

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

smart BOND

Abschlussbericht

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

PROJEKTNAME: **smartBOND**
**Fügen von innovativen Materialien in der schiffbaulichen
Fertigung mittels automatisiertem Klebprozess**

TEILVORHABEN: **smartBOND A – Erprobung, Demonstration und Validierung der
Tauglichkeit des smartBOND-Robotersystems**

DOKUMENTNAME: Abschlussbericht
FÖRDERKENNZEICHEN: 03SX566A
LAUFZEIT: 01.07.2022 - 30.06.2025

AUTOREN: Marvin Drößer, Matthias Kammler
DATUM: 15.12.2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Meyer Werft GmbH.

MEYER WERFT GMBH
FORSCHUNG & ENTWICKLUNG
INDUSTRIEGEBIET SÜD
26871 PAPENBURG
DEUTSCHLAND

WWW.MEYERWERFT.DE
TELEFON: +49 (0) 4961 810

© COPYRIGHT 2025, MEYER WERFT GMBH

15.12.2025

INHALTSVERZEICHNIS

I	KURZDARSTELLUNG	3
	I.1 Aufgabenstellung	3
	I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
	I.3 Planung und Ablauf	6
	I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	7
	I.4.1 Sicherheitsbestimmungen im SOLAS-Schiffbau	7
	I.4.2 Kleben im Schiffbau	7
	I.4.3 Automatisierte Klebprozesse im Schiffbau	8
	I.4.4 Recycling	8
	I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
II	EINGEHENDE DARSTELLUNG	10
	II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	10
	II.1.1 AK1 – Anforderungen, Lastenheft	10
	II.1.2 AK2 – Anlagentechnik, Automatisierung	16
	II.1.3 AK3 – Bedienkonzept, Sensorik & Steuerung	18
	II.1.4 AK4 – QM-Anbindung, smartness	21
	II.1.5 AK5 – Prozessqualifizierung	23
	II.1.6 AK6 – Demonstrator-Anlagen	29
	II.1.7 AK7 – Gesamtbewertung und Zulassung	38
	II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	43
	II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	43
	II.4 Verwendbarkeit der Ergebnisse	43
	II.5 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	43
	II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	43
III	ERFOLGSKONTROLLBERICHT	44
	III.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen	44
	III.2 Ergebnisse des Vorhabens	44
	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	44
	Gesammelte wesentliche Erfahrungen	45
	III.3 Verwertungsplan	46
	3.1 Erfindungen/ Schutzrechtsanmeldungen	46
	3.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	46
	3.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	47
	3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	47
	3.5 Präsentationsmöglichkeiten für Nutzer-/ und Anwenderkonferenzen	47
	3.6 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung	47
	VERZEICHNISSE UND ANHANG	48

I KURZDARSTELLUNG

I.1 AUFGABENSTELLUNG

Die Aufgabe des im Zuge des Forschungsvorhabens smartBOND auf der MEYER WERFT bearbeiteten Arbeitskomplexes 6 (AK6, Abbildung 1) bestand in der Erprobung, Demonstration und Validierung der Einsatzbarkeit des im Rahmen des Gesamtvorhabens entwickelten Robotersystems unter Werftbedingungen. Hierzu zählte insbesondere die fachliche Begleitung der Technologieentwicklung und -integration bis zum TRL 5 (Technology Readiness Level) sowie Zuarbeit zu anderen Arbeitskomplexen und damit einhergehend die Erbringung des praktischen Nachweises der technischen Einsatzbarkeit einer automatisierten Oberflächenvorbereitung und des Klebstoffauftrages am Beispiel ausgewählter, werftspezifischer Anwendungen.

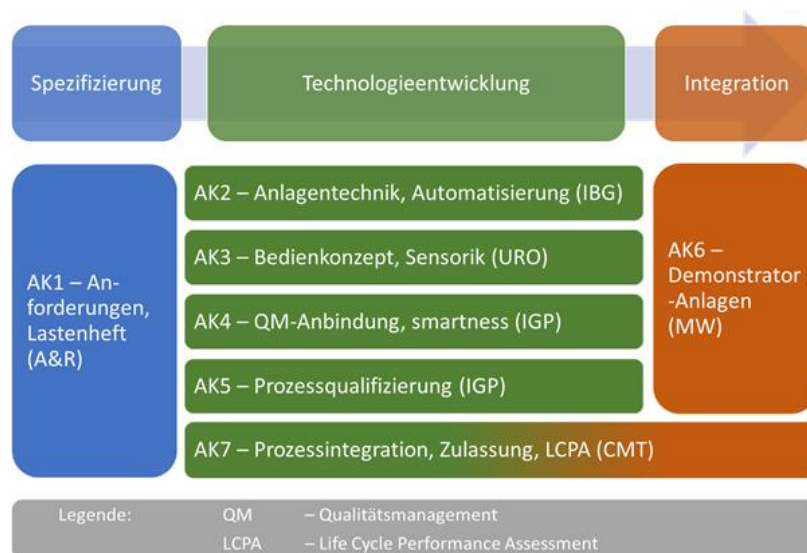


Abbildung 1: Projektphasen und Struktur der bearbeiteten Aufgaben bzw. Arbeitskomplexe (Quelle: smartBOND)

Etablierte Klebanwendungen im Schiffbau, wie z.B. das Kleben von Glasscheiben und Windschirmen sowie die Lagesicherung von Kabinen in Nähe von LNG-Tanks werden üblicherweise manuell ausgeführt. Diese Prozesse sind von der Planung über die Vorbereitung, die Ausführung bis hin zur Dokumentation personal- und zeitaufwändig und somit potenziell fehleranfällig. Das für die geplante Einführung strukturbaulicher Multimaterial-Konzepte im Schiffbau der MEYER WERFT erforderliche Vertrauen in die Klebtechnik seitens der Reedereien und Klassifikationsgesellschaften ist mit solchermaßen gestalteten Prozessen nur schwer erreichbar. Aus diesem Grund werden werfttaugliche Fertigungstechnologien mit einem der Automobilindustrie vergleichbaren Automatisierungsgrad mit einhergehender, rechnergestützter Prozessüberwachung und -dokumentation benötigt.

In AK6 wurden Demonstrationsumgebungen entwickelt und bereitgestellt, die durch werft- und schiffsspezifische Randbedingungen in Form vorhandener Umgebungsbedingungen, wie z.B.

- wechselnde Temperaturen,
- variable Luftfeuchtigkeiten,
- stahlbaulich geprägte Arbeitsumfelder mit Stäuben, Spänen und Verschmutzungen

sowie für den Schiffbau charakteristischen, konstruktionsbedingten räumlichen Gegebenheiten, wie beispielsweise Spantabstände, Freigängigkeiten oder Störkanten geprägt sind. In diesen Testumgebungen wurden vorab auch Tests mit Teilsystemen durchgeführt, die im Nachgang des Forschungsvorhabens in schlanke Mechanisierungslösungen überführt werden können. Besonderer Wert wurde auf einen kontinuierlichen Abgleich der Arbeitsfortschritte in AK6 und den Arbeiten in den anderen AK gelegt (Abbildung 1). Die in AK1 erarbeiteten funktionalen Anforderungen bildeten wichtige Grundlagen für die Demonstratorentwicklung. Für die Subsystementwicklung in AK2 bis AK5 stellte die Entwicklung der Demonstrationsumgebung im Gegenzug wichtige, ergänzende Informationen zur Verfügung. Zudem wurden viele Anforderungen der Demonstrationsumgebung für die Experten der verschiedenen, beteiligten Disziplinen deutlich greifbarer und die damit gewonnenen Untersuchungsergebnisse lieferten grundlegende Informationen für die Prozesssimulation in AK7.

Die Hauptziele der durchgeführten Arbeiten lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Emissionen im Schiffsbetrieb durch Leichtbau reduzieren
- Optimierung der Life Cycle Performance der Produkte
- Einsatz von innovativen Multimaterial-Designkonzepten
- Steigerung des Automatisierungsgrads von Klebungen im schiffbaulichen Umfeld
→ neue Anwendungen
- Klebtechnik etablieren durch Qualitätssteigerung, höhere Produktivität, sowie die Garantie gesunder und attraktiver Arbeitsbedingungen (Befähigung der Mitarbeitenden)

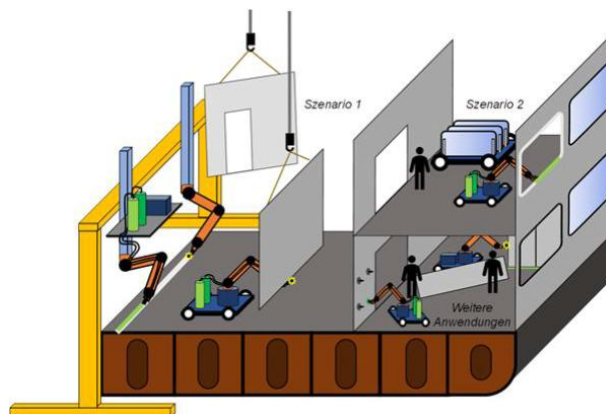


Abbildung 2: Einsatzszenarien für teilautomatisierte Klebprozesse (Quelle: smartBOND)

I.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

Die MEYER WERFT in Papenburg gehört zu den größten und modernsten Werften der Welt. In ihren Produktions- und Baudockhallen entstehen Kreuzfahrtschiffe für international renommierte Reedereien, wie beispielsweise

- Carnival Cruise Lines (CCL)
- Disney Cruise Lines (DCL),
- Nippon Yusen Kabushiki Kaisha (NYK Cruises)
- Norwegian Cruise Line (NCL) oder
- Royal Caribbean (RCI).

So wurden in den letzten 40 Jahren bereits mehr als 50 luxuriös ausgestattete Kreuzfahrter mit den verschiedensten Attraktionen gebaut. Neben verschiedenen Cafés, Bars, Discotheken, Themen-Restaurants oder Theatern gehören mittlerweile auch Basketball- bzw. Tennisplätze, Wasserrutschen sowie Kart- und Achterbahnen zu den Unterhaltungsangeboten. Hieraus ist ersichtlich, dass Kreuzfahrtreedereien unablässig bemüht sind, ihre Angebote möglichst breit zu fächern, um den verschiedensten Wünschen der Gäste entgegenzukommen. Um wiederum den hohen Ansprüchen ihrer Kunden - den Reedereien - gerecht zu werden, bildet die MEYER Gruppe inzwischen ein in ganz Norddeutschland tätiges Unternehmen mit zwei Werften in Papenburg und Rostock, sowie weiteren Unternehmen. Insgesamt arbeiten rund 3.500 Mitarbeiter direkt für die Werft in Papenburg. Gemeinsam mit diesem hochqualifizierten Netzwerk werden Kreuzfahrtschiffe, Flusskreuzfahrtschiffe, Behörden-, Forschungs- und Marineschiffe sowie Fähren für Kunden aus aller Welt gebaut, die jeweils speziell für die jeweiligen Märkte und Zielgruppen zugeschnitten sind.

Durch die über Jahrzehnte oftmals federführende Beteiligung an zahlreichen Forschungsvorhaben der Industriellen Gemeinschaftsforschung verfügt die MEYER WERFT über ein breites, interdisziplinäres Know-how und ist stets an der Entwicklung neuer, zukunftsweisender Technologie beteiligt. Daher sind die Schiffe der MEYER WERFT für ihren Innovationsgrad und ihre Qualität bekannt. So konnte beispielsweise 2017 das weltweit erste LNG betriebene Kreuzfahrtschiff von der MEYER WERFT abgeliefert werden. In Forschungsvorhaben werden zukünftige, alternative Energiequellen hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten untersucht und die dafür an Bord erforderlichen Technologien entwickelt.

Für das Projekt smartBOND waren insbesondere das Labor der Forschung- & Entwicklungsabteilung der MEYER WERFT sowie das Werkstoffprüflabor von großer Bedeutung. Dort standen die Räumlichkeiten und Grundausrüstung für die durchgeführten Versuche, Probenanfertigungen, Materialprüfungen und den Demonstratorbau zur Verfügung. Das speziell für Forschungsvorhaben geschulte und über viele Jahre erfahrene Laborpersonal leistete mit den Ingenieuren der verschiedenen Fachrichtungen bereits in vielen verschiedenen Forschungsprojekten der MEYER WERFT wertvolle, richtungsweisende Arbeiten. Entsprechend ihrer verschiedenen Arbeitsschwerpunkte (Abbildung 1) setzte sich das Konsortium des Forschungsvorhabens smartBOND aus den folgenden Unternehmen und universitären Partnern zusammen:

- MEYER WERFT GmbH (MW)
- Abeking & Rasmussen Schiffs- und Yachtwerft SE (A&R)
- IBG Automation GmbH (IBG)
- Universität Rostock Lehrstuhl Fertigungstechnik (URO)
- Center of Maritime Technologies gGmbH (CMT)
- Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP (IGP)

I.3 PLANUNG UND ABLAUF

Das Forschungsprojekt smartBOND wurde in sieben teils parallel und teils nacheinander ablaufende Arbeitskomplexe (AK) unterteilt. Im ersten, grundlegenden AK wurde in enger Zusammenarbeit der beteiligten Werften eine detaillierte Basis für die nachfolgenden Arbeiten geschaffen. Hier wurden klebtechnische, werftspezifische und schiffbauliche Randbedingungen und Anforderungen an die einzelnen Prozessschritte in Form eines Lastenheftes definiert.

Im zweiten AK erfolgte die Entwicklung der Anlagentechnik und der zugehörigen Automatisierungslösungen. Im dritten AK wurde das Bedienkonzept sowie die Sensorik und Steuerung erarbeitet. Die Anbindung an Qualitätsmanagementsysteme mit der damit einhergehenden Smartness wurde in AK 4 untersucht. Die Qualifizierung des Klebprozesses fand in AK 5 statt. Im sechsten AK wurde der Demonstrator gebaut und die Robotersysteme in einer Werftumgebung in Betrieb genommen sowie deren Funktionsfähigkeit validiert. Die finale Gesamtbewertung der erarbeiteten Anlagentechnik und Prozesse fand in AK7 statt. In diesem Zuge erfolgte auch die Herstellung von Probekörpern, welche nach erfolgter mechanischer Prüfung zur Zulassung des teilautomatisierten Klebens unter werfttypischen Randbedingungen durch die Klassifikationsgesellschaft DNV beitragen.

Die MEYER WERFT leitete den sechsten Arbeitskomplex und war somit maßgeblich an der Entwicklung der Demonstratoranlage beteiligt. Weiterhin war die MEYER WERFT in allen anderen Arbeitskomplexen jeweils in mindestens einem Unterarbeitspaket eingebunden. So wurden entweder Zuarbeiten geleistet, indem die speziellen schiffbaulichen Gegebenheiten in die Arbeitskomplexe einfließen konnten und den Konsortialpartnern erklärt wurden. Oder die MEYER WERFT leistete Hauptarbeiten in Unterarbeitspaketen und leitete diese in Zusammenarbeit mit dem Arbeitskomplexverantwortlichen.

Tabelle 1: Liste der Arbeitspakete mit Anteilen der MEYER WERFT

Arbeitskomplex	Titel
1	Anforderungen, Lastenheft
2	Anlagentechnik, Automatisierung
3	Bedienkonzept, Sensorik & Steuerung
4	QM-Anbindung, Smartness
5	Prozessqualifizierung
6	Demonstratoranlagen
7	Gesamtbewertung und Zulassung

I.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND

I.4.1 SICHERHEITSBESTIMMUNGEN IM SOLAS-SCHIFFBAU

Der Einsatz von Klebverbindungen im Allgemeinen und vor allem strukturelle Klebungen finden im aktuellen Stahlschiffbau lediglich vereinzelte Anwendungen. Klebverbindungen bieten jedoch im schiffbaulichen Umfeld ein hohes, bisher noch nicht annähernd ausgeschöpftes Potenzial, welches sich in anderen Industriezweigen bereits deutlich zeigt. So wird die Klebtechnologie beispielsweise im Flugzeug-, Automobil- und im Schienenfahrzeugbau bereits erfolgreich im großen Maßstab eingesetzt und unterliegt stetiger Weiterentwicklung.

Im Vergleich zu Fracht- oder Marineschiffen gelten für Kreuzfahrtschiffe deutlich strengere Sicherheitsbestimmungen. Sie werden von der Internationalen Schifffahrtsorganisation IMO (International Maritime Organisation) der Vereinten Nationen durch weltweit geltende Standards für die Sicherheit und den Betrieb vorgegeben. So dominieren auf SOLAS-konformen Kreuzfahrtschiffen (International Convention for the Safety of Life at Sea) derzeit noch Stahl und in geringen Teilen Aluminium in der lasttragenden Struktur. Das SOLAS-Abkommen ist einer der wichtigsten Verträge, welcher erstmals 1914 verabschiedet wurde. Die SOLAS-Bestimmungen gelten auf zivilen Schiffen mit mehr als zwölf Passagieren und wurden durch vielfache Änderungsverordnungen an die moderne Schifffahrt angepasst. Seit 2010 gelten zusätzliche Bauvorschriften für Neubauten, die als „Safe Return to Port Guideline“ ergänzt wurden. Dabei müssen Passagiere und Crew nach bestimmten Brand- oder Flutungsvorfällen in sogenannten „Safe Areas“ an Bord untergebracht werden können und die Schiffe fähig sein, sicher den nächsten Hafen zu erreichen. Die Guideline folgt der übergeordneten Philosophie, nach der das Schiff selbst das beste Rettungsboot sein soll.

I.4.2 KLEBEN IM SCHIFFBAU

Bei der strukturellen Verbindung von Komponenten in Bereichen, in denen keine Heißenarbeiten zulässig sind, kommt der Fügetechnik eine besondere Aufgabe zu, da nur wärmearme Fügetechniken einsetzbar sind. Strukturelles Kleben wurde im SOLAS-Schiffbau bisher so gut wie nicht eingesetzt. Auch wenn der Klebstoff in einer Betriebsphase von 15 bis 30 Jahren unter Ausschluss von UV-Strahlung so gut wie nicht altert, degradiert eine Klebverbindung in Kontakt mit den bisher hauptsächlich verwendeten Metallen meist durch Korrosion der Metalloberflächen. Neuere Ergebnisse zu Klebverbindungen¹ haben bestätigt, dass bei geeigneter Klebstoff- und Substratvorbehandlung eine Unterwanderung der Klebschicht durch Korrosion verhindert wird und Zugscherfestigkeiten in der Größenordnung der zulässigen Vergleichsspannung für Aluminiumlegierungen liegen. Die Abschätzungen zeigen aber auch, dass beispielsweise bei der strukturellen Anbindung von Faserverbundkunststoffen an Stahlstrukturen noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

¹ RAMSSES, siehe 2, es wurden hier Klebverbindungen analysiert, die im EU Projekt BONDSHIP 2003 geklebt wurden und anschließend einer Freibewitterung unterzogen wurden.

I.4.3 AUTOMATISIERTE KLEBPROZESSE IM SCHIFFBAU

Automatisierte Klebprozesse sind im Schiffbau bislang nicht etabliert. Nach aktuellem Wissensstand erfolgt auf Werften für Klebungen der Klebstoffauftrag manuell. Anwendungsbeispiele hierfür sind Klebhalter, Kabinenwinkel und die in großer Stückzahl vorkommenden Scheibenklebungen. Hierzu werden überwiegend einkomponentige, feuchtigkeitshärtende Klebstoffe eingesetzt. Die Vorbereitung bzw. die Vorbehandlung der Substratoberfläche erfolgt ebenfalls manuell und besteht zum Großteil aus den Arbeitsschritten Reinigen, Schleifen, Aktivieren und Primerauftrag. Für die Qualitätssicherung einer heutigen Klebung stellt die Erstellung des Klebreports einen zentralen Arbeitsschritt dar. Hier werden neben Umweltbedingungen ebenso die Daten der verwendeten Kleb- und Klebhilfsstoffe und die durchgeführten Arbeitsschritte manuell dokumentiert.

I.4.4 RECYCLING

Hochseetüchtige Schiffe werden für eine langzeitstabile Anwendung konstruiert, was entsprechend hohe Anforderungen an die eingesetzten Materialien stellt und gleichzeitig einen Einfluss auf das Abwracken bzw. Recycling besitzt. Durch die Bestimmungen der Hongkong-Konvention soll ein geregelter Rückbau ausgedienter Schiffe mit hoher Recyclingquote in dafür zertifizierten Betrieben erfolgen. Für die Betriebe bedeutet der Rückbau großer Passagierschiffe vor allem aufgrund der Materialvielfalt große Aufwände. Die Vorgehensweise umfasst das Abpumpen von Dieseltreibstoff, Maschinenöl, Chemikalien zur Brandbekämpfung und den Ausbau der Antriebe sowie aller Ausrüstungsgegenstände. Im Anschluss wird die metallische Schiffstruktur in bewegliche Stücke zerschnitten, sodass durch einen Einschmelzprozess Stahl für eine weitere Verwendung z.B. in der Bauindustrie als Bewehrung für Stahlbeton verwendet werden kann². Neben dem Abbruch und Recycling findet häufig ein Umbau der ausgedienten Kreuzfahrtschiffe zu oftmals weniger luxuriösen, preisgünstigen Alternativen anderer Kreuzfahrtgesellschaften statt.

Bislang schien das Recycling von PU-Kunststoffen ein noch ungelöstes Problem zu sein. Vor Kurzem entwickelten jedoch Wissenschaftler im Forschungsvorhaben RePURpose³ an der Universität Aarhus ein Verfahren, welches die chemische Aufbereitung von PU-Kunst- bzw. Klebstoffen erlaubt. In diesem Verfahren wird der Kunststoff in einer Mischung von auf 225 °C erhitztem tert-Amyl-Alkohol bzw. 2-Methyl-2-butanol (C₅H₁₂O) und Kalilauge (KCL) zersetzt. Somit kann auf diesem Weg zum Ausgangspunkt der PU-Synthese zurückgekehrt werden. Nach dem Sieden des Materials erhält man die Grundverbindungen Polyole und ein Aminvorprodukt, die zusammen Polyurethan bilden. So ist es gelungen, 20 verschiedene Arten von Polyurethanvarianten zu zerlegen. Das Verfahren ist inzwischen patentiert. Dieser Sachverhalt, der während der Projektlaufzeit von smartBOND bekannt wurde, ist vor dem Hintergrund der gewünschten Rückführung aller zum Bau eines Schiffes verwendeten Materialien in Stoffkreisläufe besonders hervorzuheben. Das mechanische Recycling durch Aufbrechen des Materials und dessen Weiterverwendung als Füllstoff in der Bauindustrie oder als Teppichunterlage waren bisher

² <https://www.cruisetricks.de/wenn-schiffe-sterben/>

<https://www.nationalgeographic.de/umwelt/schiffe-verschrotten-bangladesch>

<https://www.daserste.de/information/wirtschaft-boerse/plusminus/schiffahrt-fonds-bangladesch-100.html>

³ <https://innovationorigins.com/de/verdammt-jetzt-stellt-sich-heraus-dass-man-pu-doch-zur-wiederverwendung-abbauen-kann/>

eine der wichtigsten Möglichkeiten zur Wiederverwendung. Alternativ wurden Polyurethane auf Deponien eingelagert oder thermisch wiederverwendet, d.h. verbrannt. Vor dem Hintergrund, dass bei der Herstellung von einem Kilogramm Polyurethan 3,5 kg CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt werden, bilden diese Wege also äußerst zweifelhafte Varianten einer „Entsorgung“.

I.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

In vielen Punkten wurde im Rahmen des Forschungsprojektes in den Arbeitspaketen mit den anderen geförderten Partnern A&R, IBG, URO, IGP und CMT zusammengearbeitet. In erster Linie betraf dies den Austausch über die Anforderungen aus dem Schiffbau und die Möglichkeiten der Roboter- und Automatisierungstechnik im Zusammenhang mit den geplanten Forschungszielen.

So erfolgte in AK1 die gemeinsame Erstellung des Lastenheftes, welches Grundlage für alle weiteren Schritte im Forschungsvorhaben bildete, unter Federführung von A&R. Hier wurden neben den Anforderungsprofilen der beiden beteiligten Werften auch potenzielle Auslöser für Klebfehler und deren Konsequenzen sowie Ansätze zu deren Kompensation zusammengetragen. Darüber hinaus wurde in diesem AK bereits eine erste wirtschaftliche Abschätzung zum Einsatz des teilautomatisierten Klebens erstellt.

Hinsichtlich der Automatisierung bildeten die AK2, AK3 und AK4 einen technologischen Themenblock mit den Schwerpunkten Teilautomatisierung, Informationsanalyse / Verarbeitung und Entwicklung smarter Systemeigenschaften zur Fehlererkennung. Hier erfolgte in Zusammenarbeit mit IGP, URO und IBG die Ausgestaltung der Anlagenbedienung, die Festlegung der Datenanalyse und Prozessprotokollierung sowie der Aufbau eines Teilversuchsfeldes in den Räumlichkeiten der MEYER WERFT für Systemtests zur Entwicklung und Überprüfung von Teilfunktionen. Die Qualifizierung des Klebsystems für die MEYER WERFT in AK5 erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem IGP und dem DNV. Unter Berücksichtigung der für die MEYER WERFT charakteristischen Arbeitsabläufe wurden Strategien zum Klebstoffauftrag und zur Prozessgestaltung entwickelt. In AK6 erfolgte auf dem Gelände der MEYER WERFT der Aufbau eines Demonstrators in Form einer modifizierten Balkonkabine, in dem die Funktionalität des Systems geprüft und Probekörper für die Erlangung eines Approval in Principle erstellt wurden. Dieses fand in enger Zusammenarbeit mit IGB, IGP und DNV statt. Zur Entwicklung erster Ansätze zur Prozessoptimierung und Erstellung eines LCPA wurden dem CMT umfangreiche Daten für aktuelle und zukünftige Prozesse im thematischen Umfeld des Fügens, speziell dem Kleben auf der MEYER WERFT zur Verfügung gestellt und Hilfestellung bei der Analyse gegeben. So konnten weiterführende Aussagen zur zukünftigen Wirtschaftlichkeit des teilautomatisierten Klebens gemacht werden.

Besondere Bedeutung hinsichtlich regulatorischer Fragen war in diesem Forschungsvorhaben der Zusammenarbeit mit der im Unterauftrag beteiligten Klassifikationsgesellschaft Det Norske Veritas (DNV) beizumessen. Die MEYER WERFT führte mit der Klassifikationsgesellschaft DNV einen wiederkehrenden Austausch. Klassifikatorische Belange des Klebprozesses, der in diesem Projekt teilautomatisiert wurde, wurden mit DNV besprochen, analysiert und bewertet. In diese Bewertung flossen außerdem die Untersuchungen des IGP zum Klebprozess mit ein. Ziel der Zusammenarbeit mit DNV war, dass die Vorstufe einer Zertifizierung des automatisierten Prozesses erreicht wird. So kann mit der industriellen Einführung des Robotersystems auf der Werft und der damit verbundenen Anwendung des Prozesses eine Zertifizierung bei DNV eingeholt werden, ohne weitere Vor- und Zulassungsversuche durchzuführen.

II EINGEHENDE DARSTELLUNG

II.1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND ERZIELTE ERGEBNISSE

II.1.1 AK1 – ANFORDERUNGEN, LASTENHEFT

smartBOND.A.1.1 - Ist Stand und Aufarbeitung von Fehlerquellen manueller Anwendungen

Zur Sicherstellung der Berücksichtigung aller relevanten Randbedingungen für das teilautomatisierte Kleben im Schiffbau unter Verwendung eines Roboters für den Klebstoffauftrag erfolgte die Erstellung eines umfangreichen Lastenheftes. Dieses beinhaltet einen ausführlichen Katalog möglicher Fehlerquellen, die im Zuge der Entwicklung des Benutzerdialoges zur Erstellung der Klebprotokolle zu berücksichtigen waren. In diesem Zusammenhang erfolgten durch den Projektpartner CMT Umfragen im MariLight-Netzwerk zu Erfahrungswerten zum Kleben und möglichen Fehlerquellen. Die Umfrageergebnisse flossen nach Sichtung und Bewertung ebenfalls in das Lastenheft sowie in eine Fehlermatrix ein. Diese Fehlermatrix enthält neben potenziellen Fehlerquellen auch Ansätze zur Fehlervermeidung und Kompensation.

Die Matrix enthält Informationen zu folgenden Kategorien:

- Beschreibung der Informationsquelle (z. B. Projekttitle, Studie, Person)
- Beteiligte (z. B. Projektkoordinator, Industriepartner und weitere deutsche Partner)
- Klebfälle (z. B. Elemente, Materialien, Einsatzbedingungen)
- Ziel des Projekts o. dgl.
- verfolgter Lösungsansatz, ggf. Verweis auf (u. U. vertrauliche) detaillierte Dokumentation
- Einschätzung zu
 - für smartBOND interessanten Aspekten/Ergebnissen
 - beschriebenen typischen Fehlerquellen
- Veröffentlichungen

Darüber hinaus wurden auch Kontrollmechanismen aufgenommen, um eventuelle Hardwarefehler der einzusetzenden Sensorik und somit falsche Messdaten zu identifizieren. Hierzu gehören neben den Parametern der Umgebungsbedingungen, wie Temperatur, Luftfeuchte und Taupunkt auch die Orientierung im Raum. Somit wird sichergestellt, dass der Klebstoffauftrag an den vorgesehenen Orten stattfindet.

Auszugsweise sind nachfolgend für verschiedene Klebstoffsysteme Listen verschiedener Fehlerszenarien aufgeführt, die durch die smarte Überwachung und Protokollierung der einzelnen Arbeitsschritte ausgeschlossen werden sollen. Es zeigt sich bei allen Klebstoffen, dass insbesondere die Temperaturen und die Luftfeuchtigkeit potenzielle Fehlerquellen darstellen.

- Verarbeitungsfehler bei 2-K Epoxidharz-Klebstoffen und 2-K PUR-Klebstoffen
 - Die Angaben zum Mischungsverhältnis (siehe Technischen Datenblatt) wurden nicht beachtet. Angabe richtet sich entweder nach Gewichtsteilen oder Volumenteilen
 - Bei Klebstoffen in der Doppelkammerkartuschen mit Mischrohr sind die ersten 3 cm der Mischung zu verwerfen, um eine homogene Mischung zu erzielen.
 - Es wurde ein nicht geeignetes Mischrohr verwendet.
 - Die Topfzeit (Verarbeitungszeit) wurde überschritten.
 - Durch zu kurzes Rühren ist keine homogene Mischung entstanden.
 - Die Rückstände am Gebinde-Boden wurden nicht aufgerührt.
 - Klebstoff und Füge Teile haben nicht die benötigte Verarbeitungstemperatur.
 - **Es herrscht eine zu geringe oder zu hohe Umgebungstemperatur.**
 - Die Mindesthaltbarkeit des Klebstoffes wurde überschritten.

- Verarbeitungsfehler bei 1-K PUR (feuchtigkeitsvernetzend) Klebstoffen
 - Es herrschte eine zu **geringe Luftfeuchtigkeit**. Der Klebstoff vernetzt/härtet nur sehr langsam bis gar nicht aus.
 - Die **Luftfeuchtigkeit ist zu hoch**, der Klebstoff bildet zu schnell eine Haut und kann die Füge teiloberfläche nicht benetzen.
 - Die Angaben zur Offenzeit wurden nicht beachtet. Angaben zur Offenzeit können dem Datenblatt entnommen werden.
 - Der Klebstoff und die Füge Teile haben nicht die benötigte Verarbeitungstemperatur.
 - Es herrscht eine zu geringe oder zu hohe Umgebungstemperatur.
 - Die Mindesthaltbarkeit des Klebstoffes wurde überschritten. Der Klebstoff hat bereits zum Teil reagiert.
 - Das Gebinde wurde nicht dicht verschlossen.
 - Zwei diffusionsgeschlossene Substrate wurden miteinander verklebt. Der Klebstoff bekommt nicht die ausreichende Feuchtigkeit für eine vollständige Vernetzung/Aushärtung. Mindestens ein Fügepartner muss feuchtigkeitsdurchlässig sein!

- Verarbeitungsfehler bei Cyanacrylaten (Sekundenklebstoffen)
 - Falsche Lagerbedingungen (Temperatur, **Feuchtigkeit zu hoch**)
 - Dem Klebstoff steht zu **wenig Luftfeuchtigkeit** zur Aushärtung zur Verfügung. Der Klebstoff benötigt ca. **40 bis 70% relative Luftfeuchtigkeit**. Bei <30% kann es zu erheblichen Aushärteverzögerungen kommen.
 - Die relative **Luftfeuchtigkeit ist zu hoch**. Bei >80% kommt es zu einer Schockhärtung.
 - Der Klebespalt ist zu groß (> 0,2mm)
 - Das Substrat ist ungeeignet z.B. Glas (saure Oberfläche)
 - Es ist ein Primer erforderlich (zum Beispiel beim Kleben von PE, PP, POM, TPE)
 - Es herrscht eine zu geringe oder zu hohe Umgebungstemperatur.
 - Klebstoff und Füge Teile haben nicht die benötigte Verarbeitungstemperatur.
 - Die Mindesthaltbarkeit des Klebstoffes wurde überschritten.
 - Es diffundieren Weichmachern bei Kunststoffen an die Klebstoffgrenzfläche.
 - Ausblühungen (weißliche Verfärbungen der Füge teiloberflächen unmittelbar am Randbereich der Klebestellen) z.B. durch einen zu großen Klebespalt

Der Verbundpartner A&R wurde von der MEYER WERFT bei der Erstellung des Lastenhefts unterstützt. Hierbei lag der Fokus auf den zu untersuchenden Anwendungsfällen und dem Ablauf der Klebvorbereitung und des Klebstoffauftrags. Die MEYER WERFT hat sich dabei auf die Anwendungsfälle

- Kleben von Glasscheiben z.B. in Restaurantbereichen, Windschirme und Glasrelings sowie im Bereich der Brücke (Abbildung 3) und
- das Kleben von Passagier- und Crewkabinen festgelegt (Abbildung 4).

Glasscheiben werden auf der MEYER WERFT in der Regel verklebt. Kabinen werden seit der Einführung von LNG-Antrieben im Bereich der LNG-Bunkeranlage verklebt, um eine nachträgliche Wärmeeinwirkung auf die Gasdichtigkeit zu verhindern. Auf konventionelle Weise werden Kabinen auf den Kreuzfahrtschiffen der MEYER WERFT ans Deck geschweißt. Durch positive Ergebnisse des Forschungsprojektes kann zukünftig ein größerer Anteil der Kabinen mit dem Stahldeck verklebt statt verschweißt werden.

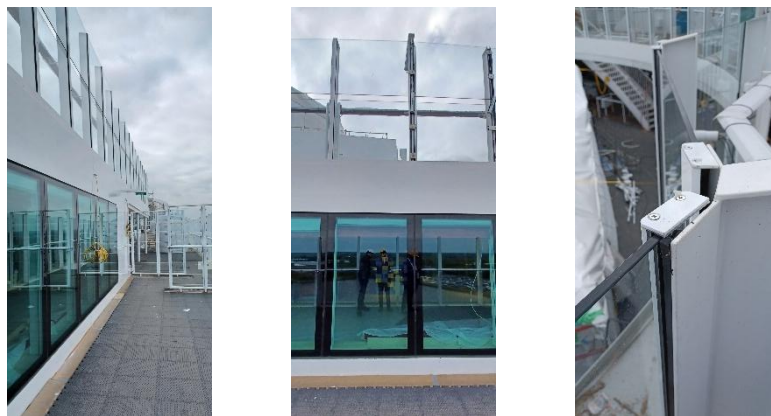


Abbildung 3: Geklebte Glasscheiben auf Deck (Quelle: MEYER WERFT)

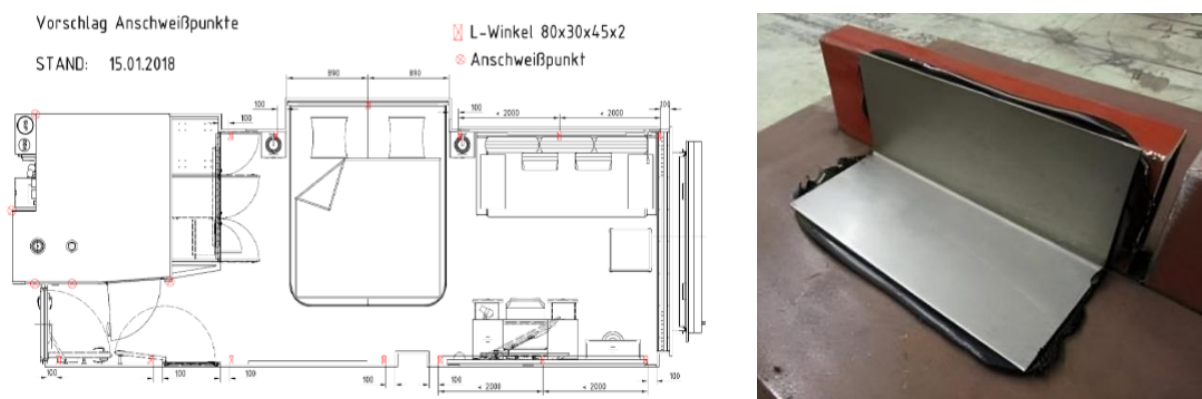


Abbildung 4: Links Anschweißpunkte und Positionen geklebter Winkel zur Lagesicherung über LNG-Tanks Rechts geklebter Winkel an einem Kabinen-Grundrahmen (Quelle: MEYER WERFT)

Neben wirtschaftlichen Randbedingungen sind insbesondere im Fall von SOLAS-Schiffen zahlreiche regulatorische Vorgaben einzuhalten. Vor diesem Hintergrund wurde die Klassifikationsgesellschaft DNV bereits in diesem frühen Projektstadium eingebunden. Die Aufgabe des DNV bestand darin, die Entwicklung der teilautomatisierten Prozesse beratend zu begleiten und aus regulatorischer Sicht zu dokumentieren. Durch diese Vorgehensweise wurde gewährleistet, dass sowohl die erforderlichen Fertigungsschritte als auch die Klebverbindungen selbst im Nachgang des Forschungsvorhabens seitens der Klassifikationsgesellschaft ein Approval in Principle (AiP), also eine allgemeine Zulassung erhalten. In Zuge dieses Forschungsvorhabens wurden folgende Klebstoffe für das teilautomatisierte Kleben ausgewählt.

- DELO-DUOPOX AD840 2-K Epoxidharz – Klebstoff
- Körapur 840/45 2-K-PU
- Sikaflex-268 PowerCure 1-K-PU

smartBOND.A.1.3 - Gesamtprozess / Randbedingungen

Schiffbauliche Fertigungsstätten, insbesondere für den Bau von Kreuzfahrtschiffen sind in der Regel sehr raumgreifend. Während auf anderen Werften oftmals in Baudocks unter freiem Himmel gearbeitet wird, finden die meisten Fertigungsschritte bei der MEYER WERFT in Papenburg in großräumigen Hallen statt, deren vollständige Klimatisierung aus wirtschaftlichen Gründen praktisch nicht möglich ist. Die Verarbeitung von Klebstoffen erfordert jedoch die Erfüllung von drei Randbedingungen an die Arbeitsumgebung. Diese sind

- die Temperaturen der Arbeitsumgebung und der Fügepartner,
- die Luftfeuchtigkeit und
- der Taupunktabstand.

So liegt die Mindesttemperatur zur Verarbeitung von Klebstoffen in der Regel bei 10 °C, darf jedoch systemabhängig bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Abhängig vom Klebstoffsystem ist zudem ein Verarbeitungsfenster der Luftfeuchtigkeit einzuhalten. So kann eine zu geringe Luftfeuchtigkeit dazu führen, dass der Klebstoff nur sehr langsam, bis gar nicht vernetzt / aushärtet. Ist die Luftfeuchtigkeit zu hoch, bildet der Klebstoff zu schnell eine Haut und kann die Fügepartioberfläche nicht benetzen. Darüber hinaus ist der von der Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit abhängige Taupunktabstand einzuhalten. So wird sichergestellt, dass auf den zu fügenden Flächen kein Tauwasser ausfällt und somit die Haftung des Klebstoffes beeinträchtigt.

Im Zuge der Digitalisierung der Werftanlagen sind Hallenbereiche der MEYER WERFT, in denen auch schwerpunktmäßig aktuelle Klebarbeiten ausgeführt werden, mit Systemen zur Klimaüberwachung ausgestattet worden. Diese Systeme zeichnen sehr engmaschig die Umgebungstemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit sowie den Taupunktabstand auf. Exemplarisch sind die entsprechenden Werte in Abbildung 5 als Diagramm dargestellt. Hieraus ergibt sich, dass in den betrachteten Bereichen im Vergleich zum Außenklima ganzjährig deutlich höhere Temperaturen herrschen und auch ein Taupunkt-abstand von mehr als 6 K durchgehend eingehalten wird. Somit zeigt sich, dass ganzjährig Klebprozesse durchführbar sind.

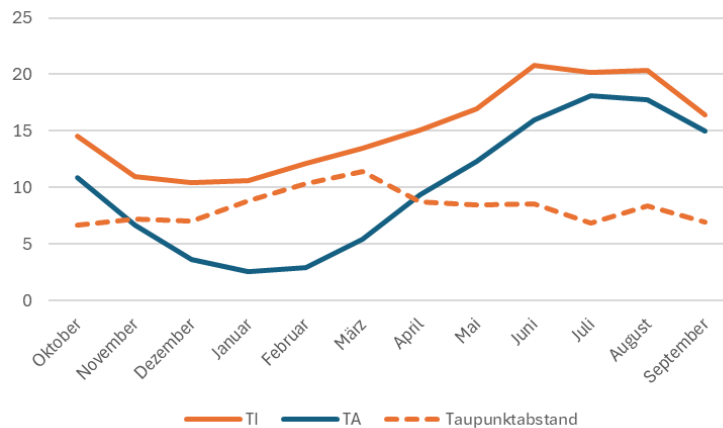


Abbildung 5: Für eine Halle aufgezeichnete Innentemperatur im Vergleich zu Temperaturen des Klimadiagramms und zugehörige Taupunktstände (Quelle: MEYER WERFT)

smartBOND.A.1.4 - Wirtschaftliche Betrachtung

Für eine wirtschaftliche Betrachtung wurden die Ergebnisse zwischen jeweils einer manuellen Schweißapplikation und einer automatisierten Klebapplikation von eingeklebten Winkeln zur Lagesicherung von Kabinen gegenübergestellt. Eine detaillierte Aufstellung sowie Gegenüberstellung des manuellen und automatisierten Prozesses, erfolgte nach vollständiger Beurteilung des automatisierten Prozesses anhand von in der Demonstratorumgebung gefertigten Proben in AK6. Nachfolgend sind die zu betrachtenden Eckpunkte der wirtschaftlichen Betrachtung in kompakter Form aufgeführt. Für weiterführende Informationen wird auf den entsprechenden Abschlussbericht des Projektpartners CMT verwiesen.



Abbildung 6: Einsatzbeispiel geklebte Winkel zur Lagesicherung von Kabinen (Quelle: MEYER WERFT)

Manueller Prozess

Bei dem manuellen Prozess werden die Kabinenwinkel mittels derzeit angewendeter manueller Schweißprozesse inklusive Vor- und Nacharbeiten montiert.

- Der manuelle Prozess wurde anhand der nachfolgenden Kriterien bewertet.
 - Kosten
Die auszuwertenden Kosten sind Material in Form von Halbzeugen und Lohnkosten.
 - Zeit
Der zu betrachtende Zeitraum der manuellen Anwendung ist inklusive Rüstzeiten und umfasst auch die Arbeiten der Oberflächenvorbehandlung.
Die Rüstzeiten sind hier stark vom Baustadium sowie der örtlichen Gegebenheit auf dem Schiff abhängig.
 - Qualität
Durch die Ausführung der Arbeiten durch unterschiedliches Personal kommt es hier auf eine gute fachliche Kompetenz der Facharbeiter an.
Die Qualität hat dadurch auch einen direkten Einfluss auf die Kosten sowie die Zeit.

Automatisierter Prozess

- Der automatisierte Prozess wird mit den vier nachfolgenden Punkten bewertet.
 - Kosten
Die auszuwertenden Kosten sind Material in Form von Halbzeugen und Lohnkosten.
 - Zeit
Der zu betrachtende Zeitraum der automatisierten Anwendung ist inklusive Rüstzeiten und umfasst die Arbeiten inklusive Oberflächenvorbehandlung.
 - Qualität
Durch die Automatisierung wird eine fortlaufende Qualitätssicherung eingehalten.
Durch wiederkehrende Prozessschritte und deren Aufzeichnung können menschliche Fehler teilweise ausgeschlossen werden. Auf Grund dieser Aufzeichnung kann die Definition des "Speziellen Prozesses" erfüllt werden und somit auch die Qualität einer Klebung verbessern.
- Arbeitserleichterung durch Automatisierung
Eine Arbeitserleichterung durch einen automatisierten Klebeprozess wird an unterschiedlichen Stellen ersichtlich:
 - Durch das Aufzeichnen von Rahmenbedingungen und die digitale Erstellung eines Klebprotokoll entsteht eine Arbeitserleichterung bei der Dokumentation.
 - Durch eine automatisierte Oberflächenbehandlung
 - Durch einen automatisierten Klebstoffauftrag

II.1.2 AK2 – ANLAGENTECHNIK, AUTOMATISIERUNG

IBG entwickelte in enger Zusammenarbeit mit dem Konsortium zwei Varianten für prototypische, automatisierte Anlagentechniken aus den Teilsystemen

- Robotersystem
- Automated Guided Vehicle (AGV),
- Greifer,
- Klebetechnik und
- Steuerung.

In diesem Zuge erfolgten intensive Diskussionen zur Dimensionierung der Robotersysteme und verschiedene Konzepte wurden in Betracht gezogen - beginnend bei tragbaren, transportablen Systemen und endend bei selbstfahrenden Lösungen, die ohne menschliches Zutun von einer Fertigungsstelle zur nächsten fahren. Zu beachten waren in diesem Zusammenhang vor allem die Arbeitsumgebung der Werker beim Positionieren und Fixieren der Kabine auf dem Stahldeck. Während dieser Entwicklungsarbeiten stellte sich heraus, dass die Realisierung eines für die beengten räumlichen Verhältnisse an Bord geeigneten Robotersystems mit einem Kostenumfang verbunden wäre, der während der Projektentwicklung noch nicht absehbar war und somit das geplante und bewilligte Projektbudget übersteigen würde. Vor diesem Hintergrund wurde seitens IGB auf vorhandene Systemkomponenten zurückgegriffen, die eine teilweise Integration in die Werftumfelder erlaubten und mittels derer die technische Machbarkeit prinzipiell nachgewiesen werden konnte. Um den unterschiedlichen Anforderungen für den Einsatz bei der MEYER WERFT (Ausbaubereiche) und A&R (Strukturbau) gerecht zu werden, wurden zwei Robotersysteme entwickelt – eine kleine und mobilere Variante für den Einsatz in den Ausbaubereichen sowie eine größere Variante für den Einsatz im Strukturbau. Aus der Erprobung dieser Systeme ergaben sich auch weiterführende Erkenntnisse hinsichtlich vorhandener Optimierungspotenziale der kinematischen Steuerungsstrategien insbesondere in den sehr eng ausfallenden Kabinenbereichen.



Abbildung 7: Im Forschungsvorhaben für die MEYER WERFT entwickeltes System zur Klebstoffapplikation in einer Kabine (Quelle: MEYER WERFT)

Die Entwicklung dieser innovativen und funktionalen Teilsysteme erfolgte unter Berücksichtigung einer möglichst durchgehenden Automatisierung insbesondere für die Prozessschritte

- Vorbereitung der Oberflächen der Bauteile,
- Durchführung der Klebstoffapplikation
- sowie die Prozessüberwachung
- und Qualitätssicherung.

smartBOND.A.2.6 - Aufbau eines Teilversuchsfeldes: Systemtests für Teilfunktionen

Das Kernziel dieses APs bestand in der Zusammenführung aller Teilsysteme (Hard- und Software) zur teilautomatisierten Klebanlage. Deren Verifikation im Demonstrationsumfeld fand unter iterativer Anpassung der Komponenten bei besonderer Berücksichtigung der Anforderungen der schiffbaulichen Fertigung aus AK1 statt. Um eine frühestmögliche eigene Validierung von Systemkomponenten an einem stationären Roboterarm (Universal Robots UR12e mit Klebstoffequipment bestehend aus LOCTITE 97 160, MM25 und MM30 für 2k-Klebstoffe) durch die MEYER WERFT zu ermöglichen (**Abbildung 8**), erfolgte der Aufbau eines Teilversuchsfeldes (**Abbildung 9**).



Abbildung 8: Komponenten für Versuchsklebung: Universal Robots UR12e mit Klebstoffequipment bestehend aus LOCTITE 97 160, MM25 und MM30 für 2k-Klebstoffe (Quelle: <https://shop.tewipack.de/geraete-dosierttechnik/>)

Dieses diente unter anderem zur Bewertung der Teilsysteme für einen Einsatz im Produktionsumfeld der Werft und zur detaillierten Analyse und Bewertung der Qualität der Klebprozesse für die Abbildung der Fügeprozesse in der Fertigung. Im Zuge dieser Untersuchungen erfolgte eine Unterstützung bei der Validierung der Sicherheitssysteme. Dieses erfolgte in Bezug auf schiffbauliche Anforderungen und Vorgaben einer ganzheitlichen Analyse der Versuchsergebnisse in Hinsicht auf den Einsatz im Demonstratorumfeld. Auf Basis der so gewonnenen Erkenntnisse wurde es ermöglicht, bereits kurz nach Projektende einzelne, entwickelte Teilsysteme in einfacheren Mechanisierungslösungen für Kleb- und andere Fügeoperationen auf der MEYER WERFT nutzbar zu machen.

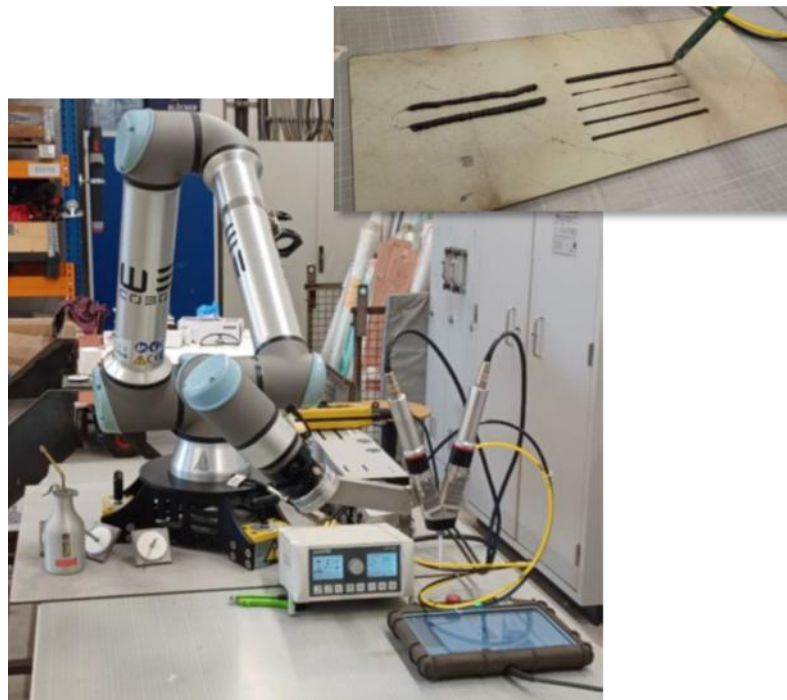


Abbildung 9: Teilversuchsfeld für Klebstoffapplikationen und erste Proben im Labor der F&E der MEYER WERFT (Quelle: MEYER WERFT)

II.1.3 AK3 – BEDIENKONZEPT, SENSORIK & STEUERUNG

smartBOND.A.3.1 - Konzeption der Verfahren zur Anlagenbedienung

Grundvoraussetzung für eine einwandfreie Klebverbindung ist die sorgsame, wiederholgenaue Vorbereitung der zu verbindenden Oberflächen. Diese derzeit noch manuell auszuführenden Tätigkeiten weisen Fehlerpotenziale auf, welche die finale Tragfähigkeit einer Klebverbindung beeinträchtigen können. Um die hier angestrebte Teilautomatisierung zu realisieren, ist eine Referenzierung des Robotersystems im Raum unter schifftypischen, veränderlichen Gegebenheiten erforderlich. Auf dieser Basis erfolgt die Lokalisierung der Fügeflächen (Abbildung 10, links).



Abbildung 10: Links Optisches Sensorsystem zur Referenzierung im Raum und Lokalisierung der Fügeflächen
 Rechts Applikationssystem für den Klebstoff (Quelle: MEYER WERFT)

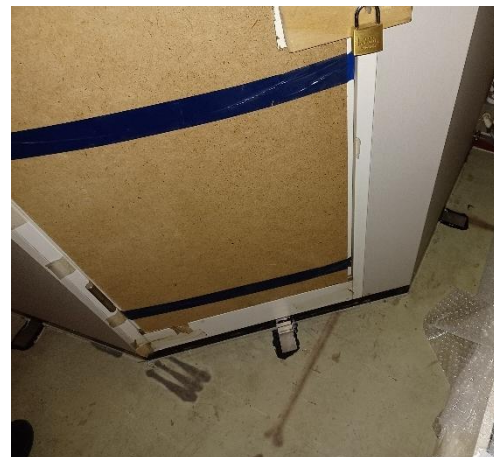


Abbildung 11: Beispiele für Situationen zur räumlichen Referenzierung und Lokalisation der Fügestellen
 links: Scheibenkleben, rechts: Kabinenkleben (Quelle: MEYER WERFT)

Das Ziel der durchgeführten Arbeiten war die Entwicklung eines mehrstufigen Systems zur Erzeugung benötigter Steuerungsinformation. Hierzu mussten für den Stahlschiffbau charakteristische Herausforderungen, wie große Bauteilabmessungen, vergleichsweise hohe Toleranzen, geringe Stückzahlen und damit einhergehend Unwirtschaftlichkeit konventioneller Verfahren zur Erzeugung von Steuerungsprogrammen überwunden werden.

Neben einer korrekten Lokalisierung der Fügestellen im Raum ist für die Qualitätssicherung und Integration in vorhandene Qualitätsmanagementsysteme eine intuitiv bedienbare Benutzerschnittstelle erforderlich, die unter Nutzung smarterer Funktionen Prozessfehler möglichst weitgehend erkennt und nach Möglichkeit korrigierend eingreift. Unter diesen in AK1 erarbeiteten Anforderungen erfolgten mit Unterstützung der MEYER WERFT Arbeiten zur Konzeptentwicklung folgenden Teilaufgaben:

II EINGEHENDE DARSTELLUNG

- Referenzierung des Gesamtsystems,
- Definition der Arbeitsaufgaben und
- Erzeugung notwendiger Steuerungsprogramme.

Der besondere Fokus lag hierbei auf Hard- und Softwareschnittstellen und deren Anwendung im Wertumfeld sowie auf folgenden Arbeitspunkten:

- Erstellung einer Anforderungsliste für die Anlagenbedienung im Hinblick auf den Produktionsprozess in der Werftumgebung
- Analyse und Bewertung der entwickelten Konzepte, sowie Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Lösungskonzepte mit Abgleich der Anforderungen aus AK1
- Betrachtung und Analyse vergleichbarer Automatisierungslösungen im Wertumfeld und Überführung von Erfahrungen.

Nach Vorversuchen mit verschiedenen optischen und taktilen Sensoren erwies sich der Fall des Klebens von Windschirmen an Relingstützen als besondere Herausforderung für die Erkennung von Konturen und basierend darauf die Lokalisation von Klebeflächen. Wobei in diesem Fall die beiden Klebeflächen sich auf seitlich an der Stütze positionierten Flachstählen befinden, die in stumpfen Winkeln, also nicht in einem Winkel von 180° zueinander ausgerichtet sind. Dieser Fall tritt auf, wenn die Reling einen Knick oder einen Radius abbilden muss. Zum Training des eingesetzten optischen Systems wurde eine exemplarische Relingsstütze durch das Labor der Forschung & Entwicklung gefertigt und der Universität Rostock zur Verfügung gestellt. Neben dieser Relingsstütze wurden, dort zusätzlich sogenannte Mikropaneele für die Entwicklung der Algorithmen eingesetzt.

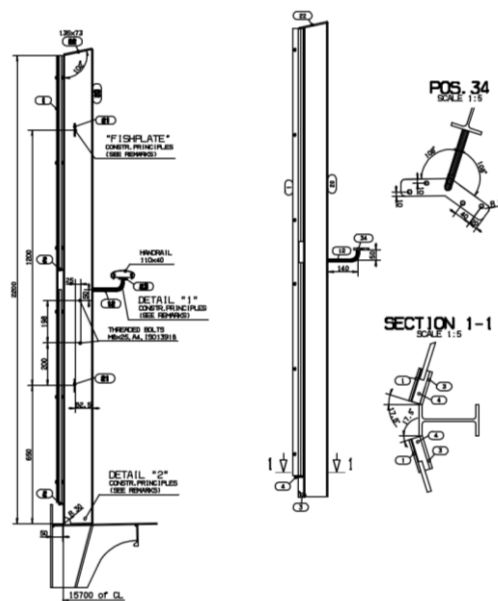


Abbildung 12: Beispiel einer Relingstütze mit angewinkelten Flanschen (Quelle: MEYER WERFT)

Basierend auf den so gewonnenen Erkenntnissen erfolgte eine erste prototypische, softwaretechnische Umsetzung des Referenzierungssystems und des Systems zur Lokalisierung der Klebflächen im Raum. Dadurch wurde ermöglicht, die erforderlichen Werkzeuge für die verschiedenen Schritte zur Klebflächenvorbereitung und zum Klebstoffauftrag mit ausreichender Genauigkeit zu positionieren und daran anschließend die entsprechenden Kinematiken abzufahren. Ferner wurde ein erster Prototyp der Benutzerschnittstelle mit Anbindung an ein werftseitiges QS-Managementsystem entwickelt. Hierbei ist eine Funktion zur fotografischen Dokumentation der erfolgten Arbeitsschritte integriert.

II.1.4 AK4 – QM-ANBINDUNG, SMARTNESS

Da die programmtechnische, anwenderfreundliche Umsetzung und Integration in vorhandene Datenverarbeitungsstrukturen unter anderem durch einen Hardwaredefekt verzögert wurden, beantragten die Projektpartner IGP und URO eine kostenneutrale Verlängerung ihrer Teilprojekte um vier Monate. Somit kann an dieser Stelle nur verkürzt über die Arbeiten der MEYER WERFT zu diesem AK berichtet werden.

smartBOND.A.4.1 - Datenanalyse und Prozessprotokollierung

Der Prozessüberwachung wird in diesem Forschungsvorhaben besondere Bedeutung beigemessen, da Klebfehler in der Regel nur schwer zu detektieren sind. Hierzu wurde in enger Zusammenarbeit mit der URO sowie dem IGP eine nahtlose Online-Prozesserfassung (Anhang, Abbildung 22) entwickelt. Dieses erfolgte insbesondere vor dem Hintergrund, dass beim Bau von Kreuzfahrtschiffen potenziell eine große Anzahl von Klebverbindungen herzustellen ist. Der so entstehende Protokollierungsaufwand kann also recht schnell sehr groß und somit fehleranfällig werden. Die sowohl vom Robotersystem als auch durch Bedieneringabe gewonnenen Daten bildeten somit eine wertvolle Grundlage in Form einer Vielzahl zusammenhängender Datensätze, die es erlauben Datenmuster zu erkennen und nach Analyse Methoden zur Inline-Fehlererkennung zu entwickeln. Zu diesen Informationen zählen unter anderem Umgebungsparameter wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit, Häufigkeit auftretender Fehler, Arbeitsaufträge, Verbindungskennungen (Joint-IDs), sowie Fehlerkennzeichnungen (Stempelungen) und weitere qualitätsrelevante Merkmale. Mit solch einer smarten Analyseplattform könnte das QS-System der MEYER WERFT sehr gut ergänzt werden. Darüber hinaus lassen sich Teile der Analysestrategie auf andere Fertigungsprozesse der Werft adaptieren.

Die Entwicklung der smarten Analyseplattform verlief bis zur Fertigstellung dieses Berichtes kurz gefasst wie folgt:

1. Für die Überprüfung und Protokollierung des Klebprozesses wurden zunächst Schnittstellen konzipiert und relevante Prozessdaten für das Qualitätsmanagement (QM) der Werft ermittelt.
2. Die Prozessschnittstellen wurden anschließend in Zusammenarbeit mit URO und IBG umgesetzt.

II EINGEHENDE DARSTELLUNG

3. Zur Erstellung einer ausreichend großen Datenbasis für die Datenanalyse wurden daraufhin reale und künstlich generierte Beispieldaten gesammelt.
4. Die aufgenommenen Daten wurden in einer relationalen Datenbank zur Archivierung und Analyse der Daten strukturiert gespeichert.
5. Ein Server für die smarte Analyseplattform wurde aufgesetzt und alle Module zur Prozessdokumentation und -steuerung darauf integriert.
6. Die passwortgesicherte Protokollierung ermöglicht die Signierung sowie den Export der Protokolle im PDF-Format.
7. Während der gesamten Projektlaufzeit wurden die einzelnen Module (insbesondere die Schnittstellen zur Datenbank) fortlaufend verifiziert.
8. In Zusammenarbeit mit der URO und der IBG wurden zum Abschluss des Projekts Integrationstests zur Validierung der Kommunikation zwischen Sensoren und Analyseplattform durchgeführt.
9. Ein Systemtest insbesondere des Protokoll-Moduls wurde in einem realitätsnahen Szenario in Anschluss an die Klebversuche durchgeführt.
10. Die Validierung der QM-Anbindung wurde in Zusammenarbeit mit den Werftpartnern durch Validierungspläne, Spezifikation der Schnittstellen und Funktionstests umgesetzt.
11. Die Tauglichkeit der einzelnen Software-Komponenten hinsichtlich Performance, Robustheit und Optimierungspotenzialen konnte bestätigt werden.

smartBOND.A.4.3 - Entwicklung der smarten Analyseplattform

Basierend auf den Ergebnissen von Arbeitspaket 4.1 erfolgte von Seiten der MEYER WERFT eine praxisnahe Unterstützung zur Optimierung der entwickelten Auswertemethoden innerhalb der Cloud-Anwendung. Dieses umfasste die Methoden zur Datenerfassung und zur Protokollierung. Als konkrete Einsatzgebiete wurden die von der MEYER WERFT ausgewählten Klebanwendungen

- Kleben von Stahlwinkeln zur Lagesicherung von Kabinen und
- Kleben von Glasscheiben und Windschirmen

betrachtet. So wurde für den späteren Einsatz sichergestellt, dass sich die smarte Analyseplattform (Grundkomponenten → Anhang, Abbildung 23) nahtlos in die Prozessstrukturen der MEYER WERFT einfügt. Vorrangig erfolgte hier eine intensive Unterstützung bei der praxisgerechten grafischen Datenaufbereitung und Validierung von Entwicklungsständen sowie durch Bereitstellung der erforderlichen Daten und Hilfestellungen zur Erstellung von Prozessreports (Anhang, Abbildung 24).

smartBOND.A.4.4 - Intelligente Auswertemethoden

Abbildung 25 im Anhang zeigt als Diagramm die größten Einflussfaktoren auf Fehler beim Kleben. Es zeigt sich, dass neben den klimatischen Randbedingungen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Taupunkt auch die Druckdauer bzw. Fixierzeit, die Anpresskraft zur vollständigen Benetzung der Klebflächen sowie eine Überschreitung der Topfzeit zu den Hauptursachen für fehlerhafte Klebverbindungen gehören. Während die klimatischen Randbedingungen und die Temperaturen der Fügepartner, Kleb- und Hilfsstoffe durch geeignete Sensoriken recht einfach zu überwachen sind, erweist sich die Überwachung der noch überwiegend durch manuelle Arbeitsschritte beeinflussten Druckdauer bzw. Fixierzeit, Druckkraft zur vollständigen Benetzung der Klebflächen und der Topfzeit als kompliziert.

Vor diesem Hintergrund ist neben einer durchgehenden Prozessüberwachung und Protokollierung aller verfügbaren Parameter inklusive der Nutzung optischer Fehlererfassungssysteme anzustreben, intelligente Systeme zur Auswertung und Detektion von Fehlermustern zu entwickeln. Diese Systeme wurden von den Projektpartnern IBG, URO und IGP in Zusammenarbeit modular aufgebaut, sodass Erweiterungen auf dem Klebprozess nachgelagerte Schritte ermöglicht wurden. Hierbei werden auch indirekt erkennbare Unregelmäßigkeiten berücksichtigt. So ist zumeist die eigentliche Klebstelle nicht einsehbar. Es können jedoch Rückschlüsse anhand des Klebstoffüberschusses an den Klebrändern auf die Verteilung bzw. Benetzung der Klebflächen gezogen werden, wie z.B. Abbildung 26 im Anhang verdeutlicht. Durch Variationen der Auftragsparameter und verschiedene Auftragsstrategien wurden so Musterdatensätze geschaffen, die ein Anlernen des Systems erlauben. Diese sehr umfangreichen Trainingsreihen zur Entwicklung von Strategien zur frühzeitigen Fehlererkennung und -kompensation sowie Entwicklung von Abbruchkriterien sind zum Zeitpunkt dieser Berichtserstellung noch Gegenstand der laufenden Arbeiten. Es wird jedoch in den kommenden Monaten mit einer prototypischen Integration in die QS-Systeme der Werft gerechnet.

II.1.5 AK5 – PROZESSQUALIFIZIERUNG

smartBOND.A.5.1 - Entwicklung einer automatisierten Oberflächenbehandlung

Einen zentralen Arbeitskomplex dieses Forschungsvorhabens bildete die Entwicklung und Qualifizierung eines teilautomatisierten Klebprozesses für die Belange des Schiffbaus. Da fertiggestellte Klebungen nur in Teilen zerstörungsfrei prüfbar sind und somit in weiten Teilen die Güte bzw. Qualität einer Klebung nur indirekt zu bewerten sind, kommt der präzisen Einhaltung der vorgegebenen Prozessparameter bei der Klebflächenvorbehandlung, bestehend aus

- Reinigung,
- Schleifen und
- Primerauftrag

II EINGEHENDE DARSTELLUNG

zur Sicherstellung einer optimalen Haftung eine sehr große Bedeutung zu. Hierbei bestand das Ziel darin, sämtliche Vorteile aus der Reproduzierbarkeit teilautomatisierter Prozesse unter Verwendung von Robotern auszuschöpfen. In diesem Zuge war die präzise Dosierung der aufzutragenden Klebstoffmenge ein Thema, um mit möglichst geringem Überschuss - Materialverschwendung - zu arbeiten. In diesem Zusammenhang wurden - und werden aktuell noch - folgende Klebstoffe hinsichtlich der einzustellenden Prozessparameter, zugehörigen Randbedingungen und resultierenden mechanischen Eigenschaften systematisch untersucht.

- Sikaflex-268 PowerCure,
- Delo AD 840,
- Körapur 840/45

Diese Arbeiten erfolgten / erfolgen in enger Zusammenarbeit zwischen dem IGP und dem DNV sowie der MEYER WERFT, um sowohl den teilautomatisierten Klebprozess unter Werftbedingungen als auch die damit hergestellten Klebungen zu qualifizieren und schließlich zu zertifizieren. Hierbei flossen Ergebnisse aus Besichtigungen der Arbeitsstätten und protokollierten Klimadaten der entsprechenden Arbeitsbereiche ein.

Die für die eingesetzten Klebstoffe zu verwendenden Prozessparameter sind in den folgenden Tabellen wiedergegeben. Die für die Fixierung anzusetzende Flächenpressung ist auf Basis konkreter Bauteilmessungen entsprechend umzurechnen.

Tabelle 2: Prozessparameter für den Einsatz des Klebstoffes Sikaflex-268 PowerCure (Quelle: IGP)

<i>Sikaflex 268</i>		
Vorbehandlung	Reinigung	<ul style="list-style-type: none"> • zweifaches Reinigen mit weißem getränktem Papiertuch • 15 min. Ablüftzeit • Gemisch aus 50 % Isopropanol, 45 % VE-Wasser, 5 % Aceton
	Sika Aktivator 100	<ul style="list-style-type: none"> • einmaliger Auftrag mit fusselfreiem getränktem Tuch • mind. 10 Minuten Ablüftzeit • max. 2 h Ablüftzeit
	Sika Primer 207	<ul style="list-style-type: none"> • einmaliger Auftrag mit getränktem Melaninschwamm • mind. 10 Minuten Ablüftzeit • max. 24 h Ablüftzeit
Verarbeitungszeit	@ 23±2°C	• 30 Minuten Verarbeitungszeit zum Fügen der Proben
Auftrag	Sika Power Cure Dispenser	<ul style="list-style-type: none"> • Manueller Auftrag der Klebstoffraupe auf aufgereihte Proben • Entnahme der Proben durch Trennen der Raupe mit gereinigtem, abgelüftetem Spatel
Aushärtung	Umg. Bedingungen	• Raumtemperatur
	Fixierung	• Auflegen von Gewichten (~220 g/Probe)
	Handfestigkeit	• nach 24 h
	Endfestigkeit/Entformung	• nach 5 Tagen



Tabelle 3: Prozessparameter für den Einsatz des Klebstoffes (Quelle: IGP)

<i>Delo AD 840</i>		
Vorbehandlung	Reinigung	<ul style="list-style-type: none"> • zweifaches Reinigen mit weißem getränktem Papiertuch • 15 min. Ablüftzeit • Gemisch aus 50 % Isopropanol, 45 % VE-Wasser, 5 % Aceton
Verarbeitungszeit	@ 23±2°C	• 90 min. Verarbeitungszeit zum Fügen der Proben
Auftrag	Kartuschenpresse Klebstoff in Kartusche	• Manueller mäanderförmiger Auftrag des Klebstoffs auf einzeltem Füge teil
Aushärtung	Umg. Bedingungen	• Raumtemperatur
	Fixierung	• Auflegen von Gewichten (~220 g/Probe)
	Handfestigkeit	• nach 16 h
	Endfestigkeit/ Entformung	• nach 7 Tagen

Tabelle 4: Prozessparameter für den Einsatz des Klebstoffes Körapur 840/45 (Quelle: IGP)

<i>Körapur 840/45</i>		
Vorbehandlung	Reinigung	<ul style="list-style-type: none"> • zweifaches Reinigen mit weißem getränktem Papiertuch • 15 min. Ablüftzeit • Gemisch aus 50 % Isopropanol, 45 % VE-Wasser, 5 % Aceton
Verarbeitungszeit	@ 23±2°C	• 45 min. Topfzeit zum Fügen der Proben
Auftrag	Kartuschenpresse Klebstoff in Kartusche	• Manueller mäanderförmiger Auftrag des Klebstoffs auf einzeltem Füge teil
Aushärtung	Umg. Bedingungen	• Raumtemperatur
	Fixierung	• Auflegen von Gewichten (~220 g/Probe)
	Handfestigkeit	• nach 5 h
	Endfestigkeit/ Entformung	• nach 24 h

smartBOND.A.5.4 - Experimentelle Qualifizierung eines Klebsystems

Zur experimentellen Qualifizierung der Klebsysteme erfolgten und erfolgen noch am IGP sehr umfangreiche Reihenuntersuchungen. Um auch statistische Einflüsse zu berücksichtigen, ergab sich bei der Herstellung und Prüfung ein beträchtlicher Arbeitsaufwand.

- 3 Klebstoffe
- 5 Untergründe
 - geprimierter Stahl (PS)
 - verzinkter Stahl (ZS)
 - lackierter Stahl (IF 750)
 - lackierter Stahl (IF 850)
 - Glas
- 2 Vorbehandlungen
 - gereinigt
 - beflammt
- 5 verschiedene Auslagerungsregime unter Belastung
- jeweils 12 Proben

Zu den sich so ergebenden 1.800 Proben kamen noch ca. 264 Proben für Vorversuche hinzu, die zu großen Teilen von der MEYER WERFT gefertigt, vorbereitet und zur Verfügung gestellt wurden. Zunächst erfolgte eine eingehende Analyse der Oberflächeneigenschaften der potenziellen Fügeflächen, unter anderen der Oberflächenenergie, wie sie in Abbildung 27 im Anhang gezeigt sind.

Die Messungen zur Bestimmung der polaren und dispersiven Oberflächenenergie erlauben Rückschlüsse auf die Benetzbarkeit der vorgesehenen Oberflächen. Somit lassen sich erste Aussagen zur Haftung der hier untersuchten Klebstoffe treffen. Hierbei wird zwischen polaren und dispersivem Anteil unterschieden. Der Zusammenhalt von Atomen und Molekülen, der die Oberflächenenergie einer Substanz bedingt, ist auf unterschiedliche Arten von Wechselwirkungen zurückzuführen⁴. Die Wechselwirkungen aufgrund von zeitlichen Fluktuationen der Ladungsverteilung der Atome oder Moleküle werden als disperse oder Van-der-Waals-Wechselwirkungen bezeichnet. Unter polaren Wechselwirkungen werden Coulomb-Wechselwirkungen zwischen permanenten induzierten Dipolen zusammengefasst. Ein Beispiel für polare Wechselwirkungen sind Wasserstoffbrückenbindungen, wie sie zum Beispiel Wassermoleküle ausbilden. Vergleicht man für zwei Phasen das Verhältnis von dispersen zu polarem Anteil der Grenzflächenenergie, so können daraus Vorhersagen über die Haftung der Phasen abgeleitet werden. Je ähnlicher das Verhältnis der dispersen und polaren Anteile, desto höher sind die Wechselwirkungen zwischen den Phasen. In diesem Fall ist mit einer stärkeren Haftung der beiden Phasen aneinander zu rechnen⁴. Alkane und einige Kunststoffe wie zum Beispiel Polyethylen oder Polypropylen bilden ausschließlich disperse Wechselwirkungen aus. Das ist auch der Grund für die

⁴ Nach <https://www.dataphysics-instruments.com/de/wissenszentrum/disperse-und-polare-anteile-grenzflaechenenergie/>, abgerufen am 23.11.2025

schlechte Benetzbarkeit vieler Kunststoffe durch Wasser⁵. Die Ergebnisse in Abbildung 27 im Anhang zeigen, dass die Oberflächenvorbehandlung durch Beflammung mit Pyrosil® durchgängig für alle Untergründe die größten Werte für die Oberflächenenergie aufweisen, wobei die dispersiven Anteile für alle Untergründe auf etwa dem gleichen Niveau rangieren. Pyrosil® ist ein Verfahren zur Oberflächenbehandlung, bei dem eine sehr dünne und haftfeste Silikatschicht (SiO₂) mittels Flammenpyrolyse auf Materialien wie Glas, Metall oder Kunststoff aufgetragen wird. Dieses Verfahren dient der Haftverbesserung von Kleb- aber auch Lackverbindungen. Laut Anbieter wird es auch bei Klebungen verwendet, die hoher Feuchtigkeit ausgesetzt sind. Außerdem kann das Verfahren zur Adhäsionsverbesserung bei schwierigen Oberflächen eingesetzt werden⁶. So ist auch die Klebung von hydrophoben Glasoberflächen möglich. Die damit erzielte hohe Oberflächenenergie ist nicht zwangsläufig von Vorteil, da Klebstoff und Oberfläche – wie im vorangegangenen Absatz beschrieben – für eine gute Benetzung unterschiedliche Oberflächenenergien aufweisen sollten. Des Weiteren gelten Prozesse mit offener Flamme in allen Industriezweigen, wie auch dem Schiffbau als problematisch. Konkret ist davon auszugehen, dass an Bord eines Schiffes im fortgeschrittenen Fertigstellungsstadium eine offene Beflammung in mechanisierten bzw. automatisierten Prozessschritten aus Gründen des Brandschutzes von den Werften nicht anstandslos akzeptiert wird.

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse zu den Oberflächenenergien wurden vom Projektpartner IGP in Zusammenarbeit mit dem DNV und unter Einbindung der MEYER WERFT sowie A&R die in Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4 genannten Prozessparameter zur Oberflächenvorbehandlung für die verschiedenen Untergründe festgelegt. Erste Ergebnisse aus Voruntersuchungen zur Haftabzugsfähigkeit der untersuchten Klebstoffe auf verschiedenen Untergründen und unterschiedlicher Oberflächenvorbehandlung sind in Abbildung 28 im Anhang dargestellt. Insgesamt zeigt sich in den Diagrammen ein uneinheitliches Bild. Für den im Schiffbau weit verbreiteten Sikaflex-268 PowerCure zeigen sich für die Oberflächenbehandlungen mit Pyrosil® und Plasma zwar recht einheitliche Werte mit vergleichsweise geringer Streuung. Für eine abschließende Bewertung sind jedoch weitere Untersuchungsergebnisse erforderlich, da schiffbauliche Klebverbindungen zumeist nicht oder nur schwer inspizierbar sind und im Falle struktureller Verbindungen unter statischen und veränderlichen Beanspruchungen Lebensdauern von mehr als 30 Jahren gefordert werden. Dem zu Folge sind weitergehende Untersuchungen unter vorausgehender Auslagerung bei verschiedenen Umgebungsbedingungen erforderlich.

Zur Abschätzung der Langzeitfestigkeit unter Einsatzbedingungen, wurden Langzeitversuchsreihen unter genormten, überwachten Laborbedingungen in die Wege geleitet. In Absprache mit DNV wurde eine Versuchsdauer von 1.000 Stunden festgelegt. Das entspricht rund 30 ½ Tagen pro Versuchstyp. Da nach Abschluss eines Versuchstyps die Proben zeitnah, ohne verfälschende Verzögerungen zu untersuchen sind, ergibt sich die Notwendigkeit einer zeitlichen Staffelung der Untersuchungen. Aus diesen logistischen Randbedingungen ergab sich, dass vom Projektpartner IGP eine kostenneutrale Verlängerung erwirkt wurde. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes wird davon ausgegangen, dass die Ergebnisse der nachfolgend vorgestellten Versuchsreihen nach Projektende, Anfang 2026 vorliegen.

⁵ <https://www.kruss-scientific.com/de-DE/know-how/glossar/freie-oberflaechenenergie>, abgerufen am 23.11.2025

⁶ <https://www.bohle.com/de-DE/Pyrosil-Profi-Set/BO5209491>, abgerufen am 23.11.2025

Tabelle 5: Randbedingungen für die Auslagerung von Klebproben zur Analyse des Langzeitverhaltens unter verschiedenen Umweltbedingungen (Quelle: IGP).

<i>Referenz/nicht ausgelagert/ungealtert</i>	
Medium	• /
Dauer	• /
Belastung	• /
Bedingungen	• /
Zyklus	• /
<i>Salzsprühnebel</i>	
Medium	• Salzlösung (Natriumchlorid, NaCl)
Dauer	• 1000 h
Belastung	• Medienbelastung
Bedingungen	• 35 °C; 5 % Konzentration Salzlösung
Zyklus	• kontinuierlich
<i>Klimawechseltest</i>	
Medium	• Feuchtigkeit
Dauer	• 1000 h
Belastung	• Nur Temperatur und Luftfeuchte
Bedingungen	• Wechsel zwischen 70 °C/ 95 % rh und -40 °C/ min. Luftfeuchte
Zyklus	• 12 h Zyklus
<i>kriechfähiges Öl</i>	
Medium	• kriechfähiges Öl
Dauer	• 1000 h, Besprühen an 5 von 7 Tagen
Belastung	• Medienbelastung
Bedingungen	• 23 °C für 3h nach besprühen, danach 35°C
Zyklus	• kontinuierlich
<i>Kriechen</i>	
Medium	• /
Dauer	• 1000 h
Belastung	• statische Zugscherbelastung von 30 % der maximalen Belastung Referenzproben
Bedingungen	• Raumtemperatur
Zyklus	• kontinuierlich

Grundlage für diese Versuchsreihen bildeten umfangreiche Analysen, Ortsbegehungen und Interviews mit allen an Klebprozessen bei der MEYER WERFT beteiligten Mitarbeiter. Darüber hinaus wurden die klimatischen und logistischen Randbedingungen eingehend betrachtet. Insbesondere für die zugehörige Logistikkette der MEYER WERFT und das in alle Teilprozesse eingreifende Qualitätsmanagement ergeben sich bei einer Teilautomatisierung von Klebprozessen einige Änderungen, um die jeweilige Durchgängigkeit konsequent zu gewährleisten. Hierzu wurden auch bereits erste Konzepte für Mitarbeiterschulungen entworfen, die für eine nahtlose Einführung neuer Teilprozesse zwingend erforderlich sind. So entstanden in Zusammenarbeit mit dem DNV die in Tabelle 5 genannten Versuchsrandbedingungen für die Auslagerungen zur Erlangung eines Approval in Principle für die Klebungen und die teilautomatisierten Prozesse festgelegt.

Abschließende Ergebnisse der experimentellen Qualifikation eines Klebsystems (Typenzulassung) lagen zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht vor. Es wird hierzu auf den Abschlussbericht des Projektpartners IGP verwiesen.

II.1.6 AK6 – DEMONSTRATOR-ANLAGEN

smartBOND.A.6.1 - Transfer in eine werftnahe Versuchsumgebung

Festlegung der Rahmenbedingungen für die Übertragung des Klebprozesses

Die Übertragung der entwickelten Prozesse in die Räumlichkeiten der MEYER WERFT erforderte zahlreich hausinterne Abstimmungen mit den verschiedensten, hauseigenen Fachbereichen. So waren neben dem Industriemanagement, die Logistik, das Qualitätsmanagement und u.a. auch das Tochterunternehmen EMS PreCab einzubeziehen. So konnten die verschiedenen Aufgaben und Arbeitsschritte ohne größere Hindernisse abgearbeitet werden.

Entwicklung und Vorbereitung von Probekörpern

Vorbereitend für die in AK5 durchgeführten Untersuchungen zur Charakterisierung der Klebstoffe und Qualifizierung der einzusetzenden Klebsysteme wurden von der MEYER WERFT zahlreiche Probekörper mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen erstellt und zur Verfügung gestellt. Hierbei erfolgten Absprachen mit Klebstoffherstellern, dem DNV sowie dem IGP um eine möglichst reibungslose Abarbeitung des doch sehr umfangreichen Prüfprogrammes zu gewährleisten. Zu den gewählten Abmessungen sowie den Oberflächenbehandlungen ist bereits im Abschnitt zu AK5 berichtet worden. Ferner sei auf die entsprechenden Passagen im Abschlussbericht des Projektpartners IGP zu diesem Forschungsvorhaben verwiesen.

Erstellung eines Prüfplans für hergestellte Klebverbindungen

Klebverbindungen auf Kreuzfahrtschiffen unterliegen einer Reihe verschiedener Beanspruchungen während der Betriebsdauer des Schiffes. Hier sind nicht nur Beanspruchungen auf dem eigentlichen Schiffsbetrieb zu nennen, sondern auch Einwirkungen, die sich durch die Nutzung durch Passagiere und Crew ergeben. Neben mechanischen Einwirkungen ergeben sich auch Einflüsse aus möglicherweise materialschädigenden Medien. Um dem Umstand gerecht zu werden, dass Klebverbindungen im Laufe der ca. dreißigjährigen Betriebsdauer möglicherweise nicht inspiziert werden, wurde in Zusammenarbeit mit dem DNV ein umfangreiches Prüfprogramm festgelegt, welches sich derzeit noch in der Abarbeitung befindet. Hierzu zählen auch Kriechversuche, die sich naturgemäß nicht beschleunigen lassen. Es wird jedoch erwartet, dass die entsprechenden Ergebnisse Anfang 2026 vorliegen und zeitnah in nachgelagerte Forschungs- und Innovationsprojekte einfließen können.

Prozessbegleitende Qualitätssicherung

Die MEYER WERFT verfügt in der stahlverarbeitenden Fertigungskette über ein für solche Betriebe übliches, konsequent durchgängiges Qualitätssicherungskonzept und überwacht dementsprechend alle zugehörigen Prozesse und deren Ergebnisse. Klebtechnische Prozesse und Verbindungen sind entsprechend ihrer Sicherheitsklasse ebenso zu überwachen und zu prüfen. Dabei steht das grundsätzlich zu erstellende Klebprotokoll im besonderen Fokus, da wie bereits in AK4 bzw. AK5 erwähnt Klebverbin-

II EINGEHENDE DARSTELLUNG

Ein wesentlicher Vorteil ist die Ermöglichung einer langlebigen, leichten Verbindung zweier, unter Umständen unterschiedlicher, Werkstoffe, ohne dass die Eigenschaften der Fügepartner z.B. durch Temperatureintrag oder Bohrungen etc. verändert werden. Zudem wird mittels großer, flächiger Klebflächen eine homogene, flächige Kraftübertragung sichergestellt. Klebverbindungen, bei denen die Fügepartner aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehen, verhalten sich anders als solche, bei denen gleichartige Werkstoffe miteinander verklebt werden. Sie weisen bei der Konstruktion und Dimensionierung besondere Problematiken auf, die es zu berücksichtigen gilt.

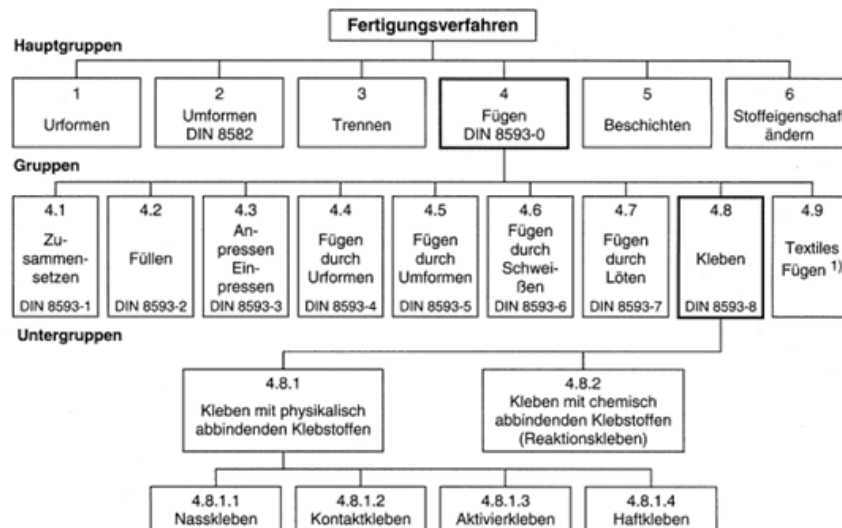


Abbildung 14: Einteilung der Fertigungsverfahren⁸

Klebstoff Sikaflex®-268 PowerCure

Im Zuge dieses Forschungsvorhabens ist unter anderen der Klebstoff Sikaflex-268 PowerCure untersucht worden. Dabei handelt es sich um einen einkomponentigen Polyurethan-Klebstoff, der feuchtigkeitsaushärtend ist. Das Aushärten kann mit kompatibelem Booster des gleichen Herstellers beschleunigt werden. Die Aushärtung ist dabei weitgehend unabhängig von Umgebungsbedingungen wie der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit. Dieses ermöglicht eine hohe Prozesssicherheit und Flexibilität in der Fertigung. Es ist gezeigt worden, dass der speziell für den Schienenfahrzeugbau entwickelte Klebstoff für die Verbindung verschiedener Materialkombinationen, wie Metall – Metall, Kunststoff – Metall, Metall – Glas und Kunststoff – Glas geeignet ist.

Der Sikaflex®-268 PowerCure wird gegenwärtig auf der MEYER WERFT für das Verkleben von Glasfronten und Klebhaltern sowie bei der Fixierung von Passagierkabinen über LNG-Tanks eingesetzt. Er ist MED-zertifiziert (engl.: Marine Equipment Directive). Dabei handelt es sich gemäß der Richtlinie 2014/90/EU um eine gesetzlich vorgeschriebene Konformitätsbewertung für bestimmte Ausrüstungsgegenstände, die auf Schiffen unter EU-Flagge eingesetzt werden. Für Klebstoffe bedeutet das, dass sie sicherheitsrelevante Anforderungen im Hinblick auf Brandverhalten, Rauchentwicklung und Toxizität der entstehenden Gase erfüllen müssen.

⁸ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), DIN 8593-8: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 8: Kleben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.

Der Klebstoff zeichnet sich durch eine sehr gute Witterungsbeständigkeit (UV-Strahlung) sowie eine hohe Resistenz gegenüber einer Vielzahl von Reinigungsmitteln aus. Dies ist besonders für die Verwendung auf Kreuzfahrtschiffen vorteilhaft, wo mechanische Belastbarkeit und Umweltbeständigkeit gefordert sind. Der Sikaflex-268 PowerCure ist allgemein gegenüber Süßwasser, Meerwasser, verdünnte Säuren und verdünnte Laugen sowie gegenüber einer Vielzahl von Reinigern beständig. Selbst gegenüber den auf Kreuzfahrtschiffen eingesetzten Betriebsstoffen in Form von Kraftstoffen und Mineralölen gilt er als beständig. Nicht beständig ist der Klebstoff hingegen gegenüber organischen Säuren, Glykol, konzentrierten Mineralsäuren und Laugen oder Lösungsmitteln.

Die Materialkennwerte des Sikaflex-268 PowerCure sind dem Produktdatenblatt⁹, den erweiterten Produktinformationen¹⁰ und den Material Cards des calcbond-Tools¹¹ zu entnehmen. Da vergleichsweise kleine Verformungen der Klebschicht angestrebt werden, sind für ein linearelastisches Materialmodell insbesondere die mechanischen Kennwerte im elastischen Bereich (0,5 – 5 % Dehnung) von Bedeutung. Die DIN 6701-3 gibt zur experimentellen Bestimmung der Materialkennwerte jeweils den exakten Versuchsaufbau vor. Für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls E , der Querkontraktionszahl ν und der Festigkeitskurve sind vom Klebstoffhersteller und im Rahmen des Forschungsvorhaben vom Projektpartner IGP Versuche an der in **Abbildung 15** dargestellten, einfach überlappten Zugscherprobe durchgeführt worden.

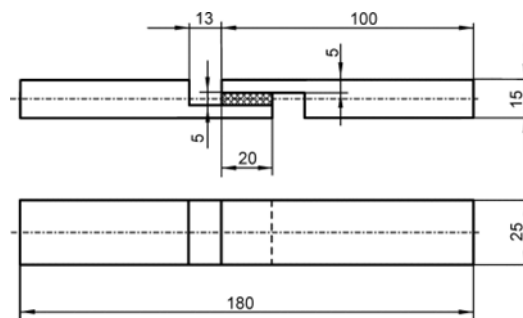


Abbildung 15: Einfach überlappte Zugscherprobe zur Prüfung der Verbundfestigkeit mit niedrigfesten Klebstoffen¹²

Der Zugscherversuch an der einfach überlappten Zugscherprobe liefert im elastischen Bereich bei gewöhnlichen Prüfbedingungen (23 °C, 50 % relative Feuchte) für den Verbund aus Fügepartnern und Klebstoff einen Elastizitätsmodul von 2,7 MPa, eine Zugfestigkeit von 7,4 MPa und eine Bruchdehnung von 578 %^{9,10}. Die Zugscherfestigkeit beträgt 5,1 MPa und die Schubdehnung beim Bruch 526 %. Die Querkontraktionszahl ν ist nicht explizit gemessen, sondern vielmehr mit 0,48 approximiert worden¹¹. Für annähernd inkompressible Materialien kann ein Grenzwert von $\nu \approx 0,50$ angesetzt werden, wes-

⁹ Sika Deutschland CH AG & Co KG, „Produktdatenblatt Sikaflex®-268,“ Sika Deutschland CH AG & Co KG, 2025.

¹⁰ Sika Services AG, „Additional Product Information: Mechanical Properties And Repair Sikaflex®-268,“ Sika Services AG, 2022.

¹¹ ar engineers GmbH, „calcbond-Tool 1.9.8,“ ar engineers GmbH, Hamburg.

¹² Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), DIN 6701-3: Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen - Teil 3: Leitfaden zur Konstruktion und Nachweisführung von Klebverbindungen im Schienenfahrzeugbau, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.

halb die innerhalb des calcbond-Tools getroffene Approximierung physikalisch nachvollziehbar und zulässig ist¹¹. Der Schubmodul lässt sich schlussendlich anhand des experimentell ermittelten Elastizitätsmoduls und der angenäherten Querkontraktionszahl berechnen¹³.

Das Produktdatenblatt gibt im Allgemeinen mit einer Zugfestigkeit von 6 MPa, einer Reißdehnung von 500 % und einer Zugscherfestigkeit von 4,5 MPa etwas konservativere Werte an. Es verweist als Quelle für die leicht abweichenden Zugfestigkeit und Reißdehnung auf die DIN EN ISO 527-2 und für die Zugscherfestigkeit auf die DIN ISO 4587. Bei Materialprüfungen gemäß der DIN EN ISO 527-2 werden nicht wie bisher die Eigenschaften des Verbundes aus Fügepartnern und Klebstoff ermittelt, sondern anhand der in **Abbildung 16** gezeigten Klebstoffsubstanzzugprobe lediglich die Materialkennwerte des reinen Klebstoffs an sich.

Für die weiteren Berechnungen innerhalb dieses Projektes werden die Materialkennwerte aus dem einfach überlappten Zugscherversuch verwendet, da diese Werte die Verbundeigenschaften der gesamten Klebverbindung abbilden und nicht nur die idealisierten Reinstoffeigenschaften des Klebstoffs.

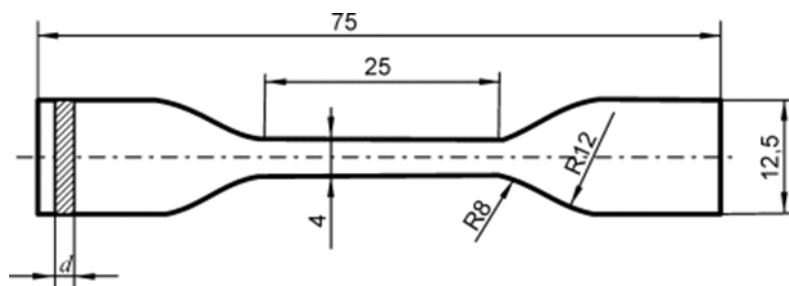


Abbildung 16: Klebstoffsubstanzzugprobe vom Typ S2 zur Prüfung der Materialkennwerte des Klebstoffs¹²

smartBOND.A.6.4 – Demonstratordesign

Auf der MEYER WERFT hat sich die Arbeitsweise etabliert, bereits fertig ausgestattete Kabinen in das Schiff einzubringen. Diese Fertigungskabinen werden, wie in **Abbildung 17** gezeigt, bei dem Tochterunternehmen EMS PreCab GmbH (EPC) am Fließband produziert. Kabel- sowie Lüftungsanschlüsse sind bereits installiert und müssen an Bord nur noch angeschlossen werden. Gleiches gilt für die Nasszelle. Eine gewöhnliche Passagierkabine hat Abmessungen (L x H x B) von etwa 6.300mm x 2.600mm x 2.900mm und ein Rohgewicht von etwa 2 Tonnen. Die Basis der Kabine bildet ein stählerner Grundrahmen, entlang dessen die Wände der Kabine positioniert werden. Eine erste Lagesicherung erfolgt für gewöhnlich durch das Verschweißen des Kabinengrundrahmens mit der Decksplatte. Ein Boden wird erst nach der Fixierung der Kabine an ihrer vorgesehenen Position an Bord aufgebaut. Dazu werden Estrich und Ausgleichsmasse im Grundrahmen der Kabine auf dem Stahldeck aufgetragen.

Hauptaufgabe in diesem AK war es, für die abschließenden Testläufe der entwickelten Systeme realitätsnahe Randbedingungen für die Anwendungsfälle der MEYER WERFT bereit zu stellen. Diese sollten die beengten Platzverhältnisse beim Kabinenkleben als auch die Gegebenheiten beim Scheibenkleben

¹³ C. Spura, B. Fleischer, H. Wittel und D. Jannasch, Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung, 26. Auflage Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2023.

abbilden. Dabei handelt es sich um Anwendungen, die im Gegensatz der Beispiele des Projektpartners A&R mehr oder minder ausschließlich im Inneren des Schiffes stattfinden. Hieraus ergaben sich besondere Herausforderungen für den Einsatz der Robotertechnik, wie z.B. die räumliche Nähe zu manuell auszuführenden Arbeiten oder der Koordination der für die verschiedensten Arbeiten erforderlichen Zuleitungen für Elektrizität oder andere Medien. Die in diesem Zuge gewählte, wirtschaftlichste und logistisch günstigste Lösung bestand in der Weiterverwendung einer Modellkabine aus dem vorausgegangenen Forschungsvorhaben EcoCab. Diese wurde zunächst basierend auf CAD-Daten umkonstruiert und an die aus der neuen Nutzung resultierende neue Beanspruchungssituation konstruktiv angepasst. Auf dieser Basis erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Tochterfirma EMS PreCab der Umbau der Kabine und die Vorbereitung der abschließenden Probeläufe des Robotersystems.



Abbildung 17: Fließbandfertigung der Passagierkabinen bei EPC: Bereits vorinstallierte Verkabelung (oben) und der zu verschweißende Kabinengrundrahmen (unten) (Quelle: EMS PreCab)

Die LE Cab (Low Energy Cabin) aus EcoCab wurde ursprünglich als komplett ausgestattete Kabine gebaut. Der Unterschied zu derzeit standardmäßig verbauten Kabinen besteht in einer autarken Stromversorgung und dem Einsatz von Leichtbau-Komposit-Materialien für die Kabinenhülle. Der Demonstrator für die beiden Klebanwendungen wurde digital aufbereitet, an die Besonderheiten des Robotersystems angepasst und dem Projektpartner zu Planungszwecken zur Verfügung gestellt.

smartBOND.A.6.5 – Demonstratorbau

Für die Demonstration in smartBOND wurde sämtliches Mobiliar und alle elektrischen Komponenten sowie die Schiebtür zum Balkon aus der Musterkabine entfernt. Als Verstärkung und zur Nachbildung eines unbehandelten Decksblechs wurde ein 5 mm Stahlblech eingebracht und mit Sikaflex-268 Power-Cure Powercure auf dem Kompositboden verklebt. Zusätzlich wurden auf einer Länge von 1,5 m die Wand- und Deckenkonstruktion der Kabine zum Balkon hin entfernt, um das AGV des Partners IBG in der Kabine positionieren zu können (Abbildung 18).

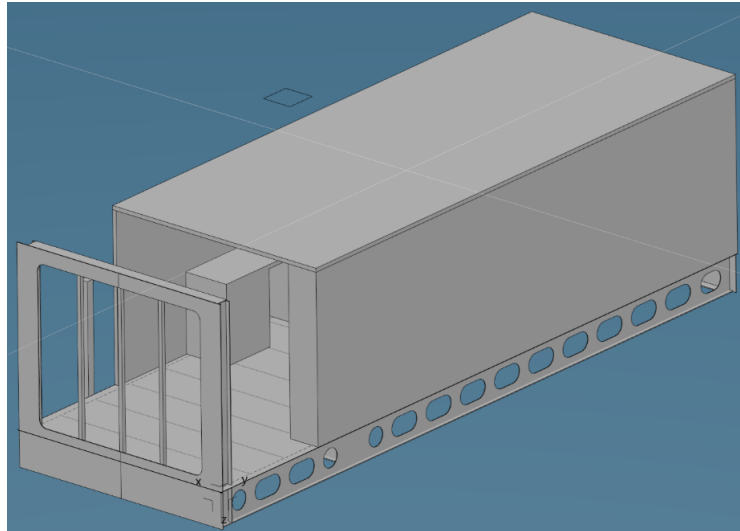


Abbildung 18: Demo-Kabine in der Gesamtansicht (Quelle: MEYER WERFT)

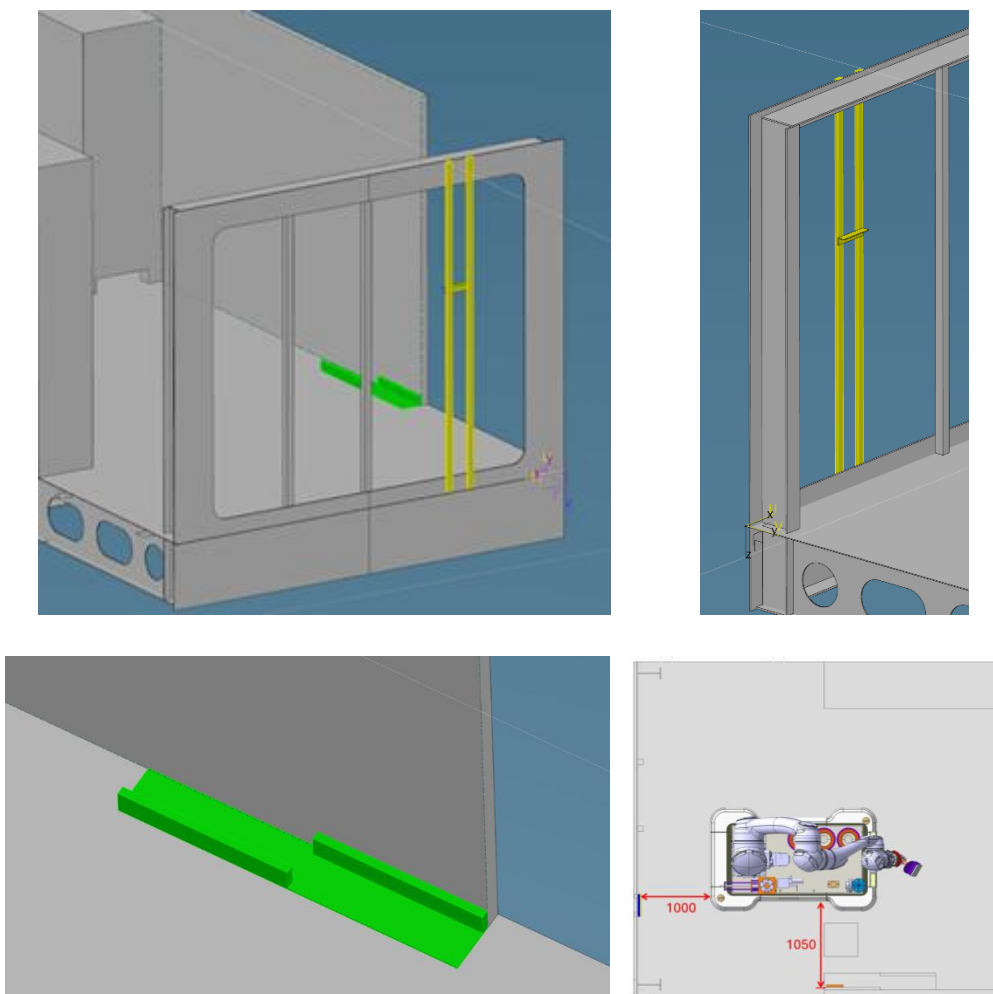


Abbildung 19: Überblick Anwendungsfälle, Rahmenkonstruktion Scheibe und Simulation von Deck und Kabinenrahmen sowie Position des Robotersystems in der Kabine (Quelle: MEYER WERFT)

In Abbildung 19 sind die beiden Anwendungsfälle der MEYER WERFT hervorgehoben. Die gelb dargestellte Konstruktion dient der beispielhaften Verklebung einer Glasscheibe. Dabei wird die Scheibe auf dem horizontal montierten L-Winkel gesetzt und so gegen Verrutschen nach unten gesichert. Im Falle der grün markierten Konstruktion für die exemplarische Verklebung von Kabinen am Decksblech mittels eines Blechwinkel, ist die Wiederverwendbarkeit durch Wenden gut ersichtlich.

smartBOND.A.6.6 - Auswertung und Validierung der Demonstration

In diesem Arbeitspaket wurden die Resultate aus A.6.5 laufend bewertet und notwendige Änderungsmaßnahmen aufgezeigt und der Entwicklungsverlauf dokumentiert.

Auswertung der durchgeführten Klebanwendung unter Berücksichtigung der im Vorfeld festgelegten Kriterien und Aufzeigen von notwendigen Änderungsmaßnahmen im Demonstrationsverlauf

Zunächst erfolgte eine grundlegende Auswertung der Ergebnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen zu den ausgewählten Klebanwendung unter Berücksichtigung der in AK1 in Form des Lastenheftes festgelegten Kriterien. In besonderem Fokus standen dabei die Praktikabilität des Einsatzes von Robotersystemen innerhalb eines in den letzten Ausbaustufen befindlichen Kreuzfahrtschiffes und der mittels des entwickelten Klebstoffapplikationssystems erzielbaren Klebresultate hinsichtlich ihrer Fehlerfreiheit und zu erwartenden mechanischen Eigenschaften. Auf Basis von am IGP durchgeführten Vorversuchen und ersten Ergebnissen aus den Auslagerungsversuchen wurde folgendes, teilautomatisiertes Regime für die Anwendungsfälle der MEYER WERFT gemeinsam mit dem DNV festgelegt.

- Oberflächenreinigung mit Isopropanol
- 2 Minuten Ablüftzeit
- Anschleifen der Oberflächen mittels Schleifvlies
- Erneutes Reinigen der Oberflächen mit Isopropanol
- 2 Minuten Ablüftzeit
- Oberflächenvorbereitung mit Aktivator Sika 100
- 10 Minuten Ablüftzeit
- Primern der Oberflächen mit Sika 207
- 10 Minuten Ablüftzeit
- Aufbringen einer definierten Menge des Klebstoffs Sikaflex-268 PowerCure Powercure
- Fügen innerhalb von 30 Minuten nach Aufbringen des Klebstoffs

Vorbereitend zu diesen Arbeiten erfolgte im Projektverlauf eine frühe Abstimmung mit dem Projektpartner IBG, um die logistischen und technischen Voraussetzungen für den Einsatz im Werftumfeld zu gewährleisten. So konnte eine iterative Erprobung der Teilsysteme vorgenommen werden, sodass eine Probenfertigung zur Erlangung eines Approval in Principle (AiP) in dieser Arbeitsumgebung ermöglicht wurde.

Validierung der Anlagentechnik in der entwickelten Demonstratorumgebung

Die abschließende Validierung der Einsatzfähigkeit des entwickelten Robotersystems fand im schiffbaulichen Umfeld der MEYER WERFT statt. Hier wurden nach mehreren Iterationen alle Teilprozesse, unter den vom IGP und DNV vorgegebenen Prozesszeiten und Randbedingungen mehrfach erfolgreich erprobt. So konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Technologie unter den speziellen Arbeitsbedingungen eines stahlverarbeitenden Betriebs - einer Werft - einsetzbar und die räumliche Nähe teilautomatisiert stattfindender Tätigkeiten zu manuell auszuführenden Arbeiten beherrschbar ist. Ferner wurden in dieser Demonstrationsumgebung die für die Erteilung eines Approvals in Principle (AiP) erforderlichen Probekörper zur Durchführung von Langzeitversuchen am IGP erstellt.



Abbildung 20: Robotersystem in der Kabine und verschiedene Arbeitsschritte zur Vorbereitung des Klebstoffauftrags und der eigentliche Klebstoffauftrag (Quelle: MEYER WERFT)

Die im Nachgang der Probenerstellung eingeleiteten Auslagerungen der Proben unter verschiedenen Randbedingungen dauerten zum Zeitpunkt dieser Berichtserstellung noch an, sodass dazu noch keine abschließenden Aussagen getroffen werden können. Der derzeitige Stand der Prüfungen spricht jedoch dafür, dass die seitens des IGP und des DNV geforderten Mindestwerte der Materialkennwerte erreicht werden, sodass aus technologischer Sicht mit einer Zulassung zu rechnen ist.

II.1.7 AK7 – GESAMTBEWERTUNG UND ZULASSUNG

Im Arbeitskomplex 7 wurde die im Gesamtprojekt entwickelte, ganzheitliche Lösung verifiziert und validiert. Der Validierungsprozess umfasste im Wesentlichen drei Aspekte:

- Durchführung von Studien mittels des Simulationssystems STS,
- ein eingehendes Life Cycle Performance Assessment (LCPA) sowie
- Maßnahmen zur Zulassung und Akzeptanz des entwickelten Lösungsansatzes.

smartBOND.A.7.1 - Erstellung eines Digital Twins

In Arbeitspaket 7.1 wurden zunächst in enger Zusammenarbeit mit dem CMT auf Basis eines Fragenkatalogs die relevanten Informationen der betroffenen Prozessketten der MEYER WERFT zusammengetragen und analysiert (Anhang, Abbildung 29). Diese setzen sich aus Daten einzelner Prozessschritte, wie Zeiten, eingesetzten Materialien und Hilfsstoffen sowie den dazugehörigen Transportwegen und -zeiten auf dem Werftgelände und innerhalb des Schiffes zusammen.

In diesem Zusammenhang wurden für Baustellenprozesse typische und zumeist individuelle Informationen zur Vor- und Nachbereitung der Arbeitsplätze und Wartungsarbeiten, wie z. B. Intervalle, benötigte Parameter, Personalressourcen und Dauer der Maßnahmen berücksichtigt. Zur realitätsnahen Modellierung flossen weiterhin Aspekte der Arbeitsvorbereitung und -organisation, wie Schichtkalender, Arbeitszeiten, Werkskalender und Pausenregelungen ein. Schließlich wurden auch potenzielle Störungen und Art der entsprechend erforderlichen Nacharbeit erfasst.

Nach Aufbereitung dieser prozessspezifischen Datensätze und ihrer logischen Verknüpfung innerhalb der Prozessketten erfolgte seitens CMT zur Dokumentation der modellbeeinflussenden Randbedingungen die Ausarbeitung in Form eines recht umfangreichen Pflichtenheftes (Anhang, Abbildung 30). Auf Basis dieses Pflichtenheftes erfolgte die Umsetzung in einen digitalen Zwilling zur Simulation der derzeitigen Ist-Prozesse. Nach Abgleich der Simulationsergebnisse und Kalibrierung der Modelle durch Korrektur der Eingangsdaten anhand zusätzlich aufgenommenen Realwerte aus Einzelprozessen erfolgte die virtuelle Teilautomatisierung der Prozessketten für das Scheiben- und Windschirmkleben sowie das Setzen geklebter Kabinenwinkel.

smartBOND.A.7.2 - Simulationsstudien zu repräsentativen schiffbaulichen Anwendungen

Die durchgeführten Simulationsstudien erfolgten mit dem Siemens-System Plant Simulation unter Verwendung des speziell für den Schiffbau entwickelten Bausteinkastens "Simulation Toolkit for Shipbuilding (STS)" der Firma SimPlan AG. Diese Arbeiten hatten zum Ziel, die im Gesamtvorhaben erarbeiteten Lösungen zu analysieren und zu validieren sowie effiziente Prozesse für die Werft durch optimierte Ressourcennutzung und minimierte Leerlaufzeiten auf Grundlage verifizierter lauffähiger Simulationsmodelle zu entwickeln. Hierzu wurden verschiedene Strategien für die unterschiedlichen Prozessketten

ten unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit und Auslastung der Ressourcen sowie das Zusammenwirken mit etablierten vor- und nachgelagerten Prozessen untersucht. Durch Variation der Simulationsexperimente wurden Zielgrößen, wie

- Durchlaufzeit,
- Personalbedarf,
- Arbeiten mit hohem Schwierigkeitsgrad, sowie
- die Auslastung

der benötigten Fertigungsmittel untersucht. Die MEYER WERFT stellte hierbei den direkten Praxisbezug sicher, durch:

- Einbringen von Erfahrungen aus den Demonstratorversuchen und Validierung von Teilergebnisse in der Demonstrationsumgebung
- Diskussion der Schlussfolgerungen, Ableiten von Empfehlungen für neue Herangehensweisen in der Praxis

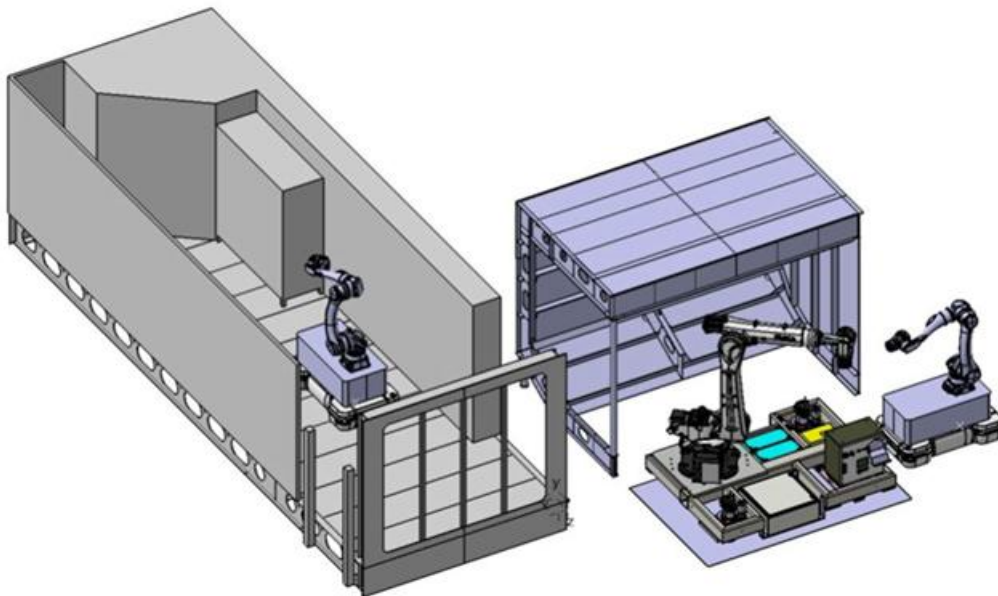


Abbildung 21: Beispiele zur räumlichen Situation für die Robotersysteme in den Demonstrationsumgebungen der MEYER WERFT und A&E (Quelle: MEYER WERFT)

Zur Entwicklung valider Simulationsmodelle insbesondere für die klebtechnische Lagesicherung von Kabinen erfolgten diverse Begehungen in den entsprechenden Bereichen der MEYER WERFT und bei EMS PreCab. Diese erfolgten, um alle relevanten fertigungstechnischen Details und Randbedingungen zu identifizieren. Neben technologischen Aspekten fanden hier auch Aspekte des Qualitätsmanagements Berücksichtigung. Hierzu wurde ein Quality Check integriert, bei dem eine Zufallszahl mit Gleichverteilung generiert wird. Basierend auf der Wahrscheinlichkeit wird innerhalb des Simulationsmodells

ein „Rework process“ ausgelöst. Dieser Quality Check basiert auf einer Tabelle mit möglichen Fehlern und deren Wahrscheinlichkeiten, wie sie u.a. im AK1 identifiziert wurden.

Klebtechnische Prozesse weisen gegenüber den auf Werften üblicherweise eingesetzten Schweißprozessen deutlich andere Taktzeiten auf. Vor diesem Hintergrund fanden umfangreiche Untersuchungen zu verschiedenen Klebstrategien statt. Hierbei wurden Prozessrouten identifiziert, die durch intelligente Parallelisierung und Bereitstellung von Materialpuffern die zeitliche Optimierung der gesamten Prozesskette unter Berücksichtigung von Transporten zwischen den Produktionsstätten der Kabinenfertigung und den Montageplätzen an Bord erlauben, Abbildung 21. Die Simulationsmodelle wurden auf der Basis von CAD-Daten, Decksplan, M-BOM, Reihenfolge der Montage, Fehlerklasse und Prozesszeiten erstellt. Auf dieser Basis erfolgte die Konvertierung von 3D-Dateien, die Definition der internen Logik im Modell, Process Constraints und eine Was-wäre-wenn-Analyse. Anschließend wurde die Modellierung der Simulation sowie die Durchführung von Simulationsexperimenten mit Hilfe einer Versuchsplanung ausgeführt, deren Ergebnisse ausgewertet und Optimierungen auf diesen Erkenntnissen basierend vollzogen. Diese Entwicklung der entsprechenden Simulationsmodelle erfolgte iterativ in enger Abstimmung zwischen dem CMT und der MEYER WERFT und weisen für bestehende und zukünftige Prozessketten eine sehr hohe Realitätsnähe auf.

Untersucht wurden zwei etablierte Klebprozesse der MEYER WERFT, das Scheibenkleben und das Kleben von Kabinenwinkeln. Für beide Prozesse gilt, dass auf Grund der Größe der zu verbauenden Komponenten und Hilfsgeräte eine gewisse Zugänglichkeit erforderlich ist. Hinzu kommt, der im Vergleich hohe Zeitaufwand beim klebtechnischen Fügen. Somit wurde für beide Prozessketten angenommen, dass sie im 3-Schicht-Betrieb stattfinden.

Kleben von Kabinenwinkeln

Auf Basis der Simulationsergebnisse konnte für das teilautomatisierte Kleben unter Verwendung des Robotersystems ein mittlerer Durchsatz von 132 Scheiben pro Woche ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der auf fundierten Schätzungen und Erfahrungen von Fachleuten beruhenden Fehlerwahrscheinlichkeiten beträgt die mittlere Nacharbeitszeit 11 Stunden pro Woche.

In den dreistufigen (-50%, 0%, + 50%), vollfaktoriellen Simulationen ohne Berücksichtigung möglicher Fehler zeigte sich, dass die Prozesse „MountRobot“, der den Transport, die Bereitstellung von Strom und Konnektivität sowie die Vorbereitung des Arbeitsplatzes umfasst und „Join“, also das eigentliche Fügen den stärksten Einfluss auf den Durchsatz haben und dass der Durchsatz im Klebprozess durch die Verkürzung der Transportzeit der Kabinen erhöht werden kann. Der Entscheidende Prozesszeitraum zur Verkürzung des Gesamtprozesses liegt also außerhalb des eigentlichen Klebens.

Die analog durchgeführten, ebenfalls dreistufig (- 5%, Referenzwert, + 5%), vollfaktoriellen Simulationen zeigten, dass Fehler Nr. 11 (2. Fügeteil konnte nicht in der Verarbeitungszeit des Klebstoffes gefügt und fixiert werden) den größten Einfluss sowohl auf die Verringerung des Durchsatzes als auch auf die Erhöhung der Nachbearbeitungszeit hat. Hieraus ist zu schließen, dass die Zugänglichkeit der Klebestellen hier den größten Einfluss auf den Gesamtdurchsatz hat.

Kleben von Glasscheiben

Die Simulationsergebnisse für das Kleben von Glasscheiben ergeben einen mittleren Durchsatz von 60 Stück pro Woche, wobei die mittlere Nacharbeitszeit 8,9 Stunden beträgt. Auch hier wurde zunächst

ohne den Einfluss von Fehlern gerechnet, um anschließend Simulationen unter der Annahme der bereits genannten Fehlerwahrscheinlichkeiten durchzuführen.

Die vollfaktoriellen, ebenfalls dreistufig (-50%, 0%, + 50%) durchgeführten Simulationen ohne Fehlerinfluss zeigten, dass die Prozesszeit für die Klebstoffapplikation den stärksten Einfluss auf den Durchsatz hat. Dieser Einfluss ist von besonderer Bedeutung, da die Geschwindigkeit beim Auftrag des Klebstoffes Einfluss auf die Verteilung bzw. Benetzung der Klebflächen und somit auf die Güte bzw. Festigkeit der späteren Klebverbindung besitzt.

Die vollfaktoriellen, dreistufigen (- 5%, Referenzwert, + 5%) Simulationen unter Einfluss der Fehlerwahrscheinlichkeiten zeigten, dass Fehler Nr. 11 (2. Füge­teil konnte nicht in der Verarbeitungszeit des Klebstoffes gefügt und fixiert werden) den größten Einfluss auf die Verringerung des Durchsatzes besitzt. Somit zeigt sich auch hier, dass die Zugänglichkeit der Klebestelle einen maßgeblichen Einfluss auf den Gesamtdurchsatz hat.

Diese Ergebnisse bilden eine sehr gute Grundlage, um in die konkretere Umsetzungsplanung zukünftiger Prozessinfrastrukturen zu gehen.

smartBOND.A.7.3 - Life Cycle Performance Assessment

Life Cycle Performance Assessments (LCPA) wurden eingesetzt, um die Wirtschaftlichkeit und die Umweltfreundlichkeit der smartBOND-Lösungen und der mit ihrer Hilfe gefertigten Produkte zu bewerten. Die MEYER WERFT beteiligte sich hier im Wesentlichen durch:

- Unterstützung bei der Quantifizierung der Kosten
- Bereitstellung von Daten zum LCPA

Grundlagen des Life Cycle Performance Assessments (LCPA) und des Life Cycle Costings (LCC)

Eine detailliertere Definition des Zeiteinsparungspotenzials der Demonstratoren wurde anhand von Simulationen und der Erfassung bzw. Abschätzung der Zeiten der Prozesse vorgenommen. Die Abschätzung von Leistungen und Einschaltzeiten einzelner Verbraucher erfolgte auf Basis von Datenblättern der in den untersuchten Prozessen einzusetzenden Maschinen. Auf dieser Basis wurden die Ökobilanzen der Demonstratoren erstellt und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (LCC) erarbeitet. Hierzu erfolgten auch Untersuchungen zu alternativen Szenarien, insbesondere in Kombination verschiedener Prozesse und Kapazitätserweiterungen zur Optimierung von Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz. Die Abschätzung potenzieller Zeiteinsparungen erfolgte anhand von Simulationen der Vorgänge Oberflächenvorbereitung, Reinigen, Klebstoffauftragung. Dabei wird eine Zeiteinsparung von 32% angenommen. Auf Basis dieser Betrachtungen ergab sich beim Scheibenkleben ergibt sich nach 363 Tagen ein höherer Kapitalwert bzw. Net Present Value (NPV). Im Gegensatz dazu ergaben sich aufgrund der geringen Anzahl werden beim Kabinenkleben nur geringe Kosteneinsparungen. Eine gesteigerte Wirtschaftlichkeit ließe sich erzielen, wenn für beide Anwendungsfälle dieselbe Anlagentechnik eingesetzt würde. Hieraus ergäben sich jedoch ca. 10% höhere Investitionskosten.

Grundlagen für die Durchführung des LCPA

Als Bewertungsgrundlage für die LCPA wurde der EU-Strommix und der deutsche Industriestrompreis des Jahres 2024 herangezogen. Die Verbräuche wurden aufgrund von Nennleistungen und abgeschätzten Einschalt Dauern ermittelt. Die Abnahmeleistung des am Demonstrator eingesetzten Roboters beträgt 500 W (während der Einschaltdauer der Simulation), die Leistung der Ladestation der Kartuschenpresse beträgt 90 W bei einem permanenten Ladevorgang des Akkus und die Leistung des Schweißtrafos (AR) beträgt 7.390 W (die Einschaltdauer wurde aus Schweißgeschwindigkeit von 2,5 m/min und Nahtlänge ermittelt). Als Key Performance Indicators (KPI) zur Bewertung dienten der kumulierte Energieverbrauch (CED), das Treibhauspotential (GWP), das Versauerungspotential (AP), das Aerosolbildungspotenzial (AFP) sowie das Eutrophierungspotential (EP).

Betrachtung der Ökobilanz des Windschirm- und Kabinenklebens

Beim automatisierten Windschirmkleben und Kabinenkleben ergibt sich ein etwa doppelt so hoher Energieverbrauch gegenüber der manuellen Variante. Dieses ist im Wesentlichen auf den Energieverbrauch des Robotersystems zurückzuführen. Die Emissionssteigerung verhält sich äquivalent zum Energieverbrauch. Insgesamt bewegen sich die Emissionen aber auf einem geringen Niveau und sind deshalb gut durch die Verwendung von Strom aus regenerativen Quellen kompensierbar.

Gesamtbewertung mit Fokus auf Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz

Für die szenariobasierte Simulation wurde ein Datenmodell durch das CMT aufgebaut und weiterentwickelt, dass der Entwicklung effizienter Werftprozesse dient. Hierzu wurden Qualitätsmanagement-Daten der MEYER WERFT in die Simulationen eingebunden, sowie Schichtmodelle und Pausen berücksichtigt. Des Weiteren erfolgte eine Skalierung der Anwendungsfälle, welche wie eine kombinierte Anwendung einen großen Einfluss zeigte. Das Kernergebnis Untersuchungen zeigt, dass bei Substitution von Schweißprozessen durch teilautomatisierte Klebprozesse nur 1/6 der Schadstoffe emittiert werden.

Eingehende Informationen zu diesen beim CMT durchgeführten umfangreichen Untersuchungen sind dem entsprechenden Abschlussbericht des Projektpartners zu diesem Verbundvorhaben zu entnehmen.

smartBOND.A.7.4 - Zulassungs-, Akzeptanz- und Regularienfragen

Arbeitspaket 7.4 befasste sich mit der Regelkonformität und Zulassungsfähigkeit der in smartBOND entwickelten Lösungen und der Nutzung der gewonnenen Erfahrungen, um Vorschläge zur Weiterentwicklung von Regelwerken und Richtlinien bereit zu stellen. Darüber hinaus wurde in der Fachwelt ein Bewusstsein für den in smartBOND erreichten Stand der Technik geschaffen.

Alle vorbereitenden Maßnahmen für zur Erreichung eines Approval in Principle (AIP) unter Integration des werfteigenen Qualitätsmanagementkonzeptes wurden getroffen. Hierzu zählten die Beschaffung, Sichtung und Aufbereitung der erforderlichen Unterlagen sowie die Terminkoordination mit der Klassifikationsgesellschaft.

II.2 POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES

Die Verwendung der Personalkosten (Pos. 0837), welche die größte Position des zahlenmäßigen Nachweises ausmachen, ergibt sich aus den oben aufgeführten Darstellungen der Arbeitspakete. Daraus geht hervor, dass zur Entwicklung der Prozesse und Algorithmen sehr umfangreiche System- bzw. Prozessanalysen durchgeführt wurden. Dabei wurden sämtliche Stakeholder der Werft einbezogen, was gegenüber der Vorkalkulation den größten Kostenanstieg mit sich brachte. Die Kosten für die Miete des Cobot-Systems sowie der klebtechnischen Ausstattung (0847) lagen im geplanten Kostenrahmen. Alle weiteren Positionen des Verwendungsnachweises fielen geringer als angenommen aus, sodass die Gesamtkosten des Vorhabens nur geringfügig überschritten wurden.

II.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT

Um weiterhin eine weltweite Technologieführerschaft im Schiffbau einnehmen zu können, muss die MEYER WERFT im Bereich der Produktionstechnik genauer Automatisierung und Fügetechnik Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchführen. Mit den Automatisierungslösungen, die in diesem Projekt erarbeitet wurden, kann die Effizienz in Ausrüstungsprozessen erhöht werden und dadurch die Wettbewerbsfähigkeit gesteigert werden. Die erzielten Verbesserungen in der Fügetechnologie Kleben ermöglichen der Werft nicht nur die untersuchten Anwendungsfälle zu verbessern, sondern auch andere Technologien, allen voran Composite-Leichtbau, auf der Werft einzuführen (unter Beachtung weiterer, für den Composite-Leichtbau relevanten Vorschriften).

II.4 VERWENDBARKEIT DER ERGEBNISSE

Mit den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt smartBOND werden die untersuchten Klebprozesse mit Hilfe der Prozessqualifizierung für einen automatisierten Prozess auf einen Stand gebracht, dass eine Zulassung kurzfristig durchgeführt werden kann.

II.5 WÄHREND DES VORHABENS BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT BEI ANDEREN STELLEN

Während des Vorhabens sind keine wesentlichen Fortschritte mit direktem Einfluss auf das Projekt smartBOND bei anderen Stellen bekannt geworden.

II.6 ERFOLGTE UND GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Die MEYER WERFT hat den Zwischenstand und Fortschritt des Projektes smartBOND im Rahmen des Projektabschlusses zusammen mit den Projektpartnern den VSM-Arbeitskreisen *Fertigung* und *Industrial Engineering* vorgestellt und das entwickelte Robotersystem im Versuchsfeld einem interessierten Teilnehmerkreis live vorgeführt. Darüber hinaus wurden die Projektpartner dazu ermutigt und unterstützt, das Forschungsvorhaben und die erzielten Ergebnisse im Zuge von Messen, Ausstellungen, Fachvorträgen und Fachartikeln bekannt zu machen.

III ERFOLGSKONTROLLBERICHT

III.1 BEITRAG DES ERGEBNISSES ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN

Das Forschungsvorhaben smartBOND wurde im Rahmen des Maritimen Forschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) durchgeführt. Es hat in den Bereichen Flexible und automatisierte Produktionstechnik, Einsatz innovativer Fertigungsverfahren und Materialien sowie Digital vernetzte Produktion wertvolle Erkenntnisse zur Säule Produktion maritimer Systeme geliefert. Das übergeordnete Ziel des Verbundvorhabens war die Etablierung der Klebtechnik im Schiffbau durch ein teilautomatisiertes, mobiles System, das durch ein integriertes, ganzheitliches QM-System eine erhöhte Akzeptanz in der Branche schafft. Somit hat es zu einem Erkenntnisgewinn zu den strategischen Zielen des Forschungsprogramms mit den Schwerpunkten Produktivitäts- und Qualitätssteigerung in Verbindung mit gesteigerten Wiederholgenauigkeiten bei teilweise verkürzten Durchlaufzeiten beigetragen. Das Vorhaben bewegte sich somit entlang der Innovationspfade der modularen wandlungsfähigen Produktionsanlagen, Steigerung des Automatisierungsgrades, SMART FACTORY-Technologien und alternative Fertigungs- und Fügetechnologien. SmartBOND hatte somit Bezug zu drei Querschnittsthemen des Forschungsprogramms MARITIME.green, MARITIME.smart und MARITIME.safe.

III.2 ERGEBNISSE DES VORHABENS

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ERGEBNISSE

Im Zuge des AK1 erfolgte in intensiver Zusammenarbeit der Projektpartner unter Leitung von A&R die Erstellung eines Anforderungskataloges, wobei auf die individuellen Gegebenheiten der beiden beteiligten Werften eingegangen wurde. Diese ergeben sich aus den sich unterscheidenden Produktspektren und entsprechend in Teilen unterschiedlichen Baumethoden. Aufbauend auf diesem Anforderungskatalog wurde ein Lastenheft abgeleitet, welches zusätzlich einen Katalog möglicher Klebfehler mit zugehörigen Konsequenzen bzw. Maßnahmen zu deren Kompensation enthält. Sowohl das Lastenheft als auch der Fehlerkatalog wurden für alle nachfolgenden AK als Grundlage herangezogen. Insbesondere dienten sie in AK2 bis AK4 zur Auswahl und Integration von Komponenten der erforderlichen Anlagen zur Teilautomatisierung der Klebprozesse. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wurde seitens des Projektpartners IGB (AK2) hier auf bereits vorhandene Komponenten zurückgegriffen. So konnte gewährleistet werden, dass der Nachweis der Praxistauglichkeit und die Vorbereitung eines Approvals in Principle (Unterauftrag DNV) unter vertretbaren Kosten durchgeführt werden konnten. Insbesondere der entwickelte Fehlerkatalog bildete die Grundlage für die Entwicklung des Bedienkonzeptes (AK3). Da hier entsprechende Sensoriken - im Wesentlichen optische Systeme – zu integrieren waren, deren Informationen in den Benutzerdialog mit einfließen, um so im Fehlerfall kompensierend eingreifen zu können. Eng an diese Arbeiten angebunden war die QM-Anbindung sowie die Schaffung einer smarten Reaktionsfähigkeit des Systems (AK4). Somit wurde in den besonders stark miteinander gekoppelten AK2 bis AK4 ein prototypisches System aus Hard- und Software geschaffen, welches eine erste Grundlage für die speziellen Anforderungen des teilautomatisierten Klebens in einem Werftumfeld darstellt. Diese Arbeiten in Verbindung mit den Ergebnissen der in AK5 erfolgten Prozessqualifikation für verschiedene Klebstoffe bildeten die Voraussetzungen zum Testeinsatz des prototypischen

Systems. Hierzu wurden bei den Projektpartnern MEYER WERFT und A&R jeweils charakteristische Arbeitsumfelder in Form von Demonstratoren entwickelt und bereitgestellt. Im Falle der MEYER WERFT ist dieses eine modifizierte Modellkabine, anhand derer die Einsatzfälle Scheibenkleben und Kabinenkleben untersucht wurden. Beim Projektpartner A&R erfolgten analoge Untersuchungen zum Kleben von Heiaugen und Beulsteifen an einem Rumpfabschnitt mit Knickspanten. Begleitend zu den Arbeiten aller AK erfolgte in AK7 die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit unter Aspekten der Optimierung von Arbeitstakten bzw. des potenziellen Durchsatzes sowie zur Schaffung der Arbeitsgrundlagen für eine abschließende LCPA. Aus den Untersuchungen ging hervor, dass insbesondere die jeweilige Zugänglichkeit einen wesentlichen Einfluss auf die Taktzeiten besitzt und der kombinierte Einsatz des Systems unter Einsatz alternativer Stromquellen eine wirtschaftliche Nutzung ermöglichen kann.

GESAMMELTE WESENTLICHE ERFAHRUNGEN

Voll- und teilautomatisierte Prozesse werden gegenwärtig vorrangig in der industriellen Serienfertigung in eigens dafür gestalteten Arbeitsbereichen eingesetzt, in denen in der Regel auch besondere Vorkehrungen zur Vermeidung von Unfällen in Form von Absperrungen getroffen werden. In modernen Schiffbauprozessen wurden große Teile solcher Fertigungsprinzipien bereits übernommen. Sodass bei beiden beteiligten Werften in der Vorfertigung von Paneelen und Wänden bereits ein hoher Automatisierungsgrad besteht. Im anschließenden Sektions- und Blockbau wächst der Anteil manueller Tätigkeiten bereits deutlich. Die hier betrachteten Klebprozesse der MEYER WERFT finden in der Regel in einem Stadium statt zu dem der Schiffkrper in weiten Teilen bereits zusammengefügt wurde. Somit kann von einem Baustellenprozess mit sehr heterogenen Arbeitsumfeldern gesprochen werden, in denen eine deutliche räumliche Nähe zwischen teilautomatisierten und manuellen Arbeiten gegeben ist. Zudem ergeben sich hinsichtlich der jeweiligen Zugänglichkeit deutliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit teilautomatisierter Klebprozesse.

Zentraler Bestandteil eines jeden Klebprozesses ist das zu führende Klebprotokoll, in dem zur Qualitätssicherung sämtliche Teilschritte aufgezeichnet werden. Ein Teilziel dieses Forschungsvorhabens bestand darin hierzu einen möglichst hohen Automatisierungsgrad zu erreichen. Eine besondere Herausforderung bestand darin, sämtliche Stakeholder für die vorgesehene, cloudbasierte Lösung so zu integrieren, dass eine nahtlose Anbindung an vorhandene und zu schaffende Schnittstellen ermöglicht wurde. Hierzu waren multilaterale Gespräche zwischen den Projektpartnern IGB, URO, IGP mit dem Industriemanagement, der IT, der Fertigung sowie dem Qualitätsmanagement der MEYER WERFT erforderlich. Hieraus geht hervor, dass neu zu schaffende IT-Infrastrukturen einer präzisen, ganzheitlichen Planung bedürfen.

Aus den räumlichen Gegebenheiten beim Einsatz teilautomatisierter Klebprozesse, der erforderlichen informationstechnischen Infrastruktur und der zu erwartenden Wirtschaftlichkeit ergibt sich eine deutliche Weiterentwicklung des im Zuge des Vorhabens entwickelten Anforderungskatalog. So ist in weiterführenden Projekten besonderer Fokus auf eine universelle Einsatzfähigkeit eines Systems zum teilautomatisierten Klebstoffauftrag zu legen. Der Einsatz hochspezialisierter Systeme, wie sie in Teilen der industriellen Serienfertigung zum Einsatz kommen können, ist derzeit in heterogenen Arbeitsumfeldern des Schiffbaus nur mit erheblichen Mehraufwänden in der Arbeitsvorbereitung und bei der Durchführung der Arbeiten darstellbar. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Entwicklungen in näherer Zukunft eine Adaptierung an schiffbauliche Fertigungsketten ermöglichen.

III.3 VERWERTUNGSPLAN

3.1 ERFINDUNGEN/ SCHUTZRECHTANMELDUNGEN

Im Verlauf des Forschungsvorhabens erfolgten seitens der MEYER WERFT keine Erfindungs-, Patent- oder Schutzrechtanmeldungen.

3.2 WISSENSCHAFTLICHE UND/ODER TECHNISCHE ERFOLGSAUSSICHTEN NACH PROJEKTENDE

Lfd.	Bezeichnung	Zeithorizont
1	Steigerung der Wahrnehmung und Erweiterung des Anwendungsspektrums „Fügen durch Kleben“	Bei relevanten Beteiligten konnte zusätzliches Interesse und Bewusstsein für die Potentiale des „Klebens im Schiffbau“ geschaffen werden. Neue Klebanwendungen sind in Diskussion und können kurzfristig umgesetzt werden (manuelles Kleben).
2	Unterstützungssysteme und -prozesse gewinnen für die Klebaufgabe an Relevanz. Entwicklung und Einsatz kleinerer Mechanisierungslösungen mit Systematiken zur Qualitätssicherung	Die durchgeführten Untersuchungen konnten nachweisen, dass alle relevanten Arbeitsschritte bei der Durchführung einer Klebung auch im maritimen Umfeld sinnvoll automatisierbar sind. Mit verfügbarer Cobot-Technologie und dem Potential der Qualitätssteigerung sind Umsetzungen mechanisierter Klebanwendungen in den nächsten zwei Jahren absehbar.
3	Verfügbarkeit von automatisierten und smarten Klebsystemen für den Einsatz von High-performance-Materialklassen auf Kreuzfahrtschiffen.	Unabhängig von der Verfügbarkeit entsprechender Materialien stellen zum einen die Vollautomatisierung der benötigten Prozesstechnik und zum anderen auch die Anwendbarkeit im komplexen schiffbaulichen Umfeld große Herausforderungen dar, weshalb von konkreten Umsetzungen frühestens in fünf Jahren auszugehen ist.

3.3 WISSENSCHAFTLICHE UND WIRTSCHAFTLICHE ANSCHLUSSFÄHIGKEIT

Aus den in diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Ergebnissen lassen sich viele grundlegende Handlungsempfehlungen für den alltäglichen Schiffbaubetrieb und Inspirationen für studentische Abschlussarbeiten sowie inhaltlich anschließende Forschungs- und Entwicklungsprojekte ableiten. Insbesondere die Ergänzende Ausstattung des Teilversuchsfeldes (siehe AK 2) für klebtechnische Anwendungen erlaubt es Teilaspekte klebtechnischer Fügeprozesse eingehender zu untersuchen und Optimierungspotenziale zu identifizieren. Hierbei werden insbesondere wirtschaftliche Aspekte bei der Mechanisierung und Automatisierung zukünftig Fokusthemen weiterer Forschungsvorhaben sein.

3.4 ARBEITEN, DIE ZU KEINER LÖSUNG GEFÜHRT HABEN

Alle im Zuge dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Arbeiten führten zu Ergebnissen und einem wertvollen Erkenntniszuwachs. Die besonderen Umgebungsbedingungen des Schiffbaus zeigten jedoch, dass der aktuelle Stand der Automatisierungstechnik hier noch besondere Herausforderungen zu bewältigen hat.

3.5 PRÄSENTATIONSMÖGLICHKEITEN FÜR NUTZER-/ UND ANWENDERKONFERENZEN

Die im Zuge dieses Forschungsvorhabens gewonnenen Ergebnisse und abgeleiteten Erkenntnisse wurden im direkten Anschluss an das Abschlusskolloquium im Zuge von Sitzungen der VSM-Arbeitskreise „Fertigung“ und „Industrial Engineering“ am 26.06.2025 einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Insbesondere die in diesem Zuge vorgeführten Demonstrationen zum robotergestützten, teilautomatisierten Kleben an einer Demonstratorkabine fanden besonderes Interesse bei den Teilnehmern.

3.6 EINHALTUNG DER KOSTEN- UND ZEITPLANUNG

Bis auf geringfügige Änderungen in der Zeitplanung konnten alle vorgesehenen Arbeiten der MEYER WERFT in den geplanten Zeitumfängen und zu den vorgesehenen Terminen durchgeführt und abgeschlossen werden. Einige Konsortialpartner haben für ihre Teilvorhaben kostenneutrale Verlängerungen erwirkt. Deren noch ausstehende Ergebnisse und Erkenntnisse werden im Nachgang gesichtet und in individueller Rücksprache ausgewertet. Diese nach Projektende noch zu erwartenden Informationen werden unmittelbar in laufende Forschungs- und Innovationsprojekte der MEYER WERFT einfließen und Berücksichtigung finden. Somit ergeben sich aus diesen zeitlichen Versätzen voraussichtlich keine negativen Auswirkungen.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Projektphasen und Struktur der bearbeiteten Aufgaben bzw. Arbeitskomplexe (Quelle: smartBOND).....	3
Abbildung 2:	Einsatzszenarien für teilautomatisierte Klebprozesse (Quelle: smartBOND)	4
Abbildung 3:	Geklebte Glasscheiben auf Deck (Quelle: MEYER WERFT).....	12
Abbildung 4:	Links Anschweißpunkte und Positionen geklebter Winkel zur Lagesicherung über LNG-Tanks Rechts geklebter Winkel an einem Kabinen-Grundrahmen (Quelle: MEYER WERFT)	12
Abbildung 5:	Für eine Halle aufgezeichnete Innentemperatur im Vergleich zu Temperaturen des Klimadiagramms und zugehörige Taupunktstände (Quelle: MEYER WERFT)	14
Abbildung 6:	Einsatzbeispiel geklebte Winkel zur Lagesicherung von Kabinen (Quelle: MEYER WERFT)	14
Abbildung 7:	Im Forschungsvorhaben für die MEYER WERFT entwickeltes System zur Klebstoffapplikation in einer Kabine (Quelle: MEYER WERFT).....	16
Abbildung 8:	Komponenten für Versuchsklebung: Universal Robots UR12e mit Klebstoffequipment bestehend aus LOCTITE 97 160, MM25 und MM30 für 2k-Klebstoffe (Quelle: https://shop.tewipack.de/geraete-dosierttechnik/).....	17
Abbildung 9:	Teilversuchsfeld für Klebstoffapplikationen und erste Proben im Labor der F&E der MEYER WERFT (Quelle: MEYER WERFT).....	18
Abbildung 10:	Links Optisches Sensorsystem zur Referenzierung im Raum und Lokalisierung der Fügeflächen Rechts Applikationssystem für den Klebstoff (Quelle: MEYER WERFT)	19
Abbildung 11:	Beispiele für Situationen zur räumlichen Referenzierung und Lokalisation der Fügestellen links: Scheibenkleben, rechts: Kabinenkleben (Quelle: MEYER WERFT)	19
Abbildung 12:	Beispiel einer Relingstütze mit angewinkelten Flanschen (Quelle: MEYER WERFT).	20
Abbildung 13:	Übersicht klebtechnischer Begriffe und Parameter des Klebfugendesigns	30
Abbildung 14:	Einteilung der Fertigungsverfahren.....	31
Abbildung 15:	Einfach überlappte Zugscherprobe zur Prüfung der Verbundfestigkeit mit niedrigfesten Klebstoffen	32
Abbildung 16:	Klebstoffsubstanzzugprobe vom Typ S2 zur Prüfung der Materialkennwerte des Klebstoffs ¹⁴	33
Abbildung 17:	Fließbandfertigung der Passagierkabinen bei EPC: Bereits vorinstallierte Verkabelung (oben) und der zu verschweißende Kabinengrundrahmen (unten) (Quelle: EMS PreCab)	34
Abbildung 18:	Demo-Kabine in der Gesamtansicht (Quelle: MEYER WERFT)	35
Abbildung 19:	Überblick Anwendungsfälle, Rahmenkonstruktion Scheibe und Simulation von Deck und Kabinenrahmen sowie Position des Robotersystems in der Kabine (Quelle: MEYER WERFT)	35

Abbildung 20: Robotersystem in der Kabine und verschiedene Arbeitsschritte zur Vorbereitung des Klebstoffauftrags und der eigentliche Klebstoffauftrag (Quelle: MEYER WERFT) 37

Abbildung 21: Beispiele zur räumlichen Situation für die Robotersysteme in den Demonstrationsumgebungen der MEYER WERFT und A&E (Quelle: MEYER WERFT) ..
..... 39

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Liste der Arbeitspakete mit Anteilen der MEYER WERFT	6
Tabelle 2: Prozessparameter für den Einsatz des Klebstoffes Sikaflex-268 PowerCure (Quelle: IGP)..	24
Tabelle 3: Prozessparameter für den Einsatz des Klebstoffes (Quelle: IGP)	25
Tabelle 4: Prozessparameter für den Einsatz des Klebstoffes Körapur 840/45 (Quelle: IGP)	25
Tabelle 5: Randbedingungen für die Auslagerung von Klebproben zur Analyse des Langzeitverhaltens unter verschiedenen Umweltbedingungen (Quelle: IGP).....	28



ANHANG, NICHT FÜR EINE VERÖFFENTLICHUNG VORGESEHEN