



## - Abschlussbericht zum Projekt HylInnoNets -

- Teil I: Kurzbericht -

### Zuwendungsempfänger:

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)

Lehrstuhl für Digital Additive Production (DAP)

Institut für Textiltechnik (ITA)

**Förderkennzeichen:** 03ZU1115BA

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.10.2021 – 30.09.2024

**Berichtszeitraum:** 01.10.2021 – 30.09.2024

GEFÖRDERT VOM



**CLUSTERS  
4 FUTURE**  
Innovationsnetzwerke  
für unsere Zukunft



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## **Stand der Technik und Zielsetzung**

Zum Aufbau eines Wasserstoff-Pipelinenetzes sollen bestehende Erdgaspipelines genutzt werden. Die für diese verwendeten Stähle sind aber teilweise nicht für den Betrieb mit Wasserstoff geeignet, es kommt zur Wasserstoffversprödung. Eine Möglichkeit, um diese Pipelines für den Betrieb mit Wasserstoff bereit zu machen, ist die Innenbeschichtung mit Permeationsbarrieren, welche den Wasserstoff nicht hindurchlassen und so das Rohrmaterial schützen.

Zu Beginn des Forschungsprojekts war die Technologie des high-speed directed energy deposition (HS-DED), bzw. früher Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA), eine in der Forschung etablierte Technologie, mit der metallische und Metall-Matrix-Komposit-Beschichtungen auf metallische Substrate aufgebracht werden konnten. Die Technologie war allerdings auf die Außenbeschichtung von Bauteilen beschränkt. Im Projekt sollte daher eine Innenbeschichtungsoptik und der Prozess für die Innenbeschichtung entwickelt werden, um Rohre von innen beschichten zu können.

Der großflächige Einsatz von Wasserstoff als nachhaltiger Energieträger erfordert eine effiziente Infrastruktur für dessen Transport. Aktuell basiert das deutsche Gasleitungsnetz auf Stahlpipelines gemäß DVGW-G 463, die jedoch für den Transport von reinem Wasserstoff nur bedingt geeignet sind, da Wasserstoffdiffusion zu Versprödung und Materialschäden führen kann. Während bestehende Stahlpipelines durch innovative EHLA-Beschichtungstechnologien für den Wasserstofftransport nachgerüstet werden sollen, besteht gleichzeitig ein wachsender Bedarf an neuen, kosteneffizienten Pipeline-Lösungen. Hier setzt das Projekt HyInnoNets an, das die Entwicklung faserverstärkter Kunststoffpipelines (FVK) als Alternative zu herkömmlichen Stahlrohren erforscht. Diese FVK-Pipelines zeichnen sich durch geringes Gewicht, hohe Korrosionsbeständigkeit und eine reduzierte Temperatursensitivität aus und sollen für den Hochdruckbetrieb im Wasserstoff-Fernleitungsnetz optimiert werden. Durch die Kombination von FVK mit EHLA-Beschichtungstechnologie soll ein innovatives Composite-Pipeline-System entwickelt werden, das sowohl mechanische Stabilität als auch eine geringe Wasserstoffpermeabilität gewährleistet. Ziel des Projekts ist es, Prototypen solcher Pipeline-Systeme zu realisieren und ihre technische sowie wirtschaftliche Eignung für den zukünftigen Wasserstofftransport zu evaluieren. Damit leistet HyInnoNets einen entscheidenden Beitrag zur nachhaltigen Umsetzung der nationalen Wasserstoffstrategie.

## **Wesentliche Projektergebnisse**

Das Projekt bestand aus sieben Arbeitspaketen. Zunächst wurden in AP1 gemeinsam die Anforderungen an Rohr und Beschichtung definiert. Anschließend wurden im Bereich der

Beschichtungen in AP2 und AP4 die Innenbeschichtungsoptik entwickelt und der Beschichtungsprozess entwickelt. Parallel wurde die Fertigung der FVK-Rohre in AP3 und AP5 mit der Entwicklung der Systemtechnik für die Wicklung und der Prozessentwicklung zur Fertigung von Faserverbund-Pipelines entwickelt. Zuletzt wurde in AP6 die Möglichkeit der metallischen Beschichtung von FVK-Rohren mittels HS-DED untersucht. Außerdem wurden in AP7 die gefertigten beschichteten und unbeschichteten Rohre im Hinblick auf die Wasserstoffpermeabilität getestet.

Im Rahmen des Projekts wurden grundlegende Anforderungen für die Innenbeschichtung von FVK-Pipelines mittels HS-DED definiert. Die Materialauswahl für die Beschichtungen konzentrierte sich auf Aluminium und Metall-Matrix-Komposite (MMC) aus 316L+TiC. Die Innenbeschichtungsoptik (IBO) wurde erfolgreich entwickelt, um möglichst kleine Rohre von innen beschichten zu können. Der kleinstmögliche Innendurchmesser für die Beschichtung betrug ca. 85 mm.

Die Prozessentwicklung zeigte, dass die Innenbeschichtungen mit 316L und MMC rissfrei und mit geringen Porositäten erzeugt werden konnten. Bei der Aluminium-Innenbeschichtung wurden anfänglich Anbindungsdefekte festgestellt, die durch niedrige Energieeinbringung in das Substrat aufgrund des 45°-Neigungswinkels der IBO hervorgerufen wurden. Durch Anpassungen der Optik und Erhöhung der Laserleistung konnten die Defekte behoben werden. Im Rahmen des Projekts HylInnoNets konnten entscheidende Fortschritte bei der Entwicklung faserverstärkter Kunststoffpipelines (FVK) für den Transport von gasförmigem Wasserstoff erzielt werden.

#### **1. Umfassende Untersuchung aller relevanten Komponenten und Prozesse**

Die grundlegenden Material- und Prozessanforderungen für FVK-Pipelines wurden detailliert analysiert. Dabei wurden alle wesentlichen Aspekte untersucht, darunter geeignete Faser-Matrix-Kombinationen, die Fertigungsprozesse zur Herstellung der Rohre inkl. Inline-Konsolidierung, die Strömungsmechanik des Wasserstofftransports, die Permeationseigenschaften der Materialien sowie innovative Verbindungstechnologien. Diese Untersuchungen führten zu einem tiefgehenden Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Materialeigenschaften und Wasserstoffbelastung.

#### **2. Entwicklung und Validierung von Prototypen**

Basierend auf den Erkenntnissen der Material- und Prozessstudien wurden erste Prototypen faserverstärkter Kunststoffrohre gefertigt. Diese wurden umfassend getestet, um ihre mechanischen und chemischen Eigenschaften im Hinblick auf Hochdruck-Wasserstoffanwendungen zu bewerten. Besonders im Fokus standen

dabei die Druckbeständigkeit, die Langzeitstabilität, die Temperaturresistenz sowie die Permeationsrate der Werkstoffe.

### 3. **Optimierung der Material- und Verbindungstechnik**

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung einer effizienten Verbindungstechnik für FVK-Pipelines, um eine sichere und dichte Kopplung zwischen den Rohrsegmenten zu gewährleisten. Hierbei wurden verschiedene Verbindungskonzepte getestet und hinsichtlich ihrer mechanischen Belastbarkeit, ihrer Dichtigkeit gegenüber Wasserstoff und ihrer Langzeitstabilität optimiert.

Durch diese Ergebnisse wurde eine entscheidende Grundlage für den Einsatz von FVK-Pipelines im zukünftigen Wasserstofftransport geschaffen. Die entwickelte Technologie zeigt vielversprechende Perspektiven für eine kosteneffiziente und nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Stahlpipelines.

Zudem konnte nachgewiesen werden, dass metallische Beschichtungen auf FVK-Rohren mittels HS-DED prinzipiell möglich sind, wobei thermoplastische Materialien als Substrate besonders geeignet sind. Dabei muss eine möglichst hohe Energiezufuhr in das Beschichtungsmaterial ermöglicht werden, ohne das Substrat zu schädigen. Daher eignen sich Substrate mit hoher Erweichungstemperatur und Wärmeleitfähigkeit sowie die Nutzung eines metallischen Liners zum Wärmeabtransport.



**- Abschlussbericht zum Projekt HylInnoNets -**  
**- Teil II: Eingehende Darstellung -**

**Zuwendungsempfänger:**

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)  
Lehrstuhl für Digital Additive Production (DAP)  
Institut für Textiltechnik (ITA)

**Förderkennzeichen:** 03ZU1115BA

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.10.2021 – 30.09.2024

**Berichtszeitraum:** 01.10.2021 – 30.09.2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Inhaltsverzeichnis

1.	Eingehende Darstellung der Ergebnisse .....	8
1.1.	AP 1 – Definition Anforderungen .....	8
1.2.	AP 2 – Entwicklung Innenbeschichtungsoptik für HS-DED .....	9
1.3.	AP 3 – Systemtechnik für die Wickelung von Faserverbundpipelines .....	10
1.4.	AP 4 – Prozessentwicklung zur Innenbeschichtung von Metall-Pipelines mittels EHLA.. .....	14
1.5.	AP 5 – Prozessentwicklung zur Fertigung von Faserverbundpipelines .....	17
1.5.1.	Prozessentwicklung und Versuchsreihen (AP 5.2) .....	17
1.5.2.	Gefügeuntersuchungen und Grenzschichtanalysen (AP 5.3) .....	18
1.5.3.	Prototypenfertigung (AP 5.4) .....	19
1.6.	AP 6 – Studie zur HS-DED-Beschichtung von Faserverbund-Pipelines.....	20
1.7.	AP 7 – Test und Bewertung der beschichteten Pipelines.....	24
2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	24
3.	Angemessenheit und Notwendigkeit der geleisteten Aufwände.....	25
4.	Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	25
5.	Fortschritt des Stands der Technik während der Projektlaufzeit .....	26
6.	Veröffentlichung der Ergebnisse.....	27

## Abkürzungsverzeichnis

EHLA	Extrem-Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen
HS-DED	High-speed directed energy deposition
FVK	Faserverstärkte Kunststoffe
IBO	Innenbeschichtungsoptik
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
MMC	Metall-Matrix-Komposite / <i>metal matrix composites</i>
SPILA	Separat Pulver-Induziertes Laserauftragschweißen

## 1. Eingehende Darstellung der Ergebnisse

Im Projektantrag und den Zwischenberichten wurde das Verfahren zur Innenbeschichtung noch als Extrem-Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA) bezeichnet. Wir verwenden nun den standardisierten Begriff High-speed directed energy deposition (HS-DED) in allen Veröffentlichungen, weshalb auch in diesem Bericht durchgehend HS-DED verwendet wird.

### 1.1. AP 1 – Definition Anforderungen

Zu Projektbeginn wurden die grundlegenden Anforderungen für die Innenbeschichtung mittels HS-DED, das Wickeln der FVK-Pipelines sowie der Innenbeschichtungsoptik (IBO) ausgearbeitet und nach Möglichkeit direkt definiert. Diese Parameter (siehe folgende Abbildung 1) dienen allen Projektpartnern als Grundlage für die Konzepterstellung der Technologien, Materialauswahl und Versuchsplanung.

Definitionen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchmesser: <math>\varnothing_{\min}</math> 100 mm, <math>\varnothing_{\max}</math> 300 mm</li> <li>• Betriebsdrücke: ca. 80 - 90 bar</li> <li>• Betriebstemperaturen: ca. [-20°C bis + 60°C]</li> <li>• Konzentration H<sub>2</sub>: bis 100%</li> <li>• Permeabilität: Tests gemäß ISO 4080. Permeation geringer als bei reinen Kunststoffrohren.</li> <li>• Sicherheitsfaktoren: 2,5</li> <li>• Deformations- und Beschädigungsgrenzen: Ringsteifigkeitstests, Bersttests, Werkstoffcharakterisierung</li> <li>• UV-Beständigkeit: Ja</li> <li>• Zu beschichtende Rohrlänge: bis 9 m (Auslegung Innenbeschichtungsoptik)</li> </ul>
Qualifizierung/Test
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Validierung Pipelinesegment als Referenz</li> <li>• Drucktest (Bersttest)</li> <li>• Ringsteifigkeit gemäß DIN EN ISO 16870</li> <li>• Modellierung / Simulation</li> </ul>

Abbildung 1 - Definition der Anforderungen, Testbedingungen

### Materialauswahl:

Innerhalb des Projektes sollten H<sub>2</sub>-Permeationsbarrieren zum Korrosionsschutz erzeugt werden. Dementsprechend mussten die Legierungen rissfrei erzeugbar sein und eine möglichst geringe Wasserstoffdiffusion zulassen. Kleine Diffusionswerte weisen die Materialien TiC sowie Aluminium und Aluminiumoxide auf. Zudem ist das Ausmaß der Wasserstoffversprödung in austenitischen Stählen gering. Basierend auf den Literaturwerten zu Diffusionskoeffizienten und Korrosionsschutz gegen H<sub>2</sub>, sowie der erwarteten Verarbeitbarkeit mittels HS-DED, wurden als Beschichtungsmaterialien Aluminium und die Metall-Matrix-Komposite (*metal matrix composite* MMC) aus 316L+TiC verwendet.

**Meilenstein 1:** Die Erstellung eines Lastenheftes ist erfolgreich entsprechend der Zeitplanung erstellt worden und wird mit neuen Erkenntnissen innerhalb der Projektlaufzeit im Rahmen der Möglichkeit weiter angepasst.

Das Lastenheft beschreibt die technischen Anforderungen an die Rohrleitungen, die einen Durchmesser von mindestens 100 mm bis maximal 300 mm aufweisen sollen. Die Rohre müssen für Betriebsdrücke von etwa 80 bis 90 bar ausgelegt sein und in einem Temperaturbereich von -20°C bis +60°C zuverlässig funktionieren. Zudem müssen sie für Wasserstoffanwendungen mit einer Konzentration von bis zu 100 % geeignet sein. Die Permeabilität der Rohre wird gemäß ISO 4080 getestet und soll geringer sein als bei reinen Kunststoffrohren. Ein Sicherheitsfaktor von 2,5 ist zu berücksichtigen. Zur Bestimmung der Deformations- und Beschädigungsgrenzen werden Ringsteifigkeitstests, Bersttests und Werkstoffcharakterisierungen durchgeführt. Die Rohre müssen UV-beständig sein und eine Innenbeschichtung für Rohrlängen von bis zu 9 Metern ermöglichen.

## 1.2. AP 2 – Entwicklung Innenbeschichtungsoptik für HS-DED

In AP2 wurde die Entwicklung der Innenbeschichtungsoptik (IBO) für die späteren Beschichtungsversuche durchgeführt. Dazu wurden zunächst folgende Anforderungen definiert:

- Unabhängig von Rohrgröße übertragbare Prozesse
- Möglichst kleine Optik, die mit entsprechender Führung für variable Rohrlängen befähigt werden kann:
  - Kleinster Innendurchmesser der Rohre von  $\varnothing = 100$  mm
  - Rohrlängen bis 18 m (Beschichtungslänge innerhalb des Rohres min. 9 m)
- Große Kühlleistung der Optik, Lanze und Düse, da aufgrund des halbgeschlossenen Umfelds des Rohres geringerer Wärmeabtransport im Vergleich zur externen Beschichtung erwartet wird
- Große Robustheit
- Verschleißteile unkompliziert austauschbar

Für eine vielseitig einsetzbare IBO wurde ein Konzept entwickelt, mit welchem unterschiedliche Rohrdurchmesser mit der gleichen Optik ohne eine umfangreiche Prozessparameteranpassung beschichtet werden können. Die Optik ist daher klein gehalten und sowohl die nötigen Betriebsmittel für den Auftragsprozess (Pulver-Gas-Strom, Schutzgasstrom) als auch das Lichtleitkabel werden durch eine Führungslanze mit in das zu beschichtende Rohr hineingeführt (s. Abbildung 2).

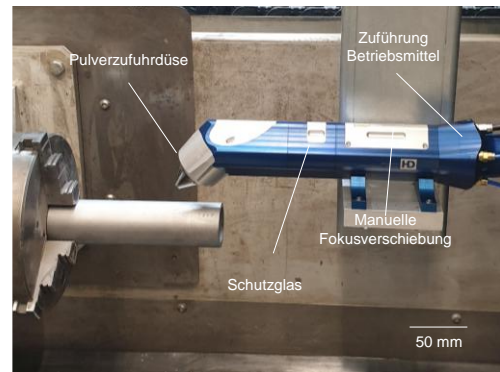
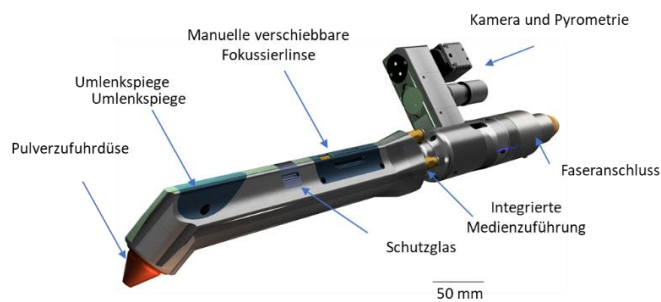


Abbildung 2: Links: Auslegung der Innenbeschichtungsoptik, Rechts: Aufnahme der Innenbeschichtungsoptik bei der Inbetriebnahme in der Hornet Lasercladding-Anlage

Um den sehr klein definierten Rohrendurchmesser von < 100 mm zu erreichen, ist die Pulverzufuhrdüse um 45° zur Oberfläche geneigt. Die Optik anhält ein Schutzglas, um die optischen Linsen zu schützen. Der Laserspotdurchmesser kann durch die manuelle Fokussierlinse variiert werden, sodass darüber die Prozesseigenschaften zusätzlich beeinflusst werden können. Da sich die Umgebung, insbesondere was den thermischen Zustand angeht, mit zunehmendem Eintauchen der Lanze ins Rohr verändert, ist eine Prozessüberwachung nötig, auch um gegebenenfalls die Prozessparameter anpassen zu können. Daher wurde für die Prozessüberwachung innerhalb der Rohre eine optische Kamera und ein Pyrometer verbaut. Der final erreichte minimale Innendurchmesser für die zu beschichtenden Rohre war ca. 85 mm.

**Meilenstein 2:** Die Auslegung und Konstruktion der Innenbeschichtungsoptik ist erfolgreich innerhalb der Zeitplanung erfolgt.

### 1.3. AP 3 – Systemtechnik für die Wicklung von Faserverbundpipelines

Das Arbeitspaket 3 zur Entwicklung der Systemtechnik für die Wicklung von faserverstärkten Kunststoffpipelines für den Transport von grünem Wasserstoff wurde erfolgreich umgesetzt. Die Wicklung von FVK-Pipelines wurde im Laufe des Projektes dabei an zwei unterschiedlichen Maschinen durchgeführt (siehe Abbildung 3). Zum einen konnte an einer Einzel-Filamentwickelmaschine individuelle Probenkörper zur genauen Werkstoffcharakterisierung eingesetzt werden und zum anderen an einer Multi-Filament-Wickelmaschine Prozessparameter zur kontinuierlichen effizienten Fertigung untersucht werden. Ein zentraler Schwerpunkt lag auf der Anpassung der Systemtechnik, um eine dichte Materialschicht zu gewährleisten und die Permeation von Wasserstoff zu minimieren (Siehe Abbildung 4). Hier war insbesondere die Übergangsstelle zwischen konstantem Rohrdurchmesser und Verbindungsflansch von großer Relevanz.

Im Teilpaket AP 3.1 entwickelte die Firma Kümpers ein optimiertes TowPreg-Material mit verbesserten Eigenschaften, insbesondere hinsichtlich der Wasserstoffdichtigkeit und

thermischen Stabilität. Mithilfe der durchgeführten Entwicklungen an der Towpreg-Anlage konnten die Towpreg-Breite so modifiziert werden, dass diese beim Wickeln präziser abgelegt werden können und es somit zu weniger Lücken zwischen der Faserablage kommt. Gleichzeitig konnte die Konsolidierungszeit durch optimierte Prozessparameter erheblich reduziert werden, was die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens steigerte. Die Klebrigkeit der TowPregs wurde durch gezielte Anpassungen der Additive und des Vorverfestigungsgrades so optimiert, dass eine gute Rutschfestigkeit auf dem Liner gewährleistet war, während die Gefahr von Faserbeschädigungen beim Wickelprozess minimiert wurde.

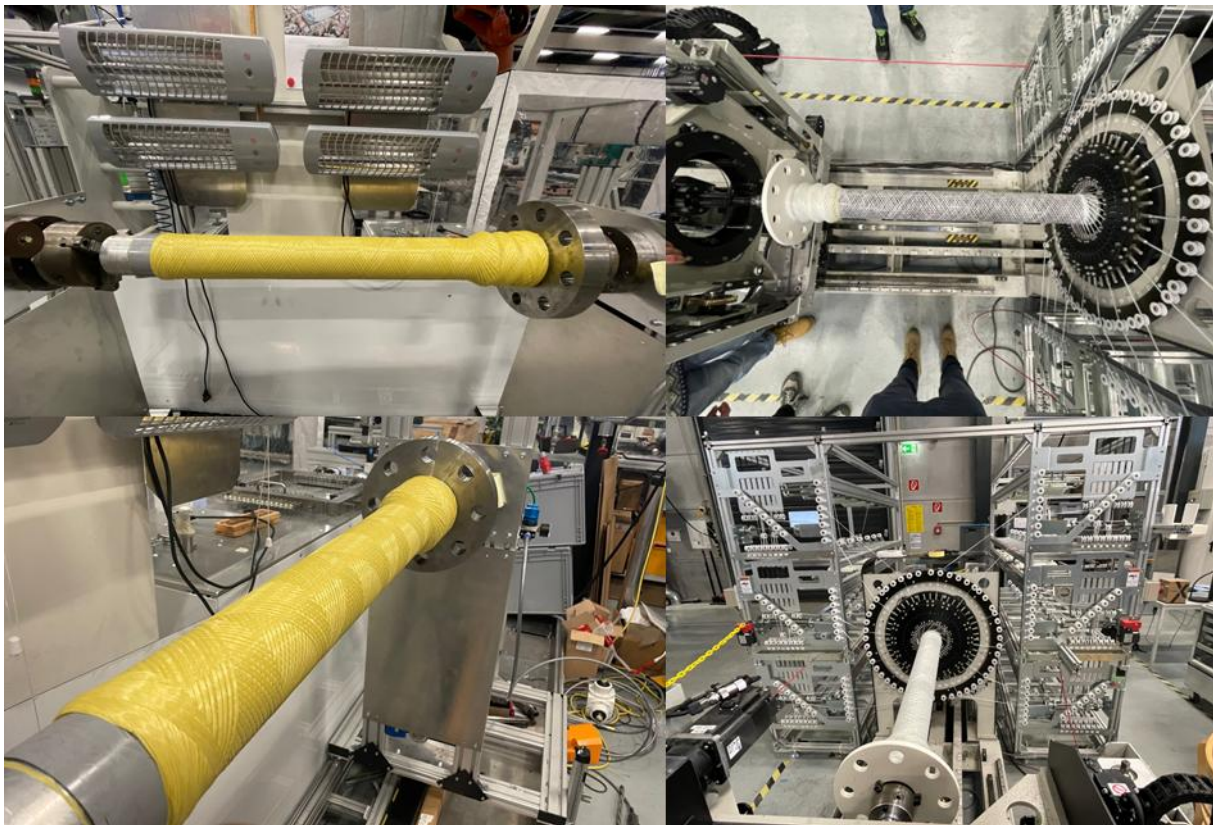


Abbildung 3: Darstellung Wickelversuche (Einzel- und Multifilamentwickelanlage, Aramidfasern in Gelb und Glasfasern in Weiß)

Das Teilpaket AP 3.2, welches die Entwicklung eines innovativen Rohranbindungssystems umfasste, wurde erfolgreich von Voss Fluid GmbH umgesetzt. Hierbei wurden bestehende Verbindungselemente mit kleineren Durchmessern auf ihre Kompatibilität mit den neu entwickelten faserverstärkten Kunststoffpipelines getestet. Basierend auf den Ergebnissen wurden größere Verbindungselemente konzipiert, die den speziellen Anforderungen der gewickelten Wasserstoffpipelines gerecht werden.

Die Integration der Materialentwicklung und Verbindungstechnik in die Systemtechnik des Wickelprozesses wurde im AP 3.3 durch das ITA erfolgreich begleitet. Besonders hervorzuheben ist die Entwicklung der Inline-Matrix-Aktivierung mit dem beschafften Inline-Konsolidierungsofen, die es ermöglichte, die Viskosität der Matrix gezielt im Prozess selber zu

senken, um Hohlräume während des Wickelvorgangs effizient auszufüllen. Dadurch wurde eine geringe Porosität und eine optimierte Wasserstoffbarriere des Materials erreicht.

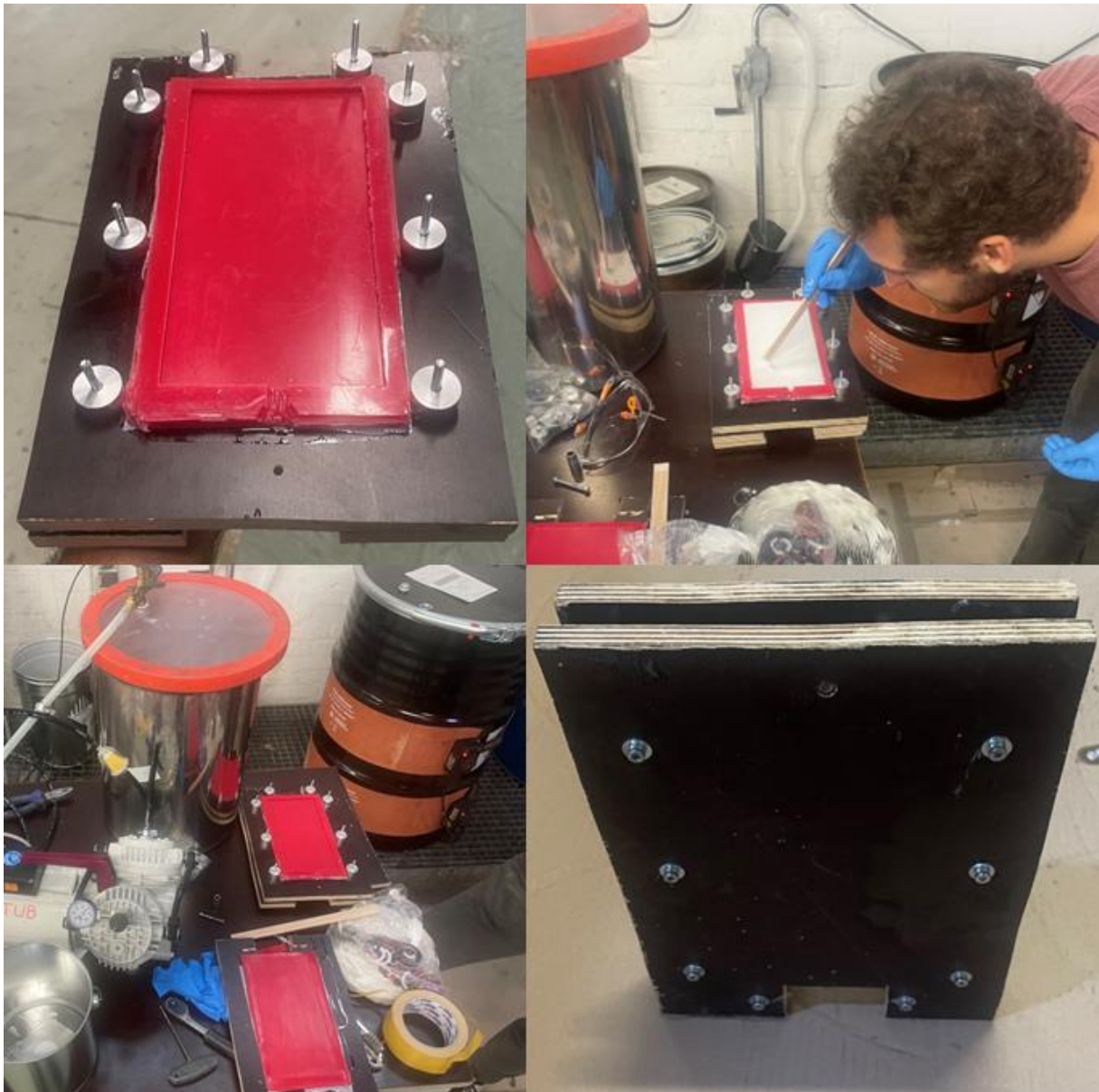


Abbildung 4: Darstellung der Herstellung von Matrix-Harz-Modifikationen. Herstellung eine Prüfplatte zur anschließenden Analyse der Materialeigenschaften

Abschließend wurden im AP 3.4 umfangreiche Materialtests und Analysen durchgeführt, um die Qualität der entwickelten Systemtechnik sicherzustellen. Die Ergebnisse bestätigten die erfolgreiche Umsetzung der angestrebten Ziele: Die entwickelten TowPregs und Verbindungselemente sind für die industrielle Anwendung geeignet, erfüllen die Anforderungen an Wasserstoffdichtigkeit und mechanische Stabilität und ermöglichen einen wirtschaftlichen Herstellungsprozess. Im Folgenden wird die Entwicklung der Flanschverbindungen bei Voss Fluid in Zusammenarbeit mit dem ITA dargestellt:

### VossLok40- Flansche:

Version 1.0 (31.07.2023)

Ursprungsversion inkl. Zeichnungen erstellt & in die Fertigung gegeben

### Nut- & Federflansch:

Version 1.0 (PA)

Ursprungsversion

Version 1.1 (PA)

Innendurchmesser auf neuen 105mm Liner angepasst

Version 2.0

Innendurchmesser & O-Ring-Nuten auf eine 2mm Presspassung geändert

Nutpositionen der O-Ringe geändert, sodass diese unter den Wellenbergen liegen

Angepasst auf Liner: Marley Regenfallrohr DN105 (Dadurch geändert: Innendurchmesser Wickelgeometrie= 103.5 (+0.3) ; O-Ring Bauraumhöhe (auf Presspassung angepasst) ; Fase vor zweitem O-Ring Bauraum entfernt)

N&F CL:Fertig gezeichnet inklusive technische Zeichnung

N&F DL:Fertig gezeichnet inklusive technische Zeichnung

Version 2.1

Presspassung auf 1mm reduziert und Innendurchmesser & O-Ring-Nuten entsprechend angepasst, da beim Verpressen der Liner verbogen ist

### RTJ-Flansche:

Version 1.0 (PA)

Ursprungsversion

Version 1.1 (PA)

Innendurchmesser auf neuen 105mm Liner angepasst

Version 2.0

Innendurchmesser & O-Ring-Nuten auf eine 2mm Presspassung geändert

Nutpositionen der O-Ringe geändert, sodass diese unter den Wellenbergen liegen

Angepasst auf Liner: Marley Regenfallrohr DN105 (Dadurch geändert: Innendurchmesser Wickelgeometrie= 103.5 (+0.3) ; O-Ring Bauraumhöhe (auf Presspassung angepasst) ; Fase vor zweitem O-Ring Bauraum entfernt)

Fertig gezeichnet inklusive technische Zeichnung und PDFs

Version 2.1

Presspassung auf 1mm reduziert und Innendurchmesser & O-Ring-Nuten entsprechend angepasst, da beim Verpressen der Liner verbogen ist

Fertig gezeichnet inklusive technische Zeichnung und PDFs

Die Prototypen und die daraufhin gewickelten Demonstratoren sind in der folgenden Abbildung 5 dargestellt:



Abbildung 5: Darstellung von Versuchen zur Entwicklung von Verbindungselementen für eine H<sub>2</sub>-Dichtigkeit (Links: Prototyp basierend auf der VossLok40-Technologie, Rechts: Hochskalierung mittels 3D-Prototyp-Druckelement)

#### 1.4. AP 4 – Prozessentwicklung zur Innenbeschichtung von Metall-Pipelines mittels EHLA

**Außenbeschichtung.** Mit den in AP1 ausgewählten Beschichtungen Aluminium und MMC aus 316L+TiC wurde im ersten Schritt die Untersuchung der grundsätzlichen Machbarkeit der Schichterzeugung auf Stählen durchgeführt. Dies wurde anhand der Außenbeschichtung eines Testrohrs aus St52, einem Baustahl, getan, um so mögliche störende Effekte durch die veränderten Bedingungen im Rohr zunächst auszuschließen. Die hier entwickelten Prozessparameter für die entsprechenden Materialkombination im HS-DED konnten dann als Grundlage für die Innenbeschichtungen genutzt werden. Beide Beschichtungen konnten mittels HS-DED erzeugt und die Schichtanforderungen hinsichtlich defektfreier Anbindung, geringer Porosität und Rissfreiheit erfüllt werden (s. Abbildung 6). Dabei wurden in einfacher Überfahrt Schichtdicken von ca. 100 µm erzielt.

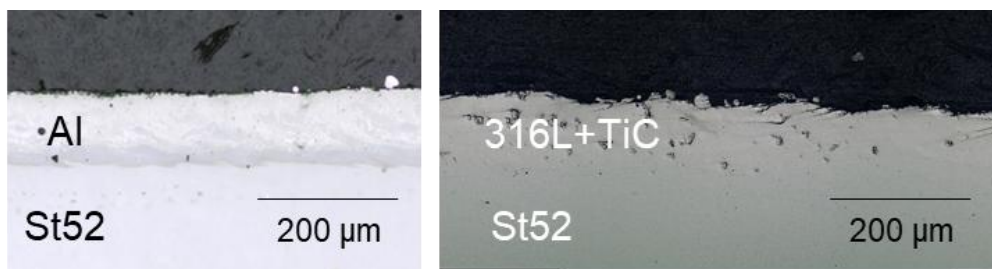


Abbildung 6: Querschliffe der mittels HS-DED erzeugten Beschichtungen auf der Außenfläche eines Rohrs aus St52 mit Aluminium (links) und der MMC 316L+TiC (rechts)

*Innenbeschichtung.* Wie oben beschrieben beträgt der kleinstmögliche Innendurchmesser von Rohren, die mit der IBO beschichtet werden können, ca. 85 mm. Für die Prozessentwicklung der Innenbeschichtung wurden Rohre aus St52, einem Baustahl, mit Innendurchmesser  $\varnothing = 110$  mm verwendet. Die IBO wird über eine Lanze aufgenommen und in das Rohr hineingeführt. Für die Beschichtung wird das Rohr gedreht und die Optik wird axial mit einer definierten Geschwindigkeit (Vorschub in mm/Umdrehung des Rohrs) in das Rohr hinein (oder heraus) bewegt. Die IBO selbst wird nicht gedreht. In Abbildung 8 links ist eine Aufnahme des Innenbeschichtungsprozesses abgebildet.

Zunächst wurde der gut untersuchte Werkstoff 316L per Innenbeschichtung aufgetragen. Hier war zunächst eine Aufmischung zwischen Substrat und Beschichtung zu beobachten, welche durch eine Erhöhung der Laserleistung und Reduzierung des Fördergasvolumenstroms reduziert wurde. Die erhaltene Schicht weist keine Risse und wenige, vereinzelte Poren auf (s. Abbildung 7).

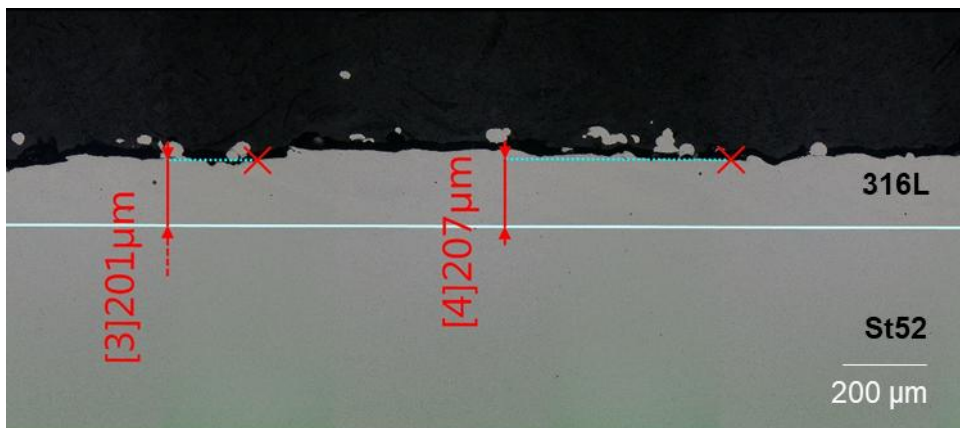


Abbildung 7 - Schliffbild einer Innenbeschichtung von 316L auf St52

Die finalen Parameter für 316L auf St52 sind in Tabelle 1 gezeigt.

Tabelle 1 - Prozessparameter für Innenbeschichtungen

Beschichtungswerkstoff	316L	316L+TiC(1:1 vol-%)
Laserleistung	3200 W	3400 W
Prozessgeschwindigkeit	20 m/min	15 m/min
Spurversatz	0,35 mm/U	0,35 mm/U
Fördergasvolumenstrom	12 l/min	6 L/min (316L) + 6 L/min (TiC)
Pulvermassenstrom	ca. 12,6 g/min	

Anschließend wurde der für Außenbeschichtung entwickelte Prozess der Beschichtung mit MMC 316L+TiC auf die Innenbeschichtung übertragen, wobei eine 1:1 vol%-Mischung von 316L und TiC verwendet wurde. Die Mischung wurde in situ erzeugt, indem gleiche

Fördergasvolumenströme eines 316L-Pulverstroms und eines TiC-Pulverstroms verwendet wurden. Durch die erhöhte Laserleistung und die langsamere Prozessgeschwindigkeit wurde hier im Vergleich zu reinem 316L ein höherer Energieeintrag verwendet, um die Schichten zu erzeugen. Ein Schliffbild der erhaltenen Beschichtung ist in Abbildung 8 rechts oben gezeigt. Die Beschichtung ist rissfrei erzeugbar und hat eine Schichtdicke von ca. 280 µm.

Innenbeschichtungsversuche mit Aluminium waren zunächst weniger erfolgreich. In Abbildung 8 rechts unten ist ein Schliffbild der Innenbeschichtung von St52 mit Al gezeigt. Eine zusammenhängende Beschichtung wurde erzeugt, allerdings wies die Beschichtung noch Anbindungsdefekte an der Grenzfläche zum Substrat auf, welche auf zu geringen Energieeintrag in das Substrat zurückzuführen sind.

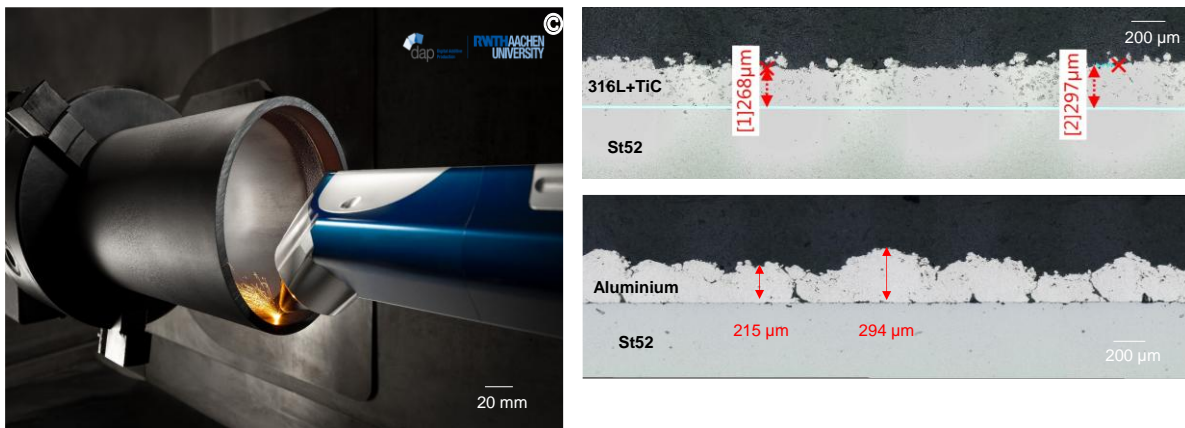


Abbildung 8: links: Aufnahme des Innenbeschichtungsprozesses mittels der entwickelten IBO, rechts oben: Aufnahme des Querschliffs der MMC 316L+TiC Innenbeschichtung, rechts unten: Aufnahme des Querschliffs der Aluminium-Innenbeschichtung

Der Grund hierfür liegt in der entwickelten IBO: durch die 45°-Neigung der Düse relativ zum Substrat ist der Laserspot auf der Oberfläche elliptisch und damit größer als bei der verwendeten Optik für die Außenbeschichtung, bei welcher Pulverstrom und Laser in einem 90°-Winkel auf die Oberfläche treffen. Die 45°-Neigung führt somit zu einer größeren Interaktionszeit der Partikel im Laserstrahl bei gleichzeitig kleinerer Intensität des Laserstrahls auf der Bauteiloberfläche. Dies führte zu einer nicht ausreichenden Energieeinbringung auf der Substratoberfläche und einer gleichzeitig zu großen Energieeinbringung in das Beschichtungsmaterial. Als Lösung hierfür wurde der Einsatz einer alternativen Fokussierlinse gefunden.

Unter Einsatz dieser alternativen Fokussierlinse und mit erhöhter Laserleistung (s. Tabelle 2) wurde eine dichte und defektfrei angebundene Schicht erzeugt (s. Abbildung 9). Die Anzahl der Poren in der Schicht ist deutlich zurückgegangen. Diese positive Entwicklung wird auf den reduzierten Spottedurchmesser und die erhöhte Laserleistung zurückgeführt, durch welchen die Energieeinbringung auf der Substratoberfläche erhöht wurde, sodass eine schmelzmetallurgische Verbindung zwischen Beschichtung und Substrat entstehen konnte.

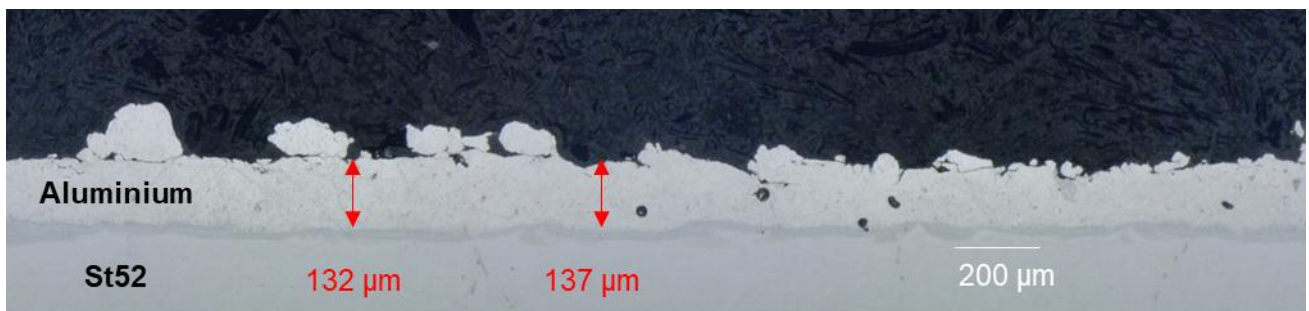


Abbildung 9: Schliffbild einer Innenbeschichtung mit Aluminium in einem St52-Rohr, durchgeführt mit einem reduzierten Spotdurchmesser durch Linsenanpassung

Tabelle 2 - Prozessparameter für die Innenbeschichtung mit Al auf St52

	Ursprüngliche Optik	Mit angepasster Fokussierlinse
<b>Laserleistung</b>	2200 W	2600 W
<b>Prozessgeschwindigkeit</b>	25 m/min	25 m/min
<b>Spurversatz</b>	0,35 mm/U	0,35 mm/U
<b>Fördergasvolumenstrom</b>	12 L/min	12 L/min

## 1.5. AP 5 – Prozessentwicklung zur Fertigung von Faserverbundpipelines

Aufbauend auf den Ergebnissen aus AP 3 wurde im vorliegenden Arbeitspaket (AP 5) die Entwicklung des Fertigungsprozesses für Faserverbund-Pipelines (FVK-Pipelines) vorangetrieben. Ziel war es, den Wickelprozess so auszugestalten, dass er für die industrielle Serienfertigung geeignet ist und gleichzeitig die spezifischen Anforderungen für den Transport von Wasserstoff erfüllt. Dazu zählen insbesondere die Gasdichtigkeit, eine hohe mechanische Stabilität und die Einhaltung eng definierter Prozessparameter.

Im ersten Schritt (AP 5.1) wurden die im Rahmen von AP 3.4 gewonnenen Erkenntnisse und Analysedaten herangezogen, um das Zusammenspiel von Systemtechnik, Materialentwicklungen und Verbindungstechnik zu optimieren. Hierfür wurden folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- **Abstimmung der Prozessparameter** (u. a. Ablagewinkel, Faser-Volumen-Gehalt, Abzugsgeschwindigkeit) auf die im AP 3 entwickelten TowPregs.
- **Integration der Verbindungstechnik** von Voss Fluid und der Materialentwicklung von Kümpers in das Wickelkonzept, um eine durchgängige Prozesskette sicherzustellen.

### 1.5.1. Prozessentwicklung und Versuchsreihen (AP 5.2)

Im Anschluss erfolgten umfangreiche Versuchsreihen, in denen die in **Tabelle 1** genannten Parameter (z. B. Ablagewinkel, Aktivierungstemperatur, Rovingbandbreite) systematisch variiert und untersucht wurden. Ziel war es, die Abhängigkeiten zwischen

Materialeigenschaften, Wickelprozess und Verbindungstechnik zu identifizieren und zu quantifizieren.

Wichtige Ergebnisse aus diesen Versuchsreihen:

- **Optimierte Ablagewinkel** und **angepasste Rovingbandbreiten** reduzierten den Porengehalt in den Schichtübergängen signifikant.
- Eine **gleichmäßige Rovingspannkraft** stellte die gleichbleibende Qualität der Wicklung sicher und verhinderte Fehlstellen in der Matrix.
- Die **regelbare Aktivierungstemperatur** und -dauer ermöglichten eine verbesserte Durchtränkung der Fasern mit dem Harz und erhöhten damit die mechanische Performance der Pipeline.

*Tabelle 3 - Prozessparameter für die Wicklung der FVK-Pipelines*

Rohrmaterial	Faserbreite	Faserwinkel	Lagen	Fadenspannung
<b>Carbon</b>	6	54.6	4+1 Hoop	40N
<b>Aramid</b>	4	54.6	4+1 Hoop	40N
<b>Glasfaser</b>	7	54.6	4+1 Hoop	40N

### 1.5.2. Gefügeuntersuchungen und Grenzschichtanalysen (AP 5.3)

Basierend auf den fertigungstechnischen Erkenntnissen wurden Gefügeuntersuchungen durchgeführt, um Porengehalt und Harzverteilung (Variationskoeffizient) zu bestimmen. Dabei lag ein besonderer Fokus auf den Grenzflächen zwischen den einzelnen Faserschichten und den Rohrverbindungsstellen.

- **Mikroskopische Analysen (Lichtmikroskop &  $\mu$ -CT)** bestätigten eine deutliche Reduktion der Porenanteile durch die in AP 5.2 optimierten Parameter (siehe Abbildung 10).
- **Grenzschichtuntersuchungen** belegten eine homogene Verteilung des Matrixharzes in den kritischen Bereichen, was sich positiv auf die Druckbeständigkeit und Gasdichtigkeit auswirkt.

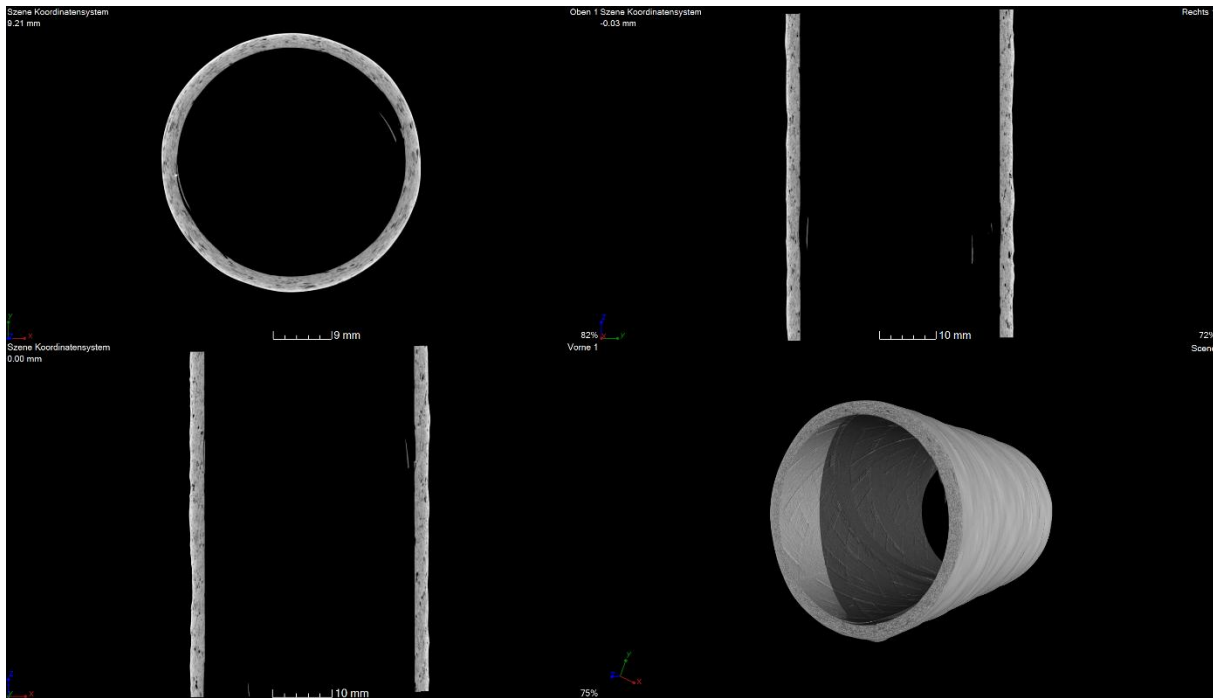


Abbildung 10: CT-Aufnahme eines Pipeline-Probekörpers

### 1.5.3. Prototypenfertigung (AP 5.4)

Abschließend wurden im Rahmen von AP 5.4 Prototypen von FVK-Pipelines gefertigt, um diese in nachfolgenden Arbeitspaketen der EHLA-Beschichtung (Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen) zu unterziehen. Die enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern (ITA, Firma Kümpers und Voss Fluid) stellte sicher, dass die entwickelten Verbindungselemente nahtlos in den Wickelprozess integriert werden konnten.

- Die **produzierten Prototypen** weisen eine definierte Wandstärke, reproduzierbare Schichtaufbauten und stabile Verbindungsstellen auf.
- Eine erste **Qualitätsprüfung** bestätigte die Einhaltung der vorgegebenen Toleranzen und die Eignung für die anstehenden Beschichtungstests.

Mit Abschluss des AP 5 liegen nun sämtliche Parameter und Prozessanpassungen vor, um Faserverbund-Pipelines für den Transport von Wasserstoff in einer hochskalierbaren, industrietauglichen Weise herzustellen. Alle im Antrag definierten Arbeitsschritte wurden planmäßig und erfolgreich durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine robuste Fertigungslinie, die:

- **Geringe Porenanteile** und damit hohe Gasdichtigkeit sicherstellt.
- Eine **gleichbleibende Qualität** durch definierte Prozessparameter gewährleistet.
- Durch **angepasste Verbindungstechnik** zuverlässige Rohrsegmente erzeugt, die für Druckschwankungen im Betrieb ausgelegt sind.

Im nächsten Schritt werden die Prototypen in AP 6 einer EHLA-Beschichtung unterzogen, um die Lebensdauer der FVK-Pipelines weiter zu erhöhen und sie vor äußeren Einflüssen zu schützen.

### 1.6. AP 6 – Studie zur HS-DED-Beschichtung von Faserverbund-Pipelines

In AP6 wurde die Machbarkeit der Beschichtung von FVK-Rohren mit einer metallischen Beschichtung mittels HS-DED untersucht. Hierfür wurde Aluminium als Beschichtungswerkstoff ausgewählt. Als kritischer Aspekt der metallischen Beschichtung von FVK mittels HS-DED wurden die hohen Temperaturen des geschmolzenen Metalls ausgemacht, welche bei zu hohem Wärmeeintrag in das Polymer-Substrat dieses beschädigen oder sogar zersetzen können. Aluminium hat zusätzlich zu seiner geringen Wasserstoffpermeabilität eine niedrige Schmelztemperatur, sodass die thermische Belastung des FVK möglichst klein gehalten werden kann. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Substrate getestet, die sich in Faser- und Matrixmaterial unterschieden. Die Beschichtung fand als Außenbeschichtung statt.

Tabelle 4: Prozessparameter Beschichtung von FVK-Rohrproben (Pulverwerkstoff Aluminium)

Substratwerkstoff	Prozessgeschwindigkeit [m/min]	Vorschub f [mm/rot]	Laserleistung [W]	Drehzahl [%]	Fördergasvolumenstrom [l/min]
Duroplast CFK (Epoxy)	75	0,25	250	25	11
Thermoplast GFK (PP)	50	0,3	400	30	11
Thermoplast CFK (PA6)	75	0,4	500	30	11

Im ersten Schritt wurde dazu ein CF-EP (Carbonfaser-Epoxidharz) FVK verwendet. Für eine gute Anbindung der Beschichtung an das Substrat muss eine mechanische Verklammerung des Metalls um die Fasern des FVK stattfinden. Da das Epoxidharz (EP) kein Thermoplast ist, welches schmelzen kann, wurden zunächst die obersten CF-Lagen mittels Laserstrahl freigelegt. Auf die freigelegten Fasern wurde dann die Beschichtung aufgetragen. Hier wurde beobachtet, dass eine gewisse Rauigkeit dazu beiträgt, dass die Verklammerung sich verbessert. Von Vorteil ist die nicht 100%-ige gleichmäßige Faserbreite, da hierdurch die Wicklung Freiräume für das Eindringen der Metallpulverpartikel freilässt.

Zur weiteren Reduzierung der thermischen Belastung wurde in einer folgenden Versuchsreihe die neuentwickelte SPILA-Methode (Separat Pulver-Induziertes Laserauftragschweißen) angewendet (s. Abbildung 11). Im Wesentlichen unterscheidet sich das Verfahren vom traditionellen HS-DED (bzw. EHLA) hinsichtlich mehrerer justierbarer Pulver-Gas-Strahlen,

über welche separat Materialien zugeführt werden können. Diese können dabei identisch oder verschieden sein. Durch die relative Verschiebung der Pulvergasstrahlen in Verfahrerrichtung und senkrecht zum Laserstrahl wird die erzeugbare Schichtdicke gesteigert, während die thermische Belastung der Substrate reduziert wird. Dadurch ist die Beschichtung des CF+EP mit Aluminium, wie in Abbildung 11 rechts abgebildet, möglich. Die erhaltene Beschichtung war porös, es ist also eher von einem Ansintern der Al-Partikel auszugehen. Allerdings konnte in der Anbindungszone erkannt werden, dass die Al-Partikel einzelne CF-Fasern umschlossen, wodurch eine mechanische Anbindung erzeugt wird.

Aufbauend auf diesen Versuchen wurden folgende FVK-Komposite verwendet, die sich vom CF-EP vor allem durch die Verwendung von Thermoplasten als Matrix unterscheiden:

- Carbonfaser (CF) + Polyamid 6 (PA6) ohne Wärmebehandlung
- CF+PA6 mit metallischem Liner und Wärmebehandlung
- Glasfaser (GF) + Polypropylen (PP) ohne Wärmebehandlung

Die Versuche wurden ebenfalls mit SPILA durchgeführt. In Abbildung 12 sind Aufnahmen der Al-Beschichtung auf CF+PA6 ohne Wärmebehandlung dargestellt. Die Al-Beschichtung war hier im Vergleich zum CF-EP FVK dichter, allerdings war die Porosität ist weiterhin groß, sodass diese Beschichtung noch nicht als Permeationsbarriere geeignet ist.

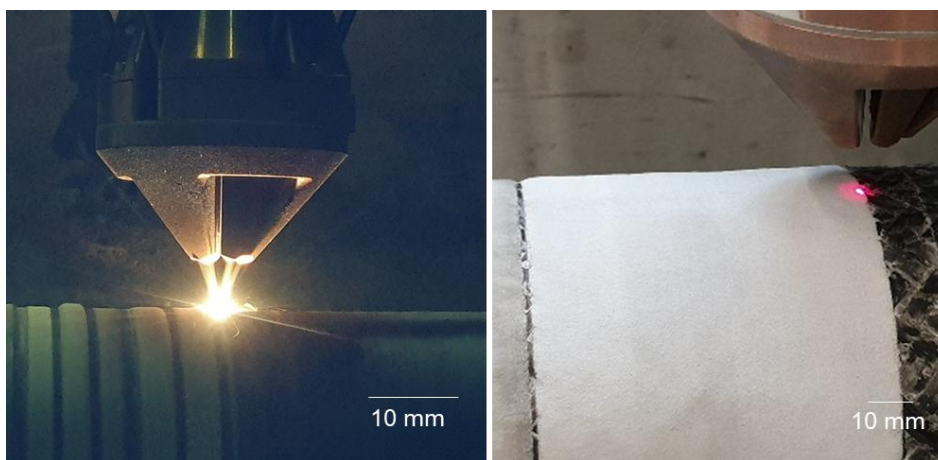


Abbildung 11: Beschichtung von FVK (CF+EP) mit Aluminium mittels SPILA. links) Prozessaufnahme der Schicht erzeugung; recht) Aufnahme der erzeugten Aluminiumschicht

Zusätzlich wurden Versuche mit GF+PP durchgeführt, da Glasfasern ein im Vergleich zu Carbonfasern günstigeres Material darstellen. PP In Abbildung 13 sind die Beschichtungsergebnisse auf GF+PP abgebildet. In den Aufnahmen der Querschliffe ist eine größere Dichte als für CF+PA6 bei gleichen Prozessparametern zu erkennen. Dies wird darauf zurückgeführt, dass während des Beschichtungsprozesses die Temperatur innerhalb des FVK für GF+PP stärker ansteigt als für CF+PA6. Dies kann auf den niedrigeren Wärmeleitkoeffizient von Glasfasern im Vergleich zu Carbonfasern zurückgeführt werden.

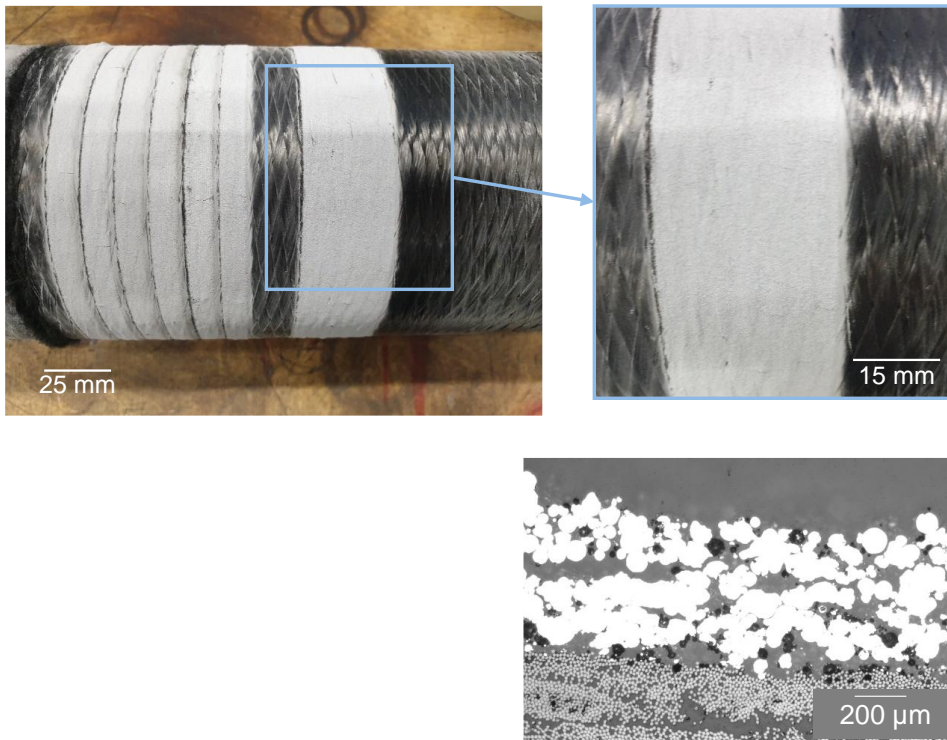


Abbildung 12: Oben: Aufnahme der Beschichtung von FVK (CF+PA6) mit Aluminium mittels SPILA; unten: Aufnahme des Querschliffs der Al-Beschichtung

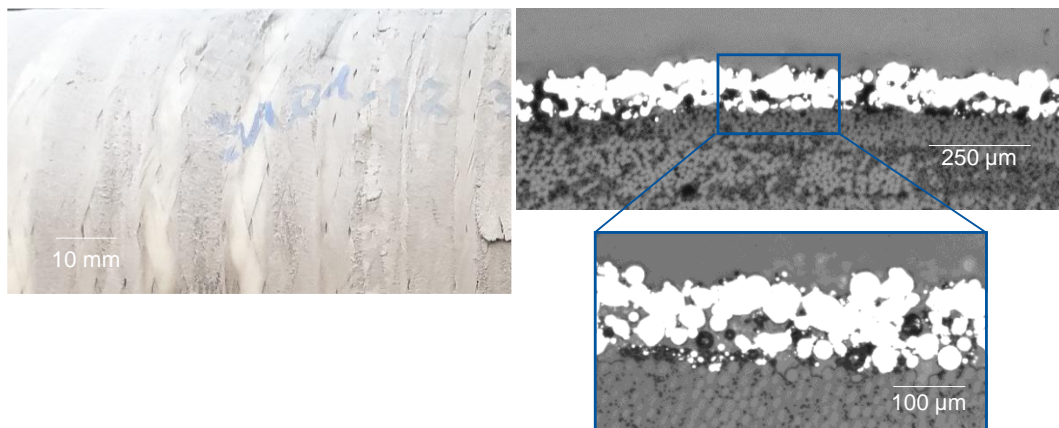


Abbildung 13: links: Aufnahme der Beschichtung von FVK (GF+PP) mit Aluminium mittels SPILA; rechts: Aufnahme des Querschliffs der erzeugten Aluminiumschicht

Durch die höhere Temperatur während des Prozesses wird die Schicht dichter als für CF+PA6, da eine bessere Durchmischung bzw. Anbindung der einzelnen Al-Partikel untereinander erfolgt. Bei größeren Beschichtungsbreiten steigt die Temperatur des FVK-Rohrs bis zur Erweichungstemperatur von PP, die niedriger als für PA6 liegt, wodurch das Rohr nach einer Beschichtungslänge von 25 mm versagt (s. Abbildung 14).

Um die Energiezufuhr in die Al-Partikel erhöhen zu können, ohne das Substrat zu schädigen, wurde in folgenden Versuchen mit CF-PA6, welches sich als thermisch resistenter erwies, ein metallischer Liner als Aufnahme für das FVK-Rohr verwendet (s. Abbildung 15 oben links). Durch die Verwendung des metallischen Liners wird ein erhöhter Wärmeabtransport erreicht werden, sodass die verwendete Laserleistung gesteigert werden konnte. Die so erzeugte Al-

Beschichtung auf dem CF-PA6 wurde händisch angeschliffen und scheint glänzend (s. Abbildung 15 oben). In den Mikroskopaufnahmen des Querschliffs kann eine deutlich höhere Dichte der Beschichtung im Vergleich zum Versuch ohne metallischen Liner erkannt werden. Zudem ist eine Vermischung des PA6 mit der Al-Beschichtung erkennbar und die beim Auftrag aufgeschmolzenen Al-Partikel haben einzelne Carbonfasern umschlossen (s. Abbildung 15 unten).

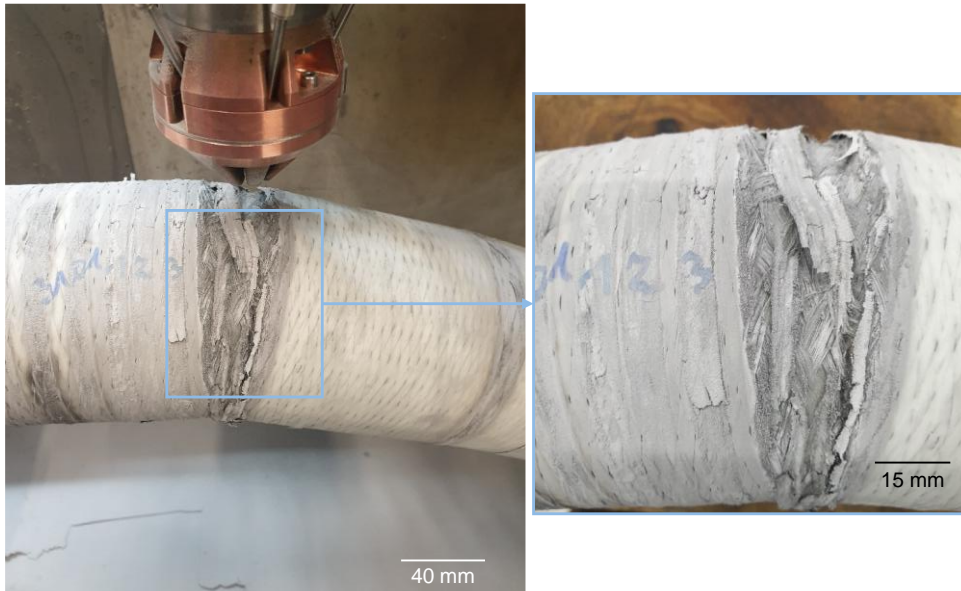


Abbildung 14: links: Aufnahme des abgeknickten FVK (GF+PP) nach Beschichtung mit größerer Beschichtungsbreite mit Aluminium mittels SPILA; rechts: Detailaufnahme des Versagensbereichs

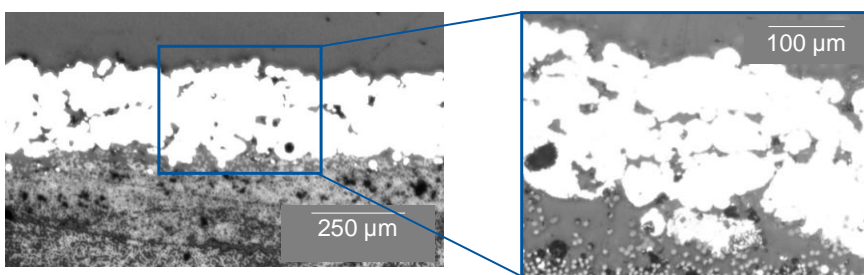
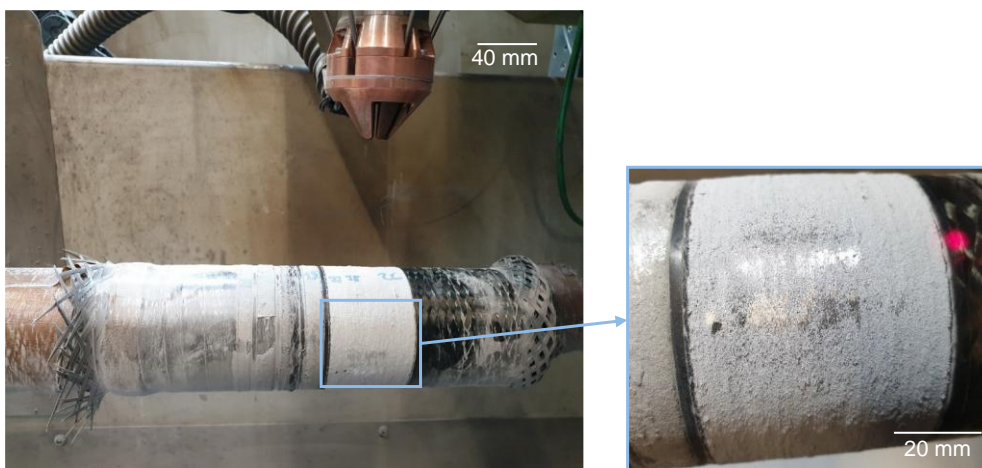


Abbildung 15: Oben links: Aufnahme der Beschichtung von FVK (CF+PA6) mit Verwendung eines metallischen Liners mit Aluminium mittels SPILA; oben rechts: Aufnahme des angeschliffenen Bereichs der erzeugten Al-Beschichtung, unten: Aufnahme des Querschliffs der Al-Beschichtung

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die metallische Beschichtung von FVK mittels HS-DED möglich ist, wobei sich insbesondere die thermoplastischen FVK als Substrate anbieten. Der Wärmeabtransport aus dem FVK erwies sich als kritischer Aspekt für den Prozess. Durch einen besseren Wärmeabtransport aufgrund besserer Wärmeleitfähigkeit der FVK-Rohre oder durch die Verwendung eines metallischen Liners konnte die eingebrachte Energie gesteigert und dadurch dichtere Beschichtungen erzielt werden. Die Nutzung von Polymeren mit hohen Erweichungstemperaturen für die FVK-Matrix scheint ebenfalls hilfreich, um die eingebrachte Energie steigern zu können, ohne dass das FVK-Rohr während des Prozesses mechanisch versagt.

### 1.7. AP 7 – Test und Bewertung der beschichteten Pipelines

Im Rahmen von AP 7 wurden die in den vorherigen Arbeitspaketen (AP 4, 5 und 6) entwickelten und beschichteten Demonstratoren umfassend untersucht. Ziel war es, die Korrosionsbeständigkeit, Dichtigkeit und Materialbelastbarkeit unter realitätsnahen Bedingungen zu evaluieren und so die kontinuierliche Validierung der einzelnen Entwicklungsschritte sicherzustellen. Die gewonnenen Daten dienen nicht nur der internen Evaluierung, sondern auch der projektübergreifenden Vernetzung, um innovationsbegleitende Maßnahmen im H<sub>2</sub>-Markt zu initiieren.

**Iterative Validierung:** Die enge Abstimmung und iterative Validierung mit den Daten aus AP 4, 5 und 6 führten zu einer kontinuierlichen Optimierung des Gesamtsystems. Das Arbeitspaket 7 war eng an die vorhergehenden Arbeitspakete gekoppelt, so dass in den Rückkopplungsschleifen die Ergebnisse kontinuierlich verbessert werden konnten. Des Weiteren wurden die Ergebnisse des Projekts in enger Zusammenarbeit mit PPS Pipelinesystems kontinuierlich evaluiert und mit den Entwicklungen im Bereich der Zertifizierungen im Pipelinebau analysiert. Insbesondere die Eignung von FVK-Pipelines im zukünftigen Pipelinebau sowie die Beschichtung von bestehenden Pipelines für die zukünftige Nutzung als Wasserstoff-Pipelines wurde im Detail mithilfe von PPS untersucht.

Die gesammelten Daten und die gewonnenen Erkenntnisse werden nun für eine projektübergreifende Vernetzung genutzt. Dies ermöglicht es, übergeordnete innovationsbegleitende Maßnahmen zum Auf- und Ausbau von Wertschöpfungsketten im H<sub>2</sub>-Markt zu initiieren. Die erfolgreiche Umsetzung von AP 7 bildet somit eine solide Grundlage für zukünftige Entwicklungen und die Markteinführung industrietauglicher Wasserstofftransportsysteme.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größte Position des zahlenmäßigen Nachweises sind die Beschäftigungsentgelte mit 364.095,20€ (Beschäftigte E12-E15) und 35.078,76€ (Beschäftigte E1-E11) sowie die Beschäftigungsentgelte wissenschaftlicher Hilfskräfte mit 26.775,41€. Die wissenschaftlichen

Mitarbeiter (E12-E15) führten die Projektorganisation, Konzeptionierung, teilweise die Durchführung sowie die Präsentation der wissenschaftlichen Arbeiten durch. Die weiteren Beschäftigten führten Experimente, insbesondere Charakterisierungen, durch. Des Weiteren wurden 33.851,02€ für sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben aufgewendet, das meiste hiervon entfiel auf Verbrauchsmaterialien für die Versuche wie z.B. Metallpulver und Substrate, sowie Verschleißmaterial für die Additive Fertigung wie Düsen spitzen. Zudem wurden für die Konsolidierung der FVK-Rohre eine Konsolidiereinheit und für die Messungen der Wasserstoffpermeabilität eine entsprechende Messzelle beschafft, für insgesamt 42.907,83€.

### **3. Angemessenheit und Notwendigkeit der geleisteten Aufwände**

Zu Beginn des Projektes war es notwendig, grundlegende Anforderungen zu definieren (AP1). Diese klare Definition ermöglichte es allen Projektpartnern, auf einer gemeinsamen Basis zu arbeiten und fördert eine zielgerichtete Konzepterstellung sowie die Auswahl geeigneter Materialien. Dies war entscheidend, um Missverständnisse zu vermeiden und sicherzustellen, dass alle Partner dieselben Ziele verfolgen und gemeinsam daran arbeiten können.

Die Unterstützung bei der Entwicklung der Innenbeschichtungsoptik (AP2) war notwendig, um das Prozesswissen einzubringen sowie die Kompatibilität mit der am DAP vorhandenen Anlage zu gewährleisten. Darüber hinaus war die iterative Prozessentwicklung in AP4 notwendig, um eine Innenbeschichtungsschicht aus Aluminium mit den gewünschten Eigenschaften zu erzeugen. Dazu wurde zunächst mit einem bekannten Werkstoff (316L) Prozess Erfahrung gesammelt, bevor auf den neuen Werkstoff Aluminium gewechselt wurde. In AP6 war die breit gestreute Untersuchung verschiedener Kombinationen von FVK und Prozessbedingungen notwendig, da die Kombination von Metall und Polymer eine sehr herausfordernde Materialkombination darstellt. Insbesondere, da sich zeigte, dass verschiedene thermoplastische Polymere unterschiedliche Auswirkungen auf das Beschichtungsergebnis haben können. Die Kombination zweier Teilprojekte aus unterschiedlichen Forschungsfeldern (Textiltechnik und Additive Fertigung / Auftragsschweißen) hat dazu beigetragen neuartige Innovationen zu erforschen, die so vorher nicht denkbar gewesen wären. Erst durch die geleisteten Aufwände konnten die gemeinsamen Entwicklungsergebnisse auf Messen publiziert werden und so einem breiten Forschungsfeld bekannt gemacht werden. Zudem wird in Folge dieses Projektes ein Buch veröffentlicht, an dem das DAP und das ITA beteiligt gewesen sind. Publikationsdatum des Buches (ISBN: 1119909619) ist im Jahr 2025 anvisiert.

### **4. Nutzung und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die erfolgreiche Entwicklung der Innenbeschichtungsoptik ermöglicht es, auch andere Bauteile als Pipelines mittels HS-DED zu beschichten. Dies kann sowohl eine Beschichtung gegen

Wasserstoffversprödung wie in diesem Projekt sein, aber auch andere metallische Beschichtungen. So können Bauteile z.B. gegen Korrosion oder Abrasion geschützt werden, wobei die Vorteile des HS-DED-Prozesses gegenüber anderen Beschichtungsverfahren, wie z.B. die lokale Applikation oder die schmelzmetallurgische Verbindung zum Substrat, genutzt werden. Die ersten, vielversprechenden Ergebnisse der metallischen Beschichtung von FVK-Rohren eröffnet perspektivisch auch die Möglichkeit, Kunststoffsubstrate zu beschichten, wodurch sich ganz neue mögliche Anwendungen ergeben. Eine Mehrmaterial-Kombination aus FVK+Metall zeigt neben den im Projekt erarbeiteten Ergebnisse weitere Einsatzmöglichkeiten. Insbesondere die Luft- und Raumfahrt zeigt großes Interesse, da eine solche Mehrmaterialkombination bspw. bei Hochtemperaturanwendungen eingesetzt werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zu Akquise- und Weiterbildungszwecken innerhalb von wissenschaftlichen Veröffentlichungen, Pressemitteilungen und im Vorlesungsbetrieb genutzt. So resultiert aus diesem Projekt am DAP die Erschließung neuer Anwendungs- und Forschungsfelder zur Innenbeschichtung von Bauteilen mittels HS-DED. Am ITA wird die Technologie für den Einsatz in Wasserstoff-Drucktanks evaluiert. Langfristig trägt diese Forschungsarbeit dazu bei, das Leistungsportfolio des DAP zu erweitern und die Sichtbarkeit des Instituts für zukünftige Forschungsarbeiten gemeinsam mit Forschungsinstituten oder Industriepartnern zu erhöhen. Zusätzlich werden die vom DAP erzielten Forschungsergebnisse in die Vorlesungen „Additive Manufacturing I“ und „Additive Manufacturing II“ integriert, die der DAP anbietet. Auf Seiten des ITA werden die Ergebnisse in die verschiedensten Textiltechnik-Vorlesungen und zugehörigen Übungen integriert und gelehrt. Des Weiteren haben die Ergebnisse das Potential im Rahmen einer Start-Up Ausgründung langfristig genutzt zu werden.

## **5. Fortschritt des Stands der Technik während der Projektlaufzeit**

Von dritter Seite sind keine F&E-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind. Es sei aber erwähnt, dass die zu Beginn der Laufzeit des Projekts seitens Gasnetzbetreibern behauptete Tauglichkeit der bestehenden Erdgasnetze für den Betrieb mit Wasserstoff sich nur bedingt erwiesen hat, sodass die Forschung an alternativen Rohrmaterialien bzw. der Bearbeitung bestehender Materialien hochaktuell bleibt. Insbesondere hat zu Beginn des Jahres 2025 ein großer Player verlauten lassen, dass aktuelle Stahlpipelines sich nicht für Druckwechselspannungen aufgrund von Wasserstoffkorrosion für den Transport von gasförmigem Wasserstoff eignen. Dies zeigt, dass die weitere Forschung und die Hochskalierung zu industriereifen Pipelines von großer wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Relevanz sind.

## 6. Veröffentlichung der Ergebnisse

### DAP:

- **Vortrag** auf dem Aachen Hydrogen Colloquium 2022 (04.-05.05.2022) zum Thema: „Hydrogen-proofing pipelines with internal hydrogen permeation barriers produced by Extreme High-Speed Laser Material Deposition (EHLA)“
- **Vortrag** und **Veröffentlichung** auf der 17. European Conference on Spacecraft Structures Materials and Environmental Testing (27.-31.03.23) zum Thema: „Metallic Coating of Fibre Reinforced Polymers using Separate Powder Injected Laser Application“
- **Demonstratorausstellung** (Innenbeschichtungsoptik) auf der Messe Formnext (07.-10.11.23)
- **Vortrag** auf dem Aachen Hydrogen Colloquium 2024 (14.-15.05.2024) zum Thema: „Metallic coating as a permeation barrier and as protection for FRP pressure storage devices by means of Laser Cladding“
- **Vortrag** auf den ZVO (Zentralverband für Oberflächentechnik) Oberflächentagen 2024 (11.-13.09.2024) zum Thema: „ Introduction to Extreme High Speed Laser Application and demonstration of the potential for surface functionalization “

### ITA:

- **Vortrag und Proceedings** bei der internationalen Pipeline-Konferenz in Calgary, Kanada: *Investigation of Cost-Effective Braided and Wound Composite Pipelines for Hydrogen Applications*, Paper No: IPC2022-87191, V003T05A015; 8 pages; <https://doi.org/10.1115/IPC2022-87191>; Published Online: December 19, 2022
- **Vortrag** bei der 18. Pipeline Technology Conference in Berlin (19.04.2023) mit dem Thema: „Fibre-Reinforced Plastics (FRP) for high-pressure hydrogen pipelines“
- **Vortrag** bei Aachen Hydrogen Colloquium (18.-19.04.2023) – Development and design of FRP pipelines for the transport of gaseous hydrogen

### Gemeinschaftliche Veröffentlichungen:

- **Poster und Demonstratorenausstellung** (Entwickelte Innenbeschichtungsoptik, innenbeschichtetes Rohr, FVK gewickeltes Rohr) bei Aachen Hydrogen Colloquium (18.-19.04.2023)
- **Buchkapitel in:** Oil and Gas Pipelines, Multi-Volume: Integrity, Safety, and Security Handbook [ISBN: 1119909619] – (2025)