



Baden-Württemberg

Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben

Fertigungstechnologien für die Serienfertigung von Wasserstofftanks für schwere Nutzfahrzeuge CleanPro4HS

Forschung zur Identifizierung und Evaluation von Fertigungstechnologien für die Serienfertigung von Wasserstofftanks mit Fokus auf Maßnahmen zur Sicherstellung der Technischen Sauberkeit

ABSCHLUSSBERICHT

Zeitraum: 11.11.2020 - 31.12.2021
Eingereicht am: 22.03.2022

Berichtendes Institut:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND TOURISMUS

 **Fraunhofer**
IPA

Projektübersicht

Projektname:	CleanPro4HS
Federführendes Ressort:	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus
Projektpartner:	Fraunhofer IPA
Assoziierter Partner	MAGNA Energy Storage Systems GmbH Schwäbisch Gmünd
Ansprechpartner Fraunhofer IPA:	Michael Luckert (michael.luckert@ipa.fraunhofer.de)
Finanzieller Gesamtumfang:	500.255,00 Euro
Projektzeitraum:	11.11.2020 bis 31.12.2021

Zusammenfassung des Vorhabens:

Ziel des durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg geförderten Forschungsprojektes war die Entwicklung einer Methodik, die eine Kombination der Fertigungssystemplanung mit der Expertise aus dem Bereich der Technischen Sauberkeit ermöglicht. Die Methodik zielt darauf ab, Unternehmen darin zu unterstützen eine möglichst wirtschaftliche Serienproduktion bei der Fertigung von sauberkeitskritischen Produkten zu konzeptionieren.

Entwickelt und validiert wurde die Methodik am Beispiel der Herstellung von Wasserstofftanks für schwere Nutzfahrzeuge. Die MAGNA Energy Storage Systems GmbH (ESS), im folgenden MAGNA ESS, unterstützte das Projekt als assoziierter Partner und stellte so die Praxisrelevanz sicher.

Die wichtigsten Ziele im Rahmen des Projektes waren:

- Aufnahme des Ist-Zustands in der Prototypenfertigung von mobilen Wasserstoffspeichern und Ableitung der Anforderungen in Bezug auf Fertigungstechnologien für eine Serienfertigung je Prozessschritt.
- Festlegung der Sauberkeitsspezifikation für einzelne Prozessschritte, Komponenten und das Gesamtsystem.
- Analyse und Identifikation von kritischen Fertigungsprozessen und Handlungsfeldern im Hinblick auf die Serienproduktion von mobilen Wasserstofftanks, welche ein entsprechendes Optimierungspotential hinsichtlich Fertigungstechnologie und Qualität sowie Technischer Sauberkeit aufzeigen.
- Optimierung bestehender Fertigungsprozesse, Erarbeitung alternativer Fertigungskonzepte sowie Maßnahmen zur Sicherstellung der Technischen Sauberkeit unter Einsatz des Methodenbaukastens Technische Sauberkeit im Produktentstehungsprozess.
- Ableitung und Bewertung von Maßnahmen, Technologien und Fertigungskonzepten zur Sicherstellung und Optimierung der Technischen Sauberkeit von definierten Prozessschritten mit ergänzenden Handlungsempfehlungen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete inklusive der erreichten Meilensteine im Detail betrachtet.

Arbeitspaket 1: Projektmanagement

Laufzeit: 01.12.2020 – 31.12.2021

AP1.1: Projektmanagement

- Zur Projektsteuerung wurde ein Strukturplan erstellt, der Arbeitspakete, Meilensteine und Inhalte bündelt und die Überwachung des Zeitplans ermöglicht.
- Das Projekt wurde innerhalb des geplanten Zeitrahmens abgeschlossen. Es gab einzelne Verzögerungen in Arbeitspaket 2 bei der Messung der Umgebungsbedingungen in der Produktionsumgebung sowie bei der Messung der Verschmutzung der Zulieferteile. Beide Verzögerungen ergaben sich aufgrund von Lieferschwierigkeiten, die die Verfügbarkeit der Teile eingeschränkt haben. Die Messungen wurden im Projektverlauf nachgeholt.
- Der geplante Kostenrahmen des Gesamtprojektes wurde eingehalten. Die im Projektplan beschriebene Messtechnik zur mobilen Evaluation von Verschmutzung in Produktionsumgebungen wurde beschafft und im Projektverlauf erfolgreich verwendet.
- Informationen zum Projektvorhaben finden sich auf der Homepage des Instituts (<https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/CleanPro4HS.html>).
- Im Rahmen der Technologierecherchen wurden Versuche zur Reinheit von Schweißverfahren und zum Ausgasungsverhalten von Klebstoffen durchgeführt. Zu beiden Themen sind Veröffentlichung geplant, die im Laufe des Jahres 2022 erscheinen sollen.
- Im Rahmen der Verwertung der Forschungsergebnisse ist ein 45-minütiges Webinar im Rahmen der Webinar-Reihe „keep the pace“ des Fraunhofer Instituts geplant. Das Webinar ist für interessierte Vertreter der Wirtschaft konzipiert und wird kostenfrei angeboten.

AP1.2: Lenkungskreis

- Zum regelmäßigen Austausch und zur Projektsteuerung wurden monatliche Austauschtreffen (Jour Fix) durchgeführt. Hieran nahmen die Arbeitspaketverantwortlichen des Instituts und vom assoziierten Projektpartner Magna teil. Ergänzend fanden regelmäßig kurzfristige bilaterale Abstimmungen zur Planung der Arbeitstermine und zur Überwachung des Zeitplans statt.

Arbeitspaket 2: Anforderungsaufnahme

Laufzeit: 01.12.2020 – 31.03.2021

Kurzbeschreibung des Arbeitspakets:

Innerhalb des Arbeitspaketes 2 ging es darum, den Fertigungsprozess zu spezifizieren und Anforderungen in Hinblick auf die Technische Sauberkeit zu ermitteln, da im Bereich der kryogenen, mobilen Flüssigwasserstofftanks für schwere Nutzfahrzeuge in Bezug auf die seriennahe Fertigung keine Erfahrungen vorhanden waren. Hinsichtlich der Sauberkeit wurde insbesondere der Innentank mit allen

medienberührenden Teilen (Funktionssicherheit) sowie der Vakuumbereich für die Isolation zwischen Innentank und Außentank (Prozesszeit) als sehr kritisch betrachtet.

Zur Definition der Anforderungen der Fertigungsprozesse zur Herstellung von Wasserstofftanks in Hinblick auf die Serienfertigung wurden zunächst eine Ist-Zustandsaufnahme im Bereich der Prototypenfertigung durchgeführt sowie A-Muster der Kleinserienfertigung auf ihren filmischen und partikulären Sauberkeitszustand untersucht. Weiterhin wurden im Rahmen von Workshops die Fertigungsabläufe beschrieben sowie analysiert und bilden somit die Basis für die Ableitung von Anforderungen.

AP2.1: Anforderungen aus Fertigungsumfeld und Produktionsszenario

- Die Montage-/Fertigungsprozesse der Prototypenfertigung und deren Abläufe wurden aufgenommen. Als Grundlage wurde hierfür ein Montagegraph erstellt, der die Strukturierung der Produktionsreihenfolge erlaubt und die Grundlage für die weitere Planung darstellt. Zudem wurden die geplanten Produktionsmengen und, soweit bekannt, die geplanten Produktionsverfahren aufgenommen. Diese Prozesse orientieren sich an einem aktuellen Modell des Prototyps (Stand Q4 2021) und sind nicht final, da das Design aufgrund von sich ändernden Kundenanforderungen noch Änderungen unterliegt. Die grundsätzlichen Schritte und Komponenten bleiben jedoch identisch.
- Wie bereits unter AP1 beschrieben wurde, wurden Messgeräte zur Aufnahme des Ist-Zustands der Prototypenfertigung beschafft. Die Messungen wurden in der zweiten Jahreshälfte durchgeführt.
- Als Ausgangspunkt für die Konzeption der Serienfertigung wurden die aktuell bekannten Fertigungsprozesse und -verfahren der Prototypenfertigung analysiert. Aufbauend auf diesen manuell dominierten Verfahren wurden die bestehenden Schwachstellen erörtert und darauf aufbauend Anforderungen an eine Serienfertigung definiert. Besonderes Augenmerk bei der Konzeption der Serienfertigung lag auf der schrittweisen Erhöhung der Ausbringungsmenge, da die potenziellen Absatzzahlen von Wasserstofftanks für schwere Nutzfahrzeuge unbekannt waren. Darauf aufbauend kam der Modularisierung der einzelnen Verfahren und der Verkettung der Module eine wichtige Rolle zu.
- Zur Strukturierung der Anforderungen der Fertigungsverfahren wurden die Fertigungsschritte im Hinblick auf ihre Automatisierbarkeit, Eignung des Fertigungsverfahrens, Taktzeiten, Potenzial für Partikel- und Öl-/Schmierstoff-Verschmutzungen, Reinigbarkeit, Sicherheitsrelevanz für das Endprodukt und Überprüfbarkeit des Ergebnisses bewertet.
- Um die kritischen Verunreinigungsmengen der verschiedenen Tankbereiche (Isolationsvakuums sowie Wasserstoffkreislauf) zu evaluieren, wurden die Auswirkungspunkte von Verschmutzungen untersucht. Im Bereich des tiefkalten Wasserstoffkreislaufs lag der Fokus auf partikulären Verschmutzungen, im Bereich des Isolationsvakuums auf filmisch-chemischen Verunreinigungen.
- Eine Bewertung des Wasserstoff-Kreislaufs ergab, dass die primäre Gefahr von Verschmutzungen ein sich Zusetzen der semipermeablen Membran der Brennstoffzelle ist.

Eine verschmutzte Membran würde ggfs. die Lebensdauer bzw. die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle verringern.

- Aufbauend darauf wurde im Fraunhofer-Netzwerk recherchiert, welche Untersuchungen zur tolerablen Verschmutzung (Partikelgrößen, zu vermeidende Elemente) bereits durchgeführt wurden. Diese Recherche ergab, dass aufgrund mangelnder Praxiserfahrung wegen geringer Verbreitung von wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugen sich Langzeitauswirkungen von Verschmutzung derzeit kaum bewerten lassen. Dasselbe Feedback ergab eine Befragung von zwei OEM-Herstellern.
- Als Grundlage der zulässigen Verschmutzung im Rahmen des Produktionsprozesses und der zulässigen Materialien wurde eine Normenrecherche durchgeführt.
- Zur Vorbereitung der Fertigungsplanung wurde das Verschmutzungspotenzial einzelner Fertigungs- und Montageverfahren diskutiert. Außerdem wurden Wissenslücken im aktuellen Stand der Fertigungsverfahren identifiziert. Diese betreffen vor allem das Verunreinigungspotenzial von unterschiedlichen Schweißprozessen und die potenzielle Gefährdung des Isolationsvakuums zwischen den zwei Tankmodulen. Um hierzu Aussagen treffen zu können, wurden die später durchgeführten Untersuchungen geplant (AP4).

AP 2.2 Spezifikation der Technischen Sauberkeit

- Um den initialen Sauberkeitszustand der Produktionsumgebung und der Einzelkomponenten bewerten zu können, wurden im Projektverlauf verschiedene Messungen vorgenommen. So wurden die Komponenten ins Besondere auf partikuläre und filmische Initialverunreinigungen hin untersucht. Die Untersuchungen hinsichtlich der partikulären Verunreinigungen erfolgten dabei nach der in VDA 19.1 beschriebenen Methode zur Prüfung der Technischen Sauberkeit (Sauberkeitsanalyse). Hierbei werden die Partikel im Rahmen eines Probenahmeschrittes unter Zuhilfenahme einer Prüfflüssigkeit vom Bauteil extrahiert und auf einen Filter abgeschieden. Die Auswertung des Filters erfolgt mit lichtoptischen Systemen. Im Rahmen der Sauberkeitsanalysen zur Ermittlung der partikulären Verunreinigungen konnten folgende Ergebnisse festgestellt werden:
 - Auf gedrehten, gestanzten und gebogenen Bauteilen sowie Bauteilen mit Gewindschnitten befindet sich initial eine hohe Partikellast (metallische Partikel, nicht metallische Partikel und Fasern, Abbildungen 1, 2 und 3):

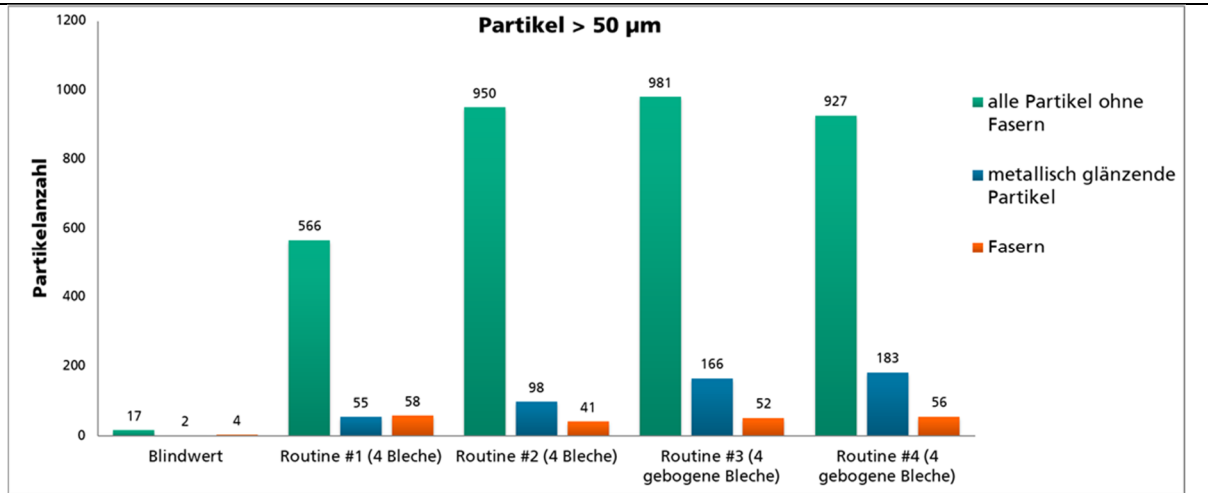


Abbildung 1: Ergebnisse der Sauberkeitsanalysen an Blechen (Prüflosgröße: 4; ohne Vorreinigung)

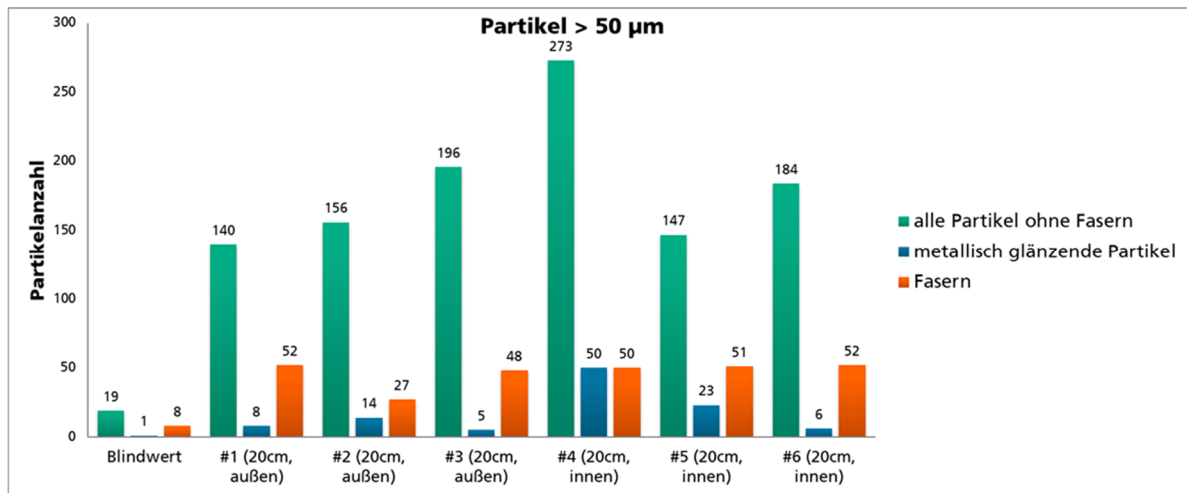


Abbildung 2: Ergebnisse der Sauberkeitsanalysen an Rohren (mit Vorreinigung)



Abbildung 3: Ergebnisse der Sauberkeitsanalysen: Beispiele für partikuläre Verunreinigungen

- Im Rahmen der Messungen zur Ermittlung der filmischen Verunreinigungen konnten folgende Ergebnisse festgestellt werden:

- Auf gedrehten, gestanzten und gebogenen Bauteilen sowie Bauteilen mit Gewindecchnitten befinden sich zumeist Bearbeitungshilfsmittel. Diese können für das Vakuum und die Schweißprozesse kritisch sein (Abbildungen 4 und 5).

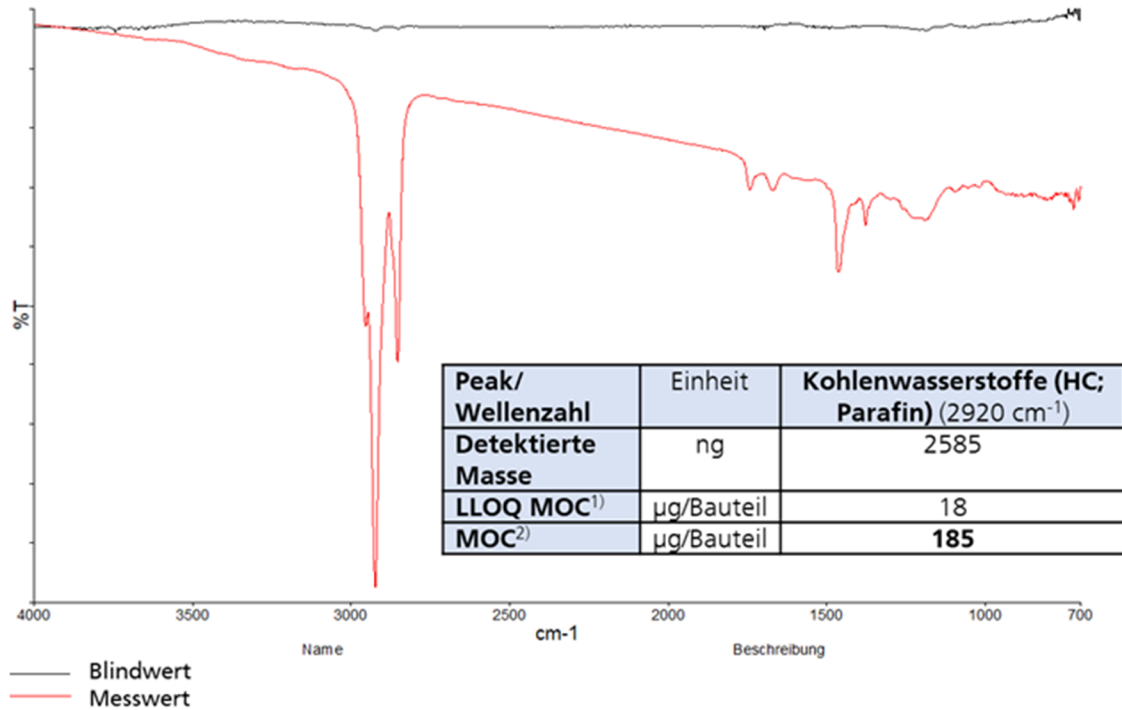


Abbildung 4: Ergebnisse der Messungen hinsichtlich molekularer organischer Verunreinigungen an nicht gereinigten Blechen

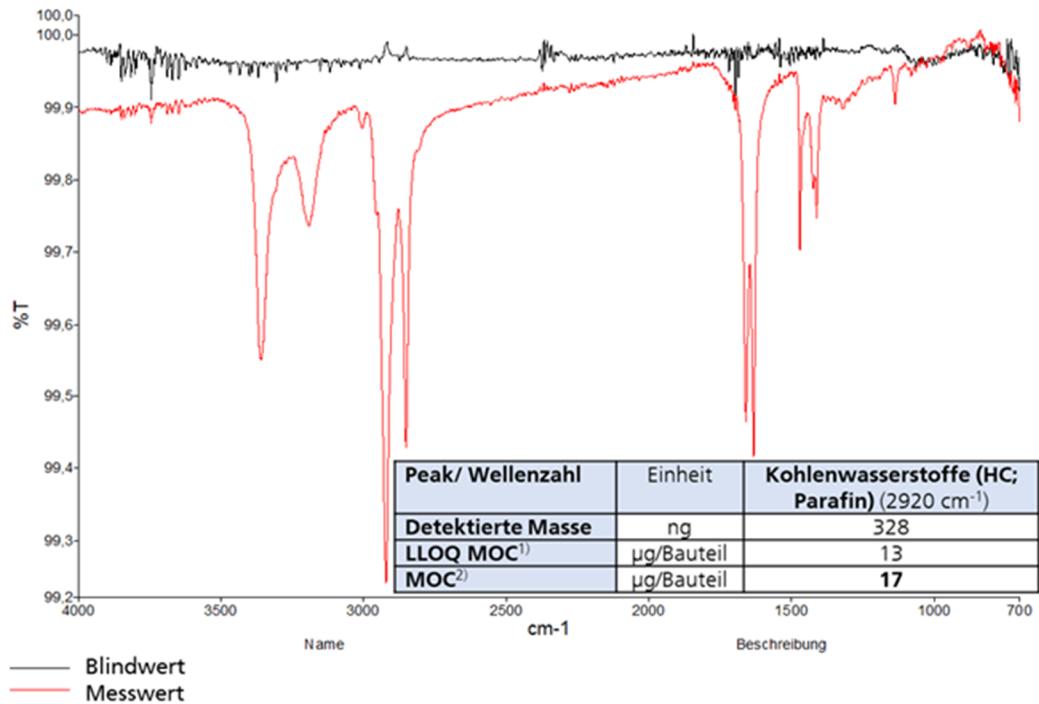


Abbildung 5: Ergebnisse der Messungen hinsichtlich molekularer organischer Verunreinigungen an gereinigten Blechen

- Aufbauend auf den Ergebnissen der Messungen und den Anforderungen der einschlägigen Normen wurden folgende Maßnahmen festgelegt: Alle wasserstoffberührenden und vakuumberührenden Komponenten, sind als Einzelteile zu reinigen,
 - falls für nachfolgende Montageprozesse ein definierter Sauberkeitszustand benötigt wird (z.B. Schweißprozesse),
 - falls die Einzelteile im Rahmen von Reinigungsprozessen des Zusammenbaus nicht mehr erreichbar bzw. nicht mehr ausreichend reinigbar sind und
 - falls keine Reinigung der Einzelteile im Zusammenbau mehr stattfindet.
- Um zusätzlich einen Anhaltspunkt bezüglich des Verunreinigungspotentials im Fertigungs-/bzw. Montageablauf zu erhalten, erfolgte zudem eine tabellarische Bewertung des Risikopotentials hinsichtlich chemischer und partikulärer Kontaminationen der Einzelteile (siehe Abbildung 6). Die Einzelteile wurden hinsichtlich des Materials, der Fertigungsverfahren und der Fertigungshilfsstoffe sowie der Reinigbarkeit aus Sauberkeitssicht bewertet und in unterschiedliche Risikogruppen eingeteilt. Des Weiteren erfolgte eine Bewertung hinsichtlich Gratentstehung und Kritikalität der Gratposition sowie eine Bewertung der Kontaminationsrisiken beim Handling. Diese Beurteilung und Einteilung dient im weiteren Verlauf des Projektes als Grundlage für die Ableitung von Maßnahmen zu Verbesserung des Sauberkeitszustands sowie als Basis für die Planung der Reinigungsverfahren.
- Als Folge der Bewertung der Fertigungsverfahren wurden verschiedene mögliche Fehlerquellen, beispielsweise entstandene Grate und zu erwartenden negativen Auswirkungen von Verunreinigungen abgeleitet. Darauf aufbauend wurden Anforderungen an das Design des Wasserstofftanks definiert, die in das Design des Prototyps übernommen wurden. Die wichtigsten Anforderungen sind:
 - Gratvermeidung an Bauteilbereichen, an denen diese durch Handling, Transport und Montage abgeschert werden können. Hierzu sind je Bauteil die entsprechenden Bereiche zu definieren.
 - Die Werkzeug-Trennlinie darf sich beim Transport, der Handhabung oder bei der Montage nicht in Kontaktflächen des Bauteils befinden

Können Grate bzw. das Abscheren dieser nicht von Anfang an vermieden werden, sind entweder eine prozesssichere Entgratung durchzuführen oder Reinigungsprozesse nach kritischen Handlings-, Montage und Transportprozessen zu definieren.

Bauteilname	Fertigungsverfahren	Gratbewertung	Reinigungsverfahren	Risikobewertung Fertigung chemische Verunreinigungen	Risikobewertung Fertigung Partikel
Niete	Zu klären: Ist Bauteil kaltumgeformt? Aufgrund der Materialumformung entstehen Oberflächenrisse im um-Bereich --> Risiko: Partikelgenerierung		einfache Reinigung als Schüttgut möglich (z.B. US) Zu klären, ob Bauteil bei Lieferant gewaschen wird --> Risiko Schmierstoffe	gering	hoch
Lötkontakt	Stanzteil Zu klären, ob Bauteile gleitgeschliffen werden --> Risiko: Schmierstoff (Abreinigung notwendig)	eventuell ist mit Stanzgraten zu rechnen	einfache Reinigung als Schüttgut möglich (z.B. US) Material hinsichtlich Reinigung kritisch	gering	hoch
Elektrode	Fertigungsverfahren zu klären: - Sägen? - Löcher bohren / schneiden / Laser?	Bohraustritsgrate --> zu klären: Wird Bauteil innen entgratet?	einfache Reinigung als Schüttgut möglich (z.B. US); Reinigung des Innenbereichs kritisch	gering	hoch

Abbildung 6: Ausschnitt Tabelle Verunreinigungspotential Einzelteile

Wichtige Meilensteine (Projektergebnisse)

- MS 2.1: Ist-Zustandsaufnahme Prototypenfertigung und Anforderungsaufnahme.
- Aufstellung von Designkriterien zur vereinfachten Reinigung des Tanks im Produktionsablauf.
- Theoretische Bewertung des Verunreinigungspotentials (filmisch und partikulär) der Einzelkomponenten.
- Messung der Initialverschmutzung der Einzelkomponenten und Prozessschritte.
- Messung der Verschmutzung der Produktionsumgebung.
- Ableitung der Sauberkeitsspezifikation des Gesamtsystems, der Produktkomponenten und der Prozessschritte.
- MS 2.2: Allgemeine Sauberkeitsspezifikation für Gesamtsystem.

Arbeitspaket 3: Analyse und Identifikation von Fertigungskonzepten

Laufzeit: 01.02.2021 – 30.04.2021

Kurzbeschreibung des Arbeitspakets:

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die relevanten technologischen Handlungsfelder und kritischen Prozessschritte identifiziert, für welche noch keine serientauglichen Fertigungsprozesse zur Verfügung stehen oder welche im Hinblick auf ihr Schmutzpotential und der Einhaltung entsprechender Grenzwerte im Bereich der Technischen Sauberkeit angepasst und optimiert werden müssen. Es wurden sauberkeitskritische Zukaufkomponenten untersucht und geklärt, ob diese die notwendigen Anforderungen und Spezifikationen an die Technische Sauberkeit über die Lieferkette erfüllen.

AP 3.1 Prozessanalyse mit Identifikation kritischer Prozesse

- Zur Identifikation von verunreinigenden Fügeprozessen im Fertigungsvorgang wurde ein vorläufiger Montagegraph aufgenommen. Aufbauend darauf wurden die aus technologischer Sicht kritischen Fertigungsprozesse abgeleitet und die Differenzen zwischen Prototypen- und Serienfertigung diskutiert. Anschließend wurden die zu vermeidenden Verunreinigungsarten für die jeweiligen Folgeprozessschritte aufgenommen und der Bedarf an Reinigungsschritten im Prozessablauf skizziert. Es wurde erkannt, dass sich die Qualität der Schweißprozesse besonders stark auswirkt. Zum einen durch das Verunreinigungspotenzial durch den Prozess selbst und zum anderen durch die hohen Sicherheitsanforderungen, die dazu führen, dass beispielsweise Anlauffarben zu vermeiden sind.
- Aus Basis der Differenzen zwischen Prototypen- und Serienfertigung wurden die Prozessschritte identifiziert, für die keine serientauglichen Prozesse zur Verfügung stehen. Dies betraf ausgewählte Reinigungsprozesse, aber vor allem auch die Isolationsfolie (MLI) im Zwischenraum zwischen Innen- und Außentank. Da für den Bau der Prototypen einige Prozesse aus der Raumfahrt übernommen wurden, werden die Fügeprozesse meist manuell durchgeführt.

Aufgrund der geringen Stückzahlen in der Raumfahrt stehen häufig keine serientaugliche Lösung am Markt bereit. Darunter fallen ins Besondere die Konfektionierung und Anbringung der MLI und die Integration des Innentanks in das äußere Tankmodul.

- Die Montageprozesse wurden darüber hinaus detailliert tabellarisch hinsichtlich der Fügeprozesse, der Fügeigenschaften und der Fügereigenfolge aus Sauberkeitssicht bewertet und in unterschiedliche Risikogruppen hinsichtlich filmischer und partikulärer Verunreinigungen eingeteilt (siehe Abbildung 7). Es wurden die Prozessschritte ermittelt, innerhalb derer sensitive Komponenten verarbeitet werden und von außen verunreinigt werden können, sowie aus Sauberkeitssicht generell kritische Prozessschritte. Diese Beurteilung und Einteilung diente im weiteren Verlauf des Projektes zusammen mit den Ergebnissen aus AP2 als Grundlage für die Ableitung von Maßnahmen zu Verbesserung des Sauberkeitszustands sowie als Basis für die Planung der konkreten Reinigungsverfahren.

Montage					
Bauteilname	Fügeprozess	Fügeigenschaften, Fügereigenfolge	Maßnahme	Risikobewertung Montage (Partikel)	Risikobewertung Montage (chemische Verunreinigungen)
Niete	genietet an Elektrode	Partikelrisiko durch Umformung der Niete (Nietprozess; Grate an Niete) Toleranzen ausreichend, kein Schaben	- vorab: Nietprozess auf Partikelentstehung untersuchen - Reinigung mittels Ausblasen direkt nach Montage falls notwendig	hoch	gering
Lötkontakt	werden genietet (wir im weiteren Verlauf der Montage oben an Elektrode gelötet)	Partikelrisiko (Nietprozess; Grate an Niete)	- vorab: Nietprozess auf Partikelentstehung untersuchen - Reinigung mittels Ausblasen direkt nach Montage falls notwendig		
Elektrode					

Abbildung 7: Ausschnitt Tabelle Verunreinigungspotential Montageprozesse

AP 3.2 Untersuchung sauberkeitskritischer Zukaufkomponenten

- Unter Berücksichtigung der vorläufigen Stückliste wurde eine Übersicht über die im Tank verbauten Zukaufkomponenten erstellt. Aufbauend auf dieser Übersicht wurden Kategorien gebildet und bewertet. Als grundsätzlich sauberkeitskritisch wurden hierbei alle wasserstoffführenden oder sich im Vakuum befindlichen Komponenten definiert. Für diese Komponenten wurden die Auswirkungen möglicher Verunreinigungen bewertet. Für den Bereich des tiefkalten Wasserstoffs gilt es sicherzustellen, dass partikuläre Verunreinigungen vermieden werden, da diese die Lebensdauer der eingesetzten Brennstoffzelle verringern, während für den Bereich des Vakuums besonders ausgasende Verbindungen problematisch sind, da diese die Langzeitstabilität des Isolationsvakuums beeinträchtigen und so die Langlebigkeit des Tanksystems gefährden.
- Da die MLI-Folien einen Großteil der Flächen im Vakuumbereich ausmachen, erfolgten hierzu mehrere Ausgasungsuntersuchungen. Zunächst erfolgte ein Emissionsscreening nach VDI 2083 Blatt 17 und ISO 14644-15 zweier unterschiedlicher MLI-Ausführungen (Coolcat NW und Coolcat NF der Firma RUAG) bei Raumtemperatur und 80°C (siehe Abbildung 8). Es wurde herausgefunden, dass die Ausgasung der Folie bei Erwärmung das Vakuum gefährden könnte.

		MLI 1 (NW)	MLI 2 (NF)
Emissionsrate 23°C	in g/m ² s	1,2E-09	2,0E-09
Emissionsrate 80°C	in g/m ² s	4,5E-07	4,0E-07

¹⁾: VOC sind alle Substanzen mit einer Retentionszeit von einschließlich C6 (Hexan) bis C16 (Hexadekan). SVOC sind demnach alle Substanzen mit einer Retentionszeit größer Hexadekan. Die Konzentration berechnet sich aus der analysierten Probenfläche, der detektierten Masse, der Prüfdauer und der Response des externen Standards, welcher bei jedem Analyse-Batch ebenfalls bestimmt wird.

Abbildung 8: Ergebnis Emissionsmessung: VOC/SVOC 23°C und 80°C

- Um herauszufinden, ob es sich hierbei um einen einmaligen Vorgang handelt oder ob dauerhafte Emissionen zu erwarten sind, wurde das Ausgasungsverhalten über einen längeren Zeitraum untersucht. Im Rahmen einer Thermoextraktion in Anlehnung an VDA 278 wurde das Ausgasungsverhalten einer MLI (Coolcat NW) bei 80°C über 72 h untersucht. Hierbei wurde der Prüfgegenstand in einer thermisch vorkonditionierten Edelstahl-Röhre mit eingesetztem PTFE Liner ausgeheizt. Es zeigte sich, dass die Spuren an organischer Ausgasung nach 24 Stunden unterhalb der Nachweisgrenze abklingen und keine Ausgasung aufgrund einer verzögerten thermischen Degradation eintritt (siehe Abbildung 9). Dies bedeutet, dass die Folie nach einer einmaligen Erhitzung nicht vakuumgefährdend ist, jedoch ggfs. im Produktionsablauf dieser Schritt berücksichtigt werden muss.

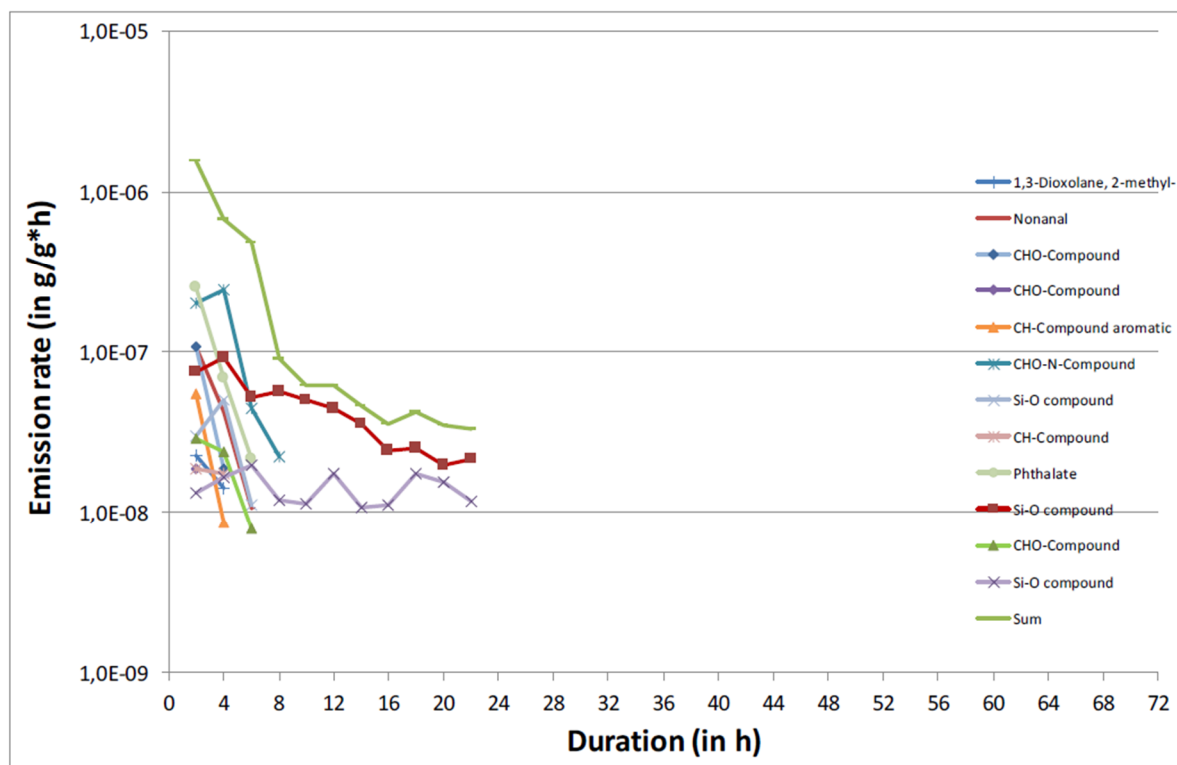


Abbildung 9: Ausgasungsverhalten MLI (Coolcat NW) bei Thermoextraktion in Anlehnung an VDA 278

- Weiterhin wurden die einzelnen Zukaufkomponenten aufbauend auf ihren Materialeigenschaften und Geometrien auf ihre Reinigbarkeit untersucht. Dies diente zum einen als Grundlage für die Entscheidung, welche Komponenten beim Lieferanten vor dem Transport und

welche nach dem Transport unmittelbar vor der Montage zu reinigen sind. Zum anderen wurden hierdurch Komponenten ermittelt, bei denen aufgrund einer erschwerten Reinigbarkeit Maßnahmen getroffen werden müssen, um eine Verunreinigung weitestgehend auszuschließen.

- Aufbauend auf den Messergebnissen der initialen Verunreinigung aus AP2 wurden die Reinigungsanforderungen erhoben. Hierauf aufbauend erfolgte dann die Erarbeitung eines Konzeptes zur Einhaltung der Sauberkeit über die gesamte Lieferkette unter Berücksichtigung des Risikos einer Rückverschmutzung durch Logistik- und Transportprozesse.

Wichtige Meilensteine (Projektergebnisse)

- MS 3.1: Prozessanalyse ist abgeschlossen und kritische Prozessschritte sind definiert.
- MS 3.2: Sauberkeitskritische Zukaufkomponenten sind identifiziert und dokumentiert.
- MS 3.2: Untersuchung der initialen Verunreinigung sauberkeitskritischer Zukaufkomponenten wurde abgeschlossen. Konkrete Reinigungsanforderungen für sauberkeitskritische Zukaufkomponenten wurden abgeleitet.

Arbeitspaket 4: Entwicklung von Fertigungskonzepten

Laufzeit: 01.04.2021 – 31.08.2021

Kurzbeschreibung des Arbeitspakets:

Innerhalb dieses Arbeitspaketes erfolgte die Bewertung für die im Prototypenprozess eingesetzten Technologien sowie die Identifizierung geeigneter alternativer Technologien der kritischen Prozessschritte. Um eine ausreichende Sauberkeit des Endproduktes zu gewährleisten, wurden Konzepte zur Sicherstellung der Technischen Sauberkeit erarbeitet. Da die Kombination aus hohen Reinheitsanforderungen bei der Produktion großvolumiger Produkte in Serie mit hoher Stückzahl und Einsatztemperaturen bis – 250 Grad Celsius (flüssiger Wasserstoff) nur selten anzutreffen ist, sind einige Fertigungsverfahren und Produktionsmaterialien nicht dahingehend untersucht.

AP 4.1 Technologierecherche

Ziel des Teilarbeitspakets war u.a. die Identifikation geeigneter Fertigungstechnologien. Ins Besondere war das Verunreinigungspotenzial von Schweißverfahren nicht wissenschaftlich untersucht. Um geeignete Reinigungsverfahren und die Fertigungsumgebung planen zu können, wurden deshalb verschiedene Versuche durchgeführt. Die wichtigsten Arbeitsfelder werden anschließend beschrieben.

Schweißen

- Um das Eignungspotential einzelner Schweißverfahren beurteilen zu können, wurden Untersuchungen bezüglich des Verunreinigungspotentials verschiedener Schweißtechnologien durchgeführt. Hierbei wurden die Schweißprozesse WIG (mit/ohne Zusatz), E-Hand und MAG (S-Puls, Standard und Speed) auf die Entstehung von chemischen und partikulären Verunreinigungen untersucht. Zur Bewertung der Entstehung von partikulären Verunreinigungen wurden Partikelfallen, Luftpartikelzähler und Sauberkeitsanalysen eingesetzt. Zur Bewertung der chemischen Verunreinigungen wurden ACC-Messungen, PINs und Materialemissionsmessungen eingesetzt (siehe Abbildung 10).
- Die Bewertung der chemischen Verunreinigungen durch die Schweißprozesse hat ergeben, dass sich bei keinem der Schweißprozesse kritische chemische Verunreinigungen bilden.

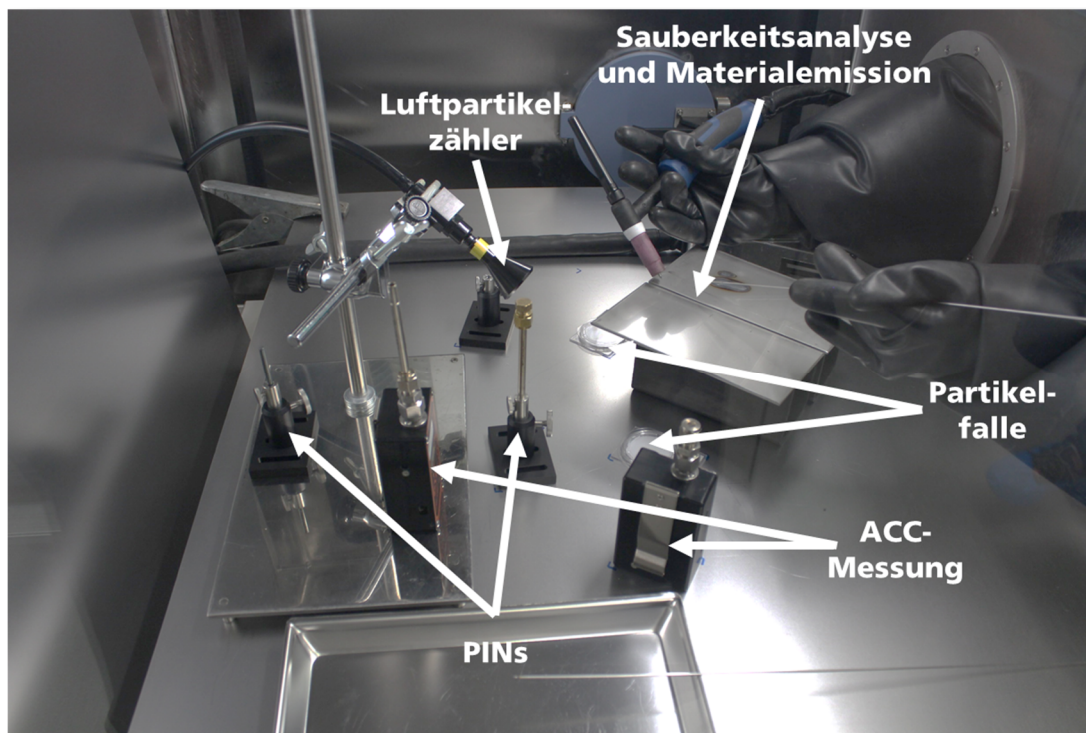


Abbildung 10: Versuchsaufbau und durchgeführte Analysen

- Mittels der Luftpartikelzähler (Messung luftgetragener Partikel) und der Partikelfallen (Messung sedimentierender Partikel) konnte der Kontaminationseinfluss auf die Umgebung der Schweißprozesse und damit auch das Risiko von Querkontaminationen ermittelt werden. Mithilfe der Sauberkeitsanalyse wurde der Sauberkeitszustand des Bauteils nach dem Schweißen untersucht.
- Anhand der Messungen ist eine Einordnung des Verunreinigungspotentials verschiedener Schweißverfahren möglich (siehe Abbildungen 11, 12, 13). Darauf aufbauend wurden Maßnahmen zur Verbesserung der Reinheit der Produktionsprozesse erarbeitet.

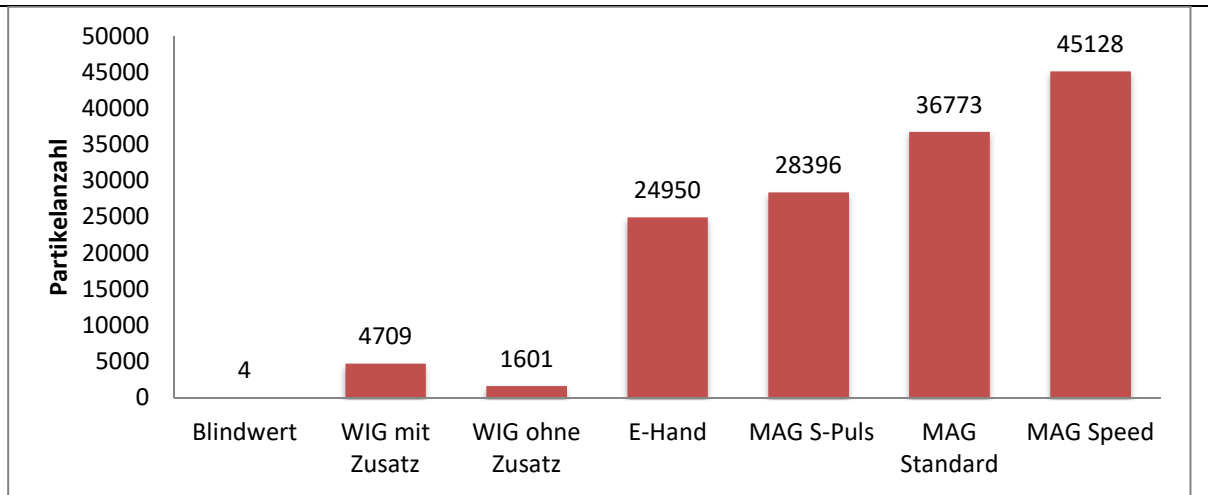


Abbildung 11: Ergebnis Sauberkeitsanalysen (Alle Partikel ohne Fasern > 50 µm)

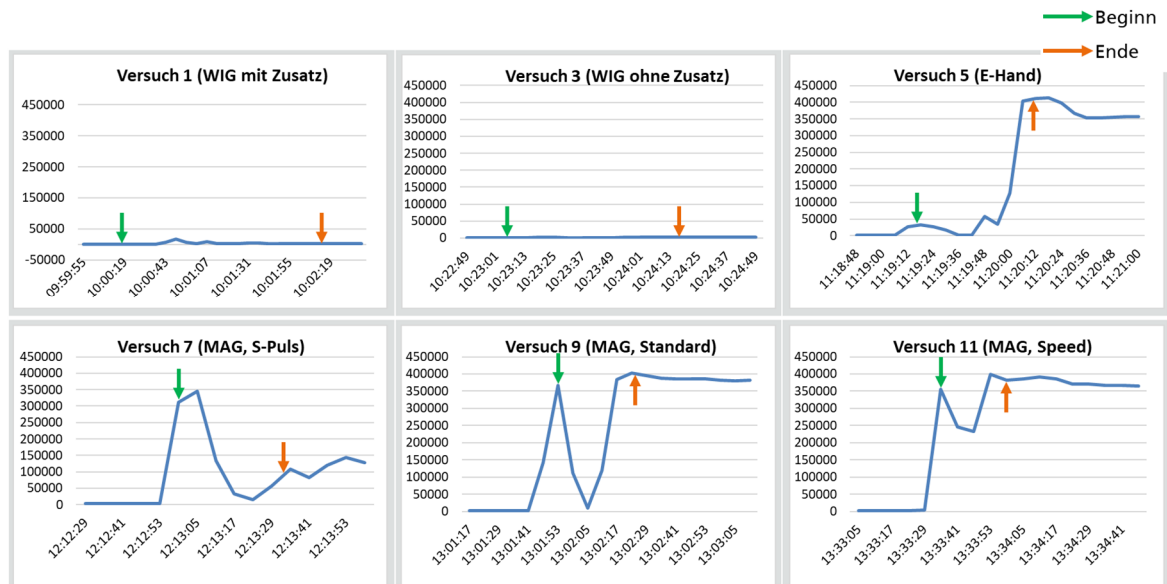


Abbildung 12: Ergebnis Luftpartikelzähler (Zeitlicher Verlauf der Partikelgenerierung aller Partikel > 0,5 µm)

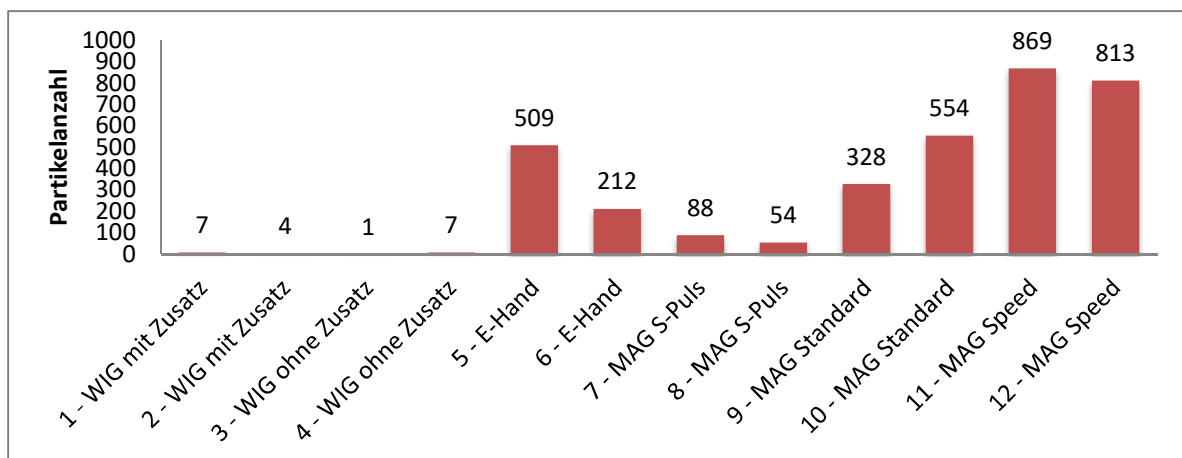


Abbildung 13: Ergebnis Partikelfallen (Pro Versuch wurden zwei Partikelfallen ausgelegt, die Ergebnisse wurden zusammengerechnet.)

- Da es sich bei vielen der wasserstoffführenden Komponenten um Rohrleitungen handelt, ist das saubere Verbinden dieser ein wichtiger Produktionsschritt. Mit Orbitalschweißzangen (siehe Abbildung 14) existiert am Markt hierfür bereits eine geeignete Lösung. Bei den Schweißvorgängen wird üblicherweise der Innenbereich des Rohres mit Schutzgas geflutet. Da dies im gegebenen Anwendungsfall bedeuten würde, den gesamten Tank mit Schutzgas zu fluten (ineffizient/teuer), wurde eine Lösung benötigt, mit der möglichst nur der zu verschweißende Innenbereich des Rohres geflutet wird. Als Lösung hierfür wurde Formiervorrichtungen identifiziert (siehe Abbildung 15). Diese erlauben eine Minimierung des Schutzgasbedarfs.



Abbildung 154: Orbitalschweißzange
© Polysoude



Abbildung 145: Formiervorrichtung
© ASCHL

Klebstoffe

- Für die Montage der Isolationsfolie (MLI) war es notwendig, diese im Rahmen des Produktionsprozesses am Innentank zu fixieren. Als eine Möglichkeit hierfür würden Klebeverbindungen identifiziert. Da sich die MLI im Vakuum befindet und dieses über einen möglichst langen Zeitraum stabil zu halten ist, wurden minimalausgasende Klebstoffe benötigt. Aktuell kommen diese vor allem bei der Raumfahrt zum Einsatz, allerdings sind die Referenznormen zum Ausgasverhalten veraltet, weshalb von den Herstellern keine konkreten Aussagen getroffen werden konnten. Aufgrund dessen wurde ein Versuch von infrage kommenden Klebstoffen durchgeführt.
- Wegen des herausfordernden Anforderungsprofils an den Klebstoff wurden Vorgespräche mit einigen Klebstoffherstellern geführt. Das Anforderungsprofil umfasst:
 - Die Verklebbarkeit von zwei Komponenten mit stark differierenden Oberflächenenergien (Edelstahl des Innentanks zu Polyesterfolie der MLI).
 - Die Temperaturstabilität für den Betriebszustand (ca. -250°C), den Montageprozess (Raumtemperatur bei ca. 25°C) und die Überführung von Montageprozess zu Betriebszustand.
 - Der Kleberstoff muss in der Lage sein, die verschiedenen Ausdehnungen von Edelstahl und Polyesterfolie bei der Temperaturdifferenz von Montageprozess zu Betriebszustand auszugleichen.
 - Der Kleber muss minimalausgasend sein, um die Langzeitstabilität des Vakuums nicht zu gefährden.
 - Der Applikationsprozess des Kleberstoffs muss serientauglich sein.

- Bedingt durch das beschriebene Anforderungsprofil waren nach den Vorgesprächen nur drei Hersteller in der Lage Klebstoffe für die Ausgasungsversuche zu empfehlen. Im Rahmen der Vorgespräche ergab sich, dass eine punktuelle Klebung gegenüber einer flächigen Klebung zu bevorzugen ist. Dies liegt wesentlich an der verschiedenen Ausdehnung der beiden zu verklebenden Komponenten bedingt durch die hohe Temperaturdifferenz zwischen Montage und Betrieb.
- Es wurden die folgenden Klebstoffe bei den Versuchen berücksichtigt:
 - DELO-DUOPOX® AD840 von DELO (modifiziertes Epoxidharz | 2K | raumtemperaturhärtend)
 - DELO®-PUR 9895 von DELO (Polyurethan | 2K | raumtemperaturhärtend)
 - EP29LPSPND-3 von MASTERBOND (modifiziertes Epoxidharz | 2K | für kryogene Temperaturen)
 - PENGUIN CLEAN SEAL 2555 von SUNSTAR ENGINEERING (modifiziertes Silikon | 1K | gering ausgasender Reinraumkleber)
 - #1039 von SUNSTAR ENGINEERING (modifiziertes Epoxidharz | 2K | gering ausgasender Elektronikkleber)
- Das Versuchsdesign zielte darauf ab, die Klebstoffe hinsichtlich ihrer Initialausgasung und der Ausgasung über die Zeit zu untersuchen. Dazu wurde ebenfalls die Wärmebehandlung zur Prozessverkürzung und deren Einfluss auf die Ausgasung mitbetrachtet. Mit Wärmezufuhr nach Klebstoffapplikation verläuft die chemische Reaktion schneller, sodass die gewünschte Festigkeit für folgende Montageschritte schneller erreicht wird. Dies ist von besonderer Relevanz für die spätere Auslegung der Serienproduktion. Das Versuchsdesign ist in der folgenden Grafik dargestellt:

Nr.	Kleber	Aushärtungsart	Aushärtungsdauer
1	Delo Dupox AD8840	Ofen (80 Grad)	20 min
2		Raumtemperatur	24 h
4	Delo Pur 9895	Ofen (80 Grad)	60 min
5		Raumtemperatur	24 h
7	Sunstar Penguin 2555	Ofen (40 Grad)	24 h
8		Raumtemperatur	24 h
10	Sunstar #1039	Ofen (65 Grad)	2 h
11		Raumtemperatur	24 h
13	MB EP29LPSPND-3	Ofen (65 Grad)	5 h
14		Raumtemperatur	24 h

Vorgehen:

- Verklebung innerhalb der Petrischale mit der zugeschnittenen MLI (4x punktförmige Klebeverbindung)
- Differenzwägung der Fügeverbindung direkt nach Applikation und nach jeder Messung
- Direkte Messung nach Aushärtung
→ μ CTE: pre-purge 6 min und Probenahme 6 min
- Langzeit-Messung der Raumtemperatur-Probe je Kleber nach Tag 14
→ μ CTE pre-purge 6 min und Probenahme 60 min (je nach Ergebnis der direkten Messung)

Abbildung 16: Versuchsaufbau Klebstoffe

- Für die Versuchsdurchführung wurden die Klebstoffe in einer Petrischale mit der MLI nach Anweisung des Klebstoffherstellers verklebt und abhängig vom Versuchsdesign anschließend bei definierter Temperatur im Ofen ausgehärtet. Daraufaufgehend sind die Petrischalen mit den Klebstoffen in Versuchskammern eingebracht worden, die die Ausgasung innerhalb der Kammer aufzeichnet. In der Folge kann der Graph mit der Blindwertmessung der Versuchskammer verglichen werden, um die Menge und Art der Ausgasung zu bestimmen (Abbildung 17).

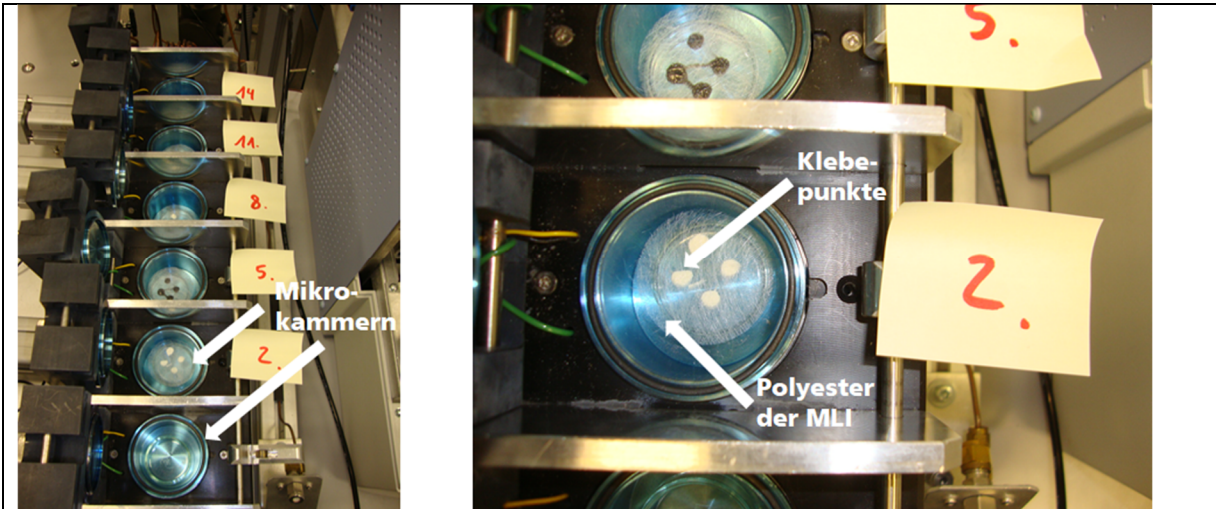
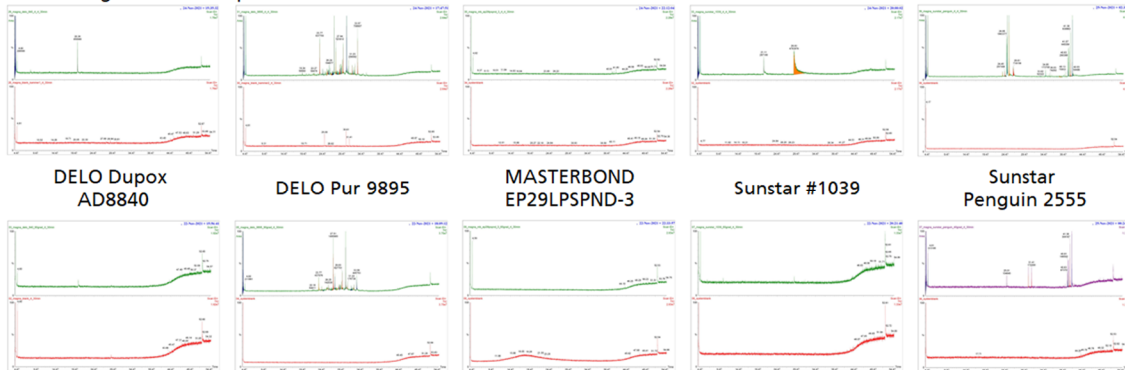


Abbildung 17: Laborbild Versuchsaufbau Klebstoffe

- Es zeigte sich, dass alle Klebstoffe ein sehr geringes Ausgasungsverhalten aufweisen. Herausstechend waren die Klebstoffe DELO DUPOX AD8840 und der MASTERBOND EP29LPSPND-3, die beide jeweils nach der Initialmessung sowohl für Aushärtung bei Raumtemperatur und im Ofen so gut wie keine messbare Ausgasung aufwiesen. Auffällig ist auch der Sunstar #1039, der nach Aushärtung im Ofen kaum Ausgasung aufwies. Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse der Ausgasungsuntersuchungen.

Aushärtung bei Raumtemperatur



Aushärtung im Ofen

Abbildung 18: Ergebnisse Ausgasung Klebstoffe

- Die Ausgasungsmessungen nach 14 Tagen stützten die beschriebenen Resultate und es traten keine Veränderung im Ausgasungsverhalten nach 14 Tagen gegenüber der Initialausgasung auf (siehe Abbildung 19).

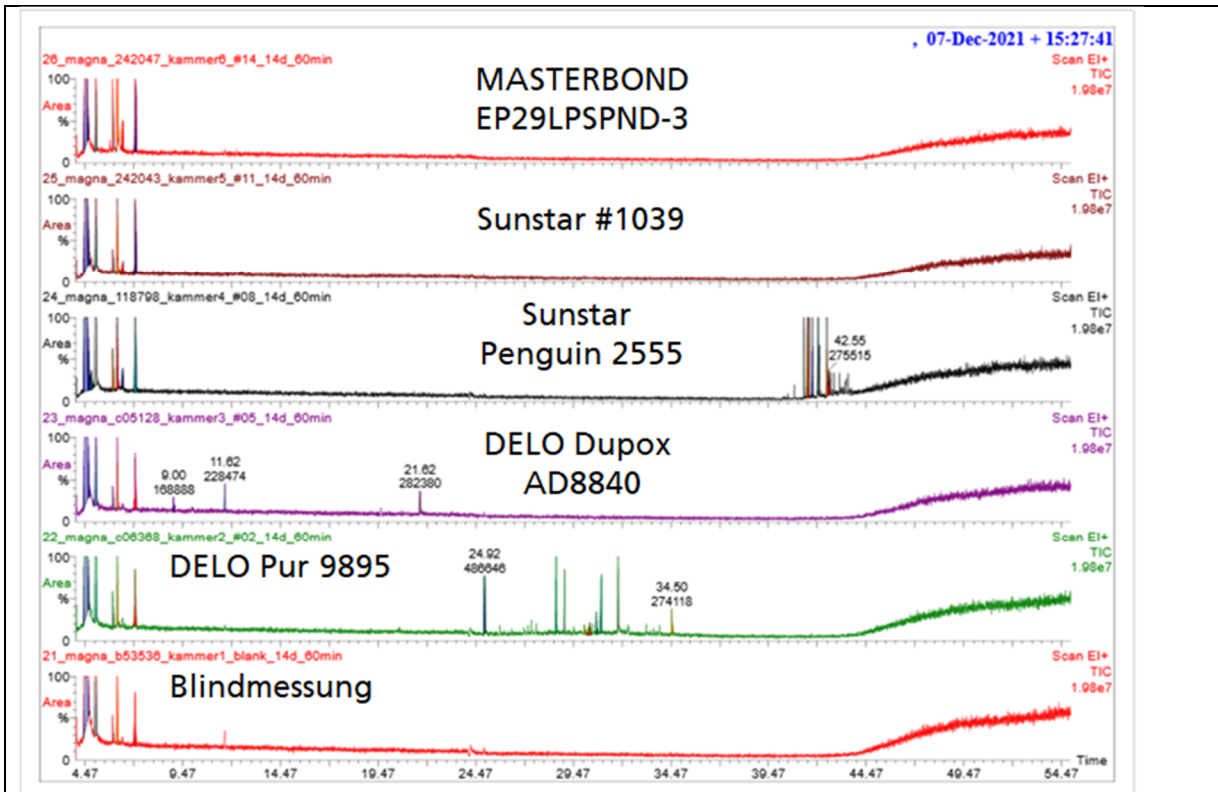


Abbildung 19: Ausgasungsmessung der Klebstoffe nach 14 Tagen

Fixierung der Isolationsfolie

- Da die MLI-Folie in bis zu 40 Schichten um den Innentank gewickelt werden soll und der Zwischenraum zwischen Innen- und Außentank minimiert werden soll, um den zu vakuumierenden Bereich zu verringern, war es notwendig, den Zwischenraum zwischen den einzelnen Folienlagen zu begrenzen. Zudem war es notwendig, einzelne Abschnitte der Folie möglichst prozessfreundlich zu verbinden. In der Vergangenheit wurden die einzelnen Abschnitte häufig vernäht, was prozesstechnisch für eine Serienfertigung ungeeignet ist. Zur Lösung dieser Problematik wurde untersucht, inwiefern sich die Schichten mithilfe von aus der Textilindustrie (u.a. Socken) bekannten Tags zusammengehalten werden können (vgl. Abbildung 20).
- Es wurde nachgewiesen, dass das Verfahren geeignet ist, jedoch darauf zu achten ist, welches Material für die Tags verwendet wird, da der handelsübliche Kunststoff eine neue Ausgasungsquelle im Vakuumbereich bedeuten würde. Als geeignetes Material wurde PEEK identifiziert.
- PEEK eignet sich dahingehend, da es die NASA-Anforderung an Ausgasung erfüllt und Vakuumgeeignet ist. Es weist eine hohe Festigkeit und Beständigkeit gegen Verschleiß auf, was als Fügeelement von Vorteil ist. Zudem besitzt PEEK eine geringe Wärmeleitfähigkeit, wirkt somit isolierend und verhindert damit Wärmebrücken durch die thermisch isolierende MLI.



Abbildung 20: Tagging Gun und schematische Funktionsweise ©rechtes Bild: Hatakenaka et al.

- Als Alternative zur Fixierung der Isolationsfolie wurde zusätzlich zwei Spezialklebebänder der Firma RUAG (COOLCAT 1050 und COOLCAT B-R50) betrachtet. (Abbildung 21). Insbesondere das COOLCAT B-R50 ist hierbei für den Einsatzzweck der Verbindung von Isolationsfolien ausgelegt und bietet selbst eine zusätzliche Isolationswirkung für eventuelle Nahtstellen. Die Untersuchung hat ergeben, dass das oberflächliche Verkleben von Nahtstellen eine weitere Möglichkeit der Fixierung darstellt, die Anbringung jedoch für eine Großserienfertigung eher ungeeignet ist, da einerseits viel Klebeband benötigt würde, es aktuell keinen automatisierten Prozess zur Anbringung gibt und eine zusätzliche Ausgasungsquelle im Vakuumbereich hinzugefügt würde.



Abbildung 21: Geringausgasendes Klebeband COOLCAT B-R50 ©RUAG Space GmbH

AP 4.2 Technische Sauberkeit von sensitiven Komponenten

- Für die als sauberkeitskritisch ermittelten Komponenten und Zusammenbauten wurden unter Berücksichtigung relevanter Normen und unter Beachtung der maximal erreichbaren Sauberkeit in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien und Werkstoffen sauberkeitsrelevante Optimierungsmaßnahmen definiert.

- Die Optimierungsmaßnahmen wurden aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen APs und auf Basis einer branchenübergreifenden Recherche abgeleitet. Diese beziehen sich vor allem auf die Verminderung von Verunreinigungen bzw. die prozesssichere Entfernung dieser mithilfe geeigneter Reinigungsmethoden und unter Berücksichtigung der geeigneten Reinigungszeitpunkte und -orte.
- Hinsichtlich der Reinigungsprozesse wurden zunächst die benötigten Zeitpunkte für eine Reinigung definiert. Hierzu wurden die Montageprozesse einerseits auf die Entstehung von Verunreinigungen und andererseits hinsichtlich der Zugänglichkeit der verbauten Komponenten untersucht. Des Weiteren wurde berücksichtigt, ob durch nachfolgende Zusammenbauschnitte Anforderungen hinsichtlich des benötigten Sauberkeitszustands gestellt werden. Für die einzelnen Zusammenbauschnitte wurde dann jeweils festgelegt, in welchem Sauberkeitszustand die Einzelteile bereitgestellt werden müssen, sowie nach welchen Zusammenbauschnitten eine Zwischenreinigung notwendig ist.
- Für die Reinigung der Einzelteile und Zukaufteile wurden die unterschiedlichen Reinigungsmethoden nach DIN 8592 unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile auf ihre Eignung hin überprüft. Des Weiteren erfolgte eine Festlegung des Reinigungsortes (Eigenreinigung bzw. Reinigung beim Lieferanten), dies beeinflusst wiederum das Verpackungskonzept. Die Zukaufteile, Einzelteile und Zusammenbauten wurden anhand der vorliegenden Anforderungen und unter Berücksichtigung ihrer Geometrien gruppiert. Für die einzelnen Gruppen wurden folgende Verfahren als geeignet ermittelt, um den benötigten Sauberkeitszustand zu erzielen:

Gruppierung	Definition	Reinigungsfragestellung / Anforderungen	Reinigungsverfahren	Reinigungsort
Rohre	-	Außenbereich: Vakuumbereich; Innenbereich: wasserstoffführend	Außen: Wischreinigung; Innen: Spülen (Druckwechselreinigung auch möglich)	Lieferant (Einsatz von Hülsen und ggf. Beutel für Versand)
Schüttgüter	Unempfindliche Bauteile mit einfacher Geometrie, die als Schüttgüter gereinigt werden können	Material (Aluminium, Edelstahl, Kunststoff) gut zu reinigen und lösemittelbeständig	Einzelnes US-Becken bzw. Mehrbeckentauchanlage mit US	Eigenreinigung (Verpackungskonzept nicht sauberkeitskritisch)
Großteil	Große, schwere, schwierig zu handhabende Bauteile. Werden als Einzelteil gereinigt.	Einfache Geometrie aber Größe und Gewicht kritisch; ggf. gleiche Reinigung wie Zusammenbauten; Vakuumbereich und teilweise Wasserstoffbereich	Tauchbeckenanlage (wässrig) mit US und Trocknungskammern	Eigenreinigung (Verpackungskonzept nicht sauberkeitskritisch)
Setzgutteil	Einfach zu reinigende Bauteile, die aufgrund ihrer Geometrie nicht als Schüttgüter gereinigt werden können	Orientierung zu berücksichtigen; Können im gleichen US-Becken, wie Schüttgüter gereinigt werden	Reinigung und Trocknung entsprechend Schüttgüter	Eigenreinigung direkt vor Montage (Verpackungskonzept nicht sauberkeitskritisch)

Abbildung 22: Übersicht Materialgruppen, Reinigungsanforderungen und -verfahren

- Hinsichtlich der aus Sauberkeitssicht notwendigen Umgebung wurden die Sauberkeitsstufen nach VDA 19.2 auf ihre Eignung hin überprüft. Hierbei wurde berücksichtigt, dass mit der Festlegung der Sauberkeitsstufe weitere Empfehlungen für die Bereiche Logistik, Verpackung und Personal verbunden sind. Die Sauberkeitsstufen "SaS 0: Konventionelle Fertigung", "SaS 1: Sauberzone SaS", "SaS 2: Sauberraum" und "SaS 3 Reinraum" unterscheiden sich in Bezug auf der Bereichstrennung, den Materialtransfers, den Personenverkehr und der Reinlufttechnik. Montageprozesse, die ein hohes Verunreinigungspotential mit sich bringen, wie z.B. Schweiß- oder Lötprozesse, sollten in einem von den anderen Montageprozessen abgetrennten bzw. eingehausten Bereich (SaS 0 oder SaS 1 ausreichend) mit anschließender Zwischenreinigung durchgeführt werden. Die Montage von sauberkeitssensiblen Komponenten innerhalb von Montageprozessen mit geringem Verunreinigungspotential sollten in einem Sauberraum erfolgen, um Querkontaminationen zu vermeiden.

AP 4.3 Definition alternativer oder optimierter Fertigungskonzepte

- Aufbauend auf den Ergebnissen der Arbeitspakete 4.1 und 4.2 wurde die Eignung der identifizierten und untersuchten Technologien und Materialien im Hinblick auf die Serienfertigung diskutiert. In Abstimmung mit dem assoziierten Partner wurden mögliche Einsatzbereiche abgesteckt.
- Es wurden anschließend alternative Technologien für einzelne Fertigungs- und Montageabschnitte identifiziert und bewertet. So wurden beispielsweise Niet-Verbindungen zur Fixierung von Sensorik betrachtet. Diese wurden als grundsätzlich technologisch geeignet und ausreichend stabil identifiziert.
- Aufgrund der engen normativen Vorgaben für wasserstoffführende Baugruppen sind die meisten technologischen Substitute jedoch für die Fertigung von Flüssigwasserstofftanks nicht zugelassen, weshalb diese anschließend verworfen wurden. Ins Besondere im Bereich der Schweißverfahren, die den größten Teil der Fertigungsschritte betreffen und für wasserstoffführende Komponenten häufig vorgeschrieben sind, erlauben die normativen Grundlagen zudem grundsätzlich lediglich den Einsatz von Wolfram-Inert-Gas- und Metall-Aktiv-Gas-Verfahren, weshalb alternative Fertigungskonzepte in diesen Bereichen von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen wurden.
- Bezüglich der Reinheit wurden Reinigungsverfahren identifiziert und anschließend mit den aktuell in der Prototypenfertigung eingesetzten Methoden verglichen. Es zeigte sich, dass die Methoden der aktuellen Fertigung die von den Herstellern für eine Serienfertigung geforderten Grenzwerte nicht erfüllen konnten und somit in ihrer aktuellen Umsetzung für eine Serienfertigung ungeeignet sind.
- Anschließend wurden mögliche Optimierungen der verwendeten Reinigungsverfahren diskutiert und Automatisierungsmöglichkeiten der manuellen Reinigungsschritte bewertet.

- Aufbauend auf den untersuchten Fertigungstechnologien und Reinigungsverfahren wurde eine aktualisierte Prozessübersicht erstellt, welche die jeweiligen Verfahren und deren Alternativen in den Produktionsablauf einordnen und es wurden geeignete Reinigungspunkte im Prozessablauf abgeleitet.
- Zusammenfassend wurde eine Gesamtübersicht über alle in Frage kommenden Fertigungs- und Reinigungsverfahren erstellt, die dann im Rahmen des Arbeitspaket 5 bewertet wurden.

Wichtige Meilensteine (Projektergebnisse)

- MS 4.1: Technologierecherche wurde abgeschlossen.
- MS 4.2: Maßnahmen zur Sicherstellung der Technischen Sauberkeit wurden definiert.
- MS 4.3: Fertigungskonzepte und Maßnahmen wurden definiert.

Sonstiges: Es wird an der Veröffentlichung der untersuchten Fertigungstechnologien gearbeitet. Besonders die Ergebnisse der Schweißversuche und die noch zu erarbeitenden Ausgasungsmengen der Klebstoffe sind hierbei wissenschaftlich relevant, da hierzu bisher keine Referenzwerke vorhanden sind. Die Veröffentlichung der Ergebnisse der Schweißversuche erfolgt voraussichtlich in der Fachzeitschrift „Cleanroom and Processes“.

Arbeitspaket 5: Evaluation und Bewertung

Kurzbeschreibung des Arbeitspakets:

Ziel des Arbeitspaketes war die Entwicklung eines Bewertungsmodells, welches es ermöglicht sowohl Maßnahmen zur Herstellung von technischer Sauberkeit als auch Fertigungstechnologien hinsichtlich ihrer Kosten und ihres Nutzens zu bewerten. Dabei wurden Abhängigkeiten berücksichtigt und die jeweiligen Technologiealternativen mit ihren spezifischen notwendigen Maßnahmen zum Erhalt der Technischen Sauberkeit in eine Bewertungsmatrix aufgenommen.

Arbeitspaket 5: Evaluation und Bewertung

Im ersten Schritt erfolgte die qualitative Bewertung der Fertigungs- und Reinigungstechnologien bezüglich ihrer Eignung für die Prototypenfertigung, Kleinserie, Großserie und Massenfertigung anhand von technischen und wirtschaftlichen Kriterien.

Bei den untersuchten Fertigungstechnologien wurde festgestellt, dass die untersuchten WIG- und MAG-Schweißtechnologien grundsätzlich geeignet sind, aufgrund der geringeren Ausprägung von Anlaufarben jedoch WIG-Verfahren vorzuziehen sind. Der jeweilige Automatisierungsgrad kann hierbei an das Produktionsvolumen angepasst werden. Für die Rohrverbindungen wurden WIG-Orbitalschweißzangen in Kombination mit angepassten Formiervorrichtungen ausgewählt. Diese können sowohl von der Prototypenfertigung bis zur Serienfertigung effizient eingesetzt werden. Bei der Untersuchung der Schweißprozesse in Arbeitspaket 4 wurde nachgewiesen, dass WIG-Schweißen

auch im Hinblick auf die partikuläre Schmutzentwicklung sehr gute Ergebnisse liefert. Für die Befestigung von Sensorik im Innentank wurden Schraub- bzw. Schweißverbindungen ausgewählt. Die betrachteten Nietverbindungen wurden für die Serienfertigung als vielversprechend eingestuft, sind derzeit aber aufgrund der zu beachtenden Normen nicht zulässig. Für die Befestigung der MLI-Folie wurden sowohl Klebe-, Näh- als auch Pin-Verbindungen als geeignet klassifiziert, wobei Nähverbindungen aufgrund des manuellen Aufwands ausschließlich für den Prototypenbau geeignet sind. Für die Serienfertigung wurde die Verbindung mittels PEEK-Pins als am besten geeignet bewertet, da dies unter Automatisierungssicht am Effizientesten und Prozessstabilsten umsetzbar ist und zusätzlich die Pins die Vakuumstabilität nicht gefährden.

In Bezug auf die ausgewählten Reinigungstechnologien zeigte sich im Rahmen der Bewertung, dass alle betrachteten Verfahren aus technischer Sicht geeignet sind. Demgegenüber sind Reinigungstechnologien, deren Umsetzung mit einem großen Investitionsvolumen aufgrund von aufwendigen Reinigungsanlagen verbunden sind, erst ab der Großserie wirtschaftlich einsetzbar. Reinigungstechnologien, die sich nicht oder nur geringfügig automatisieren lassen, sind mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden und somit nicht oder nur mit Einschränkungen für die Großserie und Massenfertigung geeignet. Abbildung 23 zeigt die Übersicht über die Eignung der Reinigungsverfahren für den jeweiligen Produktionstypen.

	Geeignet für Prototypenfertigung (wirtschaftlich und technisch)	Geeignet für Kleinserie (wirtschaftlich und technisch)	Geeignet für Großserie (wirtschaftlich und technisch)	Geeignet für Massenfertigung (wirtschaftlich und technisch)
Spritzreinigung	Ja	Ja	Mit Einschränkungen	Mit Einschränkungen
Injektionsflutwaschen	Nein	Nein	Ja	Ja
Ultraschallreinigung	Ja	Ja	Ja	Ja
Tauchbeckenanlage mit US	Nein	Nein	Ja	Ja
Druckwechselreinigung	Nein	Nein	Ja	Ja
CO2-Schnee-Strahlen	Ja	Ja	Ja	Ja
Spülen	Ja	Ja	Mit Einschränkungen	Mit Einschränkungen
Wischreinigung	Ja	Ja	Mit Einschränkungen	Nein

Abbildung 23: Qualitative Bewertung der Reinigungstechnologien

Aufbauend auf der Qualitativen Bewertung der Technologien und Reinigungsverfahren wurde anschließend eine Bewertung der geeigneten Fertigungs- und Reinigungstechnologien mithilfe einer Nutzwertanalyse vorgenommen. Abbildung 24 zeigt exemplarisch die Gewichtung der einzelnen Leistungsanforderungen für den Bereich der Reinigungstechnologien.

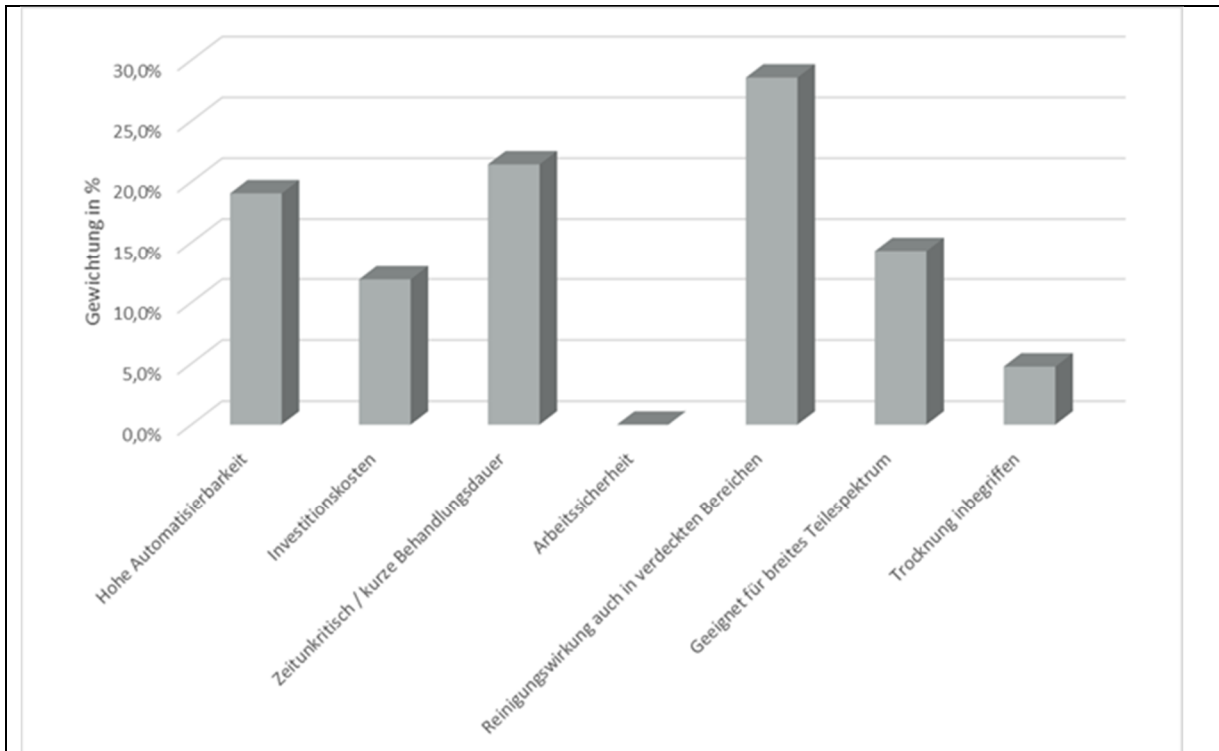


Abbildung 24: Bewertung der Reinigungstechnologien mithilfe der Nutzwertanalyse (Festlegung der Gewichtungsfaktoren)

Die Bewertung ergab, dass vor allem die Reinigung mithilfe einer Mehrbeckentauchanlage und Ultraschall für die Großserie und Massenfertigung geeignet ist. Der Ansatz überzeugte vor allem aufgrund der hohen Automatisierbarkeit, der Parallelisierbarkeit von Reinigungsschritten (zeitunkritisches Verfahren), der guten Reinigungswirkung in verdeckten Bereichen aufgrund des Ultraschalls, der inbegriffenen Trocknung und der Eignung für zahlreiche Bauteile je nach Korbeinsatz. Da sich dieses Verfahren aber nicht für Rohre und sehr große Komponenten eignet, sind bei Bedarf zusätzlich Spritzreinigungs- und Spülreinigungsverfahren vorzusehen.

Auf Basis der durchgeführten Bewertung von Fertigungs- und Reinigungstechnologien und Umsetzungsalternativen wurde anschließend ein aktualisierter Prozessablauf erstellt, der die Grundlage für die Fertigungsplanung bildet. Insbesondere wurden geeignete Reinigungstechnologien und -zeitpunkte im Ablaufdiagramm erfasst bzw. definiert. Auf Basis dessen konnten Fertigungssysteme für den Anlauf einer Kleinserienfertigung und die Umsetzung einer Großserienfertigung abgeleitet werden.

Zusammenfassung der wichtigsten Projektergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten der Fertigungsprozess und die damit zusammenhängenden Fertigungs- und Reinigungstechnologien praxisnah untersucht werden. Insbesondere wurden kritische Prozessschritte erfasst und untersucht. Im Laufe des Projektes wurden verschiedene Wissenslücken identifiziert und untersucht, so zum Beispiel die konkreten zu erwartenden Verunreinigung durch Schweißprozesse. In Kombination mit der Untersuchung der initialen Verschmutzung von realer Komponenten konnten somit wichtige Erkenntnisse bezüglich der Reinheitsanforderung von Produktionsumgebungen von Wasserstofftanks abgeleitet werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf die Produktionen weiterer Komponenten des Wasserstoffkreislaufs übertragen und leisten somit über den definierten Projektumfang hinaus wichtige Grundlagenarbeit für die Industrialisierung des Baus weiterer Komponenten des Wasserstoffkreislaufs. Es wurden Reinigungstechnologien und Anlagenkonzepte betrachtet, ausgewählt und getestet, die für die Serienproduktion wasserstoffberührender Komponenten und Teile geeignet sind. Da die Reinigungstechnologien im Kontext Wasserstoff einerseits kritisch sind und andererseits bisher nur rudimentär untersucht wurden, leistete das Projekt hier wichtige Pionierarbeit. Während in den aktuell vorherrschenden Produktionsumgebungen eher kleine Stückzahlen mit großem manuellem Aufwand gefertigt wurden, gewinnt das Thema der Serienproduktion von H₂-Komponenten zunehmend an Bedeutung. Das Projekt lieferte hierbei wichtige Erkenntnisse, wie sich diese Komponenten im industriellen Maßstab herstellen lassen und in welchem Umfang Reinigungsverfahren zu berücksichtigen sind.

Darüber hinaus konnten besonders neue Erkenntnisse bezüglich des Ausgasungsverhaltens minimalausgasender Klebstoffe gewonnen werden. Diese Erkenntnisse sind neben dem hier untersuchten Anwendungsfall besonders auch für den Aerospace-Bereich relevant. Beispielsweise werden beim Satellitenbau zunehmend minimalausgasende Klebstoffe benötigt und verwendet, die aktuellen Richtwerte sind allerdings nicht fein genug, um die Qualität aktueller Klebstoffe bewerten zu können, weshalb die neutrale Untersuchung der Klebstoffe wichtige Hinweise für diesen Bereich liefert.

Anschließend wird die Verwertung der beschriebenen Ergebnisse dargestellt.

Verwertung der Ergebnisse

Die Verwertung der im Rahmen des Forschungsprojektes erarbeiteten wissenschaftlichen Erkenntnisse erfolgt primär über die Veröffentlichung der Ergebnisse. Hierzu entstehen aktuell Veröffentlichungen zu den Bereichen Schweißversuche und Klebeversuche. Es ist geplant, diese im Rahmen von wissenschaftlichen Konferenzen der INTERNATIONAL ACADEMY FOR PRODUCTION ENGINEERING (CIRP) zu präsentieren und im Anschluss als Open Access Dokumente zu veröffentlichen. Darüber hinaus fließen die Erkenntnisse ins Besondere auch im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung als Leitprojekt geförderten Projektes H₂-Giga ein.

Um einen möglichst erfolgreichen und effektiven Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft zu erreichen, werden verschiedene Formate kombiniert. Aktuell entsteht eine Veröffentlichung der Ergebnisse der Schweißversuche für die Fachzeitschrift „Cleanroom and Processes“, die sich inhaltlich an Fach- und Führungskräfte aus der Industrie richtet. Darüber hinaus ist beabsichtigt, die Forschungsergebnisse in der monatlich stattfindenden Webinar-Reihe Webinar „keep the pace“ vorzustellen. Die kostenlos angebotenen Webinare erreichen regelmäßig über 100 Teilnehmer aus der Industrie. Dazu werden die Ergebnisse im Rahmen des Abschlussberichts auf der Projekt-Homepage „<https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/CleanPro4HS.html>“ veröffentlicht. Ergebnisse, die nicht im Rahmen der wissenschaftlichen Veröffentlichungen behandelt werden, werden zudem über die zentrale Sammelstelle für Forschungsberichte bei der Technischen Informationsbibliothek Hannover veröffentlicht.

Aktuell werden zudem im Rahmen von Kooperationsprojekten zur Herstellung von Elektrolyseuren die Ergebnisse Herstellern aus der Industrie zur Verfügung gestellt.