüchtigkeit der Verbindungen. Außerdem steigt die Adsorptionsrate mit steigendem Druck an. Polare Verbindungen hingegen, wie z.B.: Schwefelwasserstoff, Mercaptan, Thiophen und Kohlenoxidsulfid, absorbieren nur an imprägnierter Aktivkohle (z.B.: Kaliumpermanganat, Kaliumcarbonat und Kaliumjodid) und bei hohem Druck. Zeolithe werden ebenfalls als Adsorbens eingesetzt, vor allem zur Entfernung von Schwefelverbindungen (z.B. Mercaptanen). Ebenso können Sauerstoff, Methan und Stickstoff entfernt werden. Zudem dient Zeolithe der H₂O-Entfernung, der Gastrocknung. Zur Entfernung von Schwefelverbindungen ist ebenso die Kopplung aus Adsorptionsprozessen und katalytischen Reaktionen im Anschluss möglich, wie beispielsweise mithilfe von Kobalt/Molybdän-Katalysatoren und einem Zinkoxid-Adsorbens.

Weitere mögliche Verfahren zur Gasreinigung sind das Membranverfahren, die partielle Oxidation, die Kryokondensation und die Absorption. Bei Membranverfahren durchströmt das Gasgemisch meist aufgrund eines Konzentrations- und/oder Druckgefälles das Gas durch eine semipermeable Membran (mit unterschiedlichen Selektivitäten), wodurch es zu einer Trennung der einzelnen Verbindungen und kommt. Das Prinzip ist rein mechanisch und ermöglicht eine schonende Trennung der beiden Fraktionen, durch die Membran diffundierte (Permeat) und von der Membran zurückgehaltene Fraktion (Retentat). Die häufigsten Verunreinigungen, die dadurch entfernt werden, sind Methan, Wasser und Kohlenstoffmonoxid bzw. -dioxid. Mögliche Technologien sind Polymermembranen, Protonen-Austausch-Membran (PEM) oder Palladiummembranen.

Bei der partiellen Oxidation wird die Adsorption durch chemische Bindungen (Chemisorption) mit einer nachfolgenden katalytischen Reaktion der adsorbierten Komponenten gekoppelt. Dabei wird Wasserstoff mit zugeführtem Sauerstoff (oder Luft) an einem Platin- oder Palladium-Katalysator zu Wasser bei Umgebungstemperatur oder leicht erhöhten Temperaturen (> 50 °C) exotherm umgesetzt. Dieses Prinzip kann zur Entfernung von Wasserstoff aus Erdgasströmen, sowie zur Reinigung von verunreinigtem Wasserstoff eingesetzt werden. Der Einsatz der partiellen Oxidation zur Entfernung von Sauerstoff aus dem Wasserstoff wird als Deoxo-Reaktion bezeichnet und vor allem nach der Produktion durch Elektrolyse angewendet. Das dabei entstandene Wasser wird in einer nachgeschalteten Adsorptionsanlage entfernt, wodurch eine Wasserstoffreinheit von mindestens 99,999 % erreicht wird.

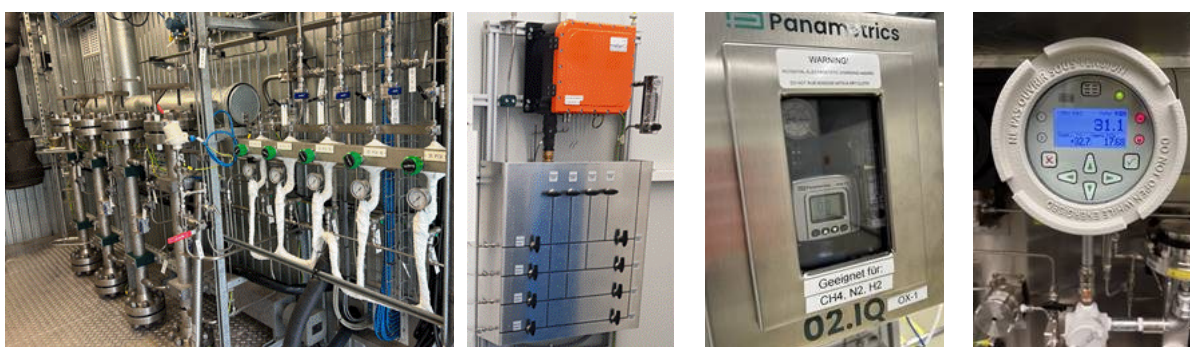
Die bei der Reaktion freigegebene Wärme ist abhängig von der Sauerstoffkonzentration des Eingangsstroms - umso höher der Sauerstoffanteil, desto höher die Temperaturerhöhung. Diese wird apparativ oder verfahrenstechnisch berücksichtigt durch z.B. kaskadierte Reaktorsysteme mit

Zwischenkühlung oder Teilrückführungen des Wasserstoffs. Um eine Schädigung des Katalysators zu vermeiden, sollte zuvor der möglicherweise im Wasserstoff enthaltene Schwefel (durch z.B. imprägnierte Aktivkohle) entfernt werden.

Die Kryokondensation kann zur Trennung von Komponenten bzw. Wasserstoff-Erdgas-Gemischen sowie zur Senkung des Volumens und Druckes bei dem Transport von Flüssigkeiten (LNG, H₂) eingesetzt werden. Sie basiert auf den verschiedenen Siedepunkten und Flüchtigkeiten der Gaskomponenten, die durch eine Kühlbox laufen und dabei teilweise verflüssigt werden. Da der Siedepunkt von Wasserstoff bei -235 °C liegt, ist für eine erfolgreiche Aufreinigung auf hohe Reinheit die Verflüssigung aller anderen Bestandteile Voraussetzung. Da im Falle von Wasserstoff kein Entspannungsverfahren zur Ausnutzung des Joule-Thomson-Effekts möglich ist, ist der Energiebedarf für die H₂-Reinigung hoch. Wird das Verfahren zur Trennung von Wasserstoff und Erdgas genutzt, ist die nachgeschaltete Aufreinigung mit einer Membran- oder PSA-Anlage zum Erreichen der Wasserstoffreinheit von 99,999 % notwendig. In jedem Fall ist zusätzlich eine Vorbehandlung des Eingangstroms notwendig, um CO₂, H₂S, H₂O und hohe Kohlenwasserstoffe zu entfernen und somit eine Verstopfung des Rohres durch gefrorene Teile zu vermeiden. Daher sind Adsorptionsverfahren energetisch und kostengünstiger als das Kryoverfahren.

Das Prinzip der Absorption wird ebenfalls zur Reinigung von Wasserstoff verwendet, vor allem zur Trocknung des Gases. Hierbei wird die zu entfernende Komponente in einer Waschflüssigkeit reversibel gebunden. Es kann dabei allerdings zum Eintrag der Waschflüssigkeit (z.B. Amine, Glykole) in das Gas kommen. Bei der Trocknung mit Triethylenglykol (TEG), die standardmäßig an Untergrundspeichern eingesetzt wird, kann die Wasserstoffqualität Gruppe A erreicht werden und in Kombination mit Molsieb-trocknung auf Gruppe D erhöht werden.

Als Ergebnis der Betrachtungen dieser Aufreinigungsverfahren, stellte sich hierbei als aussichtreichstes Gasreinigungsverfahren, die einfache Adsorption dar. Für deren Erprobung wurde eine gepachtete Technikumsanlage aus dem Bestand der OGE für die Nutzung mit Wasserstoff ertüchtigt. Vor der Inbetriebnahme fand eine HAZOP-Analyse in Zusammenarbeit mit dem TÜV Hessen statt. Die Konzeption der Anlage ermöglichte es, kommerzielle Adsorbentien in technischer Form ohne vorherige Anpassungen (z.B. Mahlen) bei den relevanten Betriebsbedingungen des Pipelinetransports (Druck, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit) zu untersuchen. Bis zu vier Adsorbentien konnten dabei entweder seriell oder parallel durchströmt werden (Abbildung III.3.7. a).



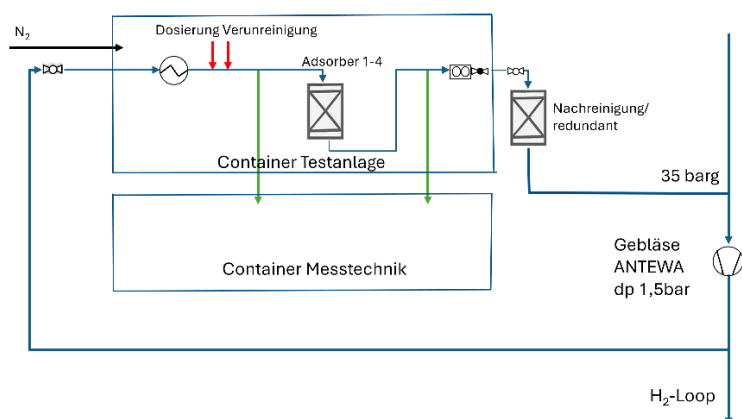
a) Adsorberdruckbehälter und Probeentnahmestellen

b) Gaschromatograph

c) Elektrochemischer Sauerstoffdetektor

d) TDLAS

Abbildung III.3.7: Adsorptionstestanlage und die vor Ort verfügbare Analytik



a.) Schematische Darstellung der Einbindung des Adsorptionstestanlage-Container, Messtechnik-Container und der Nachreinigung in den Wasserstoff-Loop der RWE in Lingen

b.) Nachreinigungskartuschen zum Schutz des Loops vor unerwünschtem Eintrag der zudosierten Störkomponenten und N₂-Flaschenbündel zum Inertisieren der Anlage beim An-/Abfahren.

Abbildung III.3.8: Einbindung der Adsorptionstestanlage vor Ort in Lingen

Der für die Versuche erforderliche Wasserstoff wurde als Teilstrom aus dem Wasserstoff-Loop von RWE entnommen und der Adsorptionsanlage zugeführt (Abbildung III.3.8). Dort wurde der Wasserstoffstrom mit ausgewählten Störkomponenten versetzt und durch die Adsorber geleitet. Die Analyse der Gasströme vor und nach jedem Adsorber erfolgten mittels eines Gaschromatographen (NH₃, THT, N₂, O₂), eines elektrochemischen Sensors (O₂) sowie eines Spektroskops (TDLAS) (H₂O) (Abbildung III.3.7 b) bis d).

Im Fokus der Untersuchungen standen die Störkomponenten Wasser, NH₃, O₂ und THT. Es konnten zum Teil Durchbruchkurven ermittelt werden, die für die technische Auslegung relevant waren. Zur Bestimmung der Austauschzeiten erfolgte eine schichtweise Analyse der beladenen Adsorbentien im Labor.

Die Dosierung der Störkomponenten erfolgte über unterschiedliche Methoden. Wasser konnte mittels eines Verdampfers, Ammoniak flüssig mittels einer Dosierpumpe sowie O₂ und THT gasförmig als synthetische Luft bzw. Wasserstoff/THT-Gemisch mittels Massendurchflussreglern dosiert werden. Abbildung III.3.9 a zeigt die Dosierpumpe mit und den Ammoniakzylinder mit Tauchrohr. Über eine Gasflaschenheizung wurde der Druck im Ammoniakzylinder erhöht. So war sichergestellt, dass der Ammoniak vor der Dosierpumpe in der Flüssigphase vorliegt. Das Ammoniak wurde in den Eintrittsstrom vor den Adsorbentien dosiert, wo es sich mit dem Gasstrom vor dem Adsorbentienbett homogenisierte. Die Ammoniakkonzentration wurde mit einem Gaschromatographen vor und nach dem Adsorber analysiert und damit die Daten für die Durchbruchkurven ermittelt (Abbildung III.3.9 b).



Abbildung III.3.9 a: beheizter
Ammoniakzylinder
mit Dosierpumpe.

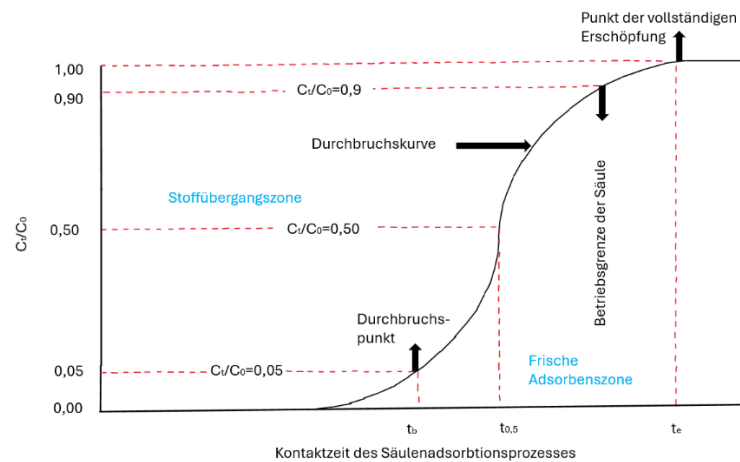


Abbildung III.3.9 b: schematische Darstellung einer Durchbruchskurve mit den typisch daraus zu ermittelnden technischen Parametern [7].

Aufgrund von technischen Problemen bei der Inbetriebnahme des im Wasserstoff-Loop eingebundenen Gebläses kam es beim Projektablauf zu immensen Verzögerungen, sodass das geplante Versuchsprogramm nur teilweise innerhalb der Projektlaufzeit bearbeitet werden konnte. OGE hat in Abstimmung mit RWE daher beschlossen, bis Mitte Mai 2026 den Testbetrieb auf eigene Kosten fortzuführen.

Im Rahmen des Arbeitspakets 3.2 wurde parallel zu den Arbeiten an der Technikumsanlage, zusammen mit DVGW-EBI einer Marktrecherche zu den entsprechend geeigneten Adsorbentien durchgeführt. Die hierbei identifizierten Materialien wurden zu Versuchszwecken innerhalb des Projekts von deren Herstellern bereitgestellt. Um deren grundsätzliche Eignung für die Versuche an der Technikumsanlage in Lingen zu untersuchen, wurden am EBI Laborversuche zur adsorptiven Entfernung ausgewählter Komponenten durchgeführt. Hierzu wurde seitens DVGW-EBI ein Teststand entworfen und in dessen H₂-Labor aufgebaut (Abbildung III.3.10). Vor dem Hintergrund einer künftig dezentralen Gasreinigung, um Wasserstoff der Gruppe A auf die Qualitätsanforderungen der Gruppe D aufzureinigen, lag auch der Anspruch darauf, diese Möglichkeit hiermit zu untersuchen.



Abbildung III.3.10: Laboranlage-Adsorberteststand im H₂-Labor des DVGW-EBI

Die Reinigung von Wasserstoff der Gruppe A auf die Qualitätsanforderungen der Gruppe D impliziert die Entfernung störender Spurenstoffe im unteren ppm-Bereich. Daher wurde der Teststand weitestgehend aus Edelstahl mit SilcoNert®-Beschichtung gefertigt, um den Einfluss adsorptiver Wandeffekte zu minimieren. Das Herzstück der Anlage bildeten zwei Adsorber (B20; B21; Di=20 mm), die parallel betrieben werden konnten. Die Adsorber wurden jeweils über einen MassFlow Controller (MFC-20 und -21) mit Feedgas versorgt. Beide Adsorber waren mit je vier Temperatursensoren ausgestattet, sodass bei Bedarf das Temperaturprofil über die Adsorberhöhe erfasst werden konnte. Ein Adsorber (B 20) konnte bis 100 °C temperiert betrieben werden. Das Feedgas wurde über das vorgelagerte Gasmischsystem bestehend aus 4 MFCs hergestellt. Der Arbeitsdruck der Adsorber ließ sich über den Druckregler (MFC-22), der sich am Ausgang der Adsorber befand, einstellen. Über entsprechende Armaturen und einem Leitungsdruckminderer konnten Gasproben der Adsorberein- und -ausgänge der Analytik zugeführt werden. Hierzu wurde auf die Analysenmethoden aus AP 3.1.1 zurückgegriffen (Massenspektrometer, μ -Gaschromatograph und OFCEAS). In *Tabelle III.3.3* sind die möglichen Betriebsbereiche des Teststands aufgeführt.

Tabelle III.3.3: Adsorptionsteststand-Betriebsbereich

Betriebstemperatur	T_{Raum} bis 100 °C (nur ein Adsorber beheizbar)
Betriebsdruck	0 bar _{rel.} – 15 bar _{rel.}
2 Adsorber, Adsorberdurchmesser (innen)	20 mm
Maximale Schüttbetthöhe	200 mm
Volumenstrom	bis zu 500 l/h (NTP)

Bei der Auswahl der Zielkomponenten lag der Fokus auf Störstoffen, zu denen bisher wenig Kenntnisse hinsichtlich der adsorptiven Entfernung vorlagen. In Absprache mit den Betreibern der Testanlage in Lingen wurden folgende Störstoffe für die Untersuchungen am DVGW-EBI ausgewählt; CO, CO₂, NH₃ und O₂. Zur Adsorbentienauswahl, wurden für die ausgewählten Komponenten, Hersteller hinsichtlich geeigneter kommerzieller Adsorbentmaterialien angefragt. Die für die Versuche ausgewählten Adsorbentien zeigt Tabelle III.3.4.

Tabelle III.3.4: Getestete Komponenten und empfohlene Adsorbentien

Analyt	Adsorbens
CO ₂	AS 1 (13X-Zeolith)
CO	AS 2 (5A-Zeolith)
NH ₃	AS 3 (Aktivkohle)
O ₂	AS 4 (Silicat/Aluminiumoxid, impregniert)

Vor den Versuchen mit den ausgewählten Adsorptionssystemen wurden umfangreich Arbeiten zur Inbetriebnahme und Vorversuche hinsichtlich der Betriebsweise und der Kalibrierung von MSR und Analytik durchgeführt. Alle Versuche wurden bei Raumtemperatur und einem Systemdruck von 3 barg durchgeführt. Der dem Adsorber zugeführte Volumenstrom des jeweiligen Feedgases wurde auf ca. 50 l/h eingestellt und Durchbruchkurven der jeweiligen Analyte mit ihren zugeordneten Adsorbentmaterialien aufgenommen. Aus den Durchbruchkurven (DBK) wurden als charakteristische Daten die Gleichgewichtsbeladung B bei $y/y_0 \approx 50\%$ (ideale Sprungfunktion) sowie die Durchbruchbeladung B_D bei $y/y_0 \approx 5\%$ ermittelt.

AP 3.3 Eichfähige Durchflussmessung

Im Wasserstoffnetz ist es erforderlich, den Durchfluss an Einspeise- und Ausspeisestellen geeicht zu messen. Derzeit liegen auf diesem Gebiet nur begrenzte praktische Erfahrungen vor. Einzelne Zählertypen wie Wirkdruckgaszähler oder Corioliszähler verfügen bereits über eine Baumusterprüfbescheinigung für die eichfähige Messung, die unabhängig vom Medium gilt. Dennoch ist es notwendig, auch die Gaszusammensetzung geeicht zu erfassen, was für viele Anwendungen praktikabel erscheint.

Im Erdgasbereich kommen üblicherweise Turbinenradgaszähler, Drehkolbengaszähler und Ultraschallgaszähler zum Einsatz. Zu Beginn des Projekts standen jedoch keine Zähler mit Baumusterprüfbescheinigung für Wasserstoff zur Verfügung, und es existierten nur wenige Kenntnisse bezüglich der Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit unter Wasserstoffbedingungen.

Das Ziel des Projekts war es daher, potenziell geeignete Zähler für den Einsatz im Wasserstoffnetz detailliert zu untersuchen und gemeinsam mit den Herstellern darauf hinzuwirken, dass Baumusterprüfbescheinigungen bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) erwirkt werden. Hierzu wurden in den H₂-Loop bei RWE eine Teststrecke und Umgang eingebaut. Nach Abstimmung der Gebläsekennlinie, Drücke und Durchflüsse wurden TransfERNormale konzipiert, die als Referenz für Zählerprüfungen dient und den Kern der Untersuchungen zur Messgenauigkeit und -qualität bildet. Das Vorgehen wurde eng mit der PTB abgestimmt und die Auslegung des Prüfstands auf die Anforderungen des Loops angepasst.

Um die Messgenauigkeit verschiedener Durchflussmessverfahren bei der Anwendung mit Wasserstoff bestimmen zu können, wurde ein TransfERNormal als Referenz entwickelt und validiert. Dieses TransfERNormal bestand aus einer Blendenmessstrecke sowie einem Turbinenradzähler.

Die Kalibrierung der TransfERNormale erfolgte auf mehreren Prüfständen mit unterschiedlichen Medien. In Abbildung III.3.11 ist die Abweichung der Blendenmessstrecke zu der jeweiligen Prüfstandsreferenz über der Reynoldszahl aufgetragen. Mit blauen Symbolen sind die Abweichungen der Luft- und Wassermessungen bei der PTB, mit grünen Symbolen die Wasserstoffmessungen bei unterschiedlichen Drücken bei RMA und mit orangenen Symbolen die Erdgasmessungen bei zwei Drücken auf dem pigsar Prüfstand aufgetragen. Über den gesamten abgedeckten Messbereich liegt die Abweichung innerhalb von +/- 1 %. Die Zuverlässigkeit der Blendenmessstrecke zeigt sich nicht nur durch die geringe Gesamtabweichung, sondern auch durch die bei vergleichbarer Reynoldszahl geringen Abweichung der Ergebnisse auf verschiedenen Prüfständen und mit unterschiedlichen Betriebsmedien.

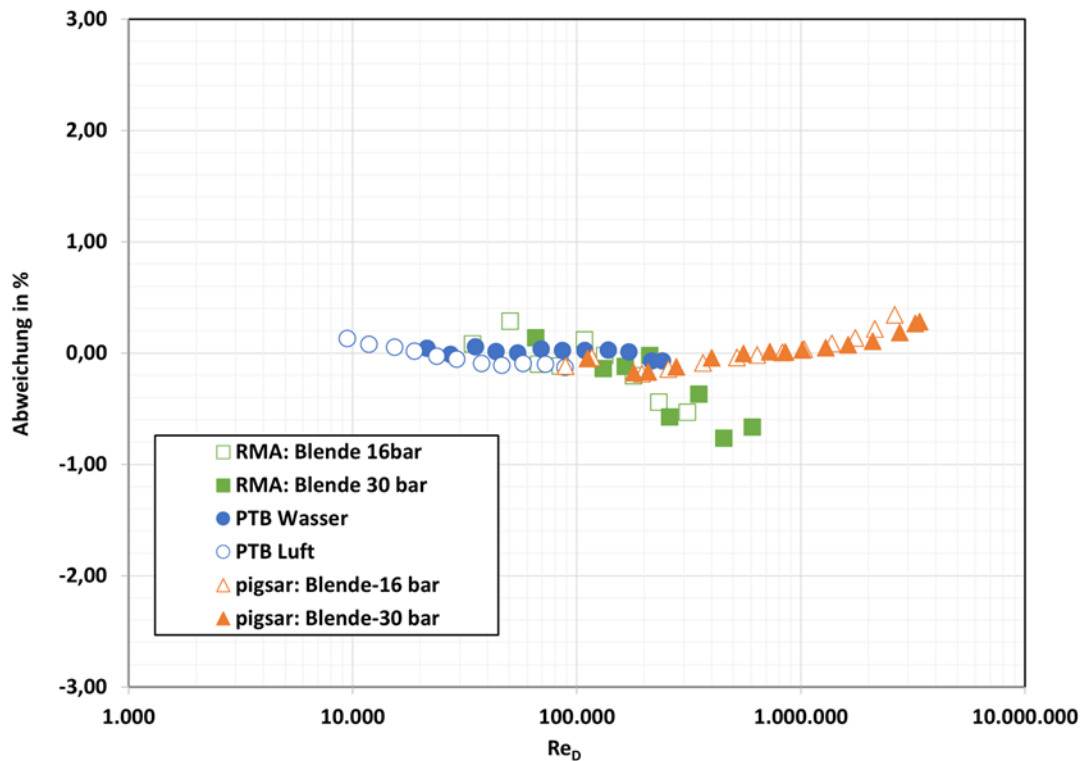


Abbildung III.3.11: Abweichung der Blendenmesswerte über der Reynoldszahl auf den Referenzprüfständen

Abbildung III.3.12 stellt die ermittelte Abweichung des Referenzturbinenradzählers über der Reynoldszahl auf den Referenzprüfständen dar. Auch der Turbinenradzähler zeigt beim Vergleich der Abweichungen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Medien Luft und Erdgas. Auf dem RMA Prüfstand mit Wasserstoff wurde eine etwas größere Abweichung der Messwerte beobachtet. Die Abweichungen für den Turbinenradzähler liegen über den gesamten Messbereich bei $\pm 1,5\%$.

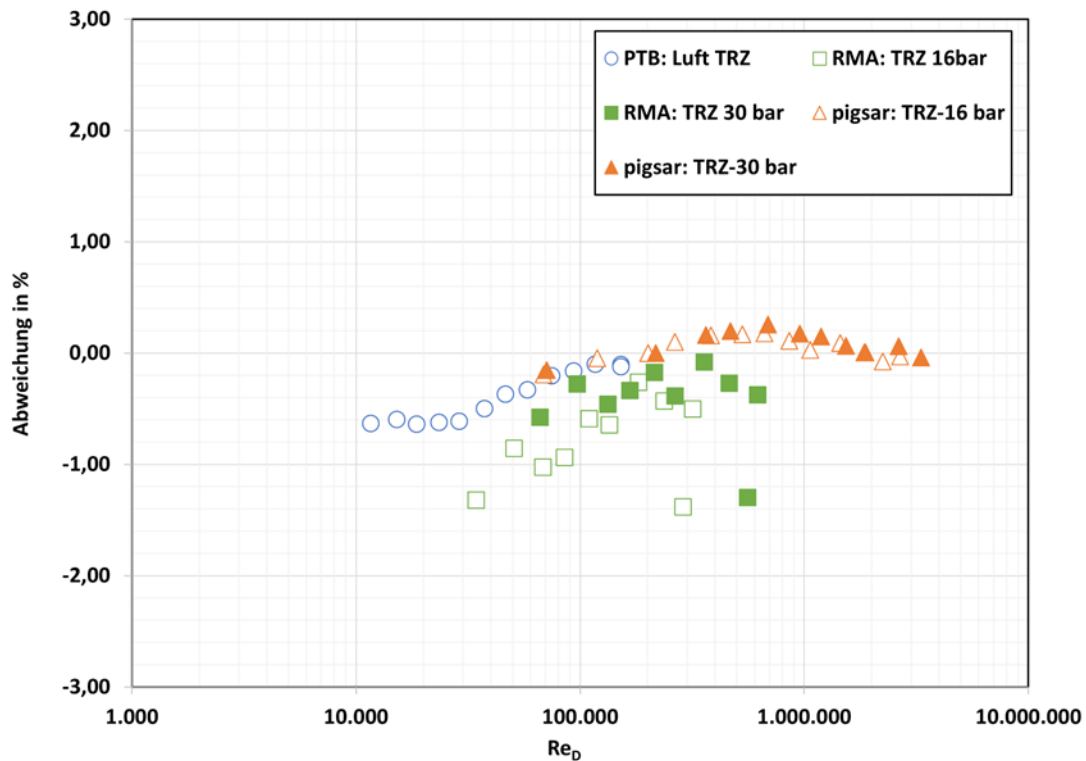


Abbildung III.3.12: Ermittelte Abweichung des Referenzturbinenradzählers über der Reynoldszahl auf den Referenzprüfständen

Die Blendenmessstrecke erwies sich über den gesamten Durchflussbereich als geeignete Referenz hinsichtlich der Messunsicherheit und wurde für die Versuche am H₂-Loop bei RWE als primäre Referenz für die Testzähler festgelegt. Der Turbinenradgaszähler wurde dabei erfolgreich zur Überwachung der Blendenmessstrecke eingesetzt.

Für den Aufbau in Lingen wurde in Zusammenarbeit mit der PTB ein Loop mit Ein- und Auslaufstrecken für die Referenzgeräte und Prüflinge konzipiert und realisiert (Abbildung III.3.13).



Abbildung III.3.13: Zählermessstrecke am H₂-Loop in Lingen

Insgesamt wurden drei Ultraschallgaszähler und zwei Turbinenradgaszähler für die Tests ausgewählt. Die Zähler wurden zunächst am pigsar-Prüfstand getestet und anschließend im H₂-Loop bei RMG unter realen Bedingungen mit Wasserstoff untersucht. Vor Ort wurde ein Datenerfassungssystem installiert, das alle relevanten Signale aufzeichnet und die notwendigen Umrechnungen vornimmt. Die Testzähler wurden bei einem Druck von etwa 34 bar und bei variierenden Durchflüssen zwischen 30 und 650 m³/h geprüft. Die Untersuchungen erstreckten sich über einen Zeitraum von vier bis acht Wochen und lieferten wichtige Erkenntnisse zur Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit von Gaszählern im Wasserstoffnetz. Die gewonnenen Daten bilden eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung und Zulassung eichfähiger Messgeräte für Wasserstoffanwendungen.

III.4 Arbeitspaket 4: H₂-Verträglichkeit von Werkstoffen

AP 4.1: Bewertung des Istzustandes des vorhandenen alten Systems.

Das AP 4 behandelte die H₂-Verträglichkeit von Werkstoffen aus vorhandenen Systemen, wie z.B. aus vorhandenen Erdgasleitungen, und sollte mögliche Einflüsse des vorherigen Betriebs auf das Werkstoffverhalten erfassen. Im AP 4.1 „Bewertung des Ist-Zustandes des vorhandenen alten Systems“ wurde eine GAP-Analyse durchgeführt, eine Roadmap erstellt und der erste Meilenstein in frühen Abschnitt des Projekts erreicht. Im Rahmen dieses Meilensteins wurden relevante Werkstoffe inkl. Liefervorschriften und anzuwendende Regelwerke und Normen identifiziert. Die erstellte Werkstoffliste wurde u.a. mit DVGW und OGE diskutiert und betriebsbeanspruchtes Rohrmaterial (gebrauchte Rohrstücke aus Erdgasleitungen) wurde aus verschiedenen Quellen eingesammelt. Am Ende standen für die Projektziele insgesamt vierzehn gebrauchte Rohrsegmente aus Erdgasleitungen zur Verfügung. Diese bestanden aus verschiedenen Werkstoffen und besaßen unterschiedliche Abmessungen, insbesondere hinsichtlich der Durchmesser und der vorliegenden Wandstärken.

Neben den zahlreichen Abstimmungen für die Planung, Konzipierung, Fertigung, Abnahme und Inbetriebnahme des Materialprüfstandes als Teil des Wasserstoffloops (Closed-Loop-System) wurden auch Themen des AP 2, durchgeführt von RWE Generation, fachlich unterstützt. Insbesondere die Umwidmung der DN100 Bestandsleitung ist in diesem Zusammenhang zu nennen. Zum Zeitpunkt der Projektdurchführung waren die erforderlichen Schritte für Umwidmungen von Bestandsleitung, z.B. Erdgasleitungen, für einen Wasserstoffbetrieb in keinem einheitlich oder klar beschriebenes Verfahren beschrieben. Vielmehr stellte der Umwidmungsvorgang eine von Bestandsregelwerken nicht ursprünglich vorgesehene Qualifizierung dar und erforderte somit einen umfangreichen und arbeitsintensiven Abstimmungsprozess zwischen der zugelassene Überwachungsstelle und den involvierten Parteien. Wie bereits im AP 2 beschrieben mussten u.a. Wandstärkenmessungen, eine Kamerabefahrung, eine Molchung der Leitung, eine Reinigung wegen des vorgefundenen „Black Powder“ (Quecksilber) und eine neue Druckprüfung nach DVGW-Regelwerk erfolgen. Unterstützung vom der RWE Power AG (AP 4) wurde bei der „Black Powder“ Problematik sowie mit dem ebenfalls erforderlichen Nachweis der mechanischen Eigenschaften des betriebs-beanspruchten Materials der Bestandsleitung geleistet. Für diesen Zweck wurden Segmente der Bestandsleitung entnommen und gemäß den Vorgaben der zugelassene Überwachungsstelle im Labor geprüft. Grundsätzlich ist die ursprüngliche Liefernorm der Bestandsleitung für die nachzuweisenden Anforderungen heranzuziehen.

AP 4.2 bis AP 4.4: In situ Versuche in der Teststrecke, werkstofftechnische Untersuchungen und begleitende wissenschaftliche Projektsteuerung

Die vorgeschriebene Vorgehensweise für die knapp 125 m lange Bestandsleitung (betriebsbeanspruchtes Material) stellte auch die Rahmenbedingungen für die Qualifizierung bzw. Umwidmung der gebrauchte Rohrsegmente für den Einsatz in Teststrecken des Materialprüfstands. Für das Projekt wurden somit viele der eben beschriebenen Qualifizierungsschritte und Nachweise, die für eine Umwidmung notwendig sind, für insgesamt fünfzehn Rohrsegmente (Bestandsleitung und vierzehn Rohrproben aus unterschiedlichen Quellen) umgesetzt werden. Dabei ergaben sich durch die verschiedenen vorliegenden Rohrtypen auch unterschiedliche Anforderungen bezüglich der zu erbringenden Nachweise, insbesondere der mechanischen Eigenschaften. Konkret sind diese Anforderungen aus den jeweiligen Produktnormen sowie aus gültigen Regelwerken zu entnehmen. Für die für das Vorhaben ausgewählten vierzehn Rohrsegmente waren Vorgaben aus fünf unterschiedlichen Produktnormen zu berücksichtigen, was einen erheblich höheren Abstimmungsbedarf und ausführlichere Prüfanweisungen erforderlich machten. Daher wären standardisierte Qualifizierungsrichtlinien für die Umwidmung von Bestandsleitungen vorteilhaft, da im Zweifel jeder Werkstoff- oder Chargenwechsel einen gesonderten Nachweis inkl. der mechanischen Eigenschaften erforderlich macht.

Die Vorbereitungen für AP 4.2 „In-situ-Versuche in der Teststrecke gemäß der entwickelten Roadmap“ und AP 4.3 „Werkstofftechnische Untersuchungen zur Auswertung der In-situ-Versuche“ beinhalteten die Konzipierung, d.h. Design und Auslegung von Teststrecken für den Einbau und Betrieb im TransHyDE GETH2-Loop am RWE-Standort Lingen sowie die erwähnte Qualifizierung der gebrauchten Werkstoffe. Von den ursprünglich vierzehn zur Verfügung stehenden Rohrsegmenten konnten lediglich acht Segmente für die Fertigung der Teststrecken genutzt bzw. berücksichtigt werden. Aufgrund der begrenzten verfügbaren Längen der nun für die Umwidmung qualifizierten Rohrsegmente musste das Design der Teststrecken inkl. der Werkstoffpaarung mehrfach revidiert werden (Abbildung III.4.1 und Abbildung III.4.2). Auch kurz vor der Fertigung stellte sich heraus, dass vorgesehene Werkstoffpaarungen formell nicht erlaubt waren, wodurch eine erneute Anpassung des

Designs notwendig wurde. Die Fertigung als solche wurde nach der Qualifizierung im Frühling 2025 veranlasst und erfolgreich inkl. der zerstörungsfreien Prüfungen sowie einer Druckprüfung bei 1,3x des Auslegungsdrucks abgeschlossen (Abbildung III.4.3). Letzte Prüfung fand in Anwesenheit des TÜV Nord statt.

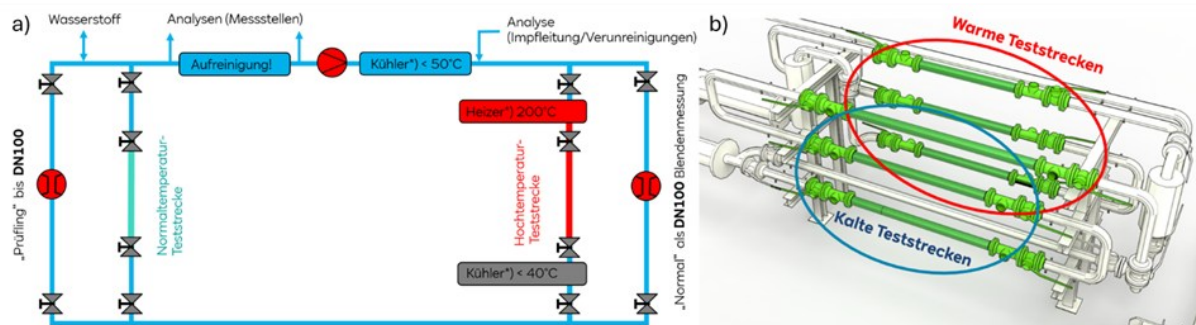


Abbildung III.4.1 a) Beispiel der ersten Rohrleitungs- und Instrumentenfließschemas (R&I) für die Integration des Materialprüfstands bzw. der Teststrecken; b) erste Entwürfe des Materialprüfstands mit jeweils drei warmen und kalten Teststrecken



Abbildung III.4.2: GETH2 TransHyDE -Loop Materialprüfstand mit sechs Passtücken im Betrieb vor Einbau der Teststrecken aus betriebsbeanspruchten Rohrsegmenten



Abbildung III.4.3: Eindrücke der Druckprüfung aller Teststrecken bei 1,5-fachen Betriebsdruck beim Fertiger in Anwesenheit des TÜV Nord und der RWE Power Qualitätssicherung. Alle Teststrecken erfüllten die Vorgaben für neues Material und haben die Druckprobe bestanden

Weitere Punkte beim Design der Teststrecken und der Begleitheizung (Meilenstein „Hochtemperatur Teststand“) waren die Besonderheiten des Installationsortes. Von den sechs Teststrecken sollten ursprünglich drei mit Temperaturen bis zu 200 °C betrieben werden. Aus näherer Betrachtung wurde deutlich, dass die gebrauchten Rohrsegmente keine Druckwasserstoffbeständigkeit (anfällig für HTTA - High Temperature Hydrogen Attack) oberhalb von ca. 160 °C aufwiesen. Der Installationsort der Teststrecken im Loop befand sich ferner innerhalb der Ex-Zone einer Gasumleitstation, was wiederum besondere Anforderungen an den Explosionsschutz der verwendeten Begleitheizung mit sich brachte. Auch hier musste ein nicht unerheblicher Abstimmungsaufwand und technische Prüfungen des Konzepts vorgenommen werden.

Die Teststrecken konnten schließlich in der zweiten Jahreshälfte 2025 am Materialprüfstand am GETH2 TransHyDE-Loop in Lingen installiert werden. Die installierten Teststrecken wurden einer erforderlichen Dichtheitsprüfung durch den TÜV Nord unterzogen, welche schließlich als Grundlage für die Inbetriebnahme der Teststrecken im Loop diente. Nach dieser Abnahme wurden die Teststrecken erstmalig mit Wasserstoff beaufschlagt.

Die Installation der Begleitheizung und erste Wasserstoff In-situ-Messungen (Referenzmessungen) fanden zeitnah an die Inbetriebnahme der Teststrecken statt. Ab diesem Zeitpunkt wurden in regelmäßigen Abständen die In-situ-Messungen durchgeführt sowie Proben für langsame Zugversuche (SSRT – Slow Strain Rate Test) und Wasserstoffanalysen entnommen. Ergänzend wurden im Labor die Wasserstoffpermeationskoeffizienten der betriebsbeanspruchten Werkstoffe bei Raumtemperatur und bei 70 °C ermittelt und auf dieser Basis die Koeffizienten bei 100 °C und 200 °C über Extrapolationen abgeschätzt. Diese Werte dienen der Abschätzung der minimalen Diffusionsdauer für die Wandstärken der unterschiedlichen Rohrsegmente, welche wiederum die Messintervalle für die In-situ-Wasserstoffmessungen mit der sogenannten „Local Hydrogen Analysis“ (LHA) der Ruhr-Universität Bochum bzw. Euro-Labor GmbH vorgeben (Abbildung III.4.4). Diese Methode erfasst den im Werkstoff gelösten Wasserstoff und im vorliegenden Projekt wurden die Messungen im laufenden Testbetrieb an den Rohraußenoberflächen durchgeführt, was wiederum eine Wasserstoffdiffusion durch die gesamte Rohrwand voraussetzt. Ziel der Untersuchungen war den Einfluss von betriebsbeanspruchten Rohrrinnen-Oberflächen auf die Wasserstoffaufnahme zu erfassen. Hiermit sollte ein Beitrag zur sicheren Umwidmung der Erdgasinfrastruktur zu Wasserstoffgasen geleistet werden.

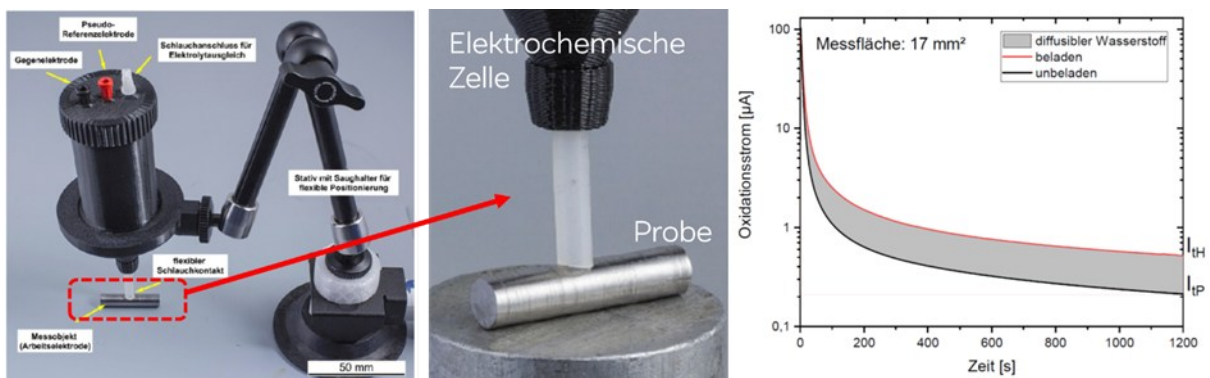


Abbildung III.4.4: Darstellung des Funktionsprinzips der In-situ-Wasserstoffmessungen mit der sogenannten „Local Hydrogen Analysis“ (LHA) der Ruhr-Universität Bochum. Links: verwendete elektrochemische Zellaufbau; rechts: Messkurven des Oxidationsstroms für einen Referenzzustand sowie von einem mit Wasserstoff beladenem Zustand

Letzte operative Hürden beinhalteten die Inbetriebnahme der Begleitheizung im beschriebenen Explosionsschutzumfeld, welches eine formelle Abnahme durch eine zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) erforderlich machte. Eine Inbetriebnahme wurde in KW 46/47 umgesetzt.

Unabhängig vom Zeitpunkt der Bereitstellung der Testumgebung (Inbetriebnahme des Loops AP 2) hat das Design, die Auslegung und die Fertigung der Teststrecken inkl. der erforderlichen Werkstoff- und Bauteilqualifizierung wesentlich mehr Zeit und Ressourcen in Anspruch genommen als ursprünglich geplant. Trotz aller Schwierigkeiten wurden Lösungen und Alternativen mit den involvierten Parteien erarbeitet und die wissenschaftliche Fragestellung weiter bedient. Die beschriebenen Arbeiten und Fragestellungen waren ein wesentlicher Bestandteil des AP 4.4 „Begleitende wissenschaftliche Untersuchungen und Projektsteuerung“. Alle im Projekt vorgesehenen Ziele konnten erreicht.

III.5 Arbeitspaket 5: Luftgestützte Wasserstoff-Ferndetektion (Hy2ReM)

AP 5.1: Theoretische Verfahrensevaluierung

Das Projekt begann im September 2021 mit der theoretischen Verfahrensevaluierung (AP 5.1) von drei auf Raman-Streuung basierenden Methoden, um ihre Eignung für die vorliegende Anwendung zu evaluieren. Dazu wurden umfangreiche Modellrechnungen unter Berücksichtigung potentieller Störeinflüsse durchgeführt. Außerdem flossen Erfahrungen von Adlares hinsichtlich der Betriebs-Randbedingungen für das luftgestützte LIDAR-System ein.

Aus den Modellrechnungen folgte, dass das SRGS-Verfahren (Stimulated Raman Gain Spectroscopy) in der geplanten Anwendung keine ausreichende Messempfindlichkeit besitzen würde. Auch das CARS-Verfahren (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) ist im geplanten Ferndetektionsverfahren nicht umsetzbar. In beiden Verfahren kann die notwendige Leistungsdichte der anregenden Laserstrahlung am Ort der Messung nicht erreicht werden. Infolge des Ausschlusses dieser Verfahren wurde das Messverfahren für die lineare Raman-Spektroskopie ausgelegt. Hierfür wurden bei Adlares Simulationen zur Statistik der detektierten Photonen und zu einer möglichen Leckdetektion unter Verwendung sogenannter Alarmschwellen implementiert.

Bei der Wahl der Wellenlänge des Lasers als Lichtquelle galt es neben den messtechnischen Eigenschaften auch die Lasersicherheit zu beachten, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich Personen im Messbereich des luftgestützten Verfahrens befinden. Das Messsystem muss weiterhin als luftgestütztes System bei Tageslicht betrieben werden. Eine Modellrechnung der vorliegenden Messkonfiguration mit gepulstem Laser ergab, dass die Wellenlänge des Lasers kleiner als 270 nm sein muss, sodass für die Wellenlänge des detektierten H₂-Raman-Signals $\lambda < 300$ nm folgt. In diesem Wellenlängenbereich ist das Tageslicht als Störquelle vernachlässigbar. Ein weiterer Vorteil einer kurzen Wellenlänge des Lasers ist die Skalierung der Raman-Streuquerschnitte mit λ^{-4} skaliert.

Ursprünglich wurde die Verwendung eines KrF-Excimer-Lasersystems mit einer Emissionswellenlänge 248 nm in Betracht gezogen. Durch die durch den Krieg in der Ukraine verursachte Verknappung des für den Betrieb des Lasers benötigten Puffergases Argon musste das Laserkonzept angepasst werden.

Aus einer Analyse der kommerziell erhältlichen Lasertypen haben sich zwei Festkörperlasertypen als geeignet ergeben: Fourth-harmonic Laser mit Nd:YAG als Lasermedium bei einer Emissionswellenlänge von 266 nm oder Laser mit Yb:YAG als aktivem Medium bei einer Emissionswellenlänge von 258 nm. Schlussendlich fiel die Wahl auf einen Fourth-Harmonic Nd:YAG-Laser mit einer Linienbreite von $\Delta\lambda < 50$ pm. Dieser Lasertyp ist in einem weiten Bereich von Ausgangsleistungen erhältlich und als Festkörperlaser auch im mobilen Einsatz stabil zu betreiben.

Aus den Modellrechnungen ergab sich weiterhin, dass es eine Überlagerung des Raman-Signals von Wasserdampf mit dem H₂-Raman-Signal gibt, die bei der Auswertung der Signale zu berücksichtigen ist (Abbildung III.5.1). Gleiches gilt potentiell für die Fluoreszenz des vom Laserstrahl getroffenen Bodenmaterials.

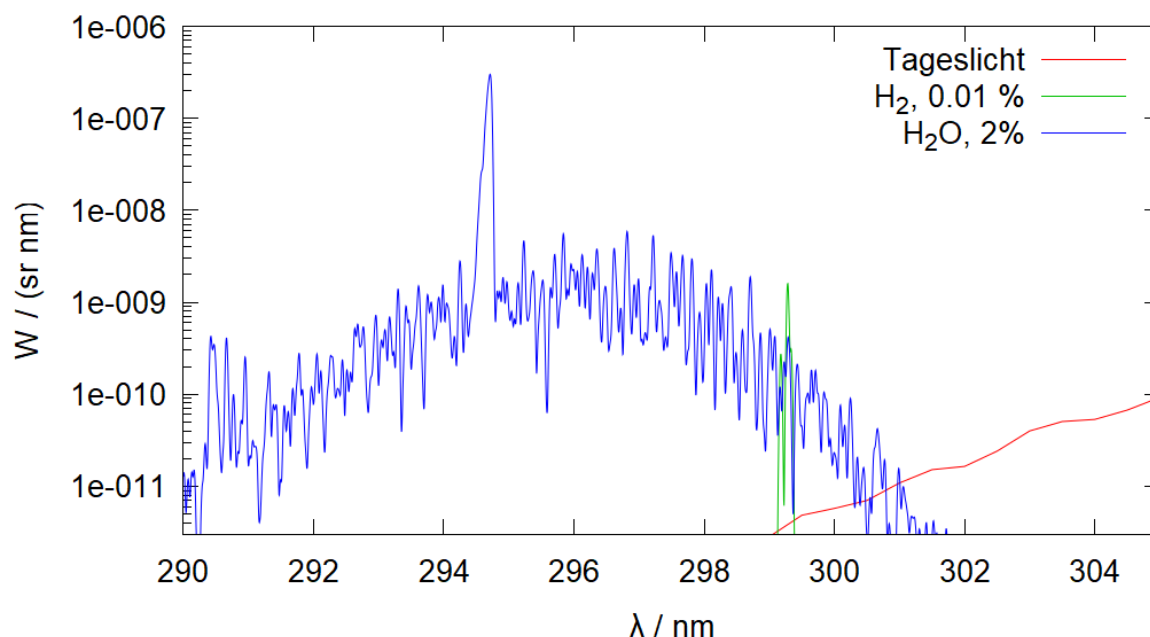


Abbildung III.5.1: Quantitativer Vergleich der berechneten Signale der Raman-Streuung von Wasserstoff (0.01 Vol. %) und Wasserdampf (2 Vol. %), sowie des Tageslichts.

Durch die Festlegung des Lasertyps und damit auch des Wellenlängenbereichs, in welchem die Detektion stattfindet, konnten weitere Kriterien und die Auslegung des Detektionssystems definiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Nutzung eines schmalbandigen Lasers und entsprechend schmalbandiger Detektion des H₂-Raman-Signals eine wesentliche Reduktion der Störsignale ergibt. Deshalb wird im H₂-Kanal des Detektionssystems ein Fabry-Pérot-Interferometer (FPI) verwendet. Im Vergleich zu Bandpassfiltern kann dadurch im vorliegenden Wellenlängenbereich um 300 nm die Bandbreite um mindestens eine Größenordnung auf $\Delta\lambda \approx 0.1$ nm reduziert werden.

Das berechnete H₂-Raman-Signal des Ferndetektionssystems erfordert im Minimalfall die Detektion einzelner Photonen und deren Mittelung über mehrere Laserpulse. Daher sind eine hohe Lichtausbeute und ein sehr geringes Eigenrauschen des Detektionssystems notwendig. Dementsprechend wurde das Detektionssystem als Filtersystem mit fünf Detektionskanälen konzipiert, die jeweils einen definierten Wellenlängenbereich mit einem PMT als Detektor erfassen. Für die Berücksichtigung, bzw. Korrektur von Störsignalen wird zum H₂-Raman-Signal zusätzlich die elastische Rückstreuung des Laserlichtes (Rayleigh-Streuung), die Raman-Streuung von Stickstoff und Wasserdampf und die Fluoreszenz vom Bodenmaterial gemessen. Der im Fall eines Pipeline-Lecks an der Bodenoberfläche austretende Wasserstoff befindet sich in einem vertikal begrenzten Bereich (< 1 m) über dieser, dementsprechend ist das H₂-Signal im LIDAR-System zeitlich begrenzt. Zur Reduktion von Störsignalen ist daher eine hohe Zeitauflösung der Detektion günstig, diese ist hauptsächlich von der Dauer des Laserpulses ($t_P \approx 5$ ns) und der Zeitauflösung der Messelektronik bestimmt.

Die grundsätzliche Konzeption des Systems ist festgelegt. Alle wesentlichen Verfahrenskenngrößen für den Aufbau des Laborfunktionsmusters wurden bestimmt.

AP 5.2: Aufbau und Tests Labor-Funktionsmuster

Zusätzlich zum im AP 5.1 konzipierten Detektionssystem wurde das LFM um ein Spektrometer erweitert, mit dem Fluoreszenzspektren von Bodenproben, sowie Raman-Spektren der relevanten Gase gemessen wurden.

Für die Messung von Raman-Spektren wurde eine Gaszelle mit Quarzglas-Fenstern verwendet. Die Strahlführung des Anregungslichts und des detektierten Signals erfolgte kollinear mittels eines Teleskops mit einem Arbeitsabstand von ungefähr 0.5 m. Die notwendigen H₂-Gasgemische wurden mit einem Gasmischer (Umwelttechnik MCZ GmbH, Bad Nauheim) aus einer 3 Vol% H₂-in-Luft-Mischung und Luft eingestellt. Das im LFM integrierte Spektrometer wurde bezüglich der Empfindlichkeit kalibriert, um Angaben zu Raman-Streuquerschnitten von Wasserdampf, Wasserstoff und Stickstoff zu verifizieren und um quantitative Aussagen zur Fluoreszenz von Bodenmaterialien zu gewinnen.

Für das LFM wurde eine kostengünstige Version des Fourth-Harmonic Solid-State-Nd:YAG-Lasers mit relativ kleiner Ausgangsleistung beschafft (Quantel Q-Smart 450, Wellenlänge 266 nm, Firma Lumibird GmbH, Köln) und in das Labor-funktionsmuster integriert. Ausgangsleistung, sowie Polarisationsgrad und Polarisationsrichtung des Laserstrahls wurden überprüft. Mit dem Laser konnten alle geplanten Messungen und Tests durchgeführt werden, sodass auf die Beschaffung eines zweiten Lasers mit größerer Ausgangsleistung verzichtet werden konnte.

Für die Kanäle des Detektionssystems wurden optische Filter und Strahlteiler zur spektralen Trennung von elastischer Streuung, Raman-Streuung (N₂, H₂O, H₂) und Fluoreszenz spezifiziert. Nach Evaluierung von Modellrechnungen von Filterherstellern wurden die Komponenten in Auftrag gegeben.

Nach einer Marktanalyse der verfügbaren Systeme wurden Photomultiplier und Messelektronik der Firma Licel GmbH, Berlin ausgewählt. Die Messelektronik enthält sowohl Zähler zur Einzelphotonendetektion als auch Transientenrekorder für Messungen im Analogmodus. Dadurch wird ein hoher Dynamikbereich der Detektion erreicht.

Das LFM wurde zunächst mit einem vorläufigen Detektionssystem ohne Fabry-Pérot-Interferometer (FPI) aufgebaut, mit diesem wurden das Filtersystem, die Detektoren und die Messelektronik ausführlich getestet. Die zweite Version des Detektionssystems (Abbildung III.5.2) enthielt das FPI (Light Machinery, Ottawa, Kanada). Diese wurde sowohl im LFM als auch im FFM verwendet.

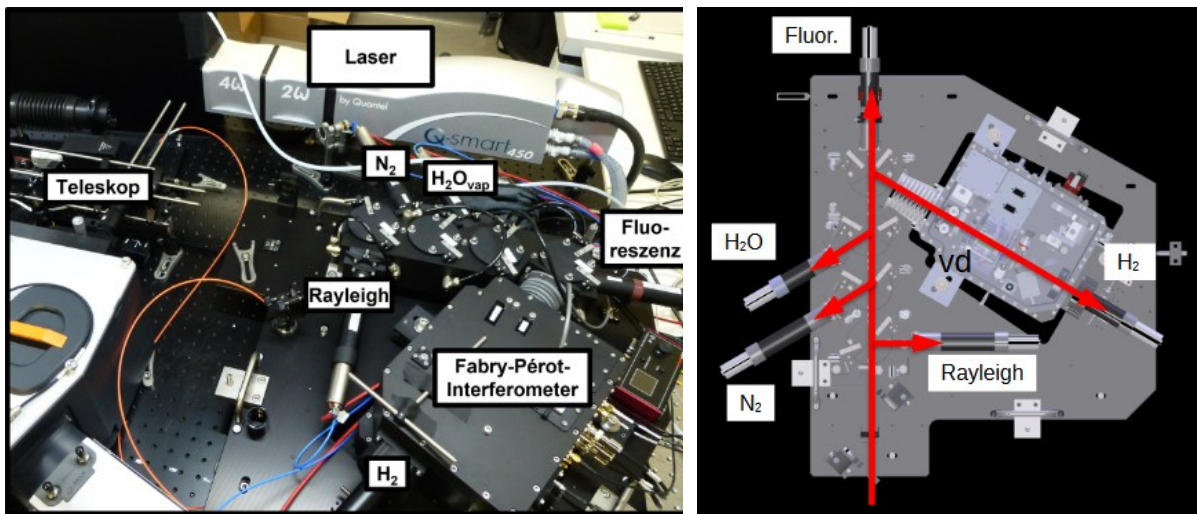


Abbildung III.5.2: Links: LFM, rechts: Detektionssystem. Die Detektionskanäle sind mit H₂, Fluoreszenz, H₂O, N₂, Rayleigh bezeichnet.

Nach der Installation der Gaszelle wurde der Gasmischer und dessen Steuersoftware in den Gesamtaufbau integriert. Damit war der Aufbau der Versorgung des LFM mit quantitativen Gasmischungen (Synth. Luft, Synth. Luft + 3 vol% H₂, Ar, N₂) abgeschlossen. Das Referenz-Raman-Spektrometer (Soliton Laser- und Messtechnik GmbH, Gilching) wurde mit einer zweiten Gaszelle in das LFM integriert (Abbildung III.5.3).

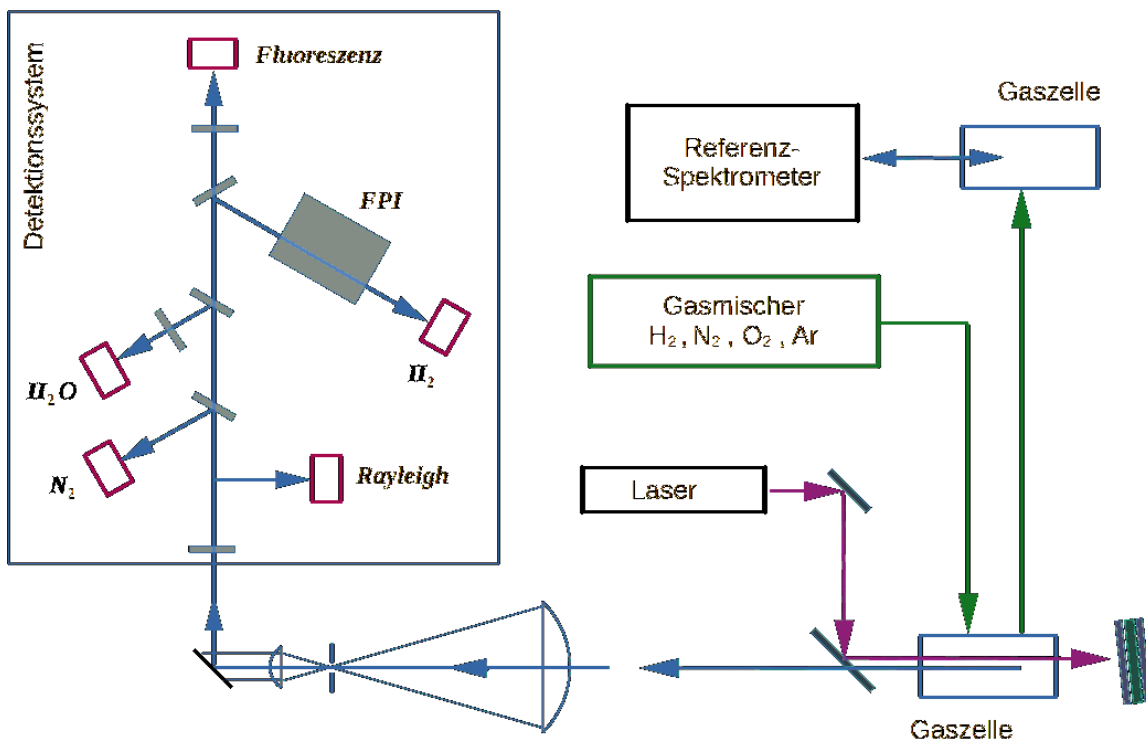


Abbildung III.5.3: Gesamtaufbau LFM mit Gassystem.

Tests und Messungen mit dem LFM, sowie die Analyse der gewonnenen Messdaten, wurden erfolgreich abgeschlossen. Dies beinhaltete Messungen zur Bestimmung des Dunkelstroms und Zeitverhaltens der PMTs, die Charakterisierung des UV-Laserlichts, und Messungen zum Zeitverhalten der Messelektronik. Quantitative Messungen der Raman-Streuung an den Referenzgasen und die Kalibration des Messaufbaus wurden abgeschlossen. Proben von Bodenmaterialien wurden bezüglich ihrer Fluoreszenz mit dem LFM quantitativ charakterisiert. Dabei wurde die Oberfläche der Proben mit dem Laser des LFM bestrahlt, die resultierende Floreszenz mit dem Spektrometer erfasst (Abbildung III.5.4, Abbildung III.5.5). Proben von Ackerböden wurden von der LUFA Nord-West (Institut für Düngemittel und Saatgut, Hameln) zur Verfügung gestellt.

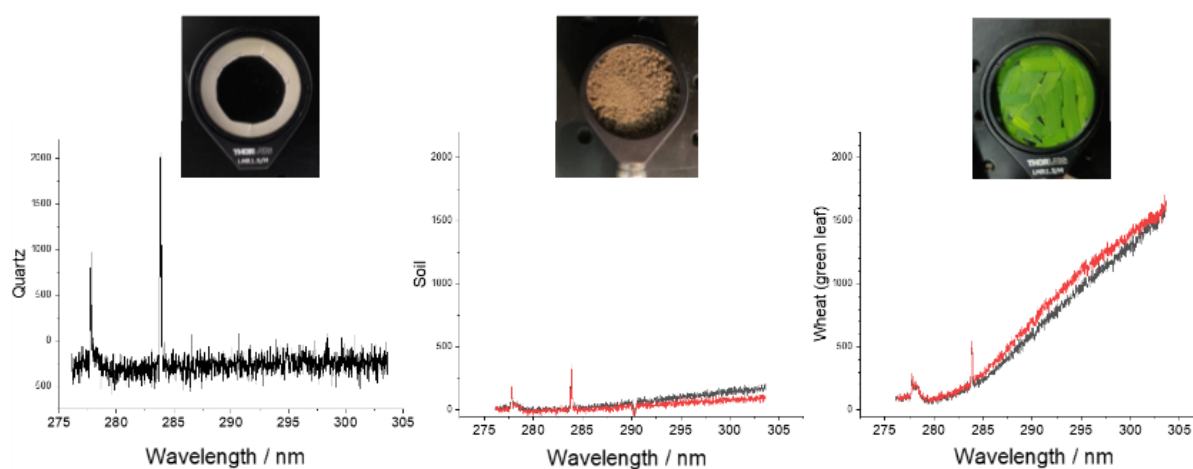


Abbildung III.5.4: Fluoreszenz-Emissionsspektren von Quarzglas (links), Sandboden (mitte) und Weizenblättern (rechts).

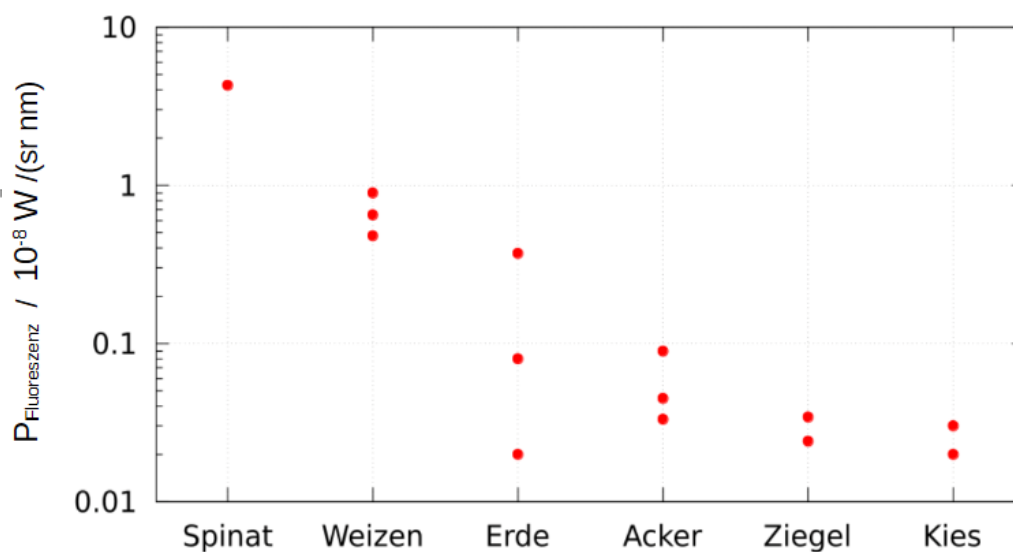


Abbildung III.5.5: Spektrale Strahlungsstärke $[W/(\text{sr nm})]$ der Fluoreszenz von Bodenmaterialien bei Emissionswellenlänge $\lambda_{em} = 300 \text{ nm}$, Anregung mit $\lambda_{ex} = 266 \text{ nm}$, Anregungsleistung $P_{\text{Laser}} = 1 \text{ W}$.

AP 5.3: Aufbau eines Feld-Funktionsmusters und Durchführung von Feldtests

Das Feldfunktionsmuster (FFM) stellt die Übergangsstufe zwischen einer Validierung des Messprinzips im Labor und der realen Anwendung des LIDAR-basierten Wasserstoff-Ferndetektionsverfahrens dar. Während das LFM den Nachweis der Messmethode unter kontrollierten Laborbedingungen erbrachte, ist das FFM darauf ausgelegt, das Verfahren unter realistischen Umweltbedingungen (z.B. Temperaturfluktuationen der Atmosphäre, Streulicht, Fluoreszenz, Tageslicht, Wind) mit skalierter Laserleistung und LIDAR-Geometrie in einem mobilen, autarken Messsystem zu demonstrieren und damit die Voraussetzungen für zukünftige luftgestützte Einsätze zu schaffen. Das FFM ist somit kein bloßes Upscale des LFM, sondern ein systemisch neues Gesamtsystem, in dem Optik, Mechanik, Laser, Detektion, Software, Energieversorgung und Sicherheitskonzepte erstmals vollständig integriert werden.

Das FFM wurde von Beginn an als mobiles LIDAR-System in einem Messanhänger konzipiert, um Feldversuche durchzuführen. Die Systemarchitektur umfasst als Hauptkomponenten ein Hochleistungs-UV-Lasersystem (FHG-Nd:YAG, 266 nm), die Sendestrahloptik mit definierter Divergenz und Strahlformung, das Sende- und Empfangsperiskop zur Strahlführung außerhalb des Messanhängers mit großem Aperturdurchmesser, die Detektionseinheit, Mess- und Steuersoftware sowie die mobile Infrastruktur (Messanhänger mit Klimatisierung sowie Energieeinspeisung und -versorgung).

Auf dem Weg zum Hauptergebnis des Projekts- dem vollständig funktionstüchtigen und einsatzbereiten Messsystem und dem damit durchgeführten erfolgreichen Feldtest- wurden in Teilstufen wichtige Nebenergebnisse gesichert, welche die Funktion, der das Messsystem konstituierenden Baugruppen sicherstellen. In umfangreichen unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführte Modultests an der Universität Potsdam und bei Adlares wurden einerseits für Tests Komponenten des FFM in das LFM integriert, andererseits bereits fertiggestellte größere Baugruppen getestet (Abbildung III.5.6). Die hierbei gewonnene zentrale Erkenntnis ist, dass sich keines der entwickelten Baugruppenkonzepte als unhaltbar erwies, womit der Weg zur vollständigen Integration des Messsystems offenstand.

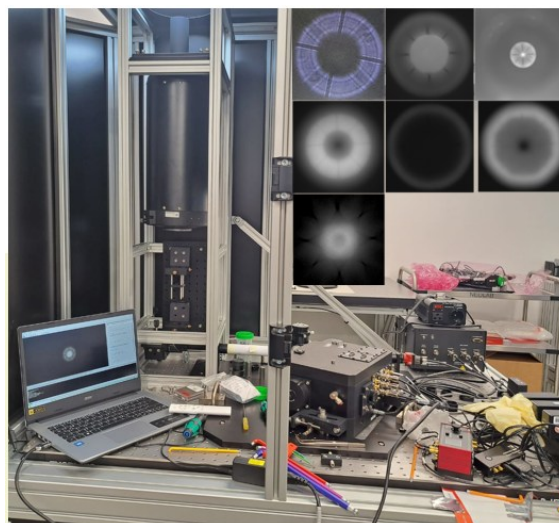


Abbildung III.5.6: Baugruppen-Funktionstest der vollständigen Empfangseinheit des FFM im Adlares Entwicklungslabor zur Überprüfung der kollinearen Lichtausbreitung im Messsystem.

Die durchgeführten konzeptionellen und konstruktiven Arbeiten und die abschließenden Montagearbeiten mündeten in das funktionstüchtige und einsatzbereite FFM und den auf dem OGE-Testfeld in Emsbüren durchgeführten ersten Feldtest. Abbildung III.5.7 zeigt auf der linken Seite die Systemkomponenten kurz nach dem Einbau in den Anhänger. Auf der rechten Seite ist eine Außenansicht des vollständig aufgebauten und funktionstüchtigen FFM zu sehen. Im Folgenden werden einige ausgewählte Aspekte des FFM-Aufbaus exemplarisch näher betrachtet.



Abbildung III.5.7: Links: Module des Messsystems kurz nach dem Einbau in den Anhänger. Rechts: Vollständiges Messsystem kurz vor der ersten vollständigen Inbetriebnahme auf dem OGE-Testfeld in Emsbüren.

Während der Konzeptionsphase wurden die in AP 5.1 und AP 5.2 gewonnenen Ergebnisse verwendet, um als Input für optische Simulationen grundlegende Systemeigenschaften des FFM offenzulegen. Damit konnten erste Simulationen zu den in den Messungen erwarteten Signalen durchgeführt und Querempfindlichkeiten der Wasserstoff-Messungen und parasitärer Signale wie z.B. von Wasserdampf abgeschätzt werden. Mit Berechnungen des Dampfdrucks von Wasser nach Huang [8] wurde so der Einfluss des Wetters (Temperatur, Luftfeuchte) auf die Messergebnisse abgeschätzt. In Abbildung III.5.8 ist auf der linken Seite der absolute Wassergehalt der Atmosphäre als Funktion der Temperatur für verschiedene relative Luftfeuchten gezeigt. Auf der rechten Seite sind Simulationsergebnisse zum Limit-Of-Detection (LOD) des FFM als Funktion der Messzeit für verschiedene Temperaturen gezeigt.

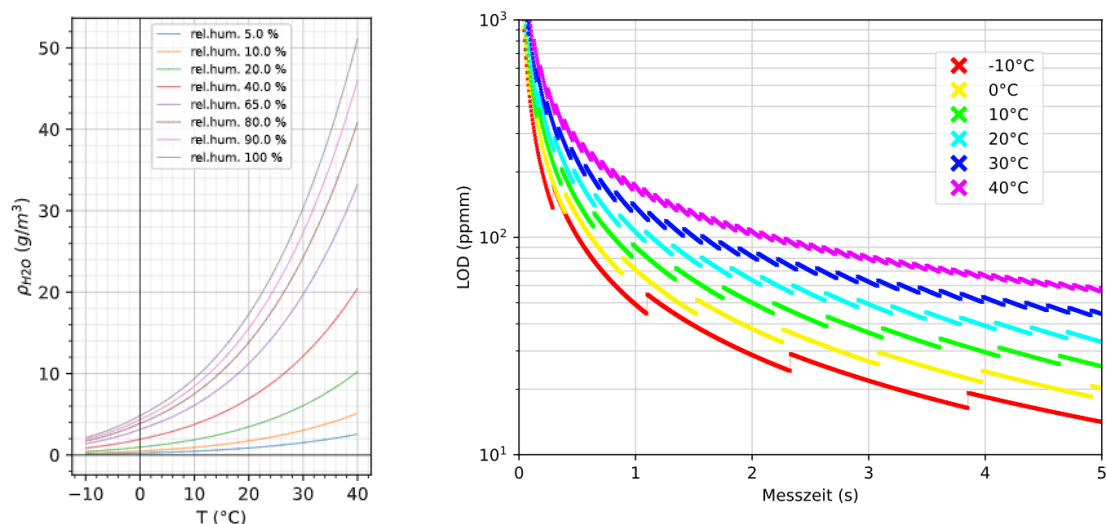


Abbildung III.5.8: Links: Wassergehalt der Atmosphäre als Funktion der Temperatur für verschiedene relative Luftfeuchten nach Huang [7]. Rechts: Simulation des Limit-Of-Detection (LOD) des Messsystems als Funktion der Messzeit für verschiedene Lufttemperaturen bei 60 % rel. Luftfeuchte.

Weiterhin wurde aus den Simulationen zur Optik die Spezifikation für die mechanische Konstruktion des FFM abgeleitet.

Mit dem Optikdesign der Empfangseinheit konnten auch die Parameter der Sendestrahlinreinigung definiert und deren Aufbau, also Abstände und Winkel und Auslegung der optischen Komponenten, detailliert festgelegt werden. Bedingt durch die Architektur des FHG-Lasersystems mussten zunächst residuale spektrale Anteile der Nd:YAG-Fundamentalen und der SHG aus dem FHG-Laserlicht entfernt werden. Dazu wurden bei Adlares nach umfangreichen Berechnungen und der daraus abgeleiteten Strahlgeometrie in Laborexperimenten zunächst optische Komponenten getestet und später in das Messsystem integriert. Abbildung III.5.9 zeigt auf der linken Seite der Abbildung die Strahlreinigung und den Strahlengang des Strahlanalysesetups schematisch, während rechts der reale Aufbau gezeigt ist. Auf Basis der Simulationen der Detektionsoptik wurden Spezifikationen für die Sendestrahloptik und Strahldivergenz berechnet und später die betreffenden Komponenten im Messaufbau integriert.

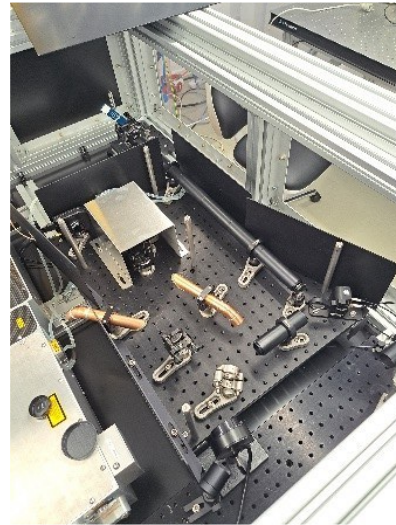
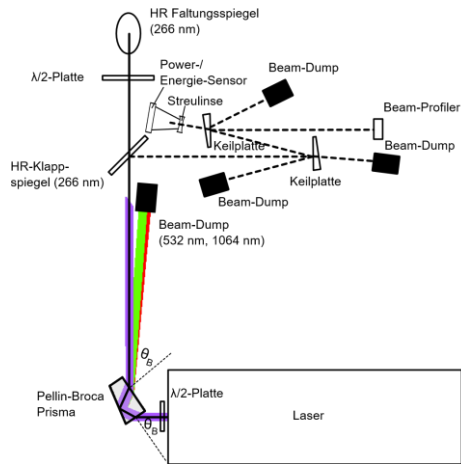


Abbildung III.5.9: Links: Schema der Strahlreinigung des FHG-Lasersystems und des im Aufbau verwendeten Strahlanalyse-Setups. Rechts: Strahlreinigung im FFM.

Das FFM wurde als kollineares LIDAR konzipiert, so dass Sende- und Empfangsstrahlengang entlang der Strahlachse immer einen Überlapp zeigen. Um gezielt verschiedene Punkte im Messfeld anfahren zu können, wurde ein Periskop in den Aufbau integriert, durch welches sowohl Sende- als auch Empfangsstrahl geführt werden. Bedingt durch die Strahldurchmesser von Sende- und Empfangsstrahl müssen im Periskop große Optiken eingesetzt werden. Weiterhin spielte bei der Auslegung dieser Optiken die unterschiedliche Intensität von Sende- und Empfangsstrahl eine Rolle, so dass ein Zwei-Zonen-Design dieser Optiken realisiert wurde. Aus dem Optikdesign wurde, wie auch im Fall von Empfangs- und Sendestrahlengang, das mechanische Konzept abgeleitet und in mehreren Designstufen zur Fertigungsreife entwickelt. Abbildung III.5.10 zeigt zwei Schritte aus dem Designprozess des Periskops. Auf der linken Seite der Abbildung ist das Streuverhalten des Sendestrahls beim Durchlaufen des Periskops gezeigt, auf der rechten Seite ein CAD-Entwurf der Periskopbaugruppe. In violett gehalten sind Komponenten des Periskopantriebs zu sehen.

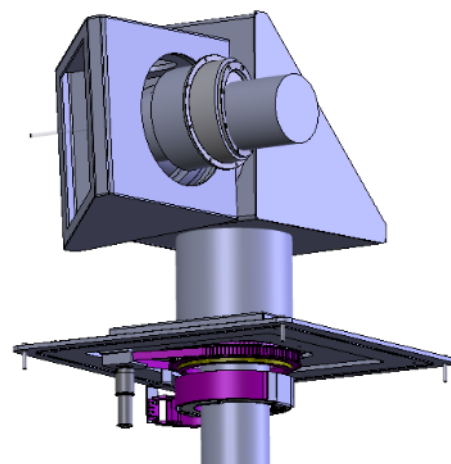
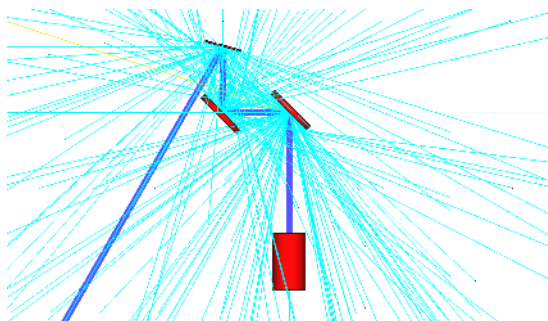


Abbildung III.5.10: Links: Simulation zum Streuverhalten des Sendestrahls an den optischen Flächen des Periskops. Rechts: Teil eines CAD-Entwurfs zum Periskop des Messaufbaus.

Ähnlich zum Vorgehen bei Sende- und Empfangsstrahl wurde auch die optische Mehrkanal-Detektionseinheit des Messsystems entwickelt. Hier lag der Fokus insbesondere auf der mechanischen Integration des als Ultraschmalbandfilter eingesetzten Fabry-Pérot-Interferometers (FPI), für welches ein Haltekonzept erarbeitet werden musste. Die Qualität der Filterwirkung des FPI wird vor allem durch die außerordentliche Materialqualität der optischen Flächen beeinflusst. Dabei können schon kleinste durch die mechanische Halterung induzierte Verspannungen der FPI-Komponenten eine Welligkeit in den optischen Flächen des Interferometers erzeugen, womit ein Verlust der Güte des Instruments verbunden ist. Aus diesem Grund wurden diverse Halterungskonzepte über FEM-Simulationen bewertet und schließlich das mechanische Design der Halterung für eine optimale Funktionalität des FPI angepasst. Abbildung III.5.11 zeigt exemplarisch eine FEM-Simulation des FPI unter axialer äußerer Krafteinwirkung und den CAD-Entwurf eines Halters für das Interferometer.

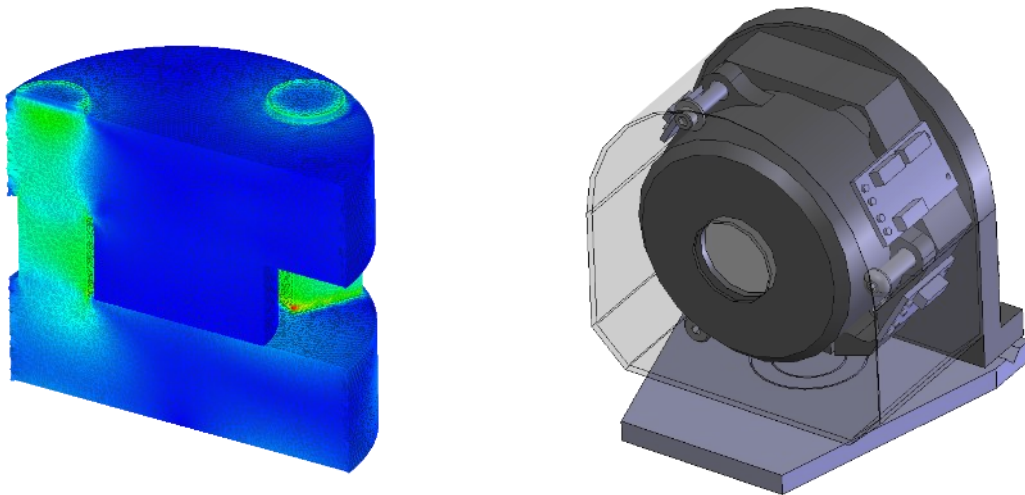


Abbildung III.5.11: Links: FEM-Simulation der Verspannung im Interferometer für ein Haltekonzept. Rechts: CAD-Modell eines Haltekonzepts für das Interferometer.

Schlussendlich wurden alle CAD-Komponenten des Messsystems zusammengeführt, erneut geprüft und gefertigt. Abbildung III.5.12 zeigt auf der linken Seite ein CAD-Modell der assemblierten Kernbaugruppen des Messsystems, hier noch ohne das weiter oben beschriebene Periskop. Auf der rechten Seite ist die physische Entsprechung der auf der linken Seite der Abbildung dargestellten Baugruppen gezeigt. Viele der Komponenten des Aufbaus werden über verschiedene Schnittstellenformate über Hardware-Software-Interfaces ausgelesen und angesteuert, so dass neben allen physikalisch-ingenieurstechnischen und konstruktiven Entwicklungen auch ein Entwicklungsbedarf für Softwarekomponenten bestand. In dem in Abbildung III.5.12 gezeigten Entwicklungsstand wurden die ersten Kalibrier- und Justagearbeiten an den Kernkomponenten des Systems durchgeführt.



Abbildung III.5.12: Links: CAD-Modell der Kernbaugruppen des Messsystems (unten, grün: Lasersystem, auf dem Tisch: Empfangs- und Sendeeinheit (senkrecht) und Spektralapparat (flach)). Rechts: Physischer Aufbau des Messsystems mit Steuerrechner und Datenerfassungssystem.

Abbildung III.5.13 zeigt auf der linken Seite einen CAD-Entwurf des Messanhängers. Auf der rechten Seite der Abbildung ist der voll ausgebaute und funktionstüchtige Anhänger während der Feldversuche auf dem OGE Testfeld in Emsbüren im Dezember 2025 zu sehen. Während des Designprozesses des Messanhängers mussten die für die jeweiligen Betriebszustände des Messsystems (Lagerung, Transport, Messung) notwendigen infrastrukturellen Rahmenbedingungen jederzeit berücksichtigt werden. Dazu zählen z.B. die Stromversorgung während der Überführungsfahrten oder die Aufrechterhaltung der Luftfeuchte innerhalb des Systems in engen Grenzen, zum Schutz des sensiblen Messequipments, über eine in-house konzipierte und gefertigte und auf die speziellen Rahmen- und Betriebsbedingungen zugeschnittene Trocknungsanlage. Zur Erfüllung gängiger Sicherheitsrichtlinien wurde ein Gutachten von Sachverständigen des TÜV erstellt und es erfolgte eine offizielle TÜV-Abnahme des Anhängers.

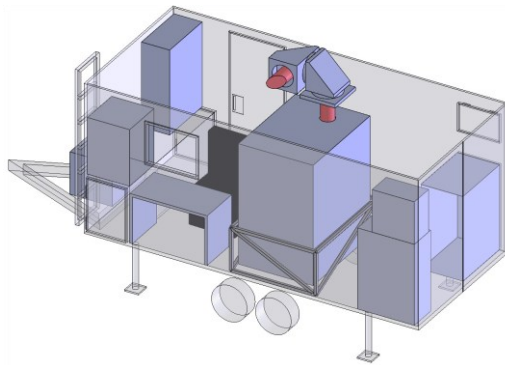


Abbildung III.5.13: Links: CAD-Entwurf des kompletten Messsystems. Rechts: Voll integrierter und funktionstüchtiger Messanhänger auf dem OGE-Testfeld in Emsbüren.

Ein wichtiger Aspekt bei der Planung war auch die Erfüllung von Arbeits- und Sicherheitsrichtlinien, was Warn- und Signalmittel für die durchgeführten und zukünftige Feldversuche ebenso beinhaltet, wie die Auswahl geeigneter Persönlicher Schutzausrüstung, Berechnungen zu Strahl-Expositionszeiten, Schutzmaßnahmen gegen Streulicht und die Ausarbeitung eines Sicherheitskonzepts für Feldversuche auf Basis von Sicherheitsstandards wie DIN EN 60825-1, DIN EN 207 und der Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS Laserstrahlung).

AP 5.4: Konzeption des fliegenden Systems

Für die Konzeption des fliegenden Systems wurden im Wesentlichen konzeptionelle, analytische und vergleichende Arbeiten durchgeführt. Für die Konzeption sind dies vor allem physikalische Modellierung und simulationsgestützte Abschätzungen, Technologie- und Fluggerätevergleiche sowie die Übertragung vorhandener praktischer Erfahrungen auf potenzielle Eigenschaften eines luftgestützten Ferndetektionssystems für molekularen Wasserstoff. Die bearbeiteten Themenkomplexe in der Konzeption sind die Missions- und Einsatzbedingungen, Berechnungen zur potenziell notwendigen Lasertechnik, deren Infrastruktur und Sicherheit, Themen zum Detektionssystem und die Integration eines potenziellen Messsystems in einen Flächenflieger, wobei speziell Themen wie Modularität des Messsystems sowie der Ein- und Ausbau der Messgerätekomponten in das Fluggerät bearbeitet wurden.

Unabhängig von der gegenwärtigen Verfügbarkeit eines für die Wasserstoffferndetektion nutzbaren Lasersystems konnten generelle Untersuchungen zu Aspekten der Lasersicherheit durchgeführt werden, deren Ergebnisse bei der Wahl von Laser- und Scanner-Betriebsparametern in einem zukünftigen luftgestützten Messsystem berücksichtigt werden müssen (Abbildung III.5.14).

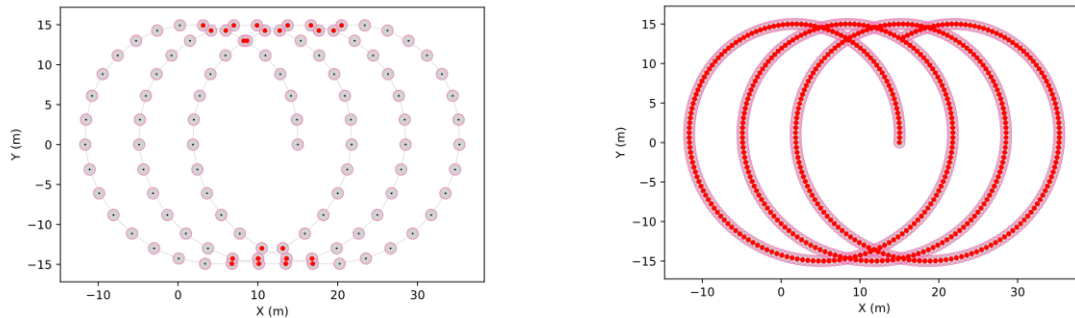


Abbildung III.5.14: Simulationen zur Lasersicherheit eines potenziellen luftgestützten wasserstoff-sensitiven Raman-LIDARS. Die Abbildung zeigt die durch einen rotierenden Laserscanner und einen Laser im Impulsbetrieb erzeugten Muster auf dem Boden unter einem sich vorwärtsbewegenden Luftfahrzeug (Vorwärtsbewegung in X-Richtung). In beiden Fällen wurde eine Vorwärtsgeschwindigkeit des Fluggerätes von 87 kts über Grund angenommen. In beiden Fällen wurde der gleiche Radius des Scanner-Kreises und die gleiche Scanner-Winkelgeschwindigkeit gewählt. Rote Punkte markieren überlappende Laserspots. Links: Repetitionsrate des Lasersystems bei 200 s⁻¹, Rechts: Repetitionsrate des Lasersystems bei 1000 s⁻¹.

Ebenfalls unabhängig von der Verfügbarkeit eines geeigneten Lasersystems wurde auf Erfahrungswerten basierend ein Integrationskonzept in ein Fluggerät entwickelt, wobei hier das Augenmerk auf einer sinnvollen Modularisierung des Messsystems und auf Be- und Entladekonzepten in das bzw. aus dem Fluggerät gelegt wurde. In Abbildung III.5.15 ist exemplarisch ein Flugzeug in der betriebswirtschaftlich abbildbaren Größenklasse gezeigt. Rechts daneben ist ein erstes Beladekonzept eines modularisierten Wasserstoff-LIDARS zu sehen, während unten im Bild ein Integrationskonzept des Messsystems in das FWA zu sehen ist.

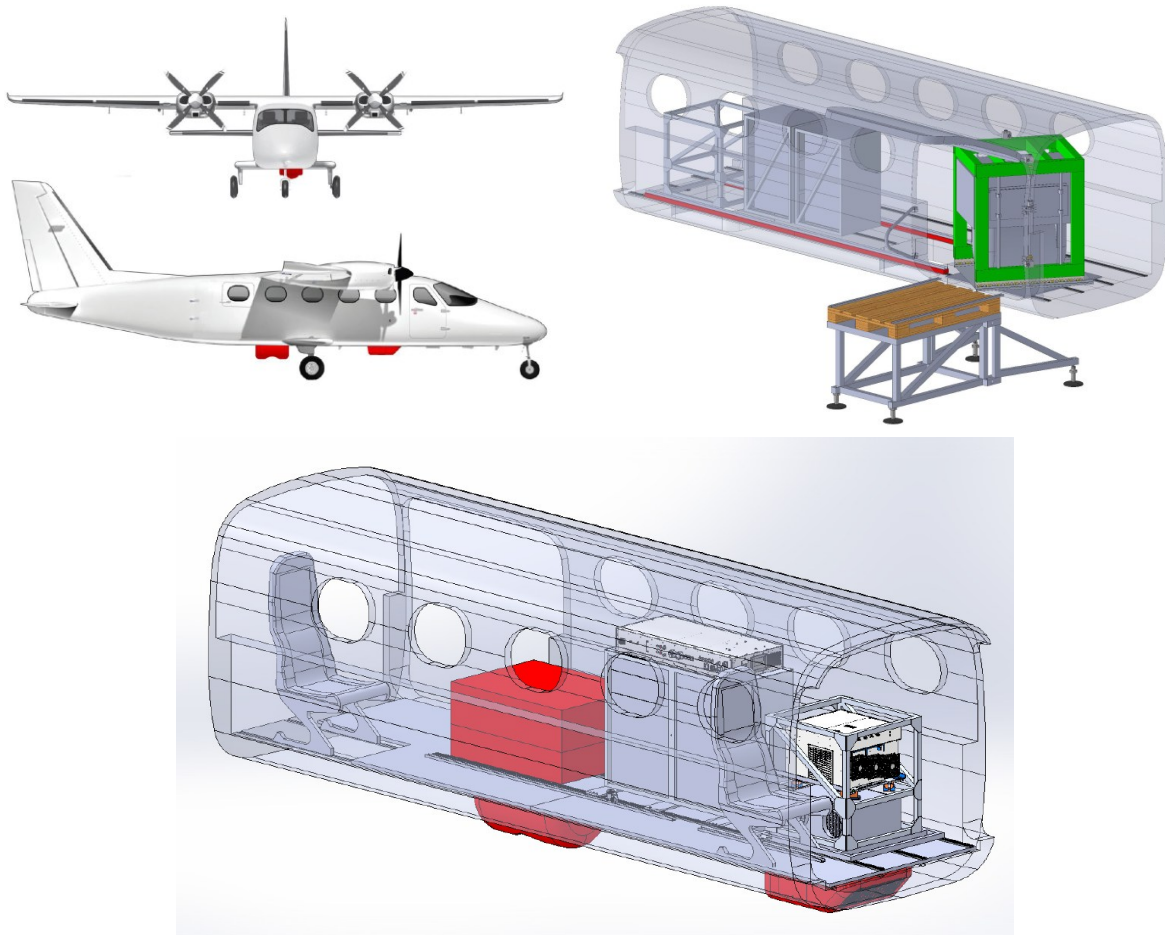


Abbildung III.5.15: *Oben links: FWA in der betriebswirtschaftlich abbildbaren Größenklasse. Oben rechts: Erster Entwurf eines Beladekonzepts für ein hypothetisches modularisiertes Wasserstoff-Raman-Messsystem. Unten: Laser-Tonnen-Scanner (rot, zentral), modulares Messsystem mit Energieverteilung, Infrastrukturkomponenten des Lasers (Netzteil und Kühler) und zusätzlicher Ram-Air-Einströmöffnung (rot, unten rechts).*

III.6 Arbeitspaket 6: Intelligente Molchung

Das Arbeitspaket 6 verfolgte das Ziel, einen Molch zu entwickeln, der unter Wasserstoffatmosphäre in der Gashochdruckleitung 43 betrieben werden kann und vergleichbare Integritätsinformationen liefert wie eine Ultraschallmolchung, welche insbesondere Risse und rissartige Fehlerbilder detektiert.

Die Umsetzung erfolgte in vier Teilaufgaben: Nullmolchung (AP 6.1), Entwicklung des H₂-Testmolchs (AP 6.2), Vorbereitung der Leitung für die H₂-Molchung (AP 6.3) sowie die geplante Referenzmolchung im H₂-Strom (AP 6.4). Hierbei wurde das AP 6.2 durch die Firma Rosen aus Lingen durchgeführt und entsprechend in diesem Sachbericht dokumentiert. In regelmäßigen Abständen fanden zu den Arbeitspaketen Abstimmungstermine statt um sich gegenseitig über den aktuellen Stand zu berichten.

Teil dieser Abstimmungsrunden waren neben der Nowega und Rosen auch Mitarbeiter der Evonik und der OGE um mit Ihrem Fachwissen wichtige Aspekte mit in die Entwicklung des Molches und die Umstellung einer Erdgasleitung auf Wasserstoff zu liefern.

III.6.1 Durchführung einer Nullmolchung

Gemäß der ursprünglichen Zielsetzung des Teilvorhabens „Intelligente Molchung“ bestand eine zentrale Anforderung darin, eine belastbare Referenzmolchung für die spätere Bewertung der Leitung 43 unter Wasserstoffbetrieb zu schaffen. Hintergrund war die wissenschaftlich begründete Annahme, dass der Wasserstoff in Stahlleitungen bestehende Materialinhomogenitäten oder Mikrorisse beeinflussen können. Vor diesem Hintergrund wurde die Nullmolchung konzeptionell als wesentlicher Bestandteil des Validierungskonzeptes definiert.

Die längsnahtgeschweißte Gastransportleitung Nr. 43 wurde 1996 errichtet, besitzt einen Nennweite von DN 250 und eine Wandstärke von 7,10 mm. Die Leitung ist für einen maximalen Betriebsdruck von 70 bar zugelassen und weist einen Auslegungsdruck von 100 bar auf. Weitere technische Details sind der Tabelle III.6.1 zu entnehmen.

Tabelle III.6.1: Technische Daten Leitung 43

Leitungs-Nr.	43
Leitungsbezeichnung	ERE Lingen
Abschnitte Molchung	Schepsdorf – Holthausen II
Regelwerk	GasHDrLtgV (Verordnung über Gashochdruckleitungen)
Baujahr	1996
Medium	Süßgas
Länge	ca. 10,94 km
Inhalt	575,07 m ³
Werkstoff	STE 360.7
Auslegungsdruck (DP)	100 bar
Max. zul. Betriebsdruck (MOP)	70 bar
Nennweite	DN 250 (10")
Außendurchmesser	273,0 mm
Wanddicke (Normalrohr)	7,10 mm
Wanddicke(verstärkt, Bogen)	273,0 x 8,0 mm
kleinster Innendurchmesser	250 mm (T-Stück)
kleinster Bogenradius	4000 mm
Rohrtyp	längsnahtgeschweißt
Innenbeschichtung d. Rohre	Nicht vorhanden
Außenbeschichtung d. Rohre	PE
Molchleitbleche in T-Stücken	Vorhanden

Die Gasleitung verläuft westlich von Lingen (Emsland) von der Station Holthausen II über insgesamt 10,94 Kilometer Länge in Richtung Süden zur Station Schepsdorf, vgl. Abbildung III.6.1. Auf ca. halber Leitungslänge befindet sich die Leitungsstation Lingen West. Diese Station ist nicht mehr im Betrieb und soll für die Molchung im H₂-Strom zurückgebaut werden. Der Aufführungspunkt der Leitung 43 auf der Station Schepsdorf stellt gleichzeitig den Endpunkt dieser Leitung dar. Eine physische Verbindung zum nachgelagerten Transportsystem besteht an dieser Stelle derzeit nicht. Am

nördlichsten Punkt der Leitung 43, auf der Station Holthausen II, schließt Sie an das bestehende H-Gassystem zur Versorgung der BP ERE Lingen an.

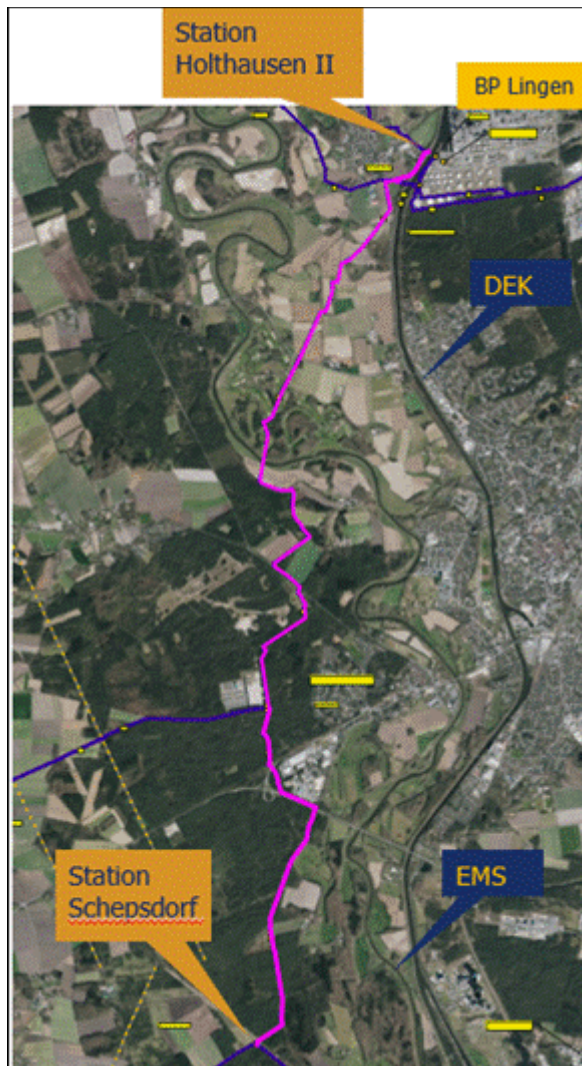


Abbildung III.6.1: Übersicht Leitung 43

Die Leitung 43 der Nowega wurde aufgrund Ihrer Dimension, der ausreichenden Leitungslänge sowie der vom Gasversorgungssystem zu trennenden Möglichkeiten für dieses Arbeitspaket ausgewählt, da diese Umstände hervorragende Bedingungen für eine H₂-Testmolchung bietet.

Im Jahr 2021 wurde dann die Leitung erfolgreich aus dem Erdgassystem gelöst und somit für die bevorstehende Molchung und anschließende Umstellung auf Wasserstoff vorbereitet.

Die gewonnenen Molchdaten wurden vollständig ausgewertet und bilden die Referenzbasis für die spätere Vergleichsmolchung im Wasserstoffbetrieb (AP 6.4).

Als Untersuchungsverfahren wurde das Ultraschallverfahren (vgl. Abbildung III.6.2) eingesetzt, da dieses eine besonders hohe Auflösung bei der Detektion von Fehlstellen in der Leitung bietet. Insbesondere Risse, die nach aktuellem Stand der Technik den größten Einfluss auf den Betrieb unter Wasserstoffatmosphäre haben, sollten hiermit zuverlässig detektiert werden. Der Analyseumfang des

Molches umfasste die Inspektion der Wanddickenminderungen sowie Längsrisse ab einer Tiefe von 2 mm und einer Länge von 25 mm. Ab dieser Größenordnung ist unter Berücksichtigung der technischen Parameter der Gashochdruckleitung 43 von einem möglichen initialen Risswachstum unter Wasserstoffeinfluss auszugehen.

Für die Erfassung der Wanddickenminderungen sowie der Längsrisse wurden zwei verschiedene Molchtechnologien eingesetzt, welche beide auf den Ultraschallprinzip beruhen.

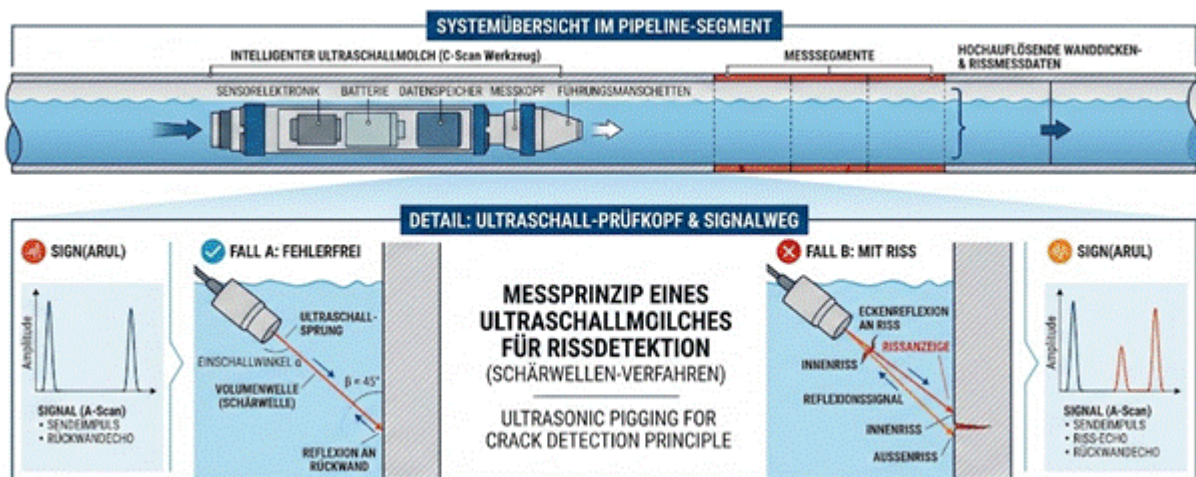


Abbildung III.6.2: Messprinzip Ultraschallmolch

Da sowohl die Ultraschalltechnologie als auch die EMAT-Technologie sensitiv auf Verunreinigungen an der Rohrwandung reagiert, wurde eine hydromechanische Reinigung durchgeführt, um Ablagerungen und Kohlenwasserstoffreste signifikant zu reduzieren. Dies dient sowohl der Verbesserung der Messsignalstabilität als auch der Sicherstellung der hohen Anforderungen der zukünftigen Reinheit des Wasserstoffes.

Die Molchrichtung erfolgte entsprechend der wasserwirtschaftlichen Randbedingungen von der Startstation Holthausen II bis zur Zielstation Schepsdorf.

Der Aufführungspunkt der Leitung 43 wurde mit einer temporären Sendeschleuse versehen, welche vor dem vorhandenen Kugelhahn gesetzt wurde. Zudem gibt es drei seitliche Abgänge, die an das nachgelagerte System angebunden sind, vgl. Abbildung III.6.3.



Abbildung III.6.3: Sendeschleuse Station Holthausen II

Für die Molchung wurde die Leitung 43 zunächst über das nachgelagerte System bis auf einen Mindestdruck entspannt. Anschließend wurden die Abgangskugelhähne zunächst geschlossen und über Blindflansche physikalisch vom nachgelagerten System getrennt, um das Eindringen von Wasser zu verhindern. Nach Herstellung des gasfreien Zustands wurde die Leitung mit Stickstoff gespült und somit inertisiert. Dies erfolgte durch Stickstofftrailer mit ca. 10.000 m³ Stickstoff.

Mit der Außerbetriebnahme der Leitung wurde ebenfalls eine Kaliberscheibenmolch durch die Leitung gefahren, welcher einen ersten Nachweis der Passierbarkeit des Durchmessers der Leitung brachte. Dieser Nachweis wurde ebenfalls mit Befüllung der Leitung und die Durchfahrt eines so genannten Geometriemolches bestätigt. Der Geometriemolch hat die zusätzliche Aufgabe Beulen und Verformungen der Rohrwandung zu erfassen.

Im Anschluss wurde die Sendeschleuse hinter der blindgeflanschten Endarmatur auf der Station Holthausen II installiert. Die Befüllung der Leitung erfolgte mit Wasser aus dem Dortmund-Ems-Kanal. Hierzu wurde mittels Tauchpumpe, Schlauchleitung und einer auf dem Stationsgelände errichteten Füllereinheit das Wasser in die Leitung eingebracht. Der Vortrieb der Molche erfolgte über eine in der Füllereinheit integrierte Hochdruckpumpe. Zur Sicherstellung einer hohen Messqualität wurde eine konstante Molchgeschwindigkeit von 0,8–1,0 m/s realisiert, was einem kontinuierlichen Fördervolumenstrom von ca. 200 m³/h entsprach, vgl. Abbildung III.6.4.

Gefördert durch:



Abbildung III.6.4: Wasserentnahme aus dem Dortmund-Ems-Kanal

Die erforderlichen Aufbau- und Stationsarbeiten, einschließlich Leitungsbefüllung, Montage sowie Versand der intelligenten Molche, wurden in enger Abstimmung mit den beauftragten externen Dienstleistern durchgeführt. Ebenso waren vielfache Abstimmungen zur Nutzung der betroffenen Grundstücke z.B. für die Wasseraufbereitungsanlage sowie die wasserrechtlichen Genehmigungen für Wasserentnahme und Wiedereinleitung erforderlich.

An der Zielstation Schepsdorf war die Leitung 43 bereits physikalisch vom nachgelagerten System getrennt. Die Empfangsschleuse musste hinter der Endarmatur über einen 90°-Bogen installiert werden, da die Station räumlich begrenzt war. Zur messsicheren Absicherung wurde ein Kalibrierrohr (schwarz isoliert) mit definiert eingebrachten Referenzfehlstellen installiert. Dieses ermöglichte eine quantitative Validierung der Messauflösung, der Positionsgenauigkeit sowie der Detektionswahrscheinlichkeit unter realen Betriebsbedingungen, vgl. Abbildung III.6.5.



Abbildung III.6.5: Empfangsschleuse Station Schepsdorf

Das ausgeleitete Wasser wurde über die Empfangsschleuse einer Aufbereitungsanlage mittels Kies- und Aktivkohlefilter zugeführt und aufgereinigt, vgl. Abbildung III.6.6.



Abbildung III.6.6: Wasseraufbereitungsanlage

Vor der Wiedereinleitung in die Ems wurde das Wasser durch ein unabhängiges und zertifiziertes Umweltlabor geprüft, um die im Vorfeld mit den Behörden abgestimmten Einleitkriterien zu erfüllen. Zur Beweissicherung erfolgte eine kontinuierliche Probenahme des aufgereinigten Wassers. Nach erfolgreicher Aufbereitung wurde das Wasser über eine Schlauchleitung und mittels Hochdruckpumpe in einen nahegelegenen Entwässerungsgraben geführt, von wo aus die Einleitung in die Ems erfolgte.

Über die Dauer der Aufreinigung, sowie der beiden intelligenten Molchläufe wurden insgesamt rund 4.000 m³ Wasser aus dem Dortmund-Ems-Kanal entnommen, auf dem Stationsgelände Holthausen II in die Leitung 43 gepumpt und nach Aufbereitung im Bereich der Station Schepsdorf wieder in die Ems

eingeleitet. Nach erfolgter Inspektion der Leitung wurden die Messergebnisse durch den Dienstleister ausgewertet und der Nowega als Bericht vorgelegt.

Im Ergebnis konnten die künstlich eingebrachten Defekte reproduzierbar detektiert und geometrisch korrekt charakterisiert werden. Im Bestand der Leitung selbst wurden keine rissartigen Anzeigen identifiziert. Insgesamt wurden 16 Materialverluste entlang der Leitung detektiert, die zwischen 7 % und 19 % lagen. Diese traten teilweise an der Rohrinneoberfläche und teilweise an der Außenwand auf. Zusätzlich wurden eine Lamination sowie vier Beulen festgestellt. Alle Anomalien befinden sich deutlich unterhalb kritischer Werte.

Die Ergebnisse der Ultraschall-Molchung bestätigen, dass die Leitung Nr. 43 für den Wasserstoffbetrieb geeignet ist und liefern eine belastbare Grundlage für den sicheren, dauerhaften Betrieb von Wasserstoff in bestehenden Hochdruckleitungen.

Über die reine Zustandsbewertung hinaus erfüllt die Nullmolchung eine zentrale wissenschaftliche Funktion: Sie definiert die Vergleichsbasis für die spätere Bewertung der EMAT-Daten unter H₂-Atmosphäre und ermöglicht somit eine differenzierte Betrachtung möglicher wasserstoffinduzierter Veränderungen.

III.6.2 Entwicklung eines H₂-Testmolchs

Für die Entwicklung eines H₂-Molchs ist es notwendig alle auf dem Molch verbauten Materialien auf H₂-Tauglichkeit zu prüfen.

III.6.2.1 Material Tests

Um einen Molch in Wasserstoff einzusetzen, müssen die ausgewählten Materialien dem Wasserstoff unter Druck für die Dauer der Inspektion standhalten. Um zu bestätigen, dass die auf einem Molch verbauten Materialien dem genügen, haben wir Tests mit typischerweise auf einem Molch verbauten Komponenten und Materialien durchgeführt. In der folgenden Tabelle sind Komponenten aufgelistet, die in Autoklaven Wasserstoff unter Druck über einen Zeitraum ausgesetzt sind, aufgelistet, mit der Bemerkung zum Zustand vor dem Test:

Tabelle III.6.2: Tests von Materialien die auf Molchen verbaut werden

Nr.	Beschreibung	Bemerkung / Zustand
1	P24X-10 Sensor	benutzter Sensor -EMAT
2	P24X-10 Sensor	Neuer Sensor -EMAT
3	Suco Druckschalter	Neu
4	IGUS Gleitlager	Neu
5	IGA Gleitlager	Neu
6	08" LF-Manschette	Neu
7	Coax Kabel	Neu
8	Bürstendraht	
9	Bürstendraht	
10	XGP Arm	Ausrangiert
11	Odometer Magnet	
12	Sicherungsring #1	
13	Sicherungsring #2	

Nr.	Beschreibung	Bemerkung / Zustand
14	DMD Sensor	Neu
15	DIC U Sensor	Neu / mit Stecker
16	Wellendichtringe	Neu
17	Lamellenbürste	Neu
18	Kabel	Neu
19	Sensorkabel	Neu

Die Komponenten wurden unter folgenden Parametern getestet. Die unterschiedlichen Materialien wurden in den Autoklaven für 24 h, 48 h and 96 h platziert und dem Wasserstoff bei 100 % und 100 bar Druck ausgesetzt.

Tabelle III.6.3: Test-Parameter

Temperatur	Raumtemperatur
Druck	100 bar
Dauer / Explosionszeit	24h / 48h / 96h
Wasserstoffgehalt	100%

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Tests mit dem jeweiligen Zustand der Komponenten nach 24 h, 48 h und 96 h aufgelistet:

Tabelle III.6.4: Test Ergebnisse

Nr.	Beschreibung	24 h	48 h	96 h
1	P24X-10 Sensor	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	-
2	P24X-10 Sensor	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	-
3	Suco Druckschalter	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
4	IGUS Gleitlager	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
5	IGA Gleitlager	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
6	08" Manschette	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
7	Coax Kabel	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
8	Bürstendraht	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
9	Bürstendraht	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
10	Sensor Arm	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
11	Odometer Magnet			

Nr.	Beschreibung	24 h	48 h	96 h
12	Sicherungsring	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
13	Sicherungsring	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
14	DMD Sensor	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten	Keine Auffälligkeiten
15	DIC U Sensor	Stecker aufgebläht	Stecker aufgebläht	Stecker aufgebläht
16	Wellendichtringe	-	-	Keine Auffälligkeiten
17	Lamellenbürste	-	-	Keine Auffälligkeiten
18	Kabel	-	-	Stecker aufgebläht
19	Sensorkabel	-	-	Stecker aufgebläht

In den Fällen mit aufgeblähtem Stecker kann abschließend festgehalten werden, dass die Komponenten während der Inspektion voll funktionsfähig sind und es erst nach dem Druckablassen und Ausschleusen zu dem Phänomen des Aufblähens kommt. Diese Komponenten müssen nach der Inspektion getauscht werden.

Alle weiteren Materialien und Komponenten haben die Tests erfolgreich überstanden und können bedenkenlos in Wasserstoff eingesetzt werden.

III.6.2.2 Permanentmagnete

Permanentmagnete sind wichtige Komponenten unserer Inspektionswerkzeuge und von grundlegender Bedeutung für die Messtechnologie und somit für die Inspektionstechnologie. Vor dem Hintergrund der aktuellen Marktentwicklungen bereiten wir unsere Molche für den Einsatz in Wasserstoffleitungen vor und untersuchen, über welchen Zeitraum die Dauermagnete Wasserstoff ausgesetzt werden können, bevor ihre Magnetisierung nachlässt. In der folgenden Tabelle werden von uns untersuchte Optionen zum Schutz der Permanentmagnete gegen das Eindringen von Wasserstoff vorgestellt:

Tabelle III.6.5: Optionen zum Schutz der Magnet Pakete vor H_2

Konzept	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
<u>Nickel-Kupfer-Nickel Beschichtung</u>	10 – 20 NiCuNi Beschichtung	<ul style="list-style-type: none"> – Standard Magnet – Keine Anpassungen notwendig – Keine Einfluss auf die Magnetisierung 	<ul style="list-style-type: none"> – Schützt den Magnet nicht ausreichend
Einfache Edelstahlhülle	0.5mm dicke Edelstahlhülle vom Magnethersteller	<ul style="list-style-type: none"> – einfach zu beziehen – geringen Einfluss auf die Magnetisierung – geringfügige Anpassungen am Tool 	<ul style="list-style-type: none"> – Schützt den Magnet nicht ausreichend

Konzept	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Stahlgehäuse	Vollständige Schutzhülle aus Stahl und Edelstahl verschweißt	<ul style="list-style-type: none"> – Für größere Zollgrößen nur geringe Anpassung notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> – Größerer Einfluss auf die Magnetisierung bei kleinen Zollgrößen – Schützt nicht zuverlässig
Stahlgehäuse vergossen	Vollständige Schutzhülle aus Stahl und Edelstahl verschweißt mit Vergussmasse gefüllt	<ul style="list-style-type: none"> – Für größere Zollgröße nur geringe Anpassungen notwendig – Schützt den Magneten – Hohlräume werden gefüllt (Stoßschutz) 	<ul style="list-style-type: none"> – Einfluss auf die Magnetisierung, vor allem bei kleineren Zollgrößen – Aufwendiger Fertigungsprozess

Um die Wirksamkeit der Optionen gegen das Eindringen von Wasserstoff zu untersuchen, haben wir Test-Muster vorbereitet, die dann in Autoklaven unter Druck Wasserstoff ausgesetzt werden. In der folgenden Tabelle sind die Test-Proben, die Anzahl, der Zustand vor der Prüfung und der Hersteller aufgelistet.

Tabelle III.6.6: Test-Muster

Nr.	Test Proben	Anzahl	Zustand vor Prüfung	Hersteller
1	Nickel-Kupfer-Nickel Beschichtung	9	gut	Vector
2	Geklebte Edelstahlhülle 0.5 mm	6	Keine äußeren Beschädigungen	Universal Magnets
3	Stahlgehäuse Laserschweißverfahren	3	Gut	ROSEN
4	Stahlgehäuse WIG-Schweißverfahren	3	Gut	ROSEN
5	Stahlgehäuse Punkt-Schweißverfahren	2	Gut	ROSEN
6	Stahlgehäuse Laserschweißverfahren vergossen	3	Gut	ROSEN
7	Stahlgehäuse WIG-Schweißverfahren vergossen	3	Gut	ROSEN

Die Test-Proben wurden unter folgenden Parametern getestet. Die unterschiedlichen Materialien wurden in den Autoklaven für 24 h platziert und dem Wasserstoff bei 100 % und 100 bar Druck ausgesetzt.

Atmosphäre: 100% H₂

Druck: 100 bar

Dauer: 24 h

Temperatur: Raumtemperatur

Testprozess:

Die Magnete wurden in den genannten Schutzgehäusen bzw. -beschichtungen in einem Kunststoffbehälter in die Autoklaven gegeben und im ersten Schritt für 24 Stunden 100 % Wasserstoff bei 100 bar ausgesetzt. Nach den ersten 24 Stunden werden die Proben äußerlich auf Anomalien und Veränderungen geprüft. Werden keine äußeren Veränderungen festgestellt, wird jeweils ein Paket

aufgeschnitten, damit geprüft werden kann, ob innerlich irgendwelche Veränderungen vorhanden sind. Falls es keine Veränderungen gibt, werden die restlichen Pakete für weitere 24 Stunden in die Autoklave gegeben und die Kontrolle wiederholt. Falls keine Veränderungen wahrnehmbar sind, wird dies wiederholt, bis ein Gesamtzeitraum von 96 Stunden erreicht ist. Nach den ersten 24 Stunden haben alle Schutzmaßnahmen äußerliche Veränderungen und Anomalien aufgezeigt. Damit ist ein Schutz der Magnete nicht mehr gewährleistet, die Magnete weisen äußerliche Anomalien auf und teilweise sind die Magnete pulverisiert. Die Tests wurden nach 24 Stunden beendet.



Abbildung III.6.7: Test-Proben in Autoclave

Testergebnis:

Die Magnete wurden gemäß des Testprozesses dem Wasserstoff ausgesetzt und nach 24 Stunden entnommen.

Die beschichteten NiCuNißMagnete wurden gemäß des Testprozesses dem Wasserstoff ausgesetzt und nach 24 Stunden entnommen. Alle Magnete mit Nickel-Kupfer-Nickel Beschichtung waren komplett pulverisiert und nicht mehr einsatzfähig.



Abbildung III.6.8: Test-Proben Nr. 1 mit Nickel-Kupfer-Nickel Beschichtung nach 24 Stunden H_2 -Test

Die geklebte Edelstahlhülle ist nach 24 Stunden aufgeplatzt und der Magnet ist pulverisiert. Man kann gut erkennen, dass die Hülle an den geklebten Stellen aufgeplatzt ist, vermutlich durch den steigenden Innendruck.



Abbildung III.6.9: Test-Proben Nr. 2 geklebter Edelstahlhülle nach 24 Stunden H_2 -Test

Die Stahlgehäuse mit den eingebauten Magneten wurden nach 24 Stunden Wasserstoffatmosphäre entnommen und einer Sichtprüfung unterzogen. Diese Sichtprüfung zeigte, dass keines der Pakete noch instand war.

Das laserverschweißte Magnetpaket ist an den kompletten Schweißnähten aufgeplatzt, sodass man die Platte abnehmen kann. Auch hier ist der innen eingeschweißte Permanentmagnet in Gänze zerstört.



Abbildung III.6.10: Test-Probe Nr. 3 Stahlgehäuse Laserschweißverfahren nach 24 Stunden H_2 -Test

Das Magnetpaket, welches WIG verschweißt wurde, ist nur an den langen Schweißnähten aufgeplatzt. Allerdings ist auch hier der Permanentmagnet angegriffen und nicht mehr funktionstüchtig.



Abbildung III.6.11: Test-Probe Nr. 4 Stahlgehäuse WIG-Schweißverfahren nach 24 Stunden H_2 -Test

Das punktverschweißte Magnetpaket ist an den Schweißnähten aufgeplatzt und der Magnet ist pulverisiert.



Abbildung III.6.12: Test-Probe Nr. 5 Stahlgehäuse Punkt-Schweißverfahren nach 24 Stunden H₂-Test

Hingegen zu o.g. Test-Proben waren alle vergossenen Edelstahlgehäuse mit Magneten nach 24 Stunden noch intakt. Es wurde jeweils ein Laser verschweißtes und ein WIG-verschweißtes Paket aufgeschnitten, um zu prüfen, ob die innenliegenden Magnete auch noch intakt sind. Der Schnitt zeigte, dass auch die Magnete unversehrt sind, sodass die restlichen Pakete für weitere 24 Stunden in die H₂-Atmosphäre gegeben wurden.

Nach 48 Stunden haben die Pakete keine Auffälligkeiten gezeigt. Die Test-Proben-Pakete wurden nach den 116 Stunden aus dem Wasserstoff entnommen. Es waren alle vergossenen Stahlgehäuse im Laserschweißverfahren und im WIG-Schweißverfahren unbeschädigt.



Abbildung III.6.13: Test-Probe Nr. 6 vergossenes Stahlgehäuse Laserschweißverfahren nach 96 Stunden H_2 -Test

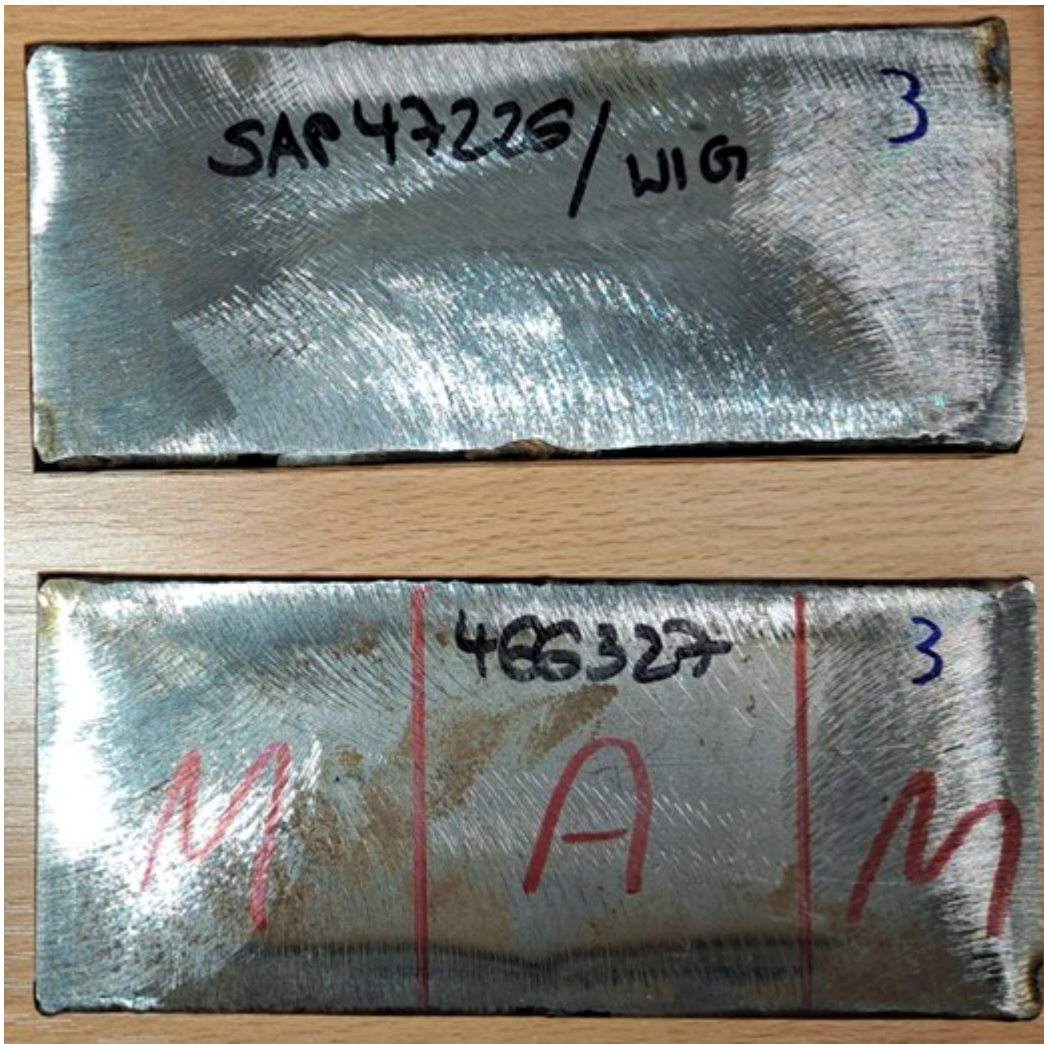


Abbildung III.6.14: Test-Probe Nr. 7 vergossenes Stahlgehäuse WIG-Schweissverfahren nach 96 Stunden H₂-Test

Um Qualitätsmängel der Schutzhüllen auszuschließen, haben wir Schichtdickenprüfungen durchgeführt. Dazu wurden die Test-Proben geschnitten, eingebettet und unter einem Mikroskop wurden die Beschichtungen bzw. Hüllen begutachtet. Diese Prüfung ergab, dass die Beschichtungen entsprechend ihrer Anforderung aufgetragen wurden.

Die Standardmagnete mit einer 10-20 µm Nickel-Kupfer-Nickel Beschichtung eignen sich nicht für eine Wasserstoffanwendung, da der Schutz nicht über den geforderten Zeitraum von 96 Stunden gewährleisten werden konnte.

Das Konzept der geklebten Edelstahlhülle bewährte sich in den Tests nicht, da alle getesteten Magnete die 24 Stunden nicht überdauert haben. Aufgrund der Testergebnisse gehen wir davon aus, dass die Klebestelle der Schwachpunkt des Konzeptes ist. Das Konzept könnte durch ein anderes Verfahren zum Befestigen der Edelstahlplatte wirksam werden.

Das Konzept einer geschlossenen Schutzhülle wird grundsätzlich als eine gute Lösung angesehen, nur die Umsetzung muss noch genauer durchdacht werden. Dabei sollte der Fokus darauf gelegt werden,

dass das Gehäuse dicht ist und im Innenraum kein Freivolumen vorhanden ist, damit sich kein Innendruck aufbauen kann und die Barriere für den Wasserstoff erhöht wird.

Die Testreihe hat gezeigt, dass das vergossene Stahlgehäuse zuverlässig einen Schutz vor Wasserstoff bietet. Bei den Tests wurden zwei unterschiedliche Schweißverfahren getestet, einmal das Laserschweißverfahren und das WIG-Schweißverfahren. Nach dem aktuellen Kenntnisstand können wir vergossene Stahlgehäuse sowohl mit dem Laserschweißverfahren als auch mit dem WIG-Schweißverfahren einsetzen, um Magnete zuverlässig gegen Wasserstoff zu schützen.

III.6.2.3 Elektronik Tests

Der aktuelle Stand des Wissens lässt nicht erkennen, ob elektronische Komponenten auf Wasserstoff reagieren. Da wir nicht garantieren können, dass unsere Gehäuse diffusionsdicht sind, mussten wir herausfinden, ob Wasserstoff einen Einfluss auf die Elektronik hat und falls ja, bei welcher Konzentration. Dazu wurden bei 10 % und 20 % Wasserstoff folgende Versuche durchgeführt:

III.6.2.3.1 10% H₂ Konzentration

Tabelle III.6.7: Testpoben

No.	Description	Remarks
1	IDG.121	Keine Auffälligkeiten
2	IDS3.212	Keine Auffälligkeiten
3	PowerGuard 0801 2.0 RB VB	Keine Auffälligkeiten

Tabelle III.6.8: Test Parameter

Temperatur	Raumtemperatur
Druck	1.5 bar
Dauer / Explosionszeit	24 h
Wasserstoffgehalt	10% Wasserstoff 90% Methan

III.6.2.3.1.1 Test Prozedur

Die elektronischen Komponenten wurden vor den Wasserstofftests auf ihre Funktionalität geprüft. Bestanden die Komponenten diese Tests, wurden die Elektroniken für 24 Stunden einer Atmosphäre aus 10 % Wasserstoff und 90 % Methan ausgesetzt. Nach Abschluss der Wasserstofftests wurde die Funktion der Komponenten erneut überprüft.

Wir versuchten, den zeitlichen Abstand zwischen den Tests so kurz wie möglich zu halten, um sicherzustellen, dass der Wasserstoff noch nicht entwichen ist.

War die Funktion der Elektronik nach dem Wasserstofftest unverändert, wurden Tests mit einem höheren Wasserstoffanteil durchgeführt.

III.6.2.3.1.2 Test Ergebnisse

Nach 24 Stunden in einer Atmosphäre mit 10 % Wasserstoff zeigten die elektronischen Komponenten keine Veränderungen. Alle Bauteile befanden sich weiterhin in einwandfreiem Zustand.

III.6.2.3.2 20% H₂ Konzentration

Die elektronischen Komponenten wurden vor den Wasserstofftests erneut auf ihre Funktionalität geprüft. Bestanden die Komponenten diese Tests, wurden die Elektronik für 24 Stunden, 48 Stunden, 72 Stunden und 96 Stunden einer Atmosphäre aus 20 % Wasserstoff und 80 % Methan ausgesetzt. Nach Abschluss der jeweiligen Wasserstofftests wurde die Funktion der Komponenten erneut überprüft.

Tabelle III.6.9: Testproben

No.	Description	Remarks
1	IDG.121	Keine Auffälligkeiten
2	IDS3.212	Keine Auffälligkeiten
3	PowerGuard 0801 2.0 RB VB	Keine Auffälligkeiten

Tabelle III.6.10: Test Parameter

Temperatur	Raumtemperatur
Druck	1.5 bar
Dauer / Explosionszeit	24 h / 48 h / 72 h / 96 h
Wasserstoffgehalt	20% Wasserstoff 80% Methan

Wir versuchten wieder, den zeitlichen Abstand zwischen den Tests so kurz wie möglich zu halten, um zu vermeiden, dass der Wasserstoff bereits entwichen ist.

War die Funktion der Elektronik nach der Wasserstoffexposition unverändert, wurden Tests mit einem höheren Wasserstoffanteil durchgeführt.

Nach 24 Stunden zeigten die Elektronik auch hierbei keine äußerlich erkennbaren Anomalien und bestanden die Funktionstests. Nach 48 Stunden waren die Elektronik weiterhin voll funktionsfähig und wiesen keine Anomalien auf. Gleiches galt nach 72 Stunden sowie nach 96 Stunden.

III.6.2.3.3 Fazit

Aufgrund der durchgeführten Tests und deren Ergebnisse konnten Materialien ausgewählt werden, Schutzmaßnahmen definiert und es konnte mit dem Molch-Design gestartet werden.

III.6.2.4 Molch Design

Für das GETH2 TransHyDe-Projekt wurde ein neues 10"-EMAT-Toolkonzept sowie ein entsprechendes Design entwickelt. Ziel des Entwicklungsprojekts war es, die Leistungsanforderungen zu verbessern und damit die veröffentlichten EMAT-C Ultra-Leistungsspezifikationen zu erreichen. Dies würde einen positiven Beitrag zu den Integritätsmanagementprogrammen der Leitungsbetreiber leisten – insbesondere für diejenigen, die ihre Pipelines von Erdgastransport auf zukünftigen Wasserstofftransport umstellen möchten.

Das bestehende 10"-EMAT-C-Tool für Erdgas besteht aus dreizehn Toolsegmenten, von denen acht Messsegmente sind. Daher sind die Werkzeugabmessungen (Länge und Gewicht) nicht ideal, insbesondere im Hinblick auf Inspektionen in zukünftigen Wasserstoffpipelines. Das neue EMAT-C Ultra-Toolkonzept bietet Vorteile im Werkzeugdesign und in der Messleistung. Es ermöglicht eine

Verkürzung der Molchlänge, eine Reduzierung der Anzahl der Messesegmente sowie eine Verringerung des Gesamtgewichts – bei gleichzeitig verbesserten Leistungsspezifikationen.



Abbildung III.6.15: Neues 10" EMAT-C Ultra Tooldesign

Das neue Molchdesign konnte nur durch die Entwicklung einer neuen Elektronik realisiert werden, die a) das neue EMAT-C Ultra-Sensorkonzept unterstützt und b) in ihrer Größe soweit reduziert wurde, dass sie in das 10"-Molchdesign passt.

Eine weitere Herausforderung bei der Entwicklung des neuen Toolkonzepts und -designs war die Konstruktion neuer 10"-EMAT-C Ultra-Sensoren. Die Schwierigkeit bestand darin, die stärkere Krümmung der kleineren Rohrleitungen zu berücksichtigen und einen präzisen Sensorkontakt sowie eine exakte Ausrichtung zwischen der Innenwand der Pipeline und dem Sensor sicherzustellen. Dies ist notwendig, um eine hohe Datenqualität zu erreichen und die angestrebten Leistungsspezifikationen zu erfüllen.

Wie in der obenstehenden Abbildung zu sehen ist, besteht das neue 10"-EMAT-C Ultra-Tool insgesamt nur aus acht Segmenten, von denen lediglich zwei Segmente als Messeinheiten benötigt werden – bei gleichzeitig verbesserten Leistungsspezifikationen.

Das innovative Design bietet zusätzlich einen deutlichen Vorteil in Bezug auf das Laufverhalten des Tools, was durch Strömungssimulationen bewertet wurde.

III.6.2.5 Strömungssimulationen in H₂ und Erdgas

Das Molchdesign des neu entwickelten EMAT-C Ultra-Tools wurde in Strömungssimulationen innerhalb der Zielpipeline untersucht. Für diesen Zweck wurden Pipelineinformationen wie Wanddicke, Höhenprofil und Installationen von Fa. Nowega bereitgestellt und in den Simulationen berücksichtigt. Die Pipeline hat einen Außendurchmesser von 10" und eine Länge von 11,5 km. Die minimale Wanddicke beträgt 6,9 mm, die nominale Wanddicke 7,1 mm und die maximale Wanddicke 25,6 mm. In der Pipeline sind nur wenige Bögen und Installationen vorhanden. Insbesondere gibt es eine Kombination aus Bögen und einen Installationsbereich bei etwa 7 km, in dem eine erhöhte Wanddicke von bis zu 18,1 mm vorliegt. Dies führt zu einem Geschwindigkeitsspitzen, der in allen Simulationsergebnissen sichtbar wurde.

In Abstimmung mit Fa. Nowega wurden verschiedene Kombinationen aus Strömungsgeschwindigkeit und Druck simuliert. Für die Berechnung der Strömungssimulationen wurden die folgenden Betriebsparameter verwendet:

- Der Druckbereich reicht von 25 bar bis 60 bar in 5-bar-Schritten.
- Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden mit 1,5 m/s und 2,0 m/s simuliert.

Tabelle III.6.11: Druck und Volumenstromgeschwindigkeiten für die Strömungssimulation

Druck [bar]	25	30	35	40	45	50	55	60
Volumengeschwindigkeit [m/s]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Volumengeschwindigkeit [m/s]	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Es wurden zwei unterschiedliche Tool-Setups simuliert. Das erste Setup beinhaltet eine zusätzliche Manschette an der Zugeinheit, sodass dort insgesamt drei Manschetten verbaut sind. Das zweite Tool-Setup war mit zwei Manschetten auf der Zugeinheit ausgestattet. Wie immer – aber insbesondere bei ILI in Wasserstoff – ist es entscheidend, eine ausreichende Abdichtung des ILI-Tools sicherzustellen, um genügend Antriebskraft während der Inspektion zu gewährleisten, insbesondere unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften von H_2 .



Abbildung III.6.16: Tool-Setup #1 mit 3 Manschetten auf der Zugeinheit



Abbildung III.6.17: Tool-Setup #2 mit 2 Manschetten auf der Zugeinheit

Im Folgenden sind einige Beispiele der Strömungssimulationen für Tool-Setup #1 und #2 in H_2 und in Erdgas dargestellt. Bei niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten und niedrigeren Drücken ist das Laufverhalten des Tools instabiler und weniger gleichmäßig, sondern deutlich unregelmäßiger. Dies führt zu Tool-Stopps und Tool-Beschleunigungen mit hohen Geschwindigkeitsspitzen. In Erdgas unterscheidet sich das Laufverhalten des Tools deutlich: Es ist weniger anfällig für Tool-Stopps und schnelle Beschleunigungen, und die auftretenden Geschwindigkeitsspitzen sind geringer.

Mit zunehmendem Leitungsdruck verbessert sich das Laufverhalten des Tools. Dadurch treten weniger Tool-Stopps auf, die Beschleunigungen fallen weniger stark aus und die Geschwindigkeitsspitzen sind geringer als bei niedrigeren Leitungsdrücken.

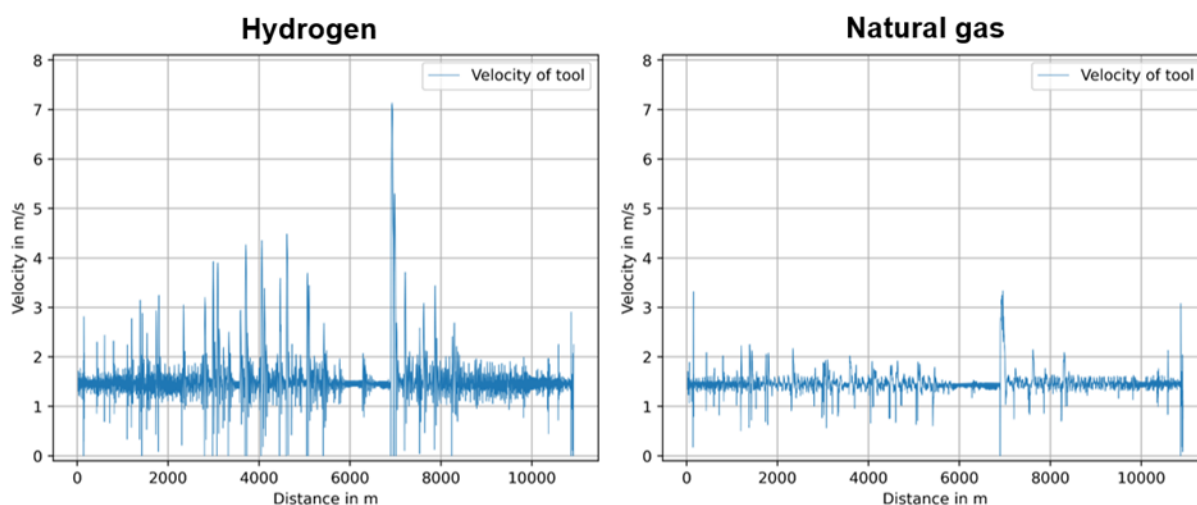


Abbildung III.6.18: Tool Setup #1 Simulation bei 1.5m/s und 25bar

Gefördert durch:

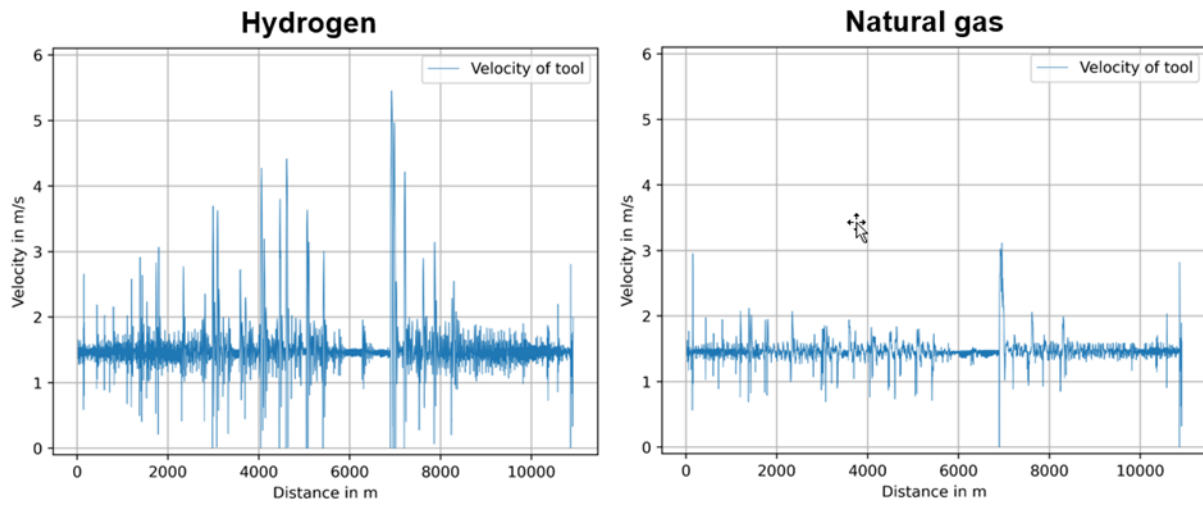


Abbildung III.6.19: Tool Setup #2 Simulation bei 1.5 m/s und 25 bar

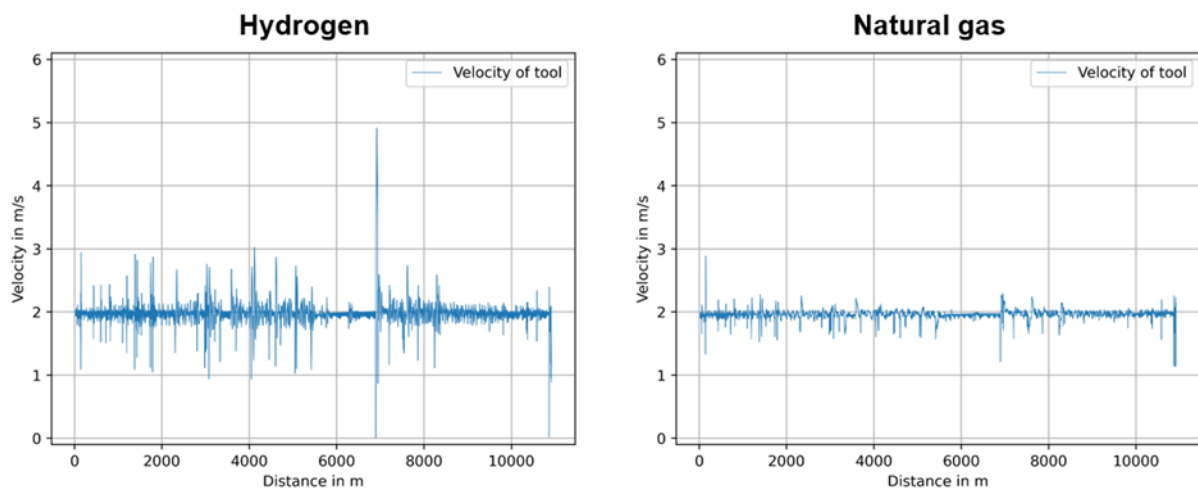


Abbildung III.6.20: Tool Setup #1 Simulation bei 2.0 m/s und 55 bar

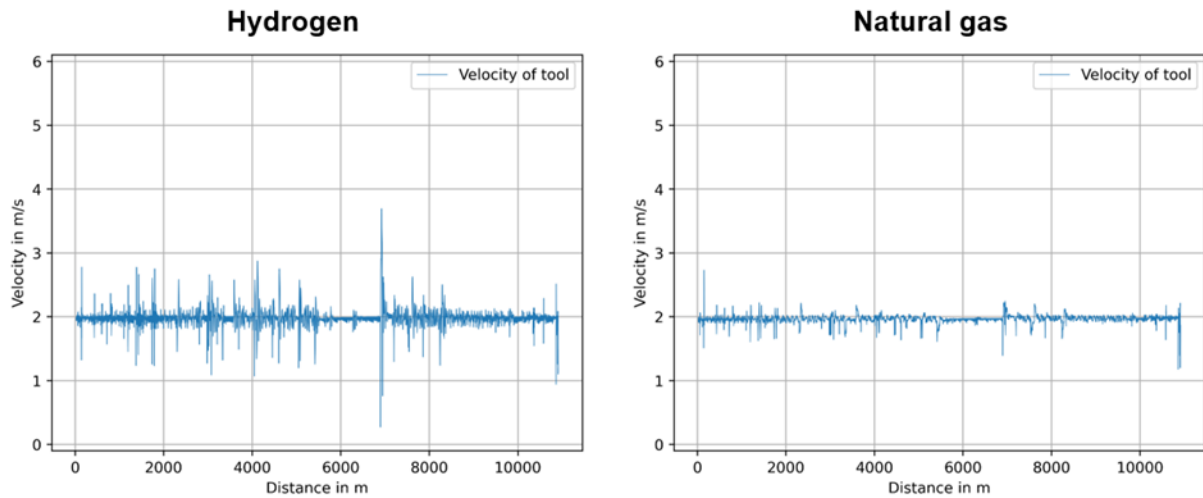


Abbildung III.6.21: Tool Setup #2 Simulation bei 2.0m/s und 55bar

Die folgende Grafik zeigt die resultierenden maximalen Tool-Geschwindigkeiten bei den jeweiligen Ziel-Strömungsgeschwindigkeiten und Druckwerten für H₂ und Erdgas für beide Tool-Setups. Wie zu erkennen ist, verringern sich die maximalen Tool-Geschwindigkeiten mit steigendem Pipeline-Druck für beide Konfigurationen.

Es lässt sich daraus schließen, dass ein höherer Pipeline-Druck bessere Laufbedingungen schafft, die zu einem gleichmäßigeren und stabileren Tool-Laufverhalten führen. Dies bildet eine wesentliche Grundlage für erfolgreiche ILI-Inspektionen und eine hohe Qualität der erfassten Inspektionsdaten.

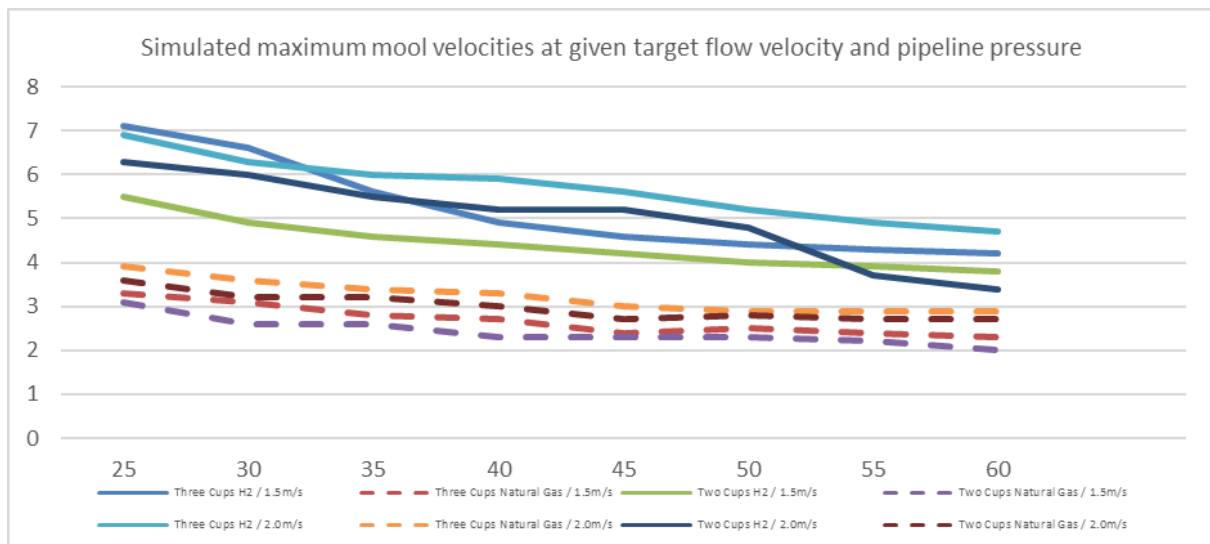


Abbildung III.6.22: Maximale Molchgeschwindigkeiten anhand der durchgeführten Strömungssimulationen

Die Strömungssimulationen je Tool Setup wurden genutzt, um die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen ILI weiter zu bewerten – unter Berücksichtigung der Integrität sowohl der Pipeline als auch des Molchs, d. h. der Risiken möglicher Schäden an Pipeline oder Tool während der Inspektion.

Das Ergebnis dieser Bewertung ist ein Diagramm, das als „Operational Limit Diagram“ bezeichnet wird und für individuelle Tool-Setups in Kombination mit der jeweiligen Zielpipeline erstellt werden kann.

Das Diagramm ist in vier Bereiche unterteilt, abhängig vom absoluten Leitungsdruck [bar] auf der X-Achse und der Strömungsgeschwindigkeit [m/s] auf der Y-Achse:

- **Bereich 1: hohes Risiko** – Strömungsgeschwindigkeit und/oder Druck sind zu niedrig für eine sichere Molchung.
- **Bereich 2: wahrscheinlich kritisches Risiko** – Strömungsgeschwindigkeit und/oder Druck sind niedrig. Abhängig von den Pipelineeigenschaften ist ein instabiles Tool-Laufverhalten mit hochfrequenten Geschwindigkeitsspitzen wahrscheinlich.
- **Bereich 3: grenzwertig kritisches Risiko** – Der Druck ist niedrig. Je nach Pipelineeigenschaften sind ein instabiles Tool-Laufverhalten und Geschwindigkeitsüberschreitungen möglich.
- **Bereich 4: geringes Risiko** – Strömungsgeschwindigkeit und Druck sind hoch genug, um in den meisten Fällen ein akzeptables Tool-Laufverhalten zu gewährleisten.

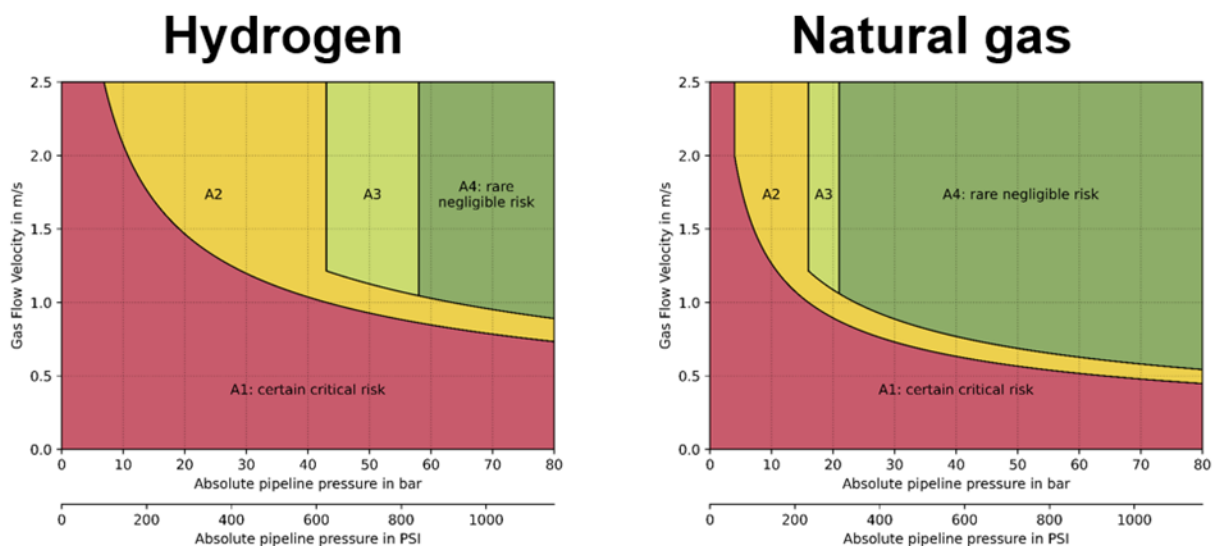


Abbildung III.6.23: Operational Limit Diagram für Tool Setup #1

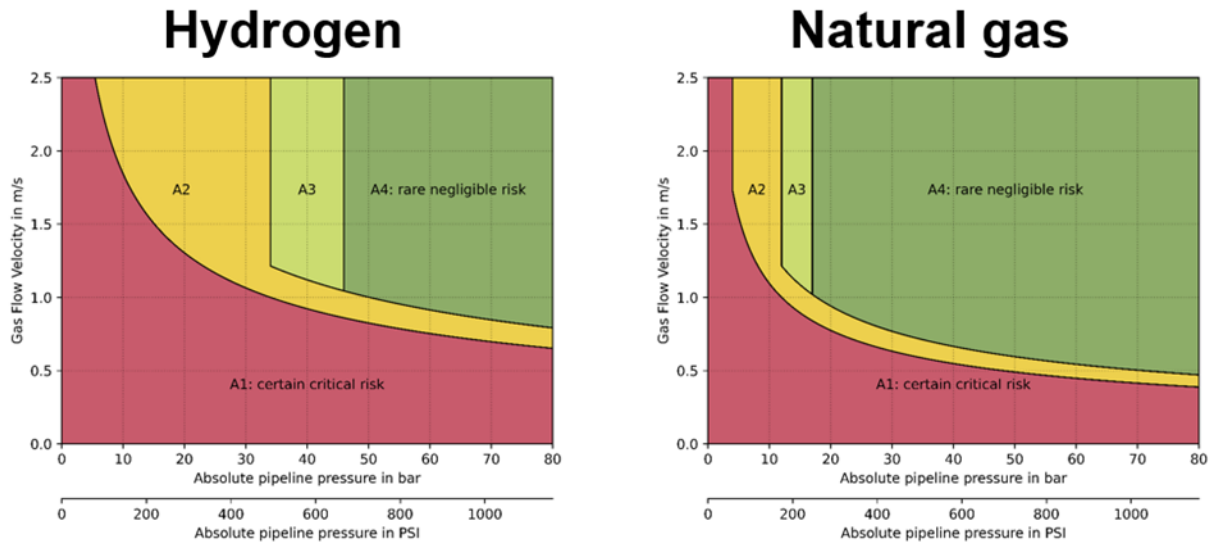


Abbildung III.6.24: Operational Limit Diagram für Tool Setup #2

Basierend auf der Bewertung der Strömungssimulationsergebnisse ist das zweite Tool-Setup – mit zwei Manschetten auf der Zugeinheit besser für die Inspektion der Zielpipeline geeignet. Grund dafür ist, dass der erforderliche Mindestdruck und die Mindestgeschwindigkeit geringer sind, um eine hohe Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Tool-Runs zu erreichen. Das zweite Tool-Setup bietet ein stabileres und gleichmäßigeres Laufverhalten des Tools. Unter Berücksichtigung der Eingangsdaten ergibt sich, dass eine minimale Strömungsgeschwindigkeit von 1,0 m/s bei einem Druck von 45 bar ausreichende Betriebsbedingungen bietet, um eine erfolgreiche Molchung durchzuführen.

Weitere Simulationen wurden mit einem alternativen Tool-Setup durchgeführt. Dem Tool wurde am Ende ein zusätzliches Segment hinzugefügt. Dieses zusätzliche Segment ist als Wirbelstrombremse (Eddy Current Brake, ECB) ausgelegt und erzeugt bei steigender Molch-Geschwindigkeit eine unmittelbare Bremskraft. Ziel der Simulationen war es, die Vorteile einer ECB im Vergleich zum Tool-Setup ohne ECB zu bewerten. Die ECB wurde als Trailer an das Tool angehängt. Da keine 10"-ECB verfügbar ist und es generell nur begrenzte Erfahrung mit ECBs bei Inline-Inspektionen gibt, müssen die Ergebnisse vorsichtig interpretiert werden. Für die Simulationen wurden die Parameter einer bestehenden 12"-ECB genutzt und auf 10" skaliert. In den Simulationen wurde das erste Tool-Setup mit den ersten vier geschlossenen Cups verwendet und die ECB als zusätzliches Segment ergänzt.

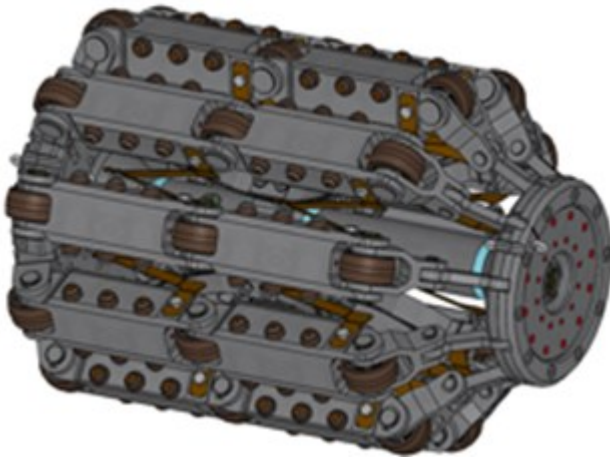


Abbildung III.6.25: Design einer 10" Wirbelstrombremse

Auf den ersten Blick verbessern sich das Laufverhalten und die erwarteten Tool-Geschwindigkeiten des Tools mit ECB nicht wesentlich, wobei jedoch die Geschwindigkeitsspitzen durch die ECB abgeschwächt werden, wie in der folgenden Abbildung zu erkennen ist.

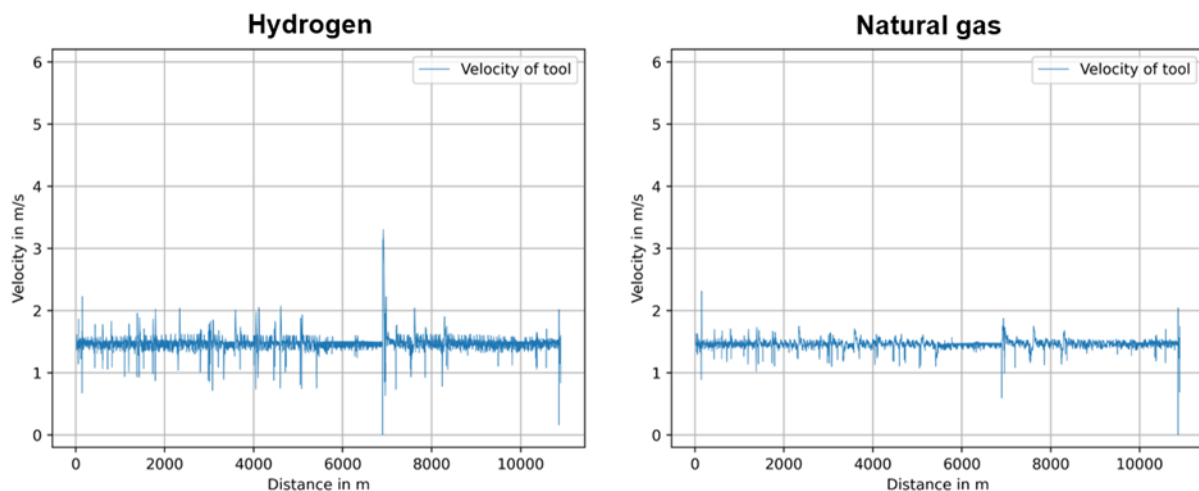


Abbildung III.6.26: Tool Setup #1 mit ECB Simulation bei 1.5 m/s und 55 bar

Der positive Effekt der ECB wird noch deutlicher, wenn man die aufsummierte Strecke betrachtet, die das Tool mit einer Geschwindigkeit oberhalb der spezifizierten Maximalgeschwindigkeit von 2,0 m/s zurücklegen würde.

Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 m/s würden nur etwa 80 m der insgesamt 11,5 km langen Pipeline mit Geschwindigkeiten über 2,0 m/s befahren. Die in diesem 80-m-Abschnitt erhobenen Daten sind weiterhin nutzbar und auswertbar, wenngleich leichte Abstriche bei der Einhaltung der Leistungsspezifikationen akzeptiert werden müssen.

In beiden Fällen beträgt die durchschnittliche Tool-Geschwindigkeit 1,48 m/s, was als akzeptabel angesehen werden kann.

Dies zeigt auch, dass der Geschwindigkeitsverlauf ohne ECB unregelmäßiger ist und sowohl höhere als auch niedrigere Werte aufweist als der Verlauf mit ECB.

Tabelle III.6.12: Vergleich Strömungssimulationsergebnisse

Tool Setup bei 1.5m/s und 55bar	Distanz mit Geschwindigkeiten > 2.0m/s [m]	Durchschnittsgeschwindigkeit t [m/s]
Tool Setup #1 in H ₂	288.50	1.48
Tool Setup #1 incl. ECB in H ₂	80.28	1.48

Eine Ziel-Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 m/s bei einem Druck von 55 bar scheint ein günstiges Betriebsfenster für die EMAT-Inspektion zu sein, wenn die ECB eingesetzt würde. Die endgültige Entscheidung hinsichtlich der Tool-Konfiguration wird zwischen dem Betreiber und ROSEN abgestimmt und hängt von den verfügbaren Betriebsbedingungen ab – aber auch von den Abmessungen der Molchschleusen, also davon, ob ausreichend Platz vorhanden ist, um das Tool-Setup einschließlich ECB aufzunehmen.

Der Einsatz einer ECB würde die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Inspektion erheblich erhöhen – auch bei niedrigeren Druck- und Geschwindigkeitswerten. Dies wird ebenfalls durch das Operational-Limit-Diagramm für dieses Tool-Setup bestätigt. Gemäß der Bewertung liegt der Mindestdruck unter 30 bar, und ausreichende Laufbedingungen beginnen bereits bei unter 1,0 m/s Strömungsgeschwindigkeit. Damit erweitert sich das betriebliche Fenster für eine erfolgreiche Inline-Inspektion in Wasserstoff erheblich.

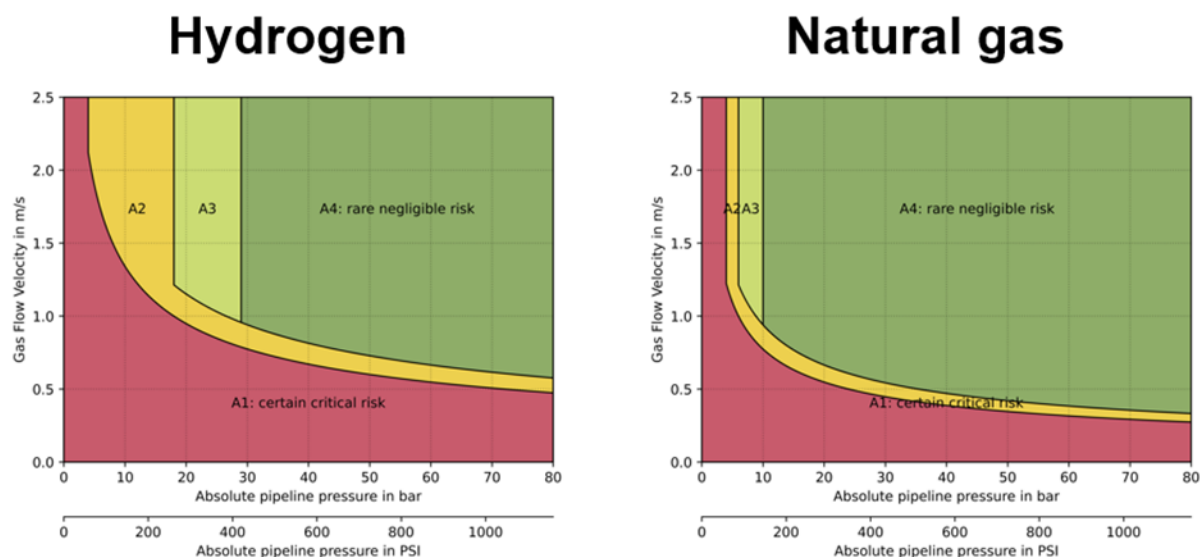


Abbildung III.6.27: Operational Limit Diagram für Tool Setup #1 mit ECB

Ein weiterer wichtiger Erkenntnisgewinn aus den Strömungssimulationen und Bewertungen ist, dass die Durchführung von ILI-Inspektionen in einer H₂-Umgebung deutlich anspruchsvoller ist als in einer Erdgasumgebung – jedoch können geeignete Lösungen bereitgestellt werden.

Das Wissen über die Pipeline-Details sowie die während der ILI erwarteten Betriebsbedingungen ist dabei entscheidend für eine fundierte Bewertung.

III.6.2.6 Molch Zusammenbau, Test und Qualifikation

Bevor neue ROSEN-ILI-Tools in den operativen Einsatz überführt werden, durchlaufen sie ein umfassendes und streng strukturiertes Verifizierungsprogramm. Diese wesentliche Phase stellt sicher, dass jede Technologie vollständig gemäß API 1163, dem anerkannten Industriestandard für Leistungsfähigkeit und Validierung von Inline-Inspektionssystemen, qualifiziert wird.

In diesem speziellen Projekt – und nachdem das Design abgeschlossen und die Materialien ausgewählt waren – wurden alle Komponenten für die Werkzeugmontage bestellt. Das montierte Tool wurde anschließend am ROSEN Technology and Research Center (RTRC) in Lingen (Ems), Deutschland, in Betrieb genommen und bewertet.

Die Inbetriebnahme des Tools umfasst Trockentests, Tool-End-Checks, Zugtests und Pumpentests.

Die ersten Trockentests und Tool-End-Checks haben bestätigt, dass die Elektronikeinheiten und Sensoren wie vorgesehen funktionieren. Alle Sensoren wurden korrekt zugeordnet und haben die Sensortests erfolgreich bestanden.

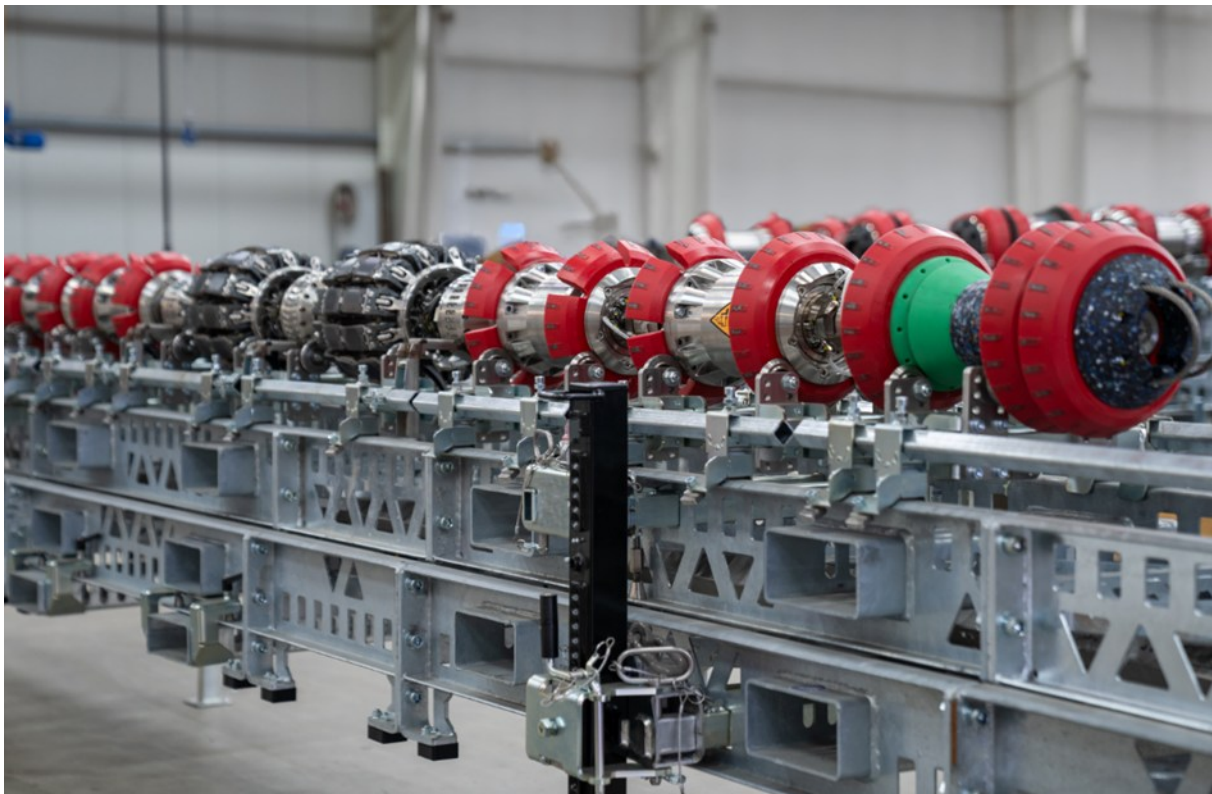


Abbildung III.6.28: Montierter neuer 10" EMAT-C Ultra Molch

Pumpentests mit Wasser werden durchgeführt, um die minimalen Passagewerte des Molchs nachzuweisen und somit die berechneten Passage- und Bogenbefähigungswerte zu bestätigen. Das Tool hat den Pumpentest erfolgreich bestanden und wurde mechanisch freigegeben.

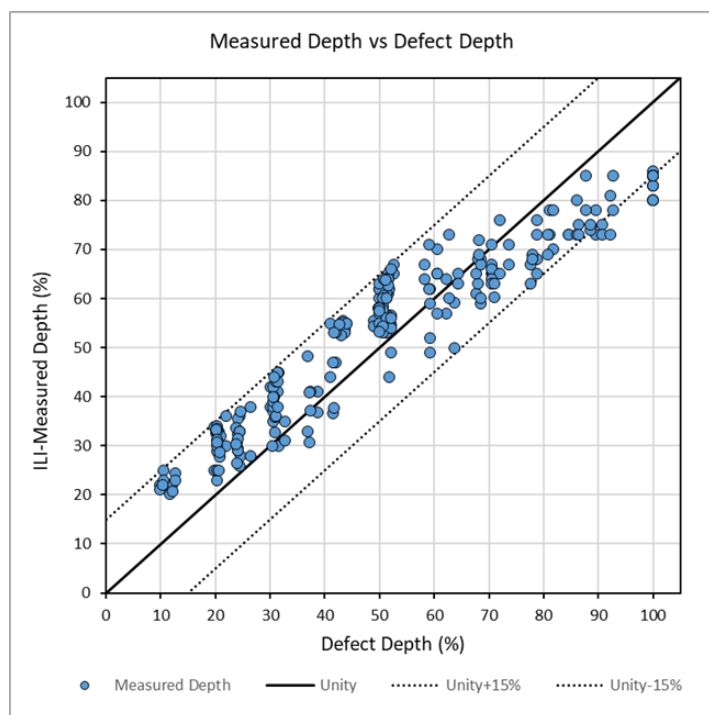


Abbildung III.6.30: Unity-Plot zur Tiefenmessung – 10" EMAT-C Ultra

AP 6.3 Vorbereitung der Gashochdruckleitung für die Durchführung der Referenzmolchung im H₂-Strom

Dieses Arbeitspaket beinhaltet die technische Vorbereitung der Gashochdruckleitung 43 (Stationen Schepsdorf – Holthausen – Lingen West) auf den Betrieb mit Wasserstoff und die daraus resultierenden Umbaumaßnahmen. Das zentrale Ziel ist der Ausbau von nicht H₂-geeigneten Komponenten und der Ersatz durch wasserstofftaugliche Bauteile. Hierzu hat die Nowega in einem intensiven Dialog mit dem TÜV Nord, die erforderlichen Prüfungen, Untersuchungen und Maßnahmen zur Nutzungsänderung nach der Verordnung über Gashochdruckleitungen (GasHDrLtgV) abgestimmt um den Wechsel des Transportmediums sowie den sicheren Betrieb gewährleisten zu können.

Die technische Vorbereitung umfasste mehrere Ebenen:

1. Werkstoff- und Komponentenbewertung

Sämtliche leitungsrelevanten Komponenten wurden hinsichtlich ihrer Wasserstoffverträglichkeit bewertet. Dabei wurden bekannte Versprödungsmechanismen, Diffusionsprozesse sowie mögliche Wechselwirkungen mit Dichtsystemen berücksichtigt. Die Analyse basierte auf Werkstoffdatenblättern, historischen Dokumentationen sowie ergänzenden materialtechnischen Bewertungen. Die Bewertung der Bauteile wurde, wie beschrieben, durch einen externen Sachverständigen (TÜV Nord) durchgeführt. Ein zentraler Aspekt war die Beurteilung des Stahlwerkstoffes der Rohrleitung. Hier konnte sowohl in der Praxis als auch in den Berechnungen keine erheblichen Auswirkungen auf die Bruchmechanik des verwendeten Stahls L360 NB festgestellt werden. Tatsächlich lassen sich Beeinträchtigungen der erheblichen Parameter wie Zugfestigkeit und Bruchdehnung für die meisten Rohrleitungswerkstoffe ausschließen, da diese erst bei Spannungsniveaus auftreten, die deutlich oberhalb der typischen Betriebscharakteristika konventionell betriebener

Erdgasleitungen liegen. Der entsprechende Nachweis des Werkstoffverhaltens wurde im Rahmen des Projekts SysWest H₂ erbracht, so dass auf zusätzliche Probenentnahmen an der Leitung 43 verzichtet wurde.

2. Infrastrukturelle Anpassungen

Armaturen, Dichtungssysteme sowie ausgewählte Komponenten wurden gesondert auf ihre Wasserstofftauglichkeit geprüft und – sofern erforderlich – ausgetauscht oder modifiziert. Ziel war die Herstellung eines konsistenten H₂-Ready-Status auf den Stationen Holthausen II, Lingen West und Schepsdorf.

Aus konservativen Beweggründen wurden generell alle mechanischen Komponenten der Stationen umgerüstet, um sich somit sicher für den zukünftigen Betrieb mit Wasserstoff aufzustellen.

Dies betrifft hauptsächlich die verbauten Stationskugelhähne, Drucktransmitter sowie Analogmanometer an den Leitungsendpunkten auf den Stationen Holthausen II und Schepsdorf.

Die nachführenden Rohrpläne verdeutlichen die erforderlichen Umbaumaßnahme auf den Stationen. Hierbei wurden die in orangefarbenen gekennzeichneten Bauteilen ausgetauscht.

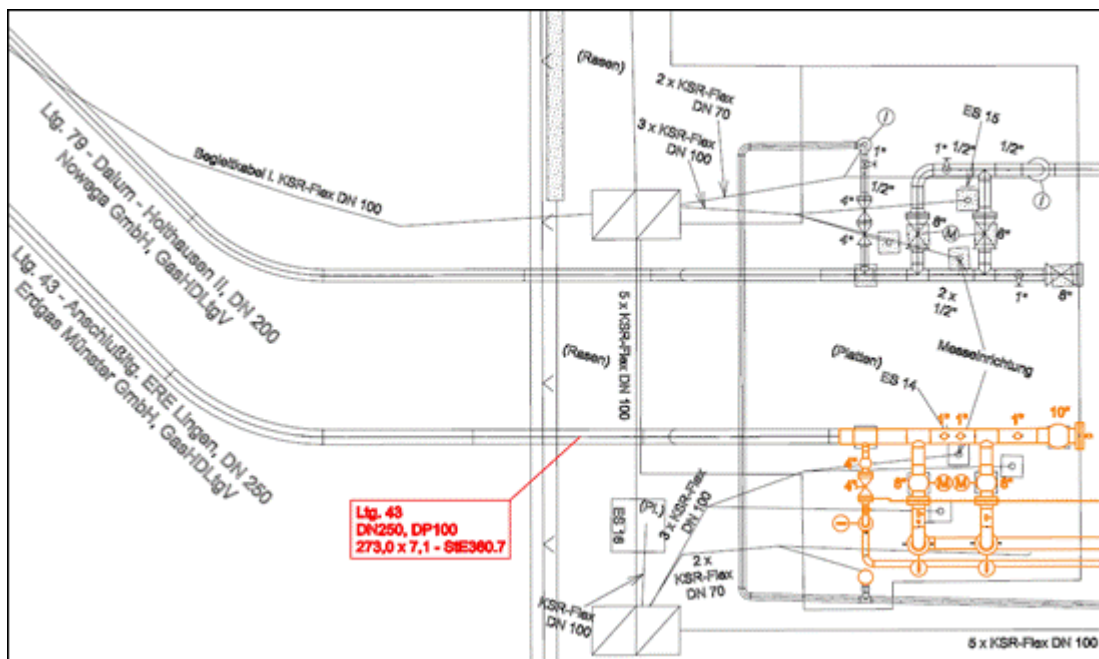


Abbildung III.6.31: Umsetzungen Holthausen II

AP 6.4 Durchführung einer Referenzmolchung im H₂-Strom und Ergebnisanalyse

Die Referenzmolchung im realen Wasserstoffstrom stellt den zentralen Validierungsschritt des gesamten Arbeitspakets dar und war bereits in der ursprünglichen Teilvorhabenbeschreibung als Demonstrations- und Nachweisführungskomponente definiert. Ziel ist die Überprüfung, ob das entwickelte EMAT-System unter H₂-Atmosphäre eine vergleichbare rissensitive Integritätsbewertung ermöglicht wie die zuvor durchgeführte Ultraschallreferenzprüfung.

Die wissenschaftliche Fragestellung geht dabei über eine reine Funktionsprüfung hinaus. Zu untersuchen sind insbesondere:

- Veränderungen der Signalcharakteristik unter Wasserstoffatmosphäre
- Einfluss der geringeren Gasdichte auf das Laufverhalten und die Messauflösung
- Reproduzierbarkeit der Defektdetektion im Vergleich zur Nullmolchung
- Bewertung potenzieller wasserstoffinduzierter Werkstoffveränderungen

Ein methodischer Schwerpunkt liegt auf dem direkten Datensatzvergleich zwischen Ultraschall- und EMAT-Messung. Hierdurch soll die Übertragbarkeit etablierter Integritätsbewertungsverfahren auf H₂-Bedingungen wissenschaftlich fundiert bewertet werden.

Aufgrund der zeitlichen Verschiebung der Umstellung der Leitung 43 auf Wasserstoff (voraussichtlich Mitte 2026) konnte die Referenzmolchung nicht innerhalb des ursprünglichen Projektzeitraums durchgeführt werden. Sämtliche infrastrukturellen, organisatorischen und messtechnischen Voraussetzungen sind jedoch vollständig geschaffen. Die Durchführung kann unmittelbar nach Aufnahme des H₂-Betriebs voraussichtlich ab Mitte 2027 erfolgen.

III.7 Arbeitspaket 7: Verdichterkonzepte

AP 7: Optimierung Verdichterkonzepte

Das AP 7 beschäftigte sich mit der Verdichtung und den möglichen Verdichtungstechnologien von Wasserstoff – zum einen im Bereich der Einspeisung, zum anderen im Bereich des Transports.

AP 7.1 Systemaspekte Wasserstoffeinspeisung, -Erzeugung, Druckniveau, Initiale Verdichtung

Der Druck in einer Transportleitung ist typischerweise höher als der Ausgangsdruck einer Elektrolyse. Um den produzierten Wasserstoff in das Netz einspeisen zu können, muss dieser auf den Leitungsdruck verdichtet werden. Die geschieht mit Hilfe einer Einspeiseeinheit.

Im Rahmen einer Studie wurden die Parametergrenzen von Elektrolyseuren bestimmt und um Entwicklungsmöglichkeiten in Bezug auf den Ausgangsdruck ergänzt. Darauf aufbauend wurde ein Bedarfsprofil für eine modulare dezentrale Einspeiseeinheit erstellt. Passend zu dem Bedarfsprofil wurde das Basic Engineering für eine modulare Einspeiseeinheit sowie die zugehörige Kostenschätzung entwickelt.

Die Wasserstoffeinspeiseanlage (WSEA) wurde dabei in Gasdruckregel und Messanlage sowie den Verdichtersatz unterteilt und jeweils separat analysiert und geplant. Für die Unterbringung der Technik wurde sich für eine containerbasierte Lösung entschieden. Diese Lösung berücksichtigt die Aspekte einer zentralen Fertigung der GDRM-Anlage, Transport- und Versetzungsmöglichkeiten sowie dem schlüsselfertigen Einkauf der Verdichter. Für die Entwicklung und Festlegung der Parametergrenzen konnte auf Informationen aus verschiedenen Studien zurückgegriffen werden. Dabei bildet insbesondere eine Untersuchung von zukünftige Wasserelektrolyseprojekte und Rahmenparameter

der dezentralen Wasserstoffherzeugung eine fundierte Grundlage, um sowohl die aktuelle Situation als auch die zukünftige Entwicklung berücksichtigen zu können. Aus den ermittelten Parametergrenzen wurden die benötigten Daten zur Erstellung des Bedarfsprofils für eine modulare Einspeiseeinheit abgeleitet. Während die Gastemperatur mit $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$, der Einspeisedruck in das Gasnetz mit 70 bar und die benötigte Reinheit nach PTB TR-G19 mit 99,9 % bereits festgelegt sind, gab es keinen klaren Rahmen bezüglich des Druckniveaus des Wasserstoffs aus der Elektrolyse oder dem zu fördernden Volumenstrom. Daher wurden in den beiden Fällen die Grenzen bei der GDRM-Anlage und Verdichtung untersucht und als Grundlage für das abdeckbare Leistungsspektrum genutzt. Bei der GDRM-Anlage wurde dabei mit unterschiedlichen Durchflussmesstechniken der kompakteste Aufbau untersucht. Dieser konnte in einem 20 Fuß Container mit E-Raum und Gasraum realisiert werden. Begrenzende Faktoren sind hierbei zum einen bestimmte Zählergrößen oder der Rohrleitungs-nenn-durchmesser, wodurch mit einer GDRM-Anlage im 20 Fuß Container eine Elektrolyse bis 30 MWe abgedeckt werden. Da die Kostenersparnis in der Druckstufenauslegung der GDRM-Anlage mit 5.000 € nur einen geringen Unterschied im Gesamtrahmen ergibt, sollte die Druckstufe DP84 als Standard zur Auslegung gewählt werden, wodurch ebenfalls eine höhere Flexibilität bezüglich des Eingangsdrucks gewährleistet ist.

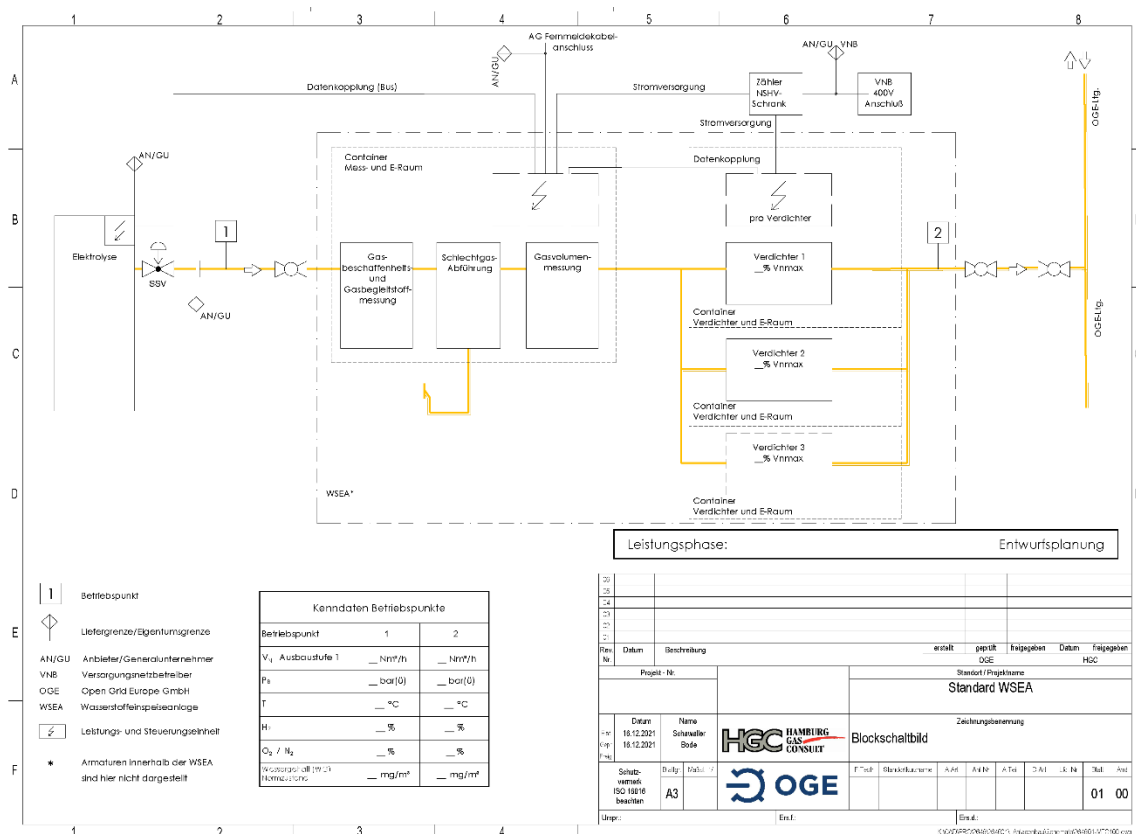


Abbildung III.7.1: Blockschaltbild WSEA

Unter dem Aspekt des abdeckbaren Leistungsspektrums wurden verschiedene Verdichtertechnologien verglichen. Die Zielgröße war ein maximal möglicher Volumenstrom unter der Einschränkung des Platzangebots auf einen 40 Fuß Container. Dabei soll unter Berücksichtigung der technologischen und wirtschaftlichen Aspekte sowie zukünftiger Entwicklungen, eine Technologie für die WSEA ausgewählt werden. Der Vergleich ergab einen aktuell noch deutlichen Vorteil der Kolbenverdichter für die Anwendung in der WSEA. Ein elektrochemischer Verdichter (ECV) ist zum Teil jetzt schon

konkurrenzfähig im Vergleich mit Membranverdichtern, ist jedoch sowohl im CapEx, als auch im OpEx noch deutlich vom Kolbenverdichter entfernt. Zukünftig könnte hier jedoch durch die Weiterentwicklung der ECV hinsichtlich der Volumenstromerhöhung je Stack, Energieeinsparungen, Wartungseinsparungen durch Verlängerung der Membranlebensdauer sowie die Serienfertigung in Großproduktion eine Konkurrenzfähigkeit zum Kolbenverdichter erreicht werden.

Um ein ganzheitliches Verdichtungssystem zu entwickeln, welches für die verschiedensten Ausgangsdrücke der Elektrolyse anwendbar ist, wurde ebenfalls ein Konzept mit Vorverdichtern (Booster) erstellt. Der Booster erhöht den Druck des Wasserstoffs von atmosphärischem Elektrolyse-Ausgangsdruck auf ein höheres Druckniveau von 10 bar. Durch den Einsatz eines Boosters kann unabhängig vom Elektrolyseausgangsdruck ein kompakter, standardisierter Hauptverdichtercontainer realisiert werden. Hierfür wurden Schraubenverdichter mit elektrochemischen Verdichtern verglichen. Dabei zeigte sich der Vorteil eines auf den Transport optimierten ECV gegenüber der Schraubenauslegung, mit den zukünftigen Entwicklungen sollte der Vorteil sich weiter vergrößern. Um also einen ganzheitlichen Lösungsansatz zum Bau solcher Anlagen zu geben, lässt sich aus den aktuellen Daten für den Booster die Verwendung von ECV, für den Hauptverdichter aktuell der Kolbenverdichter, zukünftig bei entsprechender Konkurrenzfähigkeit der ECV, und in der GDRM-Anlage ein Ultraschallzähler im einschienigen Aufbau ableiten, womit Elektrolyseure bis 30 MW abgedeckt werden können.

AP 7.2: Aufwuchs Transportbedarf und Optimierung des Transportsystems

Verdichter haben die Aufgabe, das Druckniveau eines gasförmigen (kompressiblen) Mediums zu erhöhen. In Pipelineanwendungen übernehmen Verdichter dabei mehrere Funktionen:

- Sie kompensieren den Druckverlust, der bei der Durchströmung der Rohrleitung auftritt. Dieser Druckverlust wird maßgeblich von den Eigenschaften der Rohrleitung, dem Medium und dem transportierten Volumenstrom bestimmt.
- Darüber hinaus dienen Verdichter in einem Pipelinenetz zur Steuerung der auftretenden Gasflüsse: Sie beeinflussen sowohl die Flussrichtung als auch die Flussgeschwindigkeit bzw. die transportierten Volumenströme.
- Zusätzlich können Verdichter auch zur Energiespeicherung eingesetzt werden: Durch die Erhöhung des Drucks in einer Pipeline wird auch die Menge des transportierten Mediums und somit der Energieinhalt erhöht. Solche temporären Druckerhöhungen werden zum Beispiel dafür genutzt, um kurzfristige Spitzenlasten zu kompensieren. Dieser Effekt wird häufig mit dem englischen Begriff „Line Packing“ bezeichnet.

Für die Verdichtung von Wasserstoff kommen sowohl Verdrängerverdichter als auch dynamische Verdichter in Frage.

Verdrängerverdichter arbeiten, indem sie das Gas in eine oder mehrere Verdichtungskammern ansaugen, deren Einlass anschließend geschlossen wird. Das geometrische Volumen der Kammern nimmt ab, und das Gas darin wird komprimiert. Bei Verdrängerverdichtern hängt das maximal erreichbare Druckverhältnis nicht von der molaren Masse des Gases ab, sondern nur von der Volumenreduzierung.

Dynamische Verdichter hingegen saugen das Gas in ein oder mehrere Verdichtungsaufräder an und beschleunigen es auf eine hohe Geschwindigkeit. Das Gas wird anschließend durch einen Diffusor geleitet, wo die kinetische Energie in statischen Druck umgewandelt wird. In diesem Fall haben die Eigenschaften des verdichteten Gases einen großen Einfluss auf den Verdichtungsprozess.

Insbesondere hat die molare Masse einen starken Einfluss auf das maximal erreichbare Druckverhältnis.

Zum Antrieb eines Verdichters wird eine geeignete Antriebsmaschine benötigt. Die Auswahl der Antriebsmaschine richtet sich in der Regel nach der spezifischen industriellen Anwendung des Verdichters. Im Fall des leitungsgebundenen Wasserstofftransports kommen sowohl Elektromotoren als auch Gasturbinen als Antriebe in Frage.

Elektromotoren sind eine etablierte Technologie, die seit über hundert Jahren in vielen Industriezweigen eingesetzt wird. Sie erfordern ein zuverlässiges und hoch verfügbares Stromnetz und lassen sich über einen breiten Drehzahlbereich mit gutem Wirkungsgrad betreiben. Um die Drehzahl eines Elektromotors zu variieren, ist jedoch ein Frequenzumrichter notwendig. Frequenzumrichter benötigen einen geeigneten Aufstellungsort (safe area und klimatisiert) und müssen gekühlt werden. Abgesehen von der Abwärme emittieren Frequenzumrichter elektromagnetische Strahlungen. Der größte Vorteil von Elektromotoren ist ihr sehr breiter Einsatzbereich bei gleichzeitig gutem bis sehr gutem Wirkungsgrad. Hinzu kommt, dass Elektromotoren selbst keine klimaschädlichen Gase emittieren.

Gasturbinen zeichnen sich besonders durch ihre hohe Energiedichte und ihre Unabhängigkeit von externen Energiequellen aus. Bei Pipelineanwendungen ist in der Regel das Brenngas direkt in der Pipeline verfügbar. Die für den Betrieb der Gasturbine erforderliche elektrische Energie kann durch kleine Generatoren bereitgestellt werden, sodass die Gasturbine auch ohne ein stabiles elektrisches Netz betrieben werden kann.

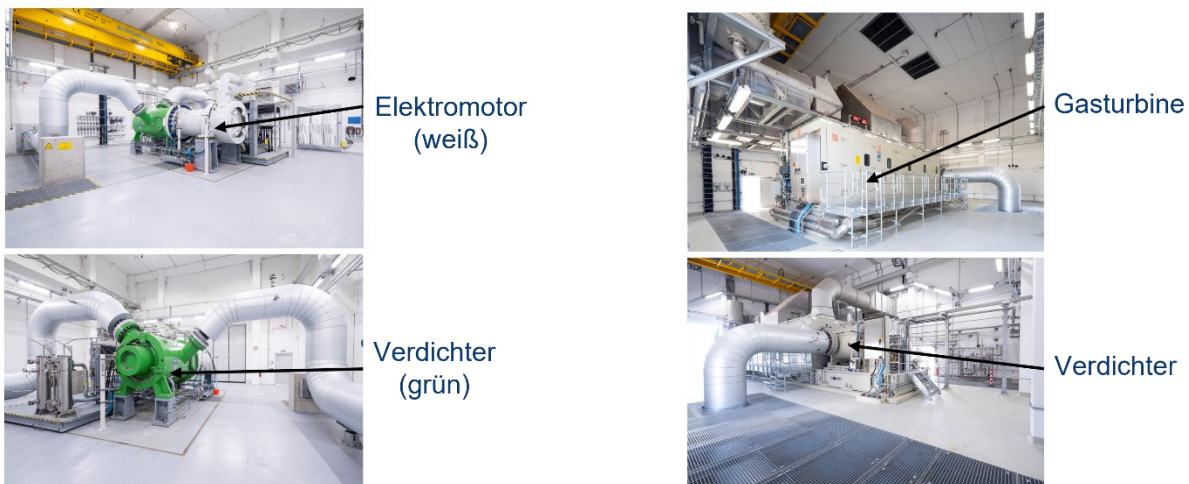


Abbildung III.7.2: Beispiele für Erdgasverdichter und Antriebe

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden Arbeitspunkte (Kombination aus Eingangsdruck vor der Verdichtung, gewünschtem Ausgangsdruck nach der Verdichtung und gleichzeitig auftretendem Volumenstrom) für potenzielle Wasserstoffverdichter definiert und darauf aufbauend passende Maschinenkonfigurationen ausgearbeitet. Ursprung der Arbeitspunkte ist eine strömungsmechanische Rechnung für das Ende 2021 vom FNB Gas veröffentlichten visionären Wasserstoffnetz (Abbildung III.7.3). Beim handelt es sich um einen Entwurf der deutschen Fernleitungsnetzbetreiber für ein mögliches Wasserstoffnetz im Jahr 2050.

Auf den beiden Karten ist das visionäre Wasserstoffnetz mit den Kopf- (pink) und Zwischenverdichtern (grün) dargestellt. Insgesamt wurden 22 Transportfälle von Kapazitäten von 1,8 bis 22 GW und Verdichtungsverhältnissen (Quotient aus Ausgangs- und Eingangsdruck) von 1,1 bis 2,1 betrachtet.

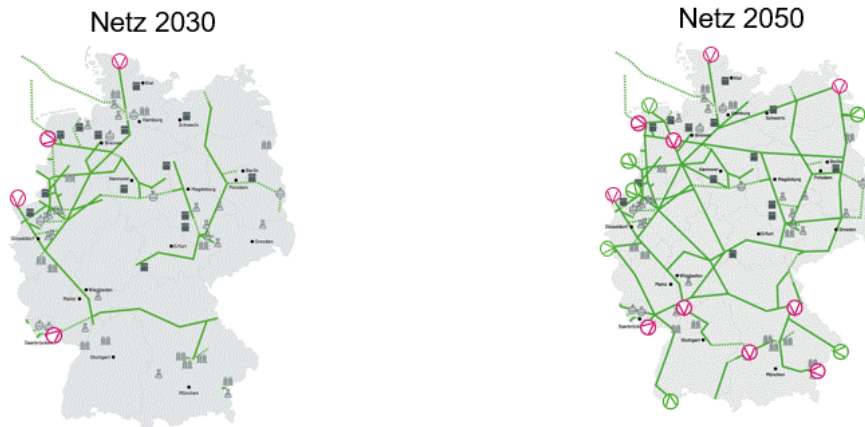


Abbildung III.7.3: Visionäres Wasserstoffnetz

Für ausgewählte Arbeitspunkte wurde durch einen Verdichterhersteller eine technische Studie zu möglichen Verdichtertechnologien und deren Antrieben erstellt. Die Auswahl der Maschinenkonfiguration erfolgte nach dem folgenden Schema (Abbildung III.7.4):

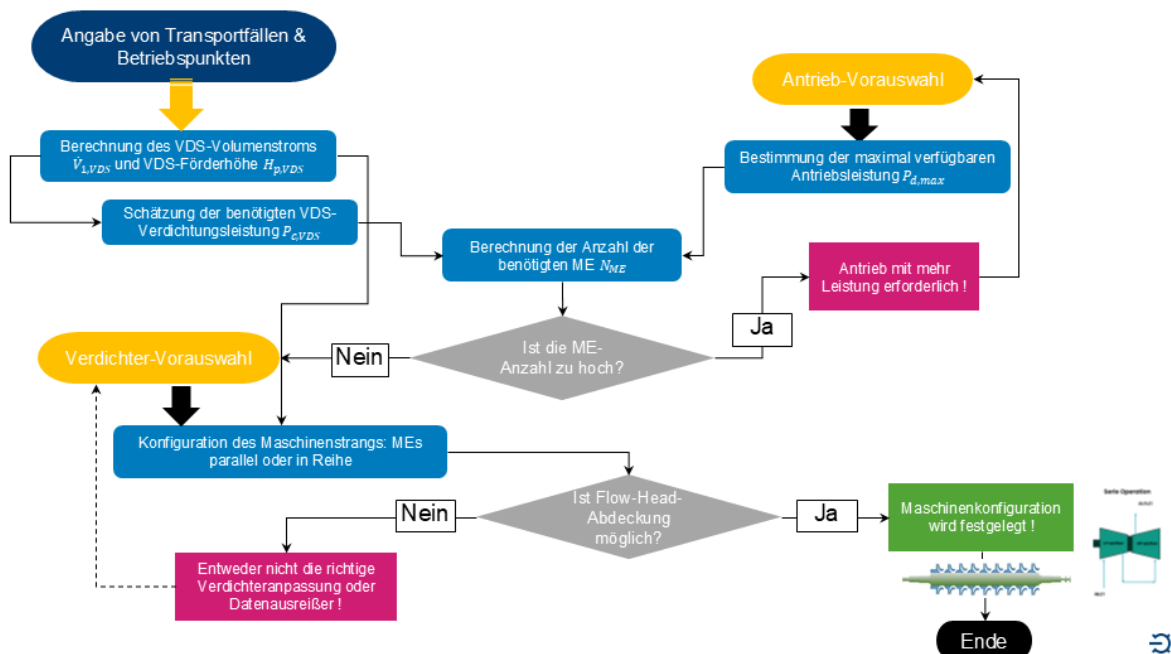


Abbildung III.7.4: Schema der in der Studie empfohlenen Maschinenkonfiguration

Die Studie des Verdichterherstellers zeigt, dass Turboverdichter zur Verfügung stehen, die Wasserstoff mit einer akzeptablen Komplexitätssteigerung in Bezug auf das Getriebe und die Anzahl der Stufen, verdichten können. Es stehen Gasturbinen zur Verfügung, die ohne signifikanten Mehraufwand an Hilfssystemen mit Wasserstoff betrieben werden können. Gekapselte Verdichter mit Elektromotoren als Antrieb waren zum Zeitpunkt der Studie noch nicht verfügbar.

In einem weiteren Teil des Arbeitspakets wurden eine Reihe strömungsmechanischer Rechnungen für verschiedene Netzkonfigurationen durchgeführt. Darauf aufbauend wurden allgemeine Folgerungen für den Transport von Wasserstoff abgeleitet.

Die strömungsmechanischen Rechnungen umfassten zwei Blöcke: Basis- und Optimierungsrechnungen.

In der **Basisrechnungen** wurde der Druckabfall über eine 1000 km lange Leitung bei verschiedenen Durchmessern (800 mm bis 1400 mm) und unterschiedlich hohen Transportleistungen (5 GW bis 20 GW) bestimmt. Reichte eine einfache Leitung nicht aus, um die vorgegebene Transportaufgabe zu erfüllen, erfolgte ein Ausbau. Dazu wurden entweder Leitungsloops parallel zur vorhandenen Leitung oder Verdichter an geeigneter Stelle eingeplant. Für alle Kombinationen wurden die spezifischen Transportkosten berechnet. In den **Optimierungsrechnungen** wurden für das Netz des Projekts GETH2 Nukleus zeitlich instationäre Rechnungen durchgeführt.

Im Rahmen der Analyse wurden drei Varianten des Transportnetzes untersucht, um das jeweilige Potenzial hinsichtlich Kapazität und Flexibilität zu bewerten (Abbildung III.7.5). Die Kapazität definiert das maximale Transportvermögen eines Erdgas- bzw. Wasserstoffnetzes. Unter Flexibilität versteht man die zulässige Änderung des Netzinhalts zur Kompensation zeitlich variierender Ein- und Ausspeisungen. Beide Parameter sind voneinander abhängig.

Wie bereits in der Basisrechnung wurden verschiedene Ausbauszenarien betrachtet: ein Netz ohne Erweiterung, eines mit einer zusätzlichen Looleitung zwischen Bad Bentheim und Dorsten sowie eines mit einem Verdichter am Standort Ochtrup. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in der nachfolgenden Abbildung gezeigt. Die Kurven verdeutlichen für jede Variante, welche Flexibilität bei unterschiedlichen Kapazitäten jeweils möglich ist. So zeigt sich zum Beispiel bei einer Kapazität von 1 GW folgende Flexibilität:

- Variante 1: 1,1 GWh
- Variante 2: 4,2 GWh
- Variante 3: 1,9 GWh

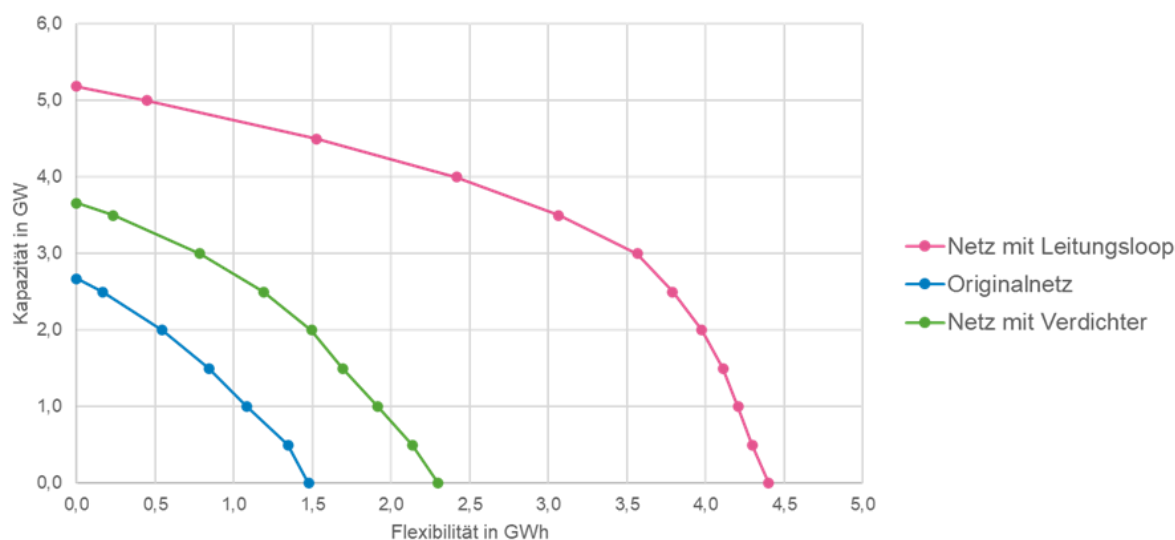


Abbildung III.7.5: Varianten des Transportnetzes

Die geringsten Kapazitäten und Flexibilitäten bietet Variante 1 (Originalnetz). Variante 2 steigert die Kapazität durch einen Verdichter um bis zu 1 GW und die Flexibilität um bis zu 0,8 GWh. Variante 3 (Loopleitung) erreicht die höchsten Werte mit einer Kapazitätssteigerung von bis zu 2,5 GW und einer Erhöhung der Flexibilität um 2,9 GWh.

IV. Wesentliche Ergebnisse

IV.1 Arbeitspaket 1: Koordination, Kommunikation, Ergebnissynthese

Die Koordination stellte kontinuierlich und engmaschig die verlässliche organisatorische und inhaltliche Steuerung des Verbundes sicher, einschließlich der Erstellung des Kooperationsvertrags, der Quartalsberichte und der Planung aller Verbundtreffen. Durch kontinuierliche Abstimmungsrunden innerhalb des Projektes sowie mit anderen TransHyDE-Verbänden konnten Synergien genutzt, gemeinsame Fragestellungen bearbeitet und die Arbeiten strategisch ausgerichtet werden. Wesentliche Beiträge leistete AP 1 zudem zur Vorbereitung der Vollversammlungen und der Abschlusskonferenz sowie zur inhaltlichen und konzeptionellen Ausrichtung der Säule II („Transportnetze & Speicher“) im Rahmen von TransHyDE 2.0“, die die Grundlage für ein neues Verbundkonzept bildete. In der externen Kommunikation wurde das Projekt in der Fachöffentlichkeit sichtbar gemacht, Pressekonferenzen durchgeführt und zahlreiche Fachbeiträge, Präsentationen und Workshops organisiert, wodurch der Austausch mit Industrie, Wissenschaft und Politik intensiviert wurde. Die Projektkoordination war auf zahlreichen nationalen und internationalen Fachveranstaltungen vertreten und brachte sich aktiv in Diskussionen zu regulatorischen, technischen und analytischen Fragestellungen zur Wasserstoffinfrastruktur ein. Darüber hinaus fanden Beiträge in wissenschaftlichen Publikationen, Fachzeitschriften und dem TransHyDE-Newsletter statt, wodurch Projektergebnisse kontinuierlich verbreitet wurden. Ergebnisorientiert wurden der fachliche Fortschritt sowie zentrale Erkenntnisse des Verbundes regelmäßig für Workshops, Konferenzen und Vollversammlungen aufbereitet und in Vorträgen, Postern und moderierten Sessions dargestellt. Insgesamt konnten alle geplanten Arbeiten in AP 1 vollständig umgesetzt werden, und die erzielten

Ergebnisse trugen maßgeblich zur inhaltlichen Weiterentwicklung von TransHyDE und zu Folgeprojekten wie „H₂-Readiness von LNG-Terminals“ bei.

IV.2 Arbeitspaket 2: Aufbau und Betrieb der Versuchsumgebung

AP 2.1: Aufbau und Betrieb der Wasserstoffversorgung

Im Rahmen des Arbeitspakets 2.1 konnte das zentrale Projektziel, nämlich die Errichtung und Inbetriebnahme einer Wasserstoffversorgungsinfrastruktur auf Basis eines Elektrolyse-Demonstrators, erfolgreich erreicht werden. Die Gesamtanlage, bestehend aus Elektrolyseur, Verdichter sowie verschiedenen Nebenaggregaten, wurde vollständig in die bestehende Kraftwerksinfrastruktur integriert und arbeitet mittlerweile im regulären Betrieb.

Nach Abschluss der baulichen Maßnahmen konnte die gesamte Wasserstoffversorgungsanlage installiert und schrittweise in Betrieb genommen werden. Die erste erfolgreiche Wasserstoffproduktion bestätigte die Funktionsfähigkeit des Systems. Durch die Integration einer speziellen Trocknungseinheit wurde zudem sichergestellt, dass die geforderte Wasserstoffqualität zuverlässig erreicht wird. Sämtliche behördlichen und technischen Zulassungen sowie Prüfungen – unter anderem durch den TÜV und den DVGW – wurden erlangt und ordnungsgemäß dokumentiert.

Darüber hinaus wurde das System im Projektverlauf unter realen Betriebsbedingungen getestet. Der erfolgreiche Lastbetrieb des Verdichters sowie die vollständige Einbindung in die Kraftwerksprozesse bestätigen die Betriebsreife der Anlage. Um flexible Betriebsabläufe zu ermöglichen und gleichzeitig die empfindliche SOEC-Technologie zu schützen, wurden zusätzliche Versorgungskonzepte eingerichtet, beispielsweise über Flaschenbündel zur Nachfüllung. Nach Abschluss der Projektlaufzeit ist die Anlage nun dauerhaft in die bestehende Infrastruktur integriert und steht für eine Vielzahl von Tests und weiteren Versuchen zur Verfügung.

Wasserstoffherzeugungsanlage

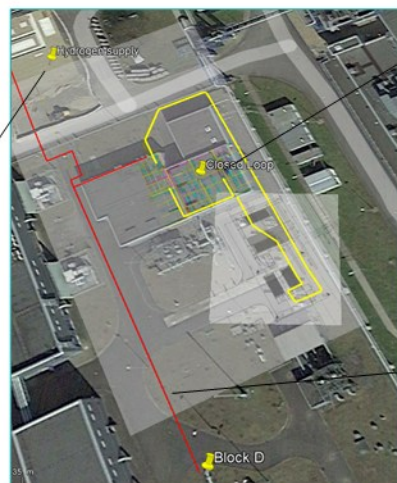
- Hochtemperatur-Elektrolyseur SOEC (250 kW)
- Kompressor System (Kolbenkompressor)
- Nebenaggregate (z. B. Stickstofftank, Trocknungsanlage)

Hydrogen supply

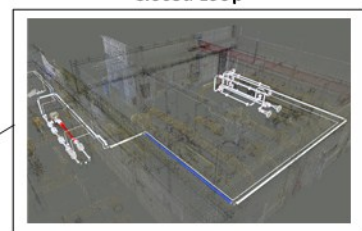


Wasserstofftestumgebung (Closed Loop)

- Materialprüfungen (RWE Power)
- Durchflussmengenprüfungen (OGE)
- Reinheitsprüfungen (OGE)



Closed Loop



Power plant connection

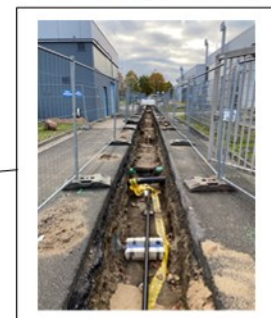


Abbildung IV.2.1: Errichtete Wasserstoffinfrastruktur im Projekt TransHyDE am Standort Lingen

Trotz der erfolgreichen Umsetzung zentraler Projektziele war der Verlauf des Arbeitspakets von mehreren Herausforderungen geprägt, die zu deutlichen Verzögerungen und Anpassungsbedarfen führten. Besonders ins Gewicht fiel die verspätete Erteilung des Förderbescheids, die den Projektstart erheblich verzögerte. Hinzu kamen langwierige Lieferzeiten für zentrale Anlagenkomponenten wie Verdichter und Elektrolyseur. Während die Inbetriebnahme ursprünglich für Anfang 2022 vorgesehen war, konnte der entsprechende Meilenstein letztlich erst im Frühjahr 2025 erreicht werden, was einer Abweichung von rund 37 Monaten entspricht. Zusätzlich erschwerte ein Defekt am Elektrolyseur den Projektfortschritt und führte zu einer mehrere Monate dauernden Unterbrechung des Betriebs. Diese Phase konnte lediglich durch temporäre Umstellungen, insbesondere eine interimistische Versorgung über Wasserstofftrailer, überbrückt werden. Parallel dazu wirkten sich inflationsbedingte Preissteigerungen sowie unvorhergesehene Mehraufwände belastend auf das Budget aus, wobei zeitweise Unsicherheiten in der Kostenprognose bestanden.

Trotz dieser Schwierigkeiten konnten im Projektverlauf mehrere bedeutende Erfolge erzielt werden. Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Integration der innovativen SOEC-Technologie sowie deren Betrieb in Kombination mit dem Verdichter – ein Meilenstein, der sowohl technologisch als auch betrieblich anspruchsvoll war. Ergänzend wurden flexible technische Anpassungen vorgenommen, um Nutzung und Betriebssicherheit zu optimieren, darunter die Installation einer leistungsfähigen Trocknungseinheit sowie die Entwicklung alternativer Nachfüllkonzepte. Die Zusammenarbeit mit Genehmigungsbehörden und Prüforganisationen verlief durchweg konstruktiv und effizient, selbst bei kurzfristig auftretenden Problemstellungen. Darüber hinaus zeigte das Projektteam eine hohe technische und organisatorische Reaktionsfähigkeit im Umgang mit Defekten, Lieferengpässen und herausfordernden Marktbedingungen, wodurch der Projektfortschritt trotz widriger Rahmenbedingungen gesichert werden konnte.

AP 2.2: Aufbau und Betrieb der Versuchspipeline

Im Arbeitspaket 2.2 wurde die bestehende Gasinfrastruktur erfolgreich zu einer Wasserstoff-Testpipeline – dem Closed Loop System DN100 (CLS100) – umgewidmet und für den Testbetrieb qualifiziert. Dies gelang trotz zahlreicher technischer, organisatorischer und sicherheitsrelevanter Herausforderungen, die den Projektverlauf zeitweise stark beeinflussten. Die Detailplanung sowie die bauliche Umsetzung der Versuchspipeline wurden vollständig abgeschlossen. Sämtliche Komponenten, darunter das Gebläse, die Messstrecken und die Containerinfrastruktur, konnten installiert und nach umfangreichen Prüfungen erfolgreich in Betrieb genommen werden. Die integrierte Messtechnik sowie die vorgesehenen Teststrecken ermöglichten es, den systematischen Betrieb für die nachgelagerten Arbeitspakete zu Qualitäts- und Mengemessung sowie zur Werkstoffverträglichkeit aufzunehmen.

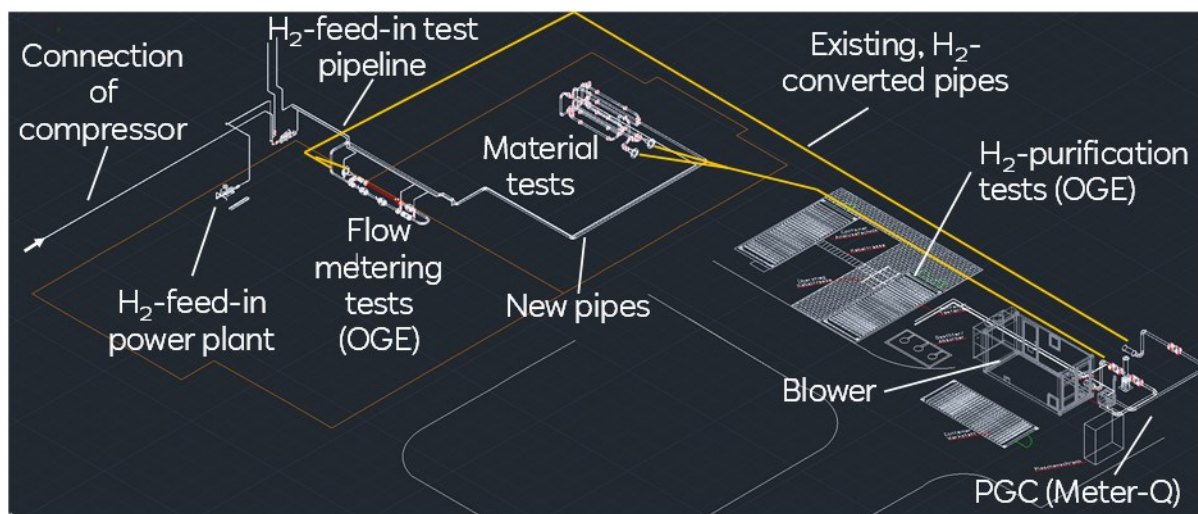


Abbildung IV.2.2: Schematische Darstellung der Wasserstoff Teststrecke TransHyDE in Lingen sowie den Schnittstellen



Abbildung IV.2.3: Gebläse zur Umwälzung des Wasserstoffs (links) Rohrsegmente der Teststrecke für Materialtests (rechts)

Während der Errichtung der Pipeline wurden verschiedene bautechnische und mechanische Defekte identifiziert, etwa Undichtigkeiten oder Probleme mit der Magnetkupplung. Nach deren Behebung und einer Reihe von Funktionstests sowie Zulassungsprüfungen konnte die Anlage schließlich unter realistischen Bedingungen betrieben werden. Technische Anpassungen an Gebläse und Laufrad stellten sicher, dass auch bei begrenzter Maximaldrehzahl eine stabile Druckdifferenz erreicht werden konnte. Zudem bewies das Projektteam hohe Professionalität durch seine schnelle und strukturierte Reaktion auf unerwartete Funde wie Black Powder oder Quecksilberbelastungen in der Leitung, die umfangreiche Arbeitsschutzmaßnahmen und zusätzliche Abstimmungen mit Prüfinstitutionen erforderlich machten.

Gleichzeitig war AP 2.2 von deutlichen Verzögerungen geprägt. Lieferschwierigkeiten bei zentralen Komponenten sowie die Entdeckung gesundheitsgefährdender Substanzen in der bestehenden Infrastruktur führten zu mehrfachen Verschiebungen der Meilensteine. Die Inbetriebnahme der Testpipeline, ursprünglich deutlich früher geplant, konnte letztlich erst im Juli 2025 erfolgen. Hinzu kamen wiederholte Reparaturen und Optimierungsmaßnahmen an Gebläse und Magnetkupplung, die nicht nur Zeit, sondern auch erhebliche personelle und finanzielle Ressourcen beanspruchten. Durch die verspätete Fertigstellung konnten nachgelagerte Arbeiten in den Arbeitspaketen 3 und 4 erst

deutlich verzögert starten. Zudem mussten aufgrund zusätzlicher Aufwände, Inflationsauswirkungen und technischer Anpassungen die Projektkosten laufend aktualisiert und dokumentiert werden.

Trotz dieser Herausforderungen zählt AP 2.2 zu den zentralen Erfolgsbausteinen des Gesamtprojekts. Das Closed Loop System DN100 wurde sicher und vollständig in den Regelbetrieb überführt und bietet den Projektpartnern eine flexible, parametrierbare Testumgebung für vielfältige Untersuchungen. Die erfolgreiche Umsetzung innovativer Lösungen bei Bauteilproblemen und Messkonzepten verdeutlicht die technische Kompetenz des Projektteams. Darüber hinaus trug die konsequente Organisation von Arbeitsschutzmaßnahmen sowie die enge Zusammenarbeit mit Prüfinstitutionen wesentlich zur sicheren und qualitativ hochwertigen Realisierung des Systems bei.

IV.3 Arbeitspaket 3: Arbeitspaket Qualitäts- und Mengenmessung

AP 3.1 Überwachung der Gasbeschaffenheit

Die Arbeiten im Unterarbeitspaket AP 3.1 führten zu einer erfolgreichen technischen und methodischen Grundlage für die zuverlässige Probenahme und Qualitätsbestimmung von Wasserstoff in Labor- und Praxisumgebungen. Die Untersuchungen zur Probenahmetechnik zeigten eindeutig, dass die Druckwechselspülung mit evakuierten und thermisch behandelten Gasflaschen die höchste Probenintegrität gewährleistet und Kontaminationen effizient minimiert. Dieses Verfahren bildet damit die Grundlage für normgerechte Entnahmeprozesse im Projektkontext. In Tabelle IV.3.1 ist der Einfluss der Probenahme auf die Probenzusammensetzung beispielhaft dargestellt. Hierzu wurde durch DVGW-EBI eine realitätsnahe Probenahme an einer Wasserstoffflasche durchgeführt und die Gasqualitäten beider Flaschen untersucht. Hierbei zeigt sich, dass trotz mehrfachen Flaschenhandlings und realer Betriebsbedingungen, der Einfluss der Probenahme äußerst gering ist. Durch eine angepasste Spülprozedur konnte der Einfluss auf die Probe nochmals verringert werden, so dass dieser innerhalb der Messunsicherheiten der Laboranalysen liegt. Um die Integrität der Probenahme abzuschätzen wurden vor allem die Leitkomponenten der Luft (N_2 , O_2 und Ar) betrachtet, da sie bei Undichtigkeiten und unzureichenden Spülzyklen als erstes in der Probe nachweisbar wären. Des Weiteren wurden CO , CO_2 und Helium als modellhafte Verunreinigungen herangezogen, da CO und CO_2 stabil und gut zu analysieren sind. Helium, als Gas mit der zweitgeringsten Dichte, welches zudem in grauem Wasserstoff vorkommt, wäre bei geringsten Undichtigkeiten entwichen was noch vor CO und CO_2 zu einem Minderbefund geführt hätte.

Tabelle IV.3.1: Darstellung des Einflusses der Probenahme auf die Probe (vor Anpassung der Spülzyklen)

Analyt	H ₂ Quelle	H ₂ Probe	Δ Quelle/Probe
N ₂	3,6 μmol/mol	5,1 μmol/mol	+ 1,5 μmol/mol
O ₂	0,32 μmol/mol	0,99 μmol/mol	+ 0,67 μmol/mol
He	27 μmol/mol	27 μmol/mol	± 0 μmol/mol
Ar	0,1 μmol/mol	0,1 μmol/mol	± 0 μmol/mol
CO	n.n.	n.n.	± 0 μmol/mol
CO ₂	n.n.	n.n.	± 0 μmol/mol

n.n.: nicht nachgewiesen

Die implementierten massenspektrometrischen Analysensysteme erwiesen sich als äußerst leistungsfähig hinsichtlich der Erfassung von Gasbegleitstoffen und Verunreinigungen, sowie der Bestimmung besonders niedriger Nachweisgrenzen. Die Validierung gemäß ISO 21087 bestätigte die Richtigkeit und Rückführbarkeit der Messungen und ermöglichte die Prüfung der Grenzwerte der Gruppe D nach DIN EN 17124 ($H_2 \geq 99,97$ Mol-%).

Das Messprinzip der Massenspektroskopie beruht auf der Ionisierung und Fragmentierung von Molekülen oder Atomen, welche anschließend in elektrischen oder magnetischen Feldern gemäß ihrem Masse-zu-Ladungs-Verhältnis (m/z) separiert werden. Aus dem resultierenden Massenspektrum können sowohl die qualitative Zusammensetzung als auch die Konzentrationen einzelner Komponenten präzise abgeleitet werden.

Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich jedoch eine methodische Einschränkung, die insbesondere die Bestimmung von Kohlenmonoxid (CO) betrifft. Mit einer Molekülmasse von 28,01 g/mol entspricht CO nahezu exakt der Molekülmasse von Stickstoff (N_2), was zu einer Überlagerung der Massensignale führen kann. Diese Interferenz wirkt sich besonders im mittleren bis niedrigen ppb-Konzentrationsbereich aus und resultiert in deutlich schwankenden Messwerten und erhöhter Messunsicherheit. Damit stellt die verlässliche Quantifizierung von CO mittels massenspektrometrischer Verfahren eine besondere analytische Herausforderung dar, die bei der Interpretation der Ergebnisse und bei der Auswahl geeigneter Messstrategien berücksichtigt werden muss. Auch die Bestimmung des nach DIN EN 17124 normativ geforderten Grenzwerts von 5 $\mu\text{mol/mol}$ (ppm) H_2O , lässt sich mit der Gerätekonfiguration nicht ohne weiteren apparativen Aufwand erreichen. Hierzu haben sich andere Analysemethoden, wie z.B. spektroskopische Verfahren wie CRDS und OFCEAS, als deutlich geeigneter erwiesen. Diese wurden zusätzlich etabliert und erweitern das Spektrum der verfügbaren präzisen Messtechnik.

Die Ergebnisse der Marktrecherche und Gerätevalidierung zeigten, dass massenspektrometrische und schwingungsspektroskopische Verfahren aktuell die leistungsfähigsten Technologien zur Überwachung der Wasserstoffqualität darstellen. In Tabelle IV.3.2 bis Tabelle IV.3.4 sind beispielhaft die Messergebnisse unterschiedlicher Wasserstoffproben (DVGW-EBI) dargestellt. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass etablierte Erdgasanalytik-Methoden ohne umfassenden Anpassungsbedarf für Wasserstoffproben, vor allem für die Qualitätsanforderungen der Gruppe A (gem. DVGW-Arbeitsblatt G 260) nutzbar sind und zukünftig in den jeweiligen Normrevisionen berücksichtigt werden sollten.

Tabelle IV.3.2: Messergebnisse (exemplarisch) kommerzieller Flaschengase unterschiedlicher Qualitätsstufen (DVGW-EBI)

Analyt	H ₂ 5.0 ≥ 99,999 % (inkl. Edelgase)		H ₂ 7.0 ≥ 99,99999 % (inkl. Edelgase)	
	Sollwert	Messwert	Sollwert	Messwert
CO ₂	< 1 $\mu\text{mol/mol}$	< Nwg.	≤ 0,03 $\mu\text{mol/mol}$	< Nwg.
CO	< 1 $\mu\text{mol/mol}$	n.n.	≤ 0,03 $\mu\text{mol/mol}$	n.n.
CH ₄	< 0,1 $\mu\text{mol/mol}$	n.n.	≤ 0,03 $\mu\text{mol/mol}$	n.n.
He	k.A.	27,5 $\mu\text{mol/mol}$	k.A.	2,9 $\mu\text{mol/mol}$

	H ₂ 5.0 ≥ 99,999 % (inkl. Edelgase)		H ₂ 7.0 ≥ 99,99999 % (inkl. Edelgase)	
N ₂	< 5 µmol/mol	3,9 µmol/mol	k.A.	< Nwg.
O ₂	< 1 µmol/mol	< Nwg.	≤ 0,03 µmol/mol	< Nwg.
Ar	k.A.	< Nwg.	k.A.	n.n.
H ₂ O	< 5 µmol/mol	0,2 µmol/mol	≤ 0,05 µmol/mol	0,05 µmol/mol

n.n.: nicht nachgewiesen, k.A.: keine Angabe, Nwg.: Nachweisgrenze

Die Untersuchungen kommerzieller Wasserstoffgase zeigten, dass die im Projekt etablierte Wasserstoffanalytik in den Laboren der Projektpartner in der Lage ist, selbst diese hohen Reinheitsanforderungen zu untersuchen und nachzuweisen. Dies diente als Benchmark zur Einordnung der Analysemethoden in erster Näherung. Mit weiteren Analysen realitätsnaher Wasserstoffproben aus unterschiedlicher H₂-Infrastruktur die zu Forschungszwecken – nicht im Rahmen dieses Forschungsprojekts – betrieben wurde, konnte gezeigt werden, dass die Analysen- und Probenahmemethoden vollumfänglich für die Bestimmung der Gasbeschaffenheit von Wasserstoff der Gruppen A und D geeignet sind. Zusätzlich zeigte die Analyse des Wasserstoffs, welcher im Test-Loop auf dem Gelände der RWE in Lingen innerhalb des Forschungsprojekts betrieben wurde, eine deutlich höhere Wasserstoffqualität als die geforderte Gruppe A. Nach einem anfänglichen Betrieb des Loops mit Wasserstoff aus einem Elektrolyseur und der späteren Nachfüllung aus Flaschenbündeln (H₂ 3.0) stellte sich eine Gasqualität von 99,822 Mol-% ein. Dies war zum einen auf die vielen Arbeiten am Loop wie z.B. dem Aus- und Einbau von Materialproben oder anderen projektbezogenen Arbeiten zurückzuführen. Jedoch auch die Beschaffenheit des Loops zeigte einen Einfluss auf die auf die Gasqualität. Vor allem der Nachweis sehr geringer Konzentrationen an Schwefelverbindungen ließ sich höchstwahrscheinlich auf Bauteile des Loops mit Erdgashistorie zurückführen. Die nachgewiesenen Spuren an Ammoniak waren auf die Versuche zur adsorptiven Aufreinigung der OGE im Rahmen des AP 3.2 zurückzuführen.

Die im Projekt erarbeiteten Messmethoden wurden erfolgreich in den Laboralltag beider Projektpartner und den praktischen Betrieb des Test-Loops überführt. Die Analysen der u.a. aus dem Test-Loop entnommenen Proben bestätigten die Anwendbarkeit der entwickelten Methoden unter praxisnahen Bedingungen. Darüber hinaus leistete das erarbeitete Whitepaper einen wichtigen Beitrag zur einheitlichen Bewertung analytischer Herausforderungen im Verbundprojekt TransHyDE. Insgesamt wurden damit robuste, normkonforme Mess- und Probenahmeverfahren geschaffen, die eine akkreditierungsfähige Grundlage für die zukünftige Qualitätsüberwachung von Wasserstoff darstellen.

Tabelle IV.3.3: Messergebnisse realitätsnaher Wasserstoffproben unterschiedlicher Herkunft, mit Gegenüberstellung zu normativ geforderten Grenzwerten gem. DVGW G 260 (A); 5. Gasfamilie, Gruppe A (DVGW-EBI)

Bestandteil	DVGW G 260 (A) H ₂ Gruppe A	H ₂ Infrastruktur (Forschung)	H ₂ Netz (Forschung)	H ₂ Test-Loop RWE Lingen
Wasserstoff	≥ 98 Mol-%	99,8631 Mol-%	< 99,8307 Mol-%	99,822 Mol-%
Nicht-Wasserstoff- Gase gesamt	2 Mol-% (≙ 20.000 µmol/mol)	0,1369 Mol-% (≙ 1369 µmol/mol)	> 0,1693 Mol-% (≙ > 1693 µmol/mol)	0,1780 Mol-% (≙ 1780 µmol/mol)

Bestandteil	DVGW G 260 (A) H ₂ Gruppe A	H ₂ Infrastruktur (Forschung)	H ₂ Netz (Forschung)	H ₂ Test-Loop RWE Lingen
Maximale Konzentration der einzelnen Verbindungen				
Wasser	MOP > 10 bar: 50 mg/m ³ (\cong 65,6 μ mol/mol)	3,9 μ mol/mol	> 55 μ mol/mol	23,5 μ mol/mol
Kohlenwasser- stoffe	Kondensationspunkt -2 °C bei $1 \leq p_{\text{abs}} \leq 70$ bar	THC exkl. CH ₄ n.n.	THC exkl. CH ₄ n.n.	THC exkl. CH ₄ 0,9 μ mol/mol
Methan		n.n.	2,0 μ mol/mol	0,1 μ mol/mol
Sauerstoff	MOP > 16 bar: 0,001 Mol-% (\cong 10 μ mol/mol)	6,9 μ mol/mol	43 μ mol/mol	5,2 μ mol/mol
Helium	k.A.	26 μ mol/mol	26 μ mol/mol	23 μ mol/mol
Stickstoff	k.A.	1330 μ mol/mol	1553 μ mol/mol	1721 μ mol/mol
Argon	k.A.	2 μ mol/mol	13 μ mol/mol	10 μ mol/mol
Kohlenstoffdioxid	k.A.	0,31 μ mol/mol	1,11 μ mol/mol	0,34 μ mol/mol
Kohlenstoff- monoxid	0,1 Mol-% (\cong 1000 μ mol/mol)	0,014 μ mol/mol	0,045 μ mol/mol	0,104 μ mol/mol
Gesamt-Schwefel & Schwefelverbindun- gen	10 mg/m ³ (\cong 7 μ mol/mol)	n.n.	n.n.	0,046 μ mol/mol
Formaldehyd	k.A.	n.n.	n.n.	0,079 μ mol/mol
Methansäure	k.A.	n.n.	n.n.	n.n.
Ammoniak	10 mg/m ³ (\cong 13 μ mol/mol)	n.n.	n.n.	3,4 μ mol/mol
Halogenierte Verbindungen (Halogenionen- Basis)	0,05 μ mol/mol	n.n.	n.n.	0,01 μ mol/mol
Maximale Schwebstoffteilche n-Konzentration	Technisch Frei	-	-	-

n.n.: nicht nachgewiesen, k.A.: keine Angabe

Tabelle IV.3.4: Messergebnisse realer Wasserstoffproben unterschiedlicher Herkunft, mit Gegenüberstellung zu normativ geforderten Grenzwerten gem. DIN EN 17124; Gruppe D (DVGW-EBI)

Bestandteil	Einheit	DIN EN 17124 Gruppe D	H ₂ Infrastruktur (Forschung)	H ₂ Netz (Forschung)	H ₂ Test-Loop RWE Lingen
Wasserstoff	Mol-%	99,97	99,8631	< 99,8307	99,822
Nicht-Wasserstoff-Gase gesamt	μ mol/mol	300	1369	> 1693	1780

Bestandteil	Einheit	DIN EN 17124 Gruppe D	H ₂ Infrastruktur (Forschung)	H ₂ Netz (Forschung)	H ₂ Test-Loop RWE Lingen
Maximale Konzentration der einzelnen Verbindungen					
Wasser H ₂ O	μmol/mol	5	3,9	> 55	23,5
Kohlenwasserstoffe gesamt (THC, außer Methan)	μmol/mol	2	n.n.	n.n.	0,9
Methan CH ₄	μmol/mol	100	n.n.	2	0,1
Sauerstoff O ₂	μmol/mol	5	6,9	43	5,2
Helium He	μmol/mol	300	26	26	23
Stickstoff N ₂	μmol/mol	300	1330	1553	1719
Argon Ar	μmol/mol	300	2	13	10
Kohlenstoffdioxid CO ₂	μmol/mol	2	0,31	1,11	0,34
Kohlenstoffmonoxid CO	μmol/mol	0,2	0,014	0,045	0,104
Schwefelverbindungen gesamt auf H ₂ S-Basis	μmol/mol	0,004	n.n.	n.n.	0,046
Formaldehyd HCHO	μmol/mol	0,2	n.n.	n.n.	0,079
Methansäure HCOOH	μmol/mol	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
Ammoniak NH ₃	μmol/mol	0,1	n.n.	n.n.	3,4
Halogenierte Verbindungen (Halogenionen-Basis)	μmol/mol	0,05	n.n.	n.n.	0,010
Maximale Schwebstoffteilchen- Konzentration	mg/kg	1	-	-	-

n.n.: nicht nachgewiesen

AP 3.1.2 Eichfähige Gasbeschaffenheitsmessung

Die Ergebnisse der PGC-Testungen im H₂-Labor in Essen sind größtenteils positiv ausgefallen. Die PGC-Technik kann als Qualitätsmessung in H₂-Netzen eingesetzt werden. Die Optimierungsmöglichkeiten und Ergebnisse wurden jeweils mit den teilnehmenden Herstellern besprochen. Das H₂-Labor in Essen bietet eine geeignete Umgebung zur Validierung und Erprobung von Messgeräten für den Einsatz in Wasserstoffnetzen. Die Ergebnisse zeigen, dass die PGC-Messtechnik im Wasserstoffbereich – analog zum Erdgas – grundsätzlich für die amtliche Messung gerüstet ist. Es ist jedoch zu beachten, dass bislang noch keine spezifischen gesetzlichen Vorgaben für die eichpflichtige Wasserstoffmessung existieren.

Im Rahmen des Projekts wurde ein für die Beschaffenheitsmessung von Wasserstoff unter metrologischer Kontrolle geeignetes Messgerät entwickelt und ausführlich getestet. Nach Abschluss der Applikationsentwicklung wurde das Gerät zunächst im Labor von meterQ, dann durch NMI Certin B.V. (nach den Anforderungen der TR G-19) und schließlich im OGE-Labortest erfolgreich geprüft. Alle metrologischen Vorgaben wurden eingehalten. Der anschließende Feldtest am H₂-Loop in Lingen unter Aufsicht der PTB hat gezeigt, dass das Gerät auch unter realen Bedingungen fehlerfrei arbeitet und die

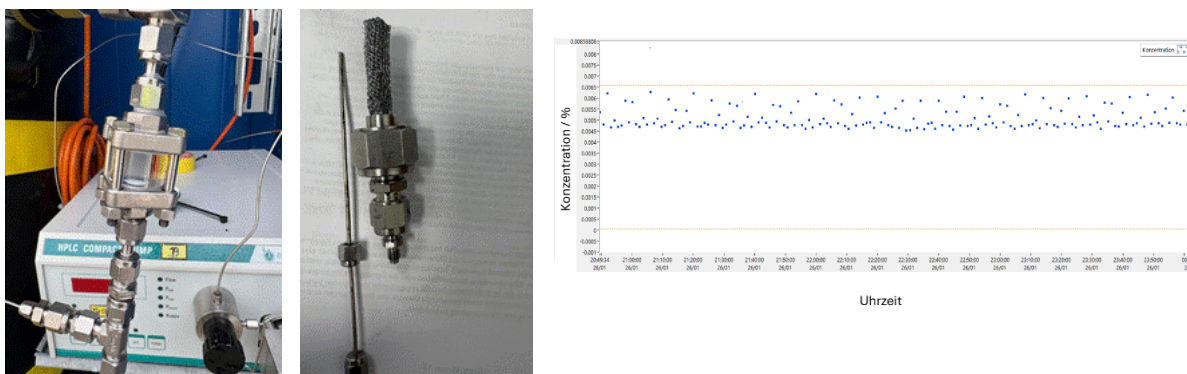
metrologischen Anforderungen nach DVGW Gas Info 33 – einschließlich der Langzeitstabilität – einhält. Eine zusätzliche Richtigkeitsprüfung an einem zweiten Baumuster findet zum Zeitpunkt der Berichterstellung im Labor der PTB statt und wird im April 2026 abgeschlossen sein.

AP 3.2 Entwicklung, Test und Optimierung von Aufreinigungsverfahren

In AP 3.2. konnten seitens OGE gemeinsam mit dem TÜV Hessen und RWE weitgehende Erkenntnisse hinsichtlich der erforderlichen Dokumentation für den Betrieb einer wasserstoffbetriebenen Anlage gesammelt werden. Über die Anlagendokumentation hinaus wurde gemeinsam mit dem GWI in Essen an den Erfordernissen der Schulung der die Anlage betreibenden Personen gearbeitet. Die die Anlage betreibenden Personen wurden bei einem Vor-Ort-Termin in Lingen von Sachkundigen des GWIs vor der finalen Inbetriebnahme des Wasserstoff-Loops geschult. Im Rahmen einer Marktrecherche konnten für die verschiedenen zu erwartenden Verunreinigungen (CO, CO₂, THT, H₂S, NH₃, C₂H₄, H₂O, Kohlenwasserstoffe, O₂ und HCl) aussichtreiche Adsorbentien von namhaften Herstellern dieser Materialien, beschafft und zum Teil getestet werden. Bei den beschafften Adsorbentien handelt es sich um mit verschiedenen Stoffen dotierten Aktivkohlen, Molekularsiebe und katalysatorähnliches Material, d.h. saure Trägermaterialien, welche mit geeigneten Aktivkomponenten dotiert wurden. Hinsichtlich des Betriebs der Anlage wurden Konzepte zum sicheren Umgang mit Wasserstoff erarbeitet und in der Praxis getestet wie z.B. das Inertisieren der Anlage vor und nach dem Testbetrieb mit Stickstoff oder die Auslegung von Ausbläsern. Des Weiteren wurden Analysegeräte identifiziert, beschafft und Messmethoden entwickelt, die zur Verfolgung der Konzentrationsänderung von Störkomponenten vor und nach den Adsorberbetten notwendig sind. Wasser wurde mit einem TDLAS, O₂ mit einem elektrochemischen Sensor und Ammoniak, verschiedene Kohlenwasserstoffe, Stickstoff mittels eines Gaschromatographen detektiert (Kap. III, Abbildung III.3.7). Die Konzentrationsverläufe bilden die Grundlage der für die Bewertung der Adsorbentien erforderlichen Durchbruchkurven.

Während der Projektlaufzeit konnten Vorversuche seitens OGE für die Dosierung von Ammoniak in den Wasserstoff aus dem Loop, der die Adsorptionsanlage speist, durchgeführt werden. Abweichend vom ursprünglichen Konzept, welches eine Dosierung von gasförmigem Ammoniak vorsah, wurde aufgrund dessen Phasenverhaltens eine Dosierung mittels einer Pumpe entwickelt. Abbildung IV.3.1 Abbildung IV.3.1: flüssige Ammoniakdosierung zeigt die NH₃-Dosierpumpe (a), eine optimierte Dosierstelle (b) sowie den NH₃-Konzentrationsverlauf (c). Nach der Bewältigung vieler Schwierigkeiten bei z.B. dem Heizen des Ammoniakdruckzylinders, dem Kühlen des Pumpenkopfs, der Optimierung der Dosierstelle oder auch der Installation des Gasabscheiders, konnte eine ausreichend stabile und rückführbare Dosierung des Ammoniaks entwickelt werden.

Gefördert durch:



- a. Pumpe, Zuleitung mit Gasabscheider
- b. Optimierte Dosierstelle für den flüssigen Ammoniak
- c. Ausschnitt eines mittels Gaschromatographie gemessenen Konzentrationsverlaufs des dosierten Ammoniaks.

Abbildung IV.3.1: flüssige Ammoniakdosierung

Die seitens DVGW-EBI durchgeführten Versuche zur Gasreinigung im Rahmen der Vorversuche zur späteren geplanten Nutzung durch die OGE am Testloop zeigten vielversprechende Ergebnisse.

Entfernung von CO₂ aus Wasserstoff

Ein Grenzwert für CO₂ ist in der Gruppe A (DVGW-Arbeitsblatt G 260) nicht definiert. Im Versuch wurde daher für das Feedgas ein CO₂ - Molanteil von $y_0 \approx 50$ ppm gewählt. Die eingefüllte Adsorbermasse von 10 g führt im Adsorber zu einer Schüttbetthöhe von ca. 10 cm. Die Raumgeschwindigkeit betrug für diesen Versuch 2100 h⁻¹. Für die Gasanalyse wurde ein μ -Gaschromatograph verwendet. Abbildung IV.3.2 zeigt die ermittelte Durchbruchkurve von CO₂ in absoluter und normierter Darstellung.

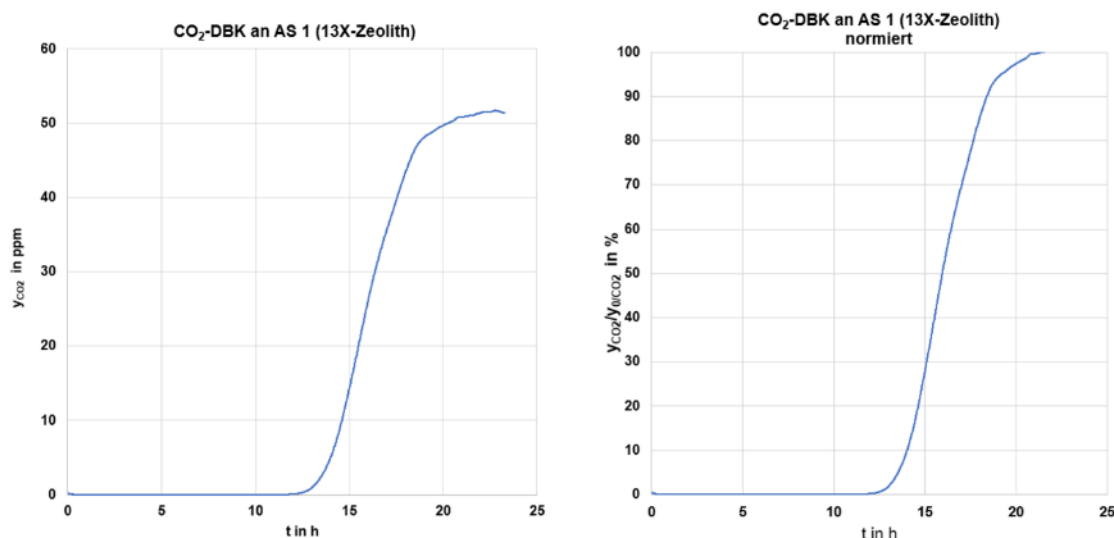


Abbildung IV.3.2: Ermittelte Durchbruchkurve (DBK) für CO₂ - links in ppm - rechts normiert in %

Die Auswertung der Durchbruchkurven ergab eine Gleichgewichtsbeladung von $B = 0,79$ Ma.-% sowie eine Durchbruchbeladung von $B_D = 0,67$ Ma.-%.

Bis zum Durchbruch (13,5 h) wurde CO₂ am Adsorberausgang mit einem Molanteil < 1 ppm detektiert. Das Versuchsergebnis zeigt, dass durch Adsorption die Entfernung von CO₂ bis auf den Grenzwert der Gruppe D (2 ppm) sehr gut möglich ist.

Entfernung von CO aus Wasserstoff

Der Grenzwert für CO ist in der Gruppe A (DVGW-Arbeitsblatt G 260) mit 1.000 ppm definiert. Im Versuch wurde für das Feedgas ein CO-Molanteil von $y_0 \approx 100$ ppm gewählt. Die eingefüllte Adsorbermasse (AS 2) von 20 g führte im Adsorber zu einer Schüttbetthöhe von ca. 15 cm. Die Raumgeschwindigkeit betrug für diesen Versuch 1.075 h⁻¹. Für die Analytik der Feedprobe wurde ebenfalls ein μ -Gaschromatograph eingesetzt, während für die Reingasprobe ein OFCAS vorgesehen war.

Im Versuch zeigte sich, dass für dieses Adsorbermaterial unter der Bedingung eines sehr niedrigen CO-Partialdrucks (100 ppm bei 3 bar $\hat{=} p_{CO} = 0,3$ mbar) keine Kapazität nachweisbar war. Dieses Ergebnis korreliert mit den Erfahrungen des Materialherstellers, der für sein Produkt als niedrigsten Gleichgewichtspunkt eine Beladung von ca. 0,03 Ma.-% bei einem CO-Partialdruck von 2 mbar angab. Eine technische Anwendung zur adsorptiven CO-Entfernung erscheint daher als unwahrscheinlich und könnte eine katalytische Entfernung voraussetzen.

Entfernung von NH₃ aus Wasserstoff

Der NH₃-Anteil im Wasserstoff ist in der Gruppe A (DVGW G 260) auf 13 ppm (10 mg/m³) begrenzt. Für den Versuch wurde das Feedgas mit ca. 11 ppm NH₃ angereichert. Nachdem bei einem Versuch mit 10 g Material auch nach über 200 h kein Durchbruch registriert wurde, wurde ein weiterer Versuch mit lediglich 1,5 g Einwaage angesetzt. Aus der niedrigen Betthöhe von 1,2 cm ergab sich die Raumgeschwindigkeit zu 13.600 h⁻¹. Für die NH₃-Analytik wurde ein Massenspektrometer verwendet. Abbildung IV.3.3 zeigt die ermittelte Durchbruchkurve von NH₃ in absoluter und normierter Darstellung.

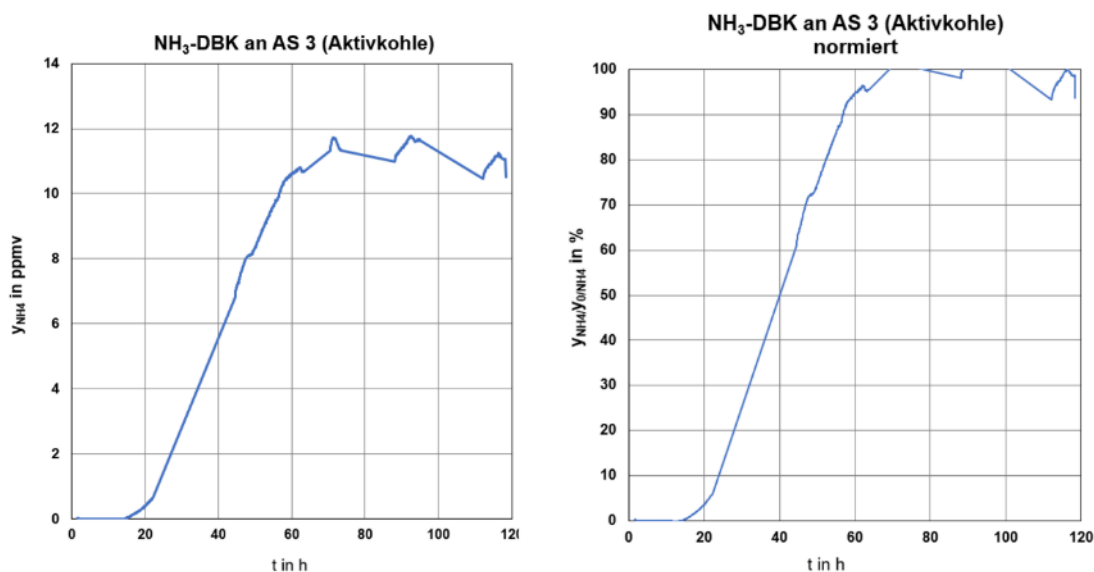


Abbildung IV.3.3: Ermittelte Durchbruchkurve für NH₃ - links in ppm - rechts normiert in %

Die Auswertung der Durchbruchkurven ergab eine Gleichgewichtsbeladung von $B = 1,12 \text{ Ma.-%}$ sowie eine Durchbruchbeladung von $B_D = 0,58 \text{ Ma.-%}$.

Bis zum Durchbruch (16 h) wurde NH_3 am Adsorberausgang mit einem Molanteil $< 10 \text{ ppb}$ detektiert. Die Reinheitsanforderungen für Ammoniak liegen in der Gruppe D bei $\leq 100 \text{ ppb}$. Die Machbarkeit der adsorptiven NH_3 -Aufreinigung unter den Grenzwert der Gruppe D konnte somit nachgewiesen werden.

Entfernung von O_2 aus Wasserstoff

Der O_2 -Anteil im Wasserstoff ist in der Gruppe A (DVGW G 260) auf 10 ppm ($0,001 \text{ Mol.-%}$) begrenzt. Vom Materialhersteller wurde für das empfohlene Produkt eine chemisorptive Sauerstoffaufnahme ($\text{Ni} + \text{O} \rightarrow \text{NiO}$) angegeben. Da sich aus der entsprechenden Stöchiometrie sehr lange Versuchszeiten ergaben, wurde für den Versuch das Feedgas mit ca. 50 ppm O_2 angereichert. Die Zielkonzentration gemäß den Reinheitsanforderungen der Gruppe D beträgt $y_{\text{O}_2} \leq 5 \text{ ppm}$. Der Adsorber wurde mit 10 g Material befüllt. Das für die Analytik vorgesehene Massenspektrometer war zum Zeitpunkt des Versuchs nicht einsatzbereit. Alternativ wurde ein μ -Gaschromatograph für die Analytik verwendet. Erste Versuche zur O_2 -Analyse im niedrigen ppm-Bereich haben gezeigt, dass die gemessenen Werte stark streuten. Der O_2 -Konzentrationsverlauf am Adsorberausgang ist in Abbildung IV.3.4 dargestellt.

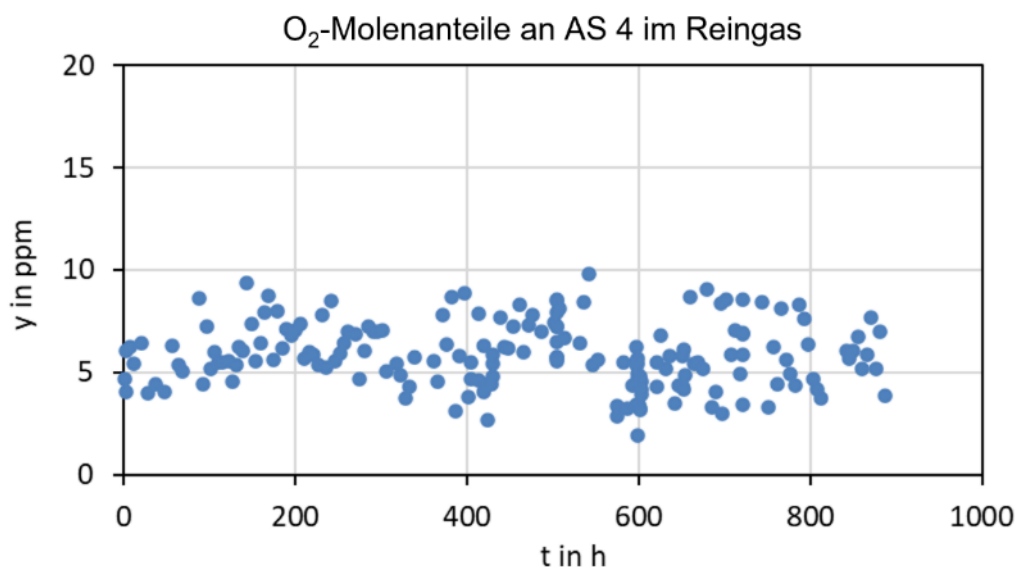


Abbildung IV.3.4: O_2 -Konzentrationsverlauf ohne Durchbruch

Der Versuch zeigte, dass sich auch nach ca. 900 h Versuchszeit kein Durchbruch andeutet. Bei Annahme der o.g. Stöchiometrie hätte Sauerstoff nach ca. 500 h durchbrechen müssen. Daher ist nicht von einer chemisorptiven O_2 -Aufnahme, sondern von einer katalytischen Oxidation des Wasserstoffs unter Bildung von Wasser auszugehen. Die generierten Werte lagen größtenteils oberhalb des Grenzwerts der Gruppe D. Während der Versuchszeit wurde die O_2 -Konzentration im Feedgas von 50 ppm zeitweise halbiert, um den Einfluss auf die erzielbare Reinheit sichtbar zu machen. Die Messwerte des entsprechenden Zeitfensters sind in Abbildung IV.3.5 dargestellt.

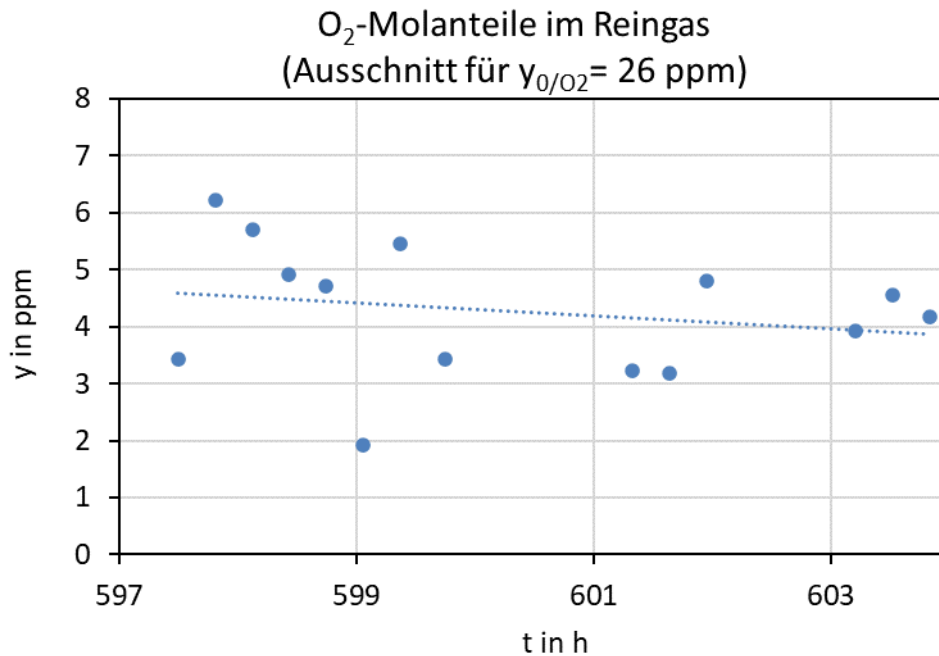


Abbildung IV.3.5: O₂-Konzentration bei 26 ppm O₂ im Feedgas (mit Trendlinie)

Durch die Reduktion der O₂-Konzentration auf 26 ppm im Feed konnte die Unterschreitung des Grenzwerts von 5 ppm mittels Katalyse demonstriert werden. Für die O₂-Konzentration von 10 ppm im zugeführten Gasstrom (maximaler O₂-Gehalt nach Gruppe A) können daher noch niedrigere Werte erwartet werden.

Kombiniertes Adsorberbett (Mehrschichtadsorber)

Nach dem Nachweis der adsorptiven bzw. katalytischen Entfernung der Einzelkomponenten CO₂, NH₃ und O₂, wurde ein Versuch zur Reinigung der genannten Komponenten aus einer Gasmatrix durchgeführt. Hierzu wurden die verwendeten Adsorbentien geschichtet in den Adsorber gegeben. Für die Analyse von CO₂ und NH₃ wurde ein OFCAS verwendet, während die O₂-Konzentration mit einem Massenspektrometer bestimmt wurde. Zusätzlich wurde mit dem OFCAS auch der Wassergehalt bestimmt, um die katalytische Umsetzung des Sauerstoffs durch die Bildung von H₂O zu bestätigen. Die Adsorbentien wurden gemäß

Abbildung IV.3.6 im Adsorber geschichtet.

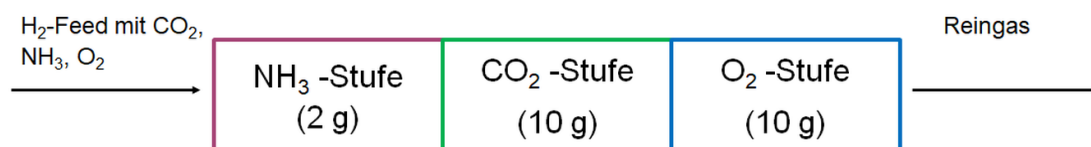


Abbildung IV.3.6: Anordnung der Adsorbentien im Mehrschichtadsorber

Die O₂-Stufe wurde als letzte Schicht gewählt, um ggf. die entstehende Feuchte infolge der katalytischen O₂-Umsetzung zu detektieren. Die Eingangskonzentration für diesen Versuch waren $y_{O_2} = 10$ ppm, $y_{CO_2} = 47$ ppm und $y_{NH_3} = 63$ ppm. Dem Adsorber wurden 50 l/h (Feed) zugeführt. Die

Messwerte nach dem Adsorber zeigt Abbildung IV.3.7. Vor Versuchsbeginn wurden die Messgeräte ca. 11 h gespült, daher begann die Aufzeichnung mit einem entsprechenden Offset.

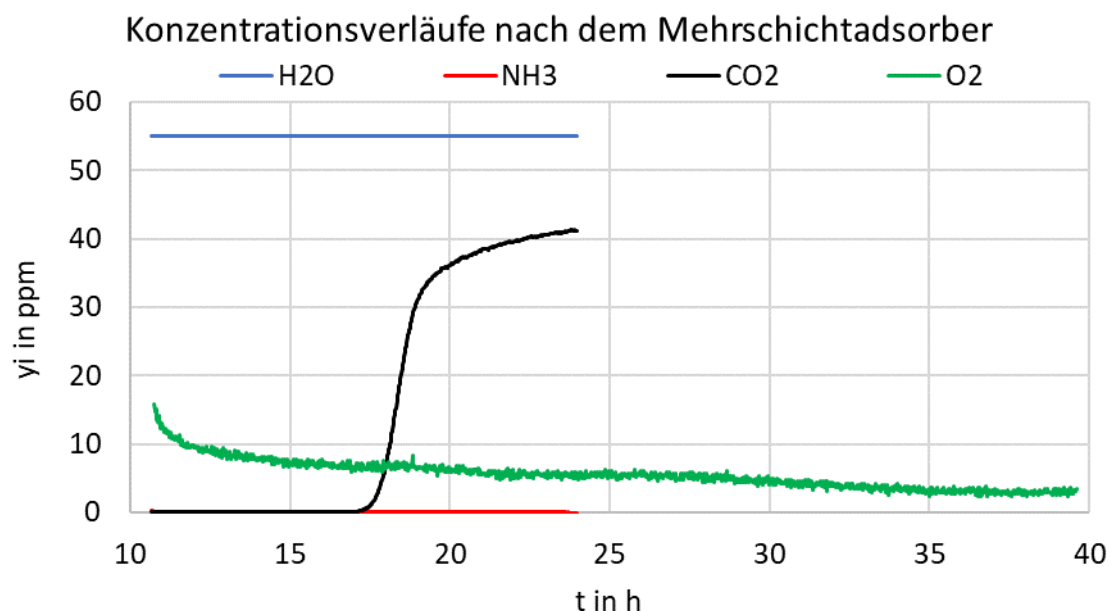


Abbildung IV.3.7: Konzentrationsverläufe nach dem Mehrschichtadsorber

Die Versuchsdaten zeigten, dass die simultane Entfernung von NH₃, CO₂, und O₂ in einem Mehrschichtadsorber möglich ist. Wegen eines Ausfalls des OFCAS konnte nur Sauerstoff mit dem Massenspektrometer bis zum Versuchsende gemessen werden. Gegen Versuchsende lag der O₂-Anteil im Gas bei < 4 ppm und erfüllt damit die Reinheitsanforderungen für Wasserstoff der Gruppe D. Des Weiteren zeigte der Versuch, dass im Adsorber Wasser entsteht, was die Annahme der katalytischen O₂-Entfernung durch Oxidation von Wasserstoff bestätigte. Die gemäß der Stöchiometrie erwarteten 120 ppm Wasser konnten nicht nachgewiesen werden, da die obere OFCAS-Nachweisgrenze für H₂O bei 55 ppm lag. Für CO₂ war die Sättigung des Materials gut zu erkennen. Für NH₃ kam es bis zum Ende der Aufzeichnung nicht zu Durchbruch.

Das geplante, noch ausstehende Versuchsprogramm der OGE am Testloop wird trotz Projektende weiter durchgeführt. Dies umfasst die Komponenten NH₃, H₂O, O₂ und THT. Mit den finalen Ergebnissen der Adsorptionsversuche ist Mitte 2026 zu rechnen.

AP 3.3 Eichfähige Durchflussmessung

Für die Versuche bei RWE in Lingen wurden von den Herstellern zwei Turbinenradzähler und drei Ultraschallgaszähler zur Verfügung gestellt. Die Zähler wurden zunächst mit Erdgas auf dem pigsar Prüfstand kalibriert und danach am H₂-Loop in Lingen untersucht.

In Abbildung IV.3.8 ist die Abweichung der Blendenmesstrecke zum Referenzturbinenradzähler für die einzelnen Messkampagnen mit den fünf kommerziellen Gaszählern dargestellt. Durch das für den Ein- und Ausbau der Testzähler notwendige Inertisieren des H₂-Loops mit Stickstoff und ein evtl. erforderliches Nachspeisen von Wasserstoff veränderte sich die Gaszusammensetzung im H₂-Loop während der Messkampagne. Mit den Kreissymbolen sind die Ergebnisse mit den im Blendenrechner hinterlegten, nicht an die veränderte Zusammensetzung angepassten, Stoffdaten dargestellt. Für die

Berechnung des Durchflusses aus den Messwerten der Blendenmessstrecke muss die Gaszusammensetzung bekannt sein. Die großen Abweichungen der Messkampagnen in Abbildung IV.3.8 zeigten die Notwendigkeit einer Korrektur der geänderten Gaszusammensetzung für die Berechnung der Durchflüsse. Mittels GPC- Analysen wurden die Gaszusammensetzung im Loop analysiert. Bei sämtlichen Messkampagnen wurde die Schallgeschwindigkeit des Betriebsmediums mit einem für Wasserstoff kalibrierten Schallgeschwindigkeitssensor erfasst. Die Berechnung der Schallgeschwindigkeit der Gasmischung aus den GPC- Daten hat gezeigt, dass neben der Hauptkomponente Wasserstoff lediglich der Stickstoffanteil einen nennenswerten Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit der Gasmischung hatte. Die anderen in Spuren gemessenen Komponenten konnten für die Korrektur vernachlässigt werden.

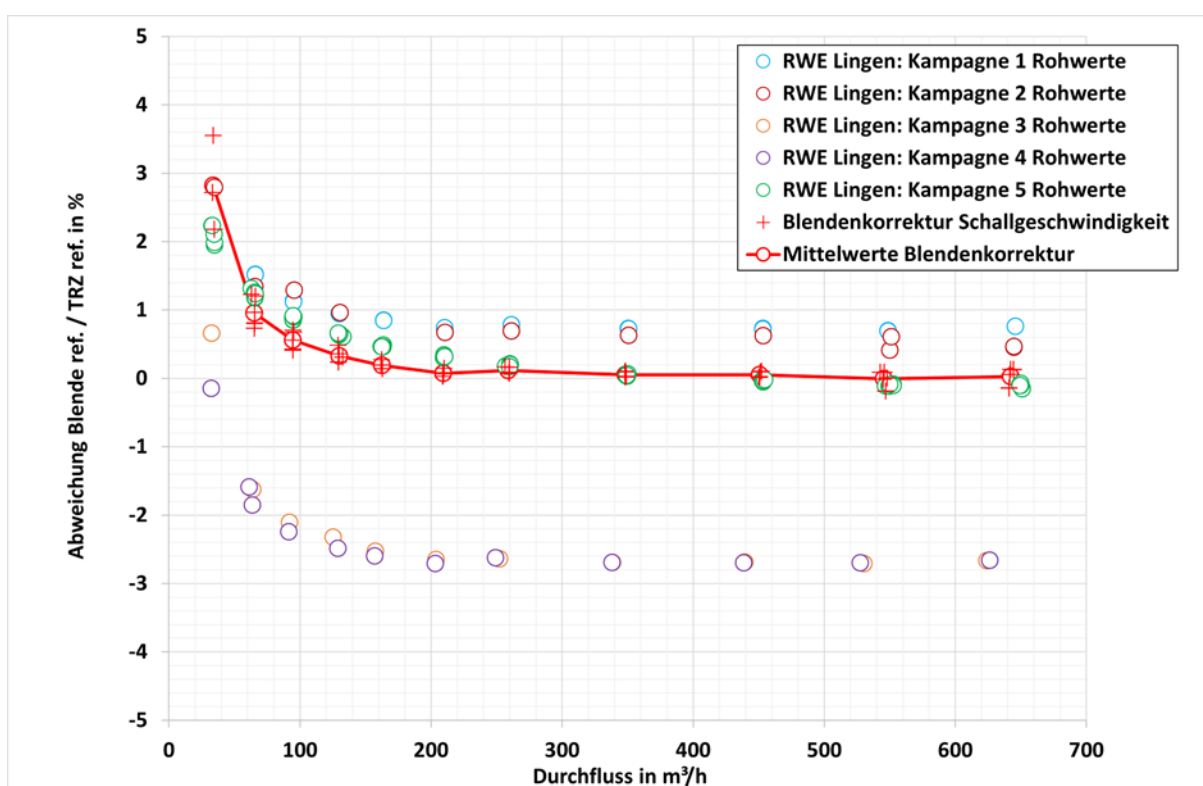


Abbildung IV.3.8: Um die veränderte Gaszusammensetzung rechnerisch korrigierte Durchflussmessung

Durch eine Korrektur der Gaszusammensetzung auf eine binäre Wasserstoff-Stickstoffmischung, deren Schallgeschwindigkeit mit der gemessenen Schallgeschwindigkeit übereinstimmt, war die Ermittlung eines Korrekturfaktors für die Durchflussberechnung möglich. In Abbildung IV.3.8 sind die korrigierten, an die veränderte Gaszusammensetzung angepassten, Werte der Einzelkampagnen mit roten Kreuzen dargestellt. Die gute Übereinstimmung der korrigierten Einzelkampagnen belegt die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Blendenmessstrecke. Die mit der roten Linie verbundenen Kreissymbole stellen die Mittelwerte der korrigierten Einzelkampagnen dar. Das Abweichen der Blendenmesswerte nach oben bei niedrigeren Betriebsdurchflüssen ist auf das Messprinzip der Turbinenradzähler mit einer höheren Messgenauigkeit und zu niedrig gemessenen Durchflüssen unterhalb des Mindestdurchflusses Q_{\min} zurückzuführen.

Bei den Messungen am H_2 -Loop in Lingen wurde nach einer Veränderung des Betriebsdurchflusses ein Erreichen konstanter Werte abgewartet und dann mit der Erfassung der Druck-, Temperatur- und Durchflusswerte begonnen. Dazu wurden über mindestens 15 Minuten sekundlich Messwerte erfasst,

aus denen dann ein Mittelwert berechnet wurde, der dann als einzelner Datenpunkt in den Diagrammen dargestellt ist.

In Abbildung IV.3.9 sind die Abweichungen der beiden Turbinenradzähler auf dem Erdgasprüfstand pigsar und die Messergebnisse für die Wasserstoffdurchflussmessung bei RWE in Lingen dargestellt. Vergleicht man die als Raute dargestellten Ergebnisse für Erdgas der Turbinenradzähler mit den runden Wasserstoffmesswerten für den jeweiligen Zähler, so ist ein früheres, bei größeren Durchflüssen, auftretendes Abknicken der Messwerte erkennbar.

Dieses Abknicken lässt sich durch die unterschiedlichen Stoffeigenschaften von Erdgas und Wasserstoff erklären. In Hinblick auf den Einsatz von Turbinenradgaszählern muss also erhöhtes Augenmerk auf den minimal zulässigen Volumenstrom Q_{\min} gelegt werden. Zu bemerken ist, dass selbst die große Abweichung im kleinsten Durchflussmesswert des Zählers 2 im Vergleich zur Erdgasmessung noch innerhalb einer absoluten Abweichung von $\pm 2\%$ liegt.

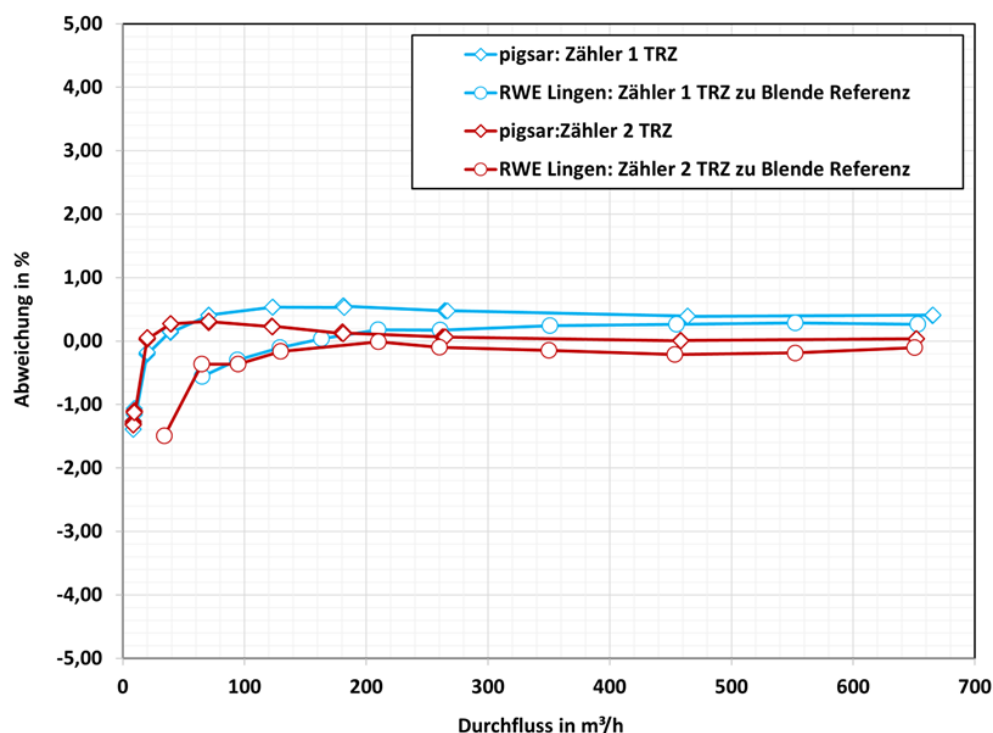


Abbildung IV.3.9: Abweichung der Messwerte der Turbinenradzähler über dem Betriebsvolumenstrom für Erdgas und Wasserstoff

In Abbildung IV.3.10 sind die Abweichungen der untersuchten Ultraschallgaszähler für die Kalibriermessungen in Erdgas bei pigsar mit Raute dargestellt. Die Abweichungen der gemessenen Durchflusswerte am H₂-Loop in Lingen sind mit Kreissymbolen dargestellt.

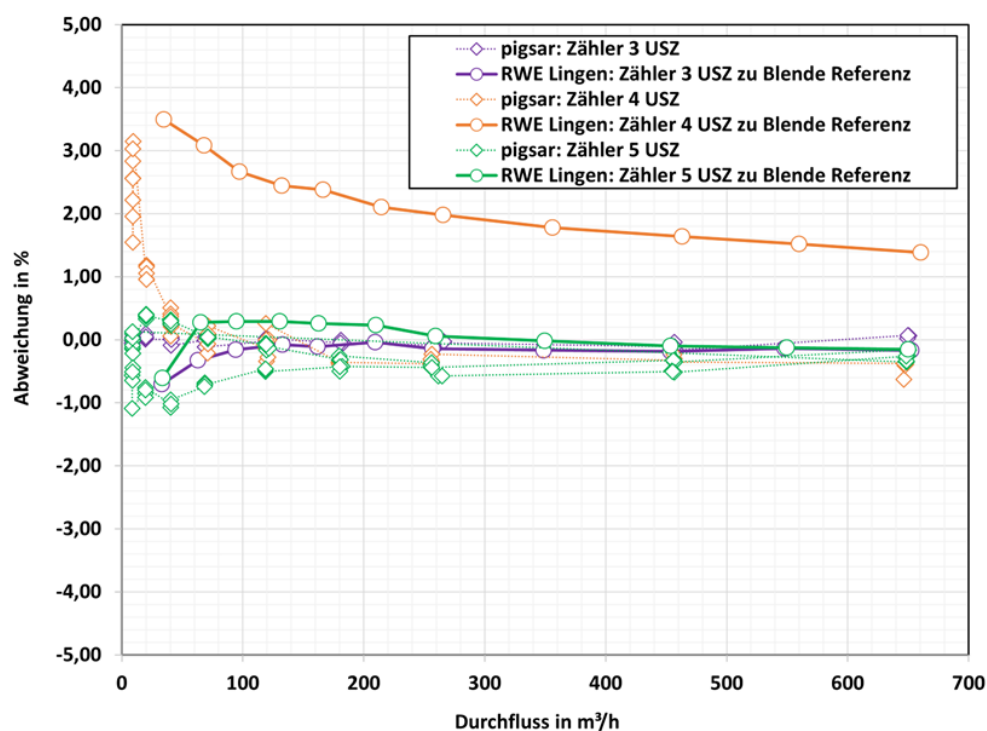


Abbildung IV.3.10: Abweichung der Messwerte der Ultraschallgaszähler über dem Betriebsvolumenstrom für Erdgas und Wasserstoff

Bei Betriebsdurchflüssen oberhalb 20 m³/h in Erdgas lagen alle Durchflussmesser innerhalb $\pm 1,5$ % Abweichung. Unterhalb dieses Wertes zeigte Zähler 4 eine größere positive Abweichung. Die Ultraschallzähler 3 und 5 zeigten auch am H₂-Loop in Lingen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Werten der Blendenmessstrecke. Die Abweichung über den gesamten Messbereich lag innerhalb ± 1 %. Zähler 4 wies eine deutlich größere positive Abweichung über den gesamten Messbereich auf. Bei dem Nachfolgemodell dieses Zählers setzt der Hersteller einen anderen Ultraschallsensortyp ein, der für die kurzen Laufzeiten in Wasserstoff besser geeignet ist. Durch weitere konstruktive Anpassungen an diesem Zählermodell soll die Messgenauigkeit in Wasserstoff erhöht werden.

Die im Projekt durchgeführten Versuche belegen, dass eine Nutzung von in Erdgas kalibrierten Durchflussmessern für Wasserstoff grundsätzlich möglich ist. Allerdings besteht weiterer Forschungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der größeren Abweichungen im unteren Messbereich. Diese können zu einem höheren Q_{\min} des Zählers bei Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas führen. Für die genaue Festlegung des jeweils kleinsten zulässigen Q_{\min} sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Die durchgeführten Messkampagnen liefern, neben den genannten Erkenntnissen, den Herstellern belastbare Daten zum Verhalten der Durchflussmesser und unterstützen die Weiterentwicklung sowie Anpassung der Geräte beim Wechsel von Erdgas zu Wasserstoff.

IV.4 Arbeitspaket 4: H₂-Verträglichkeit von Werkstoffen

Im AP4.1 „Bewertung des Istzustandes des vorhandenen alten Systems“ wurden alle Projektziele erreicht. Haupterkenntnisse und Ergebnisse umfassen die erforderlichen Nachweise für die Qualifizierung der gebrauchten Komponenten bzw. Rohrwerkstoffe für die Nutzungsumwidmung für Wasserstoff-atmosphären. Insgesamt wurden vierzehn gebrauchte bzw. lange gelagerte

Rohrsegmente aus unterschiedlichen Werkstoffen im Projekt betrachtet. Die Kriterien der zu erbringende Nachweise hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften sowie der geometrischen und volumetrischen Fehler-freiheit sind von den unterschiedlichen Liefernormen abgeleitet worden (Tabelle IV.4.1). Diese wiederum machten unterschiedliche Vorgaben, was zu einer erhöhten Komplexität der Prüfung und der zu erbringende Nachweise führte. Als Lessons-Learned ist für ähnliche Vorhaben eine engere Werkstoffauswahl zu empfehlen oder alternativ ein wesentlich höherer Zeit- und Ressourcenaufwand für die Qualifizierung einzuplanen. Allgemein wäre für die Umwidmung von betriebsbeanspruchter Infrastruktur (z.B. alte Erdgasleitungen) ein von der ursprünglichen Bauteil- bzw. Rohrliefernorm unabhängiges und einheitliches Qualifikationsverfahren vorteilhaft. Ein weiterer Punkt ist, dass Umwidmungen von sehr kurzen Rohrleitungsabschnitten für den Wasserstoffeinsatz aufgrund der zu erbringenden Nachweise für die Qualifizierung sowie Unsicherheiten bezüglich der hierfür benötigten Projektzeit möglicherweise nicht wirtschaftlich sind. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde im Zuge dieses Vorhaben nicht durchgeführt, wäre jedoch komplementär zur Erstellung eines einheitlichen Qualifikationsverfahrens erstrebenswert.

Die volumetrischen Prüfungen mittel Ultraschallprüfung ergaben für alle vierzehn Segmente keinen Befund. Gleiches galt für die ermittelten chemischen Zusammensetzungen. Die mechanischen Eigenschaften wurden über Kerbschlagbiegeversuche sowie über Zugversuche bei Raumtemperatur sowie bei 140 °C bzw. 180 °C nachgewiesen. Dabei wiesen zwei Rohrsegmente unerwarteterweise nicht ausreichende Kerbschlagarbeitswerke auf und erreichten deshalb nicht die erstrebte Qualifizierung für den Einsatz im TransHyDE GETH2-Loop (Tabelle IV.4.1). Drei Segmente wurden aufgrund von zu geringen verfügbaren Längen dem Qualifizierungsprozess nicht unterzogen. Von den neun qualifizierten Rohrsegmenten konnten acht in vier Teststrecken verbaut werden (Abbildung IV.4.1). Der Einsatz des Werkstoffes X11CrMo9-1 (TH-012) musste wegen einer aus schweißtechnischen Sicht nicht erlaubten Werkstoffpaarung in Verbindung mit unterschiedlichen Anforderungen bezüglich einer Anlasswärme-behandlung verworfen werden. Ergänzend wurden die Rohrsegmente metallographisch untersucht und die auf den Rohrinneisen vorliegen Oxidschichten charakterisiert (Abbildung IV.4.1 und Abbildung IV.4.2). Die in Abbildung IV.4.2. exemplarisch dargestellten Rohrinneisenoberflächen wurden im vorliegenden Zustand in den Teststreckenverbaut, um den Einfluss der betriebsbeanspruchten Oberflächen auf die Wasser-stoff-aufnahme zu bewerten.

Tabelle IV.4.1: Angaben zu den vierzehn für die Teststrecken vorgesehenen Rohrsegmenten aus unterschiedlichen Werkstoffen. Nicht alle Rohrsegmente haben die erforderlichen mechanischen Eigenschaften erbracht und sind somit bei der durchgeführten Qualifizierung durchgefallen

Pos.	Rohrsegment	Material	Zustand	Durch. [mm]	Wand. [mm]	Verfügbare Länge [mm]	Qualifizierungsanforderungen nach	Qualifizierung bestanden?	Grund	Lessons-Learned
1	TH-001	J55	Lagermaterial	73	5,5	550	EN ISO 11960, EN ISO 6892-1, EN ISO 6892-2, EN ISO 148-1, EN 10839-10	Ja		
2	TH-002	J55	Betriebsbeansprucht	73	5,6	375		Nein	Mechanische Eigenschaften nicht ausreichend	KBV < 27 J @21 °C
3	TH-003	J55	Betriebsbeansprucht	175	9	315		Nicht durchgeführt	Abmessung und geringe verfügbare Rohrlängen für Qualifizierung und Einbau in den Teststrecken	Mindestlängen für die Qualifizierung vor dem Vorhaben bestimmen
4	TH-004	CSN 12022	Lagermaterial	107	7,7	300	ČSN 41, EN ISO 6892-1, EN ISO 6892-2, EN ISO 148-1, EN 10839-10	Nicht durchgeführt	Verfügbare Rohrlängen nicht ausreichend für Qualifizierung und Einbau in den Teststrecken	
5	TH-005	CSN 12022	Betriebsbeansprucht	110	7,5	250		Nein	Mechanische Eigenschaften nicht ausreichend	KBV < 27 J @21 °C
6	TH-006	CSN 12022	Betriebsbeansprucht	110	7,5	275	EN ISO 3183, EN ISO 6892-1, EN ISO 6892-2, EN ISO 148-1, EN 10839-10	Ja		
7	TH-007	L360	Lagermaterial	115	7,5	465		Ja		
8	TH-008	L360 NE	Betriebsbeansprucht	115	6	500		Ja		
9	TH-009	L360 NE	Betriebsbeansprucht	115	6	500		Ja		
10	TH-010	L360 NE	Betriebsbeansprucht	115	5,1	500		Ja		
11	TH-011	L360 NB	Betriebsbeansprucht	115	6	500	Ja			
12	TH-012	9Cr1Mo	Lagermaterial	74	5,8	445	UNS K90941, EN ISO 6892-1, EN ISO 6892-2, EN ISO 148-1, EN 10839-10	Ja		
13	TH-013	P235 GH	Betriebsbeansprucht	90	3	1010	EN 10216-2, EN ISO 6892-1, EN ISO 6892-2, EN ISO 148-1	Ja		
14	TH-014	P355 NH	Betriebsbeansprucht	115	10	980	EN ISO 3183, EN ISO 6892-1, EN ISO 6892-2, EN ISO 148-1, EN 10839-10	Ja		



Abbildung IV.4.1: Links einige der betriebsbeanspruchten Segmente vor den Qualifizierungsverfahren; rechts: qualifiziertes Rohrmaterial vor der Teststreckenfertigung

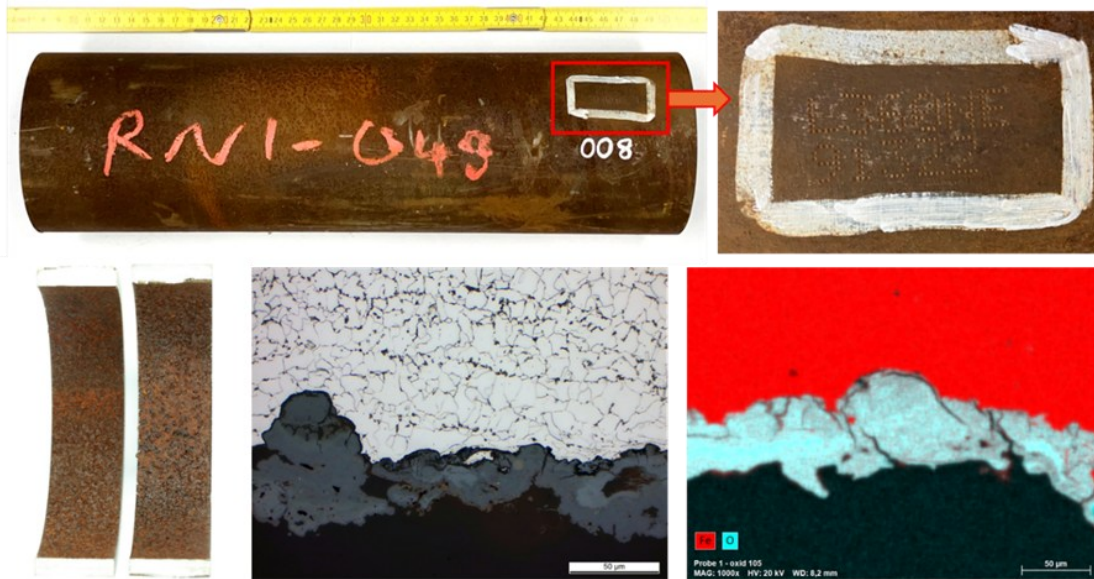


Abbildung IV.4.2: Makroaufnahme eines Rohrsegments mit Stempelfeld (L360NE) sowie Halbschalen mit korrodierter und belegter Rohrrinnenoberfläche. Mitte unten und rechts Gefügaufnahme und EDX-Elementverteilungsbild für Eisen und Sauerstoff mit mit der Oxidschicht der Rohrrinnenoberfläche

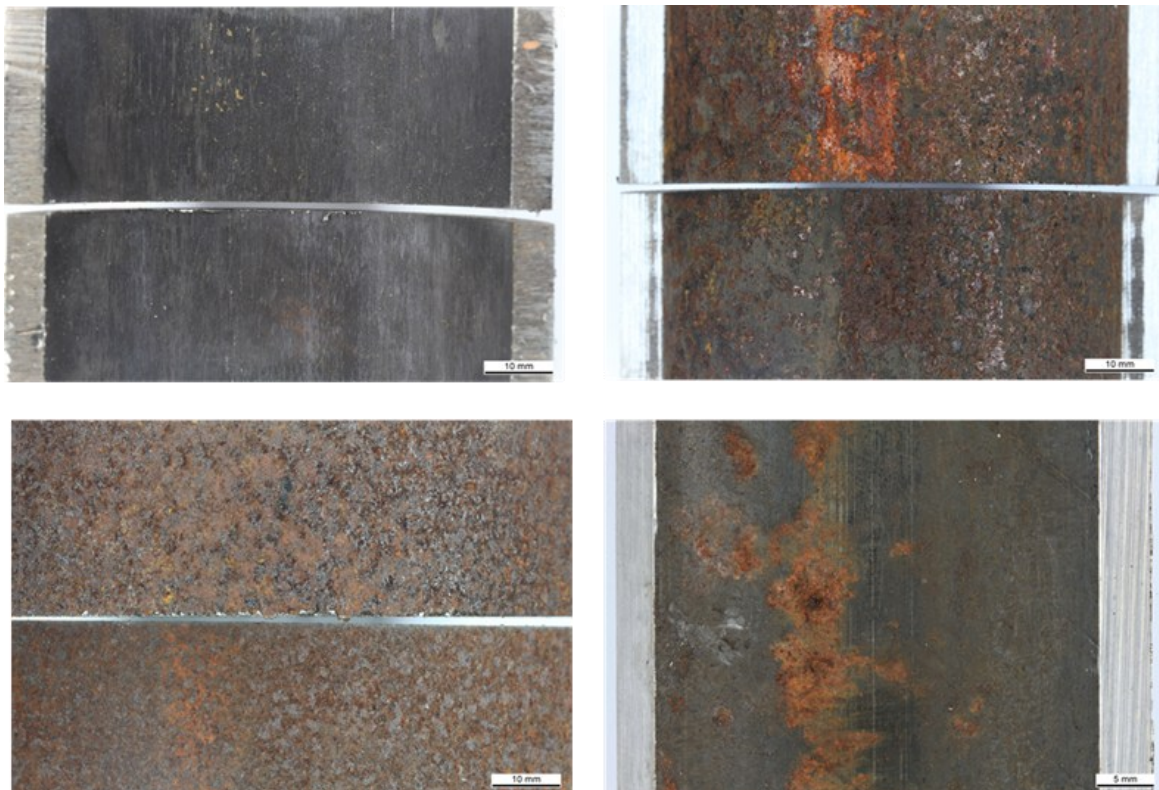
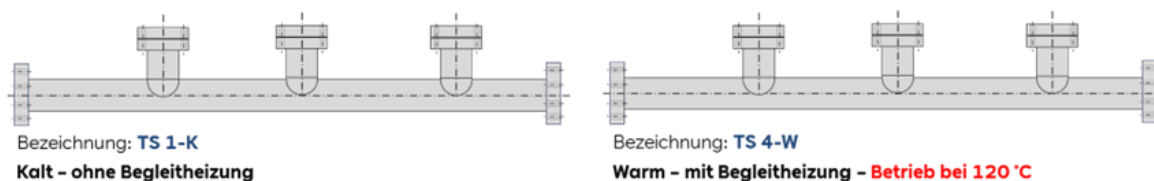


Abbildung IV.4.3: Makroaufnahme eines Rohrsegments mit Stempelfeld (L360NE) sowie Halbschalen mit korrodierter und belegter Rohrrinnenoberfläche. Mitte unten und rechts Gefügaufnahme und EDX-Elementverteilungsbild für Eisen und Sauerstoff mit mit der Oxidschicht der Rohrrinnenoberfläche

Das finale und gleichzeitig umgesetzte Design umfasste drei kalte sowie drei warme Teststrecken mit einer Länge von jeweils 2000 mm (Abbildung IV.4.4). Die warmen Teststrecken wurden mit einer Begleitheizung („Hochtemperatur Teststand“) für eine Erhitzung auf eine Zieltemperatur von 120 °C versehen. Von den insgesamt sechs Teststrecken wurden zwei aus neuem Material mit jeweils drei Flanschen gefertigt und dienten als sogenannte Probenhalterstrecken. Zug- und Analyseproben aus den verschiedenen Rohrsegmenten bzw. Werkstoffzuständen wurde in diesen Strecken bei Raumtemperatur sowie bei erhöhten Temperaturen strömenden Wasserstoff über einen Zeitraum von bis zu 12 Wochen ausgesetzt.

Aufgrund der begrenzten verfügbaren Längen der gebrauchten Rohrsegmente wurden zusätzlich Variationen der Innenoberflächen des neuen Rohrmaterials für die Fertigung der Teststrecken vorgesehen (Tabelle IV.4.2). Diese Variationen umfassten eine gestrahlte sowie eine mechanische abgedrehte Innenoberfläche, welche im Gegensatz zur Standardbeschaffenheit frei von Oxidschichten waren. Durch die Variationen sollte der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Wasserstoffaufnahme im Betrieb untersucht werden. Solche Oberflächen können u.a. im Bereich von Schweißnähten bzw. Schweißnahtvorbereitungen vorkommen. Durch die Variationen sollte der Einfluss von geänderten Oberflächen auf die Wasserstoffaufnahme im Betrieb untersucht werden.

2 x Probenhalterteststrecken – Lagermaterial mit Flanschen mit Probenhalter für Laborproben



4 x Teststrecken - verschiedene betriebsbeanspruchte Rohrsegmente Werkstoffen und Lagermaterial

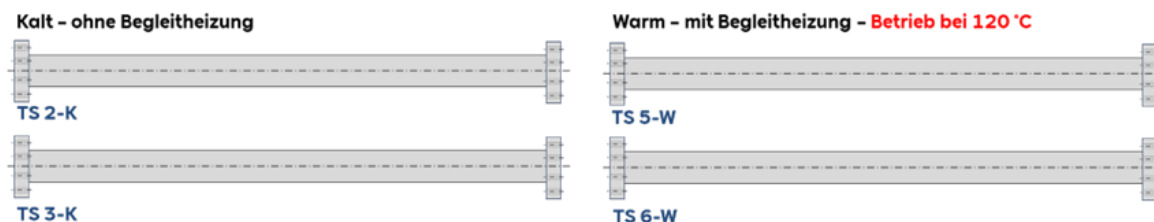


Abbildung IV.4.4: Konzept der Probenhalterteststrecken mit Flanschen für Proben sowie der Teststrecken. Die Bezeichnungen der Teststrecken sind den einzelnen Rohrsegmenten in Tabelle IV.4.2 zugeordnet

Tabelle IV.4.2: Aufteilung der qualifizierten betriebsbeanspruchten Rohrsegmente auf die kalten (TS 2-K und TS 3-K) und warmen (TS 5-W und TS 6-W) Teststrecken. Fehlende Längen wurden mit neuem Material mit unterschiedlichen Innenoberfläche ergänzt

Probenbezeichnung	Material	Durchmesser [mm]	Wandstärke [mm]	Verfügbare Länge [mm]	TS 2-K	TS 3-K	TS 5-W	TS 6-W
TH-001	J55	73	5,5	260		X		
TH-007	L360	115	7,5	170	X			
TH-008	L360NE	115	6	200	X			
TH-009	L360NE	115	6	300	X			
TH-010	L360NE	115	5,1	300			X	
TH-011	L360NB	115	6	300			X	
TH-013	P235 GH	90	3	810		X		X
TH-014	P355 NH	115	10	780	X		X	
Neues material	L360NE	114,3	3,6		X		X	X
Neues material	L360NE - innen gedreht	114,3	3,6			X		
Neues material	L360NE - innen sandgestrahlt	114,3	3,6			X		

Die Fertigung als solche wurde nach der Qualifizierung im Frühling 2025 veranlasst und erforderte keine besonderen fertigungstechnischen Maßnahmen für die erfolgreiche Umsetzung. Es konnten im Vergleich zu einer konventionellen Fertigung mit Neumaterial keine Besonderheiten festgestellt werden. Auch die anschließenden zerstörungsfreien Prüfungen sowie die vorgeschriebene Druckprüfung bei 1,3x verliefen reibungslos und mit erfolgreichem Ergebnis. Letzte Prüfung fand in Anwesenheit des TÜV Nord statt und dieser berichtete wie folgt:

Die oben genannten Leitungsabschnitte (Baugruppen) wurde am 15.10.2025 gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 469 nach dem Verfahren A2 mit ca. 60 bar ($\geq 1,3 \times DP40$) auf Festigkeit und Dichtheit geprüft. Die Prüfung auf Dichtheit erfolgte durch Besichtigung der geprüften Leitungsabschnitte. Es wurden keine Undichtheiten festgestellt.

Die Schweißnähte wurden durch das eingesetzte ZfP-Unternehmen bzw. durch die Prüfaufsicht des Bauherrn entsprechend dem DVGW-Arbeitsblatt GW 350 Qualitätsanforderungsstufe „D“ geprüft und bewertet.

Die Durchstrahlungsaufnahmen wurden durch uns entsprechend dem DVGW-Arbeitsblatt GW 350 beurteilt. Unsere Prüfungen wurden in den ZfP-Berichten dokumentiert.

Die Kehlnähte wurden einer Oberflächenrissprüfung unterzogen. Die Prüfung wurde anhand der Prüfberichte auf Plausibilität durch uns geprüft und in den dazugehörigen ZfP-Berichten dokumentiert.

Die oben genannten Prüfungen der Schweißnähte entsprechen den Anforderungen des DVGW-Arbeitsblattes GW 350 Qualitätsanforderungsstufe „D“ und ergaben im Endzustand keine Beanstandungen

Nach der Abnahme im Fertigungswerk wurde die Teststrecken im Materialprüfstand eingebaut und eine Dichtheitsprüfung für die betriebliche Abnahme in Anwesenheit des TÜV Nord durchgeführt (Abbildung IV.4.5). Die Teststrecken wurden ab diesem Zeitpunkt mit Wasserstoffbetriebsdrücken

zwischen 20 und 35 bar beaufschlagt. Die finale Installation der Begleitheizung sowie die betriebliche Abnahme erfolgte mit einem Versatz von ca. 3 Wochen (Abbildung IV.4.6), da im vorliegenden Explosionsschutzumfeld eine formelle Abnahme durch eine zugelassene Überwachungsstelle (ZÜS) erforderlich war. Ab der Abnahme wurden die kalten Teststrecken ca. 20 Wochen lang und die warmen Teststrecken ca. 17 Wochen (3 Wochen kalt und 17 Woche mit laufender Begleitheizung mit einer Solltemperatur von 120 °C) betrieben. Die Projektmeilensteine M4.2 „Hochtemperatur Teststand aufgebaut“ und M4.3 „Versuche an DN100 Teststrecke beginnen“ sowie alle Projektziele sind erreicht worden.



Abbildung IV.4.5: Links - eingebaute Teststrecken nach erfolgreicher Dichtheitsprüfung durch den TÜV Nord; rechts - erste in-situ Wasserstoffmessungen an den montierten Teststrecken durch Ruhr-Universität Bochum / Euro-Labor GmbH

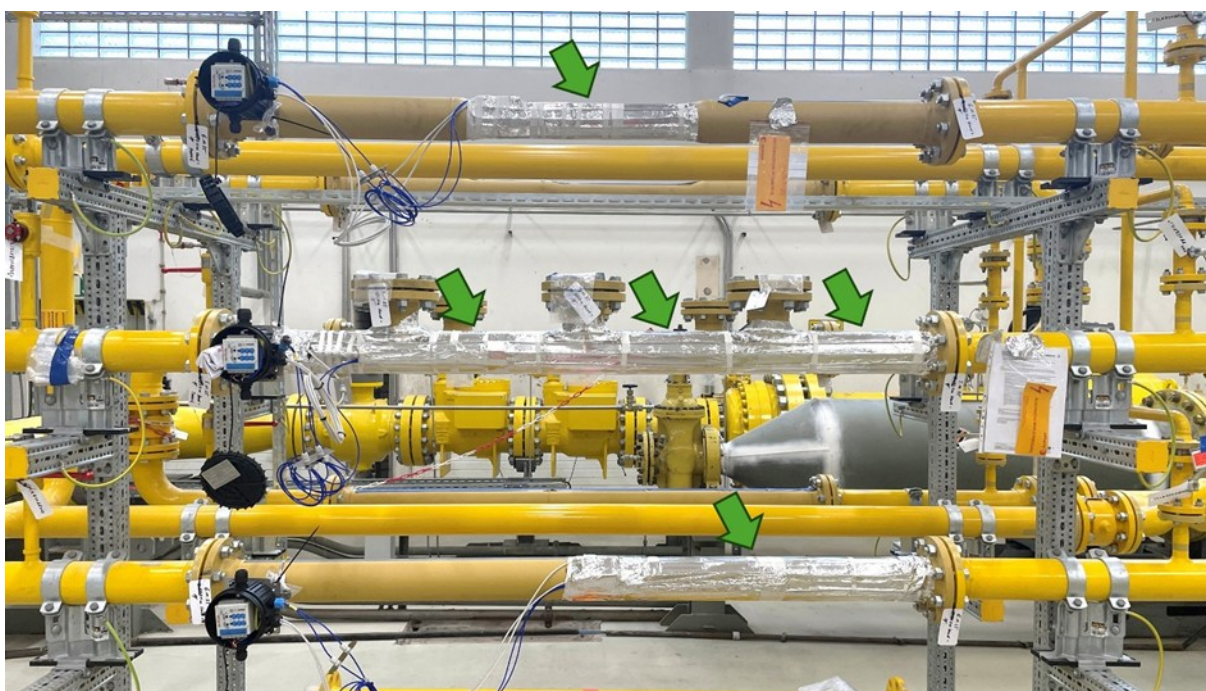


Abbildung IV.4.6: Installierte Begleitheizungen der warmgehenden Teststrecken (Meilenstein M 4.2 „Hochtemperatur Teststand aufgebaut“). Betriebsbeanspruchte (gebrauchte) Rohrsegmente wurden kontinuierlich auf eine Solltemperatur von 120 °C erhitzt und von innen mit Wasserstoff beaufschlagt

In Rahmen der Betriebslaufzeit der Teststrecken wurden in regelmäßigen Abständen die In-situ-Wasserstoffmessungen („Local Hydrogen Analysis“ (LHA)) durchgeführt sowie Proben für Zugversuche und Wasserstoffanalysen entnommen. Für diesen Zweck mussten gesonderte Maßnahmen für die Einhaltung des Explosionsschutzes durch eingewiesenes Standortpersonal vorgenommen werden. Das regelmäßige Öffnen und Schließen der Flansche der Probenhalterteststrecken für die Entnahme von Proben wurde durch Standortpersonal des regulären Kraftwerksbetriebs vorgenommen. Zu den einzelnen Maßnahmen gehörten u.a. die Inertisierung der Strecken, Schaltung von Ventilen, öffnen und schließen der Flansche, Entnahme der Proben, Ab- und Zuschaltung der Begleitheizung, Dichtheitsprüfung vor erneutem H₂-Betrieb, Protokollieren der Arbeiten und Auffüllen des Loops mit Wasserstoff. Durch die wiederkehrenden Arbeiten konnte das Fachpersonal wertvolle Erfahrungen mit den Besonderheiten des Umgangs mit wasserstoffführende Gasanlagen sammeln und somit eine solide Basis für die künftigen Wasserstoffaktivitäten am Kraftwerksstandort Lingen schaffen. Gleichzeitig führte die Einbettung des TransHyDE GETH2-Loop in einem aktiven Kraftwerkstandort zu einem erhöhten Abstimmungsaufwand, zu mehreren Revidierungen von geplanten Konzepten und zu einem höheren zeitlichen und finanziellen Aufwand für die Umsetzung im Vergleich zu Errichtung des Versuchsfelds als Stand-alone-Lösung. Was in erster Linie als Nachteil verstanden werden kann, war in Realität eine Stärke des Projekts, da hierdurch realitätsnahe Erfahrungen mit der Errichtung einer Wasserstoffinfrastruktur ohne kommerzielles Risiko gesammelt werden konnten.

Fortlaufend zum Betrieb der Teststrecken sowie des Materialprüfstands am TransHyDE GETH2-Loop wurden im Labor die Wasserstoffdiffusionskoeffizienten durch elektrochemische Permeationsmessungen bei Raumtemperatur sowie bei 70 °C ermittelt (Tabelle IV.4.3). Diese Werte dienen als Basis für Extrapolationen auf 100 °C und 200 °C. Von den untersuchten Werkstoffen wurden die höchsten Diffusionskoeffizienten beim Werkstoff P235GH und die niedrigsten bei den Werkstoffen L360 und 9Cr1Mo (X11CrMo9-1 / TH-012) ermittelt.

Tabelle IV.4.3: Im Labor bestimmte Wasserstoffdiffusionskoeffizienten bei Raumtemperatur und bei 70 °C. Koeffizienten bei 100 °C und 200 °C wurden über Extrapolationen ermittelt

Werkstoff	D in mm ² /s RT	D in mm ² /s 70 °C	D in mm ² /s 100 °C	D in mm ² /s 200 °C
J55	1,28 x 10 ⁻⁵	3,94 x 10 ⁻⁵	6,69 x 10 ⁻⁵	2,41 x 10 ⁻⁴
CSN 12022	1,63 x 10 ⁻⁵	5,87 x 10 ⁻⁵	1,07 x 10 ⁻⁴	4,62 x 10 ⁻⁴
L360	1,13 x 10 ⁻⁵	3,33 x 10 ⁻⁵	5,54 x 10 ⁻⁵	1,90 x 10 ⁻⁴
9Cr1Mo	1,41 x 10 ⁻⁵	1,14 x 10 ⁻⁵	3,10 x 10 ⁻⁵	3,30 x 10 ⁻⁴
P235GH	2,25 x 10 ⁻⁵	1,08 x 10 ⁻⁴	2,26 x 10 ⁻⁴	1,35 x 10 ⁻³

Die In-situ-Wasserstoffmessungen mit dem LHA-Verfahren wurden nach drei, fünf, zehn, vierzehn und nach sechzehn Wochen Betrieb am Materialprüfstand durchgeführt. An den kalten Teststrecken wurde einheitlich, unabhängig von eingesetztem Werkstoff oder Rohrinneoberfläche, keine messbare Wasserstoffaufnahme (Sensitivität ±0,1 ppm) festgestellt. Daraus konnte abgeleitet werden, dass die verschiedenen Rohrinneoberflächen zu keiner Steigerung der Wasserstoffdissoziation und Wasserstoffaufnahme geführt haben. An den warmen Teststrecken konnte aufgrund des Aufbaus der Begleitheizung das LHA-Verfahren nur eingeschränkt an den nicht beheizten Abschnitten durchgeführt werden. An diesen wurde nach zwei Wochen nach Inbetriebnahme der Begleitheizung ein Anstieg der diffusiblen Wasserstoffkonzentration von +0,2 ppm nachgewiesen. Es folgten weitere Messungen in

vierwöchigen Abständen bis einer beheizten Betriebszeit von 12 Wochen ohne weiteren Anstieg der diffusiblen Wasserstoff-konzentration, d.h. der Wert verharrte bei +0,2 ppm.

In den Probehalterteststrecken wurden Zug- und Analyseproben der Werkstoffe aus Tabelle IV.4.1 für unterschiedliche Intervalle im Wasserstoffstrom ausgelagert. Bei der Auslagerung bei Raum-temperatur wurden alle Proben nach zehn Wochen ausgebaut und in Cryobehältern transportiert und gelagert. Diese Cryobehälter reduzierten drastisch die sonst stattfindende Wasserstoffeffusion und hielten den Zustand bis zur Analyse oder Zugprüfung konstant.

Die Wasserstoffanalysen ergaben, dass je nach Werkstoff es zu einer geringfügigen Wasserstoffaufnahme bei einer Exposition im Loop bei Raumtemperatur (Tabelle IV.4.4). Deutlicher fiel die Wasserstoffaufnahme in der warmen Probehalterstrecken aus und erreichte nach ca. 6 Wochen Auslagerungszeit bei der gewählten Probengeometrie einen konstanten Wert. Die ermittelten Werte waren im Einklang mit den Ergebnissen der LHA-Messungen, die für den Werkstoff L360NE an der warmen Teststrecke ebenfalls eine Zunahme der diffusiblen Wasserstoffkonzentrationen um 0,2 ppm feststellte. Die wesentlich höheren Wasserstoffgehalte des Zustands TH-012 (Werkstoff X11CrMo9-1) konnten aufgrund des nicht erfolgten Einbaus in den Teststrecken nicht über in-situ-Wasserstoff-messungen (LHA) betriebsnah bestätigt werden.

*Tabelle IV.4.4: Ergebnisse der Wasserstoffmessungen an im Loop ausgelagerten Analyseproben. Werte stellen den diffusiblen Wasserstoffgehalt vor der Auslagerung (Referenz) sowie nach 10 Wochen in der kalten Probehalterstrecke (RT = Raum-temperatur) sowie nach 6 und 10 Wochen in der warmen Probehalterstrecke. *Aufgrund der starken Kühlung durch den strömenden Wasserstoff wurde eine Temperatur $60\text{ °C} < T < 120\text{ °C}$ für die Proben angenommen. Als Basis für diese Abschätzung dienten Pyrometermessungen an den nicht beheizten Abschnitten der warmen Teststrecken unmittelbar an der Begleitheizung*

Probenbez.	Werkstoff	Zustand	Referenz H in ppm	10 Wochen bei RT H in ppm	6 Wochen bei $60\text{ °C} < T < 120\text{ °C}^*$ H in ppm	10 Wochen bei $60\text{ °C} < T < 120\text{ °C}^*$ H in ppm
TH-001	J55	Lagermaterial	0,01	0,03	-	-
TH-007	L360NE	Lagermaterial	0,01	0,18	0,19	0,24
TH-008	L360 NE	Betriebsbeansprucht	0,01	0,05	0,26	0,26
TH-012	9Cr1Mo	Lagermaterial	0,02	0,18	0,75	0,88

Analog zu den Analyseproben wurde diverse Zugproben der betriebsbeanspruchten Werkstoffe für unterschiedliche Intervalle dem Wasserstoffstrom des Loops bei Raumtemperatur sowie erhöhten Temperaturen ($60\text{ °C} < T < 120\text{ °C}$; soll: 120 °C) ausgelagert und nach dem Ausbau in Cryobehältern bis zum Zugversuch gelagert. Die langsamen Zugversuche wurden mit einer Dehnrates von 0,03mm/min durchgeführt. Hinsichtlich der Ergebnisse konnte ein geringer Einfluss des aufgenommenen Wasserstoffs auf die mechanischen Eigenschaften erfasst werden. Die relative Bruchdehnung (engl. RRA relativ reduction of area) zeigten keine relevante Veränderung in Abhängigkeit der Wasserstoff-exposition. Bei der relativen Bruchdehnung waren hingegen Schwankungen zu erkennen, die jedoch auch mit der Streuung der Werte der betriebsbeanspruchten Ausgangszustände einhergingen. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle Werkstoffe eine geringfügige Abnahme der Bruchdehnung nach der Auslagerung im TransHyDE-Loop aufwiesen. In Abbildung IV.4.7 sind exemplarisch Spannungs-Dehnungs-Kurven für die Werkstoffe J55 (TH-001) und X11CrMo9-1 (TH-012) dargestellt. In Abbildung IV.4.7 sind exemplarisch für den Werkstoff J55 (TH-001) die mechanischen Eigenschaften vor und nach Auslagerung am Loop zusammen mit den duktilen

Bruchflächen aus den fraktographischen Untersuchungen dargestellt. Alle untersuchten Werkstoffzustände wiesen bei den Prüfungen ein duktiles Bruchbild mit nennenswerter Duktilität auf.

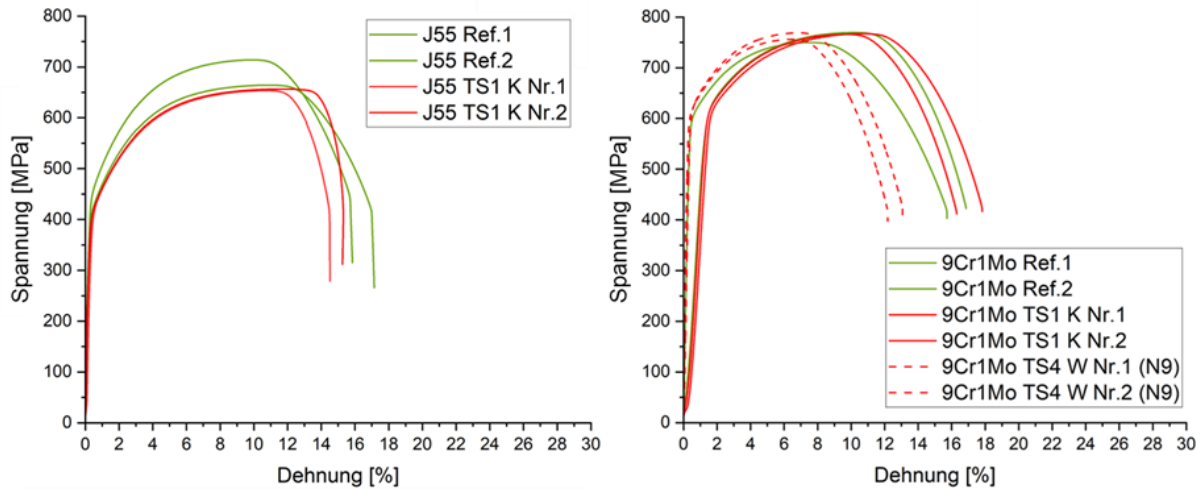


Abbildung IV.4.7: Exemplarische Spannungs-Dehnungs-Kurven der durchgeführten im langsamen Zugversuch im Anlieferungszustand („Ref.“) und nach Auslagerung im TransHyDE GETH2-Loop bei Betriebsdrücken zwischen 20 und 35 bar und Raumtemperatur („TS1 K“) oder bei erhöhten Temperaturen („TS4 W“)

Werkstoff	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_5 [%]	Brucheinschnürung Z [%]
J55 Ref. 1	457	714	9,4	15,7	71,4
Werkstoff	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_5 [%]	Brucheinschnürung Z [%]
J55 TS1 K Nr.1	424	654	10,1	14,3	72,5

Abbildung IV.4.8: Werkstoff J55 (TH-001) - mechanische Eigenschaften im langsamen Zugversuch sowie die dazugehörige Fraktographie der Bruchflächen im Anlieferungszustand (oben) und unten im Bild nach zehn Wochen im TransHyDE GETH2-Loop bei Betriebsdrücken zwischen 20 und 35 bar und Raumtemperatur

Im Rahmen des AP 4.4 „Begleitende wissenschaftliche Untersuchungen und Projektsteuerung“ sind u.a. projektunterstützende Untersuchungen und Arbeiten, wie z.B. im Falle der „Black Powder“ Beläge der DN300 Bestandsleitung oder die Qualitätssicherung und Montageüberwachung erfolgt. Komplexere Fragestellungen wurden mit externen Kooperationspartnern und Experten, wie z.B. die Ruhr-Universität Bochum, Lehrgebiet Werkstoffprüfung (Prof. Dr. Michael Pohl), Euro-Labor GmbH, TÜV Rheinland Werkstoffprüfung GmbH, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Berlin, Fraunhofer IWM Freiburg, etc. diskutiert. Weitere projektunabhängige Diskussionsplattformen stellten folgende Gremien bzw. Veranstaltungen dar:

- vgbe Congress 2024
- 49. VDI-Jahrestagung Schadensanalyse in der Energietechnik
- 2024 – 2026: Technisches Programm vgbe „Werkstoffsicherheit in der Wasserstoffwirtschaft“
- vgbe Conference Materials and Quality Assurance 7 and 8 May 2025 in Bergen
- 2025: R&D Treffen mit NORCE in Bergen, Norwegen
- 2025: Siemens Energy Workshop: Basics and challenges of Hydrogen in energy applications
- vgbe MATHEA Conference 2025 - MATerials in Hydrogen-related Energy Applications - June 24th and 25th in Hamburg, Germany
- RWE R&D Community Days 2023 und 2025
- DNV JIP Project - H₂ transport in flexible composite pipes
- Kooperation mit Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

IV.5 Arbeitspaket 5: Luftgestützte Wasserstoff-Ferndetektion (Hy2ReM)

AP 5.1: Theoretische Verfahrensevaluierung

Aus der theoretischen Evaluierung ergab sich, dass die SRGS (Stimulated Raman Gain Spectroscopy) und das CARS-Verfahren (Coherent anti-Stokes Raman Scattering) nicht als Messmethode für die vorliegende Anwendung geeignet sind. Beide basieren auf der nichtlinearen Raman-Streuung und erfordern Leistungsdichten der anregenden Strahlung, die unter den Randbedingungen der Anwendung nicht erreicht werden.

Im Projekt wurde daher ein LIDAR-System entwickelt, das auf der linearen Raman-Streuung basiert. Dabei wurden technische und experimentelle Randbedingungen mit den Projektpartnern abgestimmt. Das zur Detektion verwendete Raman-Signal von Wasserstoff ist wesentlich kleiner als weitere Signale (z.B. H₂O-Raman-Signal, Fluoreszenz), die potentiell zu einer Störung des Wasserstoffsignals führen können. Diese Störsignale müssen, soweit möglich, vom H₂-Signal spektral, bzw. durch Detektion mit hoher Zeitauflösung getrennt werden. Die Modellrechnungen zeigen, dass es eine spektrale Überlagerung des Raman-Signals von Wasserdampf mit dem H₂-Raman-Signal gibt, die bei der Auswertung der Signale zu berücksichtigen ist. Gleiches gilt für die Fluoreszenz des vom Laserstrahl getroffenen Bodenmaterials. Aus diesem Grund ist eine möglichst schmalbandige Detektion des H₂-Raman-Signals anzustreben.

Als luftgestütztes System muss das Messsystem bei Tageslicht betrieben werden. Um das Tageslicht als Störquelle auszuschließen, muss die Wellenlänge des anregenden Lasers im vorliegenden Anwendungsfall unter 270 nm liegen.

Um eine hohe Lichtausbeute bei der Messung des H₂-Signals und eine starke Unterdrückung von Störsignalen zu erreichen, wurde das Detektionssystem als Filtersystem mit dichroitischen Strahlteilern und Bandpassfiltern und fünf Detektionskanälen konzipiert. Zusätzlich zum H₂-Raman-Signal werden die Raman-Signale von H₂O und N₂, sowie Fluoreszenz und elastisch gestreutes Licht detektiert, um deren Störung des H₂-Signals zu kompensieren.

Mit Filtern lassen sich im hier verwendeten UV-Wellenlängenbereich Bandbreiten von minimal ca. 1 nm erreichen. Durch Verwendung eines Fabry-Perot-Interferometers konnte für den H₂-Kanal eine

Bandbreite von $\Delta\lambda = 0.1$ nm erreicht werden. Die Linienbreite des zur Anregung verwendeten Lasers muss entsprechend unterhalb dieses Wertes liegen.

Als Lichtquelle des Systems wurde ein Fourth-harmonic Nd:YAG-Laser mit Wellenlänge $\lambda = 266$ nm und einer Linienbreite von $\Delta\lambda < 0.05$ nm bestimmt.

Für das Messverfahren wurden bei Adlares Rechnungen zur Statistik der detektierten Photonen für eine Leckagesituation unter Berücksichtigung von Störeinflüssen vor-ge-nommen, die zeigten, dass die Fern-detektion von Wasserstoff prinzipiell möglich ist.

AP 5.2: Aufbau und Tests Labor-Funktionsmuster

Nach der Konzeption wurde das LFM an der Universität Potsdam aufgebaut und getestet. Für Wasserstoff wurde eine Nachweisgrenze des LFM von 0.25 vol% H₂ (entsprechend 250 ppm*m) bestimmt.

Zusätzlich zum Detektionssystem wurde das LFM mit einem Spektrometer erweitert, mit dem Raman-Spektren der relevanten Gase verifiziert werden konnten. Weiterhin wurden damit quantitative Messungen der Fluoreszenzspektren von Bodenproben durchgeführt. Mit den gemessenen Daten lässt sich der Einfluss der Fluoreszenz auf die Nachweisgrenze von Wasserstoff abschätzen. Die Daten zeigen, dass die Fluoreszenz insbesondere von Pflanzen im vorliegenden Anwendungsfall der potentiell größte Störfaktor ist. Messungen an H₂-Luft-Mischungen mit variierendem Wasserdampfgehalt und einer zusätzlichen Fluoreszenzquelle (Asphaltprobe) haben gezeigt, dass man die Überlagerung des H₂-Signals durch die Störsignale in der Auswertung berücksichtigen kann.

Mit dem LFM wurde die Funktionstüchtigkeit der Messmethode nachgewiesen, das Detektionssystem konnte nach Justage und ausführlichen Tests in das Feld-Funktionsmuster transferiert werden.

AP 5.3: Aufbau eines Feld-Funktionsmusters und Durchführung von Feldtests

AP5.3 kann insgesamt uneingeschränkt als außerordentlich erfolgreich bewertet werden. In AP5 wurde die technologische Entwicklung des wasserstoff-sensitiven Raman-LIDARS erfolgreich von TRL1 (grundlegende Prinzipien) auf TRL5 (Validierung eines Prototyps in relevanter Umgebung) vorangetrieben. Die erzielten Resultate sind innovativ, substantiell und von hoher Relevanz für die Etablierung einer Sicherheitsarchitektur in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft.

Nach der ersten vollständigen Grundjustage des FFM in Emsbüren wurden erste Testmessungen zur Detektion von molekularem Wasserstoff durchgeführt. In Abbildung IV.5.1 ist die Geometrie der Messungen schematisch und in einem Photo dargestellt.

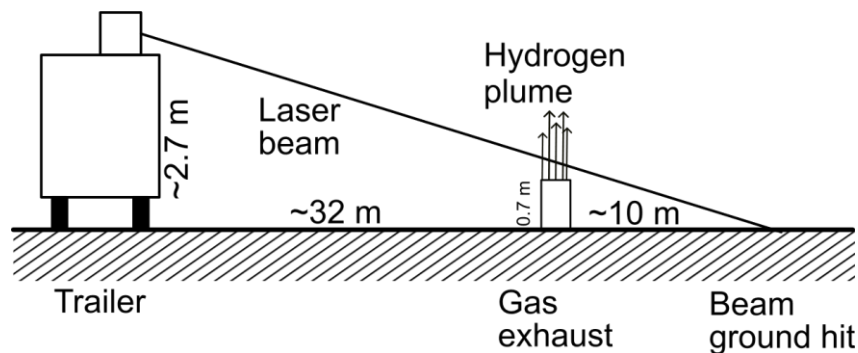


Abbildung IV.5.1: Oben: Schema der Geometrie der Feldexperimente in Emsbüren. Unten: Situation auf dem OGE-Testfeld in Emsbüren

Bei den Feldversuchen im Dezember 2025 wurden sowohl Messreihen mit Wasserstoffausströmung als auch solche ohne Wasserstoffausströmung durchgeführt. In der Analyse der Messdaten wurde zunächst eine Baseline- und Störsignalkorrektur vorgenommen. Nach der Anwendung eines adaptiven Filters wurde das Differenzsignal von Daten mit Wasserstoff-Ausströmung und Messdaten ohne Ausströmung gebildet. Die so gewonnenen Ergebnisse sind in Abbildung IV.5.2 gezeigt. Auf der linken Seite ist eine Übersicht der mit dem Wasserstoff-Kanal aufgenommenen Daten gezeigt, während auf der rechten Seite der für die den Messungen Grunde liegende Messgeometrie relevante Datenausschnitt gezeigt ist. Die Position des Messanhängers und der Auftreffpunkt des Laserstrahls auf dem Boden können ebenso den Daten zugeordnet werden, wie die klare Signatur des Differenzsignals, welche im Raumbereich der Gasausströmung liegt. Damit gibt es klare Indikatoren für die Funktionalität des Messsystems bei der Wasserstoff-Fernerkundung. In der Kürze der Versuchszeit waren nur einige wenige Messungen möglich, so dass eine statistische Validierung der ersten positiven Ergebnisse noch aussteht.

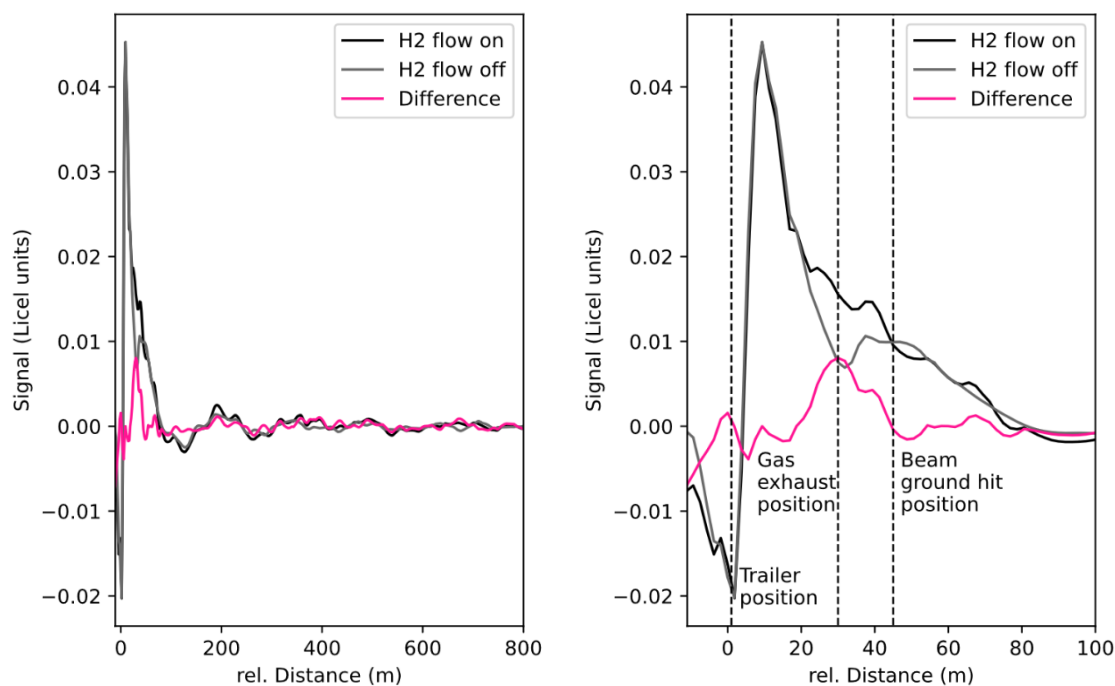


Abbildung IV.5.2: In den Feldexperimenten bei OGE-Emsbüren aufgenommene Daten des Wasserstoffkanals des FFM. Schwarz: Daten mit Wasserstoff-Ausströmung, Grau: Daten ohne Wasserstoff-Ausströmung, Hot-Pink: Differenzsignal. Links: Übersicht über die aufgenommene Datenspur, Rechts: Auf den durch die Geometrie der Messungen begrenzter, relevanter Datenausschnitt

AP 5.4: Konzeption des fliegenden Systems

In AP5.4 wurde die systematische Vorbereitung einer möglichen späteren Implementierung eines fliegenden Messsystems vorangetrieben. Dabei zeigte sich, dass ein luftgestütztes Wasserstoff-Ferndetektionssystem auf Basis des Raman-LIDAR-Prinzips grundsätzlich realisierbar erscheint, derzeit jedoch auf Grund der Nichtverfügbarkeit effizienter Deep-UV-Lasersysteme erhebliche technische Hürden bestehen. Aus wirtschaftlicher Sicht ist ein Einsatz von Helikoptern bis zu einer maximalen Größenklasse wie z.B. der EC145 oder MD900/902 sinnvoll. Bei den Flächenflugzeugen wären geeignete Kandidaten z.B. die Britten-Norman Islander, die Daher Kodiak oder die Tecnam P2012 STOL. Damit liegt auch die maximale dem Bordnetz entnehmbare elektrische Leistung in einem bestimmten Bereich, womit die Erfüllung der Anforderungen an Laserleistung, Energieversorgung und Kühlung eine der zentralen Herausforderungen für die Integration in ein Fluggerät darstellt. Kommerzielle Deep-UV-Lasersysteme erfüllen die Anforderungen aktuell kaum, sodass von zukünftigen, speziell zu entwickelnden Lasern ausgegangen werden muss.

Ein Vergleich von Helikoptern und Flächenflugzeugen zeigt, dass beide Plattformen spezifische Vor- und Nachteile besitzen. Während Helikopter bevorzugt für niedrige Flughöhen und Anlagenbefliegungen geeignet sind, bieten STOL-Flächenflugzeuge wirtschaftliche Vorteile bei langen Trassenbefliegungen.

Die Analyse der Einsatzbedingungen verdeutlicht, dass Klima, Jahreszeit, Flughöhe und atmosphärische Störgrößen wie Wasserdampf und vegetationsbedingte Fluoreszenz einen

signifikanten Einfluss auf die Messqualität haben (Abbildung IV.5.3). Daraus ergeben sich klare Empfehlungen für geeignete Einsatzzeiträume und -regionen. Die in der Konzeption gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass Klima und Geographie Mitteleuropas gute Chancen für die Umsetzbarkeit eines fliegenden Wasserstoffernerkundungssystems bieten. Die Analyse zeigt u.a., dass der Einfluss von Störsignalen im Winterhalbjahr im Vergleich zum Sommerhalbjahr sinkt.

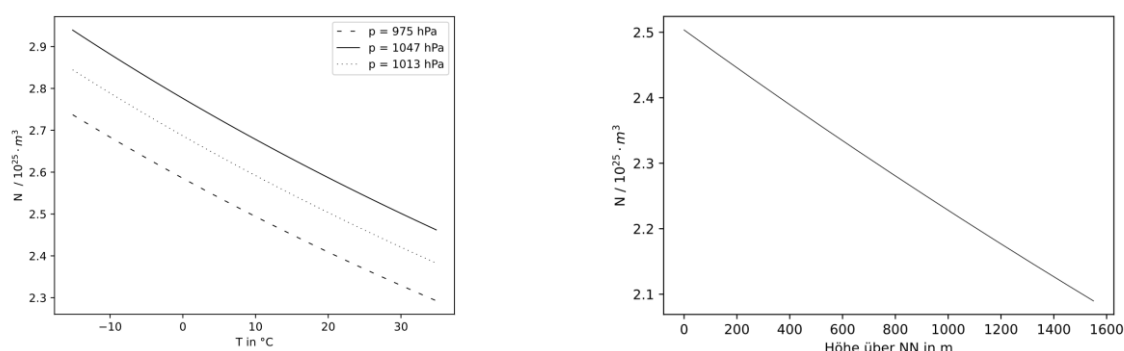


Abbildung IV.5.3: Einfluss von Druck und Temperatur und der Höhe über NN auf die Teilchenzahlen in einem Normvolumen und damit auf das Messsignal. Links: Teilchenzahl pro Normvolumen als Funktion der Temperatur für 3 verschiedene Isobaren. Die Isobaren wurden so gewählt, dass sie den Normaldruck, Tief- und Hochdruck-Wetterlagen abbilden. Rechts: Teilchenzahlen als Funktion der Höhe über NN

IV.6 Arbeitspaket 6: Intelligente Molchung

AP 6.1 Durchführung einer Nullmolchung

Die Auswertung der Ultraschall-Daten lieferte ein positives Ergebnis für die Leitungsintegrität. Während die künstlich eingebrachten Referenzdefekte zuverlässig erkannt wurden, konnten im Bestand der Leitung keine rissartigen Anzeigen identifiziert werden. Es wurden lediglich geringfügige Materialverluste (zwischen 7 % und 19 %), eine Lamination sowie vier Beulen festgestellt, die allesamt deutlich unterhalb der kritischen Grenzwerte liegen.

Damit ist die grundsätzliche Eignung der Leitung 43 für den Wasserstoffbetrieb messtechnisch belegt. Über die reine Zustandsbewertung hinaus bildet dieser Datensatz nun eine erste wissenschaftliche Grundlage, um bei späteren Vergleichsmolchungen (z.B. im AP 6.4) wasserstoffinduzierte Veränderungen differenziert bewerten zu können und vergleichbare Messverfahren, wie die EMAT-Technologie auf den Prüfstand zu stellen.

AP 6.2 Entwicklung eines H₂-Testmolchs

Als Ergebnis des Projekts kann festgestellt werden, dass es grundsätzlich möglich ist, Pipelines in Wasserstoff (H₂) zu inspizieren. Erfolgreich wurde ein 10" EMAT-C Ultra ILI-Tool für die Erkennung axialer rissähnlicher Anomalien entwickelt. Darüber hinaus wurden die Herausforderungen, die mit der Durchführung von ILI in H₂-Pipelines verbunden sind, analysiert und entsprechende Lösungen erarbeitet. Dies gilt insbesondere für den Bereich der Magnete, aber auch für andere Materialtypen wurden geeignete Lösungen erfolgreich bewertet.

Basierend auf den umfangreichen Tests und Simulationen kann folgende aktuelle Aussage zur ILI in H₂-Umgebungen getroffen werden:

- H₂-Blends ≤ 2 %
→ erfordern keinerlei Schutzmaßnahmen und können mit dem bestehenden Tool-Portfolio ohne weitere Anpassungen inspiziert werden.
- H₂-Blends ≤ 20 %
→ erfordern Schutzmaßnahmen bei der Tool-Vorbereitung sowie den Austausch bestimmter Komponenten während der Tool-Instandsetzung nach der Inspektion.
- H₂-Blends > 20 %
→ zusätzlich zu Kategorie 2 ist eine verpflichtende betriebliche Risikoanalyse, einschließlich Strömungssimulationen für die vorgesehenen Tool-Konfigurationen, erforderlich.

Der Einsatz von ILI in Wasserstofftransportleitungen ist möglich und kann auch künftig das Integritätsmanagement der Pipelinebetreiber wirkungsvoll unterstützen. Allerdings müssen zusätzlicher Aufwand für Tool-Vorbereitung und Planung, längere Vorbereitungs- und Instandsetzungszeiten sowie zusätzliche Maßnahmen zur Gewährleistung einer sicheren und erfolgreichen Durchführung vor Ort eingeplant werden.

AP 6.3 Vorbereitung der Gashochdruckleitung für die Durchführung der Referenzmolchung im H₂-Strom

Die im Arbeitspaket 6.3 durchgeführten Untersuchungen und Maßnahmen zeigen, dass die Gashochdruckleitung 43 grundsätzlich für den zukünftigen Betrieb mit Wasserstoff geeignet ist. Die werkstofftechnische Bewertung ergab, dass der verwendete Rohrstoß L360 NB unter den vorgesehenen Betriebsbedingungen keine relevanten Einschränkungen hinsichtlich der Bruchmechanik oder der mechanischen Kennwerte aufweist. Der entsprechende Nachweis des Werkstoffverhaltens konnte im Rahmen des Projekts SysWest H₂ erbracht werden, sodass zusätzliche Probenentnahmen an der Leitung nicht erforderlich waren. Ergänzend wurden alle relevanten Komponenten der Stationen Holthausen II, Lingen West und Schepisdorf hinsichtlich ihrer Wasserstoffverträglichkeit überprüft und aus konservativen Gründen weitgehend durch H₂-geeignete Bauteile ersetzt, sodass ein konsistenter H₂-Ready-Status der Infrastruktur erreicht werden konnte.

AP 6.4 Durchführung einer Referenzmolchung im H₂-Strom und Ergebnisanalyse

Die Durchführung der Referenzmolchung im H₂-Strom ist nach der geplanten Umstellung der Leitung 43 auf Wasserstoff ab Mitte 2027 vorgesehen. Die technischen und logistischen Voraussetzungen hierfür wurden seitens Nowega und ROSEN vollständig geschaffen. Unklar bleibt derzeit noch, wie sich die realen hydraulischen Bedingungen nach der Inbetriebnahme der Leitung im Wasserstoffbetrieb darstellen werden.

IV.7 Arbeitspaket 7: Verdichterkonzepte

AP 7: Optimierung Verdichterkonzepte

AP 7.1 Systemaspekte Wasserstoffeinspeisung, -Erzeugung, Druckniveau, Initiale Verdichtung

Eine Verdichtung von Wasserstoff findet sowohl im kleinen Maßstab bei der Einspeisung als auch im Transportsystem für große Mengen statt. Um die Einspeisung nach einem Elektrolyseur technisch und monetär zu beschreiben, wurde ein Bedarfsprofil für eine modulare Einspeiseeinheit mit Fokus auf Druck und Volumenstrom erstellt. Aufbauend auf dem definierten, zu erwartenden H₂-Eingangstrom wurde ein Basic Engineering der Einspeiseeinheit erstellt.

Darauf aufbauend wurde ein technischer Lösungsansatz für eine standardisierte und modulare Wasserstoffeinspeiseanlage (WSEA) für dezentrale Wasserstofferzeugungsanlagen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Verdichtungstechnologien entwickelt sowie die jeweiligen Kosten abgeschätzt.

Eine WSEA setzt sich aus den beiden Hauptkomponenten Gasdruckregel- und Messanlage (GDRM) und einem Verdichtersystem zur Druckanpassung des erzeugten Wasserstoffs zusammen. Für die Umsetzung wurde eine containerbasierte Lösung gewählt, um zentrale Fertigung, standardisierten Transport und vereinfachte Installation und Wartung zu ermöglichen. Aus einer Studie wurden technische und wirtschaftliche Parameter in Bezug auf die Einspeisekriterien und deren prognostizierte Entwicklung z.B. in Bezug auf Volumenstrom und Druck abgeleitet.

Die GDRM-Anlage konnte in einem kompakten 20-Fuß-Container realisiert werden und deckt Elektrolyseleistungen bis 30 MW ab. Es wird ein Ultraschallzähler im einschiebigen Aufbau empfohlen, da dieser platzsparend und kosteneffizient ist. Im Vergleich der Verdichtungstechnologien zeigte sich der Kolbenverdichter als aktuell wirtschaftlichste Lösung, während der elektrochemische Verdichter (ECV) zukünftig durch Weiterentwicklung konkurrenzfähig werden könnte. Für niedrige Ausgangsdrücke der Elektrolyse wird ein Booster-Konzept empfohlen, wobei der ECV als effizienteste Lösung identifiziert wurde.

AP 7.2: Aufwuchs Transportbedarf und Optimierung des Transportsystems

Im Rahmen des Arbeitspakets „Aufwuchs des Transportbedarfs und Optimierung des Transportsystems“ wurden Maschinenkonfigurationen für potenzielle Wasserstoffverdichter im Transportnetz spezifiziert. Grundlage der Auslegung bildeten ausgewählte Arbeitspunkte aus einer bestehenden strömungsmechanischen Analyse zum visionären Wasserstoffnetz. Diese Arbeitspunkte sowie die grundlegenden Anforderungen an die Konstruktion von Verdichterstationen wurden einem Verdichterhersteller übermittelt. Der Hersteller führte daraufhin eine umfassende Machbarkeitsstudie durch, in der sowohl dynamische als auch Verdrängerverdichter evaluiert wurden. Als Antriebskonzepte wurden jeweils Elektromotoren und Gasturbinen berücksichtigt. Die Analyse umfasste neben der technischen Umsetzbarkeit auch Aspekte der Wirtschaftlichkeit und Flexibilität. Insbesondere erwies sich die sogenannte Back-to-Back-Konfiguration als besonders vorteilhaft, da sie einen flexiblen seriellen oder parallelen Betrieb der Verdichter ermöglicht.

OGE-intern wurden strömungsmechanische Rechnungen für verschiedene Leitungskonfigurationen durchgeführt und Folgerungen für den Transport von Wasserstoff abgeleitet. Dazu wurde im ersten Schritt eine Reihe von Basisrechnungen anhand einer einfachen Leitung durchgeführt. Anschließend wurde diese einfache Leitung um weitere Elemente erweitert, um zu zeigen, welche Möglichkeiten zur Steigerung der Transportkapazität eines Transportsystems existieren (Leitungsloops, Verdichter) und welche Vor- und Nachteile diese mit sich bringen. Die Rechnungen wurden mit Hilfe des Simulationsprogramms SIMONE erstellt. Auf Basis der durchgeführten Rechnungen lassen sich folgende grundsätzliche Schlussfolgerungen ableiten:

- Sollen große Mengen an Wasserstoff transportiert werden (beispielsweise 10 GW und 20 GW), ist es am kostengünstigsten, Leitungen mit großen Durchmessern zu nutzen.
- Ist mit einem großen Transportzuwachs zu rechnen, sind Loopleitungen als Ausbaumaßnahme grundsätzlich günstiger als Verdichter.
- Im Fall, dass das vorhandene Transportsystem nur geringfügig unterdimensioniert ist, lohnt sich der Zubau von Verdichtern.

Zusätzlich wurden Optimierungsberechnungen für das GETH2-Netz durchgeführt, welches als realitätsnahes Beispiel im Rahmen des festgelegten Kernnetzes dient. Die Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial des Netzes in verschiedenen Ausbauvarianten hinsichtlich Kapazität (Transportleistung) und Flexibilität (Speicherfähigkeit). Für die Analyse wurden drei Netzvarianten betrachtet: das Basisnetz ohne Erweiterungen, der zusätzliche Einsatz eines Verdichters in Ochtrup sowie der Ausbau einer Loopeitung zwischen Bad Bentheim und Dorsten.

Die Untersuchungen zeigen, dass sowohl Kapazität als auch Flexibilität maßgeblich von der Ausgestaltung des jeweiligen Netzes beeinflusst werden. Das Basisnetz ohne Maßnahmen weist das geringste Potenzial auf. Durch den Ausbau mit einer Loopeitung können die höchsten Werte für Kapazität und Flexibilität erzielt werden. Das Netz mit Verdichter in Ochtrup erreicht höhere Potenziale als das Basisnetz, bleibt jedoch hinter dem mit Loopeitung zurück.

Darüber hinaus belegen die Berechnungsergebnisse, dass zwischen Kapazität und Flexibilität ein konkurrierendes Verhältnis besteht: Eine verstärkte Nutzung der Kapazitäten führt zu einer Reduktion der Flexibilität und umgekehrt.

V. Verwendung der Zuwendung

V.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

DVGW-EBI:

Die beschriebenen Arbeiten wurden von erfahrenen, langjährigen Mitarbeitenden durchgeführt. Die wichtigsten Positionen sind dementsprechend die Personalkosten.

Die Investitionen wurden wie geplant größtenteils für Messtechnik und Spurenanalytik zu Wasserstoff verwendet.

RWE:

Die Zuwendungen wurden im Wesentlichen zur Errichtung der Teststrecke verwendet. Aufgrund der Höhe hervorzuheben sind die Ausgaben bezüglich des Engineerings (RWE Technologie International), Dienstleistungen der Firma Friedrich Vorwerk (Miete, Montage) sowie Auftragsfertigung von bestimmten Teilen zum Einbau bei der Firma Friedrich Vorwerk. Dabei ist hervorzuheben, dass sowohl Friedrich Vorwerk als auch die RWE-Generation erhebliche Kostensteigerungen zu ihren Lasten als Eigenleistung in das Projekt eingebracht haben.

Die RWE Power AG als Leitung des AP4 „H₂-Verträglichkeit von Werkstoffen“ erhielt für die Durchführung des AP4 Zuwendungen in Form von „Personalkosten“ (Position 0837) sowie „Reisekosten“ (Position 0838). Die Umsetzung der AP4-Arbeitspakete ergab einen höheren Personalbedarf als ursprünglich vorgesehen und einen wesentlich geringeren Bedarf an Reisemittel. Die geänderten Arbeitsweisen mit den modernen Werkzeugen des mobilen Arbeitens haben die Notwendigkeit von Meetings in Präsenz wesentlich reduziert, sodass der Reisebedarf deutlich geringer als geplant ausfiel. Im Gegenzug haben die technischen Randbedingungen des TransHyDE-Loops und der AP4-Fragestellungen zu einem wesentlich höheren Bedarf an Abstimmungsgesprächen geführt, was z.B. in mehreren Designreviews oder in geänderte Betriebsbedingungen mündete.

OGE:

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises zeigen sich in der Position „Abschreibungen auf vorhabenspezifische Anlage“ (Position: 0847). Im Besonderen ist hier die Mess- und Analysetechnik, mit einem Gesamtwert von ~330 tEUR zu nennen. Diese stellt einen essenziellen Bestandteil des Teilvorhabens von OGE dar und trug entscheidend zu den erzielten Ergebnissen bei. Ebenso ist der Umbau eines Aufreinigungscontainers samt Messcontainer zu nennen, durch den OGE weitere Erkenntnisse erzielen konnte und einen entscheidenden Beitrag zum Gesamtvorhaben leisten konnte. Darüber hinaus konnte OGE in verschiedenen Positionen Kosten einsparen, indem zum Beispiel entsprechende Geräte gemietet oder gepachtet statt gekauft wurden.

MeterQ:

Die Verwendung der Mittel teilt sich in Personalkosten für die Entwicklung der neuen PGC Variante zur Wasserstoffmessung, sowie Sachmitteln auf. Ein wesentlicher Posten war der Aufbau eines Wasserstoff Prüfstands sowie die Beschaffung der benötigten rückgeführten Prüfgase, die für die Entwicklung und Kalibrierung des Geräts benötigt wurden. Ein weiterer wesentlicher Posten war die Anschaffung und der Aufbau des Prototypen/Baumusters, das dann später im Loop in Lingen installiert und geprüft wurden. Schließlich wurden Mittel für die Durchführung der messtechnischen Prüfungen durch NMi Certin B.V sowie die PTB eingesetzt.

Universität Potsdam:

Die Arbeiten im Projekt erforderten den Einsatz von wissenschaftlichen Mitarbeitern mit vertieften Kenntnissen u.a. der Optik, Spektroskopie und Radiometrie.

Die folgenden Positionen sind zentrale Bestandteile des Labor-Funktionsmusters und, mit Ausnahme des Testlasers, auch des Feld-Funktionsmusters:

- Mit dem Testlaser konnten alle geplanten Tests und Messungen am LFM durchgeführt werden, daher konnte auf die Beschaffung des geplanten zweiten Lasers verzichtet werden.
- Das Detektionssystem besteht aus fünf PMT-Detektoren mit hoher Zeitauflösung und entsprechend schneller Messelektronik. Das System ist speziell für LIDAR-Anwendungen ausgelegt, ein Alleinstellungsmerkmal ist die gleichzeitige Messung im Single-Photon-Count-Modus und im Analog-Modus, woraus ein sehr hoher Dynamikbereich der Messungen resultiert.
- Die Hochleistungsoptiken und dichroitischen Strahlteiler und Filter hoher Güte wurden der Konzeption des Messverfahrens entsprechend definiert und als Kundenanfertigung beauftragt. Die Leistungsfähigkeit des Messsystems ist von der geforderten hohen Qualität der Optiken (optische Reinheit der Materialien, Blockungsgrad, Schmalbandigkeit) abhängig.
- Das Fabry-Perot-Interferometer als Teil der Detektionseinheit reduziert die Bandbreite der H₂-Detektion um ca. eine Größenordnung und bestimmt damit wesentlich die Empfindlichkeit des Messverfahrens. Alleiniger Hersteller eines im Betrieb justierbaren FPI war die Firma Light Machinery Inc. in Kanada.

Weitere Positionen:

- Der Profilmesser wurde zur Kontrolle des Laserstrahlprofils benötigt. Eine Ausführung für den UV-Bereich war zum Projektbeginn nicht vorhanden. Der Gasmischer wurde als Kundenanfertigung aus Modulen für die im Projekt relevanten Gase erstellt.
- Referenzanalytik-Plattform Im AP 5.2 wurden Raman-Spektroskopische Messungen an Gasmischungen mit variierendem Mischungsverhältnis der molekularen Anteile durchgeführt. Mit der Referenzanalytik konnte das Mischungsverhältnis und dessen vollständiger Wechsel in der Messzelle des LFM kontrolliert werden.

Alle Positionen wurden auf dem Vergabemarktplatz Brandenburg ausgeschrieben.

Adlares:

Die zur erfolgreichen Umsetzung des Vorhabens eingesetzten personellen Ressourcen und die damit verbundenen Personalkosten machen den größten Anteil der beanspruchten Förderung aus. Dieser Anteil ist sowohl durch die hohe fachliche Expertise und Spezialisierung des eingesetzten Personals als auch durch die hohe technische Komplexität und den Umfang der in AP5 bearbeiteten Fragestellung gerechtfertigt. Der für das Funktionieren des FFM benötigte 10 W Deep-UV-Hochleistungslaser ist eine der kostspieligsten Komponenten im FFM. Die Notwendigkeit der Verwendung eines Lasers dieser Größenordnung wurde durch Simulationsergebnisse gestützt und später im Feldexperiment bestätigt. Der nächste größere Posten der Förderung wurde für die Fertigung der Systemkomponenten und für den Kauf der hochspezifischen Messtechnik und Systemkomponenten des FFM verwendet.

Rosen:

Wie ursprünglich im Antrag geplant bestand der wesentliche, im TransHyDE-Projekt bei ROSEN geleistete Aufwand in Personalkosten zur Entwicklung eines H₂-fähigen Inspektionsgerätes gemäß der oben beschriebenen Arbeitspakete. Weitere relevante Positionen bildeten die für den Aufbau des Inspektionsgerätes aufgewendeten Materialkosten, sowie die innerbetrieblichen Leistungen für den Zusammenbau ab. Hervorzuheben sind hier die Kosten für die Materialauswahl, da die Materialien dem Medium Wasserstoff standhalten müssen, um die notwendige Funktionalität herzustellen. Den größten Anteil an den Materialkosten stellen die Ausgaben für die Messtechnik dar.

In den übrigen Positionen, wie Reisekosten fielen dagegen nur geringe Kosten im TransHyDE-Projekt an.

Nowega:

Die Aufwendungen wurden insbesondere für die Nullmolchung der Leitung 43 verwendet. Hier insbesondere zur Beauftragung der Molchfirmen und den unterstützenden Firmen hinsichtlich der Aufreinigung der Leitung und die Wasseraufbereitung. Weitere Aspekte waren die Umbauten an den Aufführungspunkten, sowie die damit verbundenen Projektstunden.

Evonik

Die gewährte Zuwendung wurde überwiegend für Personalkosten eingesetzt. Diese umfassten sowohl die fachliche Bearbeitung der projektspezifischen Aufgaben durch qualifizierte Mitarbeitende als auch die für eine ordnungsgemäße Projektdurchführung notwendigen administrativen Tätigkeiten, einschließlich Beratungs-, Organisations- und Unterstützungsleistungen.

V.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

DVGW-EBI:

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten erwiesen sich als notwendig, um die definierten Projektziele vollständig und termingerecht zu erreichen. Die beschriebenen Arbeiten wurden auf Basis der Projektplanung systematisch umgesetzt und trugen zur erfolgreichen Realisierung des Gesamtvorhabens bei.

RWE:

Die wesentliche Aufgabe der RWE Generation im Projekt war der Aufbau und der Betrieb der Teststrecke, sowie der Versorgung mit einer Wasserstoffherzeugung Vorort. Daher sind die zugehörigen Tätigkeiten und Ausgaben bezüglich der Errichtung notwendig für alle darauf aufbauenden Messungen und Tests. Während der Projektlaufzeit wurden dabei inhaltliche Anpassungen zur Ausgestaltung des Testloops, sowie zur zeitlichen Realisierung vorgenommen. Durch die verlängerte Projektlaufzeit konnten so alle Projektziele erfolgreich umgesetzt werden. Die Kostensteigerungen im Projekt wurden durch den Antragsteller in Eigenleistung erbracht.

Die Umsetzung und Koordinierung des AP4 „H₂-Verträglichkeit von Werkstoffen“ (RWE Power AG) wurde stets gemäß den zu erreichenden Projektzielen verfolgt. Die bereits erwähnte Verlängerung der Projektlaufzeit erwies sich als richtig in diesem Zusammenhang und erlaubte die Erreichung der gesetzten Ziele. In diesem Zusammenhang ist zu betonen, dass die im gesamten Projekt geleisteten Arbeiten, gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse einen wesentlichen Beitrag für eine Hochskalierung der Wasserstoffinfrastruktur darstellen und somit für dieses übergeordnete Ziel notwendig und angemessen waren.

OGE:

Die im Laufe des Projekts durchgeführten Arbeiten waren für eine erfolgreiche Durchführung und für die Erreichung der im Antrag beschriebenen Ziele zwingend erforderlich. Ebenso wurden sie stets vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit durchgeführt und die zur Verfügung gestellten Ressourcen sparsam und effizient eingesetzt.

MeterQ:

Durch die Notwendigkeit neben dem Gerät selber auch einen entsprechenden Prüfstand aufzubauen und zu bestücken und auf Grund der Tatsache, dass alle verwendeten Prüfgase speziell für diesen Zweck hergestellt und zertifiziert werden mussten, entstanden gegenüber einer Applikationsentwicklung im Bereich Erdgas signifikante Mehrkosten, die bei der Planung der Mittel für das Projekt berücksichtigt werden mussten. Am Ende konnte das Projekt mit dem geprüften Prototypen erfolgreich im Rahmen der geplanten Mittel abgeschlossen werden.

Universität Potsdam:

Mit der am Beginn des Projekts durchgeführten theoretischen Evaluierung (5.1) konnte die anfangs favorisierte Stimulated-Raman-Gain-Spectroscopy (SGRS) als Messmethode ausgeschlossen werden. Dadurch entfielen wesentliche Aufwendungen wie z.B. ein Raman-Shifter und Sicherheitseinrichtungen für dessen Betrieb. Die freiwerdenden Mittel ermöglichten die vorab nicht geplante Verwendung eines Fabry-Perot-Interferometers in der Detektionseinheit. Ausführliche Tests der Detektionseinheit im Laborfunktionsmuster (5.2) waren die Voraussetzung für die rechtzeitige Durchführung der geplanten Feldversuche (5.3, 5.4) zum Ende des Projekts.

Adlares:

Alle während des Projekts in AP5 geleisteten Arbeiten haben innerhalb der Projektlaufzeit und des Projektbudgets zur Realisierung der ursprünglich avisierten Projektziele geführt. Durch den rigorosen Einsatz numerischer Methoden zur Simulation der erwarteten sehr kleinen Messsignale, konnte schon sehr zeitig im Projekt das Anforderungsprofil des FFM beschrieben werden. Durch die Nutzung von CAD während des Entwicklungsprozesses konnten Komponentendesigns unter Einsatz von FEM und Optiksimulationen iterativ geprüft und optimiert werden. Außerdem wurden in enger Kooperation mit AP5.1 und AP5.2 Komponentendesigns unter Laborbedingungen getestet. Schlussendlich wurde in AP5 mit jeder Entwicklungsstufe von der ersten Konzeption des Messsystems, über das LFM, bis zum ersten

Feldeinsatz des prototypischen FFM, der vollständige Entwicklungspfad von TRL1 bis TRL5 erfolgreich und ohne technologische Dead-Ends beschritten. Durch die Entwicklung der Simulations-Toolchain zu Beginn des Projektes war es außerdem möglich, sehr flexibel auf durch den Ukraine-Krieg verursachte Materialengpässe und damit nicht einsetzbare Lasertechnologie zu reagieren, womit die im ursprünglichen Design geplante KrF-Excimer-Laserquelle (248 nm) durch die schlussendlich verwendete FHG-Nd:YAG-Quelle (266 nm) ersetzt werden konnte.

Rosen:

Die von ROSEN erbrachten Arbeiten in dem Projekt waren notwendig und angemessen, da sie zentrale Grundlagen für möglichen Molchungen von Pipelines für den Wasserstofftransport liefern. Die Ergebnisse aus der Bewertung der Wasserstoffverträglichkeit der Materialien der auf den Molchen verbauten Komponenten, die Simulation des Laufverhalten des Molches in Wasserstoff und mögliche Optionen zur Optimierung sind von hoher Bedeutung. Die Projektziele konnten durch die vorgenommenen Arbeiten termingerecht, wirtschaftlich und effizient erreicht werden.

Nowega:

Die im Rahmen der Arbeitspakete AP 6.1, 6.3 und 6.4 durchgeführten Tätigkeiten waren eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung der geplanten Untersuchungen sowie für die Erreichung der im Förderantrag definierten Projektziele. Die eingesetzten finanziellen Mittel dienen dabei insbesondere der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Untersuchungen an der Leitung im Erdgas- und Wasserstoffbetrieb. Sämtliche Maßnahmen wurden unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte umgesetzt, sodass die bereitgestellten Ressourcen zielgerichtet, sparsam und effizient eingesetzt wurden.

Evonik:

Die im Projekt umgesetzten Arbeiten waren notwendig, um die definierten Ziele zu erreichen. Dabei wurde stets wirtschaftlich gehandelt und die bereitgestellten Ressourcen effizient eingesetzt.

VI. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

DVGW-EBI:

Aus der Projektkoordination heraus konnte aus den umfangreichen Gesprächen mit fachlichen Experten zentrale thematische Schwerpunkte für ein mögliches Anschlussvorhaben identifiziert und in einer Projektskizze zur Antragstellung systematisch ausgearbeitet werden. Dazu zählen potenzielle Industriepartner mit ausgewiesener Expertise sowie weiterem Forschungsbedarf im Bereich der Wasserstoffspeicherung, ebenso wie Fragestellungen zu Komponenten, Messmethoden und werkstofftechnischen Anforderungen für Wasserstofftransportleitungen innerhalb der TransHyDE-2.0-Plattform „Transportnetze & Speicherung von Wasserstoff“ (Säule 2). Entsprechende thematische Bedarfe für CO₂-Transport und -Speicherung wurden einer eigenen Säule im Rahmen von THy 2.0 zugeordnet und derzeit für eine gebündelte Antragstellung aufbereitet.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse leisten einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung des technischen Regelwerks für den leitungsgebundenen Transport von Wasserstoff. Darüber hinaus fließen die gewonnenen Erkenntnisse in systemanalytische Betrachtungen ein, die eine realistische Bewertung von Kostenstrukturen und Transformationspfaden ermöglichen. Angesichts der wachsenden Bedeutung von Wasserstoff im zukünftigen nachhaltigen Energiesystem besteht ein

erheblicher Bedarf an qualitätsgesichertem Transferwissen. Die im Projekt GETH2 erarbeiteten Erkenntnisse sollen daher als Grundlage dienen, um Verbände, kommunale Akteure und weitere Stakeholder bei der Integration von Wasserstoffinfrastrukturen zu unterstützen.

RWE:

RWE wird die Erkenntnisse aus dem Projekt in den kommenden Wasserstoffprojekten nutzen. Konkret gibt es derzeit mehrere Standorte in Deutschland, in denen große Elektrolyseanlagen mit Einspeisung in das zukünftige Kernnetz geplant sind. Die Erkenntnisse der durchgeführten Arbeiten erlauben eine bessere Einschätzung des Aufwands für eine Umwidmung von bestehenden Erdgasleitungen bzw. Komponenten sowie den Umgang mit betriebsbeanspruchten Werkstoffen. Insbesondere die zum Teil geänderten mechanischen Eigenschaften einiger betrachteten Rohrsegmente unterstreicht die Notwendigkeit des Nachweises der mechanischen Eigenschaften im Rahmen von Qualifizierungsverfahren.

Noch offen ist die Nachnutzung der im Projekt aufgebauten Infrastruktur des Testloops. Hierzu ist es geplant nach Abschluss und Auswertung aller Ergebnisse zusammen mit den Partnern aus dem Konsortium Mitte 2026 einen Workshop durchzuführen und weiterführende Schritte zu definieren. Denkbar ist sowohl eine Nutzung zur eigenen Werkstoffqualifizierung, ähnlich AP4, oder die Bereitstellung für Partner für weiterführende Arbeiten. Als mögliche Fragestellungen kommen momentan u.a. die Degradation durch MIC (mikrobiell induzierte Korrosion), die Wasserstoff-kompatibilität von faserverstärkten Kompositrohren, die Grenzwerte für herstellungsbedingter Kalt-verfestigung von Komponenten und Rohren, die H₂-Beständigkeit von Verschleisschutzschichten (Stellite; relevant für Ventile) in Betracht.

OGE:

Die im Vorhaben erreichten Ziele tragen entscheidend zur Weiterentwicklung von OGE und im speziellen dem neuen Geschäftszweig Wasserstofftransport bei, wodurch ein Beitrag zur Schaffung neuer und Sicherung bestehender Märkte entstand. Die physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff sorgen u.a. für andere Anforderungen an die Anlagentechnik, aber auch an die Messtechnik. Diese Themenfelder konnten im Rahmen des Projektes bearbeitet werden. Hier ist der Kenntnisstand zur technischen Machbarkeit und damit einhergehenden Kosten der Verdichtung zu nennen sowie die nun etablierte Probennahme und Analyse der Gaszusammensetzung. Relevant für die Wasserstoffwirtschaft und für OGE als Transporteur ist die Abrechnung, in die die geeichte Messung von Volumenstrom und Gaszusammensetzung eingeht. Durch die Arbeiten konnten neue, entscheidende Erkenntnisse (Schaffung Know-how und Kompetenzerhaltung bei OGE) für den sicheren Transport gewonnen werden.

Überdies trägt das Projekt zur Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung und der EU bei, da die Ergebnisse eine wichtige Grundlage für den Ausbau und den Betrieb des Wasserstoff-Kernetzes bilden. Im Rahmen des Vereins TransHyDE 2.0 engagiert sich OGE u.a. für Folgeprojekte um auf dem gewonnen Wissen mit Partnern aufzubauen.

MeterQ:

Ziel war es ein Messgerät zu entwickeln, das für die Wasserstoffqualitätsmessung unter metrologischer Kontrolle eingesetzt werden kann. Das entwickelte Gerät kann heute für die Bewertung vieler Projekte im Bereich Wasserstoff, die für den Wasserstoffhochlauf unerlässlich sind eingesetzt werden. Dies hat bereits der Einsatz in Lingen gezeigt, in dem die Messergebnisse genutzt wurden und werden, um in

Echtzeit den Einfluss von Änderungen im Betriebszustand des Loops auf die Gaszusammensetzung zu erfassen und auszuwerten. In weiteren parallelen Tests wurde u.a. ein anderer Prototyp eingesetzt, um dynamische Prozesse bei der Entnahme von Wasserstoff aus einer Kaverne zu untersuchen.

Neben dem Nutzen des Systems für die Analyse von Forschungsprojekten im Rahmen des Wasserstoffhochlaufs, wurde das Gerät insbesondere im Hinblick auf den eichamtlichen Einsatz zur Wasserstoffqualitätsmessung entwickelt. Solche Geräte sind Voraussetzung für die Einspeisung von Wasserstoff in das im Aufbau befindliche Wasserstoffnetz. Sie werden daher bereits heute sowohl für große Elektrolyse Anlagen als auch für Wasserstoffspeicher benötigt und sind Teil entsprechender Pilotprojekte.

Eine online-Wasserstoffqualitätsmessung, die auch eichamtlich für die Wasserstoffabrechnung eingesetzt werden kann, ist somit sowohl für die Transformation hin zu einer nationalen und internationalen Wasserstoffinfrastruktur, als auch für den späteren regulären Betrieb dieser Infrastruktur unverzichtbar.

Universität Potsdam:

Die UP hat mit dem Projekt wissenschaftliche und technologische Kompetenz gewonnen, die Voraussetzung zur Weiterentwicklung des Ferndetektionssystems ist. Kurz- bis mittelfristig soll die Verwertbarkeit des entwickelten Messverfahrens durch Folgeprojekte erweitert werden. Dabei ist einerseits der Technologie-Reifegrad zu erhöhen, andererseits soll der Anwendungsbereich durch eine mobile Variante des Messsystems auf die Überprüfung großflächiger Industrieanlagen erweitert werden. Hierzu hat die UP mit dem Projektpartner Adlares ein Projekt im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) beantragt. Eine weitere potentielle Anwendung ist die Überprüfung großer Kavernen, die zur Wasserstoffspeicherung genutzt werden sollen.

Bis 2032 soll in Deutschland ein Wasserstoff transportierendes Kernnetz in Betrieb gehen, welches anfangs Leitungen mit einer Gesamtlänge von 9000 km umfasst (Bundesnetzagentur), europaweit sollen bis 2030 etwa 28.000 km Wasserstoff führende Leitungen in Betrieb sein [8]. Für diese wird es wie bei Erdgasleitungen Sicherheitsvorschriften zum Betrieb geben. Damit ist langfristig ab 2030 mit hoher Wahrscheinlichkeit ein umfangreicher Markt für die Überwachung der Netzleitungen zu erwarten.

Die Projektpartner haben einen Prüfungsantrag für ein gemeinsames Patent gestellt, damit wäre langfristig die Einnahme von Lizenzgebühren möglich.

Die UP kann Folgeprojekte durch Beteiligung mit Studienarbeiten und Postdoc-Stellen für die Nachwuchsförderung nutzen. Mit dem Projektpartner Adlares ist eine wissenschaftliche Publikation zu den vorliegenden Ergebnissen geplant.

Adlares:

Die während der Projektlaufzeit gewonnenen Erkenntnisse lassen sich an der Entwicklung des Messsystems von TRL1 auf TRL5 messen: Das FFM stellt einen in relevanter Umgebung einsetzbaren Messaufbau an der Grenze zum Prototypen für eine Technologiedemonstration mit TRL6 dar, wobei die generelle Machbarkeit eines wasserstoffsensitiven Raman-LIDARs demonstriert und IP generiert wurde.

Bis zum Erreichen eines vollständig einsatzbereiten luftgestützten, wasserstoffsensitiven Leckageortungssystems sind jedoch noch umfangreiche Weiterentwicklungen des Messsystems notwendig, so dass kurzfristig eine direkte wirtschaftliche Verwertung der Entwicklung nicht möglich ist. In einem bereits beantragten Folgeprojekt soll die Entwicklung des Messsystems weiter

vorangetrieben werden. Hier liegt der Fokus insbesondere auf einer umfassenden in-situ Charakterisierung des Messsystems und auf der Entwicklung geeigneter praxistauglicher Auswertearithmetik und Systemfunktionen.

Mittelfristig müssen für die Realisierung höherer TRLs des Messsystems technologische Entwicklungen von Deep-UV-Lichtquellen in den Fokus rücken. Dabei muss die Effizienz der Lichtquellen steigen, um einerseits Leistungsaufnahme und andererseits das Gewicht der Lasersysteme und der Infrastruktur der Systeme zu senken.

Die längerfristigen wirtschaftlichen Erfolgsaussichten eines voll entwickelten und einsatzfähigen luftgestützten Messsystems hängen neben der politischen Dimension des Energiewandels stark von der Durchdringung von wirtschaftlichen Sektoren wie der Schwerindustrie oder dem Energiesektor mit Wasserstofftechnologie ab: Erst mit einer etablierten Wasserstoffwirtschaft und dem damit verbundenen Ausbau und Betrieb der Wasserstoffinfrastruktur sowie der mit deren Betrieb verbundenen gesetzlichen Regulierung ergeben sich umfassende betriebswirtschaftliche Perspektiven.

Rosen:

Die Ergebnisse des Arbeitspakets 6 bilden die Grundlage für einer der künftigen Einsatzmöglichkeiten intelligenter Molchverfahren im Wasserstoffnetz der Nowega GmbH. Nach Projektende soll der entwickelte H₂-fähige 10" Pilot-EMAT-Molch in den operativen Betrieb der Fa. Rosen überführt und für regelmäßige Integritätsprüfungen auch anderer Produktenrohre eingesetzt werden. Dazu sind grundlegende Modifikationen der Elektronik notwendig, welche zum aktuellen Zeitpunkt noch entwickelt werden müssen, um einen regelmäßigen operativen Einsatz zu ermöglichen.

Nowega:

Die im Rahmen der Arbeitspakete gewonnenen Erkenntnisse liefern eine belastbare Grundlage für die Bewertung und Vorbereitung bestehender Erdgasleitungen im Hinblick auf eine zukünftige Nutzung für den Wasserstofftransport. Insbesondere die Ergebnisse der Nullmolchung, der technischen Vorbereitung der Leitung sowie der anschließenden Referenzuntersuchungen im Wasserstoffstrom ermöglichen eine fundierte Einschätzung des Leitungszustands und der Integrität unter veränderten Betriebsbedingungen. Die gewonnenen Daten und Erfahrungen können daher sowohl für die Planung zukünftiger Umstellungsprojekte als auch für die Weiterentwicklung technischer Bewertungs- und Prüfverfahren im Kontext der Wasserstoffinfrastruktur genutzt werden. Damit leisten die Ergebnisse einen wichtigen Beitrag zur sicheren und wirtschaftlichen Transformation bestehender Gastransportnetze hin zu einer Wasserstoffnutzung.

Evonik:

Die Projektergebnisse bieten Evonik einen klaren Mehrwert, da sie das bestehende Know-how im leitungsgebundenen Wasserstofftransport gezielt erweitern. Die langjährige Erfahrung aus industriellen Gasnetzen lässt sich nun auf großskalige Wasserstoffstrukturen übertragen und stärkt die technische Kompetenz für kommende Transformationsprojekte. Zudem wurde im Bereich der intelligenten Molchung relevantes Planungswissen zu modernen Inspektionstechnologien aufgebaut. Insgesamt versetzen die gewonnenen Erkenntnisse Evonik in die Lage, zukünftige Wasserstoffinfrastrukturprojekte effizienter, sicherer und technologisch fundierter umzusetzen.

VII. Fortschritt des Projektumfelds während der Laufzeit

Seit 2021 wurden in Deutschland wesentliche Schritte zum Aufbau eines nationalen Wasserstoff-Pipelinennetzes eingeleitet. 2024 genehmigte die Bundesnetzagentur das Wasserstoff-Kernnetz mit einer geplanten Gesamtlänge von 9.040 km, wovon etwa 60 % durch die Umwidmung bestehender Erdgasleitungen entstehen sollen. 2025 wurde der erste große Abschnitt – eine 400 km lange umgerüstete Pipeline – in Betrieb genommen und bildet nun eine zentrale Nord-Süd-Achse von der Ostsee bis Sachsen-Anhalt. Ebenso konnte OGE im Dezember 2025 die erste Wasserstoff-Neubauleitung zwischen Heek und Epe in Betriebsbereitschaft versetzen. Parallel werden an mehreren Standorten, etwa in Lubmin, bestehende Gasleitungen schrittweise für den H₂ Transport angepasst, um Industriezentren wie das Ruhrgebiet oder Berlin künftig anbinden zu können. Ebenso hat Evonik 2025 eine insgesamt mehr als 50 Kilometer lange Wasserstoffleitung betriebsbereit gemacht. Die Pipelineverbindung erstreckt sich von Legden im Norden von NRW durch den Chemiapark Marl bis zum Raffineriestandort Gelsenkirchen. Sie ist eine der ersten Verbindungsleitungen an das Kernnetz und besteht aus Umstellungs- und Neubauabschnitten.

Unterschiedliche Wasserstoffanwendungen haben unterschiedliche Reinheitsanforderungen und sind teilweise sensibel gegenüber spezifischen Gasbegleitstoffen. Durch die Bandbreite an Herstellungsverfahren, den Transport durch umgestellte Erdgasleitungen sowie insbesondere die Kavernenspeicherung besteht die Möglichkeit, dass in den Wasserstoff Verunreinigungen eingetragen werden. Bei Elektrolyseuren kann grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden, dass vor allem Feuchtigkeit und Sauerstoff eingetragen werden, während beim Ammoniak-Cracking Unsicherheiten über verbleibende Stickstoff- und Ammoniakreste bestehen. Besonders kritisch bleibt die Speicherung, da Kavernen zusätzliche Stoffe (insbesondere Methan) in den Wasserstoff einbringen können und mit der Aufreinigung hohe Kosten einhergehen. Parallel stieg der Druck zur europäischen Harmonisierung, da unterschiedliche nationale Reinheitsgrenzen Marktfragmentierung und zusätzliche Reinigungskosten verursachen würden. Eine EU-Studie von 2025 deutet an, dass sich eine H₂-Reinheit von mind. 99,5 % als bestes Gleichgewicht zwischen Kosten und technischer Machbarkeit erweisen könnte. Viele Endanwendungen in der chemischen Industrie fordern jedoch mindestens 99,9 %, um u.a. Schäden an sensiblen Katalysatoren zu vermeiden. Technologisch werden neue Adsorbentmaterialien entwickelt, die ein breites Spektrum kritischer Verunreinigungen effizient entfernen können. Gleichzeitig gewinnt die Qualitätsanalyse weiter an Bedeutung, da Labore Verunreinigungen bis in den ppb-Bereich nachweisen müssen, um die Normkonformität des Wasserstoffes abzusichern.

Die technischen Herausforderungen der Umrüstung wurde in nationalen Forschungs- und Demonstrationsprojekten vertieft untersucht. Insgesamt hat Deutschland seit 2021 klare regulatorische Grundlagen geschaffen, große Teile des Gasnetzes für H₂ ertüchtigt und damit den Hochlauf eines landesweiten Wasserstofftransports bis Anfang der 2030er-Jahre entscheidend vorangebracht.

Aus materialwissenschaftlicher Sicht (AP 4) waren im Laufe der Projektlaufzeit sehr positive Entwicklungen in der Deutschen und Europäischen Forschungs- und Prüflandschaft zu verzeichnen. Durch die zahlreichen Leitprojekte der TransHyDE-Initiative sowie die technisch notwendigen Prüfungen und Nachweise konnte ein merklicher Anstieg der Testkapazitäten in Form von mehreren Industrie- und Forschungslaboratorien verzeichnet werden. Gleichzeitig ist die Anzahl Fachexperten sowie die Ausbildung von Fachpersonal ebenfalls merklich angestiegen. In diesem Zusammenhang sind u.a. Aktivitäten beim vge energy e.V. (Fachverband für Energieanlagenbetreiber), DVGW, VDI, DGM, BAM Berlin, DVM und EPRI als prominente Beispiele für den fachlichen Austausch und Dissemination

zu nennen. Aus den Aktivitäten sind u.a. für die Öffentlichkeit sichtbare Veranstaltungen, wie die vgb MATHEA Konferenzen 2025 und 2026, das BAM H2 Safety – Kolloquium oder die DGM H2 MSE 2025 und 2027 entstanden

VIII. Erfolgte Veröffentlichungen

Erfolgte Veröffentlichungen

Art (Whitepaper, Fachbericht, Journal Paper...)	Titel	Autoren/ involvierte APs	DOI
Whitepaper	Verdichtung und Wasserstofftransport: Eine technische und wirtschaftliche Analyse	Dr. Ann-Christin Fler Maurizio Sciancalepore Eva-Maria Spreckelsen René Werner Verbücheln /AP7	
Paper	Aktuelle Fragestellungen beim leitungsgebundenen Transport von Wasserstoff	Frank Graf, Volkan Isik, Maximilian Heneka, Wolfgang Köppel, Thomas Kolb, Ann-Christin Fler und René Werner Verbücheln	10.1002/cite.202300106
Patent	Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2025 109 676.7 Titel: "Vorrichtung und Verfahren zur Ferndetektion von Wasserstoffgas"	Oliver Reich; Ingo Gersonde; Christian Prüfert; Andreas Hoffstädt; Sebastian Friede / AP5	
Fachbericht	Maßnahmen zur Umstellung einer Gashochdruckleitung auf den Betrieb mit Wasserstoff	Dennis Hoeveler, Florian Adämmer, Fabian Howe	03/2022

Artikel	TransHyDE-GETH2 – Teilvorhaben der Meter-Q Solutions GmbH zu infrastrukturellen und betriebstechnischen Aspekten bei Neubau von Wasserstoffnetzen oder Umstellung von Erdgastransport.	Dr. Achim Zajc;	Bundesbericht Energieforschung 2023
Artikel	Bestimmung von Wasserstoff nach der TR G 16 (2/2023)	Dr. Achim Zajc, Dr. Jan Suhr:	gwf Gas + Energie, 2023, 46 – 52
Whitepaper	Gasanalytik (Gasbeschaffenheitsmessung)	AP3.1 Schütz, Zajc, van Almsieck, verbundübergreifend	TransHyDE Homepage
Artikel	„Abrechnung von Wasserstoff - Quantifizierung von Wasserstoff mit einer zertifizierten Messunsicherheit von $\leq 0,05\%$ “	AP3, Achim Zajc, Jan Suhr (MeterQ),	GWF Gas und Energie (10-11), 2024, S. 52-60
Artikel	Wenn die Pipeline mal ein Leck hat	Toni Haubitz, Ingo Gersonde, AP5	Portal Wissen – Das Forschungsmagazin der Universität Potsdam ISSN 2194-4237, Eins 2023, (85-87)
Film	Loop in Lingen	AP 2, AP3, AP4	zwei YouTube-Kanäle (BreakingLab & Dr. Watson) in Q4 2025

Veranstaltungstitel / Konferenz	Vortragstitel	Datum	Veranstaltungsort
DVGW: 27. Kolloquium „Gas- und Wassermessung“	Gasbeschaffenheitsmessung mit 100 % Wasserstoff“; Dr. Achim Zajc (meterQ):	02. – 03. Mai 2023,	Hamburg
(Re)Calibration workshop and grand opening of MEGA loop	“Transition from Natural Gas to Hydrogen – Monitoring the Process“; Dr. Achim Zajc (meterQ):	10-12 May 2023	FORCE Technology, Vejen, Denmark
49. Jahrestagung Schadensanalyse	<i>Werkstofftechnische Charakterisierung und Bewertung von Erdgas-Bestandsanlagen für den Betrieb mit Wasserstoff</i> Dr. Barbara Waldmann	18.-19.10.2023	Würzburg
Siemens Energy Workshop: Basics and challenges of Hydrogen in energy applications	<i>Hydrogen.Materials.Safety@RWE</i> Dr. Fabian Unterumsberger	13.06.2024	Mülheim an der Ruhr
vgbe MATHEA Conf. 2025 - MATerials in Hydrogen-related Energy Applications	<i>Hydrogen.Materials.Safety@RWE – Report from the Transhyde projects</i> Fabian Unterumsberger, Stephan Eisen-Humberg, Philipp Schulte im Walde, Till Quadflieg, RWE / Germany	24. und 25.06.2025	Hamburg
E-World	Wie das WLP TransHyDE den Aufbau des Kernnetzes unterstützt	16.01.2024	online
E-World	Monitoring the Gas Quality Hydrogen - A Challenge for Determining the Gas Quality	16.01.2024	Essen
beyondgas Congress 2024	„Abrechnung von Wasserstoff - Evaluierung eines Analysen-Systems“, Dr. Jan Suhr; MeterQ Solutions GmbH,	17. bis 19. September	Oldenburg
64. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches	Die Bestimmung der Wasserstoffqualität für den eichamtlichen Verkehr – aktueller Stand; Dr. Achim Zajc (meterQ):	20. - 22. September 2023	Oberursel

64. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches	“H ₂ -Beschaffenheitsmessung für die 5. Gasfamilie des DVGW-Arbeitsblattes G 260; Jochen Schütz, DVGW-Forschungsstelle am EBI des KIT), Marc-Andre Lehmann (Open Grid Europe GmbH)	20. - 22. September 2023	Oberursel
64. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches	Versuchspipeline GETH2 TransHyDE; Marko René Kadenbach (RWE Generation SE)	20. - 22. September 2023	Oberursel
65. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches	Wasserstoffbeschaffenheit im europäischen H ₂ -Kernnetz (Dr. Tobias van Almsick, Open Grid Europe GmbH)	5./6.9.2024	Leipzig
66. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches	Entwicklung eines EMAT-C ILI Molches zur Rissdetektion im H ₂ -Strom; Michael Tewes, ROSEN Germany GmbH	18./19.09.2025	Groningen
66. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches	Wasserstoffspeicherung in Salzkavernen – H ₂ -Qualität im Kontext der Untertage-speicherung; Sebastian Cichowski, RWE Gas Storage West GmbH	18./19.09.2025	Groningen
66. Erfahrungsaustausch der Chemiker und Ingenieure des Gasfaches	on-line“ – Qualitätsüberwachung von Kohlenstoffdioxid im CO ₂ -Transportnetz; Dr. Achim Zajc, Meter-Q-Solutions GmbH	18./19.09.2025	Groningen
10. Essener Gespräche zur Infrastruktur	H ₂ -Infrastruktur von Legden bis Gelsenkirchen – Leitungs-umstellung und Neubau im Projekt GETH2 Nukleus; Rabea Buß, Evonik Operations GmbH	18.4.2024	Essen
Webinar Klimadiskurs NRW	Aus der Umsetzung der Infrastruktur – Umstellung und Neubau von Pipelines im Rahmen von GETH2; Rabea Buß, Evonik Operations GmbH	3.4.2025	online
TransHyDe Abschlusskonferenz	Entwicklung eines EMAT-C ILI Molches zur Rissdetektion im H ₂ Strom	25.03.2025	Berlin

Literaturverzeichnis

- [1] K. K. u. M. U. W. Zirrig, „Erdgas hat einen optischen Fingerabdruck CHARM, das hubschraubergetragene Gasferndetektionssystem,“ *3R International*, Bd. 11, Nr. 44.
- [2] A. F. e. al, „CHARM - A Helicopter-Borne Lidar System for Pipeline Monitoring“.
- [3] R. Z. u. N. Barilo, „Wide Area and Distributed Hydrogen Sensors“.
- [4] S. H. B. J. H. C. u. J. H. K. I. Y. Choi, „A hydrogen gas concentration measurement method using the Raman lidar system“.
- [5] A. L. e. al, „Raman lidar for hydrogen gas concentration monitoring and future radioactive waste management,“ *Opt. Express* 30636, Bd. 25, Nr. 24, Nov. 2017, .
- [6] A. H. S. N. Y. O. a. M. M. N. J. Vasa, „Feasibility of nonlinear Raman lidar based on stimulated Raman gain spectroscopy without a tunable laser,“ *Applied Optics*, Bd. 41, Nr. 12, p. 2328, 2002.
- [7] S. A. H. S. M. Z. Z. Chowdhury, „Evaluating Design Parameters for Breakthrough Curve Analysis and Kinetics of Fixed Bed Columns for Cu(II) Cations Using Lignocellulosic Wastes,“ *BioResources*, pp. 732-749, 2015.
- [8] J. Huang, „A Simple Accurate Formula for Calculating Saturation Vapor Pressure of Water and Ice,“ *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, Bd. 57, Nr. 6, pp. 1265-1272, 2018.
- [9] J. J. G. I. G. A. W. L. K. u. M. O. R. van Rossum, „European Hydrogen Backbone: A European hydrogen infrastructure vision covering 28 countries,“ 2022. [Online]. Available: <https://ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00>.