



Untersuchungen zum aktuellen internationalen Stand der Technik bezüglich Entwicklung und Anwendung von Klebeverbindungen in der Schiffsfertigung

IM AUFTRAG DES DEUTSCHEN MARITIMEN ZENTRUMS E.V.

Auftragnehmer

Center of Maritime Technologies gGmbH

Projektleiterin: Dr. Wibke Mayland

Steinhöft 11

20459 Hamburg

Im Unterauftrag

Bureau Veritas Marine & Offshore

Bearbeiter: Stéphane Paboeuf

8 Boulevard Albert Einstein – CS32327

44323 NANTES CEDEX 3 – France

Hyconnect GmbH

Bearbeiter: Dr. Lars Molter

Bramfelder Str. 164

22305 Hamburg

Mai 2020

Auftraggeber



Das Deutsche Maritime Zentrum e.V. wurde 2017 gegründet. Es ist ein unabhängiger, öffentlich finanzierter, branchenübergreifender Thinktank mit Sitz in Hamburg. Die Mitglieder sind der Bund (vertreten durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur/BMVI) als maßgeblicher Finanzierer, fünf Bundesländer und die großen maritimen Verbände.

Zweck des Deutschen Maritimen Zentrums ist es, die Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft des gesamten deutschen maritimen Standortes zu erhöhen und das Know-how sowie die Berufsperspektiven in der maritimen Wirtschaft zu stärken. Dazu gehört auch die Bearbeitung und Koordinierung von maritimen Querschnittsthemen, die eine branchenübergreifende Betrachtung erfordern. Das Deutsche Maritime Zentrum versteht sich als Bindeglied zwischen Wirtschaft, Wissenschaft und öffentlicher Hand. Die Arbeitsbereiche umfassen die gesamten Wertschöpfungsketten in den Bereichen Schiffbau und Meerestechnik, Schifffahrt sowie Häfen und maritime Logistik.

Auftragnehmer



Das Center of Maritime Technologies (CMT) ist eine gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung und hat die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der maritimen Industrie und des Standortes Deutschland als Auftrag. Die Forschungseinrichtung mit Sitz in Hamburg beschäftigt ca. 15 Mitarbeiter und hat einen Jahresumsatz von über einer Million Euro.

Aufgabe des CMT ist die Stärkung der maritimen Forschung, Entwicklung und Innovation durch die Initiierung und Begleitung von Projekten, die Forschungsberatung, die Verbreitung von Wissen und Ergebnissen, die Durchführung technischer Forschung in ausgewählten Bereichen und die Nutzung von Synergien zwischen verschiedenen Industriesektoren. CMT ist Mitglied des deutschen Netzwerks für angewandte industrielle Forschung, der europäischen Technologieplattform WATERBORNE sowie anderer europäischer Verbände wie SEA Europe (Schiffbauindustrie), ECMAR (maritime angewandte Forschung) und EFFRA (Fabriken der Zukunft, Produktion und Materialien). CMT ist anerkanntes Forschungszentrum, das eigene technische Forschung in strategischen Bereichen mit mittel- bis langfristiger Perspektive durchführt und umfassende Erfahrungen, Netzwerke und Ressourcen zur Unterstützung und Beratung bei verschiedensten Vorhaben anbietet.

Seit März 2020 ist die CMT gGmbH Tochtergesellschaft des Verbandes für Schiffbau und Meerestechnik e.V., der politischen und wirtschaftlichen Interessensvertretung der deutschen maritimen Industrie, der See- und Binnenschiffwerften sowie der Zulieferer und Dienstleister. Das Unternehmen ist direkte Nachfolgeorganisation des 2002 gegründeten Center of Maritime Technologies e.V., das an mehr als 60 öffentlich finanzierten, größtenteils europäischen Forschungsprojekten und rund 50 privat finanzierten F & E-Verträgen beteiligt war.

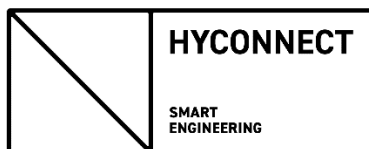
Das Knowhow von CMT umfasst Leichtbaustrukturen und neue Materialien, Produktionstechnologien, Schiffskonzepte und Lebenszyklusaspekte für maritime Anwendungen. Darüber hinaus verfügt die Organisation über umfassende Erfahrung bei der Koordination von Großprojekten sowie der Verbreitung, Analyse und dem Aufbau von Forschungs- und Entwicklungskooperationen.

Unterauftragnehmer



Die Bureau Veritas Group ist weltweit führend in der Zertifizierung und in der Bereitstellung einer breiten Palette von Konformitäts- und Compliance-Dienstleistungen in Bezug auf Qualität, Gesundheit, Sicherheit, Umwelt und soziale Verantwortung. Das Unternehmen wurde 1828 gegründet; beschäftigt ca. 77.000 Mitarbeiter; hat Büros in 140 Ländern; und erzielte 2018 einen Umsatz von 4,8 Mrd. Euro. Das Unternehmen ist in der Lage, Kunden weltweit in einer Vielzahl von Disziplinen Fachwissen zur Verfügung zu stellen.

Bureau Veritas Marine & Offshore ist ein Unternehmen der Bureau Veritas Group. Bureau Marine & Offshore ist eine der weltweit führenden Klassifikationsgesellschaften und Offshore-Sicherheits- und Verifizierungsstellen.



Die Hyconnect GmbH ist ein Unternehmen für Ingenieurdienstleistungen und Produkte in der Verbindungstechnik von Komponenten. Mit Fokus auf dem Schiffbau berät und entwickelt das Unternehmen Kunden zum Einsatz und Gestaltung von hybriden Strukturen aus metallischen und Faserverbundwerkstoffen. Das Unternehmen wurde 2018 in Hamburg gegründet.

Inhalt

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
TABELLENVERZEICHNIS	VI
KURZFASSUNG	8
1. EINLEITUNG	11
1.1. AUSGANGSPUNKT & ZIEL DER STUDIE	11
1.2. VORGEHENSWEISE	12
2. STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK	16
2.1. AKTUELLE ANWENDUNGEN DER FÜGETECHNOLOGIE KLEBEN	16
2.2. VORTEILE DER KLEBETECHNOLOGIE	24
2.3. AKTUELLE VERBREITUNG DER KLEBETECHNOLOGIE	25
2.4. TECHNISCHE ASPEKTE DER FÜGETECHNOLOGIE KLEBEN	30
2.5. LANGZEITERFAHRUNGEN & RISIKEN	49
2.6. FORSCHUNG	50
3. VORSCHRIFTEN / NORMEN / STANDARDS	64
3.1. ÜBERSICHT ÜBER VORHANDENE REGELWERKE UND AKTUELLE ENTWICKLUNGEN	64
3.2. HERAUSFORDERUNG BEI DER KLASSEZULASSUNG / KLASSIFIKATION	75
4. PRAXISANWENDUNG	76
4.1. HERAUSFORDERUNGEN BEIM EINSATZ VON KLEBETECHNOLOGIEN	76
4.2. WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG	79
5. EMPFEHLUNGEN	84
5.1. ENTWICKLUNG EINER RICHTLINIE	84
5.2. FORSCHUNGSBEDARFE	91
6. FAZIT	93
ANHANG	94
A. FACHGRUPPE	94
B. FRAGEBOGEN	95
C. SCHEMA TESTPROZEDUR MEERWASSER-ALTERUNG	99
D. WICHTIGSTE INHALTE DER REGELWERKE	100
E. LITERATURVERZEICHNIS	122

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typische Anwendungen im Boots- und Schiffbau	17
Abbildung 2: Grundschemata Referenzkatalog.....	19
Abbildung 3: Referenzkatalog Beispiel S1 – SOLAS Passagierschiff	20
Abbildung 4: Referenzkatalog Beispiel S2 – High Speed Craft Code (HSCC) Fähre	21
Abbildung 5: Referenzkatalog Beispiel S3 – High Speed Craft Code (HSCC) Fähre	22
Abbildung 6: Einteilung der Klebstoffe [Quelle: Merkblatt 382 Stahl].....	23
Abbildung 7: Eine Auswahl an Klebstellen im Auto (Quelle: DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA).....	27
Abbildung 8: Günstige und ungünstige Beanspruchungen (©Sika Deutschland GmbH).....	32
Abbildung 9: Klebgerechtes Design (©Sika Deutschland GmbH)	33
Abbildung 10: Schema für Untersuchung von Einfluss Feuchtigkeit (Davies, Tests with Moisture).....	43
Abbildung 11: Qualitätssicherungspyramide in Anlehnung an (Doobe, 2018)	46
Abbildung 12: GAK Roadmap Klebtechnik (Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik (Hrsg.), 2016)	51
Abbildung 13: DuraBond Anwendungsfall	58
Abbildung 14: Entwurfsprozess zur Bewertung der Langzeitleistung von Hybridgelenken	60
Abbildung 15: Darstellung der im Rahmen des Projekts analysierten hybriden Verbindungen.....	60
Abbildung 16: Zertifizierungsschema für Klebverbindungen	66
Abbildung 17: Zeit- und Kostenvergleich Kleben und Schweißen (©Sika Deutschland GmbH)	82
Abbildung 18: Zeit- und Kostenvergleich Kleben und Schweißen Anwendungsbeispiel Werft.....	83
Abbildung 19: Grundstruktur der Richtlinie	85
Abbildung 20: Ablaufschema Abnahmeprozess BV	102
Abbildung 21: Klebkoeffizienten nach NI613	104
Abbildung 22: Analysetyp nach NI613	104
Abbildung 23: Designprozess nach NI613	105
Abbildung 24: Klebereparatur von korrodierten Substratstrukturen (American Bureau of Shipping, September 2019).....	116
Abbildung 25: Entscheidungsprozess für Patch-Reparatur (American Bureau of Shipping, September 2019).....	117
Abbildung 26: Mindestprüfprogramm nach (American Bureau of Shipping, September 2019)	118
Abbildung 27: Designprozedur strukturelle Klebstoffe ClassNK	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Klebstoffarten mit ihren charakteristischen Eigenschaften	24
Tabelle 2: Physikalisch-chemische Tests für Klebstoffe (Bureau Veritas, 2015)	38
Tabelle 3: Mechanische Tests für Klebstoffe (Bureau Veritas, 2015)	40
Tabelle 4: Standards zur Bewertung der Dauerbeständigkeit von Klebstoffen	42
Tabelle 5: Arten von Fehlstellen und Ursachen (Bureau Veritas, 2015)	46
Tabelle 6: Vergleich NDT-Methoden (Bureau Veritas, 2015).....	47
Tabelle 7: Product Carbon Footprints von Klebstoffen (Quelle: Industrieverband Klebstoffe e.V.).....	48
Tabelle 8: Existierende Regelwerke der Klassifikationsgesellschaften	65
Tabelle 9: Kostenberechnung Klebprozess.....	81
Tabelle 10: Risikoklassifizierung für Klebeverbindungen gemäß BV Guidance Note NI613	100
Tabelle 11: Bewertungsschritte BV	101
Tabelle 12: Inhalt der Bonding-Datei nach N613	102

Tabelle 13: Anforderungen für steife Klebstoffe DNV GL	107
Tabelle 14: Anforderungen für flexible Klebstoffe DNV GL.....	108
Tabelle 15: Anforderungen an Dichtstoffe DNV GL.....	109
Tabelle 16: Prüfprogramm strukturelle Klebstoffe ClassNK.....	120

Kurzfassung

Das Deutsche Maritime Zentrum hat 2019 die Erstellung einer Studie zum Thema „Untersuchungen zum aktuellen internationalen Stand der Technik bezüglich Entwicklung und Anwendung von Klebeverbindungen in der Schiffsfertigung“ ausgeschrieben. Das Center of Maritime Technologies erhielt den Zuschlag und wurde mit deren Umsetzung beauftragt.

Ausgangslage

Die deutsche Schiffbaulandschaft steht im internationalen Wettbewerb unter hohem Kostendruck. Produkte im maritimen Bereich sind komplexe und hoch ausgerüstete Strukturen, die in harschen Umgebungsbedingungen hohen Beanspruchungen ausgesetzt werden und die die stets wachsenden Anforderungen an Umweltschutz und Ressourceneffizienz erfüllen sollen.

Neue Produktionsmethoden und Materialien spielen neben der Forschung zu Antriebstechnologien und alternativen Kraftstoffen eine bedeutende Rolle. Durch die steigende Komplexität der in Deutschland gebauten maritimen Produkte, nimmt auch der Bedarf nach neuen Fügemethoden, die eine hohe Flexibilität in der Fertigung ermöglichen, zu. Diese sind beispielsweise bei Änderungen oder Nacharbeiten in einer späten Bauphase oder Umrüstungen und Reparaturen im Betrieb erforderlich.

Der Einsatz von Leichtbaumaterialien kann die Umsetzung technischer Innovationen ermöglichen und die damit einhergehende Gewichtseinsparung zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs sowie zur Senkung der Emissionen beitragen. Kleben als leichtbaugerechte Fügetechnologie kommt hierbei zwangsläufig ins Spiel.

Zielsetzung

Die Studie zielt auf den gesteigerten Einsatz von Klebetechnologien in der Praxis ab. Sie soll:

- den aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft und die Verbreitung von Klebetechnologien darstellen,
- die aktuelle Situation in Bezug auf Vorschriften und Standards für den Einsatz der Klebetechnologie im Schiff-, Binnenschiff- und Bootsbau analysieren,
- mögliche Anwendungsfälle und Einsparpotenziale identifizieren und
- Empfehlungen für die Struktur einer zu entwickelnden Richtlinie wie auch für weitere Forschungsaktivitäten geben.

Die angestrebten Ergebnisse sollen der gesamten deutschen Schiffbaulandschaft einschließlich Bootsbauunternehmen und Binnenschiffswerften zugutekommen. Ein verstärkter, im Rahmen der Studienergebnisse sinnvoller Einsatz der Klebetechnologie könnte die Technologieführerschaft der deutschen Werften festigen.

Ergebnisse

Um einen hohen Praxisbezug zu gewährleisten und somit einen größtmöglichen Nutzen der Ergebnisse für die deutsche Schiffbaulandschaft zu generieren, wurde eine beratende Fachgruppe in die Untersuchungen eingebunden. Da die Studienergebnisse einen möglichst umfangreichen Teil der maritimen Industrie widerspiegeln sollen, wurden Teilnehmer aus den Segmenten Schiffbau, Binnenschiffbau, Bootsbau, Zulieferer, Klassifikationsgesellschaften und Forschungseinrichtungen in die Fachgruppe aufgenommen.

1. Stand der Wissenschaft und Technik

Die Analyse des Standes der Technik und Wissenschaft hat ergeben, dass Kleben – aufgrund der weiten Verbreitung im Automobilbau und in der Luftfahrt – im Wesentlichen gut erforscht ist. Kleben zeichnet sich gegenüber anderen Fügemethoden insbesondere durch die Fähigkeit aus, unterschiedliche Materialien verbinden zu können und somit als Enabler-Technologie für den Leichtbau zu dienen. Leichtbau ist, neben der Weiterentwicklung von Antriebstechnologien, für den Schiffbau ein wichtiger Hebel zur Verbesserung der Klimabilanz maritimer Industrieprodukte.

Im Bootsbau findet die Klebetechnologie bereits breite Anwendung. Für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen ist, nach aktuellem Stand der Technik, Kleben als Fügetechnologie am besten geeignet. Die Technologie kommt für eine große Bandbreite an Verbindungen von der strukturellen Verklebung von Rumpf und Deck bis hin zu kleineren Montageklebungen zum Einsatz.

Im Schiffbau, bei dem nach wie vor der Werkstoff Stahl die Hauptrolle spielt, wird Kleben derzeit überwiegend für die Montage von Ausrüstungselementen verwendet. Hier sind insbesondere das Schweißen, aber auch Fügemethoden wie das Schrauben etablierter Standard. Von großer Bedeutung für den Schiffbau ist, dass die Klebetechnologie in der Produktionsphase nach Abschluss der Heißenarbeiten als „kalte“ Fügetechnologie eingesetzt werden kann und sich damit die Möglichkeit ergibt, auf Änderungen flexibel zu reagieren.

Generell besteht Ausbaupotenzial für den Einsatz der Klebetechnologie im Bereich Schiffbau. Die Werften haben die Vorteile der Fügetechnologie erkannt und streben ihren verstärkten Einsatz an.

2. Vorschriften und Standards

Die befragten Experten betrachten die derzeitige Vorschriftenlage als größtes Hindernis für den vermehrten Einsatz der Klebetechnologie im Schiffbau. Die Werften haben, so zeigt die Befragung, ein großes Interesse an einer einheitlichen und praxisnahen Richtlinie.

Aktuell gibt es von den verschiedenen Klassifikationsgesellschaften unterschiedliche Regelwerke für einzelne Geltungsbereiche (z.B. ein Regelwerk für Reparaturen, ein Regelwerk für nichtstrukturelle Klebverbindungen etc.). Ein einheitlicher Branchenstandard existiert nicht. Branchenübergreifende Normen bieten eine gute allgemeine Orientierung hinsichtlich der Prozessanforderungen und der Qualitätskontrolle, berücksichtigen jedoch keine schiffbauspezifischen Aspekte.

Für die Zulassung von Klebverbindungen sind derzeit Einzelfallprüfungen die Regel, die zeitaufwendig und schwer kalkulierbar sind. Für viele Aspekte wie Design oder Prüfungen existieren keine klar definierten Anforderungen, deren Erfüllung eine Zulassung planbar machen würde.

3. Praxisanwendung

Technisch ist das Kleben ein sogenannter spezieller Prozess, dessen Ergebnis sich durch zerstörungsfreie Prüfverfahren nicht einhundertprozentig überprüfen lässt. Der Prozess muss gut kontrolliert werden, um stabil eine hohe Qualität zu gewährleisten. Die Beachtung von Sauberkeit im Fügebereich und eine entsprechende Oberflächenvorbehandlung sind hierbei wesentlich. Die Arbeiten müssen von qualifiziertem Fachpersonal durchgeführt werden. Anwender, die bereits Erfahrung mit der Technologie haben, bewerten die Anforderungen, die sich im Zusammenhang mit dem Einsatz der Klebetechnologie ergeben, als gut durchführbar.

Auch wenn die Entscheidung für die Anwendung der Klebetechnologie im Schiffbau zumeist aus technischen Gründen fällt, muss sich der Einsatz der Technologie kosteneffizient gestalten lassen. Eine Untersuchung der Prozessschritte hat ergeben, dass Kleben gegenüber dem Schweißen insbesondere durch den verringerten Nacharbeitsaufwand Einsparpotenzial bietet. Auch lassen sich die Kosten der Gesamtkonstruktion z.B. durch Materialeinsparung senken. Des Weiteren kann der Einsatz von

Klebstoffen eine Verminderung der Übertragung von Schall und Schwingungen auf die Gesamtkonstruktion bewirken.

4. Empfehlungen

In der Studie werden Struktur und Inhalte einer zu entwickelnden einheitlichen Richtlinie vorgeschlagen. Diese Empfehlung basiert auf einer Analyse existierender Vorschriften, wie der zum „Schweißen im Schiffbau“ oder der zum „Fertigungsstandard des Deutschen Schiffbaus“, die vom Verband für Schiffbau und Meerestechnik erarbeitet wurden. Anforderungen zur Betriebszulassung oder allgemeine Qualitätsmaßnahmen, die in anderen Regelwerken und Normen bereits detailliert definiert sind, können als Referenzrahmen für eine Richtlinie dienen, wobei sie z.B. im Hinblick auf die Bemessung schiffbauspezifischer Inhalte noch genauer aus- und eingearbeitet werden müssen.

Für die Erarbeitung einer Richtlinie und somit eines einheitlichen, verbindlichen Branchenstandards ist, neben der Definition der Inhalte, das Vorgehen bei der Erarbeitung ein wesentlicher Faktor. Im ersten Schritt wird zunächst die Konstituierung eines (moderierten) Richtlinien-Ausschusses empfohlen. Deren Kern sollten die Werften bilden, die durch Forschungseinrichtungen, Klebstoffhersteller und andere Zulieferer sowie Klassifikationsgesellschaften unterstützt werden. Das mittel- bis langfristige Ziel sollte eine internationale Standardisierung sein, für die der nationale Branchenstandard eine Grundlage liefern kann.

Der Stand der Technik und Wissenschaft zur Fügetechnologie Kleben befindet sich auf einem guten Niveau. Im Rahmen der Studie wurden einige Forschungsbedarfe für den Einsatz der Technologie im Schiffbau identifiziert. Relevante Fragestellungen beinhalten z. B. die Untersuchung und Weiterentwicklung von zerstörungsfreien Prüfmethoden und die Erforschung von Alterungsmechanismen sowie entsprechender Prüfverfahren, insbesondere im Hinblick auf die aggressiven maritimen Umgebungsbedingungen. Weiterhin sollten Betriebslasten in der Realität validiert und Berechnungsansätze weiterentwickelt werden, um die Vorhersage der Lebensdauer zu verbessern. Auf die Forschungsagenda gehören zudem Themen wie Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz (Carbon Footprint).

1. Einleitung

1.1. Ausgangspunkt & Ziel der Studie

Die deutsche Schiffbaulandschaft steht einigen Herausforderungen gegenüber. Sie muss sich im internationalen Wettbewerb unter hohem Kostendruck behaupten. Dabei sind Produkte im maritimen Bereich komplexe und hoch ausgerüstete Strukturen, die in aggressiven Umgebungsbedingungen hohen Beanspruchungen ausgesetzt werden. Gleichzeitig steigt der politische und gesellschaftliche Druck, höhere Anforderungen an Umweltschutz und Ressourceneffizienz zu erfüllen.

Vor diesem Hintergrund spielt neben der Forschung zu Antriebstechnologien und alternativen Kraftstoffen das Thema neue Produktionsmethoden und Materialien eine bedeutende Rolle. Durch die steigende Komplexität der in Deutschland gebauten maritimen Produkte, steigt auch der Bedarf nach neuen Fügemethoden, die eine hohe Flexibilität in der Fertigung ermöglichen. Diese sind beispielsweise bei Änderungen oder Nacharbeiten in einer späten Bauphase oder Umrüstungen und Reparatur im Betrieb erforderlich.

Ein weiterer Aspekt ist der potenzielle Einsatz von Leichtbaumaterialien, die vom BMWi als Schlüsseltechnologie eingestuft werden. Diese ermöglichen die Umsetzung technischer Innovationen, die den technologischen Vorsprung deutscher Werften festigen und ausbauen können. Zudem ist der Einsatz von Leichtbau und damit resultierende Gewichts- und Kraftstoffeinsparungen ein wichtiger Hebel für die Einsparung von Emissionen und Ressourcen.

Kleben als leichtbaugerechte Fügetechnologie kommt somit unweigerlich ins Spiel. Traditionelle schiffbauliche Fügemethoden lassen sich für Leichtbau-Elemente entweder schlicht nicht einsetzen oder bringen erhebliche Nachteile mit sich. So ist Schweißen für Faserverbundwerkstoffe keine Option, Methoden wie Schrauben oder Nieten sind für Faserverbundwerkstoffe materialseitig und produktionstechnisch suboptimal. Weitere Verbindungsmöglichkeiten für Faserverbundwerkstoffe und Stahl sind Gegenstand der Forschung, stellen aber heute noch keinen Stand der Technik dar. Zudem kann der Einsatz von Kleben weitere Vorteile wie einen günstigen Einfluss auf das Schwingungsverhalten mit sich bringen. Für einen effizienten Einsatz von Leichtbau im Schiffbau ist Kleben daher aktuell die Fügemethode erster Wahl.

Während Kleben und Leichtbau im Bootsbau bereits etablierter Stand der Technik ist, sind Einsatzgebiete im Binnenschiffbau und Schiffbau derzeit noch auf spezielle Anwendungsfälle beschränkt. Strukturelle Klebverbindungen sind im Schiffbau die Ausnahme, kleinere Montageklebungen an Bord entsprechen der Regel. Technisch sind viele Aspekte des Klebens auch durch den Einsatz in anderen Branchen bereits gut erforscht. Bei einigen Punkten, wie z.B. Korrosion und Alterung oder zerstörungsfreien Prüfmethode, besteht jedoch noch Forschungsbedarf.

Dass vonseiten der Werften Interesse besteht, Kleben als Fügetechnologie stärker einzusetzen, lässt sich beispielsweise durch das Engagement am Arbeitskreis „Kleben im Schiffbau“ erkennen. Auf Initiative der Forschungseinrichtungen Fraunhofer IFAM, Fraunhofer IGP und CMT sowie der Klassifikationsgesellschaft DNV GL beschäftigen sich einige große und kleine Werften zusammen mit Klebstoffherstellern seit mehreren Jahren damit, den Einsatz von Kleben im Schiffbau zu erforschen und voranzutreiben.

Jedoch stellen sich beim Einsatz der Fügetechnologie Kleben für potenzielle Anwender verschiedene Herausforderungen. Technisches Knowhow über die Technologie und ihre Einsatzmöglichkeiten sowie deren Grenzen muss bei Werften vorhanden sein oder erworben werden. Technische Risiken, die sich beispielsweise aus noch nicht vollständig erforschten Aspekten von Klebverbindungen – wie dem Einsatz von Inspektionsmethoden für verschiedene Fehlerarten und Anwendungsbereiche – ergeben, müssen ebenso wie die Kosten bewertet werden. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, muss der Prozess dabei kostenoptimiert gestaltet sein. Zudem müssen Prozesse und Qualitätsmanagement für das Kleben etabliert werden. Da Kleben ein Prozess ist, dessen Ergebnis nicht zu 100 Prozent mit zerstörungsfreien Prüfungen beurteilt werden kann, ist ein gut ausgeführter und kontrollierter Prozess essenziell. Ebenso sollten weitere mögliche Vorteile der Fügetechnologie auf die Gesamtkonstruktion

evaluiert werden. Schließlich müssen Klebverbindungen im Rahmen der Klassifizierung eines Schiffs von einer Klassifikationsgesellschaft bewertet und zugelassen werden.

Insbesondere die Zulassung stellt insofern eine besondere Herausforderung dar, weil derzeit kein einheitliches Regelwerk für Kleben existiert. Ebenso wie für andere Branchen finden sich verschiedene Vorschriften und Normen unterschiedlicher Klassifikationsgesellschaften für Kleben im Schiffbau. Die konkrete Anwendung ist in der Praxis jedoch oft mit Unsicherheit verbunden. Da viele Aspekte Ermessensspielraum beinhalten, ist für Anwender schwer einzuschätzen, ob die Zulassung einer bestimmten Klebverbindung Erfolg haben wird oder nicht. Für Anwender besteht hier ein Risiko, das in einigen Fällen den Einsatz von Klebverbindungen bremst.

Somit besteht auf der einen Seite ein klarer Anreiz, Kleben als Fügetechnologie in der maritimen Industrie einzusetzen. Andererseits stehen Anwender vor einigen technischen und regulatorischen Fragestellungen, für die sie eine Lösung brauchen.

Die Studie soll einen Beitrag leisten, indem sie Anwendern und Interessenten der Fügetechnologie Kleben im Schiffbau, Binnenschiffbau und Bootsbau zunächst einen Überblick über den Stand der Technik gibt. Anhand der Ergebnisse können Nutzer einschätzen, welche Anwendungsfälle bereits existieren und wo gegebenenfalls noch Risiken bestehen. Die Analyse der aktuellen Vorschriftenlage und der derzeitigen Herausforderungen bei der Zulassung von Klebverbindungen soll Leser in die Lage versetzen, das Thema Klassifikation besser einschätzen zu können. Daneben zeigt eine Untersuchung von fertigungstechnischen Aspekten auf, welche Produktionsthemen Schiffbaubetriebe im Auge haben sollten. Die Identifikation von Einsparpotenzialen hinsichtlich Material-, Nacharbeits- und Zeitaufwand soll Anwendern ermöglichen, eine Wirtschaftlichkeitsbewertung vorzunehmen und den Prozess kostenoptimiert zu gestalten. Schließlich sollen Empfehlungen zu Forschungsbedarfen aufzeigen, welche technischen Aspekte weiter zu untersuchen sind, um den Einsatz der Technologie Kleben im Schiffbau noch weiter voranzubringen. Als Ergebnis soll eine Struktur für die Entwicklung einer Richtlinie für die praxisnahe Anwendung den Grundstein für eine einheitliche Vorschrift legen, die Anwendern in Zukunft die Zulassung von Klebverbindungen erleichtert.

1.2. Vorgehensweise

Umfang der Studie

Die Studie behandelt mehrere Fragenkomplexe. Zunächst werden im Stand der Wissenschaft und Technik bereits existierende Anwendungsfälle der Klebetechnologie ebenso wie aktuelle Forschung zum Thema dargestellt. Dabei wird der Einsatz von Kleben in anderen Branchen und der Aspekt der Langzeiterfahrungen beleuchtet. Anschließend werden existierende und sich in der Entwicklung befindende Regelwerke zum Thema aufgeführt und Herausforderungen im derzeitigen Zulassungsprozess von Klebverbindungen im maritimen Bereich analysiert. Für Praxisanwendungen werden daraufhin fertigungs-, betriebs- und sicherheitstechnische Aspekte betrachtet. Ein besonderes Augenmerk liegt hier auf einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und dem Aufzeigen von Einsparpotenzialen. Schließlich werden Empfehlungen zu Forschungsbedarfen sowie einer zu entwickelnden Richtlinie abgegeben. Ergänzend werden Nutzungsmöglichkeiten von Klebetechnologien durch die maritime Wirtschaft aufgezeigt.

Erstellung einer Fachgruppe

Um einen hohen Praxisbezug zu gewährleisten und somit einen größtmöglichen Nutzen der Ergebnisse für die deutsche Schiffbaulandschaft zu generieren, wurde eine beratende Fachgruppe in die Untersuchungen eingebunden. Da die Studienergebnisse einen möglichst umfangreichen Teil der maritimen Industrie widerspiegeln sollen, wurden Teilnehmern aus den Segmenten Schiffbau, Binnenschiffbau, Bootsbau, Zulieferer, Klassifikationsgesellschaften und Forschungseinrichtungen in die Fachgruppe aufgenommen. Dabei wurden insbesondere Unternehmen und Einrichtungen, die auf dem Gebiet vertiefte Kenntnisse und Erfahrungen mitbringen, als Teilnehmer eingeladen.

Den Kern der Fachgruppe bilden hierbei Mitglieder der Arbeitsgruppe „Kleben im Schiffbau“, die seit Anfang 2015 auf Initiative des CMT, der Fraunhofer-Institute IFAM und IGP (ehemals AGP) sowie des DNV GL regelmäßig in halbjährlichen Workshops interessierte Unternehmen und Einrichtungen zum Thema versammelt. Ergänzend wurden weitere Teilnehmer insbesondere für die Segmente Binnenschiffbau und Bootsbau zur Mitwirkung in der Fachgruppe eingeladen. Die Liste der Teilnehmer der Fachgruppe, die bei der Erstellung der Studie beratend unterstützt haben, ist in Anhang A aufgeführt.

Die Fachgruppe wurde sowohl zur Erfassung des Standes der Wissenschaft und Technik als auch der Praxis-Anwendungen und der Erarbeitung von Empfehlungen einbezogen. Hierdurch wurde sichergestellt, dass die Studie den aktuellen Status im Schiffbau, Binnenschiffbau und Bootsbau mit allen Facetten umfassend wiedergibt und die Ergebnisse und Empfehlungen alle relevanten Aspekte widerspiegeln.

Analyse Stand der Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft und Technik orientiert sich an Forschungsthemen und konkreten Anwendungen. Zur Erschließung wurde ein Fragebogen erstellt, der auch nach der Studie zum kontinuierlichen Monitoring eingesetzt werden kann. Der Fragebogen (siehe Anhang B) wurde als Gesprächsleitfaden für Interviews mit allen Mitgliedern der Fachgruppe verwendet. Da Teilnehmer aus verschiedenen Segmenten unterschiedliche Erfahrungen mit dem Thema mitbringen und auch innerhalb eines Segments der Hintergrund heterogen sein kann, wurde der Fokus auf eine qualitative anstatt auf eine quantitative Auswertung gelegt. Um hochwertige Ergebnisse zu generieren, wurden hierbei alle Teilnehmer in Telefoninterviews oder persönlichen Konsultationen durch die Fragebögen geführt. Für die Vervollständigung des Standes der Wissenschaft und Technik wurden Informationen aus aktuellen und abgeschlossenen Forschungsprojekten des CMT genutzt und eine ergänzende Literaturrecherche durchgeführt.

Der Einsatz der Klebetechnologie in anderen Bereichen (Automobilbau, Luftfahrt, Schienenfahrzeugbau, Windenergie, Bauwesen) wurde durch Befragungen von Klebstoffherstellern und Zulieferern der Fachgruppe, die branchenübergreifend aktiv sind, und durch weitere Recherchen erfasst. Dies sollte eine Identifizierung von Technologietransfermaßnahmen, potenziellen Anwendungen wie auch gemeinsamen Herausforderungen ermöglichen und später in die „Empfehlungen“ einfließen.

Als Ergebnis steht ein Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik einschließlich einer Darstellung aktueller Forschungsprojekte, Beispiele aktueller Anwendungen, einer Einordnung der Relevanz der Klebetechnik für die maritime Branche und andere Branchen sowie einer Diskussion über Langzeiterfahrungen mit Klebetechnologien in den Anwendungen einschließlich einer Risikobetrachtung zur Verfügung. Nutzer der Studie können sich so schnell einen Überblick über aktuelle Einsatzgebiete von Klebetechnologien verschaffen und somit besser abschätzen, welche Fragestellungen in Bezug auf Kleben ebenfalls Forschungsthema sind und welche Anwendungen bereits praktikabel sind und ggf. für das eigene Unternehmen in Frage kommen.

Untersuchung der Vorschriften / Normen / Standards

Für den Komplex „Vorschriften/Normen/Standards“ wurde eine Zusammenarbeit mit der Klassifikationsgesellschaft Bureau Veritas (nachfolgend BV genannt), speziell der Abteilung „Marine & Offshore Division“, für diese Studie etabliert. Als eine der größten Klassifikationsgesellschaften verfügt BV über weitreichende Kenntnisse der derzeitigen Normen und Vorschriften sowie Entwicklungen in diesem Bereich (inklusive ISO Standards, etc.). Im europäischen Forschungsprojekt RAMSSES beteiligt sich BV beispielsweise an der Entwicklung von neuen Zulassungsmethoden im maritimen Leichtbau. BV lieferte im Rahmen der Zusammenarbeit eine Übersicht über existierende Vorschriften / Normen /

Standards ebenso wie einen Überblick über aktuelle Entwicklungen. Zudem stellt BV die Herausforderungen bei der Klassezulassung von Klebeverbindungen aus Sicht einer Klassifikationsgesellschaft dar.

Ergänzend zum Beitrag von BV bildet das CMT den Blickwinkel von Anwendern auf dieses Thema ab. Durch Befragung der Fachgruppe und Einbindung von dem CMT bekannten Beispielen werden Erfahrungen von Anwendern mit der Klassezulassung von Klebeverbindungen geschildert. Auch Informationen aus der Mitarbeit im projektbegleitenden Ausschuss des europäischen Projekts QUALIFY sind in die Bearbeitung eingeflossen. Zur Abbildung von speziellen Regelungen in der Binnenschifffahrt wurden ergänzend speziell Unternehmen und Einrichtungen aus diesem Segment kontaktiert.

Als Ergebnis sind die wichtigsten Vorschriften, Normen, Standards und deren Einsatzgebiet sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Regelwerke dargestellt. Ebenso wird beleuchtet, welche Arten von Vorgaben die Richtlinien grundsätzlich zu verschiedenen Aspekten des Klebens wie beispielsweise Design, Tests und Prozess machen. Auch aktuelle Regelentwicklungen in diesen Bereichen werden aufgeführt. Komplementiert wird dies durch dargestellte Herausforderungen bei der Zertifizierung von Klebetechnologie. Die Ergebnisse dieses Kapitels sollen den Nutzer darin unterstützen, die aktuelle Vorschriftenlage und Klassifikationsmöglichkeiten sowie zukünftige Regelentwicklungen besser einzuschätzen zu können und so das Risiko bei einer Zulassung im Bereich Klebetechnologie zu minimieren.

Praxisanwendung

Fertigungs-, betriebs- und sicherheitstechnische Aspekte

Der Komplex „Praxisanwendung“ muss im weiteren Kontext der schiffbaulichen Fertigung gesehen werden. Dazu gehört die gesamte Prozesskette aus Design-Konstruktion-Fertigung-Abnahme (QA) sowie anschließend Einsatz im Betrieb (Wartung, Reparatur, Prüfung) und Recycling. Für die Anwendung von Klebetechnologien, insbesondere als Substitution von anderen Füge-technologien wie Schweißen, Bolzen, Schrauben, etc., sind oftmals Änderungen der Fertigungsfolge und Modifikation an vorgelagerten oder nachfolgenden Prozessen erforderlich. Ebenso können sich die Anforderungen an die Fertigungsumgebung und Oberflächengüte ändern.

In der Studie werden die fertigungstechnischen Herausforderungen auch einhergehend mit Konstruktions- und Designaspekten dargelegt. Weiter werden betriebs- und sicherheitstechnische Herausforderungen herausgearbeitet. Diese beinhalten den Umgang, Lagerung, Entsorgung, wie auch notwendiges Fachpersonal und/oder notwendige Schulungen von Werftpersonal. Auch hierfür wurde einerseits auf das Knowhow der Fachgruppe als auch auf Kenntnisse aus Projekten und Netzwerken des CMT zurückgegriffen.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden aus Forschungsprojekten und Input der Fachgruppe relevante Punkte für eine Kosten-Nutzen-Analyse der Technologie identifiziert. Eine Kalkulationstabelle zur Bewertung von Zeit- und Kostenaufwand sämtlicher Prozessschritte einschließlich vor- und nachgelagerter Arbeitsschritte, die ggf. durch den Einsatz der Technologie beeinflusst werden, kann von Anwendern zur Kostenaufstellung für eigene Anwendungsfälle benutzt werden. Aus Anwendungsfällen und Erfahrungen der Fachgruppe konnten zudem die größten Einsparpotenziale des Klebens insbesondere im Vergleich mit der Füge-technik Schweißen identifiziert werden. Hierbei wurden sowohl Material-, Nacharbeits- und Zeitaufwand als auch zusätzliche technische Benefits der Technologie, die sich vorteilhaft auf Gesamtprozess oder -konstruktion auswirken können, berücksichtigt.

Mit den Ergebnissen dieses Abschnitts können Nutzer der Studie eine Abschätzung treffen, welche Umstellungen in der Fertigung beim Einsatz von Klebtechnologien auf sie zukommen. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen liefern einen Richtwert für Einsparpotenziale. Die verwendeten Kalkulationsansätze können Nutzer hierbei auf ihre eigenen Anwendungsfälle anpassen, um eigene Kosten-Nutzen-Analysen durchzuführen.

Erarbeitung von Empfehlungen

Die Empfehlungen ergeben sich aus den obigen Teilarbeiten sowie konkreten Konsultationen der Fachgruppe.

Für die Empfehlungen zur Entwicklung einer Richtlinie wurden die Arbeiten und Ergebnisse aus der Zusammenarbeit mit BV mit weiteren Experten aus der Fachgruppe diskutiert und entsprechende Kommentare, Hinweise und Ergänzungen aufgenommen. Dies ist ein entscheidender Punkt für eine nachhaltige Struktur einer geplanten Richtlinie. Diese muss für Werften, Klassifikationsgesellschaften und weitere Partner eine gemeinsame Grundlage zur Etablierung von Kleben als Fügetechnologie im Schiffbau/Binnenschiffbau/Bootsbau sein. Um sowohl eine praxisnahe Anwendbarkeit als auch Berücksichtigung aller technischen und formalen Aspekte zu gewährleisten, müssen daher Teilnehmer aus allen Segmenten der Fachgruppe einbezogen werden. Insbesondere wurden zudem Aspekte, die in der Arbeitsgruppe „Kleben im Schiffbau“ erarbeitet wurden, einbezogen. Auch wurden Grundlagen aus bestehenden Normen wie „Qualitätsanforderungen an die Klebetechnik – DIN 2304“ und „Kleben im Schienenfahrzeugbau – DIN 6701“, wie auch die im Kapitel 3.2 erarbeiteten Ergebnisse aufgegriffen.

Empfehlungen zu Forschungsbedarfen wurden aus einer Gap-Analysis abgeleitet. Durch einen Abgleich des Stands der Technik und Wissenschaft mit den aktuellen Praxisanwendungen konnten offene Fragestellungen identifiziert werden. Auch Forschungseinrichtungen und Werften aus der Fachgruppe wurden zu diesem Thema einbezogen. Zusätzlich kann das CMT auf seine Erfahrungen als AiF-Forschungsvereinigung zurückgreifen. Hier steht das Thema Kleben im Schiffbau schon länger im Fokus der Forschung und das CMT hat bereits einige Forschungsvorhaben zu dem Thema durchführen lassen.

Anmerkungen

In dieser Studie ist die Klebtechnik für den Schiffbau, Bootsbau, Binnenschiffbau wie auch für die Offshore-Industrie betrachtet worden. Es hat sich dabei gezeigt, dass der Fokus auf dem Schiffbau liegt. Grund hierfür ist das Spannungsfeld zwischen fehlenden Vorschriften und einer großen Anzahl an bereits realisierten und potenziellen zukünftigen Anwendungen. Dennoch sind stets alle Untersuchungen und Darstellungen für alle oben genannten Bereiche der maritimen Industrie ausgeführt worden und hier dokumentiert, sofern entsprechende Informationen vorhanden oder relevant sind.

2. Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über den Einsatz der Klebtechnologie und typische Klebstoffe und -verbindungen in der Schiffsfertigung gegeben. Anschließend wird analysiert, welche technischen Vorteile die Technologie besitzt und wodurch die Motivation für den Einsatz im Schiff- und Bootsbaus entsteht. Nachfolgend wird beleuchtet, welche Verbreitung die Klebtechnologie derzeit in der maritimen Branche und in anderen Branchen besitzt. Als nächstes werden die wichtigsten technischen Aspekte, die beim Einsatz der Technologie in der Schiffsfertigung eine Rolle spielen, dargestellt. Hier werden sowohl Design- und Fertigungsaspekte, aber auch Prüfmethode, Qualitätssicherung sowie Recycling und Nachhaltigkeit aufgegriffen. Da Schiffe für eine lange Lebensdauer ausgelegt werden und dies andere Herausforderungen mit sich bringt als der Einsatz von Klebverbindungen bei Produkten mit kurzer Lebensdauer, werden weiterhin die Langzeiterfahrungen und Risiken der Technologie diskutiert. Abschließend vermittelt eine Darstellung über abgeschlossene und aktuell laufende klebtechnische Forschung, welche technischen Aspekte der Technologie bereits weit ausgereift und welche noch Gegenstand der Forschung sind.

2.1. Aktuelle Anwendungen der Füge-technologie Kleben

Kleben findet im maritimen Umfeld bereits seit vielen Jahren und teilweise Jahrzehnten für spezielle Applikationen Anwendung. Besonders in Bereichen, in denen nicht-metallische Werkstoffe an Stahlstrukturen gefügt werden müssen, sind Klebverbindungen eine Lösung. Beispiel hierfür sind das Kleben von Verglasungen und – insbesondere im Mega-Yachtbereich – das Verbinden von faserverstärkten Kunststoffbauteilen, wie Schanzkleider, Verkleidungen oder Decksmöbeln. Aber auch im Bereich der Fundamentierung von Ausrüstungsgegenständen und im Maschinenraum, werden Klebungen (Vergussmassen) im Schiffbau eingesetzt. Hier werden auch mitunter geklebte Halterungen für Rohr- oder Signalleitungen eingesetzt. Daneben kommen individuelle Klebungen von diversen Bauteilen vor, welche aber im Vergleich zum Verkleben von Verglasung oder dem Vergießen von Fundamenten Einzelfälle sind. Darunter fallen das Einkleben von Schotten, Innenverkleidungen, Schienensystemen, Kunststoffrohren, etc. Weitere markante Beispiele sind bei kleineren Booten wie Offshore-Zubringern die Verklebung von Aufbauten, etc. Abgegrenzt muss daher die obige Aufzählung vom Bereich der Bootsbauer sein, in dem das Kleben ein bereits etablierter Fügeprozess für alle Bereiche des Produktionsprozesses ist. In anderen Bereichen, wie Offshore, Öl und Gas und dem Binnenschiffbau, sind Klebungen die Ausnahme im Gegensatz zur Offshore-Wind Branche, in der großflächige Klebungen an Rotorblättern bereits Standard sind. Bis auf wenige Ausnahmen (Verklebung von Verglasung und im Bootsbaus) sind die Anwendungen von Klebungen im maritimen Bereich sehr unterschiedlich und oftmals individuell von Werft zu Werft. Ein allgemeiner Überblick über bestehende Anwendungen im Schiff- und Bootsbaus wird in Abbildung 1: Typische Anwendungen im Boots- und Schiffbaus dargestellt.

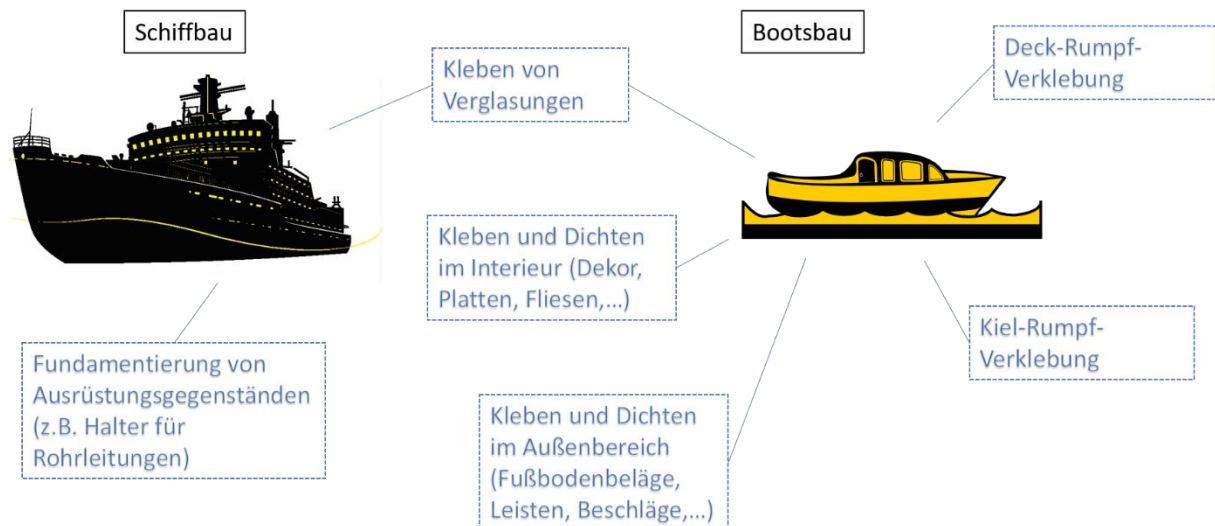


Abbildung 1: Typische Anwendungen im Boots- und Schiffbau

Grundsätzlich sind sehr unterschiedliche Materialpaarungen von Interesse für die maritime Anwendung: Stahl-Stahl in Fällen der Nacharbeit, Reparatur oder Dämpfung; Stahl-Aluminium um Alternativen wie sprengplattierte Verbindungselemente zu vermeiden und Kunststoffe mit Metallen und Kunststoffe miteinander, um einen stoffschlüssigen Verbund zu erzeugen.

Dabei ist Kleben als Fügetechnologie sehr breit einzusetzen im Vergleich zu den jeweiligen Alternativen, sofern diese technisch anwendbar sind. Diese sind unter anderem Schweißen zum Verbinden von ähnlichen metallischen Werkstoffen mit Schweißignung, hybride Verbindungselemente wie sprengplattierte Platten, Schrauben und Niete, etc. Alternative Verbindungsmethoden sind derzeit noch nicht im maritimen Umfeld etabliert oder befinden sich noch nicht in der Produktreife.

2.1.1 Einführung eines Referenzkatalogs

Motivation

Um allen Beteiligten innerhalb der Schiffsfertigung eine informative Orientierungs- und Arbeitshilfe zu liefern, wurde eine Struktur für einen Referenzkatalog erarbeitet. Dieser soll eine Orientierung an bereits umgesetzten Klebeverbindungen für bestimmte Kategorien, Materialien und Anwendungsbereiche geben. Da die Fügetechnologie Kleben insbesondere im Schiffbau derzeit noch stark auf Entwicklungen und Anwendungen einzelner Unternehmen beschränkt ist, ist auch der Zugang und die Freigabe von solchem Wissen derzeit beschränkt. Innerhalb der Studie werden daher zunächst die Struktur und einige Beispiele exemplarisch abgebildet. Im Zuge der Erarbeitung der Richtlinie zum Kleben im maritimen Bereich, aber auch in anderen Arbeitsgruppen und Forschungsprojekten, sollte der Referenzkatalog Anwendung finden und weiter ausgebaut werden. Es wird empfohlen, diesen auch als Anhang der zu entwickelnden Richtlinie in Betracht zu ziehen.

Aufbau

Der Referenzkatalog soll eine Auswahl charakteristischer Fallbeispiele enthalten, die schiffbaulich, z.B. gemäß Baugruppenverzeichnis, aufgelistet sind. Jedes Beispiel wird in eine Sicherheitskategorie eingeordnet, die derzeit an die Einordnung gem. Bureau Veritas (siehe Kapitel 3) angelehnt ist. Diese Einordnung sollte später in Einklang mit der zu erstellenden Richtlinie stehen. Die Art der Kategorisierung von Sicherheitskategorien ist auch in der Norm 2304-1 „Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse – Teil 1: Prozesskette Kleben“ dargelegt.

An dieser Stelle soll folgendes zur Definition, analog zur Einordnung durch Bureau Veritas, gelten:

Die Sicherheitskategorien sind wie folgt definiert:

- Sicherheitskategorie A: Geringes Risiko
- Sicherheitskategorie B: Mittleres Risiko
- Sicherheitskategorie C: Hohes Risiko

Sicherheitskategorie A (geringes Risiko)

Die Klebeverbindungen der Sicherheitskategorie A ist für alle Arten von Klebeanwendungen vorgesehen, bei denen Mängel im Gebrauch die Einsatzbereitschaft des Schiffes in keiner Weise beeinträchtigen (Sicherheit, Fahrbereitschaft, Wirtschaftlichkeit...) und das Gewicht der zu klebenden Ausrüstung weniger als 5 kg beträgt.

Sicherheitskategorie B (Mittleres Risiko)

Die Klebungen der Sicherheitskategorie B ist für alle Arten von Klebeanwendungen vorgesehen, bei denen Mängel im Betrieb lediglich geringfügige Auswirkungen auf die Einsatzbereitschaft des Schiffes haben könnten, jedoch ohne Auswirkungen auf die strukturelle Integrität des Schiffes, die Sicherheit und Gesundheit der Fahrgäste oder der Besatzung, die Seefähigkeit des Schiffes. Die Sicherheitskategorie B umfasst Klebungen von Teilen mit einem Gewicht zwischen 5 kg und 50 kg, die an Deck oder in einer Höhe von weniger als 1 m in öffentlich zugänglichen Räumen angebracht sind.

Sicherheitskategorie C (Hohes Risiko)

Die Klebeverbindungen der Sicherheitskategorie C ist für alle Arten von Klebeanwendungen vorgesehen, bei denen Mängel im Betrieb die Einsatzbereitschaft des Schiffes in irgendeiner Weise beeinträchtigen (Sicherheit, Fahrbereitschaft, Wirtschaftlichkeit...) oder das Gewicht der Teile mehr als 50 kg beträgt oder die in einer Höhe von mehr als 1 m in öffentlich zugänglichen Räumen angebracht sind.

Dies betrifft alle Klebungen, deren Ausfall sich auf essenzielle Funktionalitäten im Schiffsbetrieb auswirken können. Diese sind erforderlich damit ein Schiff auf See weiterfahren, gesteuert oder manövriert werden oder sonstige Tätigkeiten ausüben kann, die mit ihrem Betrieb verbunden sind und für die Sicherheit des Lebens der Passagiere und Besatzung notwendig sind.

Zu jedem Beispiel findet sich eine Beschreibung der Referenzklebung, die verwendeten Materialien sowie weitere Parameter der Klebung. Der Katalog ermöglicht somit einen schnellen Überblick über die Möglichkeiten von Klebeverbindungen in der schiffbaulichen Anwendung.

Nutzen / Anwendung des Referenzkatalogs

Der Referenzkatalog soll eine grobe Orientierung für potenzielle Einsatzgebiete von Klebeverbindungen im Schiffbau geben. Auch soll dargestellt werden, wo Klebetechnologien bereits eingesetzt werden, welche Materialien gefügt werden können, Art der Verbindung und weitere textliche Zusatzinformationen. Er hilft auch der Einordnung von Klebungen in die entsprechenden Sicherheitskategorien.

Der Nutzen des Katalogs hängt maßgeblich davon ab, wie viele Anwender beispielsweise im Rahmen der Erarbeitung einer Richtlinie, ihre Informationen zu Verfügung stellen. Daher wird empfohlen, dass der Katalog kontinuierlich gepflegt und erweitert wird.

Abgrenzung

Der Referenzkatalog dient zur Einordnung von bereits durchgeführten Klebeverbindungen. Er zeigt einen groben Überblick über Anwendungsbereiche. Die Informationen beinhalten allgemeine Beschreibungen, gehen aber aus Vertraulichkeitsgründen nicht spezifischer auf die Prozesse etc. ein.

Nachfolgend in Abbildung 2 bis Abbildung 5 sind aktuelle Anwendungsbeispiele für je eine Sicherheitskategorie dargestellt, wie das Verkleben von Balkonstützen.

SCHIFFBAULICHE EINTEILUNG (Bsp. Ausrüstung, Hilfsstruktur) Ausrüstung	
SICHERHEITSKATEGORIE (Definition voranstellen in Anlehnung BV) S2	
SCHIFFSTYP & KLASSE Fähre	
Textliche Beschreibung der Referenzklebung	Materialien /Fügepartner
	Verwendeter Klebstoff
	Elastische / steife Verklebung
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> 5 Bild / Zeichnung der Klebung hier einfügen </div>

Abbildung 2: Grundschemata Referenzkatalog


Tragende Struktur – Anhänge lasttragend	
Kategorie S1	
SOLAS Passagierschiff [DNVGL]	
<p>Beschreibung:</p> <p>Balkonstützen aus Stahl an Außenhaut eines Kreuzfahrtschiffes. Kleben substituiert hier das verschweißen der Halter mit der Außenhaut. Die Oberflächen wurden entschichtet und gesandstrahlt. Klebung wurde mit eigenem Fachpersonal im Baudock durchgeführt. Konstruktion beinhaltet mechanische Sicherung durch geschweißte Bolzen. Dauerfestigkeits- und Alterungstests durch Fraunhofer IFAM nach Absprache mit der Klassifikationsgesellschaft.</p>	<p>Material / Fügepartner: Stahl – Stahl [S355]</p>
	<p>Klebstoff: 2 K Epoxid-Klebstoff</p>
	<p>Elastische / steife Verklebung: Steife Verklebung</p>
	

Abbildung 3: Referenzkatalog Beispiel S1 – SOLAS Passagierschiff


Ausrüstung	
Kategorie S2	
Fähre HSCC [BV]	
Beschreibung: Schienen zur Befestigung der Passagiersitze auf das Stahldeck gefügt. Zusätzliche Verschraubung in der Schiene im Abstand von drei Metern. Die Klebung wurde mit werfteigenem Personal durchgeführt.	Material / Fügepartner: Stahl [S235] – Stahl [CrNi]
	Klebstoff: 2 K Epoxid
	Elastische / steife Verklebung: Steife Verklebung
	

Abbildung 4: Referenzkatalog Beispiel S2 – High Speed Craft Code (HSCC) Fähre

Ausrüstung	
Kategorie S3	
Fähre HSCC [DNVGL]	
Beschreibung: Kabelhalter zum Führen von Leerrohren für sekundäre elektrische Versorgung (Beleuchtung als Dekoration) im Innenbereich. Klebung wurde auf Stahl-Wandpanelen in 10cm Höhe ausgeführt durch Dienstleister. Abzugs- und Schältests durch externes Labor.	Material / Fügepartner: Stahl – Stahl [S235]
	Klebstoff: 2 K PUR
	Elastische / steife Verklebung: Elastische Verklebung
	

Abbildung 5: Referenzkatalog Beispiel S3 – High Speed Craft Code (HSCC) Fähre

2.1.2 Verbreitete Klebstoffe

Zum Kleben von metallischen Verbindungen oder Verbindungen von Metall und Kunststoff steht eine Vielzahl von unterschiedlichen Klebstoffen zur Verfügung, die sich in ihren Festigkeits- und Beständigkeitseigenschaften, aber auch in ihrer Verarbeitung stark variieren. Bei der Auswahl des geeigneten Klebstoffes ist es dabei wichtig, nicht allein die mechanischen Eigenschaften im Fokus zusehen. Vielmehr können, je nach Anwendung, auch der Widerstand gegen Kriechen und die Temperaturbeständigkeit Teile der Anforderungen sein. Gerade in Hinblick auf Dickschichtverklebungen von größeren Bauteilen im Schiffbau spielt die Verarbeitung der jeweiligen Klebstoffe eine besondere Rolle.

Im maritimen Bereich werden bereits verschiedene Klebstoffarten eingesetzt. Darunter haben 1K und 2K Polyurethane, 2K Epoxies und 1K Silikon / Silan Klebstoffe einen hohen Anteil. Aber auch Acrylate finden Anwendung, beispielsweise in der Montage für Halter. Diese ermöglichen in der Regel einen schnellen Festigkeitsaufbau und somit die Möglichkeit, zügig zu nachfolgenden Prozessschritten überzugehen. Weiterhin offerieren die Klebstoffhersteller eine breite Palette an für den maritimen Bereich zertifizierten Klebstoffen.

Für eine systematische Einteilung der Klebstoffe als Überblick (siehe Abbildung 6) wurde an dieser Stelle die Art der Aushärtemechanismen verwendet. Dies ermöglicht die Bildung von Gruppen unter

den Hauptgruppen Einkomponentenklebstoffe (1K) und Zweikomponentenklebstoffe (2K). Die Gruppen beziehen sich jeweils auf den Mechanismus der Aushärtung. Für die hier aufgeführten Klebstoffe ist dies nachfolgend kurz dargestellt:

- Chemisch aushärtend: Diese Klebstoffe bestehen aus fließfähigen oder niedrigviskosen Substanzen, welche reaktive chemische Gruppen enthalten. Unter bestimmten Bedingungen reagieren diese dann zu polymeren Stoffen mit hoher mechanischer Widerstandsfähigkeit. Diese Reaktion kann zum Beispiel durch das Mischen von zwei reaktionsfähigen Komponenten in Gang gesetzt werden oder durch einen physikalischen Effekt wie Bestrahlung mit UV-Licht, Einfluss von Feuchtigkeit, etc.
- Physikalisch aushärtend: Der Übergang des Klebstoffes zu einem Festkörper geschieht nur unter physikalischen Vorgängen wie Verdampfung, Diffusion, etc. Hierbei kommt es zu keiner Veränderung der polymeren Komponenten im chemischen Sinn.
- Chemisch und physikalisch aushärtend: Hierbei härtet der Klebstoff zunächst physikalisch aus, während darauf eine chemische Nachvernetzung erfolgt.
- Nicht aushärtend: Diese Klebstoffe werden als Haftklebstoffe bezeichnet und sind hochviskose Polymersysteme, die auch im Endzustand einen flüssigkeitsähnlichen Charakter haben.

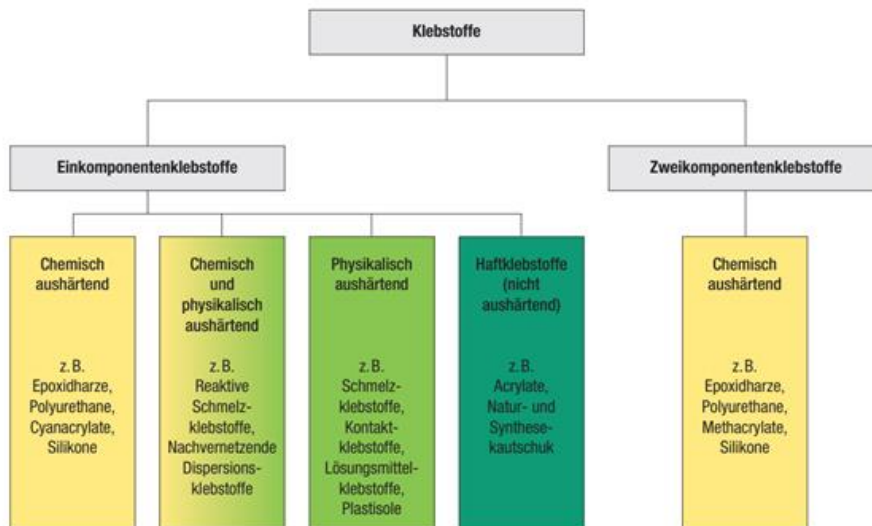


Abbildung 6: Einteilung der Klebstoffe [Quelle: Merkblatt 382 Stahl]

Die nachfolgende Kurzübersicht Tabelle 1 zeigt auf Basis der Einteilung die wesentlichen Klebstoffe mit ihren Merkmalen. Diese Tabelle soll zur Klebstoffselektion dienen [Anlehnung an Merkblatt 382 (Schliekelmann, 1972)]. Weitere Informationen können unter anderem bei den Klebstoffherstellern gefunden werden.

Verarbeitung und Art des Aushärtemechanismus		Typisches Basisaraz	Charakteristische Eigenschaften
Ein komponentige chemisch aushärtende Klebstoffe	Wärme	Epoxidharz (1K)	Hohe Festigkeit, Anwendung auch auf leicht beöhlten Substraten möglich
	Wärme	Phenolharz (1K)	Aushärtung unter erhöhtem Druck
	Chemisch bei Kontakt mit Luftfeuchtigkeit	Polyurethan (1K)	Einfache Verarbeitung, langsames Aushärten, Reaktion feuchtigkeitsabhängig
		Silikonharz (1K)	Einfache Verarbeitung, langsames Aushärten, Reaktion feuchtigkeitsabhängig
	Chemisch unter Sauerstoffabschluss (anaerob)	Diacrylsäureester (1K)	Verarbeitung als Flüssigklebstoff oder als mikroverkapselte Vorbeschichtung

	und bei Kontakt mit Metallen		
Physikalisch aushärtende Klebstoffe	Abkühlen aus der Schmelze	Ethylvinylacetat (EVA), Polyamid	Sehr schnelle Verarbeitung, lösungsmittelfrei
	Ablüften (Lösungsmittelklebstoffe)	Vinylacetat	Preisgünstig, lösungsmittelhaltig, mindestens ein Füge­teil muss diffusionsdurchlässig sein
	Trocknen und dann mit Druck fügen (Kontaktklebstoffe)	Neoprenkautschuk	Einfache Verarbeitung, niedriger Preis, lösungsmittelhaltig
	Trocknen einer Dispersion	Verschiedene Basisharze	Einfache Verarbeitung, lange Ablüftzeit, sehr geringer Lösungsmittelgehalt
	Absorbieren des Weichmachers (Plastisole)	PVC-Copolymere	Preisgünstig, vergleichsweise gute Haftung auch auf beölten Blechen
Haftklebstoffe	Permanent klebrig	Acrylat, Natur- und Synthesekautschuk	Schnelle Verarbeitung, umweltfreundlich
Kombiniert chemisch und physikalisch aushärtende Klebstoffe	Zunächst physikalisches Aushärten, dann chemische Nachvernetzung	Reaktive Polyurethan Schmelzklebstoffe	Schnelle Anfangsfestigkeit
		Neoprenkautschuk mit Isocyanathärtern	Einfache Verarbeitung, niedriger Preis, lösungsmittelhaltig
		Nachvernetzende Dispersionsklebstoffe	Großflächige Klebungen möglich, lösungsmittelfrei
Zwei komponentige chemisch aushärtende Klebstoffe	Chemische Reaktionen (Polyreaktion) nach Mischen verschiedener Komponenten	Epoxidharz (2K)	Exaktes Einhalten des Mischungsverhältnisses notwendig, Verarbeitung z.B. über statische oder dynamische Mischer
		Polyurethan (2K)	Exaktes Einhalten des Mischungsverhältnisses notwendig, Verarbeitung z.B. über statische oder dynamische Mischer, reaktive Ausgangssubstanzen, keine Wärmezufuhr erforderlich
		Acrylate (2K)	Kontaminationstolerant, radikalisch aushärtend, als zwei flüssige Komponenten oder als Harz und Härterlack im Einsatz

Tabelle 1: Übersicht der Klebstoffarten mit ihren charakteristischen Eigenschaften

2.2. Vorteile der Klebetechnologie

Für den Einsatz der Klebetechnologie können unterschiedliche Gründe eine Rolle spielen. In diesem Abschnitt werden zunächst Vorteile in Bezug auf das Design und anschließend prozessbezogene Aspekte diskutiert. Eine Analyse der Wirtschaftlichkeit erfolgt in 4.2.

Design-Aspekte

Ein wichtiger Vorteil der Klebetechnologie ist die Vielfalt der verfügbaren Klebstoffe und damit verbunden die Möglichkeit, unterschiedlichste Materialkombinationen zu fügen. So ist insbesondere anders als beim Schweißen auch das Verbinden von Faserverbund-Bauteilen mit Stahlbauteilen möglich. Kleben ist damit eine sogenannte Enabler-Technologie für den Einsatz von Leichtbau im (stahlbasierten) Schiffbau. Dies ist im Schiffbau einer der Hauptgründe für den Einsatz der Klebetechnologie.

Durch die Bandbreite an verfügbaren Klebstoffen ist es zudem möglich, ein Material zu wählen was nicht nur für die Materialkombination, sondern auch für andere Aspekte der zu verbindenden Konstruktion wie bspw. mechanische Kennwerte oder Prozessparameter besonders geeignet ist. So gibt es Klebstoffe, die auf eine hohe Festigkeit oder auch auf eine hohe Bruchdehnung optimiert sind, aber auch Produkte, die beispielsweise eine besonders schnelle Aushärtung ermöglichen.

Der Einsatz von Klebstoffen kann auf die Gesamtkonstruktion eine Verminderung der Übertragung von Schall und Schwingungen bewirken. Bei der Verklebung von Deck mit einem Aufbau in einem Anwendungsfall einer Werft beispielsweise die Schwingungen im Aufbau gedämpft. Ebenso ist es möglich, dass durch den Einsatz des Klebstoffs Veränderungen an der restlichen Konstruktion vorgenommen werden können, die Material einsparen. Beim Einsatz von Kleben als Alternative zu anderen Fügetechnologien kann die Klebverbindung oft die Funktion „verbinden“ und „abdichten“ gleichzeitig übernehmen, wo vorher neben der mechanischen Verbindung eine zusätzliche Dichtung

nötig war. Nicht zuletzt können durch den Einsatz der Klebetechnologie Korrosionsprobleme, die über den Betrieb bei Fügeverfahren mit metallischen Verbindungselementen auftreten, vermieden werden.

Prozessbezogene Aspekte

In Bezug auf den Gesamtprozess in der Schiffsfertigung ist der Hauptvorteil, dass Kleben anders als Schweißen eine sogenannte kalte Fügeverfahren ist. Damit ist gemeint, dass beim Kleben allgemein keine Temperaturen erreicht werden, die zu einer Beschädigung von Primern und Beschichtungen führen. Weiter besteht kein Risiko einer Entzündung von anderen Materialien durch Hitzeentwicklung oder Funkenflug, im Gegensatz zu heißen Arbeiten, wie dem Schweißen. Dadurch bietet Kleben eine Fügeverfahren, die auch nach Erreichen von bestimmten Meilensteinen, wie dem Abschluss der Heißenarbeiten, ohne genannte negative Nebeneffekte eingesetzt werden kann. Somit kann auch auf Änderungen in einer späten Herstellungsphase mit reduziertem Aufwand flexibel reagiert werden.

Ein weiterer Vorteil der Technologie ist die Fähigkeit, in gewissem Maß toleranzausgleichend zu wirken. Die Klebschichtdicke kann in sinnvollen Grenzen variiert werden und somit leichter schwankende Spaltmaße ausgleichen als andere Fügeverfahren. Im Vergleich mit Schweißen besitzt Kleben weiterhin noch den Vorteil, dass bei der Herstellung kein Feinstaub anfällt.

Insgesamt stellt Kleben eine Vielzahl an neuen Möglichkeiten für die Fertigung in der maritimen Branche dar und eröffnet sowohl Optionen bei der Verwendung neuer Materialien als auch in der Produktionsplanung und -durchführung. Daher hat Kleben mittel- und langfristig das Potenzial, sich als eine der maßgeblichen Fügeverfahren in der maritimen Branche zu entwickeln.

2.3. Aktuelle Verbreitung der Klebetechnologie

2.3.1 Verbreitung im maritimen Bereich

In der maritimen Branche ist die Klebetechnologie insbesondere im Boots- und Yachtbau bereits weit verbreitet. Da in diesem Segment seit langem Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz kommen, ist auch Kleben als Fügeverfahren bereits seit Jahrzehnten etabliert. Entsprechend wird die Technologie nicht nur für Montagezwecke, sondern auch für strukturelle Verbindungen der Bootsstruktur eingesetzt. Die Fertigung in diesem Bereich ist in Bezug auf das Kleben wenig automatisiert. In diesem Segment werden jedoch des Öfteren kleine bis mittelgroße Serien gefertigt, so dass Prozesse für bestimmte Anwendungen im Rahmen der Serienfertigung standardisiert werden können.

Im Schiffbau ist die Technologie für bestimmte Anwendungen wie das Kleben von Fensterscheiben fest etabliert. Für verschiedene Verbindungen im Ausrüstungsbereich wird die Technologie bereits eingesetzt, es besteht hier jedoch noch Potenzial für eine Ausbreitung der Einsatzfelder. Insbesondere im Bereich struktureller Verbindungen ist die Technologie im Schiffbau bislang eher Gegenstand von Forschungsprojekten als von tatsächlichen Anwendungsfällen. Im Schiffbau ist dabei der Einsatz von der Klebetechnologie anders als beispielsweise die Schweißtechnologie wenig automatisiert, und es handelt sich üblicherweise bei den Schiffen um eine Fertigung von Einzelstücken. Spezielle Anwendungen der Klebetechnologie wie die Montage von Halterungen kommen jedoch auch im selben oder unterschiedlichen Schiffen wiederholt zum Einsatz, so dass der Prozess in gewissem Maß standardisiert werden kann.

Die Befragung der Fachgruppenteilnehmer zum Stand der Wissenschaft und Technik spiegelt diese unterschiedlichen Erfahrungen wider. Im Segment Boots- und Yachtbau schätzen befragte Experten der Fachgruppe die Technologie als ausgereift und die Fertigung als gut beherrschbar ein. Es bestehen etablierte Produktionsprozesse und das Personal ist in der Regel geschult und praxiserfahren. Falls internes Knowhow für einzelne Anwendungen nicht ausreicht, lässt sich dies mit Unterstützung der Hersteller oder spezialisierter Forschungseinrichtungen problemlos erschließen. Es gibt keine Beschwerden über Versagen der Klebverbindungen im Betrieb. Da Kunden Probleme natürlich nicht

zwingend melden müssen, ist dies keine Garantie dafür, dass über die Lebensdauer nie Auffälligkeiten an Verklebungen auftreten, aber doch ein Indiz dafür, dass es keine ausgeprägten Probleme gibt.

Im Bereich Schiffbau gibt es unter den befragten Teilnehmern der Fachgruppe sowohl Werften, die sich schon intensiv mit der Technologie beschäftigt haben, als auch welche, bei denen Kleben erst seit kürzerem als alternative Fügemethode in Erwägung gezogen wird. Da die Fügetechnologie somit innerhalb der Werft meist noch nicht so bekannt ist wie das Schweißen und andere etablierte Methoden, besteht meist weniger Vertrauen in die Technologie. Für den erfolgreichen Einsatz des Klebens muss hier zunächst durch Schulungen und Einbezug vieler Parteien von Einkauf über Lager bis hin zur Qualitätssicherung und den Arbeitssicherheitsbeauftragten interne Akzeptanz für die Technologie geschaffen werden. Bei Personen, die sich bereits mit dem Thema beschäftigen und ebenfalls geschult sind und/oder mehr Erfahrung besitzen, besteht wiederum großes Vertrauen in die Technologie und die Potenziale werden deutlich höher bewertet als mögliche Risiken – insbesondere da bestehende Fügemethoden auch ihre Einschränkungen und mögliche Fehlerquellen besitzen. Auch im Schiffbau liegen bislang keine negativen Rückmeldungen von Kunden vor, die auf unerwartetes mechanisches Versagen der Technologie im Einsatz hinweisen. Sofern in der Fertigung trotz aller Vorkehrungen Fehler passieren, fallen diese nach Erfahrung der Befragten direkt in der Produktion auf und nicht erst im Betrieb.

Wenngleich bei erfahrenen Klebfachkräften hinsichtlich der Technologie und der Beherrschung des Fertigungsprozesses keine Bedenken vorliegen, so bestehen bei Design und Auslegungsmethoden noch eher Unsicherheiten. Da es hier keine standardisierten Vorgaben für den Schiffbau gibt und beispielsweise die Berechnung der Betriebsfestigkeit unter mehrachsiger Belastung auch noch Gegenstand der Forschung ist, ist die Berechnung nicht so einfach wie bei gängigen Schweißverbindungen. Auch ist teilweise die konkrete Belastung einer speziellen Klebverbindung an einer bestimmten lokalen Position über die Lebensdauer nicht genau bekannt. Hier besteht seitens der befragten Anwender der Wunsch nach klarerer Orientierung zu geeigneten Methoden und Annahmen sowie Ermittlung der genauen Lasten im Betrieb.

Weitere Punkte, die bei den befragten Anwendern im Schiffbau noch Fragen aufwerfen, sind einerseits die Alterung und deren Prüfung. Hier ist nicht immer klar, ob die angenommenen Einflüsse realistisch sind, und ob diese mit den beschleunigten Prüfmethoden richtig abgebildet werden. Zum anderen stellt die große Materialvielfalt teilweise eine Herausforderung dar. Diese Vielfalt ermöglicht das Fügen sehr unterschiedlicher Werkstoffe, aus Sicht der Anwender wäre das Nonplusultra jedoch ein Universal-Klebstoff, der für alle Anwendungen einsetzbar ist.

Im Bereich Binnenschiffbau scheint das Thema Kleben eine untergeordnete Rolle zu spielen. Verschiedene Werften, die im Rahmen der Studie kontaktiert wurden, kleben nach eigener Auskunft gar nicht. Bei der Reederei A-ROSA Flussschiff GmbH sind die Erfahrung mit Klebverbindungen gemischt. Auf den Flusskreuzfahrtschiffen der Reederei sind Klebverbindungen für die Montage von verschiedenen Bauteilen (Deckenverkleidungen, Zierleisten, Rohrleitungen, ...) ebenso wie zur Abdichtung im Einsatz. Im Betrieb wird Kleben auch bei kleineren Wartungs- und Reparaturarbeiten verwendet. Bei richtiger Anwendung der Technologie wird diese als zuverlässig und stabil eingeschätzt. Jedoch ist es nicht immer einfach, z.B. bei Reparaturen mittels Kleben die nötigen Bedingungen von Sauberkeit oder Temperatur herzustellen. Daher werden die Fügetechnologien Schweißen und Schrauben hier bevorzugt. Vereinzelt treten auch über die Lebensdauer Probleme mit vorhandenen Montageklebungen auf. Bei einer beschädigten Verklebung ist eine Instandsetzung nur mit viel Aufwand möglich, was ebenso als Nachteil gegenüber anderen Fügemethoden eingeschätzt wird.

2.3.2 Verbreitung in anderen Branchen

Ein Blick auf den Einsatz der Klebetechnologie in anderen Branchen ist aus verschiedenen Gründen interessant. Es kann allgemein einen Eindruck geben, wie ausgereift die Technologie bereits ist und wie viel Erfahrung mit der Technologie im industriellen Bereich insgesamt bereits existiert. Zudem kann

es Aufschluss geben, für welche Einsatzzwecke Kleben bereits genutzt wird. Hierbei sind insbesondere Anwendungen und Branchen von Interesse, die in Bezug auf Lebensdauer, Beanspruchungen, Umgebungsbedingungen aber auch auf die Rahmenbedingungen der Fertigung und Zulassung Gemeinsamkeiten mit dem Schiffbau aufweisen.

Im **Automobilbau** findet Kleben inzwischen in einer Vielzahl von Anwendungen Einsatz. Das größte Anwendungsgebiet ist das Kleben im Karosserie-Rohbau, wo verschiedene Metall von hochfesten Stählen bis hin zu Leichtmetallen einzeln oder in Mischbauweise im Einsatz sind. Aber auch Motorteile, Kunststoff-Anbauteile wie Scheinwerfer, Blenden und Spiegel ebenso wie Türverkleidungen, Armaturenbretter und weitere Elemente der Innenausstattung werden geklebt. Ein einziges Auto enthält dabei heute rund 15-18 kg Klebstoff (Industrieverband Klebstoffe e.V.: Klebstoffe im Fahrzeugbau, 2020).

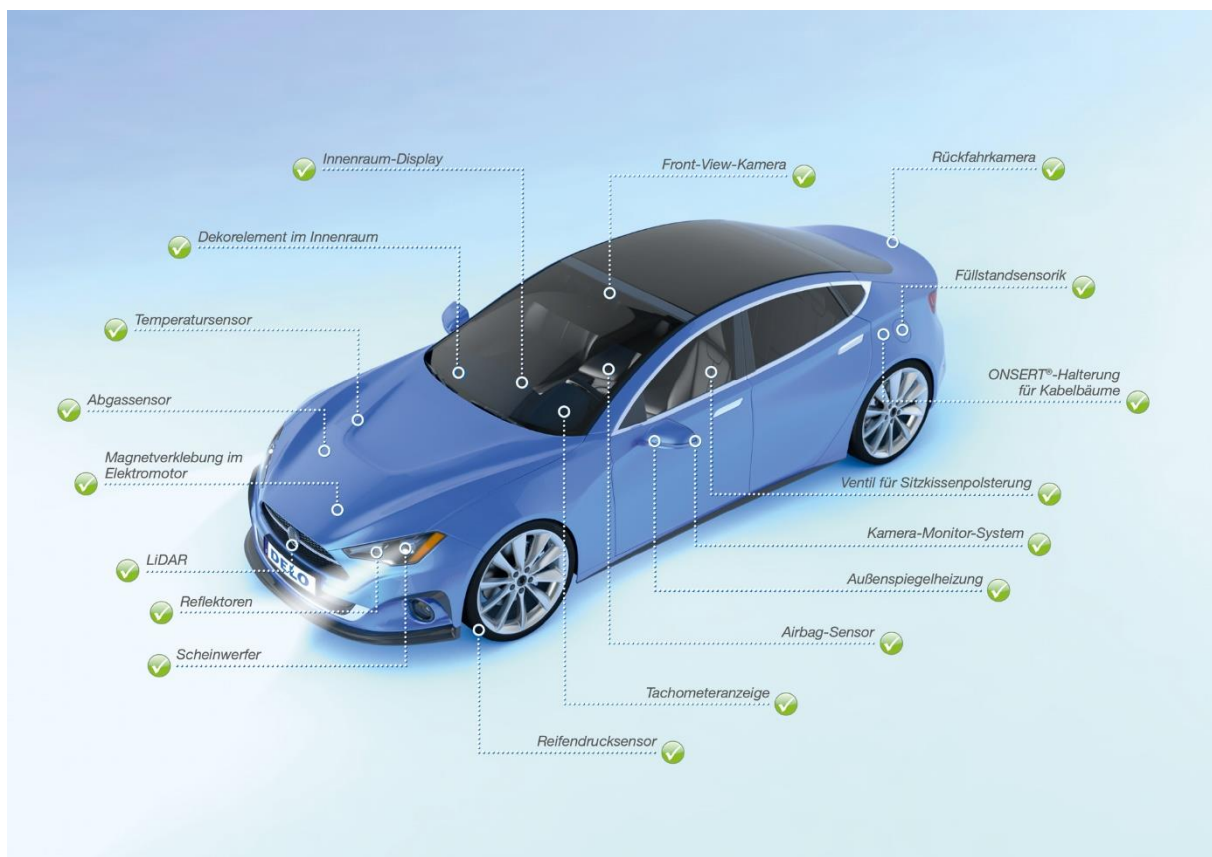


Abbildung 7: Eine Auswahl an Klebstellen im Auto (Quelle: DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA)

Traditionell werden im Automobilbau ähnlich wie im Schiffbau Niete, Schrauben und Schweißen als typische Verbindungstechniken eingesetzt. Kleben hat hier durch den zunehmenden Einsatz von Leichtbau in den letzten Jahren als Fügetechnik stark an Bedeutung gewonnen. Heutzutage wird zudem grundsätzlich ein Materialmix aus Metallen, Kunststoffen, Hybridwerkstoffen und weiteren Materialien im Automobil verwendet. Ein wesentlicher Vorteil ist daher die Fähigkeit von Klebstoffen, das Fügen unterschiedlicher Werkstoffe zu ermöglichen, die sonst nicht zuverlässig verbunden werden können. Zudem sind zusätzliche Funktionen wie Dämpfung und Korrosionsschutz von Interesse. Beispielsweise werden Windschutzscheiben elastisch verklebt, um Vibrationen abzdämpfen. Auch für Innenausstattungs-elemente ist die Geräuschdämpfung von Vorteil, ebenso lässt sich hier durch Kleben als unsichtbare Montagemethode eine gute Optik erzielen, auf die Kunden im hochpreisigen Segment ähnlich wie im Schiffbau und Yachtbau Wert legen. Auch verbessert Kleben gegenüber den traditionellen Verbindungstechniken die Crashesicherheit und die Stabilität der Karosserie. Die

Crashsicherheit kann durch spezielle crashfeste Klebstoffe optimiert werden, ist aber auch für normale Klebstoffe bereits besser als für Nieten oder Schrauben da die Füge­teile unver­se­hrt bleiben.

Im Automobilbau werden anders als im Schiffbau üblicherweise Großserien mit sehr hohen Stückzahlen hergestellt. Die Fertigung findet mit einem hohen Automatisierungsgrad statt. So kommen auch für den Klebstoffauftrag Roboter zum Einsatz. Da in einem Wagen viele unterschiedliche Verbindungen geklebt werden, kommen auch viele unterschiedliche Klebstoffe zum Einsatz. Daher müssen für die Abläufe in der Fertigungsstraße unterschiedliche Aushärtezeiten berücksichtigen müssen.

Aktuelle Herausforderungen in Bezug auf Kleben sind die zunehmend komplexe Formgebung bzw. komplexes Design, die Auswirkungen äußerer Einflüsse auf die Lebensdauer sowie Optimierung und Qualitätskontrolle einzelner Prozessschritte wie der Oberflächenvorbehandlung oder der Aushärtezeit.

Die **Luftfahrtbranche** nimmt eine Vorreiterrolle beim Einsatz von Leichtbau ein. Entsprechend ist auch die Klebetechnologie dort bereits seit vielen Jahren im Einsatz. Hauptfügemethoden im Flugzeugbau sind Nieten und Bolzen. Diese sind zuverlässig und in die Produktion integriert, haben jedoch als Nachteil, dass der Prozess mit vielen Teilschritten wie bohren, entgraten, Bohrung mit Korrosionsschutz versehen etc. teuer und zeitaufwendig ist. Kleben bietet hier das Potenzial von Kosteneinsparungen. Kleben wird im Flugzeugbau überwiegend ergänzend eingesetzt – also um Nietverbindungen zu stabilisieren –, gewinnt jedoch zunehmend auch als alleiniges Fügeverfahren an Bedeutung.

Typische Anwendungen betreffen sowohl Verbindungen zwischen Metall und Faserverbundwerkstoffen als auch Faserverbundwerkstoffe untereinander. Einsatzgebiete sind sowohl die Montage von Innenraumkomponenten wie Kabelhaltern als auch strukturelle Verklebungen der Primär- und Sekundärstrukturen wie Sandwichklebungen, Rumpfbau­teile, Versteifungen und die Verklebung von Antriebsstrukturen. Auch bei der Reparatur kommen Klebstofflösungen zum Einsatz. Insgesamt dominiert der Einsatz von Filmklebstoffen, die sich bei gleichbleibender Schichtdicke automatisiert verarbeiten lassen.

Im Flugzeugbau liegt der Fokus auf Minimierung des Gewichts bei hoher Festigkeit und langlebigen Strukturen. Es bestehen hohe Anforderungen an die Sicherheit, was sich in strengen Vorschriften für Design und Zulassung ebenso wie einem umfangreichen Testprozedere widerspiegelt. Wie im Schiffbau müssen im Flugzeugbau hohe Brandschutzanforderungen erfüllt werden. Flugzeuge sind über ihre Lebensdauer insbesondere bei Starts und Landungen extremen mechanischen Lastwechseln ausgesetzt. Zudem unterliegen sie hohen Temperaturschwankungen.

Bei der Herstellung liegt ein hoher Automatisierungsgrad vor. Es handelt sich um optimierte Serienprozesse, wenngleich die Stückzahlen niedriger als im Automobilbau ausfallen. Sicherheit und Gewichtseinsparung genießen die höchste Priorität, entsprechend ist der Kostendruck geringer als im Schiffbau. Demnach sind die Fertigungsbedingungen nicht vergleichbar, einige Aspekte wie Brandschutz und strenge Vorschriften dazu ähneln jedoch dem Schiffbau.

Der **Schienenfahrzeugbau** ist neben dem Automobilbau und der Luftfahrt einer der wichtigsten Anwender der Klebetechnologie. Kleben kommt sowohl im Innenbereich beispielsweise für die Befestigung von Bodenbelägen und Innenverkleidungen als auch im Außenbereich zur Verglasung / Montage der Fensterscheiben oder anderen Bauteilen wie Dachsegmenten. Zudem wird Kleben bei der Wartung beispielsweise zur Reparatur von Abdichtungen oder Innenverkleidungen benutzt.

Kleben stellt im Schienenfahrzeugbau eine Alternative zu herkömmlichen Füge­techniken wie Nieten oder Schweißen da, die insbesondere durch den Einsatz von Leichtbau motiviert ist. Durch den Einsatz von Kleben lassen sich einerseits Kunststoffe fügen, aber auch Blechstärken reduzieren, da die Füge­technik auch für dünnere Blechstärken eignet.

Auch die Verbindung von unterschiedlichen Füge­teilen wie Aluminium und Glas allgemein ist ein Treiber für den Einsatz. Die Funktion des Abdichtens spielt ähnlich wie im Schiffbau ebenso eine wichtige Rolle. Weitere Gründe für den Einsatz von Kleben und Leichtbau im Schienenfahrzeugbau sind Gewichtsersparnis, eine bessere Ausnutzung des Bauraums sowie ein größerer Spielraum beim Design. Auch ein geringerer Wartungsaufwand und reduzierte Betriebskosten sind Gründe für den Einsatz von Kleben.

Ähnlich wie in Schiffbau und den anderen Transportbranchen sind die Themen Brandschutz und Schwingungen ein Thema. Durch Kleben lässt sich die akustische Leistung optimieren und Schall, Schwingungen aber auch Schläge können gedämpft werden. Die dimensionierende Lebensdauer und lokal hohe Beanspruchungen sind vergleichbar mit dem Schiffbau, die Blechstärken unterscheiden sich in der Regel. Schienenfahrzeuge werden üblicherweise in Kleinserien oder mittleren Serien gefertigt.

Der Schienenfahrzeugbau nimmt eine Vorreiterrolle im Bereich industrielles Kleben in Bezug auf die Vorschriftenlage ein. Die DIN 6701 Kleben im Schienenfahrzeugbau wurde speziell entwickelt, um den Einsatz der Technologie mit einem Grundstandard abzusichern. Die DIN bietet einen Leit­faden über die gesamte Prozesskette und hat einen weltweit akzeptierten Standard für die Fertigung mittels Kleben im Schienenfahrzeugbau gesetzt.

Aktuelle Fragestellungen im Schienenfahrzeugbau sind unter anderem eine weitere Optimierung und Automatisierung des Fertigungsprozesses sowie die Untersuchung und Auslegung des Verhaltens über die Lebensdauer bei mehrachsiger Belastung.

In der **Windenergie** bzw. speziell der Fertigung von Rotorblättern für Windkraftanlagen ist Kleben eine etablierte und weit verbreitete Füge­technik. Die Klebetechnologie wird sowohl für die strukturelle Verklebung der Rotorblätter als auch für die Montage von aerodynamischen Anbauteilen sowie dem Anbringen von Hinweisschildern in Form von Aufklebern eingesetzt.

Im Windkraftbereich werden – ähnlich wie im Bootsbau – bereits großflächig Faserverbundkunststoffe eingesetzt. Entsprechend ist Kleben werkstoffbedingt die bevorzugte Füge­technologie. Bei den strukturellen Verklebungen des Rotorblatts werden üblicherweise Füge­teile aus Faserverbundkunststoff (in der Regel Glasfaserverstärkter Kunststoff) mit einem 2K Epoxidharz-Klebstoff verbunden. Anbauteile können aus Metallen oder Kunststoff sein, diese werden beispielsweise mit einem elastischen Klebeband auf der beschichteten Oberfläche des Rotorblatts angebracht.

Zur Zertifizierung von Rotorblättern einschließlich der Klebverbindungen ist die Richtlinie „Rotor blades for wind turbines“ des DNV GL etabliert (siehe 3.1.1). Diese enthält Vorgaben zu Lasten, Auslegungsmethoden, Materialprüfungen und Blatttests sowie anzusetzenden Sicherheitsfaktoren. Die Sicherheitsfaktoren berücksichtigen auch Fertigungseinflüsse.

Für die Klebverbindungen werden Tests auf Coupon-, Komponenten- und Full-Scale-Ebene durchgeführt. Full-Scale-Tests sind für die Zulassung eines neuen Rotorblatt-Typs erforderlich und aufgrund von Skalierungseffekten, die in kleineren Tests nicht alle abgebildet werden können, auch sinnvoll.

Kennzeichnend für den Einsatz der Klebetechnologie im Windkraftbereich sind einerseits die großen Dimensionen der Bauteile und der Klebverbindungen. Für Offshore-Anlagen haben Rotorblätter bereits die 100m-Grenze überschritten. Strukturelle Klebungen werden dabei über die gesamte Länge ohne zusätzliche Absicherung durch weitere Verbindungen (wie z.B. Nieten im Flugzeugbau) eingesetzt. Die Fertigung ist ähnlich wie bei Kleben im Schiffbau in der Regel wenig automatisiert, jedoch werden Rotorblätter in einem optimierten Serienprozess hergestellt. Der Kostendruck ist sehr hoch.

Die Auslegung erfolgt auf eine Lebensdauer von 20 Jahren mit hohen statischen und dynamischen Lasten durch Wind und Eigengewicht. Dabei treten ähnlich wie bei einem Schiff sowohl Biegemomente in Längs- und Querrichtung als auch Torsion auf. Die Sicherheitsanforderungen an die

Klebverbindungen sind mittel bis hoch, da ein Versagen Personen und den sicheren Betrieb gefährden kann (z.B. Personen auf der Anlage bei der Wartung, aber auch Personen in der Umgebung der Anlage durch herabfallende Anbauteile).

Aktuelle Herausforderungen beim Kleben in der Windenergie sind neben der wachsenden Bauteilgröße und der zunehmenden lokalen Beanspruchung einiger Bereiche der Verklebung vor allem die zuverlässige Berechnung der mehrachsigen Betriebsfestigkeit.

Im **Bauwesen** ist elastisches Kleben weit verbreitet. Strukturelles Kleben gewinnt zunehmend an Bedeutung. Kleben wird beispielsweise zur Montage von Wand- und Bodenbelägen oder Verkleidung und Lamellen zur Verstärkung eingesetzt. Auch die Verbindung zwischen Betonteilen und die Befestigung von Fassadenelementen wird mittels Kleben geschaffen. Zudem wird Kleben in der Restaurierung eingesetzt.

Einige der Hauptwerkstoffe (Holz, Beton) finden im Schiffbau keine oder nur sehr begrenzte Anwendung. Auch im Bauwesen kommen jedoch zunehmend Leichtbauwerkstoffe zum Einsatz. So ist auch hier Kleben als Enabler-Technologie zum Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe (Kunststoffe, Stahl, Glas, ...) von Interesse. Kleben kann bspw. zur Verbindung von GFK-Bauteilen zu Tragwerken oder von Glas zu Stahl zum Einsatz kommen, aber es gibt auch Anwendungen wie geklebte Brücken aus Faserverbundwerkstoffen.

Neben der Möglichkeit, hybride Verbindungen zu realisieren wird Kleben aufgrund der flächigen Kraftverteilung sowie der hohen Gestaltungsfreiheit beim Design verwendet. Auch im Bauwesen spielen Schwingungen und Schalldämpfung eine Rolle, was wieder durch Klebstoffe positiv beeinflusst werden kann. Ähnlich wie im Schiffbau handelt es sich im Bauwesen um Einzelstücke mit wiederkehrenden Designelementen. In Bezug auf Klebschichtdicke und Toleranzen ist das Bauwesen dem Schiffbau ebenso ähnlicher als andere Branchen. Eine weitere Gemeinsamkeit mit dem Schiffbau stellen die hohen Anforderungen an Brandschutz und Sicherheit dar.

2.4. Technische Aspekte der Füge-technologie Kleben

2.4.1 Überblick

Beim Einsatz der Klebetechnologie im maritimen Bereich müssen entlang der Prozesskette von der Auswahl des Klebstoffs bis hin zur Inspektion und Verhalten über Lebensdauer verschiedene Themen beachtet werden. Zu Beginn muss ein klebstoffgerechtes Design erfolgen. Ein für die Anwendung geeigneter Klebstoff muss ausgewählt werden. Für diesen muss die Klebverbindung unter Berücksichtigung von statischen und dynamischen Lasten und Umwelteinflüssen mit geeigneten Berechnungsmethoden ausgelegt werden. Für die Beschreibung des Materialverhaltens und der Festigkeitskriterien müssen Kennwerte in geeigneten Materialprüfungen ermittelt werden. Im schiffbaulichen Kontext muss besonders die Alterung unter aggressiven Umweltbedingungen berücksichtigt werden. Bei der Fertigung muss auf eine klebgerechte Vorbereitung der Füge-teil-Oberfläche sowie zulässige klimatische Umgebungsbedingungen geachtet werden. Für die Ausführung des Prozesses müssen Prozessgrenzen bekannt sein und beachtet werden. Für die Qualitätssicherung müssen Inspektionsmethoden verwendet werden, deren Aussagemöglichkeiten und Einsatzgrenzen bekannt sein müssen. Ungenauigkeiten bei Design und Fertigung müssen mit Abminderungsfaktoren berücksichtigt werden. Für diese Schritte und Themen wird nachfolgend der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik aufgeführt. Zunächst wird noch eine kurze Einordnung gegeben, bei welchen Themen sich die Fragestellungen im Schiffbau mit anderen Branchen decken oder unterscheiden und welche Themen branchenübergreifend Schwerpunkt der aktuellen klebtechnischen Forschung darstellen.

Das Potenzial der Klebtechnik als Fügemethodik insbesondere für Kunststoffbauteile wurde bereits in vielen Branchen erkannt und wird zur Erstellung innovativer Produkte genutzt. Damit einhergehend wurden in den letzten Jahren und Jahrzehnten bereits viele Aspekte des Klebens wissenschaftlich untersucht und Klebstoffe und deren Anwendung technisch weiterentwickelt.

Einige Aspekte der Klebtechnik sind branchenübergreifend von Interesse und gleichermaßen zutreffend. Eine grundsätzliche Kategorisierung von Klebstoffen sowie deren mechanische Charakterisierung ist in jeder Branche erforderlich, auch wenn sich vor allem anwendungsbezogen die eingesetzten Materialien unterscheiden. Damit einhergehend ist die Definition und Anwendung von geeigneten Testmethoden nötig. Zur Auswahl eines geeigneten Klebstoffs ist es jeweils hilfreich, wenn möglichst viele Daten zu Klebstoffen und Klebverbindungen mit unterschiedlichen Materialkombinationen zur Verfügung stehen. Für jede Anwendung muss eine konstruktive Auslegung erfolgen. Hierzu müssen geeignete Konstruktionsregeln und Rechenmethoden zur Verfügung stehen. Unsicherheiten bezüglich Materialverhalten oder Beanspruchung müssen üblicherweise mit Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden. Für die meisten Anwendungsfälle ist hierbei neben der Kurzzeitbetrachtung auch eine Analyse der Lebensdauer notwendig. Um eine qualitativ hochwertige Klebverbindung zu erreichen ist branchenübergreifend der Einfluss der Oberflächenvorbehandlung sowie von weiteren Fertigungsparametern auf die Festigkeit der Klebverbindung von hohem Interesse. Zur Qualitätssicherung bei Herstellung und Betrieb müssen geeignete Inspektionsmethoden und deren Anwendungsgrenzen bekannt sein. Auch die Qualifizierung von Personal und Arbeitssicherheit sind branchenübergreifende Themen.

Punkte, in denen sich Kleben im schiffbaulichen Kontext von Kleben in anderen Branchen unterscheidet, sind insbesondere die Losgröße der Produkte, die Zulassung, vorherrschende Fertigungsbedingungen sowie die Umgebungsbedingungen im Betrieb. Bei der Zulassung gelten immer branchenspezifische Vorschriften. Im Schiffbau liegt hier einerseits aktuell ein sehr heterogenes Regelwerk vor – es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Richtlinien für unterschiedliche Anwendungsbereiche von Kleben im maritimen Bereich, jedoch existiert keine etablierte einheitliche Richtlinie für alle Einsatzzwecke der Fügetechnologie. Zum anderen sind Vorgaben teilweise weniger detailliert als in anderen Branchen. Dieses Thema wird in Kapitel 3 näher beleuchtet. In Bezug auf die Fertigungsbedingungen im Schiffbau (siehe Kapitel 0) variieren beispielsweise die klimatischen Bedingungen und die Sauberkeit teilweise mehr als in anderen Branchen. Schiffbauliche Toleranzen können zu relativ hohen Klebschichtdicken führen, welche bei Materialprüfungen und Auslegung eine Herausforderung darstellen. Bestimmte Oberflächenvorbereitungsmethoden, die in einer stark automatisierten Fertigung einsetzbar sind, lassen sich im Schiffbau nicht ohne weiteres anwenden. Bei den Umgebungsbedingungen sind schiffbauliche Klebverbindungen sehr aggressiven Bedingungen ausgesetzt. Belastungen durch Salzwasser, stark schwankende Einsatztemperaturen oder Reinigungsmittel können die Lebensdauer einer Klebverbindung wesentlich reduzieren und müssen bspw. durch beschleunigte Lebensdauer-Tests bewertet werden.

2.4.2 Klebgerechtes Design

Für ein klebgerechtes Design sollten verschiedene Aspekte beachtet werden. Allgemein ist es empfehlenswert, eine Klebung auf Schubbeanspruchung auszulegen und Schälbeanspruchungen zu vermeiden (siehe Abbildung 8). Zudem gibt es konstruktive Regeln und Empfehlungen, die beim Design eingehalten werden sollten. In Abbildung 9 sind als Beispiel einige klebgerechte Designs dargestellt. Bei schiffbaulichen Anwendungen bestehen hier unterschiedliche Freiheitsgrade. So lässt sich bei der Montage von einigen Bauteilen die Konstruktion ohne Mehraufwand klebgerecht umsetzen. Bei anderen Anwendungsfällen lassen sich klebstoffgerechte Konstruktionen nur erreichen, wenn das Gesamtdesign frühzeitig genug auf den Einsatz der Klebetechnologie ausgerichtet ist. Allgemein sind vorteilhafte Belastungen und konstruktive Empfehlungen gut erforscht und stehen Anwendern im Schiffbau in der Literatur und Unterlagen der Hersteller zur Verfügung.

Grundlegende konstruktive Regeln, die man beim Design einer Klebverbindung beachten sollte, sind in Standardwerken (siehe Abschnitt 2.6) zu finden. Gleiches gilt für die analytische Ermittlung der Schubspannungen nach Volkersen oder Goland und Reissner. Einen Überblick über existierende analytische Modelle einschließlich der Untersuchungen von Geometrie auf die Festigkeit liefert auch (Shishesaz & Hosseini , 2018). Von den geometrischen Parametern ist die Klebschichtdicke und ihr Einfluss auf die Klebverbindung immer noch aktueller Forschungsgegenstand (siehe bspw. Beiträge (AB19_123)“ oder (AB19_80) in (AB 2019 - 5th International Conference on Structural Adhesive Bonding, 2019)). Es ist jedoch bekannt, dass die Klebschichtdicke einen großen Einfluss auf die Festigkeit hat. Für den Schiffbau ist hier zu berücksichtigen, dass aufgrund von Fertigungstoleranzen und Grenzen des überwiegend manuellen Klebprozesses größere Klebschichtdicken als bspw. im Automobilbau üblich sind.

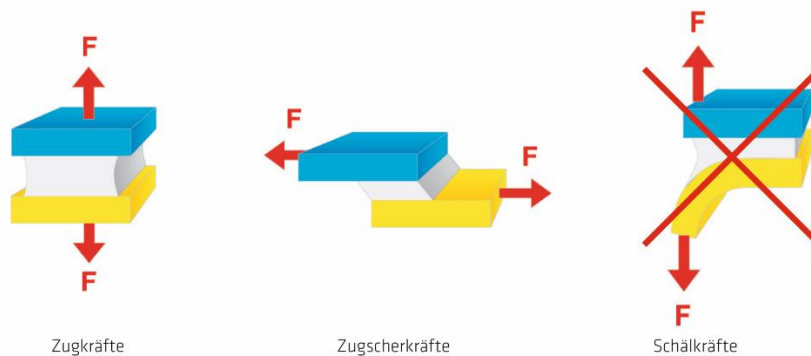


Abbildung 8: Günstige und ungünstige Beanspruchungen (©Sika Deutschland GmbH)

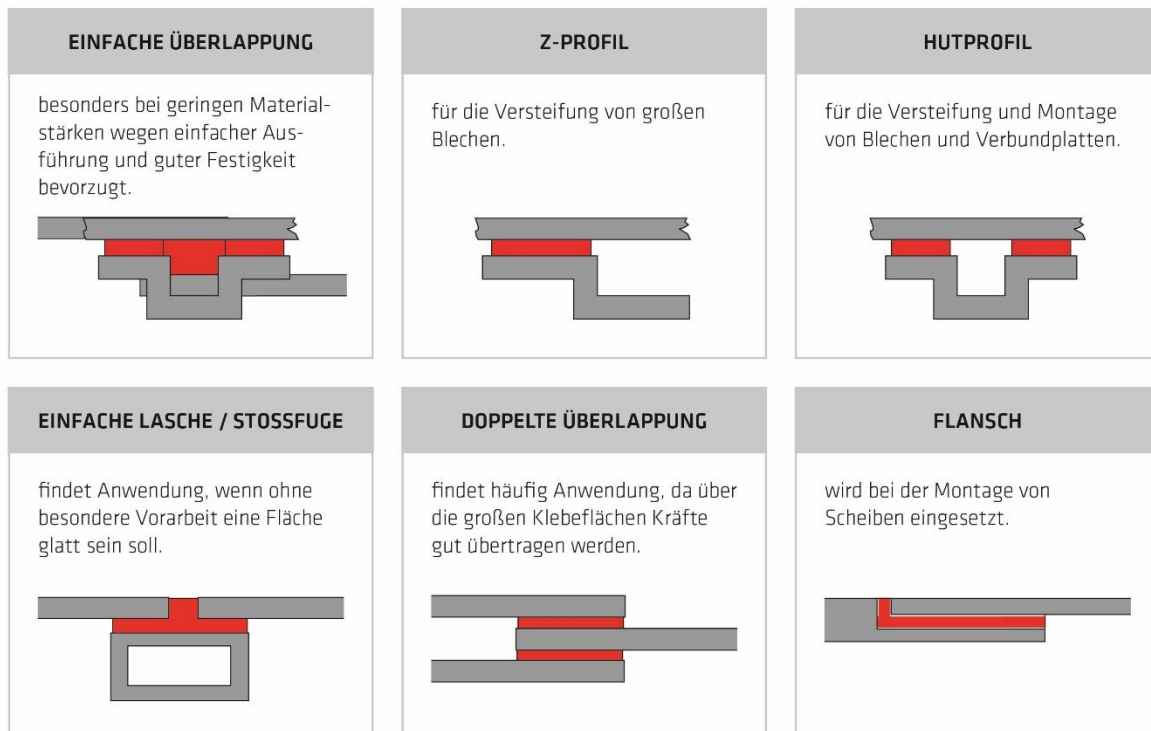


Abbildung 9: Klebgerechtes Design (©Sika Deutschland GmbH)

Auslegung und Berechnungsmethoden

Um zu gewährleisten, dass Klebverbindungen den auftretenden Belastungen standhalten, müssen diese entsprechend unter Verwendung geeigneter Versagenskriterien ausgelegt werden. Anders als beim Schweißen kann hier nicht auf Nachschlagewerke zurückgegriffen werden. Für „einfachere“ Klebverbindungen mit kleineren Abmessungen, geradliniger Geometrie und reiner Schubbelastung können analytische Ansätze verwendet werden. Für komplexere Geometrien oder mehrachsige Belastungen ist eine numerische Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode üblich. Einen Überblick über die Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode findet sich in (Abdel Wahab M. , 2014) und (He, 2011). (Yang, Ritter, & Speth, 2011) untersuchen speziell die FE-Berechnung von Faserverbund-Stahl-Klebverbindungen. Fortgeschrittene Berechnungsmethoden und Versagenskriterien sind immer noch Forschungsthema, bspw. Ansätze zur Berücksichtigung von mehrachsigen Beanspruchungen einschließlich Schälspannungen über die Lebensdauer oder bruchmechanische Ansätze (siehe z.B. (da Costa, 2017) oder (Çavdar, Teutenberg, Meschut , & et al., 2019)). Da bei Berechnungsmethoden üblicherweise für bestimmte Einflussgrößen wie lokaler Geometrie oder genauer Auswerteposition Berechnungsfaktoren angesetzt werden müssen, lässt sich eine gewisse Ungenauigkeit teilweise nicht vermeiden. Dies wird in den meisten Regelwerken durch Sicherheitsfaktoren abgedeckt. Es gibt auch Ansätze, stattdessen mit statistischen Methoden zu arbeiten (vgl. Beitrag (EUR18_92) in (EURADH 2018, 2019)), diese sind für den Schiffbau derzeit jedoch nicht relevant.

2.4.3 Beanspruchungen im Schiffbau

Grundsätzlich müssen für die Dimensionierung einer Klebverbindung einerseits mechanische Lasten und andererseits klimatische Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. In diesem Abschnitt werden auftretende Beanspruchungen genauer untersucht. Die Berücksichtigung in Materialprüfungen wird im nächsten Abschnitt dargestellt.

Bei den mechanischen Lasten sind allgemein sowohl statische Lasten als auch Betriebslasten relevant. Je nach Konstruktion können dabei auf die Klebschicht Schub-, Normal- oder Schällasten wirken. Da Schälbeanspruchung zu sehr ungünstigem Versagen führt, ist diese Belastungsart bei der Auslegung von Klebverbindungen soweit wie möglich zu vermeiden. Zusätzlich kann je nach Klebstoff und Belastung auch Kriechen relevant sein.

Aufgrund der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten des Klebens auf einem Schiff können sich die mechanischen Lasten von Klebverbindungen dabei stark unterscheiden. Auf manche Anwendungsfälle wirken quasistatische Belastungen. Beispielsweise liegt bei Immersion unter Wasser hydrostatischer Druck vor. Ebenso können jedoch zyklische Beanspruchungen beispielsweise durch Wellen oder dynamisch variierende Lasten beispielsweise durch Wind auf die Klebverbindung einwirken. Es muss also für jeden Anwendungsfall immer geprüft werden, welche mechanischen Beanspruchungen auftreten.

Zu beachten ist auch, dass mehrachsige mechanische Belastungen sich ggf. anders auswirken als einzeln auftretende Belastungen. Insbesondere mehrachsige Betriebslasten sind immer noch Gegenstand der Forschung (vgl. z.B. (Li, Zhang, Zhong Shen, & Li Wei, 2019) und (Monteiro, Akhavan-Safar, Carbas, & et al., 2019)). Auch treten Wechselwirkungen von mechanischen und hygrothermischen Lasten, die nachfolgend genauer beleuchtet werden, auf. Die genauen Mechanismen solch kombinierter Beanspruchungen werden auch noch erforscht (vgl. (Schneider, Beber, Schweer, Brede, & Mayer, 2018) oder (Jiang, Kolstein, Bijlaard, & Qiang, 2015) und (Jiang, Qiang, Kolstein, & Bijlaard, 2015)).

Als klimatische Einflüsse spielen Temperatur und Luftfeuchtigkeit, aber auch UV-Bestrahlung und der Einfluss von Medien von Salzwasser und Reinigungsmitteln, denen manche Klebverbindungen ausgesetzt sind, eine Rolle. Durch solche äußeren Einflüsse können Alterungsmechanismen auftreten. Diese werden nachfolgend genauer betrachtet.

Alterung

Alterung wird gemäß DIN 50035:2012-09 als „Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge“ definiert. Dabei können als Ursache innere und äußere Einflüsse eine Rolle spielen. Bei innerer Alterung treten thermodynamisch instabile Zustände des Materials – beispielsweise Abbau von Eigenspannungen, Nachkristallisation oder Weichmacherwanderung – auf, die zu Alterungsvorgängen führen. Äußere Alterung wird durch chemisch-physikalische und mikrobiologische Einwirkungen der Umgebung auf das Material hervorgerufen. Typische Beispiele sind Ermüdungsrisse, thermooxidativer Abbau oder Quellung.

Insbesondere Alterung durch Feuchtigkeit stellt in der maritimen Umgebung einen wichtigen Schädigungsmechanismus dar. Die Diffusion von Feuchtigkeit in die Klebschicht ist dabei ein temperaturabhängiger Prozess, dessen Geschwindigkeit mit zunehmender Temperatur steigt. Die gleichzeitige Einwirkung von mechanischer Belastung kann die feuchtigkeitsbedingte Alterung ebenso beschleunigen. Von den derzeit bekannten Klebstoffen ist kein Material gegen die Aufnahme von Feuchtigkeit immun, die Materialien unterscheiden sich jedoch in der Menge des aufgenommenen Wassers. Insgesamt hängt die Aufnahmemenge und -geschwindigkeit einer Klebverbindung also von mehreren Faktoren ab:

- Temperatur
- Umgebungsfeuchtigkeit
- Durchlässigkeit der Fügeteile
- Geometrische Gestaltung der Klebverbindung
- Vermögen des Klebstoffes Wasser aufzunehmen
- Klebstoffschädigungen (z.B. Mikrorisse)

Dabei sind Klebverbindungen in der maritimen Umgebung allgemein einem großen Temperaturbereich ausgesetzt, der in der Luft von sehr tiefen Temperaturen (-30°C) bis zu sehr hohen

Temperaturen (70°C) an Oberflächen reichen kann. Im Wasser muss ein Temperaturbereich von 0° bis 35°C berücksichtigt werden.

Die Alterung durch Feuchtigkeit wirkt sich unterschiedlich auf die Klebschicht, die Grenzschicht sowie die Füge­teile aus. Bei der Grenzschicht ist es entscheidend, ob parallel Korrosionsvorgänge ablaufen. Ist dies der Fall, führt insbesondere bei Faserverbund-Kle­bungen ein andernfalls relativ langsamer Alterungsprozess zu einem schnellen Festigkeitsverlust. In der Regel sind Feuchtigkeitseinwirkungen auf die Grenzschicht sehr ungünstig. Eine Kombination mit hohen Temperaturen ist dabei besonders kritisch. Auf die Klebschicht hat aufgenommene Feuchtigkeit einen Weichmachereffekt, d.h. Festigkeitswerte sinken, während die Dehnung steigt. Dieser Effekt ist in der Regel reversibel, Ein- und Ausdiffundieren von Feuchtigkeit kann jedoch zu Versprödung führen. Der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Füge­teile ist abhängig vom Material des Füge­teils. Während Naturfasern oder Kunststoffe in unterschiedlichem Maß quellen, können metallische Füge­teile oxidieren und Baustoffe wie Gips oder Pappe auswaschen.

Neben der Alterung durch Feuchtigkeit spielt die thermische Alterung eine Rolle. Thermische Belastung kann zu Erweichung oder Abbau der Festigkeit führen. Daher sind für Klebstoffe normale Grenzen des Einsatzes durch die Temperatur bestimmt. Auch durch UV-Strahlung, denen Klebstoffe in außenliegenden Bereichen ausgesetzt sind, können Alterungseffekte auftreten. UV-Strahlung ist in der Lage, chemische Bindungen aufzubrechen und beispielsweise Verfärbungen oder Versprödungen zu bewirken. Bei Direktverglasungen im Fahrzeugbau wird daher zum Schutz der Klebschicht ein Keramiksiebdruckrand auf die Scheibe aufgebracht.

Auch Alterung durch Medienkontakt ist in der maritimen Umgebung von Bedeutung. Im Schiffsbetrieb sind Klebverbindungen unterschiedlichen Substanzen wie Reinigungs­laugen, Salzwasser oder Kraftstoff ausgesetzt. Ähnlich wie Feuchtigkeit können Medien in Klebungen eindringen und diese schädigen. Dabei weisen verschiedene Klebstoffgruppen unterschiedliche Beständigkeiten gegenüber diesen Medien auf. Grobe Richtwerte sind in der Regel in Datenblättern enthalten. Für die Bewertung eines Anwendungs­falls ist jedoch eine genaue Kenntnis der einwirkenden Medien und häufig eine anwendungsbezogene Untersuchung nötig. So werden nicht auf allen Schiffen dieselben Reinigungsmittel verwendet, aber selbst der Salzgehalt ist nicht in allen Meeren einheitlich.

Insgesamt existieren zum Thema Alterung und Lebensdauer bereits einige Untersuchungen. Alterung für Epoxy- und PU-Klebstoffe wird beispielsweise in (Possart & Brede, 2018) ausführlich beleuchtet. Die Beanspruchung durch Salzwasser ist nicht nur für den maritimen Bereich aufgrund von Kontakt mit Meerwasser, sondern durch den Einsatz von Streusalz auf den Straßen im Winter auch für den Automobilbau von Belang. Einen Überblick über Forschung zu diesem Thema liefert (Viana, Costa, Banea, & da Silva, 2016). Insbesondere unterschiedliche Kombinationen und Wechselwirkungen von hygrothermischer und mechanischer Belastung sowie der Beanspruchung durch Medien sind jedoch auch aufgrund der Vielfalt der Einflussparameter von Materialkombinationen zu Beanspruchungsszenarien noch Gegenstand der Forschung.

2.4.4 Materialcharakterisierung & Materialprüfung

Materialseitig gibt es eine Vielzahl an verfügbaren Klebstoffen von unterschiedlichen Herstellern. Die große Auswahl an Klebstoffen unterscheidet diese Füge­technologie deutlich von anderen Füge­methoden. Einerseits bietet die Vielfalt die Möglichkeit, für unterschiedliche Einsatzzwecke maßgeschneiderte Werkstoffe zu verwenden. So ist hierdurch das Fügen von unterschiedlichsten Materialkombinationen möglich. Jedoch wird der Anwender auch vor die Aufgabe gestellt, die richtige Auswahl zu treffen. In der Regel ist ein Anwender hier auf die Unterstützung der Hersteller angewiesen, die durch Informationen zum Material und Erfahrungen mit vielen Anwendungen die Wahl erleichtern können. Ergänzend gibt es Datenbanken, wie z.B. Matmatch (Matmatch, 2019), die versuchen Informationen gebündelt zur Verfügung zu stellen. Da bei Klebverbindungen die Festigkeit von vielen Parametern abhängt – so müssen für den gleichen Klebstoff bei unterschiedlicher Dicke

oder anderem Substrat neue Prüfungen durchgeführt werden – ist es jedoch kein einfaches Unterfangen, eine nutzbare Datenbank zu erstellen.

Für die Auswahl eines Klebstoffes muss ein Anwender somit zunächst den Einsatzzweck kennen. Weiterhin müssen für die Auswahl des Klebstoffs benötigte Festigkeiten oder Bruchdehnungen ebenso wie weitere Beanspruchungen bspw. in Form von UV, Seewasser und Betriebstemperaturen sowie die vorliegenden Fertigungsbedingungen (z.B. Temperatur und Luftfeuchtigkeit) berücksichtigt werden.

Grundsätzlich stehen für Anwender im Schiffbau und Bootsbau geeignete Werkstoffe für verschiedene Anwendungen zur Verfügung, die mit Beratung durch Hersteller ausgewählt werden können, und üblicherweise mit bekannten Materialgesetzen beschrieben werden können. Gegebenfalls liegen für eine bestimmte Materialkombination nicht alle erforderlichen Kennwerte vor, so dass zusätzliche Prüfungen erforderlich sind. Mit der Auswahl und Charakterisierung des Klebstoffs sind für eine Werft, die Klebtechnologie einsetzt, jedoch keine grundsätzlich offenen wissenschaftlichen Fragen verbunden.

Forschung und Entwicklung in diesem Bereich beschäftigt sich überwiegend mit der Entwicklung von neuen Werkstoffen. Hier steht einerseits das Verbessern einzelner Eigenschaften wie der mechanischen Festigkeit oder der Widerstandsfähigkeit gegenüber Feuchtigkeit im Fokus. Stichworte sind hier z.B. „performance-enhanced PU“, EP with ultrahigh ductility“, aber auch selbstheilende und insbesondere noch schneller aushärtende Werkstoffe. Zum anderen wird versucht, den Anwenderwunsch nach einem „Alleskönner“ zu erfüllen, also einem Universalkleber, der in einem breiten Spektrum von Fertigungs- und Betriebsbedingungen nutzbar ist. Für Schiffbau-Anwender lohnt es daher immer sinnvoll, neue Produktentwicklungen im Auge zu behalten.

Zudem werden in der Forschung Untersuchungen von neuen Materialien oder Materialkombinationen betrieben. Hierdurch kann das verfügbare Wissen über bestimmte Werkstoffe erweitert werden. Dies ist für schiffbauliche Anwendungen von Interesse, wo es angedachte Materialien oder Materialkombinationen betrifft. So werden z.B. unterschiedlichste Fügepart-Materialkombinationen wie Aluminium-GFK (Arenas, Alía, Narbóna, & et al., 2013), Stahl-GFK (Galvez, Abenojar, & Martinez, 2019) oder auch allgemein Multi-Material Verbindungen untersucht. Neben dem mechanischen Verhalten bspw. der Einfluss von Feuchtigkeit, aber auch Aspekte wie die Schwingungsdämpfung eines Materials oder die thermische Ausdehnung bei unterschiedlichen Materialien einer Klebverbindung untersucht. Zudem gibt es einzelne Arbeiten zum Kleben von 3D-gedruckten Strukturen. Auch spezielle Aspekte von hybriden Verbindungen werden weiter erforscht.

Tests

Bei den Tests gibt es einige etablierte und genormte Standards. Diese betreffen zum einen die Ermittlung der physikalisch-chemischen Eigenschaften wie der Dichte und Viskosität oder des pH-Werts und der Beständigkeit gegenüber dem Einfluss von Chemikalien. Zum anderen gibt es mechanische Prüfungen zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte wie Elastizitätsmodul und Festigkeiten, die direkt in die Auslegung der Klebverbindung einfließen. Ein Überblick über alle physikalisch-chemischen und mechanischen Prüfungen ist in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt. In Tabelle 2 werden für unterschiedliche zu ermittelnde physikalisch-chemische Kennwerte zunächst Anwendungszwecke der Kennwerte und in Frage kommende Testmethoden zur Ermittlung des jeweiligen Kennwertes dargestellt. Beispielsweise ist die Glasübergangstemperatur sowohl zur Klebstoffauswahl als auch für die Entwicklung und Qualitätskontrolle von Interesse. Ermittelt werden kann sie mit zwei grundsätzlichen Testverfahren, für die es jeweils verschiedene Standards gibt.

Analog ist in Tabelle 3 für mechanische Kennwerte dargestellt, welche Prüfmethode und entsprechende Standards für die Ermittlung der Kennwerte in Frage kommen. Hier wird auch aufgeführt, welche Vorteile und Begrenzungen die einzelnen Testmethoden haben. Allein für die Ermittlung der Schubfestigkeit gibt es zahlreiche verschiedene Prüfmethode. Sofern nicht extern vorgeschrieben ist welche Materialprüfungen durchzuführen sind, sollte zunächst aufgrund der

auftretenden Beanspruchungen erörtert werden, welche Kennwerte eine Rolle spielen. Anschließend sollte die konkrete Prüfmethode basierend auf der speziellen Anwendungskonfiguration ausgewählt werden. So sind beispielsweise für Metallsubstrate und Faserverbundssubstrate verschiedene Methoden unterschiedlich gut geeignet. Hier ist es empfehlenswert, auf das Knowhow von erfahrenen Prüfinstituten zurückzugreifen.

Physikalisch-chemische Eigenschaft	Anwendungszweck	Anmerkungen	Standards / Testmethoden
Messung von T_g oder anderen Übergangstemperaturen des Klebstoffs	Klebstoffauswahl Qualitätskontrolle F&E	Zur Messung der Übergangstemperatur sind sowohl der DSC-Tests (Differential Scanning Calorimetry) als auch die DMA-Analyse (Dynamisch-mechanische Analyse) üblich	<u>DSC:</u> ISO 11357-2 ASTM E1356 ASTM D3418 <u>DMA:</u> ISO 6721-11 ASTM D7028 ASTM E1640
Dichte	Qualitätskontrolle	Allgemein liegt die Dichte von Klebstoffen im Bereich von 0,8 bis 1,5 g/cm ³ . Klebstoffhersteller müssen die Dichte im technischen Datenblatt angeben.	EN ISO 1675 ISO 1183 NF EN 542 NF EN 543
Viskosität	Klebstoffauswahl Qualitätskontrolle		EN 12092 ASTM D2556 ASTM D1084 EN ISO 2555 ISO 3219
Topfzeit	Klebstoffauswahl Qualitätskontrolle	Charakteristisch für Zweikomponenten-Klebstoffe. Topfzeit ist die Zeit, in der der Klebstoff nach dem Mischen der Komponenten verarbeitet werden darf.	NF EN 14022 ISO 10364
Füllstoffgehalt	Klebstoffauswahl F&E Lebensdauervorhersage	Füllstoffe wie mineralische Partikel oder andere Rohstoff-Partikel werden von Klebstoffherstellern eingesetzt, um die Kennwerte des Klebstoffs (Viskosität, mechanische oder elektrische Eigenschaften, Kosten, ...) zu modifizieren und verbessern. Je nach Form der Füllstoffe können diese auch zu anisotropem Materialverhalten führen sowie durch Interaktion mit Feuchtigkeit und metallischen Substraten die Lebensdauer beeinflussen.	NF EN 1246 NF EN 827 ASTM D5040 ASTM D1489
Wasseraufnahme	Klebstoffauswahl Qualitätskontrolle F&E Lebensdauervorhersage		NF EN ISO 62 ASTM D570
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	Klebstoffauswahl Design	Parameter muss bei Verbindungen mit unterschiedlichen Materialien berücksichtigt werden.	ASTM D696 ISO 11359-2
Härte	Qualitätskontrolle	Vergleichende Messungen können als Indikator für den Aushärtegrad verwendet werden.	ISO 868 ASTM C661 ASTM D2240
Fügeteil-Oberflächenqualität	Klebstoffauswahl Qualitätskontrolle	Vergleichende Methoden sollten verwendet werden, um die Oberflächenvorbereitung vor der Verklebung zu bewerten.	NF EN 828 ASTM D8296 ISO 8296 Abzugstest ASTM D3808 Rauigkeit
pH-Wert	Klebstoffauswahl Qualitätskontrolle F&E Lebensdauervorhersage	Manche Klebstoffe können durch den Einfluss von Feuchtigkeit mit der Zeit säurebildend oder basisch werden. Dies kann zu Korrosion von metallischen Fügeteilen führen und die Lebensdauer minimieren.	EN 1425 ASTM D3310 ASTM D1583
UV-Beständigkeit	Klebstoffauswahl F&E Lebensdauervorhersage	Für Klebverbindungen, die UV-Strahlung ausgesetzt sind.	ASTM D412 EN ISO 4892

Chemische Beständigkeit	Klebstoffauswahl F&E Lebensdauervorhersage	Beständigkeit des Klebstoffs gegen chemische Stoffe, denen der Klebstoff im Betrieb ausgesetzt ist, sollen vom Klebstoffhersteller spezifiziert werden.	ASTM D896
--------------------------------	--	---	-----------

Tabelle 2: Physikalisch-chemische Tests für Klebstoffe (Bureau Veritas, 2015)

Testmethoden		Standard	Vorteile	Einschränkungen
Zug	Reine Klebstoffprüfung	ISO 527-2 ASTM D638	<ul style="list-style-type: none"> - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Reine Zugspannungen: geeignet als Designkennwert 	<ul style="list-style-type: none"> - Bei dicken Probekörpern können bei der Herstellung exothermische Reaktionen auftreten - Bruchdehnung kann durch Fehlstellen (Porositäten, Risse) beeinflusst werden
	Kopfzug	ASTM D897 ASTM D2095 ISO 6922	<ul style="list-style-type: none"> - Geeignet für vergleichende Bewertung, Qualitätskontrolle - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Nutzung für Fatigue / Kriechen / Umwelteinflüsse möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht geeignet als Designkennwert - Kehlnaht beeinflusst resultierende Festigkeit - Reproduzierbarkeit der Messungen
Druck	Reine Klebstoffprüfung	Flexible Klebstoffe ISO 7743 ASTM D575 Steife Klebstoffe ISO 604 ASTM D695	<ul style="list-style-type: none"> - Allgemein gilt die Annahme, dass Zug- und Druckfestigkeit gleich sind außer wenn hydrostatische Spannungskomponenten das Versagen beeinflussen 	<ul style="list-style-type: none"> - Unterschiedliche Testmethoden für flexible und steife Klebstoffe
Schub	Single Lap Joint (SLJ)	ASTM D1002 ASTM D3163 ASTM D3164 ASTM D3165	<ul style="list-style-type: none"> - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Geeignet für vergleichenden Prüfungen, Qualitätskontrolle - Nutzung für Fatigue / Kriechen / Umwelteinflüsse möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht geeignet als Designkennwert (keine reine Schubfestigkeit) - Geometrieabhängig (Klebschichtdicke, Überlappungslänge, ...) - Versagensmodus beachten für aussagekräftige Interpretation (Schälen, Fügefließen, ...) - Nur für steife Fügeteile - SLJ: mittlere bis hohe Biegebelastung aufgrund von Versatz der Lastangriffspunkte, erhöhte Biege- und Schälspannungen an Klebschichträndern - DLJ: reduzieren Biegespannungen, aber keine homogene Spannungsverteilung - Reproduzierbarkeit der Messungen
	Double Lap Joint (DLJ)	ASTM D3166 ASTM D3528 ASTM D5868 EN 1465 ISO 4587 EN ISO 9664		
	V-Notched beam (Iosipescu)	ASTM D5379	<ul style="list-style-type: none"> - Reine Klebstoffprobe oder Verbindungsprüfkörper - Geeignet als Designkennwert - Geeignet für Untersuchung Umwelteinflüsse 	<ul style="list-style-type: none"> - Reine Klebstoffprobe: DMS (2 Biax-Rosetten) erforderlich - Verbindungsprüfkörper: Schwierigkeiten mit der Messung kleiner Verformungen - Akkurate Bearbeitung der Prüfkörper erforderlich - Spezielle Aufspannvorrichtung erforderlich - Ungeeignet für Kriechen / Lebensdauer
	Arcanprobe Modifizierte Arcanprobe	Kein Standard	<ul style="list-style-type: none"> - Vielseitige Methode (Kombination von Zug- und Schubbelastung möglich) - Reine Klebstoffprobe oder Verbindungsprüfkörper - Spannungszustand relativ homogen (Verbesserung mit modifizierter Arcanprobe) - Geeignet als Designkennwert - Nutzung für Fatigue / Kriechen / Umwelteinflüsse möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Schwierigkeiten mit der Messung kleiner Verformungen - DMS / Extensometer erforderlich - Akkurate Bearbeitung der Prüfkörper erforderlich - Spezielle Aufspannvorrichtung erforderlich - Kein existierender Standard

	Torsionsrohr / Stumpfstoß	Kein Standard	<ul style="list-style-type: none"> - Reine Klebstoffprobe oder Verbindungsprüfkörper - Geeignet als Designkennwert - Nutzung für Fatigue / Kriechen / Umwelteinflüsse möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Torsionsprüfmaschine erforderlich - Reine Klebstoffprobe: exotherme Reaktionen möglich - Verbindungsprüfkörper: kleine Dehnungen – schwierig zu messen - Kein existierender Standard
	Stumpferklebte Hohlzylinder	ASTM E229 ISO 11003-1 NF EN 14869-1	<ul style="list-style-type: none"> - Spannungszustand relativ homogen - Geeignet als Designkennwert - Nutzung für Fatigue / Umwelteinflüsse möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Torsionsprüfmaschine erforderlich - Akkurate Bearbeitung der Prüfkörper erforderlich - Kleine Dehnungen schwierig zu messen - Klebschichtdicke schwer zu kontrollieren
	TAST (Thick Adherend Shear Test)	ASTM D3983 ISO 11003-2 NF EN 14869-2	<ul style="list-style-type: none"> - Relativ homogener Spannungszustand in Klebschicht - Geeignet als Designkennwert - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Geeignet für Untersuchung Umwelteinflüsse 	<ul style="list-style-type: none"> - Schwierige Messung kleiner Deformationen (2 Extensometer nötig) - Akkurate Spannungsanalyse schwierig, Konzentrationen an Klebschichtträgern vorhanden (kann durch modifizierten Test reduziert werden) - Spezielle Aufspannvorrichtung erforderlich - Begrenzt Fatigue-tauglich
	TAST modifiziert	Kein Standard		
	ENF (Endnotched Flexure)	Kein Standard	<ul style="list-style-type: none"> - Mode II Bruchzähigkeit - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Nutzung für Fatigue / Umwelteinflüsse möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschränkt auf steife Fügeteile und Klebstoffe - Spezielle Aufspannvorrichtung erforderlich - Ungeeignet als Designkennwert - Auswertung der Ergebnisse schwierig - Reproduzierbarkeit der Messungen
Schäl	T-Schäl	ASTM D1876 ISO 11339 ISO 8510-2	<ul style="list-style-type: none"> - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Geeignet für vergleichende Prüfungen - Geeignet für Untersuchung Umwelteinflüsse 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschränkt auf dünne flexible Fügeteile - Ungeeignet als Designkennwert - Reproduzierbarkeit der Messungen - Ungeeignet für Fatigue / Kriechen
	Trommel-Schäl	ASTM D1781	<ul style="list-style-type: none"> - Test einfach durchführbar - Geeignet für vergleichende Prüfungen, Klebstoffauswahl, Qualitätskontrolle von Sandwichdeckhäuten 	<ul style="list-style-type: none"> - Spezielle Aufspannvorrichtung erforderlich - Herstellung der Prüfkörper - Ungeeignet als Designkennwert - Ungeeignet für Fatigue / Kriechen / Umwelteinflüsse
	Rollen-Schäl	ASTM D3167 ISO 4578 NF EN 1464	<ul style="list-style-type: none"> - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Geeignet für vergleichende Prüfungen, Klebstoffauswahl, Qualitätskontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> - Spezielle Aufspannvorrichtung erforderlich - Ungeeignet als Designkennwert - Ungeeignet für Fatigue / Kriechen / Umwelteinflüsse
Spalt	Boeing Keil	ASTM D3762 ISO 15107 ISO 10354	<ul style="list-style-type: none"> - Mode I Bruchzähigkeit - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Geeignet für Untersuchung Umwelteinflüsse - Effektiv zum Vergleich der Beständigkeit der Oberflächenvorbehandlung - Akkurate und reproduzierbare Daten - Variante für spröde Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschränkt auf steife Klebstoffe und Fügeteile - Ungeeignet für Fatigue / Kriechen
	Spaltfestigkeit von Metallklebverbindungen	ASTM D1062	<ul style="list-style-type: none"> - Mode I Bruchzähigkeit - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Geeignet für Untersuchung Umwelteinflüsse / Fatigue - Geeignet für vergleichende Prüfungen, Klebstoffauswahl, Qualitätskontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> - Spezielle Aufspannvorrichtung erforderlich - Beschränkt auf steife Fügeteile - Ungeeignet als Designkennwert
	DCB (Double Cantilever Beam)	ASTM D3433 ISO 25217	<ul style="list-style-type: none"> - Mode I Bruchzähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschränkt auf steife Fügeteile

			<ul style="list-style-type: none"> - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Geeignet für Untersuchung Umwelteinflüsse / Fatigue 	<ul style="list-style-type: none"> - Bruchenergie variiert mit Versagenslänge - Spezielle Aufspannvorrichtung erforderlich - Schwierige Interpretation der Ergebnisse - Begrenzt geeignet als Designkennwert - Reproduzierbarkeit der Messungen
	TDCB (Tapered Double Cantilever Beam)	ASTM D3433 ISO 25217	<ul style="list-style-type: none"> - Mode I Bruchzähigkeit - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - Geeignet für Untersuchung Umwelteinflüsse / Fatigue 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschränkt auf steife Fügeteile - Große Prüfkörper nötig - Spezielle Aufspannvorrichtung erforderlich - Ergebnisse - Begrenzt geeignet als Designkennwert - Reproduzierbarkeit der Messungen
Dynamisch		ISO 6721 Serie ASTM D4065 ASTM D4092 ASTM D5023 ASTM D5024 ASTM D5026 ASTM D5279 ASTM D5418	<ul style="list-style-type: none"> - unterschiedliche und vielseitige Methoden (Zug, Biegung, Druck, Torsion), die zur Ermittlung der Glasübergangstemperatur verwendet werden können - Elastizitäts- und Schubmodul als Funktion der Frequenz oder Temperatur - zerstörungsfreie Prüfmethode - Probekörperherstellung und Test einfach durchführbar - reine Klebstoffproben oder Verbindungsprüfkörper - geeignet für F&E, Klebstoffcharakterisierung und -auswahl, Qualitätskontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> - Ungeeignet für flexible Klebstoffe - Hohe Frequenzen können zur Erwärmung des Klebstoffs führen, welche die Ergebnisse beeinflussen

Tabelle 3: Mechanische Tests für Klebstoffe (Bureau Veritas, 2015)

Unter den Prüfmethode gibt es sowohl qualitative als auch quantitative Prüfungen. Teilweise werden Prüfungen insbesondere zur Ermittlung der physikalisch-chemischen Eigenschaften an reinen Klebstoffproben durchgeführt. Für mechanische Prüfungen werden in der Regel verklebte Prüfkörper verwendet, sodass es sich streng genommen um Verbundkennwerte handelt.

Mechanische Prüfungen können in Methoden zur Ermittlung der Kurzzeitfestigkeit und der Dauerfestigkeit unterteilt werden. Die Auswahl der Prüfmethode sollte sich dabei nach den zu ermittelnden Parametern richten. Neben den genormten Prüfungen können hier auch anwendungsorientierte Verfahren genutzt werden, die beispielsweise komplexe Beanspruchungen oder Fertigungseinflüsse berücksichtigen. Je mehr die Prüfung den realen Bedingungen entspricht, desto aussagekräftiger sind schlussendlich die Werte. Dabei sollte ein Prüfprogramm für eine Zulassung immer mit einer Klassifikationsgesellschaft abgestimmt werden bzw. deren Anforderungen entsprechen.

Auf das Ergebnis haben neben der gewählten Werkstoffkombination verschiedene Parameter einen Einfluss, die zur Nachvollziehbarkeit dokumentiert werden sollten. Hier spielen insbesondere die Probengeometrie, die Prüftemperatur, die Prüfgeschwindigkeit, das Messsystem und Probenfeuchte eine Rolle. Die Einflüsse dieser Faktoren werden nachfolgend genauer beleuchtet. Allgemein beachtet werden sollte, dass Prüfungen ggf. auch mit den verwendeten Hilfsstoffen (Primer) und möglichst mit prozessgetreuen Vorbehandlungsmethoden durchgeführt werden sollten.

Bei der Probengeometrie haben insbesondere die Überlappungslänge, die Klebschichtdicke und die Fügeteildicke einen großen Einfluss auf die Prüfergebnisse. Die höchsten Klebfestigkeiten werden dabei in der Regel bei geringen Klebschichtdicken erzielt. Ist die Klebschichtdicke zu gering, liegt jedoch oft keine vollständige Benetzung vor und die Festigkeit ist reduziert. Dies ist bei so genannten „kissing bonds“ der Fall. Tritt eine ungleiche Verformung der Fügeteile während der Belastung auf, so muss der

Klebstoff diese ausgleichen. Dadurch entstehen eine ungleiche Verformung und eine ungleichmäßige Spannungsverteilung im Klebstoff.

Bei der Prüfgeschwindigkeit kann beobachtet werden, dass mit steigender Geschwindigkeit die Festigkeit ansteigt. Für die Prüfgeschwindigkeit wird in den Normen in der Regel ein zulässiger Bereich definiert, innerhalb dessen sich Ergebnisse bereits deutlich unterscheiden können. Es ist daher insbesondere beim Vergleich von Prüfergebnissen darauf zu achten, dass dieselbe Prüfgeschwindigkeit gewählt wird.

Bei der Prüftemperatur ist bekannt, dass höhere Temperaturen die Festigkeit abmindern und die Dehnung vergrößern. Bei niedrigen Temperaturen wiederum können auch elastische Systeme glasartig werden. Es ist bei der Auswahl der Prüfungen darauf zu achten, dass Kennwerte für die minimalen und maximalen Einsatztemperaturen ermittelt werden.

Die Probenfeuchte kann ähnlich wie die Temperatur einen Weichmachereffekt (sinkende Festigkeit, steigende Dehnung) auf einen Prüfkörper haben. Im Rahmen von Untersuchungen zur Alterung wird der Einfluss von Feuchtigkeit gezielt untersucht. Um jedoch zu vermeiden, dass dieser unbeabsichtigt in anderen Prüfungen Einfluss nimmt, wird in Normen oft im Vorfeld der Prüfung eine Lagerung der Proben bei Normklima in einem Klimaschrank vorgeschrieben. Bei ausgelagerten Proben sollte vor der Prüfung immer eine eventuelle Restfeuchte dokumentiert werden.

Der Einfluss des Messsystems ist häufig nicht leicht zu bewerten. Kraft-Weg-Messungen sind oft aufgrund der Verwendung des Traversenwegs der Prüfmaschine nur begrenzt aussagekräftig. Zur Messung der Dehnung sollen daher taktile oder optische Messsysteme direkt an der Probe angebracht werden. Bei der Einspannung können unbeabsichtigt Biegemomente eingebracht werden, die das Ergebnis verfälschen. Auch kann ein Rutschen des Probekörpers auftreten, wenn Spannbacken und Spannbackendruck nicht optimal auf den Probekörper abgestimmt sind.

Trotz etablierter Standards werden einige Aspekte der Materialprüfungen selbst zu Prüfungen zur Ermittlung der Schubfestigkeit noch in der aktuellen Forschung diskutiert (vgl. (EUR18_86) in (EURADH 2018, 2019) sowie (IAA20_63) oder (IAA20_47) in (IAA 2020 - 1st International Conference on Industrial Applications of Adhesives 2020, 2019)). Es ist daher sinnvoll, Materialprüfungen bei einem Testinstitut mit entsprechender Erfahrung durchführen zu lassen.

Weiterhin sind Prüfungen zur Untersuchung der Dauerbeständigkeit und Alterung sowie zerstörungsfreie Prüfungen von Bedeutung. Letztere werden in Abschnitt 2.4.6 genauer analysiert. Prüfungen zur Dauerbeständigkeit ermitteln die Auswirkungen von Faktoren, welche die Lebensdauer einer Klebverbindung verkürzen können. Hierfür ist es erforderlich, die komplexen Alterungsmechanismen zu erfassen, die sich wie in Abschnitt 2.4.3 dargestellt aus mechanischen Lasten und Umwelteinflüssen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Salzgehalt zusammensetzen.

Es gibt hierbei zur Abschätzung der Lebensdauer noch keine universell etablierte Testmethode. Allgemein werden wiederholte Langzeitversuche in den zu erwartenden Umgebungsbedingungen als effizientestes Verfahren erachtet. Hierfür können die oben erwähnten Testmethoden zum Einsatz kommen. Dies ist jedoch aus praktischen oder finanziellen Gründen nicht immer durchführbar.

Alternativ ist die Abschätzung mittels der Prüfmethode in Tabelle 4: Standards zur Bewertung der Dauerbeständigkeit von Klebstoffen möglich, die in anderen Industrieenanwendungen zum Einsatz kommen. Diese geben Orientierung wie die Dauerbeständigkeit untersucht werden kann.

Standard	Bezeichnung
ISO 9142:2003	Klebstoffe - Auswahlrichtlinien für Labor-Alterungsbedingungen zur Prüfung von Klebverbindungen
ASTM B117	Salzsprühnebelprüfung
ASTM D3632	Künstliche Alterung von Klebverbindungen durch Sauerstoffdruck

DIN 50035	Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien - Polymere Werkstoffe
DIN 53287	Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen - Bestimmung der Beständigkeit gegenüber Flüssigkeiten
DIN EN 14258	Strukturklebstoffe - Mechanisches Verhalten von Klebverbindungen bei kurzzeitiger oder langzeitiger Beanspruchung bei festgelegter Temperatur
DIN EN 15190	Strukturklebstoffe - Prüfverfahren zur Bewertung der Langzeitbeständigkeit geklebter metallischer Strukturen
ISO 9227	Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären - Salzsprühnebelprüfungen

Tabella 4: Standards zur Bewertung der Dauerbeständigkeit von Klebstoffen

Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von beschleunigten Prüfverfahren. Die Definition von solchen beschleunigten Tests erfolgt in vier Schritten:

- 1) Definition der Umweltbedingungen, denen die Klebverbindung ausgesetzt sein wird – Temperatur, Feuchtigkeit, UV, weitere chemische Stoffe, mechanische Lasten, Salzgehalt usw.
- 2) Identifizierung von Degradations-Mechanismen – physikalisch, chemisch oder kombiniert
- 3) Identifizierung von Beschleunigungsfaktoren – kombinierte Lasten (statisch und Betriebslasten), Temperatur (isotherm, zyklisch), hydrotherm usw.
- 4) Identifizierung von Indikatoren – Restfestigkeit, Steifigkeit, Lebensdauer usw.

Sobald diese Schritte durchgeführt wurden ist es erforderlich, ein Niveau für die Anwendung der Beschleunigungsfaktoren und eine Dauer der beschleunigten Tests, die für die Lebensdauer repräsentativ ist, festzulegen. Hierzu können zwei Ansätze gewählt werden:

- Empirisch: ermittelte Umgebungsfaktoren als Grundlage
- Analytisch: Steuervariablen (Geometrie, Lastverlauf, Materialkennwerte usw.) als Grundlage

Die Anwendung von solch beschleunigten Alterungsmethoden wird nachfolgend noch detaillierter beschrieben.

Meerwasser-Alterung

Ein Beispiel für eine beschleunigte Testmethode ist die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Composite-Blättern nach X Jahren Betrieb im Meerwasser, die vom Institut Francais de Recherche pour Exploitation de la Mer (IFREMER) durchgeführt wurde (Davies, 2012). Der schematische Ablauf der Testprozedur ist in Anhang C dargestellt.

Da es keinen Einfluss der Probendicke auf die Wasseraufnahme gibt, können Tests an kleinen Proben durchgeführt werden. Zur Bestimmung des Beschleunigungsfaktors wird die Zeit, nach der bei Raum- oder Einsatztemperatur vollständige Durchdringung vorliegt, durch die Zeit, nach der bei höheren Temperaturen als der Einsatztemperatur – jedoch niedriger als Glasübergangstemperatur minus 20°C – vollständige Durchdringung vorliegt. Um die beschleunigte Alterungsdauer zu ermitteln, werden Prüfkörper für eine Dauer von X Jahren dividiert durch den Beschleunigungsfaktor in Meerwasser eingetaucht. Die gealterten Prüfkörper werden anschließend geprüft und die Eigenschaften für X Jahre Immersion ermittelt.

Feuchtigkeit

Um den Einfluss von Feuchtigkeit zu ermitteln schlägt (Davies, Tests with Moisture) das in Abbildung 10 dargestellte Schema vor. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass Substrate die Diffusion an den Rändern nicht beschleunigen.

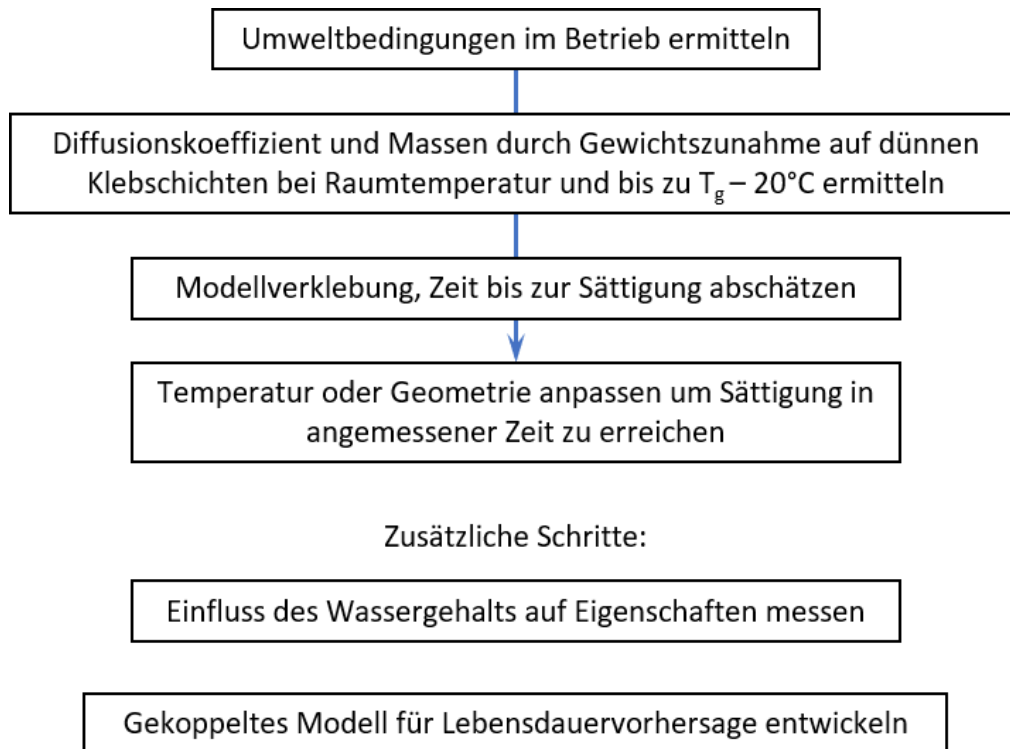


Abbildung 10: Schema für Untersuchung von Einfluss Feuchtigkeit (Davies, Tests with Moisture)

Miyano-Ansatz

Die im Rahmen des VICOMTE-Projekts (IRT Jules Verne, 2015-2018) entwickelte Methodik basiert auf dem viskoelastischen Verhalten von Verbundwerkstoffen, d.h. der von Miyano (Miyano, Nakada, & Sekine, 2004) (Miyano, Nakada, Ichimura, & Hayakawa, 2008) (Miyano, Nakada, McMurray, & Muki, 1997) definierten Zeit-Temperatur-Abhängigkeit. Das von Miyano festgelegte Zeit-Temperatur-Überlagerungsprinzip ermöglicht es, die Testdauer zu verkürzen, um den langfristigen Einfluss der Umgebung auf die mechanischen Eigenschaften von Verbundwerkstoffen zu bewerten. Diese Methode zur beschleunigten hygro-mechanischen Alterung könnte für untergetauchte Baugruppen implementiert werden (Paboeuf, et al., 2018).

Die Methode scheint sehr vielversprechend zu sein. Für die Anwendung der Methode müssen eine Reihe von Bedingungen erfüllt sein, um die Überlagerungsprinzipien mitzubedenken. Diese werden wie folgt angegeben:

- Die Zeit-Temperatur-Äquivalenz gilt nur für das zerstörungsfreie viskoelastische Verhalten und für die Beständigkeitseigenschaften des Materials. Außerdem muss der Fehlermodus unabhängig von der Temperatur identisch sein.
- Das Gesetz über den linearen kumulativen Schaden bei monotoner Belastung ist zu überprüfen. Diese Annahme ermöglicht es, die langfristige Ermüdungslebensdauer bei komplexer Belastung zu bewerten, indem alle Schäden jedes Belastungsfalls summiert werden. Dies ermöglicht die Bestimmung der Kriechmasterkurven durch quasistatische Tests.
- Lineare Abhängigkeit der Dauerfestigkeit vom Spannungsverhältnis R . Wenn diese Annahme bestätigt wird, ermöglichen die Ergebnisse des Kriechens ($R = 1$) und der Ermüdung ($R = 0$) die Ermittlung des Ermüdungsverhaltens unabhängig vom Spannungsverhältnis.

Wenn die drei oben genannten Bedingungen eingehalten werden, kann die Dauerfestigkeit eines Verbundmaterials unabhängig von der Testfrequenz, dem Spannungsverhältnis und der Temperatur bestimmt werden. Folgende Informationen sind also erforderlich:

- Hauptkurve des viskoelastischen Harzmoduls;
- Masterkurve der CRS-Stärke (Constant Strain-Rate);
- Hauptkurve der Kriechfestigkeit;
- Masterkurve der Dauerfestigkeit für das Spannungsverhältnis Null.

Für eine Verbundstruktur, die einer relativ konstanten Temperatur ausgesetzt ist, mit der Hypothese eines vernachlässigbaren Einflusses der Hydrolyse oder eines anderen Phänomens eines fortschreitenden Abbaus bei konstantem Wasserabsorptionsniveau, erfolgt eine Bewertung der Zeit, die erforderlich ist, um den gesättigten Zustand des eingetauchten Materials zu erreichen mit Temperaturbeschleunigung. Anhand der Hauptkurven des viskoelastischen Harzmoduls kann man die Beschleunigungsfaktoren quantifizieren und wissen, wann der Verbund unter normalen Temperatur- und Echtzeitbedingungen gesättigt ist und den gealterten Zustand erreicht.

Ziel ist es daher, Verbundwerkstoffproben bei hoher Temperatur in Wasser einzutauchen, um schnell den Alterungszustand des Materials zu erreichen. Anhand von Tests an diesen Proben können mechanische Eigenschaften ermittelt werden, die für das gealterte Material unter realen Bedingungen bei Designtemperatur repräsentativ sind. Für dünne Lamine werden die Probekörpern Eintauchtests bei drei unterschiedliche Temperaturen unterzogen, bevor entsprechende Tests zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften durchgeführt werden. Für dünne Lamine müssen die mechanischen Eigenschaften nach einem langen Eintauchen mit einfachen kurzen Eintauchtests bei drei Temperaturen gefolgt von den entsprechenden mechanischen Tests vorhergesagt werden.

2.4.5 Fertigungsaspekte

Bei der Fertigung sollten für die klimatischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) beim Auftragen des Klebstoff sowie für die Auftrags- und Aushärtezeiten Vorgaben der Hersteller eingehalten werden. Diese Parameter haben einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit, der teilweise bereits erfasst ist, aber teilweise für bestimmte Materialkombinationen und Wechselwirkungen der Parameter auch noch Gegenstand der Forschung ist (vgl. z.B. (EUR18_43) oder (EUR18_234) in (EURADH 2018, 2019) sowie (ADHESION '19, 2019)). Im Schiffbau sind speziell die klimatischen Bedingungen einer Halle nicht immer komplett steuerbar. Bei zu hoher Luftfeuchtigkeit muss dann ggf. der Prozess auf einen anderen Zeitpunkt verschoben werden.

Der zweite wesentliche Fertigungsaspekt, der für ein qualitativ hochwertiges Produkt beachtet werden muss, ist die Oberflächenvorbehandlung. Der Einfluss der Vorbehandlung auf die Festigkeit wird bspw. in (Mandolino, Lertora, & Gambaro, 2013), aber auch in vielen Standardwerken zur Klebtechnik (siehe 2.6) untersucht. Sofern die Oberfläche physikalisch oder chemisch verunreinigt ist, kann dies zu sehr ungünstigem adhäsiven Versagen führen. Daher ist es unbedingt notwendig, die Oberfläche mit geeigneten Verfahren zu reinigen und entfetten und während des Klebens eine saubere Umgebung herzustellen. Auch sollte die Oberfläche nicht zu uneben oder rau sein und ggf. vor Auftrag des Klebstoffs mit geeigneten Methoden geglättet werden. Oft wird zur besseren Anhaftung vor dem Anbringen des eigentlichen Klebstoffs ein Primer aufgetragen. Dieser muss zu Substrat und Klebstoff kompatibel sein.

Im Bootsbau ist der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen verbreitet. Hier wird oft ein Peelply (Abreißgewebe) auf die zu verklebende Oberfläche aufgebracht, was erst direkt vor dem Klebstoffauftrag entfernt wird. Hierdurch kann die Oberfläche vor Schmutz geschützt und erst für den Klebeprozess aktiviert werden, auch wenn das Füge teil zwischen Fertigung und Verklebung gelagert wird. Es ist jedoch zu beachten, dass Peelply teilweise mit Schmierstoffen beschichtet ist, um das Abreißen zu erleichtern. Hier kann bei Entfernen des Peelply im ungünstigsten Fall eine Verunreinigung

der Fläche erfolgen. Daher ist immer genau zu prüfen ob die Verwendung von Peelply Vorteile erzielt oder ob sich ohne Peelply die bessere Anbindung erreichen lässt.

Bei metallischen Substraten wird üblicherweise sowohl eine mechanische Vorbehandlung z.B. durch Sandstrahlen als auch eine chemische Reinigung der Oberfläche durchgeführt. Aus logistischen und wirtschaftlichen Gründen werden hier nicht immer die für einen bestimmten Klebstoff optimalen Methoden und Reinigungsmittel verwendet, sondern Mittel die bereits für andere Prozess im Betrieb vorhanden sind und den Zweck grundsätzlich erfüllen. Da im Schiffbau die Vermeidung von Korrosion von höchster Bedeutung ist, muss bei einer Verklebung insbesondere auf Stahl immer entschieden werden, ob eine Korrosionsbeschichtung vorher entfernt wird oder ob auf der Beschichtung geklebt wird. In letzterem Fall ist die Korrosionsbeschichtung, die meistens keine sehr hohe Festigkeit besitzt, immer das schwächste Glied in der Kette und es lassen sich nur Verbindungen mit begrenzter Festigkeit herstellen.

In der Forschung werden derzeit noch unterschiedliche fortgeschrittene Methoden zur Vorbehandlung bspw. mittels Laser oder Plasma untersucht. Solche Methoden sind jedoch eher für hochautomatisierte Branchen wie den Automobilbau von Belang und für den Schiffbau nach aktuellem Stand weniger relevant.

Ein wichtiges Thema in Bezug auf die Fertigung ist zudem die Personalqualifizierung. Hier gibt es verschiedene Qualifikationen, anhand deren Personal fachlich für den Klebprozess ausgebildet werden können. So werden in den DVS-Richtlinien die Stufen Klebfachkraft, Klebpraktiker und Klebfachingenieur (European Adhesive Engineer) unterschieden. Entsprechende Weiterbildungen werden zum Beispiel vom Fraunhofer IFAM angeboten. In DIN 2304-1 werden zudem zur Qualitätssicherung Vorgaben dazu gemacht, für welche Aufgaben welche klebtechnische Qualifizierung vorliegen sollte (z.B. Übernahme der Klebaufsicht durch einen Klebfachingenieur). Dies wird auch in den Empfehlungen zur Entwicklung einer Richtlinienstruktur noch einmal aufgegriffen. Die Durchführung spezieller Aufgaben von geschultem Fachpersonal ist im Schiffbau bei anderen Prozessen wie dem Schweißen Standardprozedere, in Bezug auf die Klebtechnik sind einige Werften bereits sehr gut aufgestellt, bei anderen wird die Schulung von Fachpersonal derzeit noch ausgebaut.

2.4.6 Qualitätssicherung mittels zerstörungsfreier Prüfmethoden

Allgemein sollten zur Qualitätssicherung in der gesamten Prozesskette von Anlieferung und Lagerung bis hin zur Qualitätskontrolle des geklebten Produkts Maßnahmen getroffen werden (siehe Abbildung 11). Einige grundsätzliche Aspekte wie Wareneingangskontrolle unterscheiden sich dabei nicht wesentlich von Prozessen von anderen Fügetechnologien, die in Werften bereits implementiert sind. Insbesondere muss beim Kleben das Augenmerk auf die Etablierung eines stabilen Prozesses mit sorgfältiger Qualitätskontrolle gelegt werden, da es sich beim Kleben um einen sogenannten speziellen Prozess handelt, dessen Ergebnis am Ende nicht zu 100% mit zerstörungsfreien Prüfmethoden kontrolliert werden kann. Welche Aspekte dabei zu beachten sind wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt beleuchtet. Hier soll genauer dargestellt werden, welche Möglichkeiten zur Bewertung der Qualität des geklebten Produkts es gibt und welche Einschränkungen derzeit existieren.

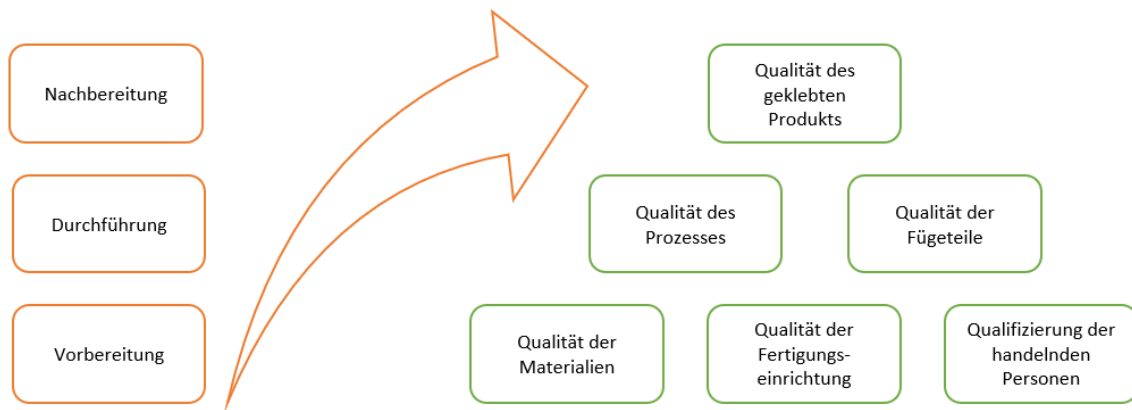


Abbildung 11: Qualitätssicherungspyramide in Anlehnung an (Doobe, 2018)

Der Einsatz zerstörungsfreier Prüfmethoden (zFP, oder auf Englisch NDT “non-destructive testing”) zur Kontrolle des geklebten Produkts soll sicherstellen, dass während der Herstellung keine Fehlstellen in der Verklebung erzeugt wurden, welche die strukturelle Integrität der Verbindung beeinträchtigen. Typische Fehlstellen, welche die Festigkeit deutlich abmindern können, sind in Tabelle 5 dargestellt.

Art der Fehlstelle		Hauptursache
1	Porosität	Vorhandensein von Lufteinschlüssen, Verlust von verdampfbaren Substanzen, ungenügender Druck während Aushärten
2	Hohlräume	Konzentration von Porositäten, unzureichender Klebstoffauftrag
3	Mangelhafte Anbindung Fügeteil zu Klebschicht	Unzureichende Oberflächenvorbereitung, Verschmutzung mit Festkörperpartikeln, wie z.B. Staub, Schleifabrieb etc.
4	Unzureichende Polymerisation	Inhomogener Klebstoff (unzureichendes Mischen), Nichteinhalten von Aushärtebedingungen des Klebstoffs (Zeit, Temperatur)
5	Risse	Hohe thermische Beanspruchung während des Aushärtens

Tabelle 5: Arten von Fehlstellen und Ursachen (Bureau Veritas, 2015)

Alle derzeit verfügbaren zerstörungsfreien Prüfmethoden besitzen Einschränkungen in ihrer Anwendbarkeit in Bezug darauf, welche Fehlstellen in welcher Tiefe bei welchen Materialien detektierbar sind. Auch wenn Fehlstellen detektiert werden, kann keine Methode eine direkte quantitative Aussage über den Einfluss auf die Festigkeit liefern. Der Einfluss von verschiedenen Fehlerarten auf die Festigkeit und die entsprechende Festlegung tolerierbarer Abweichungen muss durch Materialprüfungen mit gezielter Einbringung von Fehlstellen ermittelt werden.

Eine Übersicht über existierende NDT-Methoden und ihre Vorteile sowie Einschränkungen sind in Tabelle 6 dargestellt.

NDT Methoden		Vorteile	Nachteile
Visuelle Inspektion	<ul style="list-style-type: none"> - Sollte vor allen anderen Methoden zum Einsatz kommen - Detektiert Oberflächendefekte sowie Mangel oder Überschuss an Klebstoff 	<ul style="list-style-type: none"> - Einfache Methode 	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht ausreichend, nur auffällige Fehler
Klopfen	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse der akustischen Antwort des Materials auf einen mechanischen Stoß - manuelle oder automatisierte Methoden - Detektion von großen Volumendefekten (mehrere mm) 	<ul style="list-style-type: none"> - Einfache Methode 	<ul style="list-style-type: none"> - Manuell schwierig zu interpretieren (abhängig von Erfahrung des Prüfers) - Geringe Tiefe - Nicht geeignet für komplexe Geometrien
Ultraschall	<ul style="list-style-type: none"> - Basiert auf Prinzip der Ultraschallwellenausbreitung - Detektion von kleinen Volumendefekten 	<ul style="list-style-type: none"> - Effiziente Methode - Position und Größe von Defekten - Automatisierung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Nicht für alle Materialien geeignet - Abhängig von Erfahrung des Prüfers
Schallemission	<ul style="list-style-type: none"> - Akustische Analyse des Bauteils durch mechanische Dehnung 	<ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung von Defekten abbildbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Mechanische Dehnung des Bauteils erforderlich
Mechanische Impedanz	<ul style="list-style-type: none"> - Anregung der Struktur mit einer relativ niedrigen Frequenz, Messung der Reaktion 	<ul style="list-style-type: none"> - Kommerzielle Instrumente verfügbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Vergleichende Prüfung, schwierige Kalibrierung
Röntgen	<ul style="list-style-type: none"> - Bildgebung durch differentielle Absorption der Röntgenstrahlen - Volumetrische Inspektion von Komponenten möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Effiziente Methode - Position und Größe von Defekten - Automatisierung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Teure Methode - Abhängig von Erfahrung des Prüfers - Sicherheitsaspekte
Thermographie	<ul style="list-style-type: none"> - Erwärmen des Bauteils, Analyse der abgestrahlten Temperatur - Diskontinuitäten beeinflussen die Wärmeübertragung - Detektion von mittelgroßen Volumendefekten 	<ul style="list-style-type: none"> - Effiziente Methode - Geeignet für große Oberflächen 	<ul style="list-style-type: none"> - Geringe Tiefe - Nicht sehr akkurat / keine Defektgrößen

Tabelle 6: Vergleich NDT-Methoden (Bureau Veritas, 2015)

Zerstörungsfreie Prüfmethode sind auch weiterhin Gegenstand der Forschung (vgl. z.B. (Waugh, 2014), (EURADH 2018, 2019) oder (AB 2019 - 5th International Conference on Structural Adhesive Bonding, 2019).

Methoden zur Überwachung der strukturellen Integrität im Betrieb betreffen nicht unmittelbar den Einsatz der Klebtechnologie in der Schiffsfertigung. Ansätze zum Structural Health Monitoring – z.B. mit eingebetteten faseroptischen Sensoren oder farbgefüllten Mikrokapseln (vgl. (EURADH 2018, 2019) oder (Chen, Guo, Hill, & Su, 2016)) – werden noch erforscht und stellen derzeit nicht den Stand der Technik dar.

2.4.7 Recycling & Nachhaltigkeit

Die Themen Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz gewinnen aus politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Gründen zunehmend an Bedeutung. Daher müssen diese auch beim Einsatz der Füge-technologie Kleben betrachtet werden. Beim Schiffbau steht aktuell die Reduktion von Emissionen ganz oben auf der Agenda, aber auch die Ökobilanz und Recyclebarkeit von im Schiff- und Bootsbau verwendeten Materialien rückt immer stärker in den Fokus von Werften und Kunden, nicht zuletzt aufgrund der "Hong Kong International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships" von 2009. Auch der ökologische Fußabdruck bei der Produktion und den verwendeten Materialien bekommt mehr Bedeutung.

Kleben ist grundsätzlich eine sehr alte Technologie, die bereits lange von Menschen beispielsweise zum Bau von Häusern oder Werkzeugen verwendet wird. Klebstoffe wurden hierbei aus unterschiedlichen pflanzlichen oder tierischen Produkten hergestellt. Moderne Klebstoffe werden jedoch üblicherweise auf der Basis von synthetischen Rohstoffen auf Erdölbasis hergestellt. Klebstoffe

aus synthetischen Rohstoffen sind per se erst einmal weniger nachhaltig als Werkstoffe, die aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt werden. Die synthetischen Klebstoffe wurden in den vergangenen Jahren stark optimiert und besitzen eine hohe Leistungsfähigkeit. Daher können Klebstoffe auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen derzeit nicht ohne chemische Modifikationen das gleiche Niveau erreichen.

Grundsätzlich basieren die heutigen Klebstoffe größtenteils auf relativ wenigen Grundpolymeren. Diese lassen sich durch Kombination miteinander und mit einer Vielzahl von Modifikatoren und Hilfsstoffen in Klebstoffe wandeln, die die jeweils gewünschten Eigenschaften erzielen.

Je nach Klebstoffsystem, z.B. auf Basis von wässrigen Kunststoffdispersionen, lösemittelbasierenden Klebstoffen bis hin zu reaktiven Klebstoffen, schwankt der Wert des CO₂-Fußabdruckes (engl. Product Carbon Footprint bzw. PCF). Tabelle 7 gibt einen Überblick zu diesen Werten. Als Anhaltspunkt für den Vergleich ist die Herstellung von Stahl mit circa 1,6 kg CO₂e/kg [Quelle: DENA Deutsche Energie-Agentur] beziffert. Bei Aluminium liegt dieser Wert um circa das 2- bis 4 fache höher.

Produktgruppe	Typische Product Carbon Footprint (PCF)-Werte in kg CO ₂ e / kg Produkt
Klebstoffe auf Basis von wässrigen Kunststoffdispersionen	1 – 3
Thermoplastische Schmelzklebstoffe	2 – 5
Lösemittelbasierende Klebstoffe	2 – 5
Reaktive Klebstoffe	4 – 10

Tabelle 7: Product Carbon Footprints von Klebstoffen (Quelle: Industrieverband Klebstoffe e.V.)

Für die Bewertung der Ökobilanz von Klebstoffen gibt es dabei noch keine einheitliche Methodik. In Bezug auf den Klimaschutz ist insbesondere das Treibhauspotenzial von Produkten und Prozessen relevant. Daher wird im Forschungsprojekt KlebFuß eine Bewertungsmethodik zur Ermittlung des Product Carbon Footprint (PCF) ermittelt (Ebersold, Hesselbach, Winkel, Estephan, & Böhm, 2020). Angaben zum Treibhauspotenzial der Rohstoffgewinnung, Produktion und Distribution der Klebstoffe stellen Hersteller mithilfe einer Environmental Product Declaration zur Verfügung. Beim Projekt KlebFuß steht die Untersuchung des Treibhauspotenzials bei der Nutzung der Klebstoffe im Vordergrund. Bei den betrachteten Klebstoffen lassen sich deutliche Unterschiede im Treibhauspotenzial bei der Herstellung erkennen. Zudem hat die Oberflächenvorbehandlung einen großen Einfluss auf die Bilanz. Hier ist insbesondere eine Laservorbehandlung sehr energieintensiv, die im Schiffbau eher nicht zum Einsatz kommt. Im Projekt soll auch eine Datenbank erzeugt werden, die es Anwendern ermöglicht ihre eigenen Klebprozessketten zu bewerten.

An der Entwicklung von hochleistungsfähigen biobasierten Materialien wird derzeit national und international geforscht. In einem Förderschwerpunkt des Bundeslandwirtschaftsministeriums, der über die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) durchgeführt wurde, wurden beispielsweise Strukturklebstoffe nahezu komplett aus nachwachsenden Rohstoffen auf der Basis epoxidierter pflanzlicher Öle und Polymilchsäure sowie verbesserte stärkebasierte Klebstoffe zur Produktion von Wellpappe untersucht (Hartwig, Andreas; Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen, 2020). Auch Hersteller beschäftigen sich mit der

Weiterentwicklung von Materialien in Richtung Nachhaltigkeit sowie der Gestaltung von materialeffizienten Prozessen.

In Bezug auf Recycling ist das Entfügen von Klebverbindungen relevant. Klebstoffe reagieren empfindlich auf den Einfluss von hohen Temperaturen und verlieren je nach Material ab einem bestimmten Temperaturniveau an Festigkeit. Diese Eigenschaft kann zum Lösen der Klebverbindung genutzt werden. Da für die meisten Anwendungen wiederum eine gute Temperaturbeständigkeit des Klebstoffs gewünscht wird löst sich die Verbindung teilweise erst bei sehr hohen Temperaturen. Daher werden abschaltbare Klebstoffe und Methoden für das sogenannte Debonding derzeit erforscht. Insbesondere die Automobilindustrie treibt dieses Thema voran, da bei Automobilen mit einer durchschnittlich eher kurzen Lebensdauer von 5-10 Jahren Recycling von großem Interesse ist. Ansätze für das ein- oder mehrfache Abschalten der Klebverbindungen nutzen neben der Temperatur beispielsweise noch elektromagnetische Wechselfelder oder Kombinationen von elektrischer Spannung und Temperatur. Im Schiffbau sind solche Methoden derzeit noch nicht im Einsatz, sollten jedoch von Anwendern im Auge behalten werden.

Allgemein gibt es auch noch andere Aspekte in Bezug auf Umweltschutz als das Treibhauspotenzial. So entsteht beispielsweise beim Schweißen eine erhebliche Feinstaubbelastung. Diese ist sowohl in Bezug auf Arbeitsschutz als auch in Bezug auf Umweltschutz problematisch. Durch Kleben wiederum kann die Feinstaubbelastung minimiert werden. Daher ist es bei einer Bewertung der Technologie wichtig, auch diesen und weitere mögliche Aspekte des Umweltschutzes und der Nachhaltigkeit ganzheitlich zu erfassen und eine Verbesserung des Ist-Standes als Ziel vor Augen zu haben.

2.5. Langzeiterfahrungen & Risiken

Alterung und Langzeitverhalten sind bei geklebten Verbindungen wichtige Aspekte. Insbesondere in den herausfordernden Einsatz- und Umweltbedingungen im maritimen Umfeld. Typischerweise sind daher Erfahrungen und Daten von solchen Verbindungen im Einsatz unerlässlich. Im Schiffbau ist es nun, anders als im Automobilbau, unüblich, dass die Werften die Schiffe in deren Einsatzzeit wieder in den Zugriff bekommen. Reparaturen und Instandsetzung werden weltweit ausgeführt. Vor diesem Hintergrund, haben oftmals Zulieferer und Dienstleister größere Erfahrungen in Bezug auf das Langzeitverhalten von Klebungen.

Die bisherigen Rückmeldungen der Anwender deuten überwiegend darauf hin, dass es bei Klebverbindungen im Betrieb keine großen unerwarteten Versagensfälle gibt. Insgesamt, und auch im Vergleich mit dem Schweißen, scheint Kleben in der jetzigen Ausführung zu sehr hochwertigen und langlebigen Verbindungen zu führen. Auch die Klebstoffhersteller, die an der Fachgruppe teilnehmen, erhalten allgemein wenig Beschwerden über Klebverbindungen im Betrieb von maritimen Produkten.

Als technische Risiken für den Einsatz von Klebverbindungen können folgende Punkte identifiziert werden:

- Unsicherheit bei mechanischen Beanspruchungen: insbesondere für die Lebensdauer besteht oft eine Unsicherheit, ob nach Vorschrift oder aus vorhandenen Daten angesetzte Lasten für die vorgesehene Klebverbindung realistisch sein werden
- Alterungstests: Parameter für beschleunigte Alterungstests können bestmöglich gewählt werden, jedoch besteht immer ein Risiko, dass in der Realität Effekte auftreten, die im Alterungstest nicht abgebildet wurden
- Skalierungseffekte: bei Coupon-Prüfkörpern unterscheiden sich die geometrischen Proportionen und Beanspruchungsverhältnisse teilweise von denen eines realen Bauteils oder einer Struktur. Nicht immer lassen sich solche Abweichungen im Testaufbau vermeiden. Daher ist ein Fullscale-Test sinnvoll und in einigen Branchen üblich. Im Schiffbau lässt sich dies aufgrund der Einzelfertigung nicht immer umsetzen und es besteht ein Risiko, dass unerwartete Skalierungseffekte auftreten.

- Begrenzungen der NDT-Methoden: da es nicht möglich ist jede Klebverbindung 100% zuverlässig zu prüfen ist eine Risikominimierung nur durch die Etablierung eines kontrollierten und absolut zuverlässigen Fertigungsprozesses möglich.
- Fehlende Langzeiterfahrungen für einzelne Anwendungen

Zusätzlich besteht bei jedem Anwender ein individuelles Risiko bezüglich folgender Punkte:

- Internes Knowhow: liegt das erforderliche Fachwissen im Unternehmen (Konstruktion, Fertigung, Health & Safety, ...) vor, oder kann dies zeitnah aufgebaut oder extern eingeholt werden?
- Zulassung: Wahl einer Klassifikationsgesellschaft und Richtlinie für die Zertifizierung erforderlich

2.6.Forschung

2.6.1 Aktuelle branchenübergreifende klebtechnische Forschungsschwerpunkte

Einen branchenübergreifenden Überblick über aktuelle Forschungsfelder zum Thema Kleben liefert die Roadmap des Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik (siehe Abbildung 12) (Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik (Hrsg.), 2016). Diese wurde Anfang 2015 von Industrievertretern der Branchen Automotive, Transport/Bus/Bahn/Wagon, Klebstoffherstellung, Applikation- und Anwendungstechnik, Bau und Beratung sowie Vertretern der Forschungsvereinigungen des GAK erarbeitet. Als wichtigste Themenfelder für zukünftige Forschung wurden hier die Themenschwerpunkte „Alterung verstehen“, „Fertigung beherrschen“ und „Computerunterstütztes Kleben (Computer Aided Bonding / CAB)“ identifiziert. Korrespondierende Ziele sind dabei das Erreichen einer Langzeitstabilität und somit hoher Produktqualität, Erhöhung der Prozesssicherheit und dadurch der Zuverlässigkeit geklebter Verbindungen sowie das klebstoffgerechte Konstruieren mit effizienten Berechnungsmethoden. Als übergeordnetes Ziel aller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurde „Vertrauen in die Klebtechnik stärken“ identifiziert. Wenngleich die Erstellung der Roadmap bereits ca. 5 Jahre zurückliegt und bei einigen Punkten zwischenzeitlich wieder Fortschritte erzielt werden konnten, so spiegeln die Themenschwerpunkte der Roadmap auch heute noch die wichtigsten Forschungsfelder im Kleben und auch im Kleben im Schiffbau wider.

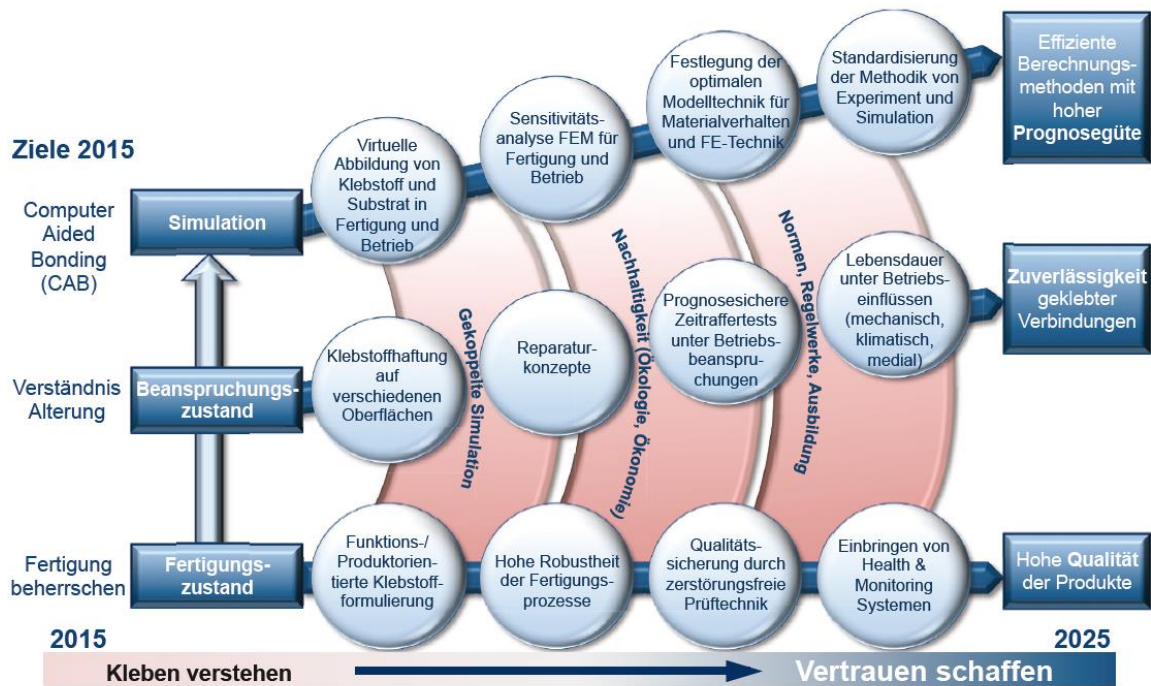


Abbildung 12: GAK Roadmap Klebtechnik (Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik (Hrsg.), 2016)

2.6.2 Klebtechnische Forschung für den Schiffbau

Bei der klebtechnischen Forschung für den Schiffbau, die bis heute an Forschungseinrichtungen und in Forschungsprojekten durchgeführt wurde, liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung des Einsatzes der Klebtechnologie für schiffbaurelevante Anwendungen und Materialkombinationen. Ziel ist dabei in der Regel, für eine konkrete relevante Praxisanwendung die technische Machbarkeit zu untersuchen. Weitere Schwerpunkte liegen insbesondere in den letzten Jahren bei den Themen Standardisierung und Alterung. Nachfolgend wird genauer dargestellt, welche Forschung speziell für den Schiffbau relevant ist und welche Forschungsprojekte hierzu durchgeführt wurden und werden.

Allgemeine Grundlagen zum Thema Kleben von Materialgrundlagen bis hin zu Berechnungsmethoden finden sich bspw. in Standardwerken wie (Kinloch, 1987), (Habenicht, 2009) oder (Rasche, 2012). Die praktische Anwendung steht bei (Habenicht, 2016) sowie speziell für elastisches Kleben bei (Pröbster, 2013) im Fokus. Grundlagen und Best-Practice-Beispiele für das Kleben von Kunststoffen werden in (Doobe, 2018) dargestellt. In einem Kapitel des Buches wird dort auch die Anwendung im Schiffbau untersucht (Glück & et al., 2018). Einen Überblick über die Forschung zu Klebverbindungen von Composites liefern auch (Banea & da Silva, 2009) bzw. (Budhe, Banea, de Barros, & da Silva, 2017) und (Abdel Wahab (Ed.), 2015). Die Betriebsfestigkeit wird in (Abdel Wahab M. M., 2012) untersucht. Einen Vergleich von Kleben mit den Fügetechniken Schweißen und Löten stellt (Reisgen & Stein, 2016) auf. Hybride Klebverbindungen – also die Kombination von Kleben mit anderen Fügemethoden – sind das Thema von (da Silva, Pirondi, & Öchsner (Hrsg.), 2011).

Die Untersuchung von Klebverbindungen im schiffbaulichen Kontext ist insbesondere für Bootsbauanwendungen kein ganz neues Forschungsthema. Die Untersuchung von geklebten T-Verbindungen in Faserverbund-Booten wurde beispielsweise Anfang der 1990er Jahre von (Shenoi & Violette, 1990) und (Shenoi & Hawkins, 1992) untersucht. Die Leistungsfähigkeit von strukturellen Klebverbindungen in Meeresumgebung betrachten (Horton, Spinks, & Isles, 1992) und (Roy, Nadot, & Casari, 2008). In (Dodkins, Shenoi, & Hawkins, 1994) wurde analysiert, welches Design einer Klebverbindung optimal zu einer hohen Festigkeit bei reduziertem Gewicht beiträgt. Die Verklebung von dicken Stahl-Fügeteilen im maritimen Kontext ist Thema von (Hashim, 1999). Kleben als Reparaturmethode für Schiffsstrukturen untersuchen (Allan, Bird, & Clarke, 1988) und geben Empfehlungen zu Oberflächenvorbehandlung und Wahl geeigneter Klebstoffe.

Den Einsatz von Klebverbindungen im europäischen Schiffbau untersuchen (Roland, Manzon, Kujala, Brede, & Weitzenböck, 2004). Theorie und Praxis und spezielle Anforderungen bei schiffbaulichen Anwendungen analysieren (Wacker, Brügge, Fach, & Franzelius, 2004). Untersuchungen zu Design und Feuerbeständigkeit von Klebverbindungen sowie Qualitätssicherung aus dem europäischen Forschungsprojekt Bondship (siehe 2.6) sind in (McGeorge & Weitzenböck, 2005) dargestellt. In (Brede, et al., 2003) wird eine „easy-to-use“-Dimensionierung für den Schiffbau aus dem Projekt erläutert.

Einen Überblick über aktuellere Forschung bietet das Buch „Adhesives in Marine Engineering“ von (Weitzenböck (Hrsg.), 2012) sowie die Kapitel „Marine Industry“ im „Handbook of Adhesion Technology“ (Davies, 2017) und „Schiffbau“ in (Doobe, 2018).

Die Festigkeit von zweischnittig überlappten Klebverbindungen („double-lap joints“) von maritimen Anwendungen betrachten (Osnes & McGeorge, 2009) bzw. (Osnes, Guthu, & McGeorge, 2011) sowie (Yu, Gao, Gu, Zhao, & Chen, 2018). Versagensmodi von Metall-Faserverbund-Klebverbindungen für nautische Anwendungen analysieren (Valenza, Fiore, & Fratini, 2011). Experimentelle Untersuchungen von überlappten Stahl-Faserverbund-Klebverbindungen im maritimen Bereich von (Özes & Neşer, 2015) zeigen, dass die Oberflächenrauigkeit einen großen Einfluss auf die Qualität der Klebverbindungen hat und sich diese durch den Einsatz von Primer deutlich verbessern lässt.

Untersuchungen zu Klebverbindungen von Schiffsstrukturen mit verschiedenen Materialien wie Vinylester und PU bzw. austenitischem Stahl finden sich in (Alía, Arenas, Suárez, & Pinilla, 2020), (Alia, Arenas, Suárez, & Pinilla, 2016) und (Jurczak & Jurczak, 2017). Die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen mit unterschiedlichen Substraten für maritime Anwendungen erforschen (Di Bella, Galtieri, Pollicino, & Borsellino, 2013). Bei (Golaz, Michaud, Lavanchy, & Månson, 2013) werden Design und Dauerfestigkeit von Titanium-Klebverbindungen betrachtet. In künstlichen Alterungsversuchen mit Meerwasser wird der Einfluss von verschiedenen Vorbehandlungsmethoden verglichen.

Die Lebensdauer und Alterung einer Patch-Reparatur, bei der ein Composite-Patch auf die Metallstruktur einer „Floating, Storage and Offloading (FSO)“-Plattform geklebt wurde, untersuchen (Meniconi & et al., 2014). Die Dauerfestigkeit von Stahl-Epoxy-Klebverbindungen in Meerwasser ist Thema von (Bordes, et al., 2009). Auch der Beitrag (AB19_114) in (AB 2019 - 5th International Conference on Structural Adhesive Bonding, 2019) widmet sich der Untersuchung von Klebverbindungen von Offshore-Strukturen.

Zur Bewertung der tatsächlichen Festigkeit von Klebverbindungen im Schiffbau führen (Succio, Rizzuto, Gambaro, & Lertora, 2015) Tests unter realistischen Bedingungen (Meerwasser, UV) durch. (Borrie, Liu, Zhao, Singh Raman, & Bai, 2015) ermitteln die Betriebsfestigkeit von zweischnittig überlappten CFK-Stahl-Klebverbindungen, die vor dem Test maritimen Umgebungsbedingungen ausgesetzt wurden. Einen Vergleich von Oberflächenvorbehandlungen von Sekundär-Verklebungen nehmen (Tomlinson & Lopez-Anido, 2019) vor.

Die Degradation von strukturellen Verklebungen, die sich auf einem Außendeck („exposure decks“) von Schiffen befinden, untersuchen (Hayashibara, Iwata, & Ando, 2019). Zugversuche an exponierten Prüfkörpern zeigen, dass in einer Umgebung mit hohen Temperaturen schnell eine Reduktion der Festigkeit auftritt. Die höchste Temperatur, die im Betrieb auftreten kann, wird hierbei als kritischer bewertet als die Durchschnittstemperatur. Messungen an dem Versuchsschiff ergaben hierbei einen Spitzenwert von 70°C für die Oberfläche auf dem Außendeck, der nach Einschätzung der Autoren zur Auslegung von Klebverbindungen für solche Anwendungen genutzt werden sollte.

Ein Verfahren zum prozesssicheren Kleben von Halterungen unter Wasser wird in (Blumentritt, Glück, & Flügge, 2019) Teil 1 & 2 vorgestellt. Hierbei handelt es sich um Ergebnisse eines Forschungsprojekts, das ebenfalls in Abschnitt 2.6.3 Forschungsprojekte aufgeführt wird. Das Kriechverhalten von geklebten Haltern für Offshore-Stahl-Strukturen untersuchen (Djeumen, et al., 2020).

Das klebtechnische Fügen von Metall-Leitungen im Schiffbau, das ebenfalls in einem Forschungsprojekt untersucht wurde, wird in (Fröck, Glück, & Nagel, 2015), (Nagel, Brede, Fröck, &

Glück, 2015), (Nagel, Brede, Fröck, & Glück, 2015) und (Fröck, Glück, & Nagel, 2016) untersucht. Hierbei werden sowohl Kennwertermittlung und Dimensionierung als auch fertigungstechnische Aspekte und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Vergleich mit Schweißen abgehandelt. Ein Vergleich der Fügetechnologien Kleben und Schweißen wird auch in (Glück & Fröck, 2017) vorgenommen.

Die Festigkeit von eingeklebten Fensterscheiben betrachten (Wiegard, Ehlers, Klapp, & Schneider, 2018). Hier werden Ergebnisse der IGF-Forschungsprojekte 'Structural Behavior of Large Windows aboard Ships' und 'Integration of bonded window strips and glass fronts in the strength analysis of ships' dargestellt.

Die Auslegung von Klebverbindungen für schiffbauliche Strukturen mittels numerischer Methoden untersuchen (Wang, Mieth, & Cappelletti, 2004). Mit zwei unterschiedlichen FE-Modellen wird in Simulationen ein Testaufbau einer geklebten Aluminium-Struktur abgebildet. Die Qualifizierung von Klebstoffen für maritime Composite-Stahl-Anwendungen wird in (Speth, Ping Yang, & Ritter, 2010) diskutiert. Da für neue Anwendungen keine Erfahrungswerte aus dem Betrieb auf See für die Zulassung zugrunde gelegt werden können, wird eine Kombination von mechanischer Kennwertermittlung und FE-Berechnungen genutzt.

Die Dauerfestigkeit und das Brennverhalten von strukturellen Klebverbindungen für den Schiffbau mit SGA-Klebstoff („Second Generation Acrylat“) in einer dicken Klebschicht untersuchen (Iwata & Hayashibara, 2019). Beschleunigte Alterungstests unter hoher Temperatur- und Feuchtigkeitsbelastung wurden ebenso wie Trocknungstests nach Wasseraufnahme, Salzwassersprühnebeltests und Tests zur Witterungsbeständigkeit durchgeführt. Ziel war die Ermittlung von Zusammenhängen zwischen den einzelnen Einflussgrößen und der Lebensdauer. Die Ergebnisse wurden mit den Anforderungen von ClassNK abgeglichen und haben diese erfüllt. Weiterhin wurde ein Oberflächenbrandtest gemäß Vorgaben der International Maritime Organization Resolution MSC.307 (88) durchgeführt. Auch hier konnten die Anforderungen mindestens mit einem Substrat erfüllt werden.

Die Entdeckung von Defekten bei Klebverbindungen in LNG-Tankern mittels Infrarot-Technik ist Thema von (Tighe, Dulieu-Barton, & Quinn, 2018). Bei (Li, Herzberg, Mouritz, Davis, & Galea, 2004) werden faseroptische Sensoren in das Interface von Composite-Schiffs-Klebverbindungen eingebettet um eine mögliche Ablösung aufzuspüren.

Design und Tests von hybriden – geklebt und verbolzten – Faserverbund-Stahl-Verbindungen von Schiffsrümpfen werden in (Cao & Grenestedt, 2004) untersucht. Auch bei (Gaiotti, Ravina, Rizzo, & Ungaro, 2018) sind Simulation und Test solcher Verbindungen zum Fügen von Stahlrumpf mit der Composite-Platte eines Marineschiffs Thema. Statische Tests und Lebensdauer-Prüfungen von Composite-Stahl-Stumpfstoß-Klebverbindungen mit und ohne zusätzliche Bolzen analysieren (Kotsidis, Yarza, Tsouvalis, & de la Mano, 2015). Einen Vergleich von „spot welding adhesive joints“ mit reinen Kleb- und reinen Schweißverbindungen nehmen (Costa, Reis, Souza, & et al., 2015) vor. Die numerische Optimierung von hybriden Kleb-/Schweiß-Verbindungen im Schiffbau erfolgt in (de Vicente, 2018).

2.6.3 Forschungsprojekte

In diesem Abschnitt werden Forschungsprojekte mit Bezug zum Thema Kleben im Schiffbau dargestellt, um einen Überblick über vergangene und aktuelle Forschungsvorgaben zum Thema zu geben. Grundsätzlich gibt es eher wenige Projekte, die explizit Kleben im Schiffbau als Thema haben. Sonst liegt der Forschungsschwerpunkt meist entweder auf speziellen Anwendungen im Schiffbau – insbesondere Leichtbau –, bei denen Kleben ein Teilaspekt ist, oder auf unterschiedlichen Aspekten des Klebens ohne speziellen Fokus auf die Schiffbaubranche. Nachfolgend werden nur Projekte mit explizitem Bezug zu Kleben im Schiffbau berücksichtigt. Die Angaben sind, sofern nicht anders vermerkt, Veröffentlichungen der Projekte entnommen.

Nationale Projekte

Inspektionsmethoden für die wiederkehrende Prüfung hochelastischer Dickschicht- und Strukturklebungen in Schiffbauanwendungen (Klebschichtinspektionsmethoden)		
Durchführende Stellen:	Fraunhofer IFAM, Fraunhofer IGP Rostock	
Auftraggeber:	BMW (IGF)	
Bearbeitungszeitraum:	01.02.2018 – 31.07.2020	laufend
<p>Kurzfassung des Vorhabens</p> <p>Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung und Qualifizierung von Inspektionsverfahren und -intervallen für die wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfung von geklebten Verbindungen im Schiffbau, um so die Sicherheit der Verbindungen zu garantieren und damit den Einsatz der Klebtechnik zu ermöglichen. Dazu sind die Schiffbau-spezifischen Fehlertypen in strukturellen und hochelastischen Klebverbindungen zu identifizieren und deren Einfluss auf die Restlebensdauer zu ermitteln. Nachfolgend müssen Verfahren identifiziert, erprobt und ggf. adaptiert werden mit denen die zerstörungsfreie Ermittlung aller relevanten Eigenschaften der Klebungen nach der Fertigung und während der Schiffsbetriebsphase möglich ist. Abschließend sind Inspektionsroutinen und -intervalle in einem Regelwerkentwurf festzuschreiben. Der wissenschaftliche Lösungsweg sieht eine enge Zusammenarbeit mit dem PA, bestehend aus Werften, Geräteherstellern, Dienstleistern und einer regelsetzenden Klassifikationsgesellschaft, vor. Nach der Analyse der relevanten Fehlertypen, sind sowohl theoretische Untersuchungen als auch experimentelle Arbeiten im Labormaßstab geplant. Die Arbeiten zu den hochelastischen Klebstoffen erfolgen beim Fraunhofer IFAM, die zu den strukturellen Klebstoffen beim Fraunhofer IGP. In der letzten Projektphase werden alle Entwicklungen unter realen Umgebungsbedingungen an schiffbaulichen Strukturen erprobt. Im Ergebnis liegen neue Erkenntnisse zum Einfluss von Fehlern auf das Tragverhalten von schiffbaulichen Klebverbindungen sowie geeignete Inspektionsverfahren zu deren Überwachung vor. Für eine effiziente Umsetzbarkeit der Ergebnisse wird ein Merkblatt erstellt, das nach Projektende zu einer Richtlinie des DNV GL werden soll. Dadurch profitieren von den gemeinsamen Forschungsaktivitäten insbesondere die KMU, bei denen 2013 ca. 75% der 68.000 im Schiffbau Beschäftigten arbeiteten.</p> <p>Der Ansatz ermöglicht Fügeprozesse ohne Schädigung der Substrate und so eine optimierte Materialausnutzung bei vergleichbaren oder auch erhöhten Lebensdauern. Ohne diese Grundlagenarbeit bleiben derartige Ansätze wenigen großen Unternehmen mit entsprechenden F&E-Ressourcen vorbehalten, für KMU ist dieser Aufwand nicht leistbar.</p>		

Nachbearbeitungsfreies Halterkleben auf Schiff- und Stahlbaubeschichtungen (Halterkleben)		
Durchführende Stellen:	Fraunhofer IFAM, Fraunhofer IGP	
Auftraggeber:	BMW (IGF)	
Bearbeitungszeitraum:	01.01.2016 – 30.06.2018	abgeschlossen

Kurzfassung des Vorhabens

Der international zunehmende Konkurrenzkampf um Schiffbauaufträge erhöht die Anforderungen an Werften und Zulieferfirmen. Es besteht die Forderung nach immer kürzeren Fertigungszeiten des gesamten Schiffes, sowie zur Realisierung kurzfristiger Änderungen und Kundenwünsche in endnahen Bauphasen. Die Forderung nach kurzfristig realisierbaren Änderungen wird durch den Unikatcharakter des in Deutschland vorherrschenden Schiffbaus weiter verstärkt. Das zur Zeit schweißtechnisch durchgeführte Haltern der diversen Ausrüstungsgegenstände (z.B. E-Installation, Kästen und Schränke) insbesondere auf Spezialschiffen, die in Deutschland häufig durch KMU ausgerüstet werden, verursacht auf Grund der bereits im Sektionsbau erfolgten Beschichtung, einen hohen Fertigungs-,Vor- und Nachbearbeitungsaufwand.

Ziel des Forschungsvorhabens war daher die Entwicklung eines klebtechnischen Fügeverfahrens für Haltersysteme auf endbeschichteten schiff- und stahlbaulichen Oberflächen, welches sauber, wärmearm und reproduzierbar ist. Da auf einer bestehenden Korrosionsschutzbeschichtung geklebt werden sollte, war dafür die Entwicklung eines zerstörungsfreien Verfahrens zum Nachweis der erforderlichen Mindesttragfähigkeiten (adhäsiv und kohäsiv) aller Schichten notwendig.

Das Testprinzip wurde in der zweiten Projekthälfte zu einem Inspektionsverfahren für bereits geklebte Halter weiterentwickelt. Ein weiterer Arbeitsbereich war die Entwicklung eines werfttauglichen Fügeprozesses für die geklebten Halter, welcher ohne zusätzliche Fixierelemente auskommt und durch eine Beschleunigung der Klebstoffaushärtung zur Reduzierung der Prozesszeiten führt. Für gängige Beschichtungssysteme erfolgte eine Langzeitqualifizierung geeigneter Klebstoffe. Für einen einfachen Einsatz der Technologie durch KMUs, wurde außerdem eine Halterfamilie für unterschiedliche Lastfälle und -bereiche entwickelt und in Bauteilversuchen erprobt. Im Ergebnis dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeit stehen neben den wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen zum Kleben auf Beschichtungen ein Merkblatt zum Einsatz von geklebten Haltersystemen im Schiffbau sowie Laborprototypen der Testsysteme zur Verfügung.

Klebtechnisches Fügen von metallischen Rohrleitungen im Schiffbau (Fügen Rohrleitungen)

Durchführende Stellen:	Fraunhofer IFAM, Fraunhofer IGP	
Auftraggeber:	BMW (IGF)	
Bearbeitungszeitraum:	01.06.2013 – 31.05.2015	abgeschlossen

Kurzfassung des Vorhabens

Der Fügeprozess ist die wesentliche Stellgröße zur Reduzierung des Zeitaufwands und der Kosten beim Einbau von Rohrleitungen in Schiffen und auf Offshorekonstruktionen. Bei der Anwendung von Schweißverfahren kommt es in Folge der Wärmeeinbringung sowohl zur Zerstörung von Korrosionsschutzschichten auf den Rohren als auch in der Umgebung. Das auf Grund der beengten Verhältnisse erforderliche Schweißen in Zwangslagen führt zu einer erhöhten Fehlerquote und dadurch zu Nachbesserungsaufwand. Alternative Verfahren, wie mechanische Rohrmuffensysteme werden als nicht wartungsfrei eingestuft und können daher nur an zugänglichen Positionen eingesetzt werden. Aus diesen Problemen leitet sich der Bedarf nach einem wartungsfreien, wärmearmen Fügeverfahren für grob tolerierte metallische Rohrleitungen ab, das im beengten Bauraum und unter variierenden Umgebungsbedingungen einsetzbar ist. Als Lösungsansatz bietet sich die Anwendung eines klebtechnischen Fügeverfahrens, das im Rahmen des Projektes

„Klebtechnisches Fügen von metallischen Rohrleitungen im Schiffbau“ entwickelt wurde. Auf Basis einer Analyse der spezifischen Anforderungen an Fügestellen unterschiedlicher Rohrleitungssysteme, sowie den Fügeprozess in der schiffbaulichen Fertigung, wurde die Verbindungsstelle dimensioniert, Klebstoffsysteme ausgewählt und qualifiziert sowie ein Fügeprozess entwickelt. Es wurde ein Rohrklassenkatalog mit kritischen mechanischen, klimatischen und medialen Einwirkungen erstellt. Zur Dimensionierung der Rohrverbindung wurden die Beanspruchungen des Klebverbands mittels numerischer Simulationen (FEM) der Verbindungsstelle analysiert und die Beanspruchbarkeiten des Klebverbands an künstlich gealterten Proben ermittelt. Ergebnisse sind Aussagen zum Alterungsverhalten ausgewählter geklebter Rohrverbindungen unter spezifischen mechanischen und medialen Belastungen und ein Berechnungsverfahren zur Auslegung geklebter Rohrverbindungen. Zur Entwicklung eines Fügeprozesses wurden unterschiedliche Applikations- und Fixierungsvarianten konzipiert und durch praktische Tests zu einer Verfahrensvariante optimiert. Als Ergebnisse stehen dem Anwender ein Verbindungsbauteil zum klebtechnischen Verbinden von Rohrleitungen unterschiedlicher Klassen und Größen sowie ein unter schiffbaulichen Bedingungen anwendbares geprüfetes Verfahren zur klebtechnischen Verbindung ausgewählter Rohrklassen zur Verfügung. Die Gebrauchstauglichkeit wurde durch die Herstellung und Prüfung von Rohrverbindungen unter Werftbedingungen nachgewiesen. Das im Projekt entwickelte klebtechnische Fügeverfahren mittels geteilter Klebmuffe ermöglicht erstmals die wartungsfreie Verbindung metallischer Rohrleitungssysteme ohne Schweißoperationen. Durch die im Projekt durchgeführten Auslagerungsversuche wurden Abminderungsfaktoren für die Alterung ausgewählter Klebstoff-Oberflächen-Kombinationen unter medial-thermischer Dauerbeanspruchung in unterschiedlichen Wasserleitungen (Kühl-, See-, Grauwasser) ermittelt. In Kombination mit dem ebenfalls im Projekt entwickelten analytischen Berechnungsverfahren ist es nun möglich, Klebmuffen für wasserführende Rohrleitungssysteme von DN32 bis DN350 rechnerisch auszulegen.

Durch die Anwendung des entwickelten Verfahrens können folgende Effekte erzielt werden:

- Steigerung der Produktivität in der Rohrmontage durch Wegfall von Nacharbeiten
- Verbesserung der Verbindungsqualität bei Fügeoperationen
- Verbesserung des Korrosionsschutzes beschichteter Rohre durch wärmefreies Fügen
- Reduzierung des notwendigen Abstands zwischen Rohrleitungen und Wänden
- Effiziente Endmontage und Reparatur in explosions- bzw. brandgefährdeten Räumen

Standardisierung von elastischen Aluminium-Stahl- und FVK-Stahl-Klebverbindungen für den Schiffbau (Kleben)

Durchführende Stellen:	Fraunhofer IFAM, CMT	
Auftraggeber:	BMW (IGF)	
Bearbeitungszeitraum:	01.11.2010 – 31.05.2014	abgeschlossen

Kurzfassung des Vorhabens

Im Bereich des Schiffbaus gibt es aus Gründen des Leichtbaus vielfältige Bestrebungen Decksaufbauten aus Leichtmetallen wie Aluminium oder Verbundwerkstoffen zu fertigen. Sehr häufig besteht das Problem der Anbindung an die darunter liegende Stahlstruktur. Eine gängige Vorgehensweise beruht z.B. bei Aluminium-Aufbauten auf einer schweißtechnischen Lösung unter

Verwendung sprengplattierter Stahl/Aluminium-Hybridverbunde. Einsparpotenziale bezüglich der Fertigungskosten können durch klebtechnische Lösungsvarianten erzielt werden. Hier bieten sich Dickschichtklebungen mit hochelastischen flexiblen Klebstoffsystemen an. Allerdings fehlen derzeit erprobte Methoden zur Dimensionierung und Nachweisführung von entsprechenden Klebverbindungen in maritimen Anwendungen. Ebenso existiert derzeit auch noch keine ausreichende Datenbasis, auf die bei solchen Aufgaben zurückgegriffen werden kann.

In diesem Forschungsvorhaben wurde eine geschlossene und methodisch weitgehend standardisierte Vorgehensweise erarbeitet, wie ausgehend von der Identifikation von Bemessungsgrößen für die Auslegung von hochelastischen Dickschichtklebungen, über die Auswahl von Standardverbindungsgeometrien und –oberflächen, der entsprechende Dimensionierungsprozess durchzuführen ist und nachfolgend eine experimentelle Überprüfung der Betriebsfestigkeit erfolgen kann. Diese Schritte werden beispielhaft an dem eingangs erwähnten Beispiel einer Dickschichtklebung zwischen einem Aluminium-Deckshaus und einem Stahldeck dargestellt. Als wesentliche Bemessungsgrößen wurden dabei die im betrieblichen Einsatz stark schwankenden Temperaturen identifiziert, die in Verbindung mit den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und lateralen Abmessungen der Fügepartner eine temperaturinduzierte Scherung der Klebschicht hervorrufen, was zu einer statischen Relaxationsbeanspruchung der Klebung führt. Weiterhin führen die periodisch wiederkehrenden Deformationen der Schiffsstruktur in Folge der Seegangbeanspruchung dazu, dass die Klebung einer zyklischen Ermüdungsbeanspruchung unterworfen ist. Unter Berücksichtigung dieser beiden und weiterer Bemessungsgrößen erfolgte die Dimensionierung der Klebfuge einer hochelastischen Dickschichtklebung zwischen einem Stahldeck und einem Aluminium-Deckshaus. Zum Nachweis der betriebsfesten Auslegung wurde eine experimentelle Überprüfung gewählt. Dies geschah auch vor dem Hintergrund, dass derzeit für die betrachtete Klebstoffklasse keine anerkannten Schadensakkumulationshypothesen für einen rechnerischen Betriebsfestigkeitsnachweis existieren. So wurde ein entsprechendes Lastkollektiv aus angenommenen Betriebsbedingungen des Schiffs abgeleitet und dieses auf bauteilähnliche Verbindungsproben angewendet. Die so geprüften Klebverbindungen bestanden die Erprobung ohne äußerliche Befunde bei kaum veränderten mechanischen Kennwerten.

Flankiert wurden diese Arbeiten durch die umfassende Ermittlung von auslegungsrelevanten Kennwerten für Klebstoffe und Klebverbindungen, die das Langzeitverhalten unter ruhender, quasistatischer und schwingender Beanspruchung bei betriebsrelevanten Temperaturen und medialen Umgebungsbedingungen beschreiben. Entsprechende Kennwerte wurden in einer Datenbank archiviert und stehen zukünftigen Anwendungen zur Verfügung. Außerdem konnte gezeigt werden, dass das Ermüdungsverhalten von hochelastischen flexiblen Klebstoffen unter variablen Amplituden bis zum Totalversagen der Verbindung zufriedenstellend mit einer linearen Schadensakkumulationshypothese beschrieben werden kann.

Europäische und internationale Projekte

DuraBond (Durable composite-to-metal bonded joints for heavily loaded structures at extreme environmental conditions)	
Durchführende Stellen:	M2I, TU Delft, Netherland Organization for Scientific Research, Marine Contractors, Damen Schelde Naval Shipbuilding, All seas, Lloyd's Register, MOCS, Ministry of Infrastructure and the Environment (Netherlands), TNO, Defensie Materieel Organisatie (Netherlands), Royal HaskoningDHV
Auftraggeber:	(niederländisches Projekt)

Bearbeitungszeitraum:		laufend
-----------------------	--	---------

Kurzfassung des Vorhabens

Das DuraBond-Projekt ist ein niederländisches Forschungsprojekt zur Hybridbindung von Metall / Verbundwerkstoffen unter extremen Umgebungsbedingungen. Die Motivation besteht in der Reduzierung des Gewichts von Bauwerken wie Schiffen oder Tiefbaubrücken. Die vorgeschlagene Lösung ist die Verwendung einer Hybrid-Metall / Verbund-Bindung (siehe Abbildung 13). Der Fokus liegt auf dem Verständnis des Haftungsverlusts an den Grenzflächen, d.h. zwischen dem Klebstoff und dem Metall- und / oder Verbundsubstrat.

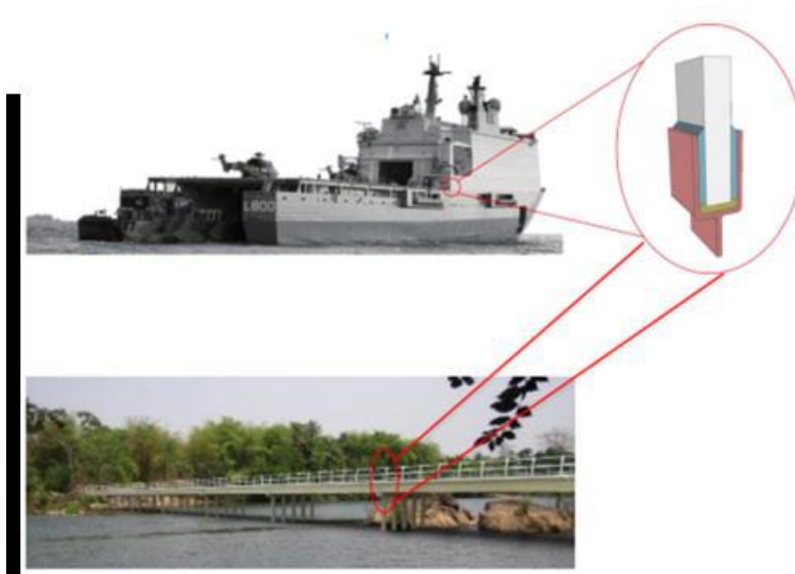


Abbildung 13: DuraBond Anwendungsfall

JIP StrengthBond Offshore		
---------------------------	--	--

Durchführende Stellen:	BV, Total, Petrobras, Naval, Siemens, Coldpad, InfraCore	
Auftraggeber:	Joint Industrial Project	
Bearbeitungszeitraum:	März 2019 – September 2022	laufend

Kurzfassung des Vorhabens

In diesem Joint Industrial Project (JIP) untersucht ein Konsortium von Interessengruppen der Offshore-, Öl- und Gasindustrie die Festigkeit von Reparaturen mit Klebebändern für Offshore-Einheiten. Das Projekt zielt darauf ab, das Problem der kurzfristigen Vorhersage des Festigkeits- und Ermüdungsdesigns von Verbundreparaturen für Rümpfe von Offshore-Einheiten anzugehen. Das Hauptziel besteht darin, eine robuste Methodik für die Entwurfsbewertung eines großen Panels für die Reparatur von Offshore-Einheiten zu definieren. Das Konsortium arbeitet mit Bureau Veritas zusammen, um eine fortschrittliche, klare und industriell anwendbare Konstruktionsanleitung zu erstellen.

Die Festigkeit von Verbundpflastern wurde in der Literatur nicht nur für die Luftfahrt- und Bauindustrie, sondern auch für die Schifffahrtsindustrie nachgewiesen. Bei Offshore-

Rumpfreparaturen, insbesondere im Spannungsbereich des Rumpfrägers, ist der Fall jedoch komplexer, mit hohen Spannungen in der Verbindungslinie und geringem Spielraum für das Manöver in Bezug auf das Design. Labortests liefern nicht immer die Antworten auf industrielle Anforderungen. Es ist notwendig, eine vorgelagerte Arbeit durchzuführen, um eine Methode zur Festigkeitsvorhersage zu validieren und die Robustheit der Vorhersage zu demonstrieren. Es besteht ein klarer Bedarf an einer Normalisierung des Feldes, es kann die Qualifizierungsschritte und die Entwurfsphase von geklebten Reparaturen systematisieren. Wenn Sie schließlich den Sicherheitsabstand zwischen den Lasten und der Festigkeit genauer definieren können, erhalten Sie die Grundlage für die Haltbarkeitsanalyse.

Die Ziele des JIP lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Beurteilung der kurzfristigen Dauerfestigkeit typischer Reparaturen
- Erweiterung des Wissens über die Festigkeit von Klebeverbindungen in typischen Offshore-Fällen
- Ermöglichen einer besseren Bewertung des Abstandes zwischen der tatsächlichen Festigkeit einer Reparatur und der Auslegungslast
- Validierung des Charakterisierungsverfahrens für die Festigkeitsvorhersage der geklebten Baugruppe
- Definition einer robusten Strategie für die Vorhersage der Festigkeit
- Sammeln von gesammelten Erfahrungen in einer industriell anwendbaren Richtlinie
- Standardisierung eines Qualifizierungsprozess für Offshore-Reparaturen von Verbundwerkstoffen

QUALIFY (Enabling Qualification of Hybrid Structures for Lightweight and Safe Maritime Transport)

Durchführende Stellen:	M2i, TU Delft, Cambridge University, DAMEN, Bureau Veritas, Ghent University, Com&Sens, Parkwind, Lloyd's Register, WMC, BAE Systems	
Auftraggeber:	EU (Interreg 2 Seas)	
Bearbeitungszeitraum:	August 2017 – Juli 2020	laufend

Kurzfassung des Vorhabens

Die Weiterentwicklung von Verbundwerkstoffen ermöglicht den Bau von maritimen Primärstrukturen, die traditionell aus Stahl bestehen, z.B. Schiffsaufbauten. Stahl und Verbundwerkstoffe können mit Klebstoffen zu einer Hybridverbindung (Stahl-Verbundwerkstoff) verbunden werden. Trotz der vielen Vorteile von Verbund- und Hybridverbindungen hat das Fehlen korrekter Richtlinien für die Zulassung und Konstruktion die Übernahme durch die maritime Industrie verhindert und ihre Verwendung auf Sekundärstrukturen beschränkt. Dies liegt zum Teil daran, dass das langfristige Verhalten und Versagen von Hybridgelenken noch nicht verstanden ist. Ziel des EU-finanzierten QUALIFY-Projekts ist es, diese Wissenslücke zu schließen und die Entwicklung solcher Leitlinien zu ermöglichen, mit dem richtigen Ziel, die Verwendung von Hybridverbindungen in Primärstrukturen in einer Meeresumwelt zu fördern.

Die Hauptziele des Projekts sind:

1. Tests zur Beurteilung der Empfindlichkeit der Klebematerialeigenschaften gegenüber der Umgebung und der strukturellen Leistung der Verbindung in verschiedenen Maßstäben.

2. Maßgeschneiderte Ausrüstung zur Bewertung der Leistung des Hybridgelenks unter kombinierten Belastungs- und Umgebungsbedingungen.
3. Prüfung der korrosionsunterstützten Ermüdung zur Bewertung von Bauteilen in einer repräsentativen Umgebung und in verschiedenen Maßstäben.
4. Überwachungs- und Inspektionsprotokoll.
5. Strukturelle Integritäts- und Zustandsüberwachungstests.
6. Richtlinien für die Zulassung von geklebten Hybridstrukturen in Primärstrukturen für Schiffsanwendungen.

Das QUALIFY-Projekt ist in drei technische Arbeitspakete unterteilt:

WP1: Langzeitleistung von Hybridstrukturen

WP2: Inspektion und Überwachung

WP3: Richtlinien für die Zulassung von Klebverbindungen



Abbildung 14: Entwurfsprozess zur Bewertung der Langzeitleistung von Hybridgelenken

Im Rahmen dieses Projekts haben Bureau Veritas und Lloyd's Register einen Überblick über die aktuellen industriellen Anforderungen für das Kleben in Schiffs- und Offshore-Anwendungen zusammengestellt, z. B. Regeln, Gesetze, Standards und Codes, die nicht nur für den See- und Offshore-Sektor, sondern auch für andere Sektoren gelten z.B. Luftfahrt, Automobil, Eisenbahn usw. Im Rahmen dieses Projekts wurde eine praktische Anwendung der Verklebung eines Verbundaufbaus mit dem Stahlrumpf einer Korvette durchgeführt (Mouton, Paboeuf, Verhaeghe, & Elenbaas, 2019). Die Anordnung ist komplex mit einer starken Diskontinuität der Struktur, die durch das Multimaterial und die vorderen / hinteren Enden des Aufbaus induziert wird (siehe Abbildung 15).

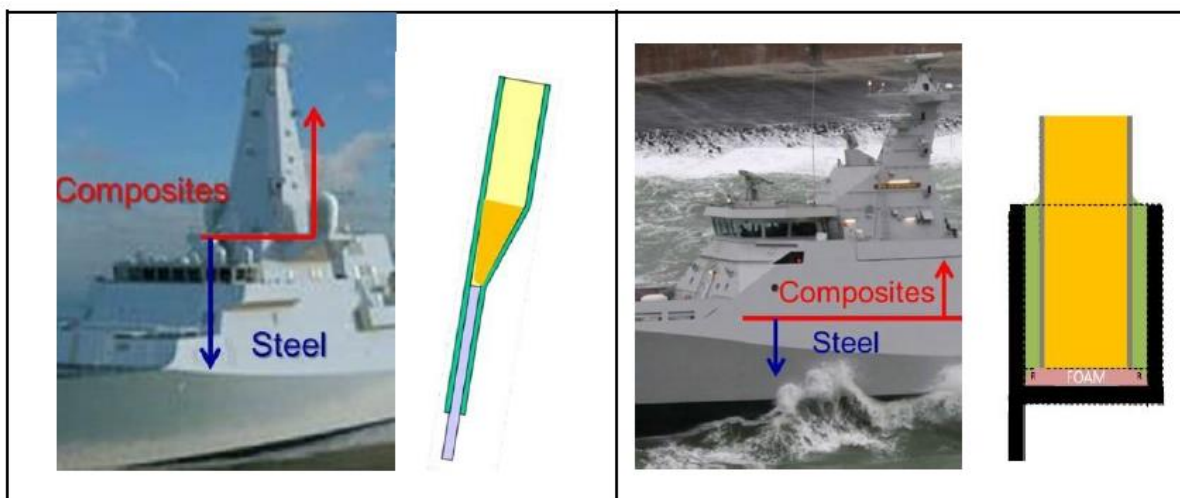


Abbildung 15: Darstellung der im Rahmen des Projekts analysierten hybriden Verbindungen

Expanded Adhesive Outfitting Applications		
Durchführende Stellen:	Huntington Ingalls Industries, Bollinger Shipyards, National Technical Systems	
Auftraggeber:	National Shipbuilding Research Program, USA	
Bearbeitungszeitraum:	September 2014 – Mai 2016	abgeschlossen
<p>Kurzfassung des Vorhabens</p> <p>Das Forschungsprojekt „Expanded Adhesive Outfitting Applications Research“ des National Shipbuilding Research Program (NSRP) (Gilmore, Losset, Murphy, & Walks, 2016) baut auf zwei früheren NSRP-Panel-Projekten auf, die sich mit der Verwendung von Klebstoffen für Ausrüstung in einem späteren Abschnitt des Fertigungsprozesses befassten („Cost Reduction Measures for Local Cable Hanger Installation“ und „Cost Reduction Measures for Late Stage Outfitting“).</p> <p>Ziel des Projekts war es, die Anwendungen für die Klebstoffausstattung über speziell getestete und zugelassene Artikel und die damit verbundenen Konfigurationen hinaus zu erweitern, indem eine Reihe von Konstruktionsregeln für Klebebolzen entwickelt wurden, die allgemeiner anwendbar sind. Die Regeln folgen den Kriterien des Naval Sea Systems Command (NAVSEA) für die Verwendung von Klebstoffen auf Oberflächenschiffen und basieren auf Tests, die von diesem Projekt durchgeführt wurden und die maximal zulässige Belastungen basierend auf den Ausfallarten festlegen.</p> <p>Anfänglich wurden leichte Gegenstände mit einem Gewicht von weniger als 100 Pfund unter Verwendung von Klebstoffen und Montageteilen mit dokumentierter Leistung in Betracht gezogen. Die Entwurfsregeln berücksichtigen alle geltenden NAVSEA-Anforderungen und identifizieren Änderungen der Schiffsspezifikationen, die für die Implementierung erforderlich sind. Die Verwendung von Klebstoffausstattungen für leichte Ausrüstungsanwendungen ist ein günstiges Geschäftsmodell, insbesondere für die Ausstattung im Spätstadium, da Heißenarbeiten und die damit verbundenen zusätzlichen Kosten entfallen.</p> <p>Das Projekt wurde in zwei Phasen unterteilt. Die erste Phase umfasste eine Überprüfung der geltenden Anforderungen, eine Überprüfung des Klebeverbindungsprozesses und eine Untersuchung möglicher Verbesserungen dieses Prozesses sowie die Entwicklung von Testplänen für Umwelttests und Überlebensfähigkeitstests. Die zweite Phase des Projekts befasste sich mit der Herstellung von Testartikeln für Umwelttests und Überlebensfähigkeitstests, der Durchführung der Testpläne und der Interpretation der Testergebnisse.</p>		

ADHESION		
Durchführende Stellen:	Airborne Composites, Amels B.V., Bureau Veritas, CMTI, Damen Schelde Naval Shipbuilding, Damen Shipyards Gorinchem, Henkel & Co Gmbh, MTI Holland BV, Netherlands Maritime Technology, Lightweight StructuresBV, Lloyd’s register EMEA, TU Delft(faculteit Luchtvaart-en Ruimtevaarttechniek/Hechtingsinstituut, Design and Production of composite Structures, faculteit 3ME)	

Auftraggeber:	(Niederländisches Projekt)	
Bearbeitungszeitraum:	2009 - 2011	abgeschlossen
<p>Kurzfassung des Vorhabens</p> <p>Im Rahmen des Projekts ADHESION wurde von 13 niederländischen Partnern systematisch der Einsatz von Kleben im Schiffbau untersucht. Das Projektziel bestand darin, Informationen zu erhalten und Technologien für zertifizierte Klebeverbindungen in der Schiffbaupraxis zu implementieren. Eine große Anzahl von Tests wurde durchgeführt, um die Anwendbarkeit verschiedener Klebstoffsysteme auf (beschichteten) Schiffbaumaterialien zu testen.</p> <p>Die Testergebnisse zeigten, dass bei hochfesten Klebstoffen ein Versagen der Beschichtung / Grundierung auftritt, was bedeutet, dass nicht die volle Kapazität des Klebstoffs verwendet wird. Die Testergebnisse zeigten jedoch, dass Beschichtungen erforderlich sind, um die Korrosion von Metallen unter der Verbindungslinie zu verhindern. Neben der Prüfung von Proben wurden vier Fallstudien zu typischen Schiffsbauteilen durchgeführt, bei denen eine Verklebung der Schiffsstrukturen möglich ist.</p> <p>Ein wichtiges Ergebnis, das sich aus den Fällen ergab, ist, dass die in der Praxis erreichten Spannungswerte im Vergleich zu den in Probestests erreichten Werten um einen Faktor 2 niedriger sind. Die größte verbleibende Herausforderung nach diesem kooperativen Forschungsprojekt besteht darin, die Lebensdauer einer Klebeverbindung vorherzusagen. Dieses Thema muss weiter untersucht werden um „standardisierte“ zertifizierten Klebeverbindungen im Schiffbau zu etablieren.</p>		

Bonding of lightweight materials for cost effective production of high speed craft and passenger ships (Bondship)		
Durchführende Stellen:	DNV, Fincantieri, Vosper Thornycroft, Jos. L. Meyer, Alcan Mass Transportation Systems, Sika, Cetena, Fraunhofer IFAM, FiReCo, University of Southampton, Délégation Générale pour l'Armement, NDT Solutions, Stena Rederi	
Auftraggeber:	EU (5. Rahmenprogramm, GROWTH)	
Bearbeitungszeitraum:	April 2000 – Juni 2003	abschluss
<p>Kurzfassung des Vorhabens (Fraunhofer IFAM, 2003)</p> <p>Im Mittelpunkt des Forschungsprojektes stand die Untersuchung mehrerer Anwendungsfälle für den Bau von Schnellfähren und Kreuzfahrtschiffen. Ziel des Projektes war die Erarbeitung von Konstruktionsmethoden mit Berücksichtigung des Langzeitverhaltens. Weiterhin sollen die Projektergebnisse eine Basis für Zulassungsrichtlinien bilden. Für die spezifizierten Anwendungsfälle sollten Verbindungstechniken qualifiziert werden.</p> <p>Zur Entwicklung einer praxisnahen Vorgehensweise wurden bei den teilnehmenden Werften Anwendungsfälle für die Klebtechnik im Schiffbau spezifiziert. Zu diesen Anwendungsfällen wurden Anforderungsprofile erarbeitet, die konkrete Daten zur Geometrie und den Lasten, zur Fertigung,</p>		

zur Montage, zu den Betriebsbedingungen und zu weiteren Aspekten der Produktentwicklung und des Produktlebensenthalten.

Zum Einsatz kamen sowohl höherfeste Klebstoffe auf Epoxy- und Methylmetacrylatbasis als auch gummielastische, flexible Klebstoffe auf Polyurethanbasis. Die Klebverbindungen sollten sowohl auf vorbehandelten Metalloberflächen als auch auf gestrichenen bzw. endlackierten Oberflächen ausgeführt werden können. Bei der konstruktiven Auslegung und der Kennwertermittlung mussten die Oberflächen und Oberflächenzustände berücksichtigt werden, die unter Werftbedingungen erzielt werden konnten.

Entsprechend der schiffbauspezifischen Anforderungen an die Substratoberflächen, Klebschichtdicken und Alterungsbedingungen wurde eine Vorauswahl von Klebstoff und Oberflächenkombinationen durch kleine Proben, insbesondere Zugscherproben, getroffen. Untersucht wurden für eine Qualifizierung neben den mechanischen Eigenschaften insbesondere der spezifische elektrische Widerstand der Klebverbindung zur Abschätzung der Kontaktkorrosionseigenschaften und der pH-Wert des ausgehärteten Klebstoffes in demineralisiertem Wasser zur groben Einschätzung des Korrosionsverhaltens auf Aluminiumoberflächen. Weiterhin wurde die Kompatibilität zwischen Klebstoffen und den Polymeren der Beschichtungssysteme festgestellt.

Die Anwendungsfälle wurden auf den Werften in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern in Demonstratoren realisiert, die auf jeder Werft aufgebaut wurden. Neben der gewonnenen Fertigungserfahrung an 1:1-Bauteilen konnten notwendige Bauteilversuche durchgeführt werden, die insbesondere zur Verifikation der Auslegungsmethoden herangezogen wurden. Parallele Bauteilversuche für ausgewählte Fälle unter schwingender und kombiniert schwingender und korrosiver Belastung im Labor und unter Freibewitterung ergänzten die Datengrundlage.

Der Schiffbau fordert für die Auslegung der Klebverbindungen einfache Methoden. Eine konstruktive Auslegung sollte auf Grundlage einiger einfacher Formeln erfolgen können. Das Projekt hat gezeigt, dass es diese Art der »einfachen« Lösungen nicht gibt. In der Regel wird es nicht möglich sein, im Schiffbau alle Verbindungen ausschließlich so zu gestalten, dass die Lasten in Scherung übertragen werden. Neben der variablen Klebschichtdicke erzeugen lokales Beulverhalten, Momente und Querkräfte in den Klebfugen Spannungszustände, die analytischen Ansätzen nicht mehr leicht zugänglich sind. Es hat sich gezeigt, dass in diesen Fällen parametrisierbare Finite-Elemente-Modelle mit linear-elastischer Näherung den »einfachsten« Zugang zur Bewertung von Klebverbindungen ermöglichen. Es können experimentell basierte Bewertungskriterien erzeugt werden, die zwar nicht zu einer 100-prozentigen Ausnutzung des Potenzials der Klebverbindung führen, jedoch einen konservativen Ansatz ermöglichen.

3. Vorschriften / Normen / Standards

Kleben als Fügetechnologie wird in industriellen Anwendungen branchenübergreifend eingesetzt. Kleben ist eine „kalte Lösung“, bei der keine thermischen Verformungen der Füge­teile entstehen. Zudem kann es für eine Vielzahl an Substraten verwendet werden. Diese Faktoren machen Kleben zu einer rentablen und effizienten Fügemethode in jedem Stadium des Fertigungsprozesses. Inspiriert durch die erfolgreiche Anwendung dieser Methode in anderen Branchen wie Automobil oder Luftfahrt ist der Schiffbau auch daran interessiert Kleb­technologie verstärkt in Schiffbau-Anwendungen einzusetzen.

Um ein effizientes Design einer Klebung sicherzustellen, ist ein tiefgreifendes Verständnis über die wirkenden Mechanismen erforderlich. Während der letzten Jahre wurde eine beachtliche Menge an Forschung mit Beteiligung von Industrie, akademischen Partnern und Zulassungsbehörden betrieben, um das mechanische Verhalten von Klebstoffen zu charakterisieren. Das letztliche Ziel hierbei ist es, standardisierte Design- und Herstellungsprozesse zu entwickeln, die einen breiteren und sicheren Einsatz von Klebstoffen im maritimen Bereich ermöglichen. Die Anwendung von Kleb­technologie insbesondere im Bereich Schiffbau steckt jedoch noch in der Aufbauphase, und Vorschriften und Richtlinien haben derzeit noch kein einheitliches Format, an dem sich Werften und Schiffbauer orientieren können. Ziel dieses Kapitels ist es, Vorschriften zu Design und Anwendung von Klebverbindungen, die derzeit im maritimen Bereich im Einsatz sind, zu identifizieren und zusammenzustellen.

Hierbei werden neben der Schiffbau-Industrie auch der Offshore Oil & Gas- Sektor sowie die Offshore-Windenergie-Branche betrachtet. Für diese Branchen wird ein Überblick über existierende Vorschriften und Richtlinien zum Design und Einsatz von Klebverbindungen gegeben. Das Ziel ist hierbei, eine nicht abschließende Aufzählung und Zusammenfassung von Regelwerken zu geben, die für neue Anwendungen von Klebverbindungen und kleinen Reparaturen herangezogen werden können.

Anschließend werden aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet dargestellt. Schließlich werden Herausforderungen beim aktuellen Zulassungsprozess aus Sicht der Anwender und Klassifikationsgesellschaften geschildert.

3.1. Übersicht über vorhandene Regelwerke und aktuelle Entwicklungen

3.1.1. Existierende Regelwerke von Klassifikationsgesellschaften

Es gibt unterschiedliche existierende Regelwerke, die den Einsatz von Kleben im Schiffbau betreffen. In allgemeinen Vorschriften für die strukturelle Auslegung von Schiffen wird das Thema Kleben dabei oft nur am Rand erwähnt. Vorschriften, die sich speziell mit dem Thema Kleben beschäftigen, sind wiederum meist auf eine spezielle Anwendung wie bspw. die Reparatur von Stahlkonstruktionen und Rohrleitungen bei Offshore-Strukturen beschränkt.

Nachfolgend werden zunächst die wichtigsten Vorschriften zum Thema aufgelistet. Daraufhin werden Gemeinsamkeiten in Aufbau und Inhalt aufgezeigt und Unterschiede dargestellt sowie anschließend verschiedene inhaltliche Aspekte genauer beleuchtet.

Die wichtigsten existierenden Regelwerke sind in Tabelle 8 aufgeführt. Für die deutsche Schiffbaulandschaft sind die Klassifikationsgesellschaften DNV GL, Lloyd's Register of Shipping (LR) und Bureau Veritas (BV) am relevantesten. Um einzuordnen, wie sich die Vorschriftenlage im internationalen Kontext darstellt, sind zusätzlich relevante Regelwerke der Klassifikationsgesellschaften American Bureau of Shipping (ABS) und Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK) aufgeführt. Relevante DIN-Normen werden in Abschnitt 3.1.2 dargestellt.

Klassifikations-gesellschaft	Vorschrift	Fokus
BV	Guidance Note NI 613 – Adhesive Joints and Patch Repair	Reparaturen, auch Multimaterial (FVK-Metall)
BV	BV Rule Note NR 546 – ‘Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey’	Strukturelle Verklebungen (allgemeine Hinweise, Berechnungsmethoden, Tests, Sicherheitsfaktoren)
BV	BV Rule Note NR 600 - Hull Structure and Arrangement for the Classification of Cargo Ships less than 65 m and Non Cargo Ships less than 90 m	Definition Sicherheitsfaktor für Klebverbindung (Fertigungsmethode)
BV	BV Rule Note NR 500 – Rules for the Classification and Certification of Yachts	Klebverbindungen in Yachten
DNV GL	Rules for Classification of Ships (Oct. 2015) [8] - Part 2 Materials and Welding, Chapter 3 Non-Metallic Materials, Section 2, Sub-section 10	Strukturelle und flexible Verklebung von Faserkunststoffverbunden
DNV GL	DNVGL-ST-C501 ‘Composite Components’ (Aug. 2017) [9] – Section 7	Design und Test von FVK-Klebverbindungen
DNV GL	Recommended Practice for Design, Fabrication, Operation and Qualification of Bonded Repair of Steel Structures DNV-RP-C301 (April 2012) – Section 7, Sub-section 3	geklebte Reparatur von Stahlverbindungen im Schiffbau und bei Offshore-Anwendungen
DNV GL	DNVGL-ST-0376: Rotor blades for wind turbines	Klebverbindungen in Rotorblättern (strukturelle Verklebung FVK-Bauteile)
DNV GL	Type approval for Adhesive Systems, DNVGL-CP-0086 (Mar. 2016)	Typenzulassung von Klebstoffsystemen
LR	Rule for the Manufacture, Testing and Certification of Materials, Chapter 14, Section 2.15	Zulassung von Klebstoffsystemen
ABS	Rules for Materials and Welding – Aluminium and Fibre Reinforced Plastic, Chapter 6 Material for Hull Construction – Fibre Reinforced Plastics, Section 1, Sub-section 9.	Strukturelle Anwendung von Klebstoffen im Schiffbau
ABS	Guidance Note on Composite Repairs of Steel Structures and Piping	Geklebte Patch-Reparaturen
Class NK	Guideline for Use of Structural Adhesives	Klebverbindungen bei Composite-Schiffen, die nicht Struktur-elemente des Rumpfes betreffen; Kleben von Bauteilen, die nicht Meerwasser oder hohen Temperaturen ausgesetzt sind

Tabelle 8: Existierende Regelwerke der Klassifikationsgesellschaften

Die wichtigsten Inhalte der verschiedenen Regelwerke werden in den folgenden Abschnitten sowie in Anhang D dargestellt. Weitere Details können interessierte Leser den Regelwerken entnehmen, die in den meisten Fällen frei verfügbar sind.

3.1.1.1 Allgemeine Struktur und Gemeinsamkeiten der Regelwerke

Den existierenden Regelwerken liegt grundsätzlich eine ähnliche Herangehensweise zugrunde. Klassifikationsgesellschaften befolgen für die Bewertung von Werkstoffen und Ausrüstungselementen, die auf Schiffen verwendet werden, allgemein diese Schritte:

1. Bewertung der Rohmaterialien
2. Bewertung des Designs
3. Bewertung der Produktion

Innerhalb der einzelnen Schritte werden verschiedene Punkte berücksichtigt, die in Abbildung 16 dargestellt sind. Nachfolgend werden die drei Phasen und relevante Aspekte genauer beschrieben.

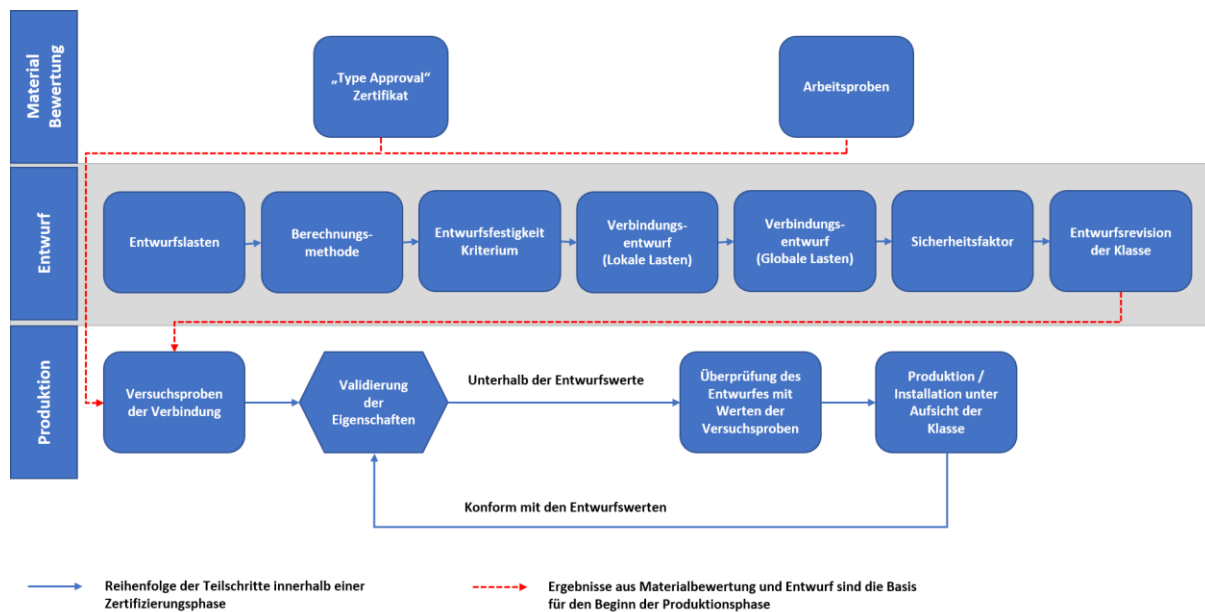


Abbildung 16: Zertifizierungsschema für Klebverbindungen

Bewertung der Rohmaterialien

Hier findet einerseits eine Zulassung des Klebstoffs statt. Dafür müssen üblicherweise verschiedene Materialprüfungen nach ISO Standards o.ä. durchgeführt werden, bei denen vorgeschriebene Mindestkennwerte erreicht werden müssen. Relevante Parameter sind hier normal die Glasübergangstemperatur, der Elastizitätsmodul, die Poissonzahl sowie Zug- und Schubfestigkeit. Zum anderen muss der Betrieb selbst für die Verarbeitung des Rohmaterials nach ISO 9000 qualifiziert sein und zugelassen werden.

Durch diesen Schritt soll sichergestellt werden, dass sich das Material für den Einsatz im schiffbaulichen Kontext eignet, und dass der Betrieb grundsätzlich in der Lage ist, mit dem Material fachgerecht umzugehen.

Bewertung des Designs

Im nächsten Schritt wird geprüft, ob das Design einer Klebverbindung den Anforderungen der Klassifikationsgesellschaft entspricht. Hierzu werden zunächst die auftretenden (statischen und/oder dynamischen) Lasten betrachtet. Anschließend wird untersucht, ob die gewählte Berechnungsmethode zur Bewertung der strukturellen Integrität des Anwendungsfalls angemessen ist. Je nach Risikokategorie der Anwendung kann hier ein analytischer Ansatz oder ein linearer oder nichtlinearer numerischer Ansatz geeignet sein. Die Berechnungsergebnisse müssen mit einem geeigneten Versagenskriterium bewertet werden. Hierfür kommen grundsätzlich verschiedene

Kriterien (z.B. spannungsbasierte, verzerrungsbasierte oder bruchmechanische) in Frage. Ggf. kann eine ergänzende Absicherung der Methode und des Versagenskriteriums durch Tests gefordert werden. Schließlich werden noch Sicherheitsfaktoren beaufschlagt. Üblicherweise werden für verschiedene Aspekte, die mit Unsicherheit behaftet sind, Teilsicherheitsfaktoren angesetzt, z.B. für Alterung, Lasten oder die Genauigkeit der Berechnungsmethode. Die tatsächliche Beanspruchung der Klebverbindung muss geringer sein als die durch Sicherheitsfaktoren abgeminderte zulässige Beanspruchung.

Durch diesen Schritt soll sichergestellt werden, dass die Klebverbindung im Betrieb allen auftretenden Beanspruchungen standhält und somit die strukturelle Integrität des Bauteils und Schiffs jederzeit gewährleistet ist.

Bewertung der Produktion

Sobald die Entwurfsrevision durch die Klassifikationsgesellschaft erfolgt ist und das Material nach einer geprüften Prozedur hergestellt wird, werden im letzten Schritt zunächst Probekörper für die Klebverbindung erstellt und geprüft. Durch die Prüfungen wird sichergestellt, dass die angesetzten Kennwerte der Berechnung in der Produktion auch vorliegen. Sofern hier Abweichungen auftreten, müssen ggf. die Designkennwerte korrigiert werden. Andernfalls kann die Klebverbindung an Bord eingesetzt oder installiert werden. Ein Besichtiger der Klassifikationsgesellschaft überprüft hierbei noch, dass die Konstruktion dem zugelassenen Design entspricht. Zur Qualitätskontrolle kommen teilweise zerstörungsfreie Prüfungen zum Einsatz.

Durch diesen Schritt wird sichergestellt, dass mechanische Kennwerte und die Ausführung der Konstruktion an Bord dem vorher geprüften Design entsprechen und keine Fehler in der Fertigung entstehen.

Eine weitere Gemeinsamkeit der Regelwerke ist die Tatsache, dass aktuell die Qualifizierung des Personals für die Klebtechnologie – anders als für das Schweißen – in keiner der Richtlinien explizit adressiert wird. Hier kann DIN 2304 Orientierung geben, die in Abschnitt 3.1.2 betrachtet wird.

3.1.1.2 Unterschiede der Regelwerke

Unterschiede der Regelwerke liegen einerseits im Anwendungsbereich. Wie bereits aufgeführt gibt es viele verschiedene Richtlinien, die Klebverbindungen im Schiffbau tangieren, aber keine Richtlinie, die für strukturelle und flexible Klebverbindungen im gesamten Bereich eines Schiffs sowie zwischen unterschiedlichen Materialien für verschiedene Schiffstypen und Einsatzbedingungen greift.

Auch sind für die vorher genannten Schritte, die verschiedene Regelwerke grundlegend gemeinsam haben, die genauen Vorgaben wiederum teilweise sehr unterschiedlich. So werden bspw. bei Bureau Veritas Klebverbindungen ähnlich wie bei DIN2304 in Risikokategorien (Class A, B, C) eingeteilt. Solch eine Unterscheidung wird in den anderen Vorschriften nicht vorgenommen. Auf Basis dieser Risikokategorien wird der weitere Zulassungsprozess angepasst. So sind für eine Klebverbindung mit geringem Risiko bestimmte Nachweise und Unterlagen nicht erforderlich, die für eine Klebverbindung mit hohem Risiko in jedem Fall betrachtet werden müssen. Bspw. sind für eine Verbindung mit geringem Risiko die Anforderungen an den Festigkeitsnachweis deutlich reduziert.

Ebenso sind die Sicherheitsfaktoren bei verschiedenen Klassifikationsgesellschaften und Regelwerken unterschiedlich. Dies betrifft sowohl die Beträge der anzusetzenden Teilsicherheitsfaktoren als auch die Kategorien, für die Sicherheitsfaktoren angesetzt werden.

Analog lassen sich für sämtliche Teilschritte aus Abbildung 16 bei einem ausführlichen Vergleich Unterschiede in den inhaltlichen Vorgaben finden. So unterscheiden sich teilweise die Vorgaben nur im Detailgrad. Teilweise gibt es jedoch auch für einige Aspekte in einer Richtlinie keine, dafür in einer anderen strenge Vorschriften.

Ohne sehr stark ins Detail zu gehen lassen sich die genauen Unterschiede in den Regelwerken und ihre Auswirkungen nur sehr schwer zu erfassen. Entsprechend ist es für einen Anwender und auch für Schiffseigner recht schwierig zu beurteilen, worin die unterschiedlichen Vorgaben begründet sind und welche für einen Anwendungsfall tatsächlich nun sinnvoller sind. Eine Vergleichbarkeit über verschiedene Klassifikationsgesellschaften ist nicht gegeben.

3.1.1.3 Inhalte zu Design & Material

In Bezug auf die Materialwahl und erforderliche Kennwerte enthalten Richtlinien beispielsweise als Vorgabe, dass der Klebstoff und die Werkstoffe der Fügebauteile kompatibel sein sollen oder dass der Klebstoff ein niedrigeres Elastizitätsmodul oder eine höhere Bruchdehnung besitzen soll als die Fügebauteile. Auch kann es Empfehlungen zum Aushärteverhalten geben: so wird von ABS (American Bureau of Shipping, 2019) empfohlen schnell aushärtende Klebstoffe zu wählen, sodass im Prozess während des Aushärtens keine zusätzliche Fixierung erforderlich ist.

Von DNV GL wird eine Einteilung der Klebstoffklassen in starre und flexible Klebstoffe sowie in Dichtstoffe vorgenommen, für die entsprechend Prüfprogramme und zulässige Kennwerte definiert werden. Dabei sind starre Klebstoffe durch hohe Steifigkeit und hohe Festigkeit gekennzeichnet, ein typisches Beispiel sind EP-Klebstoffe. Flexible Klebstoffe zeichnen sich durch eine niedrige Steifigkeit und niedrige Festigkeit ebenso wie eine hohe Bruchdehnung aus, typisch sind hier PU-Klebstoffe. Dichtstoffe unterscheiden sich von flexiblen Klebstoffen hauptsächlich durch den Einsatzzweck, der keine Übertragung von Lastenvorsieht. Auch in anderen Richtlinien wie (Bureau Veritas, November 2018) werden Vorgaben zur Ermittlung der Design-Kennwerte und mindestens ansatzbaren Kennwerten gemacht. Dabei definiert (Bureau Veritas, November 2018) zunächst allgemein, welche Parameter einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit einer Klebverbindung hat. Als besonders relevant werden die folgenden Parameter identifiziert:

- Harzsysteme und Additive wie Thixotropika
- Art der zu verklebenden Bauteile sowie deren Oberflächenvorbereitung (Abrieb, Reinigung ...) und Oberflächenbehandlung
- Geometrie und Dicke der Klebverbindung
- Aushärtungsprozess der Klebverbindung

Zum Design wählt insbesondere Bureau Veritas die Definition von Sicherheitsklassen mit unterschiedlichem Risikolevel, die eine Auswirkung auf die weiteren Schritte von Design und Zulassung haben. Das Design folgt hier einer genau definierten Prozedur von der Einordnung in die Risikoklasse und Klebstoffkategorie über die Einstufung in eine von drei möglichen Kategorien von Umweltbedingungen hin zur Definition von Sicherheitsfaktoren für unterschiedliche Analysearten. Sowohl bei Berechnungsergebnissen wie auch bei Prüfergebnissen werden teilweise die konkreten Versagensarten berücksichtigt bzw. bestimmte Versagensarten gefordert oder ausgeschlossen.

Konkrete Berechnungsmethoden oder Versagenskriterien sind in den Richtlinien nicht enthalten. Jedoch gibt es beispielsweise in der Rotorblatt-Richtlinie (DNV GL, Dec. 2015) Vorgaben, dass neben Schubbeanspruchung auch Schällasten betrachtet werden müssen und entsprechend auch für Betriebsfestigkeit mehrachsige Ansätze verwendet werden müssen. Bei den Sicherheitsfaktoren wird üblicherweise das Prinzip verfolgt, dass genauere Rechenansätze und die Absicherung durch Tests die Unsicherheit und somit anzusetzende Sicherheitsfaktoren reduzieren. Neben der Qualität der Berechnungsmethoden und Validierung durch Tests werden mit Sicherheitsfaktoren Ungenauigkeiten der Lasten, von Alterung und der innen- oder außenliegenden Position einer Klebverbindung oder auch der Einfluss von Fertigungseinflüssen auf die Festigkeit berücksichtigt.

3.1.1.4 Inhalte zu Applikation & Fertigungsprozess

Die Richtlinien enthalten in der Regel bestimmte Vorgaben zur genauen Durchführung des Fertigungsprozesses. Meist sind dies eher allgemeine Hinweise, welche Punkte bei der Herstellung zu beachten sind. So wird bspw. empfohlen, bei der Verwendung des Klebstoffs die Vorgaben des Herstellers zu beachten, oder bei der Fertigung die Oberflächenvorbehandlung und Sauberkeit zu beachten. Auch Vorgaben zur Oberflächengüte, wie z.B. Anforderungen an die Ebenheit werden gemacht. Üblich sind auch Vorgaben zu Kontrolle und Dokumentation von Prozessparametern wie Temperatur, Zeit und Luftfeuchtigkeit sowie zur Einhaltung von Designtoleranzen der Klebschichtdicke. Von Bureau Veritas werden weiterhin Vorgaben gemacht, welche Qualifikation Personen für bestimmte Aufgaben besitzen müssen.

3.1.1.5 Inhalte zu Tests / Prüfung

Wie bereits in Abschnitt 3.1.1.3 erwähnt enthalten die meisten Richtlinien Vorgaben zu zu ermittelnden Kennwerten, entsprechenden Prüfmethode und zulässigen Werten. Teilweise werden zulässige Versagensarten mit definiert. Insbesondere im Offshore- und Windkraftbereich wird oft die Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen und realen Betriebsbedingungen bei Tests empfohlen. Hier kann beispielsweise die Herstellung von Prüfkörpern unter realen Fertigungsbedingungen gefordert werden, um auszuschließen, dass ermittelte Kennwerte mit Laborproben hinterher in der Fertigung nicht erreicht werden. Ebenso ist speziell im Offshore- und Windkraftbereich meistens eine Testpyramide enthalten, die Anforderungen von Coupontests in akkreditierten Prüflaboren über Bauteiltests bis hin zu Fullscale-Tests definiert.

Eine Auflistung von relevanten Testmethoden sowie die Darstellung von Vor- und Nachteilen bzw. Einsatzgrenzen der Methoden findet sich in 2.4.

3.1.1.6 Inhalte zu Inspektion / Reparatur

Alle Richtlinien zur Herstellung von Klebverbindungen enthalten Vorgaben zur Qualitätssicherung während der Herstellung. Hierunter fallen Methoden zur Qualitätskontrolle sowie teilweise Vorgaben zu zulässigen Fertigungsabweichungen. Für Rotorblätter ist bspw. die Vorlage eines Fehlerkatalogs mit genauer Definition von zulässigen Grenzwerten unterschiedlicher möglicher Fertigungsfehler sowie Maßnahmen von komplettem Erneuern der Klebverbindung bis hin zu Akzeptanz des Fehlers bei geringem Einfluss auf die Festigkeit üblich. Zur Inspektion und Reparatur im späteren Betrieb enthalten Zulassungsvorschriften allgemein keine Vorgaben, jedoch können sich diese an Vorgaben zur Fehlertoleranz und Maßnahmen bei der Fertigung orientieren.

3.1.1.7 Inhalte zu Dokumentation / Kommunikation -> Abnahmeprozess

Die meisten Richtlinien enthalten genaue Vorgaben zur Dokumentation und Kommunikation. Dies betrifft einerseits den Abnahmeprozess selbst, zum anderen das fortlaufende Dokumentationssystem im Betrieb als Teil des Qualitätsmanagements. Für die Zulassung machen die meisten Klassifikationsgesellschaften genaue Vorgaben welche Unterlagen einzureichen sind. Dies betrifft üblicherweise Datenblätter des Klebstoffherstellers ebenso wie Design- und Prozessunterlagen. Auch Arbeitsanweisungen und Angaben zur Qualifikation des eingesetzten Personals werden normal geprüft. Dokumentation im Rahmen des Qualitätsmanagements beinhaltet neben Wareneingangsprüfungen und Lagerung insbesondere die Dokumentation der Prozessparameter.

3.1.2. Kurzüberblick über die DIN-Normen 9001, 2304 und 6701 zum Kleben

Generell lassen sich die relevanten DIN-Normen in unterschiedliche Kategorien einordnen, wobei diese auch in mehrere Kategorien hineinragen oder aufeinander verweisen:

- 1) Allgemeine Grundlagen und Qualitätsanforderungen
- 2) Allgemeine Grundlagen (u.a. Vorbereitung, Durchführung, Nachbereitung) und Qualitätsanforderungen für das Kleben
- 3) Spezielle Grundlagen (u.a. Vorbereitung, Durchführung, Nachbereitung) und Qualitätsanforderungen für das Kleben

Diese werden nachfolgend genauer erläutert.

1) Allgemeine Grundlagen und Qualitätsanforderungen

Die Basis für viele Prozesse in Hinblick auf Qualitätsanforderungen ist die Norm DIN EN ISO 9001 „Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen“, in der Kleben als „spezieller Prozess“ definiert wird. Diese DIN ist eine grundlegende Norm und findet in vielen Prozessen im industriellen Umfeld Anwendung. Solche allgemeinen Grundlagen stellen sicher, dass in den Betrieben ein entsprechendes Qualitätsmanagement vorhanden ist, das die Basis für die Sicherstellung der Qualitätsanforderungen beim Kleben darstellt.

2) Allgemeine Grundlagen und Qualitätsanforderungen für das Kleben

Um dem speziellen Prozess Kleben gerecht zu werden, entstand die DIN 2304-1 „Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse“. Diese ist gezielt für den Klebprozess entwickelt und legt die Anforderungen für die qualitätsgerechte Ausführung von konstruktiven, d. h. lastübertragenden Klebverbindungen entlang der Prozesskette Kleben – von der Entwicklung über die Fertigung bis zur Instandsetzung – fest. Die hauptsächlichen Elemente beinhalten also die Klassifizierung der Klebungen nach Sicherheitsanforderungen, den Einsatz von Klebaufsichtspersonal (KAP) und die Nachweisführung.

Ein wichtiger Aspekt ist die Einführung von Sicherheitsklassen, in die jede unter diese Norm fallende Klebverbindung eingestuft werden muss. Abhängig von diesen Sicherheitsklassen sind die Anforderungen nach dieser Norm festzulegen. Da es sich beim Kleben um einen speziellen Prozess handelt, ist eine Umsetzung dieser Anforderungen für die Sicherheit der geklebten Bauteile notwendig. Eine wichtige Definition ist dabei der Begriff „konstruktive Klebverbindung“. Dies ist im Sinne dieser Norm ein unter Verwendung von Klebstoff(en) hergestellter Werkstoffverbund, dessen Hauptfunktion die Übertragung mechanischer Lasten ist. Die lastübertragende Funktion gewährleistet hierbei – über den gesamten Lebenszyklus des Produkts – dessen Funktionstüchtigkeit und Gebrauchssicherheit. Die Klebverbindung ist in diesem Werkstoffverbund Teil einer technischen Konstruktion und trägt zum Zusammenhalt der Gesamt- bzw. Teilkonstruktion oder des Bauteils bei. Sie hält dabei allen auftretenden Belastungen stand, unabhängig davon, ob diese als statische Beanspruchungen, dynamische Beanspruchungen oder als Kombination von Beanspruchungen auftreten, mit oder ohne Einwirkung von Umgebungsbedingungen, wie sie im Anforderungsprofil definiert sind.

Die Hauptfunktion der Übertragung mechanischer Lasten bezieht grundsätzlich alle Klebstoffe ein und ist dabei:

- unabhängig von den Verformungs- und Festigkeitseigenschaften des verwendeten Klebstoffs (d. h. sie bezieht sich auf alle Klebstoffe, von niedrigmoduligen [bezogen auf den E-Modul], elastischen Klebstoffen bis hin zu hochmoduligen, hochsteifen Klebstoffen);
- unabhängig vom Verfestigungsmechanismus des verwendeten Klebstoffs (chemisch härtend, physikalisch abbindend, mit kombiniertem Mechanismus verfestigend und mit Klebstoff vorbeschichteten Materialien wie z. B. Klebebänder) sowie
- unabhängig von der Branche, in welcher der geklebte Werkstoffverbund hergestellt bzw. eingesetzt wird.

Die DIN 2304 sieht auch den Einsatz von Klebaufsichtspersonal (KAP) vor. Hierbei handelt es sich um Mitarbeiter des Anwenderbetriebes, die dort Verantwortung für die Klebtechnik und alle damit verbundenen Tätigkeiten tragen. Solch vom Betrieb zu benennendes Fachpersonal muss die entsprechenden fachspezifischen Kenntnisse durch entsprechende Schulungen oder Ausbildungen nachweisen können. Der DIN nach müssen Anwenderbetriebe ausreichend Fachpersonal nachweisen und deren Qualifikationen (z.B. DVS®/EWF-Klebpraktiker, DVS®/EWF-Klebfachkraft, DVS®/EWF-Klebfachingenieur, etc.) dokumentieren können.

Ein weiteres Kernelement der DIN 2304 ist die Nachweisführung. Diese wird notwendig, wenn die Klebung in eine der beiden oberen Sicherheitsklassen fällt. Oberstes Ziel für jede konstruktive Auslegung ist, dass die reale Beanspruchung einer Klebeverbindung stets kleiner ist als die maximale Beanspruchbarkeit. Dies muss entsprechend nachgewiesen werden. Für das Kleben werden die Prozesse der Nachweisführung unter die Verantwortung des Klebaufsichtspersonals gestellt und müssen nachvollziehbar dokumentiert werden. Eine solche Nachweisführung kann in vier Wegen erfolgen:

1. Rechnerische Nachweisführung/Bemessung

Hier werden in rechnerischen Modellen entsprechende Parameter (z.B. Belastungen, Umgebungsbedingungen, etc.) auf Basis von Standard, Versuchen, etc. berücksichtigt, um lokale Belastungen zu berechnen und diese mit der Beanspruchbarkeit der Klebung zu vergleichen. Rechnerische Nachweisführung eignet sich, wenn entsprechend notwendige Parameter und Kennwerte gesichert vorliegen. Auch eine Validierung der Modelle mittels experimenteller Daten kann Unsicherheiten minimieren.

2. Bauteilprüfung

Diese experimentelle Art der Nachweisführung prüft die Klebverbindung unter realitätsnahen Bedingungen. Das entsprechende Versagen wird dann evaluiert und bewertet. Oftmals können aber nicht alle Rahmenbedingungen in solchen Experimenten erfasst werden, so dass auch hier Unsicherheiten auftreten (z.B. Jahreszeit abhängige Umweltbedingungen, Alterung, etc.).

3. Dokumentierte Erfahrung

Hierbei werden entsprechende Erfahrungen aus ähnlichen Klebeverbindungen übertragen. Ein wichtiger Aspekt ist die Vergleichbarkeit solcher Erfahrungen für die entsprechend neu nachzuweisenden Klebeverbindungen. Dazu gehören auch vergleichbare Konstruktions- und Betriebsbedingungen der Produkte.

4. Kombination der Wege 1-3

Die Kombination der Methoden stellt einen der sichersten Wege zur Nachweisführung dar, insbesondere wenn rechnerische Methoden experimentell validiert werden. Auch ähnliche Klebungen erhöhen die Erfahrung und damit auch die Zuverlässigkeit der Methoden.

Neben den nun erwähnten Elementen Klassifizierung der Klebungen nach Sicherheitsanforderungen, dem Einsatz von Klebaufsichtspersonal (KAP) und der Nachweisführung, geht die Norm auch auf weitere Bereiche ein, welche für das Kleben relevant sind. Dazu gehören unter anderem:

- Vertragsprüfung und Unterauftragsvergabe
- Entwicklungsprozess und Prozessplanung
- Infrastruktur
- Fertigung und Instandhaltung
- Lagerung und Logistik
- Überwachung von Mess-, Prüf- und Fertigungshilfsmitteln
- Qualitätsmanagement

3) Spezielle Grundlagen und Qualitätsanforderungen für das Kleben

Während die DIN 2304 für alle industriellen und handwerklichen Bereiche gilt, gibt es bereits für spezielle Industrien oder Branchen spezifische Normen. Darunter fällt die Norm DIN 6701 „Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen“.

In dieser werden die erforderlichen Festlegungen für den speziellen Prozess „Kleben“ in der Schienenfahrzeugbranche getroffen. Grundlage dieser Festlegungen sind die klebtechnischen Fachgrundnormen unter Berücksichtigung der besonderen Anforderung an den Schienenfahrzeugbau.

Die DIN 6701 besteht aus vier Teilen:

- Teil 1: Grundbegriffe, Grundregeln (zurückgezogen)
- Teil 2: Qualifikation der Anwenderbetriebe
- Teil 3: Leitfaden zur Konstruktion und Nachweisführung von Klebverbindungen im Schienenfahrzeugbau
- Teil 4: Ausführungsregeln und Qualitätssicherung

Insgesamt enthält die DIN 6701 die wesentlichen Elemente der DIN 2304. Daher soll nur kurz der Inhalt zusammengefasst werden.

Die DIN 6701 gilt für das Kleben und Dichten von Fügeteilen bei der Herstellung und Instandsetzung von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen. Sie legt die allgemeinen Begriffe und Grundregeln für die Kleb- und Dichtarbeiten fest. Weiterhin definiert sie die Anforderungen an die Anwenderbetriebe. Sie gilt im Speziellen für die Herstellung, die Instandsetzung und die Qualitätssicherung von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen. Sie gilt zudem für die Herstellung von Isolierglasscheiben unter Zuhilfenahme von Kleb- und Dichtstoffen sowie die Herstellung von Werkstoffverbunden unter Zuhilfenahme von Kleb- und Dichtstoffen (z. B. geklebte Sandwichbauteile).

Weiterhin wird das Vorgehen bei der Konstruktion, Auslegung und Nachweisführung für das Kleben metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe bei der Herstellung und Instandsetzung von Schienenfahrzeugen und Schienenfahrzeugteilen beschrieben. Auch ist die Einordnung von Klebungen in Sicherheitskategorien dort verhaftet, wie auch der Einsatz von Klebaufsichtspersonal.

Ziel ist, die Gestaltung, Dimensionierung und Nachweisführung für die ordnungsgemäße Ausführung von Klebverbindungen unter Berücksichtigung aller geometrischen, stofflichen und medialen Einflüsse zu gewährleisten.

Da die Klebprozessplanung und -ausführung so gestaltet werden muss, dass ein sicherer und reproduzierbarer Ablauf sichergestellt ist, sind in Teil 4 der DIN 6701 wichtige Kriterien für die Gestaltung und Ausführung von Klebprozessen aufgeführt. Es wird beschrieben wie der Klebprozess sinnvoll unter Beachtung der betrieblichen Gegebenheiten und der Anforderungen des Prozesses in den Gesamtstellungsprozess eingebunden wird. Die Festlegung, Ermittlung und Dokumentation der technologischen Mindestanforderungen im Prozess, wie Luftfeuchtigkeit und Temperatur, wird ebenfalls beschrieben.

3.1.3. Binnenschiff-Standards

Maßgeblich ist der „Europäische Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe (ES-TRIN)“, wenn es um Entwurf und Ausführung von Strukturen und Fügetechnologien für Binnenschiffe geht. Nach Anfrage bei der Rheinkommission (CCNR) wurde das Thema Kleben in diesem Standard noch nicht behandelt. Auch gibt es derzeit keine Diskussion zum Kleben im CCNR oder im entsprechenden Ausschuss CESNI. Generell übernehmen auch hier die entsprechenden Klassifikationsgesellschaften eine Hauptrolle für die Weiterentwicklung und entsprechender Umsetzung der Standards beim Bau

der Binnenschiffe. Auch im Bereich anderer zuständiger Behörden konnten keine Hinweise zur Verwendung oder Standards in Bezug auf Kleben identifiziert werden.

3.1.4. Boots-/Yachtbau

Für kleine Wasserfahrzeuge unter <24m Länge gilt unter anderem die entsprechende EU-Sportbootrichtlinie. Diese wurde in Deutschland durch die Zehnte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Verordnung über Sportboote und Wassermotorräder – 10. ProdSV) umgesetzt. Unter dieser findet sich auch die Beschreibung zur CE Kennzeichnung. Außerhalb des Freizeitbereiches sind Klassifikationsgesellschaften zuständig. Die Richtlinie beinhaltet allgemeine Prozesse zur Qualitätssicherung. Ein Mittel ist hier die Konformitätsprüfung für Produkte. Diese kann z.B. durch eine Entwurfsprüfung, Baumusterprüfung sowie Mischformen erreicht werden. Wichtiger Aspekt ist, dass der Hersteller die Eigenschaften in seinen Produkten nachweisen kann. In Bezug auf das Kleben gibt es hier keine expliziten Prozesse oder Vorschriften. Klebungen können Teil der Entwurfsprüfung oder Qualitätssicherung bezogen auf den Produktionsprozess bei der Konformitätsprüfung sein. Der Hersteller muss durch diese Prüfungen sicher stellen, dass er die Risiken identifiziert hat und seine Prozesse entsprechend diesen entgegenwirken, so dass letztendlich ein sicheres Produkt entsteht. Somit hat sich Kleben im Bereich der Boote als ein gängiges Fügeverfahren etabliert.

3.1.5. Aktuelle Regelentwicklungen im Bereich Schiffbau

Das Thema Regelentwicklung findet häufig im Umfeld von Forschungsprojekten oder Industrieprojekten statt. Bei Letzteren sind oftmals die Klassifikationsgesellschaften direkt mit Industriepartnern in konkrete Projekte eingebunden. So können teilweise erarbeitete Prozesse und Erfahrungen in die kontinuierliche Ent- und Weiterentwicklung von Regeln für das Kleben aufgegriffen werden. Allerdings stehen die Ergebnisse und Prozesse zunächst nur einem eingeschränkten Kreis zur Verfügung und sind nicht öffentlich zugänglich. Daher sind Bestrebungen, wie sie in geförderten Forschungsprojekten zu finden sind, imminent, da hier auch ein Austausch mit einem breiterem Fachpublikum gewährleistet ist und die Informationen auch zugänglich sind. Im Nachfolgenden sollen die derzeitigen Projekte, welche einer Regelentwicklung zum Kleben dienen, kurz beleuchtet werden.

Die Entwicklung von Richtlinien für hybride Klebverbindungen in Primärstrukturen des Schiffes wird in einem Arbeitspaket des europäischen Forschungsprojekts QUALIFY (siehe 2.6) vorangetrieben. Innerhalb des Projekts werden experimentelle und numerische Untersuchungen zum mechanischen Langzeitverhalten unter repräsentativen Betriebslasten und Umwelteinflüssen durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen wird ein Prozedere zur Zulassung von hybriden Klebverbindungen im Einsatzbereich Schiffbau und Offshore entwickelt. Fokus liegt hierbei auf Stahl-Faserverbund-Verbindungen. Als Ergebnis sollen unter der Federführung der Klassifikationsgesellschaften und Projektpartner Bureau Veritas und Lloyd's Register Richtlinien für die Zulassung solcher Klebverbindungen vorliegen. Dabei handelt es sich um Empfehlungen, die Orientierung geben sollen, jedoch nicht um ein offizielles Regelwerk. Daher sind die Projektergebnisse sicherlich für Anwender aus dem Schiffbau und Bootsbau sehr interessant, schließen jedoch nicht die bestehende Lücke bei den Regelwerken.

Auch das Joint Industrial Project (JIP) Strength Bond mit Beteiligung von Bureau Veritas, das auch in Abschnitt 2.6.3 Forschungsprojekte aufgeführt ist, widmet sich unter anderem der Weiterentwicklung von Regelwerken. Hier sollen die Forschungsergebnisse und Erfahrungen der Projektpartner zum einen in eine industriell anwendbare Richtlinie einfließen. Zum anderen soll der Qualifizierungsprozess standardisiert werden. Dies betrifft jedoch ausschließlich den Einsatz von Kleben für Offshore-Reparaturen von Verbundwerkstoffen und ist somit für den Einsatz von Kleben im Schiffbau allgemein nur begrenzt nützlich.

Weitere Vorhaben von Klassifikationsgesellschaften zur Regelentwicklung explizit zum Einsatz von Klebtechnologien finden derzeit nach Kenntnis der Autoren nicht statt.

Im Bereich der klebtechnischen Normung finden aktuell verschiedene Weiterentwicklungen statt. Die DIN 2304-1 wird revidiert, um Erkenntnisse und Erfahrungen, die seit der Veröffentlichung 2016 dazugewonnen wurden, zu berücksichtigen. Bei der dazugehörigen Reihe der DIN Spec 2305 ist derzeit eine Erweiterung in Arbeit. Für die beiden Normen DIN 2304-1 (ISO 21368) und DIN 6701 (EN 17460) ist eine Internationalisierung geplant.

Im Bereich der Personalqualifizierung ist eine Ergänzung der existierenden Qualifizierungsstufen um einen „DVS-Klebtechniker“ in Arbeit. Diese soll zwischen Klebfachkraft und Klebfachingenieur angesiedelt werden und speziell besonders qualifizierte Praktiker dazu befähigen, Verantwortung als Klebaufsicht zu übernehmen.

Innerhalb der Arbeitsgruppe Kleben im Schiffbau wurde eine Entwicklung einer Richtlinie bereits intensiv diskutiert und wird von der Gruppe angestrebt. In Zusammenarbeit von Werften, Zulieferern und Forschungsinstituten wurden grundlegende Schritte zur Erarbeitung einer solchen Richtlinie besprochen und insbesondere weitere Forschungsvorhaben angestoßen, um identifizierte Wissenslücken zu schließen. In die Gespräche wurde auch bereits die Klassifikationsgesellschaft DNV GL eingebunden, die die Entwicklung einer Richtlinie jedoch aktuell nicht so intensiv wie nötig unterstützen kann. Aus den Vorarbeiten der Arbeitsgruppe können einige Herausforderungen bei der Entwicklung abgeleitet werden, die im nächsten Abschnitt genauer aufgeführt sind. Entsprechende Empfehlungen, wie bei der Entwicklung einer Richtlinie schnellere Fortschritte gemacht werden können, folgen in Abschnitt 5.1.

Im größeren Kontext von Kleben als Enabler-Technologie für den Leichtbau sind noch weitere Forschungsprojekte erwähnenswert, die sich für eine Weiterentwicklung der Regelwerke für den Einsatz von Leichtbau im Schiffbau einsetzen. Dies ist einerseits relevant, da Kleben als Fügemethode für den Leichtbau teilweise direkt adressiert wird, zum anderen da sich einige inhaltliche Punkte wie der Umgang mit Brandschutz für Klebstoffe und Faserverbundwerkstoffe ähneln. Nicht zuletzt ist für den Einsatz von Kleben von Faserverbundwerkstoffen natürlich von Interesse, wie sich die Lage der Zulassung von Leichtbaustrukturen im Schiffbau darstellt, da es auch hier zurzeit noch gewisse Hürden gibt. SOLAS ((IMO), International Maritime Organization, 1974, as amended) ermöglicht die Zulassung von Faserverbundwerkstoffen grundsätzlich durch eine Regelung in Regulation II-2/17, ähnlich wie beim Kleben ist es hier jedoch immer eine Einzelfallentscheidung und der Erfolg einer Zulassung für Anwender somit schlecht planbar.

Im EU-Projekt RAMSSES (RAMSSES Project, 2020) wird daher unter Beteiligung der Klassifizierungsgesellschaft Bureau Veritas, der in Fragen des Brandschutzes international anerkannten Forschungseinrichtung RISE (Research Institutes of Sweden), der Netherlands Maritime Research Foundation (NMTF) als Vertreter des niederländischen Flaggenstaats bei der IMO und des CMT ein sogenannter Smart Track to Approval (STA) erarbeitet, der künftige Zulassungsprozesse beschleunigen soll. In Anlehnung an ein Zulassungsverfahren der Bauindustrie werden Standard-Risikoklassen definiert. Für die neuartigen Design-Lösungen, die in RAMSSES für bestimmte Anwendungsfälle entwickelt, gebaut und geprüft werden, wird in einer Datenbank zusammengetragen, für welche Risikoklassen das jeweilige Design den Approval-Prozess erfolgreich durchlaufen hat. Es entsteht eine Matrix von „pre-approved Designs“, die Ansatzpunkte für die Auswahl künftiger liefert. In ähnlicher Weise wird die Datenbank Informationen bereitstellen, welche einschlägigen Standard-Tests bestimmte Materialien bestanden haben. Gemeinsam mit dem EU-Projekt Fibreship (Fibreship Project, 2020) wurde gegenüber der IMO – Sitzung SDC7 (Sub-Committee on Ship Design and Construction) im Februar 2020 – angeregt, die Weiterentwicklung der Regelwerke im Sinne des STA für die kommenden Jahre auf die Agenda der SDC zu setzen

3.2. Herausforderung bei der Klassezulassung / Klassifikation

Klebung, welche an Schiffen und Zulieferkomponenten für Schiffe durchgeführt werden, die einer Bauaufsicht durch einer Klassifikationsgesellschaft unterliegen, müssen durch diese zugelassen werden, sofern die Klebungen einen Einfluss auf den Betrieb oder die Sicherheit des Schiffes, Besatzung und Passagiere haben können. Während größtenteils übereinstimmend die Klassifikationsgesellschaften beim Kleben von einem „speziellen Prozess“ ausgehen, sind die dafür vorgehaltenen Vorschriften oder Prozesse sehr unterschiedlich, wie bereits dargelegt. Der Ursprung der Definition, dass Kleben ein spezieller Prozess sei, liegt in der DIN ISO 9001. Dies ist begründet in der Tatsache, dass Klebeverbindungen nicht einhundertprozentig zerstörungsfrei geprüft werden können. Im Umkehrschluss heißt dies aber im Sinne der DIN ISO 9001, dass potenzielle Fehler im Prozess vermieden werden müssen. Die Fehlerfreiheit der Verbindung wird über ein Qualitätsmanagement sichergestellt, welches das Kleben zu einem beherrschbaren Prozess machen soll. Dieses Vorgehen kann übersetzt auch als risikobasiertes Design gewertet werden, welches konträr zum klassischen Vorschriften-basierten Design der Klassifikationsgesellschaften steht. Dieses risikobasierte Designkonzept hat bisher noch nicht durchgreifend Einzug gehalten. Ein Beispiel hierfür im Schiffbau ist unter anderem der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen auf SOLAS Schiffen unter Bezug der SOLAS II.2 Regulation 17 Regel: diese sieht vor, dass durch eine risikobasierte Analyse, auch Faserverbundmaterialien zugelassen werden können. Allerdings sind bis heute die zugelassenen Strukturen Einzelzulassungen, da es auch hier keine einheitlichen und detaillierten Vorgaben unter den Klassifikationsgesellschaften gibt. Für die Zulassung des Klebens im Schiffbau bedeutet dies, dass die notwendige Grundlage, der Prozess des Qualitätsmanagements, keine standardisierte Vorgehensweise bei den Klassifikationsgesellschaften und im Schiffbau ist, und es daher zu allen damit einhergehenden Herausforderungen kommt.

Damit bleibt Kleben im Schiffbau zunächst eine Einzelzulassung, auch wenn viele Betriebe mit einigen Klassifikationsgesellschaften bei ähnlichen Kleb-Konstruktionen gute individuelle Prozesse etabliert haben. Bei neuen und eventuell risikobehafteten Klebungen, können allerdings Zulassungsprozesse oftmals viel Zeit in Anspruch nehmen und bleiben teils für die Betriebe unberechenbar. Dieses Risiko ist gerade im Schiffbau ein wesentlicher Faktor.

Ein weiteres übergreifendes Thema, welches die Klebetechnologie berührt, ist der Brandschutz an Bord. Es ist oftmals nicht klar, welche Anforderungen hier für Fügetechnologie gelten sollen und wie diese umgesetzt werden können. Auch dies führt zu entsprechenden Barrieren beim Einsatz der Klebtechnik.

Einige Klassifikationsgesellschaften sind allerdings in verschiedenen Vorhaben zur Entwicklung von risikobasierten Designs und deren Implementierung in die Vorschriften für nicht-metallische Werkstoffe und alternative Fügemethoden involviert. Auch haben einige Klassifikationsgesellschaften bereits Prozesse für alternative Designmethoden aufgenommen. Diese Bestrebungen führen oftmals zu einem sehr unterschiedlichen Kenntnisstand und unterschiedlicher Basis, wenn es darum geht, mit einer spezifischen Klassifikationsgesellschaft in Hinblick auf die Zulassung von Kleben zu arbeiten.

4. Praxisanwendung

In diesem Kapitel werden zunächst die fertigungs-, sicherheits- und betriebstechnischen Aspekte beim Einsatz von Klebtechnologien im Schiffbau beleuchtet. Anschließend werden Möglichkeiten zu Kostenbewertung dargestellt und Einsparpotenziale aufgezeigt.

4.1. Herausforderungen beim Einsatz von Klebtechnologien

Eine Herausforderung, die beim Einsatz von Klebtechnologien branchenübergreifend besteht, ist die Tatsache, dass sich das Ergebnis des Fertigungsprozesses mittels zerstörungsfreier Prüfungen nur bedingt kontrollieren lässt. Es handelt sich somit nach DIN ISO 9001 um einen "speziellen Prozess". Als Konsequenz ist für den sicheren Einsatz der Füge-technologie eine stabile Beherrschung des Prozesses mit sorgfältiger Qualitätskontrolle während der Fertigung erforderlich. Die Grundschrirte eines Klebprozesses sind dabei material- und branchenübergreifend immer dieselben, dennoch bestehen bei der Anwendung im Schiffbau auch branchenspezifische Besonderheiten.

Während im Bootsbau allgemein viel Erfahrung mit der Technologie besteht und der Einsatz der Klebtechnologie von Anwendern generell als sicher und gut beherrschbar bewertet wird, sind im Schiffbau traditionell andere Fügemethoden etabliert. Dementsprechend müssen hier teilweise Prozesse erst etabliert werden. Eine Herausforderung, die dem Schiffbau dabei zu eigen ist, ist die Tatsache, dass es sich bei Schiffen in der Regel um Produkte mit einer Losgröße von eins handelt. Dies birgt andere Herausforderungen als die Etablierung eines stabilen Serienprozesses. Zudem muss der Einsatz von Klebtechnologien anders als in anderen Branchen und Anwendungen in eine komplexe Fertigungskette integriert werden. Auch der hohe Anteil an Fremdarbeiten im Schiffbau erschwert das Qualitätsmanagement. In den folgenden Abschnitten werden die Auswirkungen dieser Besonderheiten genauer beleuchtet.

4.1.1. Fertigungstechnische Aspekte & Qualitätssicherung

Für die Herstellung einer qualitativ hochwertigen Klebeverbindung mit den benötigten mechanischen Eigenschaften müssen bei der Fertigung einige Punkte beachtet werden. Grundsätzlich ist zu der Gestaltung von Klebprozessen aus der Forschung und Erfahrungen mit der Technologie bereits viel Wissen verfügbar. Einerseits muss dieses Wissen jedoch auch an der richtigen Stelle verfügbar sein, zum anderen muss dennoch in der Regel eine Anpassung an vorliegende Prozessbedingungen erfolgen und konsequent umgesetzt werden.

Im ersten Schritt muss für die Klebeverbindung ein **fertigungsgerechtes Design** erstellt werden. Grundsätzlich muss die Verbindung den vorliegenden Lasten und Beanspruchungen standhalten. Hierfür müssen diese zunächst bekannt sein. Bei einer kleineren Montageklebung ist üblicherweise die Belastung durch das montierte Objekt ausschlaggebend, bei größer flächigen und strukturellen Verklebungen kommen die globalen Beanspruchungen stärker zum Tragen. Teilweise ist die genaue Beanspruchung einer lokalen Position eines Schiffes dabei nicht umfassend bekannt. Dies gilt insbesondere für Betriebslasten. Für rein auf Schub beanspruchte Konstruktionen gibt es etablierte Berechnungsmethoden. Für mehrachsig beanspruchte Verbindungen ist insbesondere die Berechnung der Betriebsfestigkeit nicht trivial. Zudem gibt es keine Berechnungsvorschriften für Klebeverbindungen, an denen sich Schiffbauer derzeit orientieren können. Entsprechend besteht bei vielen Werften der Wunsch nach einer klaren Vorgabe zu Designregeln und Auslegungsmethoden.

Unabhängig von der Berechnung empfiehlt es sich, einige konstruktive Prinzipien einzuhalten. So ist es günstig, bereits im Design darauf zu achten, dass Klebeverbindungen möglichst nur auf Schub beansprucht werden. Insbesondere Schällasten können sich sehr ungünstig auswirken und sind somit zu vermeiden. Auch gibt es in der Literatur Empfehlungen zur genauen Ausgestaltung der Füge- und Klebnahtgeometrie, die stets beachtet werden sollten. Auch die Möglichkeit zum späteren Entfügen sollte hier bei Bedarf bereits berücksichtigt werden.

Bereits im Design und bei der Materialwahl sollten zudem schiffbauliche Toleranzen beachtet werden. Klebstoffe haben gegenüber anderen Fügemethoden den Vorteil, dass sie Toleranzen in gewissem Maß ausgleichen können. Hierfür ist jedoch entscheidend, dass die Klebschichtdicke in einem Bereich variiert, der sowohl in Bezug auf Festigkeit als auch auf die Dehnung der Klebschicht für das gewählte Material akzeptabel ist.

Die **Materialwahl** sollte unter Berücksichtigung von mechanischen Kennwerten und Fertigungsaspekten getroffen werden. Der Markt bietet eine Vielzahl von unterschiedlichen Klebstoffen. Dies hat den Vorteil, dass es für unterschiedliche Anforderungen und Materialkombinationen maßgeschneiderte Lösungen gibt. Für den Anwender ist es jedoch in der Regel schwierig, selbst herauszufinden, welcher Klebstoff am besten geeignet ist. Daher findet hier üblicherweise eine intensive Beratung durch die Klebstoffhersteller statt. Diese unterstützen auch oft bei der Einrichtung des Prozesses, da dieser je nach Klebstoff unterschiedlich gestaltet sein muss. Wichtig ist, dass die Materialauswahl nicht nur das Grundmaterial der Fügeteile beachtet, sondern auch vorgesehene Beschichtungen, da die Anbindung auf einer Beschichtung sich deutlich von der Anbindung an das Grundsubstrat unterscheiden kann.

In der Fertigung ist die **Etablierung eines stabilen Prozesses** von wesentlicher Bedeutung für den erfolgreichen Einsatz der Klebetechnologie. Ähnlich wie beispielsweise beim Schweißen ist es sinnvoll, einen Prozessverantwortlichen zu definieren. Auch sind ein internes Verfahrenshandbuch bzw. Arbeitsanweisungen – ggf. in mehreren Sprachen – hilfreich. Genaue Vorgaben zur Dokumentation des Prozesses verbessern üblicherweise die Qualität der Ausführung. Zudem sorgen sie bei Auftreten von Mängeln / Schäden später eine Nachvollziehbarkeit von möglichen Fehlerursachen. Das Arbeiten mit genauen Verfahrensanweisungen und genauer Dokumentation ist im Werftumfeld üblich. Daher muss dieses Vorgehen an sich nicht etabliert werden, jedoch je nach Vorerfahrung erst entsprechende interne Anweisungen für einen Klebeprozess erstellt werden.

Entscheidenden Einfluss auf den Prozess haben klimatische Umgebungsbedingungen. Im Schiffbau sind Hallen normal nicht klimatisiert. Daher liegen teilweise sehr niedrige Temperaturen sowie über das Jahr verteilt sehr hohe Unterschiede. Die Luftfeuchtigkeit, die ebenso einen großen Einfluss hat, kann ebenso je nach Standort und Jahreszeit sehr unterschiedlich ausfallen. Da diese Parameter normalerweise nicht steuerbar sind, müssen die vorherrschenden Umgebungsbedingungen bei der Auswahl des Klebstoffs berücksichtigt werden. Auch müssen zulässige Werte der Luftfeuchtigkeit und Temperatur definiert werden bzw. zulässige Verarbeitungs- und Aushärtezeiten in Abhängigkeit dieser beiden Parameter. Bei der Fertigung müssen diese Parameter stets kontrolliert und idealerweise protokolliert werden. Bei der Festlegung der Prozessgrenzen können Hersteller üblicherweise unterstützen.

Ein wichtiger Schritt im Klebeprozess ist die Oberflächenvorbehandlung. Um adhäsives Versagen zu vermeiden sollten die Oberflächen der (ggf. beschichteten) Fügeteile staub- und schmutzfrei sein. Im Schiffbau ist die Umgebung normalerweise staubiger und schmutziger als in einigen anderen Branchen. Es muss hier entsprechend darauf geachtet werden, dass die Oberflächen von Staub, Fett oder anderen Verunreinigungen befreit und zwischen Reinigung und Klebstoffauftrag staub- und schmutzfrei gehalten werden. In großen Hallen ist dies über eine genaue Abstimmung mit anderen Prozessen oder z.B. über eine Einhausung möglich. Einhausungen sind im Schiffbau auch für andere Anwendungen üblich. Ebenso ist es im Schiffbau gängig, dass während der Durchführung bestimmter Prozesse andere Prozesse nicht stattfinden dürfen. Somit ist dies für einen Klebeprozess kein komplett neues oder unmögliches Prozedere, muss jedoch genau definiert und beachtet werden. Im Yachtbau ist in der Regel weniger Koordination mit anderen staub- und schmutzerzeugenden Prozessen nötig und daher eine Umsetzung leicht.

Vor Beginn des Klebstoffauftrags muss der Klebstoff ggf. geeignet gemischt werden. Hierzu muss das geeignete Gerät vorhanden sein. Anweisungen des Herstellers zu Mischverhältnis, Mischvorgang und -dauer sollten befolgt werden, um die richtigen Kennwerte und möglichst wenig Lufteinschlüsse zu erhalten. Sofern dies ordnungsgerecht passiert ist die Fehleranfälligkeit relativ gering. Um Fehler zu

vermeiden werden zudem von Herstellern meist unterschiedliche Farben für verschiedene Komponenten eingesetzt. Nach dem Anmischen erfolgt der Klebstoffauftrag manuell oder ggf. mittels eines geeigneten Auftragsgeräts. Hier ist auf die richtige Menge und Verteilung des Klebstoffs zu achten. Je nach Anwendung sollte vor dem Auftrag überprüft werden, ob vorhandene Toleranzen und die resultierende Klebschichtdicke den Vorgaben entsprechen. Wie vorher erwähnt müssen zudem die zulässigen Prozessparameter (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, offene Zeit) eingehalten werden. Anschließend wird der Klebstoff nach Anweisung des Herstellers getempert oder bei Raumtemperatur ausgehärtet. Bei einigen Anwendungen ist vorher eine Entfernung von überschüssigem Klebstoff und das Abziehen der Kehlnaht empfehlenswert. Während des Aushärtens kann es z.B. bei Montage an senkrechten Flächen nötig sein, die Füge­teile zusätzlich zu fixieren, bspw. durch mechanische Hilfskonstruktionen, Dies sollte vor dem Auftrag abgeklärt werden.

Bei der Planung und Ausführung der Klebverbindung muss im Schiffbau stets die **Integration in die Fertigungskette** beachtet werden. Zum einen betrifft dies die zeitliche Abstimmung mit anderen Fertigungsprozessen, um die richtigen Bedingungen für die Verklebung zu gewährleisten. Zum anderen kann sich aus dem Einsatz von Klebtechnologie Änderungen in vor- oder nachgelagerten Prozessen ergeben. So ist es möglich, dass durch den Einsatz von Klebverbindungen Dichtungen obsolet werden. Ggf. ergeben sich durch das Kleben andere Anforderungen an bestimmte die Oberflächengüte oder Beschichtungsart an bestimmten Stellen. Dies müsste entsprechend in vorgelagerten Prozessen beachtet werden. Bei nachgelagerten Schritten könnte beispielsweise eine Rolle spielen, dass sich eine geklebte Verbindung nur mit höherem Aufwand demontieren lässt als eine Schraubverbindung. Anders als bspw. Schweißen kann Kleben jedoch auch noch spät im Fertigungsprozess (nach Abschluss der Heißenarbeiten) eingesetzt werden, da (bei Aushärten bei Raumtemperatur) kein Wärmeeintrag in die Füge­teile erfolgt.

Zur **Qualitätssicherung** können im Schiffbau ebenso wie in anderen Branchen verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Klebprozesse sollten nur von entsprechend geschultem Fachpersonal ausgeführt oder mindestens beaufsichtigt werden. Arbeitsanweisungen sollten in allen erforderlichen Sprachen vorliegen und bspw. durch Weiterbildung die Fehleranfälligkeit reduzieren. Prozessparameter müssen beachtet und dokumentiert werden. Aus Erfahrung der Werften bei anderen Prozessen erhöht eine engere Dokumentation und somit Verantwortlichkeit der ausführenden Person die Qualität eines Prozesses. Die ausgehärtete Klebverbindung sollte mit geeigneten Methoden inspiziert werden. Zwar ist – wie eingangs erwähnt – nicht für jede Klebverbindung eine lückenlose Inspektion möglich (siehe 2.4 für Einsatzgebiete und Grenzen unterschiedlicher Methoden). Dennoch ist eine Inspektion immer sinnvoll, da so zumindest das Mögliche getan wird, um Fehler aufzudecken bzw. auszuschließen. Für die Bewertung von Fertigungsabweichungen bei Klebverbindungen im Schiffbau gibt es wiederum keine klare Vorgabe. Als Orientierung für die Qualitätssicherung können die Vorgaben der Normen DIN 2304-1 und DIN 6701-4 herangezogen werden.

Um eine hohe Qualität von Klebungen in der Fertigung zu erzielen ist speziell **geschultes Personal** unabdingbar. Mitarbeiter müssen sensibilisiert werden, auf welche Aspekte es bei der Fertigung einer Verklebung ankommt. Beispielsweise müssen beteiligte Mitarbeiter wissen, dass für den Prozess Sauberkeit eine deutlich wichtigere Rolle spielt als für einen Schweißprozess. Gleichzeitig ist es sinnvoll, eine definierte Klebaufsichtsperson einzusetzen, die die Verantwortung für den Prozess trägt und auch bei Abweichungen und Problemen kompetent reagieren kann. In vielen Werften ist die Notwendigkeit zur Qualifizierung des Personals erkannt und Mitarbeiter werden entsprechend geschult. Hierfür ist die Weiterbildung Klebtechnik des Fraunhofer IFAM (Fraunhofer IFAM) eine etablierte Maßnahme. Diese bietet sowohl die Möglichkeit, Personal mit Fokus auf der Ausführung zum Klebpraktiker zu schulen als auch Mitarbeiter als Klebfachkraft zur Erstellung von Arbeitsanweisungen und Wahrnehmung von klebtechnischen Aufsichtsfunktionen zu befähigen. Ein Klebfachingenieur-Lehrgang bietet zudem die Gelegenheit, Ingenieure für die verantwortliche Betreuung aller klebtechnischen Belange von der Produktentwicklung bis hin zur Reparatur zu schulen.

4.1.2. Betriebs- & sicherheitstechnische Aspekte

Beim Einsatz von Klebstoffen müssen auch betriebs- und sicherheitstechnische Aspekte beachtet werden. Klebstoffe müssen sachgerecht gelagert und entsorgt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Lagerbedingungen sich für unterschiedliche Klebstoffe voneinander unterscheiden können. Auch haben die Werkstoffe üblicherweise eine begrenzte Haltbarkeit. Im Rahmen der Qualitätskontrolle ist zudem eine Prüfung des Materials bei Wareneingang sinnvoll. Bei der Entsorgung muss beachtet werden, dass speziell nicht ausgehärtete Klebstoffreste zu den besonders überwachungsbedürftigen Abfällen zählen, da diese eine potenzielle Gefahrenquelle darstellen.

Da es sich sowohl bei Klebstoffen als auch bei eingesetzten Hilfsmitteln wie Primern oder Reinigungsmitteln in der Regel um Gefahrenstoffe handelt müssen Maßnahmen zum Arbeits- und Umweltschutz ergriffen werden. Hierunter fallen beispielsweise die korrekte Kennzeichnung von Gefahrenstoffen, den Einsatz von persönlicher Schutzausrüstung, technische Maßnahmen wie Absaugeinrichtungen oder eine zeitliche Begrenzung der Exposition eines Mitarbeiters. Ein Sicherheitsdatenblatt des Herstellers muss alle relevanten sicherheitstechnischen Angaben enthalten. Am Arbeitsplatz muss eine interne Betriebsanweisung zum Umgang mit den Gefahrenstoffen zur Verfügung stehen, und eine jährliche Unterweisung durch den Arbeitgeber erfolgen.

Grundsätzlich müssen beim Einsatz von Klebetechnologie im Schiffbau für jeden neuen Klebstoff oder jedes neue Hilfsmaterial die erforderlichen Maßnahmen definiert und umgesetzt werden. Im Einzelfall sind hier ggf. Maßnahmen nötig, die für andere Materialien im Betrieb vorher noch nicht getroffen werden mussten. Entsprechend muss das Thema Arbeits- und Umweltschutz beim Einsatz von Kleben mit Sorgfalt beachtet werden. Allgemein sind die Themen Arbeits- und Umweltschutz sowie der Umgang mit Gefahrenstoffen in den meisten Werften jedoch bekannt und es gibt üblicherweise etablierte Vorgehensweisen zu Arbeitssicherheit und der sachgerechten Handhabung von Gefahrenstoffen.

4.2. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Beim Einsatz von Klebetechnologie im Schiff- und Bootsbau gibt es zwei unterschiedliche Ausgangssituationen. Bei einem Teil der Anwendungen ist Kleben aus technischen Gründen die einzig mögliche bzw. sinnvolle Fügetechnik. In diesem Fall sind Kosten zunächst zweitrangig, jedoch soll der Einsatz natürlich dennoch möglichst kostengünstig erfolgen. Im zweiten Fall wird Kleben für eine Anwendung als eine von mehreren möglichen Fügemethoden, die sich in der „Fertigungs-Toolbox“ einer Werft befinden, in Erwägung gezogen und nur ausgewählt, wenn sie gegenüber den anderen in Frage kommenden Fügemethoden einen klaren wirtschaftlichen Mehrwert liefert. Dieser Mehrwert besteht in den seltensten Fällen aus günstigeren Materialkosten, sondern ergibt sich oft aus Vorteilen für das Gesamtdesign bzw. den Gesamtprozess. In den nachfolgenden Abschnitten wird dies genauer untersucht.

4.2.1. Kalkulationsansätze zur Kostenermittlung

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit muss verschiedene Aspekte berücksichtigen. Einerseits fallen klar quantifizierbare Kosten für Material oder die Prozessschritte des Klebens in Form von Personalkosten an. Diese können direkt anderen Fügetechnologien gegenübergestellt werden. Andererseits gibt es jedoch auch Kosten oder Einsparungen, die weniger offensichtlich sind. Zum einen kann der Einsatz von Kleben Auswirkungen auf vor- oder nachgelagerte Prozesse haben. Hier ist im Vergleich mit Schweißen insbesondere der Nacharbeitsaufwand von Interesse. Zum anderen ergeben sich durch den Einsatz der Klebetechnologie oft Auswirkungen auf das Gesamtdesign, die nicht immer direkt quantifiziert werden können, teilweise aber entscheidende Vorteile der Technologie darstellen (z.B. Schwingungsdämpfung). Es muss somit immer eine ganzheitliche Bewertung von Kosten und Nutzen stattfinden. Nachfolgend werden zunächst alle Punkte aufgeführt, die hier berücksichtigt werden müssen. Anschließend werden Beispiele dargestellt.

▪ Investitionskosten bei neuem Einsatz der Klebetechnologie

Wenn die Klebetechnologie im Betrieb vorher nicht angewendet wurde, sind am Anfang einige Investitionskosten nötig, bspw.

- Kosten für die Schulung der Mitarbeiter
- Anschaffung von Geräten, Werkzeugen, ...
- Erarbeitung von internen Prozessvorschriften & Arbeitsanweisungen
- Erarbeitung von Betriebsanweisungen zu Arbeits- und Umweltschutz
- Implementierung in das Qualitätsmanagement

Bei anderen Füge-technologien, die bereits eingesetzt werden, existieren diese Kosten ebenso, wurden jedoch teilweise bereits in der Vergangenheit getätigt. Für den direkten Vergleich mit anderen Füge-technologien sollte daher der Fokus auf laufende Kosten gesetzt werden, wenngleich für die Investitionskosten zu Beginn eine strategische Entscheidung für oder gegen Kleben getroffen werden muss. Zu beachten ist, dass es beispielsweise gegenüber Schweißen unterschiedliche Laufzeiten von Zertifikaten des geschulten Personals gibt. Konkret sind die klebtechnischen Weiterbildungen in ihrer Gültigkeit nicht begrenzt, die schweißtechnischen Qualifikationen jedoch schon sodass die laufenden Kosten für Schulungen je nach Betriebsphilosophie hinterher geringer sein können.

▪ Materialaufwand

Die Kosten für den Klebstoff ebenso wie für nötige Hilfsstoffe (Primer, Reinigungsmittel, ...) können je nach Klebstoffart und Abnahmemenge variieren. Konkrete Kosten müssen daher stets von Herstellern erfragt werden. Grundsätzlich liegen die Materialkosten für Klebstoffe in einem höheren Bereich, sodass in einem direkten Vergleich mit Schweißen die reinen Materialkosten für Kleben oft höher ausfallen als für Schweißen.

▪ Zeit-/Arbeitsaufwand

Für die Bewertung des Zeit- bzw. Arbeitsaufwands müssen einerseits die direkten Prozessschritte des Klebens bewertet werden. Hierunter fallen sowohl Zeiten, in denen aktiv gearbeitet wird, als auch Zeiten, in denen z.B. durch Einhausen oder Einschränkung anderer Arbeiten während des Aushärtens der Prozess Kleben andere Teilprozesse ggf. beeinflusst. Zum anderen muss berücksichtigt werden, dass sich der Zeit- und Arbeitsaufwand von vor- oder nachgelagerten Schritten ändern kann.

Für jeden Arbeitsschritt muss definiert werden, welche Anzahl von Mitarbeitern mit welcher Qualifikation den Arbeitsschritt ausführen muss. Mit dem entsprechenden Stundensatz können dann die Teilkosten für jeden Prozessschritt ermittelt werden. Da der Aufwand je nach Anwendung stark variieren kann, müssen die Werte stets individuell ermittelt werden. Bei manchen Anwendungen und Prozessschritten sind hierbei unterschiedliche Kombination von „Zeit pro Prozessschritt“ und „Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter“ möglich. Hier muss vom Betrieb abgewogen werden, ob mit Blick auf den Gesamtprozess eine schnellere Durchführung mit mehr Mitarbeitern oder eine langsamere Durchführung mit weniger Mitarbeitern vorteilhaft ist. Bei manchen Prozessschritten ergibt sich dies bereits aus den technischen Anforderungen: bei großflächigen Verklebungen wird beispielsweise meist die Anzahl von Mitarbeitern eingesetzt, die benötigt werden, um die zulässigen Verarbeitungszeiten einzuhalten.

Eine Kostentabelle für die Klebprozessschritte kann wie folgt aussehen:

Schritt	Beschreibung	Zeit [h]	Anzahl Mitarbeiter	Qualifikation Mitarbeiter	Stundensatz Mitarbeiter [€/h]	Kosten [€]
1	Vorbereitung (Material u. Hilfsmittel bereitstellen, Toleranzen prüfen, ggf. einhausen, ggf.					

	Fixierkonstruktion bereitstellen, ...)					
2	Oberflächenvorbehandlung (ggf. mit anschließendem Schutz, wenn Verklebung nicht direkt im Anschluss erfolgt)					
3	Klebstoff mischen					
4	Klebstoffauftrag			z.B. Klebpraktiker		
5	Aushärten					
Berechnung Kosten = Zeit x Anzahl Mitarbeiter x Stundensatz						

Tabella 9: Kostenberechnung Klebprozess

Analog kann dies für vor- und nachgelagerte Schritte erfolgen, die ggf. betroffen sind.

Soll Kleben im Vergleich mit anderen Fügemethoden bewertet werden, unterscheiden sich die erforderlichen Prozessschritte hier teilweise. Insbesondere im Vergleich mit Schweißen bei Nacharbeiten oder Änderungen in einer späten Bauphase fällt bspw. für Schweißen ein hoher Nacharbeitsaufwand an, der beim Kleben als Einsparung verbucht werden kann. Auch kann sich beispielsweise der Aufwand für die Qualitätssicherung verändern, wenn für eine Fügetechnologie aufwendigere Inspektionsmethoden eingesetzt werden.

- Auswirkungen auf das Gesamtdesign

Kleben kann verschiedenen Auswirkungen auf das Gesamtdesign haben, die bei der Kosten-Nutzen-Bilanz berücksichtigt werden sollten, z.B.

- Kein Wärmeeintrag durch Kleben: für Klebstoffe, die bei Raumtemperatur aushärten, findet kein Wärmeeintrag in die Fügeteile statt. Hierdurch kann Kleben auch nach Abschluss der Heißenarbeiten im Schiffbau oder im Bereich von beschichteten Oberflächen eingesetzt werden. Somit ist eine flexiblere Reaktion auf spätere Designänderungen möglich.
- Einsparen von Dichtungen: wenn Kleben als Ersatz für eine form- oder kraftschlüssige Verbindung wie Schrauben, bei der vorher eine zusätzliche Dichtung verwendet wurde, dient können durch den Einsatz von Kleben Dichtungen eingespart werden.
- Dämpfung: in einigen Anwendungsfällen wie der Verklebung von Rumpf und Deckshaus oder der Fundamentierung von Maschinen und Ausrüstung kann Kleben im Vergleich mit anderen Fügemethoden zu einer reduzierten Übertragung von Schall und Schwingungen von einem Fügeteil in das andere führen.
- Werkstoffkombinationen: durch den Einsatz von Kleben als Fügetechnologie wird teilweise der Einsatz von Werkstoffen im Gesamtdesign möglich, die mit den vorher eingesetzten Fügemethoden nicht in Frage kommen. So ist insbesondere der Einsatz von Faserverbundkunststoffen nur möglich, wenn eine kunststoffgerechte Fügetechnologie vorhanden ist. Die üblichen schiffbaulichen Fügemethoden sind hier – anders als Kleben – nicht geeignet.
- Konstruktion: teilweise kann der Einsatz von Kleben zu konstruktiven Änderungen führen, durch die sich Materialeinsparungen oder niedrigere Herstellkosten für andere Bauteile erzielen lassen.

Diese Aspekte lassen sich insgesamt aufgrund der komplexeren Zusammenhänge etwas schwerer quantifizieren als die Material- und Prozesskosten, sind jedoch oft entscheidende Faktoren bei der Kosten-Nutzen-Betrachtung.

- Folgekosten in Betrieb & Recycling

Im Zuge von Betrachtungen zu CO₂-Bilanzen und Nachhaltigkeit können Folgekosten in Betrieb und Recycling betrachtet werden. Aktuell spielt dies für Schiffbauer beim Einsatz von Klebtechnologien eine untergeordnete Rolle, da diese Folgekosten nicht während der Bauphase anfallen. Für Reeder wiederum ist der unterschiedliche Wartungsaufwand von Kleben und anderen Fügemethoden nicht von großem Belang, da die Wartungskosten in beiden Fällen im Vergleich mit den Betriebskosten für den Kraftstoff zu vernachlässigen sind.

Neben den aufgeführten Punkten können bei der Kosten-Nutzen-Analyse im Einzelfall noch weitere Faktoren eine Rolle spielen, z.B. durch eine zusätzliche Fügemethode unabhängiger von einem Lieferanten für eine andere Fügemethode zu werden o.ä.

Ein konkreter Kostenvergleich der Fügetechniken Kleben und Schweißen des Klebstoffherstellers Sika ist in Abbildung 17 dargestellt. Für eine Anwendungsbeispiel einer Montageklebung eines Mitglieds der Arbeitsgruppe Kleben im Schiffbau ist ein Vergleich der beiden Fügemethoden in Abbildung 18 aufgeführt. Dabei bezieht sich die Wartezeit beim Schweißen unter anderem auf die erforderlichen Nacharbeiten an der Beschichtung. Beide Vergleiche bestätigen, dass das Einsparpotenzial hauptsächlich im reduzierten Nacharbeitsaufwand und verringerter Wartezeiten im Gesamtprozess liegt. Selbst mit höheren Materialkosten lassen sich so die Gesamtkosten des Prozesses durch den Einsatz der Fügetechnologie senken.

Das absolute Einsparpotenzial liegt dabei aufgrund der Materialvielfalt bei Klebstoffen in einem Spektrum. Sowohl für die Materialkosten als auch für Wartezeiten und Gesamtkosten ist daher in Abbildung 18 ein Wertebereich angegeben. Auch mit den ungünstigeren Varianten lässt sich bei diesem Anwendungsbeispiel gegenüber Schweißen eine Einsparung erzielen. Es wird jedoch deutlich, dass ein hohes Potenzial besteht, den Prozess mit der Technologie Kleben noch kostenoptimiert zu gestalten. Dies wird im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

ZEIT- UND KOSTENVERGLEICH DER VERBINDUNGSTECHNIKEN KLEBEN UND SCHWEISSEN

Zeitanalyse (Minuten)			Kostenanalyse (in Euro)			
Fertigung	Schweißen	Kleben	Kosten/9er-Tafel	Schweißen	Kleben	
Beispiel Aluminiumtafeln	Zuschnitt aller Teile (9 St.)	120	120	Arbeitskraft 35,00 €/h	163,90	105,60
	Ablegen auf Arbeitstisch	10	10	Klebstoff (40,00 €/L): 9*25 ml	0	9,00
	Reinigen der Flächen	0	10	Schweißmaterial	1,50	10
	Applikation Klebstoff	0	6	Schleifm./Spachtel	5,00	0
	Fügen der Winkel	6	10	Zwischensumme	170,40	114,60
	Schweißen	8	0	Anlagenkosten Kleben (40.000 Tafeln)	0	7,50
	Segmentmontage	25	25	Anlagenkosten (Schweißen)	2,50	0
	Nacharbeit (Schleifen)	120	0			
	Summe	289	181	Summe	172,90	122,10
Zeiteinsparung durch Kleben: 108 Minuten			Kostensparnis durch Kleben: 50,80 € *			

* Bei einem Kostenvergleich sollte man nicht nur die reinen Materialkosten betrachten. Vorarbeiten, Nacharbeiten und die insgesamt benötigte Arbeitszeit müssen mitberücksichtigt werden.

Abbildung 17: Zeit- und Kostenvergleich Kleben und Schweißen (@Sika Deutschland GmbH)

Arbeitsschritt	Schweißen	Kleben
Vorbereitung [h]	1	2
Fügen [h]	1	1
Nacharbeit [h]	7	0
Materialkosten [€]	20	20-86
Wartezeiten [h]	72	0,25 – 24
Kosten [%]	100%	40-80%

Abbildung 18: Zeit- und Kostenvergleich Kleben und Schweißen Anwendungsbeispiel Werft

4.2.2. Einsparpotenziale

Die größten Vorteile der Klebetechnologie und somit auch die höchsten Einsparpotenziale ergeben sich aus folgenden Punkten:

- Reduktion des Nacharbeitsaufwands gegenüber Schweißen
- Kein Wärmeeintrag → Einsatz der Technologie nach Abschluss der Heißarbeiten ohne aufwendige Folgearbeiten möglich, dadurch mehr Flexibilität bei späteren Änderungen im Design
- Durch Kleben Fügen von Faserverbundkunststoffen möglich → Einsatz von FVK im Design mit entsprechendem Potenzial zur Gewichtsreduzierung möglich

Um den Prozess kosteneffizient zu gestalten, sind zudem folgende Ansatzpunkte möglich:

- Bei der Werkstoffwahl neben technischen Aspekten auch auf Materialverfügbarkeit am Markt achten
 - Es ist sinnvoll, beim Design erforderliche Mindestkennwerte für Materialdaten zu definieren, die von mehreren verfügbaren Klebstoffen erfüllt werden können, um eine starke Abhängigkeit von einem Lieferanten zu vermeiden.
 - für unterschiedliche Klebeanwendungen ggf. einen für alle Anwendungen technisch akzeptablen Klebstoff wählen anstatt verschiedene technisch optimale (sofern sich die technischen Anforderungen nicht stark unterscheiden). Hierdurch können durch höhere Abnahmemengen bessere Preise erzielt werden, es vereinfacht aber auch die interne Handhabung weniger verschiedene Klebstoffe zu nutzen.
 - Sofern Materialien mit unterschiedlichen Aushärtezeiten für die Anwendung in Frage kommen ist es vorteilhaft, ein Material mit möglichst kürzer Aushärtezeit zu wählen, um Wartezeiten im Prozess zu minimieren.
- Bei der Schulung von Personal müssen nicht unbedingt sofort viele Personen geschult werden. Zum Einstieg kann bspw. durch eine qualifizierte Klebaufsichtsperson intern Wissen multipliziert werden, oder einzelne geschulter Mitarbeiter unternehmensweit Klebaufgaben übernehmen.

5. Empfehlungen

5.1. Entwicklung einer Richtlinie

Kleben kann langfristig für eine Vielzahl von maritimen Bereichen eine etablierte Fügemethode werden. Neben bereits etablierten Anwendungen insbesondere im Boots- und Yachtbau wird derzeit das größte Potenzial für neue Anwendungen von befragten Experten im Schiffbau gesehen. Daher sollen die Empfehlungen zur Ausgestaltung einer Richtlinie sich auf diesen Bereich konzentrieren.

Um Kleben als Fügetechnologie für den Schiffbau weiter zu erschließen, müssen einheitliche Standards, Prozesse, etc. definiert werden. Im ersten Schritt wird hierzu die Erarbeitung einer Richtlinie im nationalen Kontext als abgestimmter Branchenstandard empfohlen. Diese kann im weiteren Verlauf die Basis zu Erarbeitung von Regeln einer Klassifikationsgesellschaft, einer DIN-Norm, etc. sein. Da es sich beim Schiffbau um eine internationale Branche handelt, die auch internationalen Vorschriften unterliegt, ist mittelfristig eine internationale Standardisierung das Ziel. Bei der Etablierung neuer Vorschriften beispielsweise über die IMO sind in der Regel jedoch ausführliche Abstimmungsprozesse erforderlich, sodass hier keine kurzfristigen Lösungen – die sich die deutsche Schiffbaulandschaft wünscht – zu erwarten sind. Zudem können Vorschriften im internationalen Kontext leichter abgestimmt werden, wenn bereits im Vorfeld eine gründliche Untersuchung und Aufbereitung der inhaltlichen Grundlagen erfolgt ist. Ein erfolgreiches Beispiel für solch einen Bottom-Up-Ansatz ist die Norm DIN 2304-1, die auf einer DVS-Richtlinie basiert und aktuell internationalisiert wird. Daher wird im Rahmen dieser Studie zunächst die Erarbeitung eines abgestimmten Branchenstandards als Richtlinie empfohlen, der nachfolgend als Basis für weitere Schritte dienen kann.

Ziel dieser Richtlinie soll es unter anderem sein, einen abgestimmten Standard zur Qualitätssicherung, Planung, Auslegung, Durchführung und Überprüfung zu schaffen. Hierfür müssen zum einen Strukturen geschaffen werden, um Inhalte zu gliedern, zu definieren und auszugestalten, zum anderen müssen diese von den Akteuren abgestimmt und akzeptiert werden.

Zur Erarbeitung einer Struktur für eine solche Richtlinie wurden verschiedene bekannte Regeln, Richtlinien, Normen und Standards herangezogen, unter anderem Vorschriften von Klassifikationsgesellschaften zum „Schweißen im Schiffbau“ oder dem „Fertigungsstandard des Deutschen Schiffbaus“ des VSM. Hieraus werden notwendige Elemente einer Struktur für eine Richtlinie „Kleben im Schiffbau“ abgeleitet und durch den in der Studie erarbeiteten Kenntnisstand erweitert.

5.1.1. Struktur der Richtlinie

Die nachfolgende Struktur gibt einen Rahmen für die Richtlinie „Kleben im Schiffbau“ vor. Die Überschriften spiegeln dabei logisch aufbauende Inhalte wider, welche zunächst allgemeine Definitionen liefern, dann auf Werfteebe Anforderungen definieren um schließlich Werkstoffe und den Prozess mit seiner Auslegung, Durchführung und Qualitätssicherung aufzugreifen. Dabei ist anzunehmen, dass – wie in Abbildung 19 dargestellt – der Grad der Komplexität bei der Erarbeitung der Inhalte zunimmt und bei den Kapiteln zur Bemessung und Prüfung am größten ist. Dies ist auf die Spezifika des Schiffbaus in diesen Kapiteln zurückzuführen, während allgemeine Bestimmungen, wie zum Beispiel zur Sicherung der Qualität, über bestehende Normen referenziert werden können.



Abbildung 19: Grundstruktur der Richtlinie

Nachfolgend sollen anhand von Überschriften und kurzen Erläuterungen die wesentlichen Elemente einer Struktur zur Richtlinie dargestellt werden. Im Weiteren wird auf spezielle Kapitel näher eingegangen und potenzielle inhaltliche Punkte vorgeschlagen.

Struktur zur Richtlinie „Kleben im Schiffbau“

<u>Überschrift</u>	<u>Erläuterungen / Bemerkungen</u>
A Allgemeines	Eine grundlegende Definition zum Zweck, Inhalt und Geltungsbereich der Richtlinie. Es werden Referenzen zu anderen Normen und Richtlinien aufgezeigt. Weiter werden grundlegende Definitionen und Annahmen getroffen.
B Zulassungen	Definitionen welche grundlegenden Anforderungen für eine Zulassung zum Kleben auf Ebene von z.B. Werften, Betrieben, etc. beinhaltet. Weiter werden Anforderungen an Personal und Prozesse definiert und beschrieben.
C Qualitätskontrolle	Art und Umfang von Qualitätssicherungsmaßnahmen. Ggf. Referenzen zu bestehenden Normen und Standards. Mindeststandards für Werkstoffe und Prozesse, wie auch deren Überwachung.
D Ausführung von Klebungen	Bestimmungen zur Durchführung von Klebungen (z.B. nur durch Fachpersonal). Definitionen und Bestimmungen zur Aufsichtsführung beim Kleben wie auch laufenden Kontrollen im Betrieb etc. Beachtung von Einflüssen, wie Oberflächengüte, Reihenfolge, etc.
E Prüfungen von Klebungen	Umsetzung von Prüfungen durch z.B. Fachpersonal, Besichtiger, etc. Prüfung von Prozessunterlagen, Parameters, zFP, etc.
F Werkstoffe und Hilfsstoffe	Definition von Werkstoffen, Hilfsstoffen und Eigenschaften. Ggf. mögliche Kombinationen und Mindestanforderungen.

G Klebverfahren und Verfahrensprüfung	Allgemeine Definitionen zu Klebprozessen: Eignung, Durchführung, etc. Umfang, Art und Durchführungsbestimmungen von Prüfungen (ggf. Referenz zu anderen Normen und Richtlinien)
H Konstruktive Gestaltung, Bemessung	Wichtige konstruktive Hinweise und Beispiele zur Gestaltung von Klebungen. Definition und Berücksichtigung von Umwelteinflüssen. Definition von Sicherheitsklassen.

Ziel soll es sein, eine Basis für den Prozess des Klebens auf den Werften zu schaffen. Hierfür wird eine hierarchische Struktur zur Qualitätssicherung und Zulassung empfohlen. Diese Vorgehensweise ist den Werften beispielsweise durch das Fügeverfahren Schweißen und seiner Zulassung bekannt.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Festlegung von entsprechenden Definitionen zu Werkstoffen, Klebstoffen, etc. Darunter fallen Güte von Oberflächen, Eigenschaften und zu erreichende Werte nebst den Prüfmethode für diese. Diese sind auch für die Verklebungen zu bestimmen, wie auch die Art und Umfang von Prüfungen. Einer der Hauptelemente der Richtlinie wird die Bestimmung zu Grundlagen in der Bemessung und konstruktiven Gestaltung für Klebungen im schiffbaulichen Umfeld sein. In diesem Punkt sollte eine enge Abstimmung bei der Erarbeitung mit den Klassifikationsgesellschaften angestrebt werden.

5.1.1.1 Empfehlung zu wesentlichen Inhalten der Richtlinie

Die Studie empfiehlt auf Basis der geführten Interviews, anderer Richtlinien und Normen, wie auch den Arbeiten aus dem Arbeitskreis „Kleben im Schiffbau“ einige inhaltliche Aspekte für die oben genannten Kapitel.

A Allgemeines

Verweise auf Normen und Richtlinien: Die Technologie Kleben ist in Teilen bereits in Normen und Richtlinien erschlossen. Diese umfassen unter anderem allgemeine Qualitätsanforderungen, aber auch die Ausbildung von Fachpersonal, etc. Folgende Normen sind als relevant identifiziert:

- DIN EN ISO 9000 Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe
- DIN EN ISO 9001 Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen
- DIN 8593 Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- DIN EN 923 Klebstoffe - Benennungen und Definitionen
- DIN 2304-1 Klebtechnik - Qualitätsanforderungen an Klebprozesse – Teil 1: Prozesskette Kleben
- DIN 6701-1 Ausgabe 2004-11-00 Kleben von Schienenfahrzeugen und –fahrzeugteilen- Teil 1: Grundbegriffe, Grundregeln
- DIN 6701-2 Kleben von Schienenfahrzeugen und –fahrzeugteilen- Teil 2: Qualifikation der Anwenderbetriebe
- Richtlinie DVS-EWF 3301 Europäische Klebfachkraft - Ausbildung, Prüfung und Qualifizierung
- Richtlinie DVS-EWF 3305 Klebpraktiker
- Richtlinie DVS-EWF 3309 DVS-EWF®-Lehrgang - European Adhesive Engineer (EAE), (Klebfachingenieur/in)
- Richtlinie DVS 3310 Qualitätsanforderungen in der Klebtechnik
- Richtlinie DVS 3311 Klebaufsicht; Aufgaben und Verantwortlichkeit

Allgemeine Definitionen: Begriffe, welche in der Richtlinie verwendet werden, sollten definiert sein. Dazu gehört auch eine Definition von „Kleben“. Eine solche Definition kann wie folgt lauten „Kleben im Sinne dieser Richtlinie ist das Verbinden von Fügeteilen zur Herstellung eines Klebverbundes mit einer Funktion der Übertragung von mechanischen Lasten.“ Für die Definition von Klebstoff kann die

Definition wie folgt lauten „Ein Klebstoff ist ein nicht-metallischer Werkstoff, der Füge­teile durch Adhäsion (Oberflächenhaftung) und Kohäsion (innere Festigkeit) miteinander verbindet.“ [Anlehnung an TL A-0023 und DIN EN 923].

Geltungsbereich: Zu den allgemeinen Definitionen sollte auch der Umfang, also das Spektrum der Anwendung von Kleben nach dieser Richtlinie definiert sein. Dies kann sich für den Schiffbau z.B. wie folgt definieren lassen: „Diese Richtlinie gilt für alle Klebarbeiten am Schiffskörper einschließlich der Aufbauten und Deckhäuser, seinen An- und Einbauten sowie an schiffbaulichen Ausrüstungsteilen.“ [In Anlehnung an GL II Teil 3]. Auch sollten hier klare Referenzen zu anderen Normen gemacht werden: „Im Sinne dieser Richtlinie gilt das Verfahren Kleben als spezieller Prozess gemäß DIN EN ISO 9001. Dabei können die Qualitätsanforderungen der Produkte durch nachträgliche Prüfungen zerstörungsfrei nicht eindeutig einhundertprozentig nachgewiesen werden. Für diese Richtlinie gilt die DIN 2304 als Grundlage und spezifiziert die DIN 2304 für schiffbauliche Produkte. Die Konformität von Produkten, die unter Verwendung von Klebstoffen hergestellt werden, wird durch die Zertifizierung von Betrieben zur akkreditierten Stelle auf Basis dieser Richtlinie nachgewiesen.“ [Anlehnung an TL A-0023].

Anwendungsbereich: Kleben kann als Fügeverfahren im Neubau aber auch in der Reparatur oder des Umbaus eingesetzt werden. Es sollte also definiert werden, in welchen Anwendungsszenarien die Richtlinien gelten. Ein Beispiel könnte sein: „Diese Richtlinie gilt für das Kleben von Füge­teilen bei der Herstellung und Reparatur, sowie Umbaumaßnahmen von Produkten.“ Weiter kann der Inhalt spezifiziert und gegebenenfalls wesentliche Punkte ausgeschlossen werden (siehe DIN 6701-4). Letztere könnten zum Beispiel sein:

- Herstellung von Faserverbundwerkstoffen
- Verwendung von Schraubensicherungen
- Das Dichten von Füge­teilen ohne Kraftübertragung
- ...

B Zulassungen

Anforderungen für eine Zulassung zum Kleben auf Werften, Betrieben, etc.: Es gilt zu definieren, ob Werften und Betriebe zur Ausführung von Kleben als Füge­technik gemäß Richtlinie eine Zulassung benötigen. Art und Umfang der Zulassung, wie auch der Geltungsbereich für alle oder nur spezifische Bauteile (z.B. gemäß Sicherheitsklasse), ist darzulegen. Solch eine Zulassung sollte von anerkannten Stellen (z.B. Klassifikationsgesellschaften) ausgestellt werden. Der Prozess einer solchen Zulassung kann sich an der DIN 6701-2 beispielsweise orientieren. Darin enthalten ist unter anderem die Forderung, dass der „Anwenderbetrieb über ausreichend Personal, mit entsprechender Qualifikation, für Planung, Ausführung, Aufsicht und Prüfung verfügen muss.“ Auch sind entsprechende Qualifikationen nach EWF-Richtlinie 517 oder nach DVS-EWF 3309 und weitere definiert. Solch eine Zulassung kann sich auch an der Betriebszulassung für das Schweißen im Schiffbau orientieren, welche durch die Klassifikationsgesellschaften definiert ist.

C Qualitätskontrolle

Art und Umfang von Qualitätssicherungsmaßnahmen: Grundsätzlich sollte der Anwender (Werft, Betrieb, etc.) ein zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem nachweislich umgesetzt haben (z.B. nach DIN EN ISO 9001). Gerade in Hinblick auf den notwendigen Anspruch der Sorgfalt bei der Planung und Durchführung von Klebungen gilt es wesentliche spezifische Anforderungen in dieser Richtlinie nochmals zu definieren. Hier sollte insbesondere auch eine Abstimmung mit den Klassifikationsgesellschaften stattfinden. Ein Beispiel können entsprechende personelle Maßnahmen für die Durchführung und Aufsichtsführung sein, wie auch deren Dokumentation. Dieser Punkt sollte die generelle Struktur der Qualitätskontrolle, also die Einbettung in die betriebliche Struktur, darstellen.

D Ausführung von Klebungen

Bestimmungen zur Durchführung von Klebungen: In diesem Teil sollte spezifischer die Durchführung von Klebungen in Hinblick auf die Einhaltung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung definiert werden. Hierzu können Aspekte wie die Durchführung von Klebungen nur durch Klebfachpersonal, usw. zählen. Auch sollte die Aufsichtsführung, beziehungsweise die Verantwortlichkeiten im Betrieb definiert werden. Für beide Personengruppen können entsprechend der zu klebenden Bauteile weitere Anforderungen, z.B. an die Ausbildung, definiert werden. Es können auch Aspekte wie erforderliche Infrastruktur und Ausstattung genannt werden. Hier können auch Grundlagen aus der TL A-0023 und der DIN 6701-2 herangezogen werden. Ebenfalls können an dieser Stelle auch grundsätzliche Regeln zur Ausführung festgelegt werden. Eine Anlehnung sollte an die DIN 6701-4 erfolgen, die diesbezüglich bereits sehr explizit ist.

E Prüfungen von Klebungen

Umsetzung von Prüfungen: Die Qualifikation und Anforderungen für die Prüfung sollte für externe und interne Prozesse definiert werden. Beispielsweise können Personengruppen mit entsprechend definierten Anforderungsprofil bestimmten Prüfaufgaben zugewiesen werden. Es sollten Strukturen und Prozesse für die Erstellung von Prüfplänen erstellt werden. Diese dienen dann der kontinuierlichen Überwachung. Daneben sollten Prozesse erarbeitet werden, wie Klebungen externen Besichtigern zur Prüfung vorgelegt werden können. Sofern möglich, sollte diskutiert werden, inwiefern zerstörungsfreie Prüfmethoden eingesetzt werden können. Auch wenn solche Prüfmethoden zurzeit teilweise noch nicht an Bord einsetzbar sind, so könnte dies sich zukünftig ändern. Die Richtlinie sollte hierauf eingehen. Auch kann der Ablauf und die Notwendigkeit von Arbeitsprüfungen definiert werden. Gerade bei einer Fügetechnologie, deren Qualität größtenteils von der Güte des Herstellungsprozesses abhängt, können solche Arbeitsproben der Qualitätssicherung dienen.

Prüfung von Prozessunterlagen: Dazu gehören unter anderem Fertigungsunterlagen mit Arbeitsanweisungen. Auch sind Verantwortlichkeiten der Aufsichtspersonen klar darzulegen. Diese können die Vertragsüberprüfung, Konstruktionsüberprüfung, Nachweisführung, bis hin zur Prüfung der Klebverbindung und deren spezifischer Dokumentation sein (siehe beispielsweise DIN 6701-2, DIN 2304).

F Werkstoffe und Hilfsstoffe

Definition von Werkstoffen: In diesem Abschnitt sollten Eigenschaften und Prüfmethoden für Fügeteile und Klebstoffe definiert werden. In Abgrenzung zum Schweißen, wo die Schweißbeignung der Grundwerkstoffe nachgewiesen werden muss, ist einer der wesentlichen Parameter der Grundwerkstoffe die Oberflächenbeschaffenheit. Für die im Schiffbau am häufigsten verwendeten Materialien, wie zum Beispiel Schiffbaustahl (normalfest, höherfest), Edelstahl und Aluminium aber auch Kunststoffe wie faserverstärkte Kunststoffe (auf Basis von Epoxidharz, etc.), sollten klare Anforderungen an die Oberflächengüte und Vorbehandlungsprozesse im Bereich der Fügestellen getroffen werden. Ein Maß hierfür könnte die Oberflächenenergie sein. Bei der Verwendung von Primern oder Beschichtungssystemen sollten auch hier klare Eigenschaften definiert werden. Es kann auch sinnvoll sein, zunächst ausschließlich entschichtete Oberflächen zu fordern. Für Primer oder beschichtete Oberflächen können weitere Nachweise gefordert werden. Auch können Materialkombinationen (Grundwerkstoff und Primer) auf Basis von Versuchen vordefiniert werden. Eine solche Vorauswahl sollte als Prozess in die Richtlinie aufgenommen, die eigentliche Tabelle aber als „lebendes Dokument“ mit kontinuierlicher Erweiterung als Anhang beigefügt werden.

Bei Klebstoffen sollten ebenfalls Eigenschaften und Prüfmethoden definiert werden. Dies sollte spezifisch erfolgen, also mit einem in der Richtlinie festgelegten Verfahren und gegebenenfalls auch zu erreichenden Mindestwerten, sofern dies möglich ist. Eigenschaften und deren Prüfmethoden finden sich beispielsweise in der DIN 6701 Teil 3 Tabelle C.1 „Kriterien zur Auswahl des Klebsystems“.

G Klebverfahren und Verfahrensprüfung

Definitionen zu Klebprozessen: Klebprozesse sind durch ihre hohe Parametervielfalt sehr viel schwieriger einheitlich zu definieren als beispielsweise Schweißverfahren. Was im Anwendungspotenzial zum Vorteil gereicht, ist allerdings in der Umsetzung häufig ein Nachteil. Daher sollte für die Richtlinie diskutiert werden, ob für den Schiffbau zunächst „gebrauchsübliche Klebprozesse“ erstellt werden können. Diese würden alle notwendigen Parameter der Ausführung klar definieren. Ein Beispiel sei die Oberflächenbehandlung: während es in der DIN 2304 heißt „Die Oberflächenbehandlung muss mit ihren Einzelschritten, den Bestandteilen, dem Verwendungsort und der Abfolge spezifiziert und festgeschrieben sein.“ ist in der DIN 6701-4 bei Oberflächenbehandlung definiert, wie der Prozess mit seinen Hilfsstoffen darzustellen ist. Es ist daher zu empfehlen eine konkrete Basis zu schaffen. Diese kann gebräuchliche Materialkombinationen, Bauteilkategorien und Umgebungsvariablen für definierte Klebstoffe enthalten. Es ist weiter zu empfehlen, zunächst die Anzahl der möglichen Parameter so klein wie möglich zu halten. Da die Oberflächenbeschaffenheit der Fügepartner z.B. durch Primer oder andere Beschichtungen stark variieren kann, sollte begonnen werden eine Basis für entschichtete metallische Fügepartner zu schaffen. Hier kann die erforderliche Oberflächenbeschaffenheit sehr viel einfacher definiert werden. Für die Schaffung einer solchen Basis bei Klebprozessen muss auch hier zunächst eine Struktur geschaffen werden. Diese beinhaltet Art und Umfang von Prüfungen inklusive deren Durchführungsbestimmungen. Diese Struktur kann dann genutzt werden, um weitere Kombinationen von Parametern und Klebstoffen hinzuzufügen.

H Konstruktive Gestaltung, Bemessung

Konstruktive Gestaltung und Bemessung von Klebeverbindungen: Dieser Abschnitt der Richtlinie ist sicherlich einer der komplexesten Bereiche und beinhaltet mehrere wesentliche Aspekte, von rechnerischen und analytischen Ansätzen zur Bemessung, konkreten konstruktiven Details bis hin zur Definition von Bauteil / Sicherheitsklassen. Dieser Abschnitt der Richtlinie sollte sich an der DIN 6701-3 orientieren und diese weiter spezifizieren. Es ist für die Richtlinie zu diskutieren, welchen Ansatz man für diesen Abschnitt wählt. Ein Beispiel könnten Bemessungsmethoden für definierte Konstruktionen sein mit den in Abschnitt G definierten Prozessen. Dies käme einen „Bemessungskatalog“ nahe. Gleichzeitig sollten aber auch allgemeine Prozesse definiert werden oder über eine DIN-Norm übernommen werden, um auch zukünftige Anwendungen, Methoden, etc. in den Umfang der Richtlinie einfließen zu lassen.

5.1.2 Vorgehen zur Erarbeitung der Richtlinie

Um der Zielsetzung der Richtlinie gerecht zu werden, müssen Struktur und Inhalte Konsens und Verbindlichkeit finden in der Schiffbaubranche. Bisher wurden verschiedene Ansätze verfolgt, welche das Ziel hatten, die Entwicklung einer Richtlinie über eine Klassifikationsgesellschaft anzustreben. Dies erwies sich als nicht durchführbar. Daher wird für die Erarbeitung der Richtlinie „Kleben im Schiffbau“ eine Struktur vorgeschlagen, wie sie bei der Richtlinie „Fertigungsstandard des Deutschen Schiffbaus“ verwendet wurde.

5.1.2.1 Fachgruppe zur Erarbeitung der Richtlinie

Zur Erarbeitung soll daher eine Gruppe oder ein Ausschuss gebildet werden unter der Koordinierung einer neutralen Institution, wie dem Verband für Schiffbau und Meerestechnik e.V. (VSM) oder dem Deutschen Maritimen Zentrum e.V. (DMZ). Aufgabe dieser Institution ist die Administration von Treffen, Arbeiten, Dokumentationen und Abstimmungen. Weiter müssen Regeln zur Konsensbildung definiert werden. Die Gruppe, welche die inhaltlichen Arbeiten übernimmt und untereinander abstimmt, könnte folgende Mitgliederstruktur enthalten:

Aus der Industrie:

- Werften mit Produkten für seegehende Schiffe und Strukturen
- Zulieferer im Bereich Verglasung und Beschichtung
- Zulieferer/Dienstleister, welche Kleben in ihren Produkten oder Dienstleistungen anbieten

- Zulieferer im Innenausbau und der Ausrüstung
- Zulieferer von Faserverbundbauteilen für die Produkte der Werften
- Reedereien von Produkten der Werften
- Hersteller von Kleb-/Dichtstoffen

Institutionen:

- Klassifikationsgesellschaften
- Akkreditierte Zertifizierungsstellen für Klebprozesse (z.B. TC Kleben, SKZ, Fraunhofer Institute etc.)
- Gesellschaft für Maritime Technik e.V. (GMT), Center of Maritime Technologies gGmbH(CMT), VSM, DMZ soweit nicht koordinierend tätig

Forschungseinrichtungen:

- Hochschulen, Fachhochschulen mit Lehr- und Forschungstätigkeit im Bereich Schiffbau, Offshore, etc.
- Fraunhofer IFAM und Fraunhofer IGP
- Außeruniversitäre Forschungseinrichtungen mit Bezug zum klebtechnischen Fügen im Fahrzeugbau und / oder von Großstrukturen
- Bundesanstalt für Materialforschung (BAM), Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB)

Die Zusammensetzung der Gruppe entspricht der Wertschöpfungskette im Bereich Schiffbau. Kern der Gruppe sollen die Werften sein, welche selbst Klebungen durchführen oder dies als Fremdleistungen vergeben. Grund hierfür ist die spätere Anwendung der Richtlinie. Ähnlich der Handhabung beim Fertigungsstandard können die Werften die Kleberichtlinie bereits in die Bauverträge integrieren. Dies sollte bei der Erstellung der Modalitäten für die Abstimmung bzw. Konsensbildung zu Inhalten berücksichtigt werden. Zulieferer, Klebstoffhersteller, Klassifikationsgesellschaften und Forschungseinrichtungen erweitern die Gruppe, so dass die notwendige Expertise wie auch der industrielle Kreis für die spätere Umsetzung vorhanden ist.

5.1.2.2 Ablauf zur Erstellung der Richtlinie

Diese Studie empfiehlt dem Auftraggeber DMZ, die notwendigen Schritte zur Gründung einer Gruppe „Richtlinie Kleben im Schiffbau“ einzuleiten. Dazu sollte zunächst der VSM einbezogen werden, um gemeinsam eine Gründungsveranstaltung zu organisieren. Hierfür sehen wir aufgrund der Mitgliederstruktur des VSM und dessen Netzwerk diesen als geeigneten Partner für diesen Schritt.

DMZ und VSM sollten gemeinsam einen administrativen Rahmen entwickeln, in dem die Gruppe später agiert. Dazu zählen Aufgaben, Abstimmungsmodi, Konsensbildung und Verbindlichkeit der Richtlinie.

Ziel der Gründungsveranstaltung sollte sein, die oben genannte Struktur von Beteiligten namentlich für eine Mitarbeit in der Gruppe zu identifizieren. Weiter sollten die Beteiligten und Branchenangehörige der Gruppe den klaren Branchenauftrag zur Erstellung der Richtlinie erteilen.

Es sollte sichergestellt werden, dass die Gruppe zur Erstellung der Richtlinie, bisherige Arbeits- und Fachgruppen wie „Kleben im Schiffbau“ berücksichtigt.

Nachfolgend sind die wesentlichen Punkte zur Etablierung der Gruppe und dem Arbeitsbeginn aufgezeigt:

- Gründung und Benennung der Mitglieder
- Abstimmung der administrativen Regeln und Grundsätze und inhaltlichen Zielen der Richtlinie
- Zustimmung zu den obigen Punkten durch die Mitglieder
- Abstimmung der Struktur der Richtlinie und wesentlichen Inhalte der Hauptkapitel
- Priorisierung der Inhalte / Reihenfolge der Erarbeitung
- Terminierung der Inhaltsbearbeitung und Abstimmung

Ein wesentlicher Faktor ist die kontinuierliche Arbeit der Gruppe. Daher sollte mindestens alle sechs Monate Gruppentreffen stattfinden. Innerhalb dieser Zeiträume können inhaltliche Arbeiten und im Vorfeld Abstimmungen zu Details vorgenommen werden. Auf den Treffen sollten diese dann konsolidiert und beschlossen werden. Bereits bei der Priorisierung der Inhalte sollten parallel Forschungsthemen erarbeitet werden, die ggf. noch zur Schließung von Wissenslücken erforderlich sind. Es hat sich gezeigt, dass die Definition von Forschungsbedarfen anhand solcher Leitvorgaben sehr zielgerichtet zu notwendigen Erkenntnisgewinnen für die Technologie Kleben führen. Um diese abzuarbeiten können etablierte Modelle wie die industrielle Gemeinschaftsforschung oder bei komplexeren Vorhaben das Maritime Forschungsprogramm des BMWi genutzt werden. Die Forschungseinrichtungen sollten hierbei eng kooperieren.

Die bisherigen Arbeiten z.B. in der Gruppe „Kleben im Schiffbau“ zeigen, dass es oftmals für eine effektive Zuarbeit seitens der Industriepartner eine Vorarbeit oder Moderation einer dritten Stelle braucht. Ähnlich wird dies bei der Erarbeitung von Inhalten in der Richtlinie gesehen. Es soll an dieser Stelle deutlich herausgestellt werden, dass ohne externe finanzielle Mittel oder Leistungen von Beteiligten innerhalb der Gruppe eine zeitnahe Erstellung der Richtlinie als unwahrscheinlich angesehen wird. Daher sollte angedacht werden, personelle Ressourcen zur Erarbeitung der Richtlinie begleitend zur Verfügung zu stellen. Zur Erarbeitung weiterer notwendiger Inhalte sollten geeignete Finanzierungsmöglichkeiten genutzt werden, beispielsweise maritime Forschungsprogramme. Beide Aspekte sollte bereits mit der Gründung der Gruppe von der administrierenden Institution geklärt sein.

5.1.2.3 Anmerkungen

Ein wesentlicher Aspekt sollte die enge Abstimmung mit referenzierten Normen und Richtlinien sein, da diese einer turnusmäßigen Novellierung unterliegen. Daher muss sichergestellt werden, dass es bei Änderungen in solchen Normen und Richtlinien nicht zu Schwierigkeiten in deren Ausführung im Bereich Schiffbau kommt. Hierfür sollte eine übergeordnete Institution wie das DMZ eine kontinuierliche Überwachung oder bestenfalls Mitarbeit an relevanten Normen und Richtlinien sicherstellen.

5.2. Forschungsbedarfe

Grundsätzlich hat die Fügetechnologie Kleben in Bezug auf viele Aspekte – z.B. Verständnis des Materialverhaltens, Prüfmethode, Prozessanforderungen – bereits einen gut erforschten Stand. So schätzen die befragten Anwender die regulatorischen Hindernisse deutlich kritischer ein als eventuelle Lücken im Stand der Technik. Um den Einsatz der Technologie ebenso wie die Entwicklung Richtlinie weiter voranzubringen, können dennoch einige Forschungsbedarfe identifiziert werden.

Branchenübergreifend bestehen Begrenzungen in den Möglichkeiten zur zerstörungsfreien Prüfung. Da eine einhundertprozentige Prozesskontrolle entweder nicht oder nur zu hohen Kosten umsetzbar ist, ist weitere Forschung zu **Inspektionsmethoden** jedoch empfehlenswert. Hierbei ist insbesondere eine Berücksichtigung von schiffbauspezifischen Besonderheiten sinnvoll.

Beim Thema **Alterung** ist nach aktuellem Stand der Forschung noch unklar, ob bestehende beschleunigte Prüfverfahren reale Bedingungen realistisch wiedergeben. Hier ist es empfehlenswert, die Datenbasis für Klebverbindungen in Langzeitversuchen mit unterschiedlichen Umwelteinflüssen und deren Kombinationen zu vergrößern, um die Vorhersagen von beschleunigten Prüfverfahren zu validieren oder zu korrigieren. Hier ist zu beachten, dass Klebstoffe fortlaufend weiterentwickelt werden und somit solche Langzeitversuche nur mit Materialien sinnvoll sind, die in ihrer Grundcharakteristik nach derzeitiger Einschätzung lange auf dem Markt Bestand haben. In diesem Kontext ist auch die Untersuchung von Unterwasserkleben sinnvoll. Hier ist einerseits die Ausführung des Klebprozesses unter Wasser, andererseits die Erforschung von Alterungsprozessen von dauerhaft

untergetauchten Verbindungen von Interesse. Diese kommen zunehmend in Offshore-Strukturen, aber auch im Schiffbau zum Einsatz.

Grundsätzlich wäre es zudem hilfreich, eine umfangreiche **Materialdatenbank** aufzubauen und gezielt eine große Datenbasis herzustellen und zur Verfügung zu stellen. Ein Wunsch vieler Anwender ist es zudem, einen möglichst vielseitig einsetzbaren Universalklebstoff für schiffbauliche Anwendungen zur Verfügung zu haben. Dies ist eher eine Entwicklungsaufgabe für Hersteller. In Bezug auf die Anwendung von Kleben als Enabler-Technologie für den Einsatz von Leichtbau ist speziell die weitere Erforschung von **hybriden Klebverbindungen** (z.B. Stahl-Faserverbundwerkstoffe) empfehlenswert.

Das Beispiel Halterkleben hat gezeigt, dass es erfolgsversprechend ist, eine typische schiffbauliche Anwendung zunächst in Forschungsprojekten ausführlich zu untersuchen und anschließend in die Praxis zu transferieren. Dies kann dem Einsatz der Klebtechnologie verstärkt den Weg ebnen, ohne dass Werften selbst alleine die ganze Entwicklungsarbeit mit vollem Risiko tragen müssen. Daher ist allgemein die Empfehlung, weitere **Standardanwendungen** in Forschungsprojekten zu untersuchen. Da bereits manche Forschungsergebnisse vorliegen, bei denen der **Transfer in die Praxis** nicht so vorbildhaft erfolgt ist, ist hier eine gezielte Förderung des Transfers in die Praxis empfehlenswert.

Auch zur Entwicklung der Richtlinie und der **Berechnung von Klebverbindungen** – insbesondere der **Lebensdauerberechnung** – ist die weitere Erforschung von Standardanwendungen empfehlenswert. Da bei der Auslegung teilweise die realen Lasten im Betrieb, die lokale auf eine Klebverbindung wirken, nur mit einer Ungenauigkeit bekannt sind, ist zudem die weitere **Ermittlung von realen Lasten** bzw. Methoden zur Erfassung von Betriebs- und Strukturparametern sinnvoll. Für die **Zustandsüberwachung einer Klebverbindung im Betrieb** gibt es bereits erste Ansätze, die jedoch noch nicht ausgereift sind.

Das Thema **Brandschutz** wird von Herstellern und Anwendern meistens als nicht kritisch bewertet, da die typischen Klebverbindungen im Brandfall selten das schwächste Glied in einer Kette im entsprechenden Bereich des Schiffes darstellen. Dennoch ist die weitere Erforschung durch Prüfungen und zu einer einheitlichen Risikobewertung von Klebverbindungen in Bezug auf Brandschutz noch ein Forschungsbedarf.

Nicht zuletzt gewinnt das Thema **Nachhaltigkeit** immer mehr an Bedeutung. Hier ist eine weitere Erforschung von Ansätzen zur Bewertung des Carbon Footprints einer Klebverbindung ebenso sinnvoll wie die Weiterentwicklung von biobasierten Materialien. Auch Ansätze zum **Recycling** wie beispielsweise abschaltbare Klebverbindungen sollten weiter erforscht werden.

Bei der in 5.1 empfohlenen Vorgehensweise zur Erarbeitung einer Richtlinie ist zu erwarten, dass sich bei der detaillierten Ausarbeitung einer Schiffbau-Richtlinie in einem Ausschuss zu einigen inhaltlichen Punkte noch zusätzliche Forschungsbedarfe ergeben.

6. Fazit

Während Kleben im Boots- und Yachtbau bereits für viele Anwendungen eine etablierte Füge-technologie darstellt, ist der Einsatz im Schiffbau noch ausbaufähig. Der verstärkte Einsatz der Technologie bietet großes Potenzial, vor allem durch die Fähigkeit, unterschiedlichste Werkstoffe zu verbinden, und somit den Einsatz von Leichtbaukomponenten zu ermöglichen. Auch der Einsatz als alternative Fügemethode, die gegenüber anderen Füge-techniken als „kalte“ Methode insbesondere in späteren Phasen der Produktion, aber auch durch weitere positive Auswirkungen, wie eine Reduktion der Übertragung von Schwingungen, Vorteile mit sich bringt.

Das Interesse der befragten Werften an einem verstärkten Einsatz von Kleben ist groß. Wo bereits technisches Knowhow vorhanden ist, werden Prozesse als gut beherrschbar und die Technologie in den wesentlichen Punkten als gut erforscht eingeschätzt. Dennoch kann der Einsatz der Technologie im Schiffbau durch weitere Forschung auf einigen Gebieten zusätzlich vorangetrieben werden. Insbesondere das Verständnis der Alterungsvorgänge im maritimen Umfeld, der Einsatz und die Weiterentwicklung von zerstörungsfreien Prüfmetho- den, aber auch die Lebensdauerberechnung und Validierung von Betriebslasten sollten weiter untersucht werden. Die Erforschung von schiffbaulichen Standardanwendungen mit anschließenden Transfermaßnahmen in die Praxis ist ebenso empfehlenswert. Nicht zuletzt sollte das Thema Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz auch bei der Anwendung der Klebete-chnologie weiter untersucht und angewendet werden.

Das größte Hindernis zum Anwenden der Füge-technologie Kleben stellt nach Einschätzung der befragten Werften die aktuelle Richtliniensituation dar. Existierende Regelwerke adressieren nur einzelne Anwendungskategorien und bei der Zulassung erfolgt oft eine Einzelfallbewertung. Diese beinhaltet ein hohes Risiko für Anwender und macht die Technologie unattraktiver. Um das Potenzial der Technologie im Schiffbau auszuschöpfen, ist es daher empfehlenswert, mit einer Richtlinie für das Kleben einen einheitlichen, verbindlichen Branchenstandard zu schaffen. Dieser muss nicht von Grund auf erarbeitet werden – es kann sowohl auf bestehende Normen als mitgeltende Dokumente wie auch auf Vorarbeiten in Forschungsprojekten und dem Arbeitskreis Kleben im Schiffbau zurückgegriffen werden.

Mittelfristig ist eine internationale Standardisierung erstrebenswert, für die ein nationaler Standard als Grundlage verwendet werden kann. Dass die Erarbeitung eines Branchenstandards als erster Schritt ein sinnvolles Vorgehen sein kann, haben andere Beispiele gezeigt. Daher wird die Erarbeitung eines Branchenstandards, insbesondere im Kreis der Werften sowie mit Unterstützung von Zulieferern, Klebstoff-Herstellern, Forschungseinrichtungen und Klassifikationsgesellschaften als zielführend angesehen. Diese Studie bietet eine Grundlage, die Vorschläge für die Struktur und Inhalte einer solchen Richtlinie sowie für das Vorgehen, um die Richtlinie in einem realistischen Zeitrahmen zu erarbeiten und Hindernisse für die internationale Anerkennung und Anwendung zu identifizieren. Darauf kann aufgebaut werden, um das Ziel einer praxisnahen, anwenderfreundlichen Richtlinie zum verstärkten Einsatz der Füge-technologie Kleben zu erreichen. Das Aufgreifen und Umsetzen dieser Vorschläge liegt nun in der Hand der Schiffbaubranche und -verbände.

Anhang

A. Fachgruppe

Die Fachgruppe, welche die Erstellung der Studie durch ihre Fachkenntnisse beratend unterstützt hat, setzt sich aus folgenden Teilnehmern zusammen:

Unternehmen	Segment(e)
3M Deutschland GmbH	Zulieferer
ar engineers GmbH	Zulieferer / Schiffbau / Bootsbau
BaltiCo GmbH	Zulieferer
Bureau Veritas Marine & Offshore	Klassifikationsgesellschaft
CCNR	Behörde
Damen Schelde Naval Shipbuilding BV	Schiffbau
Eikboom	Zulieferer
EMS Precab GmbH	Zulieferer
Fraunhofer IFAM	Forschungseinrichtung
Fraunhofer IGP	Forschungseinrichtung
Gurit	Zulieferer
Henkel	Zulieferer
Knierim Yachtbau	Bootsbau
Lürssen Werft	Schiffbau
Max Schön	Zulieferer
MEYER WERFT GmbH & Co. KG	Schiffbau
Muehlhan AG	Zulieferer
MV WERFTEN Rostock	Schiffbau
Nobiskrug GmbH	Schiffbau
SIKA Deutschland GmbH	Zulieferer
Tilse	Zulieferer
Verbindungs-Techniken-Rüther	Zulieferer
WP-Service GmbH	Zulieferer
Yachtwerft Meyer	Bootsbau

B. Fragebogen

Fragebogen zur Studie:

„Untersuchungen zum aktuellen internationalen Stand der Technik bezüglich Entwicklungen und Anwendung von Klebeverbindungen in der Schiffsfertigung“

Kontaktdaten des Interviewpartners:

Name	
Unternehmen Umsatz/Mitarbeiter	
Email	
Telefon	

Segment des Befragten:

- Schiffbau
- Binnenschiffbau
- Bootsbau
- Zulieferer (Produktbezogen)
- Design/Berechnungsbüro/Service/Beratung
- Klassifikationsgesellschaften
- Forschungseinrichtung

HINWEISE:

Informationen werden segmentweise ausgewertet und in der Studie dargestellt. Die Angabe von spezifischen Informationen (z.B. Praxisbeispiele) mit Angabe des Unternehmens werden nur nach Absprache in der Studie veröffentlicht.

Zur besseren Auswertung möchten wir Ton-Aufnahmen von einigen Gesprächen durchführen. Die Aufnahmen werden nur für die digitale Erfassung der Daten genutzt und anschließend gelöscht. Sollten Sie mit der Aufnahme nicht einverstanden sein, weisen Sie uns bitte zu Gesprächsbeginn darauf hin.

GENERELLE FRAGEN

1. Wie ist Ihr Unternehmen aufgestellt? Sind Sie ausschließlich im Schiffbau tätig oder bedienen Sie weitere Märkte?
2. Wenn wir über Kleben im Schiffbau sprechen, an welcher Stelle der Wertschöpfungskette verorten Sie Ihr Unternehmen?
3. Was sind typische Produkte und Dienstleistungen Ihres Unternehmens?
4. Was sind die Hauptprodukte und aus welchen Hauptkonstruktionsmaterialien setzen sich diese zusammen?
5. Gibt es hier bereits Kombinationen mit ungleichen Werkstoffen? (z.B. Boote mit Stahlrumpf + Alu-Aufbau, Stelling aus GFK mit Stahlstützen)

STAND DER TECHNIK

6. Wird Kleben als Technologie innerhalb Ihres Unternehmens verwendet?
 - Falls ja, welchen Stellenwert besitzt Kleben als Fügetechnologie innerhalb Ihrer Firma? (wird präferiert/ nur wenn es keine Alternative gibt etc.)
7. Besteht hierfür ein eigener Prozess? Oder wird die Klebetechnologie durch Dienstleistung Dritter oder in Zulieferteilen genutzt?
8. Für welche Materialien / Verbindungen / Einsatzzwecke wird Kleben bei Ihnen bereits eingesetzt?
9. Bitte beschreiben Sie die Art der Klebeausführung und welche Komponenten betroffen sind. (z.B. selbst hergestellte oder zugelieferte Teile, Verbindungen mit Zulieferteilen oder eigenen Teilen zueinander herstellen.... Bei mehreren Beispielen priorisieren / exemplarisch auswählen)
10. Welche Gründe waren bei diesen Anwendungsfällen für die Auswahl von Kleben als Fügetechnologie ausschlaggebend? Ist Kleben als Fügeverfahren rein technisch bedingt, oder wurden/werden im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsprüfung alte Verfahren in Frage gestellt?
11. Ist Kleben bei diesen Anwendungen ein Substitut für eine andere Fügetechnologie? Wie wurden die Bauteile vorher gefügt?
12. Welche Erfahrungen haben Sie mit diesen Anwendungen gemacht? (Kosten, Produktion, interne Akzeptanz...)
13. Schildern Sie bitte den Klebeprozess innerhalb Ihrer Firma von der Idee bis zur Zulassung und Durchführung.
14. Beschäftigen Sie innerhalb der Firma Fachpersonal oder kaufen Sie ggf. Fachexpertise als Dienstleistung ein?
15. Welche Langzeiterfahrungen besitzen Sie mit der Fügetechnologie Kleben als Prozess sowie mit Klebungen im Allgemeinen?
16. Gibt es innerhalb Ihrer Firma Anwendungen, bei denen Kleben als Fügetechnologie in Erwägung gezogen wurde, die Entscheidung aber letztendlich gegen Kleben ausfiel? Bitte erläutern Sie kurz, weshalb Kleben in diesem Falle nicht zum Einsatz kam. (Bsp.: Zulassung, Personal, Kunde, Kosten, Risiko, etc.)
17. Gibt es aktuell Bestrebungen innerhalb Ihrer Firma dem Kleben eine größere Rolle einzuräumen? Wenn ja, inwiefern?
18. Wie sehen Sie die zukünftige Entwicklung des Schiffbaus in Bezug auf Kleben als Technologie?
 - Welche Anwendungen könnten Sie sich zukünftig vorstellen?
 - Was müsste passieren, damit diese in der Praxis umgesetzt werden?
19. Wo sehen Sie das Potenzial insbesondere innerhalb Ihres Unternehmens?
20. Wo sehen Sie die größten Hindernisse innerhalb Ihres Unternehmens?
21. Welche Risiken bestehen aus Ihrer Sicht beim Einsatz von Klebverbindungen?
22. Was benötigen Sie, damit Kleben einen größeren Stellenwert innerhalb Ihres Unternehmens einnehmen kann bzw. Kleben generell in Ihrem Unternehmen etabliert werden kann?

PRAXISANWENDUNGEN

23. Welche fertigungstechnischen Herausforderungen bestehen beim Einsatz von Kleben in der Praxis? (z.B. Dauer und Zuverlässigkeit des Prozesses, Integration in die Fertigungskette, Qualitätskontrolle etc.)

24. Welche betriebstechnischen und sicherheitstechnischen Herausforderungen bestehen beim Einsatz von Kleben in der Praxis? (z.B. Lagerung, Entsorgung, Arbeitssicherheit, Schulungen / Fachpersonal etc.)
25. Können Sie die Kosten des Klebens innerhalb Ihres Unternehmens anhand eines Beispiels beziffern?
 - Wurden für die Kostenbetrachtung bestimmte Kalkulationsansätze oder Methoden verwendet?
 - Wurden vor- und nachgeschaltete Prozesse / Prozessänderungen berücksichtigt?
26. Das CMT plant die Aufstellung von Kalkulationsansätzen. Würden Sie für eine kurze Bewertung der Ansätze aus Sicht eines Anwenders bei Bedarf im Januar und Februar zur Verfügung stehen?
27. Worin liegt Ihrer Meinung nach das größte Einsparpotenzial beim Einsatz von Kleben im Vergleich mit anderen Fügetechnologien (z.B. Material-, Nacharbeits- oder Zeitaufwand, Erwartete Größenordnung, Begründung der Einschätzung)
28. Haben Sie sonstige Anmerkungen zu Fertigungs- und Kostenaspekten von Praxisanwendungen?

EMPFEHLUNGEN (RICHTLINIE)

Anwender:

29. Welche allgemeinen Erfahrungen haben Sie mit dem Thema Richtlinien zu Kleben im Schiffbau?
30. Haben Sie bereits für eine Anwendung eine Zulassung bei einer Klassifikationsgesellschaft beantragt?
 - Falls ja, war diese erfolgreich?
31. Bei welcher Klassifikationsgesellschaft wurde diese eingereicht?
32. Wie lange hat es gedauert die Zulassung zu erhalten?
33. Welche Hürden galt es zu überwinden?
34. Würden Sie basierend auf der Erfahrung weitere Zulassungen beantragen?
35. Hat die Erfahrung Entscheidungen für den Einsatz von Kleben in Folgeprojekten beeinflusst?
36. Welche Erwartungen haben Sie an eine zu entwickelnde Richtlinie? Welche Aspekte sind aus Ihrer Sicht besonders zu berücksichtigen?
37. Haben Sie weitere Anmerkungen zum Thema Richtlinie?

Klassen:

38. Welche Richtlinien zum Thema sind Ihnen bekannt?
39. Welche Richtlinien befinden sich derzeit in der Entwicklung?
40. Waren Sie in Zulassungsprozesse involviert?
 - Falls ja, welcher Prozentanteil war erfolgreich?
41. Worin bestehen bis heute die größten Herausforderungen im Zulassungsprozess?
42. Haben Sie weitere Anmerkungen zum Thema Richtlinie?

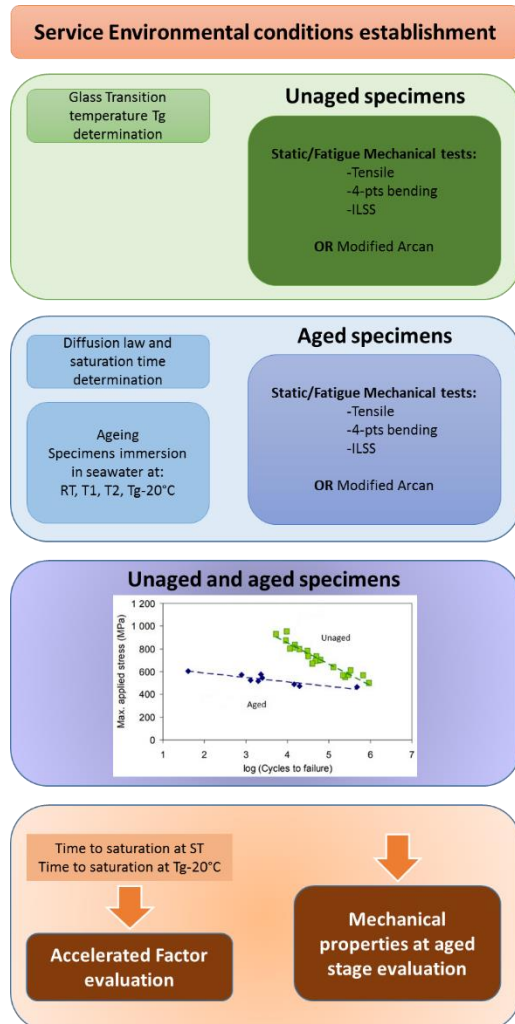
EMPFEHLUNGEN (FORSCHUNGSBEDARFE)

43. Sind Sie zurzeit in Forschungsprojekte im Bereich Kleben im Schiffbau involviert? Informieren Sie sich regelmäßig über aktuelle Forschungsprojekte?
44. In welchen Bereichen sind aus Ihrer Sicht weitere Forschungsarbeiten nötig, um den Einsatz von Klebtechnologien im Schiffbau zu stärken?
45. Haben Sie konkrete Empfehlungen zur Struktur einer zu entwickelnden Richtlinie für die praxisnahe Anwendung in der Fertigung?
46. Haben Sie die Absicht sich selbst an der Durchführung solcher Forschungsarbeiten zu beteiligen?
 - Falls nein, aus welchem Grund würden Sie dies nicht tun?
 - Falls ja, sehen Sie Hindernisse auf dem Weg, diese Forschungsarbeiten durchzuführen?
47. Haben Sie weitere Anmerkungen zum Thema?

Abschlussfrage: Stehen Sie für eine Diskussion der Zwischenergebnisse vor Beenden der Studie zur Verfügung?

C. Schema Testprozedur Meerwasser-Alterung

Quelle: (Davies, Accelerated Aging tests for marine energy applications, 2012)



D. Wichtigste Inhalte der Regelwerke

BV

Guidance Note NI 613 – Adhesive Joints and Patch Repair

Der spezielle Leitfaden von Bureau Veritas für Klebeverbindungen, NI613 DT R00 E (Bureau Veritas, 2015) enthält Anforderungen und Empfehlungen für die Bewertung von Klebeverbindungen und gilt auch für Klebeverbindungen aus mehreren Materialien, z.B.

- Composite / Composite („secondary bonding“)
- Metall / Metall
- Metall / Composite

Dieser Leitfaden gilt jedoch nur für Klebeverbindungen oder Patch-Reparaturen, die nicht an der strukturellen, wasserdichten und feuerfesten Integrität des Schiffes beteiligt sind. Ziel des Leitfadens ist es, Werften, Konstrukteuren und Vermessungsingenieuren, die an der Verklebung und Reparatur von Patches beteiligt sind, technische Unterstützung zu bieten.

Basierend auf dem Risikograd werden drei Arten von Bonding-Anwendungen definiert. Eine ausführliche Beschreibung dieser Klassifizierung findet sich im BV-Leitfaden NI613. Eine Zusammenfassung ist in Tabelle 10 aufgeführt.

Parameter	Klasse A	Klasse B	Klasse C
Auswirkungen auf die Schiffsmision (Sicherheit, Segeln, Wirtschaft ...)	Ein Mangel wirkt sich in keiner Weise auf die Schiffsmision aus	Mängel können geringfügige Auswirkungen auf die Schiffsmision haben	Mängel wirken sich auf die Schiffsmision aus
Bauteilgewicht	Weniger als 5 kg	Zwischen 5 kg und 50 kg	Größer als 50 kg
Position	Nicht zutreffend	Verklebt an Deck oder an einem Schott mit einer Höhe von weniger als 1 m, in öffentlich zugänglichen Räumen	Verklebt an Deck oder an einem Schott mit einer Höhe von mehr als 1 m, in öffentlich zugänglichen Räumen

Tabelle 10: Risikoklassifizierung für Klebeverbindungen gemäß BV Guidance Note NI613

Der **Abnahmeprozess** besteht aus vier Hauptschritten:

- Vorläufige Bewertung der Werft
- Bewertung der „Bonding File“ (BF-Bewertung)
- Plan für Herstellung, Prüfung und Inspektion („MTI bonding plan“)
- Endbewertung der Verklebung

Der Gesamtprozess ist nachstehend in Tabelle 11 zusammengefasst und in einem Ablaufdiagramm (siehe Abbildung 20) veranschaulicht.

Schritt	Beschreibung
Vorläufige Bewertung der Werft	Die Werft erstellt die allgemeinen Dokumente zu ihrer Organisation, ihrem Qualitätssystem, ihren Fähigkeiten und ihrer Qualifikation im Bereich der Verklebung sowie ihren bisherigen Erfahrungen, um ihre Fähigkeit zu demonstrieren, einen zuverlässigen Verklebungsprozess zu erreichen
	BV führt eine vorläufige Inspektion durch, um eine Erstdiagnose vor Ort zu erstellen (BV-Gutachter vor Ort)
Bewertung der Bonding-Datei „Bonding file“	Nach der Phase der Spezifikation der Klebverbindung legt die Werft alle erforderlichen technischen Dokumente in Bezug auf den Zulassungsantrag vor
	BV bewertet die Konformität des Entwurfs der Klebeanwendung mit den Anforderungen ihrer Regeln: Validierung der Risikoklassifizierung für Klebeverbindungen, Prüfung der zugehörigen Zeichnungen, Eigenschaften der Konstruktion von Klebeverbindungen, Qualifikationstests... (BV-Planungsbüro + BV-Gutachter vor Ort)
Plan für Herstellung, Prüfung und Inspektion („MTI bonding plan“)	Die Werft stellt der BV ihren MTI-Plan in Bezug auf das betrachtete Antragsverfahren zur Verfügung
	BV prüft den MTI-Plan und führt eine Inspektion des Klebprozesses durch (BV Planungsbüro + BV-Gutachter vor Ort)
Abschließende Bewertung	

Tabelle 11: Bewertungsschritte BV

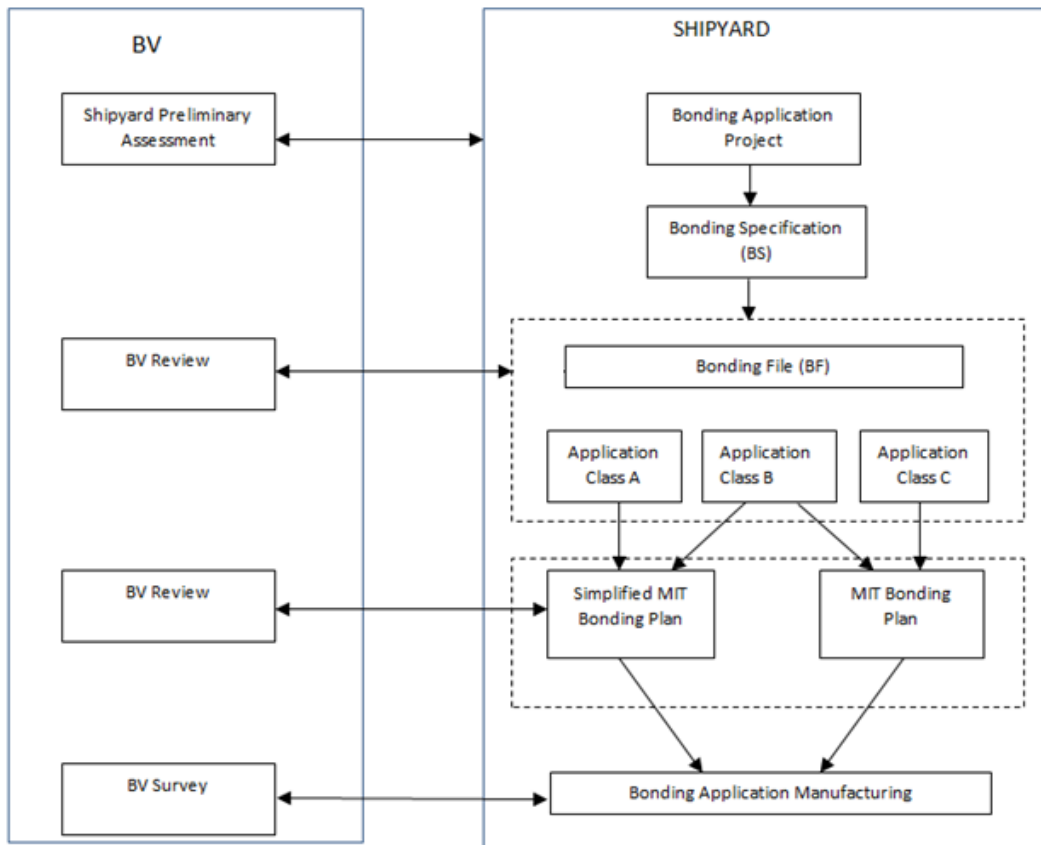


Abbildung 20: Ablaufschema Abnahmeprozess BV

Die von der Werft für die Überprüfung erstellte **Bonding-Datei (Bonding File, BF)** sollte dabei aus folgenden Elementen bestehen:

- Zeichnungen, Spezifikationen, Qualifikationstests und / oder Verfahren, die erforderlich sind, um eine zuverlässige Leistung der Klebverbindung im Betrieb zu erzielen
- Akzeptanz des Verbindungsprozesses, um die Validierung der Klebeverbindung zu ermöglichen und Anforderungen für ein sicheres und ordnungsgemäßes Funktionieren der Klebverbindung festzulegen
- Maßnahmen zur Behebung kritischer Konstruktionsdetails und zur Sicherstellung der Kontrolle der Schlüsselmerkmale, mit Plänen zur Überprüfung und Validierung nach Bedarf.

Der Inhalt der Bonding-Datei ist in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Inhalt der Bonding-Datei nach N613

	Risk Class		
	A Low	B Medium	C High
BV check	SAY	LPO + SAY	LPO + SAY
General arrangement drawing / Associated drawing set	NA	X	X
Considered environmental service condition	X	X	X
Fire safety requirements for the considered bonding application	X	X	X

Design file	Considered design load	NA	X	X
	Considered material mechanical characteristics design values (E, G, nu, behaviour law)	NA	X	X
	Adhesive system breaking strength (σ, τ) measured on test samples representatives of real production conditions (environmental, surface treatments, polymerisation state...)	NA	(X)	X
	Durability assessment	NA	(X)	X
	Joint geometry specification	NA	X	X
	Calculation method justification	NA	X	X
	Process specific file	Adherent surface condition specification before bonding	X	X
Process description		X	X	X
Process parameters to control / NDT		NA	(X)	X
Repair manual		X	X	X
Note 1:				
SAY: BV Surveyor at yard, LPO: BV Local Plan Office				
NA: Not applicable, X: Applicable, (X): Applicable on case by case basis				

Die **Designprozedur** ist in Abschnitt 3 der Guidance Note beschrieben. Sie beinhaltet fünf Schritte:

1. Risikoklassifizierung: Die Klebverbindung wird basierend auf den Auswirkungen auf die Schiffsmmission, dem Ausrüstungsgewicht und der Position der Klebverbindung an Bord in die Risikoklasse A, B oder C eingeteilt. Die Klassifizierungskriterien sind weiter oben in Tabelle 10 dargestellt.
2. Materialverhalten / Klebstofftyp: Ein Klebstoff gilt als „steif“, wenn das Werkstoffgesetz linear ist und die Bruchdehnung weniger als 10% beträgt. Ein Klebstoff gilt als „weich“, wenn das Werkstoffgesetz nichtlinear ist und eine Bruchdehnung von mehr als 100% aufweist. Bei Zwischenwerten kann der Klebstoff als „mittel“ angesehen werden.
3. Umgebungsbedingungen: Im Allgemeinen müssen die Umgebungsbedingungen wie folgt sein:
 - a. Temperatur: -25 ° C bis 55 ° C.
 - b. Luftfeuchtigkeit: 95% bei 55 ° C.
 - c. Salznebelgehalt: 1 mg / m

Darüber hinaus erfolgt die Klassifizierung des Risikograds auf der Grundlage der Art der Umgebung, der die Verbindung voraussichtlich ausgesetzt sein wird. Das zunehmende Risiko ist wie folgt: geschützte Umgebung im technischen Bereich, luftgekühlter Bereich und exponierter Maschinenraum.
4. Wert des Klebkoeffizienten: Der Klebkoeffizient hängt von den drei oben genannten Parametern ab - Risikoklassifizierung, Art des Klebstoffs und Umgebungsbedingungen. Für jeden Parameter wird ein zugehöriger Gewichtungsfaktor von 0 bis 2 zugewiesen, um den Klebkoeffizienten zu definieren (siehe Abbildung 21). Der Gesamtkoeffizient für eine Baugruppe ist die Summe der drei Klebkoeffizienten und kann daher im Bereich von 0 bis 6 liegen.

Risk Level Classification	Class A	Class B	Class C
Adhesive behaviour law	Rigid	Medium	Soft
Environmental conditions in service	Technical area Protected	Air cooled area	Exposed, machinery space,...
Bonding coefficient	0	1	2

Abbildung 21: Klebkoeffizienten nach NI613

5. Auswahl des Analysetyps: Der Wert des Klebkoeffizienten wird anschließend verwendet, um den Typ der Analyse zu bestimmen, die im Designprozess verwendet wird. Dies erfolgt gemäß Abbildung 22 .

Bonding Coefficient	Analysis Type
0	Direct Analysis and/or tests
1, 2 or 3	Analytic Analysis and/or tests
4 or 5	Linear Numerical Analysis or Non-linear Numerical Analysis, and tests
6	To be discussed with the Society

Abbildung 22: Analysetyp nach NI613

Der gesamte Designprozess wird als Flussdiagramm in Abbildung 23 zusammengefasst.

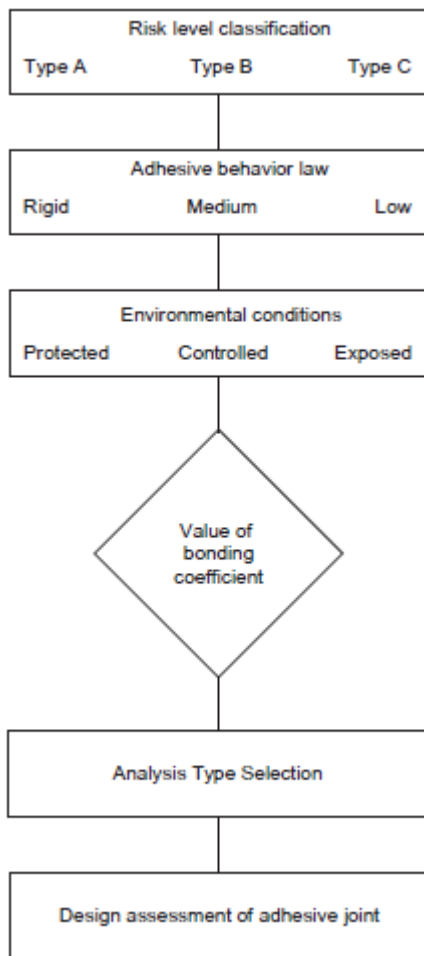


Abbildung 23: Designprozess nach NI613

Sicherheitsfaktoren sind in der Guidance Note wie folgt definiert:

Der Sicherheitsfaktor SF ist $SF = \alpha \cdot C_V \cdot C_F \cdot C_A$ definiert, wobei folgendes gilt:

$$\alpha = 2,4$$

C_V ist der Teilsicherheitskoeffizient zur Berücksichtigung des Alterungseffekts des Klebstoffs.

$C_V = 1.6$ für eine freiliegende Verbindung

$C_V = 1.2$ für eine geschützte / innenliegende Verbindung

C_F ist der Teilsicherheitskoeffizient zur Berücksichtigung der Art der Lasten.

$C_F = 1.6$ für dynamische Lasten (Impact etc.)

$C_V = 1.2$ für statische Lasten

C_A ist der Teilsicherheitskoeffizient zur Berücksichtigung des Klebstofftyps / Materialverhaltens.

$C_A = 1.2$ für starre Klebstoffe

$C_A = 1.4$ für mittlere Klebstoffe

$C_A = 1.6$ für weiche Klebstoffe

Die Sicherheit der Klebverbindung wird berechnet, indem die aus der numerischen oder analytischen Analyse berechnete Festigkeit (σ_{computed}) mit der experimentell aus den Testproben (σ_{adh}) ermittelten Spannung verglichen wird, die für die tatsächlichen Produktionsbedingungen repräsentativ ist.

Für ein sicheres Design muss gelten $\frac{\sigma_{\text{adh}}}{\sigma_{\text{computed}}} \geq SF$.

Der Minimalwert von SF beträgt $2.4 \cdot 1.2 \cdot 1.2 \cdot 1.2 = 4.15$

Der Maximalwert von SF beträgt $2.4 \cdot 1.6 \cdot 1.6 \cdot 1.6 = 9.83$

BV

BV Rule Note NR 546 – 'Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey'

Die allgemeinen Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften einer strukturellen Klebeverbindung zwischen Composite-Fügeteilen sind in BV Rule Note 546 (Bureau Veritas, November 2018) enthalten. Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften einer strukturellen Klebeverbindung hängen hauptsächlich von folgenden Parametern ab:

- Harzsysteme und Additive wie Thixotropika
- Art der zu verklebenden Bauteile sowie deren Oberflächenvorbereitung (Abrieb, Reinigung ...) und Oberflächenbehandlung
- Geometrie und Dicke der Klebeverbindung
- Aushärtungsprozess der Klebeverbindung

In der Regel ist der Wert der Schubfestigkeit gleich dem vom Hersteller angegebenen Mindestwert der anfänglichen Scherfließspannung des Klebharzes anzusetzen, die auf einem Substrat ermittelt wurde, das den untersuchten Bauteilen entspricht oder alternativ einer theoretischen Festigkeit der ersten Schicht der miteinander verbundenen Komponenten. Wenn keine Informationen verfügbar sind, kann eine maximale Schubfestigkeit von 5 N / mm^2 bis 10 N / mm^2 (für eine Hochleistungsklebeverbindung) angesetzt werden.

DNV GL

Rules for Classification of Ships (Oct. 2015) - Part 2 Materials and Welding, Chapter 3 Non-Metallic Materials, Section 2, Sub-section 10

In Teil 2, Kapitel 3, Abschnitt 2, Unterabschnitt 10 der DNVGL-Regeln für die Klassifizierung von Schiffen (DNV GL, Oktober 2015) werden die für den Schiffbau verwendeten Klebstoffe wie folgt klassifiziert:

- Steife Klebstoffe - Hochfeste Klebstoffe mit hoher Steifigkeit. Ein typisches Beispiel sind Hochleistungs-Epoxidklebstoffe
- Flexible Klebstoffe - haben eine geringe Festigkeit, eine geringe Steifigkeit und eine hohe Bruchdehnung. Ein typisches Beispiel sind Polyurethanklebstoffe
- Dichtstoffe - sind flexiblen Klebstoffen sehr ähnlich, mit der einzigen Ausnahme, dass sie keine Lasten oder Momente übertragen sollen.

Für diese Klebstoffe werden folgende Anforderungen definiert:

Steife Klebstoffe

Für den ungehärteten Klebstoff müssen folgende Eigenschaften weitergegeben werden:

- Dichte nach ISO 1675
- Viskosität nach ISO 3219

Zusätzlich ist bei der Härtung zweikomponentiger Klebstoffe bei Raumtemperatur die Topfzeit nach ISO 10364 anzugeben. Für die Eigenschaften im ausgehärteten Zustand sind die Anforderungen für die Prüfung in Tabelle 13 angegeben.

<i>Property</i>	<i>Test conditions</i>	<i>Test method</i> ¹	<i>Acceptance criteria, data format and unit</i>
Tensile lap-shear test ²	At RT after 24 ± 1 h curing at 23°C and storage at 50% relative humidity ³	EN 1465	12 MPa
Tensile lap-shear test after immersion in water ²	At RT after 1000 ± 12 h storage in distilled water at 23°C	EN 1465	12 MPa
Tensile lap-shear test at elevated temperatures ²	At 50°C	EN 1465	12 MPa
Long-term tensile lap-shear test ²	At 23°C/50% R.H. at 60% of the mean tensile lap-shear strength for 192 ± 2 h	EN1465	<ul style="list-style-type: none"> • creep deformation ≤ 0.18 mm for a bondline thickness of 0.5mm • creep deformation ≤ 1.0 mm for a bondline thickness of 3.0 mm
T-peel test ²	At RT after 24 ± 1h curing at 23°C and storage at 50% relative humidity ³	ISO 11339	2 N/mm
T-peel test after immersion in water ²	At RT after 1000 ± 12 h storage in distilled water at 23°C	ISO 11339	2 N/mm
Measurement of pH	Insert test specimen into test tube, filled with de-ionized water and close test tube. Store the test tube in a temperature chamber for 30 days at 40°C. Measure pH value using litmus paper	-	Document pH. If pH value is outside the allowed range, the adhesive joint must be protected against the impact of water. Aluminium: pH 6 to pH 8 Polycarbonate: pH 4 to pH 10 Steel: always to be protected against the impact of water
Tensile modulus E_t and Poisson's ratio	At 23/50, test specimen 1B	ISO 527-1,2	MPa
Shear modulus, G	Calculate, $G = E/(2(1+\mu))$	-	MPa
HDT test	At RT after 24 ± 1 h curing at 23°C and storage at 50% relative humidity ³	ISO 75-1,2 method A	65°C
HDT test	At RT after 1000 ± 12 h storage in distilled water at 23°C	ISO 75-1,2 method A	65°C
1) Other standards may be agreed upon with the Society prior to testing 2) Specimens with an adhesive thickness of 0.5mm and 3.0mm shall be used and the substrate has to be agreed with the Society prior to testing 3) Other curing conditions may be agreed upon with the Society prior to testing			

Tabelle 13: Anforderungen für steife Klebstoffe DNV GL

Flexible Klebstoffe

Dieser Anwendungsbereich beschränkt sich auf das Verkleben von Bauteilen und tragenden Bauteilen, die in die Struktur integriert und für die Sicherheit des Schiffes relevant sind. Je nach Anwendung fällt die Zulassung für Klebstoffe entweder unter Klasse A oder Klasse B.

- Klasse A definiert Klebeverbindungen unter erhöhter mechanischer Beanspruchung (hohe Festigkeit bei mittlerer Nachgiebigkeit).
- Klasse B ist definiert als Klebeverbindungen bei mittlerer mechanischer Beanspruchung (hohe Übereinstimmung mit mittlerer Festigkeit).

Die Prüfanforderungen für ausgehärtete flexible Klebstoffe sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Property	Test method ¹	Acceptance criteria, data format and unit	
		Class A	Class B
Shore A	ISO 7619-1	≥ 45	≥ 30
Fracture strain at -20°C	DIN 53504	≥ 50%	≥ 100%
Tensile stress at yield for +60°C	DIN 53504	≥ 1.5 MPa	≥ 0.6 MPa
Tear propagation resistance	ISO34-1	≥ 4 N/mm	≥ 4 N/mm
Tensile lap-shear strength	DIN EN 1465	≥ 2 MPa	≥ 0.7 MPa
Values for the long-term tensile lap-shear test at: 23°C/50% relative humidity at 60°C	Based on DIN EN 1465	0.25 MPa ² 0.15 MPa ²	Specified by manufacturer
Relaxation test after 90 days conditioning	Based on DIN EN 1465 and ISO6270-2	Specified by manufacturer	30% ± 1%
Measurement of pH	Insert test specimen into test tube, filled with de-ionized water and close test tube. Store the test tube in a temperature chamber for 30 days at 40°C. Measure pH value using litmus paper	Document pH. If pH value is outside the allowed range, the adhesive joint must be protected against the impact of water. Aluminium: pH 6 to pH 8 Polycarbonate: pH 4 to pH 10 Steel: always to be protected against the impact of water	
Shear modulus, G	Calculate	MPa	
Glass transition temperature (T_g)	ISO 6721-2	°C	
<p>1) Other standards may be agreed upon with the Society prior to testing</p> <p>2) No failure may take place within the long-duration shear tests. The strain-in creep values that are determined shall be specified versus the time</p>			

Tabelle 14: Anforderungen für flexible Klebstoffe DNV GL

Dichtstoffe

Die Prüfanforderungen für Dichtungsmassen sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Property	Test method ¹	Acceptance criteria, data format and unit
Lap shear test – constant elongation	Test sample in accordance with EN ISO 8340 with 10% and 30% extension. Weathering according to ASTM 1183 – 92, Test cycle D new 28 days, tested to destruction after ageing.	Acceptance criterion: adhesive failure occurs in less than 5% of the bonding area. MPa (mean)

Glass transition temperature (T_g)	ASTM E 1356 - 08	°C
UV Resistance	DIN 53504, S-2 or ASTM D 412 min. 500hrs QUV ²	Reduction in elongation at break <30% (compared to un-aged samples)
Measurement of pH	Insert test specimen into test tube, fill with de-ionized water and close test tube. Store the test tube in a temperature chamber for 30 days at 40°C. Measure pH value using litmus paper	Document pH. If pH value is outside the allowed range, the adhesive joint must be protected against the impact water. Acceptable levels of pH: <ul style="list-style-type: none"> • aluminium: pH 6 to pH 8 • polycarbonate: pH 4 to pH 10 • steel: always to be protected against the impact of water
<p>1) Other standards may be agreed upon with the Society prior to testing</p> <p>2) 2 mm thick sheet, die cut dumbbell-shaped specimen (ASTM D 412 or DIN 53 504), aged in QUV</p>		

Tabelle 15: Anforderungen an Dichtstoffe DNV GL

DNV GL DNVGL-ST-C501 'Composite Components' (Aug. 2017) – Section 7

Empfohlene Verfahren für die Reparatur von Stahlverbindungen im Schiffbau und bei Offshore-Anwendungen mit Klebeverbindung sind in Abschnitt 7.3 von DNV-RP-C301 (DNV GL, April 2012) dargestellt. Die Materialeigenschaften und das Prüfprotokoll sind wie folgt:

- a. Charakteristische Materialwerte - sollten wie in DNVGL-ST-C501 (DNV GL, August 2017) beschrieben angegeben werden
- b. Klebschicht-Festigkeit - Ziel der Klebschicht-Charakterisierungstests ist es, die Inputs bereitzustellen, die für die theoretischen Modelle erforderlich sind, die zur Vorhersage des Verhaltens der Kleb-Reparatur verwendet werden. Der Umfang der erforderlichen Tests hängt von den verwendeten Modellen ab. Im Allgemeinen erfordern Finite-Elemente-Modelle eine ziemlich detaillierte Spezifikation der Materialeigenschaften, während einige vereinfachte Modelle nur die kritischsten Eigenschaften erfordern. Im Folgenden werden die wichtigsten Parameter behandelt. Sollten andere Materialeigenschaften als Eingabe für die Modelle benötigt werden, sollten diese gemäß DNVGL-ST-C501 (DNV GL, August 2017) erhalten werden.
Die Klebschicht-Charakterisierungstests sind für eine Reihe von Patch-Materialien durchzuführen, die den Bereich der Patch-Steifigkeiten abdecken, für die das Klebstoffsystem verwendet werden soll. Das Schubmodul des Klebstoffs kann Datenblättern entnommen oder mit Standardprüfverfahren ermittelt werden.
- c. Scherfestigkeit und Bruchzähigkeit der Klebschicht – Statischer Schälwiderstand, gemessen anhand des Scherbruchversuchs mit gerissenen Balken (Anhang G von DNV-RP-C301) oder des Bruchtests mit geriffelten Balken (Anhang H von DNV-RP-C301) oder Doppelband-Scherbruchprüfung (Anhang I von DNV-RP-C301) oder Doppelband-Kantenbruchprüfung (Anhang J von DNV-RP-C301).
- d. Ermüdungsverhalten - Ermüdungsversagen, gemessen anhand eines Scherbruchversuchs mit Rissen oder eines Bruchkantentests mit Flächenkanten oder eines Scherbruchversuchs mit Doppelband oder eines Bruchversuchs mit Doppelbandkanten.
- e. Spannungsbruchleistung - Klebschicht-Spannungsbruch, gemessen anhand eines Riss-Flachbalken-Scherbruch-Tests oder eines Patch-Balken-Kantenbruch-Tests oder eines Doppelband-Scherbruch-Tests oder eines Doppelband-Kantenbruch-Tests.

- f. Langfristige Verschlechterung der Klebeeigenschaften - Eine langfristige Verschlechterung der Materialeigenschaften aufgrund der Exposition der Reparatur gegenüber der vorgesehenen Betriebsumgebung wird bei Reparaturen der Klassen I und II nicht ausdrücklich berücksichtigt. Es dürfen jedoch nur Materialkombinationen mit guter Haltbarkeit in der vorgesehenen Betriebsumgebung verwendet werden. Es wird empfohlen, die in Abschnitt F von DNV-RP-C301 angegebenen Screening-Tests zu verwenden, um solche Materialkombinationen zu identifizieren. Relevante Langzeiteigenschaften können wie in DNVGL-ST-C501 beschrieben gemessen werden.

DNV GL

DNVGL-ST-0376: Rotor blades for wind turbines

Die Vorschriften für Klebstoffanwendungen für Rotorblätter von Windkraftanlagen sind in DNVGL-ST-0376 „Rotorblätter für Windkraftanlagen“ (DNV GL, Dec. 2015) enthalten. Bei allen Klebeverbindungen ist die Verträglichkeit zwischen Klebstoff und Klebematerial zu gewährleisten. Folgende chemische und physikalische Eigenschaften des Klebstoffs sind anzugeben:

- i. Harzchemietyp
- ii. Nennmischungsverhältnis
- iii. Dichte (im ausgehärteten Zustand)
- iv. Art und Menge des Thixotropikums (falls zutreffend)
- v. Wärmestabilität, z.B. Glasübergangstemperatur (T_g). Die thermische Stabilität des Matrixharzes ist im Hinblick auf den Schaufeltemperaturbereich nachzuweisen. Wenn T_g die höchste auf der Schaufel zu erwartende stündliche Durchschnittstemperatur bei einer Wiederholungsperiode von 1 Jahr (θ_{max} , Schaufel) um mindestens 150 ° C überschreitet, ist kein weiterer Nachweis hinsichtlich der thermischen Stabilität erforderlich.
- vi. Grad der Aushärtung in Bezug auf eine vollständig ausgehärtete Verbindung, z.B. als Restenthalpie

Die folgenden mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs sind anzugeben:

- i. Konstruktionskonstanten - Elastizitätsmodul E, Schermodul G und Poisson-Verhältnis μ
- ii. Endfestigkeit und Druckfestigkeit des sauberen Harzes
- iii. Endfestigkeit und Ermüdungsfestigkeit der Klebeverbindung (unter Berücksichtigung von Scherung und Ablösung)
- iv. Bruchzähigkeit der Klebeverbindung (Modus I, Modus II und gemischter Modus), falls diese als Grundlage für die Analyse der Entwurfsprüfung verwendet wird
- v. In geeigneter Weise angegebene Dauerfestigkeit oder Rissbeständigkeit
Alle im Dokument angegebenen Anforderungen setzen voraus, dass die Temperatur der Schaufeln zwischen -30 ° C und + 50 ° C bleibt. Wenn erwartet wird, dass die extremen Temperaturen diese Grenzwerte überschreiten, sind weitere Tests erforderlich. Für den Klebstoff besteht dies darin, keine Änderung der strukturellen Eigenschaften des Klebstoffs nachzuweisen und weitere statische Festigkeitsprüfungen des Klebstoffs sowie Analysen der Klebeverbindungen durchzuführen.

Fehlermodi

Für Klebeverbindungen werden drei Versagensarten identifiziert:

1. Versagen der Klebstoff- / anhaftenden Grenzfläche: Dieses Versagen ist durch das Versagen am Klebstoff und an der anhaftenden Grenzfläche gekennzeichnet, d. H. durch ein Versagen der Grenzfläche. Ein Grenzflächenfehler ist einer der schwächsten Fehlermodi und sollte vermieden werden. Dieser Fehlermodus wird unter anderem durch eine schlechte Vorbereitung der

Fügeteiloberflächen und / oder einen inkompatiblen Klebstoff verursacht. Ein Grenzflächenriss kann anschließend durch eine Mischung aus Scher- und Schälspannungen belastet werden.

2. Kohäsionsversagen: Dieses Versagen ist durch das Versagen am Klebstoff gekennzeichnet, d. H. durch das Kohäsionsversagen. Klebstoffe können ein nichtlineares Verhalten mit großen Versagensdehnungen aufweisen, so dass es zu einem duktilen Versagen kommen kann.
3. Fügeteilversagen: Dieses Versagen ist durch das Versagen des Fügeteils gekennzeichnet, d. H. der Klebstoff ist stärker als die Fügeteile. Die Fehlermodi sind die gleichen wie bei einem Verbundlaminat-, Matrix- oder Faserfehler.

Design

Bei der Konstruktion ist nachzuweisen, dass der Klebstoff mit den zu verklebenden Materialien kompatibel ist, dass die Oberflächenvorbereitung gemäß den einschlägigen Normen erfolgt und dass der Klebstoff für extreme Temperaturen, Betriebstemperaturen und Umgebungsbedingungen geeignet ist. Die Entwurfsüberprüfung muss entweder mit einem spannungs- oder einem kombinierten spannungsbruchmechanischen Ansatz durchgeführt werden (jede Methode ist mit einem anderen Sicherheitsfaktor verbunden). Die Auswirkung des Kriechens ist durch Prüfung zu untersuchen.

Die Bemessungsfestigkeit entspricht der charakteristischen Festigkeit, die durch Sicherheitsfaktoren verringert wird:

- γ_{mc} : Kritikalität des Fehlermodus
- γ_{m1} : Langzeitabbau
- γ_{m2} : Temperatureffekte
- γ_{m3} : Herstellungseffekt
- γ_{m4} : Genauigkeit der Analysemethode
- γ_{m5} : Genauigkeit der Lastannahmen

Für jede kritische oder stark belastete Klebeverbindung müssen Tests auf mittlerer Ebene (Komponentenebene) durchgeführt werden.

Herstellung

Zum Verkleben sind folgende Maßnahmen durchzuführen:

- Die Klebeflächen sollten trocken und frei von Trennmitteln, Verunreinigungen und Lösungsmitteln sein. Es ist darauf zu achten, dass die Klebefläche frei von jeglichem Material ist, das den Klebevorgang negativ beeinflussen kann.
- Alle Klebeflächen müssen aufgeraut sein (z. B. mechanisch oder chemisch). Hinweis: Bei Verwendung von Abreißgewebe ist auch ein Aufrauen erforderlich. Wenn alternative Mittel angewendet werden, um ein Aufrauen zu vermeiden, ist eine Überprüfung des Verfahrens erforderlich.
- Abnahmekriterien für den Oberflächenzustand vor dem Verkleben sind anzugeben.
- Der Klebstoff muss gemäß den Anweisungen des Herstellers verarbeitet werden. Der Klebstoff ist so zu mischen, dass eine homogene Mischung entsteht. Ein Eindringen von Luft ist zu vermeiden.
- Der Klebstoff muss ordnungsgemäß für das Klebstoffsystem aufgetragen werden und die Anforderungen für den maximal zulässigen Luftgehalt nach dem Auftragen erfüllen.
- Nach dem Auftragen des Klebstoffs sind die Klebeflächen unverzüglich zusammenzuführen und zu fixieren.
- Es ist sicherzustellen, dass das Auftragen von Klebstoffen und das endgültige Fügen der Komponenten innerhalb einer begrenzten Zeit nach dem Mischen abgeschlossen ist. Diese

Frist muss unter Berücksichtigung aller relevanten Material- und Prozesseigenschaften (z. B. Gelzeit) ordnungsgemäß festgelegt werden.

- Klebeverbindungen dürfen nicht belastet werden, bevor der Klebstoff ausreichend ausgehärtet ist. Für alle Klebeverbindungen mit duroplastischen Klebstoffen wird ein anschließendes Anlassen der Verbindung empfohlen.
- Wenn GFK-Komponenten verklebt werden, müssen minimale und maximale Aushärtungsgrade vor dem Verkleben angegeben werden. Sofern nicht anders angegeben, sollten FRP-Komponenten vor dem Verkleben vollständig ausgehärtet werden, wenn sich das Verbindungssystem vom Laminiersystem unterscheidet.
- Die Parameter für die Dicke der Klebschicht müssen durch geeignete Mittel (z. B. Trockenverschlusstests, Sichtprüfungen, Ultraschalluntersuchungen) kontrolliert werden, um die Übereinstimmung mit den relevanten Entwurfsannahmen sicherzustellen.

DNV GL Type approval for Adhesive Systems, DNVGL-CP-0086 (Mar. 2016)

Die Beschreibung der DNV GL-Typenzertifizierung von Klebstoffsystemen ist in DNVGL-CP-0086 (DNV GL, March 2016) enthalten. Nach den DNVGL-Regeln (DNV GL, October 2015) müssen Klebstoffe gemäß diesem Schema typgenehmigt sein, damit Geräte auf Schiffen der DNV GL-Klasse installiert werden können. Kurz gesagt, sind folgende Unterlagen zur Typgenehmigung vorzulegen:

- 1) Typbezeichnung, d. H. Produktname (Klasse) mit Liste der Varianten, die in das Typgenehmigungszertifikat aufgenommen und auf diesem angegeben werden sollen
- 2) DNV GL-Zulassung des Herstellerzertifikats, falls zutreffend, gültig für mindestens ein Jahr.
- 3) Grundlage für die Genehmigung. Ein Verweis auf geltende Regeln und Normen, denen das Produkt entsprechen muss.
- 4) Produktbeschreibung einschließlich:
 - a. Art des Klebstoffs
 - b. Art des Härtingssystems (einschließlich Nichtverträglichkeit mit anderen Härtingssystemen / Chemikalien)
 - c. Informationen bezüglich möglicher mangelnder chemischer Beständigkeit gegenüber Ölen, Reinigungsmitteln usw.
 - d. Umweltbeschränkungen bei der Verwendung des Klebstoffs, z.B. zulässiger Temperaturbereich oder Luftfeuchtigkeit
 - e. Dokumentation der In-Service-Erfahrung, falls verfügbar.
- 5) Es wird eine Liste der Zulassungen beantragt (für Aluminium, verschiedene Legierungsgruppen wie Serien 5000-, 6000 usw.).
- 6) Verfahren zur Vorbereitung jedes Klebers
- 7) Antragsverfahren einschließlich:
 - a. Mischverhältnis
 - b. Topfzeit / offene Zeit
 - c. Temperatur-, Feuchtigkeits- und Temperaturbereich über dem Taupunkt
 - d. max. und min. Dicke der Klebeverbindung
- 8) Aushärtungsverfahren
- 9) Anwendungsbereich und besondere Einschränkungen des Produkts (Auftragsverfahren und erforderliche Oberflächenbehandlung vor dem Verkleben, Verträglichkeit / Nichtverträglichkeit mit anderen Materialien usw.)

- 10) Produktspezifikation, einschließlich Datenblätter (Technisches Datenblatt (TDS) und Materialspezifikationsdatenblatt (MSDS)) für alle Varianten
- 11) Beschreibung der Produktionsprozesse, einschließlich Standardarbeitsanweisungen (SOP)
- 12) Beschreibung des Qualitätssicherungssystems oder Kopie des ISO 9001-Zertifikats
- 13) Qualitätsplan für Material, das an Bord von Schiffen installiert werden soll
- 14) Testergebnisse (aus bereits durchgeführten Tests) unter Bezugnahme auf Normen, Methoden usw.
- 15) Angaben zur Kennzeichnung des Produkts oder der Verpackung
- 16) Alle relevanten Zertifikate mit ihrer Ausstellungsnummer und / oder ihrem Datum (z. B. Zertifikat des Qualitätsmanagementsystems)
- 17) Liste der Prüf- und Messgeräte, einschließlich Kalibrierzertifikate
- 18) Erfahrung im Betrieb, falls verfügbar
- 19) Die Ergebnisse der Zeugenprüfung und der erste Bewertungsbericht des Vermessers der Gesellschaft sind nach Fertigstellung vorzulegen.

LR

Rule for the Manufacture, Testing and Certification of Materials,
Chapter 14, Section 2.15

Die Anforderungen für die Zulassung von Verbundwerkstoffen sind in Kapitel 14 der LR-Regeln für die Herstellung, Prüfung und Zertifizierung von Werkstoffen (Lloyd's Register of Shipping, July 2013) aufgeführt. Insbesondere die Regeln für Klebstoffe und Dichtungsmaterialien sind in Abschnitt 2.15 dieses Kapitels aufgeführt. Im Wesentlichen sind folgende erforderlich:

- Materialien dieser Art müssen vor der Verwendung von LR akzeptiert werden.
- Die Voraussetzungen für die Annahme hängen von der Art des Antrags ab.
- In erster Linie muss der Hersteller alle Einzelheiten des Produkts, des Verfahrens zur Verwendung (einschließlich der Oberflächenvorbereitung) und der beabsichtigten Anwendung vorlegen. Nach Überprüfung dieser Details stellt LR einen spezifischen Testplan zur Bestätigung der Materialeigenschaften zur Verfügung.
- Jede erteilte Annahme ist auf bestimmte Anträge beschränkt und hängt von der Einhaltung der Gebrauchsanweisung ab.

Wie bei anderen Klassifikationsgesellschaften ist der Genehmigungsprozess in zwei Phasen unterteilt. Phase 1 - Inspektion des Ortes, an dem der Klebstoff hergestellt wird, und Phase 2 - Zulassungsprüfung des Klebstoffs.

Phase 1

LR Begutachtung des Standorts, an dem der Klebstoff hergestellt wird, ist erforderlich. Im Rahmen des Inspektionsprozesses überprüft der teilnehmende Gutachter die vorhandenen QA / QC-Verfahren, prüft die Testausrüstung, die Aufzeichnungen zur Personalschulung usw. Darüber hinaus überprüft der teilnehmende Gutachter auch die Entnahme der Klebstoffprobe aus einer zuvor hergestellten Charge in der Produktion (unter Angabe der relevanten Chargennummern und Verfallsdaten) für die Zulassungsprüfung. Der Standort-Inspektionsbericht wird zur Überprüfung an das zuständige Support-Büro weitergeleitet.

Phase 2

Die ausgewählte Klebstoffprobe muss getestet werden. Die angegebenen Tests hängen von der vom Klebstoffhersteller angegebenen Art des Substrats und den vom Hersteller angegebenen

Anforderungen an die Oberflächenvorbereitung und die Aushärtung / Nachhärtung ab. Bei GFK / GFK oder Holz sind folgende Zulassungsprüfungen erforderlich:

- 1) Bestimmung der Zugscherfestigkeit bei minimaler und maximaler herstellungsspezifischer Dicke der Verbindungslinie. Zugscherproben, die bei Raumtemperatur getestet werden sollen. Es sind mindestens 5 Proben zu prüfen. Prüfung nach ASTM D1002 oder ASTM D3165
- 2) Bestimmung der Zugscherfestigkeit bei minimaler und maximaler vom Hersteller angegebener Dicke der Klebschicht. Die vorbereiteten Proben werden dann 28 Tage lang bei 35 ° C in destilliertes Wasser getaucht. Nach der Konditionierungsperiode wurden die aus dem Wasserbad zu entfernenden Proben getrocknet und innerhalb von 2 Stunden getestet.

Im Falle eines metallischen Substrats wären zusätzlich zu den Zugschertests auch die folgenden Tests erforderlich:

- 3) Spaltungstest an Proben mit typischer Klebschichtdicke, mindestens 5 zu testende Proben. Prüfung gemäß ASTM D 1062
- 4) Bewertung der Ermüdung an Zugscherproben mit typischer Klebschichtdicke, um die Belastung zu bestimmen, die ein Minimum von 1 000 000 Zyklen erreicht, Test zwischen 2 und 5 Hz, mindestens 5 zu testende Proben. Prüfung gemäß ASTM D3166
- 5) In jedem Fall ist neben den Versagenslasten auch die Fehlerart zu dokumentieren
- 6) Spezifizierte Zulassungsprüfungen können durchgeführt werden durch:
 - a. Der Klebstoffhersteller oder ein geeignetes nicht akkreditiertes Prüflabor. In diesem Fall muss die Prüfung jedoch vom Gutachter bezeugt und der Bericht zur Überprüfung an das Supportbüro weitergeleitet werden.
 - b. Die Prüfung kann auch von einem staatlich anerkannten Prüflabor für die oben angegebene Prüfung durchgeführt werden. In diesem Fall muss das Akkreditierungszertifikat des Testlabors von LR überprüft werden, und wenn akzeptable Tests nicht vom Gutachter bezeugt werden müssen, muss der endgültige Testbericht dennoch dem Konstruktionsunterstützungsbüro zur Überprüfung vorgelegt werden
- 7) Vorbehaltlich einer zufriedenstellenden Zulassungsprüfung und Inspektion vor Ort wird das entsprechende Zulassungszertifikat für den Klebstoff / Herstellungsort ausgestellt und ist 5 Jahre gültig, sofern sich die Formulierung des Klebstoffs oder der Herstellungsort nicht ändert.

ABS

Rules for Materials and Welding – Aluminium and Fibre Reinforced Plastic, Chapter 6 Material for Hull Construction – Fibre Reinforced Plastics, Section 1, Sub-section 9.

In dieser Richtlinie (American Bureau of Shipping, 2019) sind Anforderungen an strukturelle Verklebungen im Marine-Sektor definiert. Hier werden die folgenden Vorgaben gemacht:

Allgemeine Hinweise:

- Der Klebstoff muss mit dem Laminierharz kompatibel sein.
- Klebstoffe für strukturelle Anwendungen sind gemäß den Empfehlungen des Herstellers zu verwenden.

Mechanische Kennwerte und Tests:

- Die minimale Scherfestigkeit des Klebstoffs muss zwischen 6,9 N / mm² und 10,0 N / mm² liegen und bei Temperaturen im Bereich von Umgebungstemperatur bis 49 ° C unter Verwendung eines FRP-Substrats erreicht werden. Es sind nur Kohäsions- oder Faserausfallmodi zulässig. Die Tests müssen gemäß ASTM D1002 oder ASTM D3165 durchgeführt werden.

- Klebstoff soll der entweder auf GFK oder auf metallischem Untergrund auf Ermüdung geprüft werden. Der Test muss bei 50% der Zugfestigkeit bei 30 Hz durchgeführt werden und mindestens eine Million Zyklen dauern. Prüfung gemäß ASTM D3166.
- Das Elastizitätsmodul des Klebstoffs muss erheblich geringer sein als der für die FRP-Haut, an der er haftet.
- Das Verhältnis von Dehnung zu Versagen des Klebstoffs soll viel größer sein als die umgebende Struktur.
- Mechanische Eigenschaften des Klebstoffs sollen schnell aufgebaut werden, so dass keine mechanische Befestigung wie Bolzen oder Schrauben erforderlich ist, um das Substrat zusammenzuhalten, während der Klebstoff aushärtet.

Design Review & Abnahme:

- Einzelheiten zum vorgeschlagenen Strukturklebstoff sind im Materialdatenblatt und in den vorgelegten Bauplänen anzugeben.
- Unterlagen zum Fertigungsprozess, einschließlich Angaben zur maximalen Dicke der Klebschicht, zur zerstörungsfreien Prüfung und zum maximalen Kriechen, müssen zur Überprüfung eingereicht werden.
- Arbeitsanweisungen zum Herstellungsprozess sind zur Überprüfung vorzulegen. Diese sollen Angaben zur Handhabung, zum Mischen und zum Auftragen des Klebstoffs ebenso wie zur Qualifikation des ausführenden Personals enthalten.

Fertigungsprozess:

- Besonderes Augenmerk ist auf die Oberflächenvorbereitung und Sauberkeit der anhaftenden Oberflächen zu legen.
- Bei unebenen oder ausgefransten Klebeflächen ist ein geeigneter Spaltfüllklebstoff oder eine zusätzliche Verstärkung zu verwenden, um die Oberflächen auszugleichen.

Die kürzliche veröffentlichte Guidance Note (American Bureau of Shipping, September 2019) beschreibt Klassifizierungsrichtlinien für die Reparatur von Stahlkonstruktionen und Rohrleitungen an Bord von Offshore-Konstruktionen wie bspw. sogenannten „Floating Production Storage and Offloading (FPSO)“- und „Floating Storage and Offloading (FSO)“-Konstruktionen. In Ermangelung von Vorschriften, nach denen sie regelmäßig trocken andocken müssen, bleiben solche Plattformen für lange Zeit an ihrem Einsatzort und haben dementsprechend regelmäßig Reparaturbedarf. Die Reparatur korrodierter Elemente vor Ort durch Heißenarbeiten ist nur möglich, wenn benachbarte Tanks gasfrei sind. Dies kann den Dauerbetrieb der Einheiten beeinträchtigen und Sicherheitsbedenken aufwerfen. Daher werden für solche Anwendungen Reparaturen von Klebeverbundwerkstoffen bevorzugt.

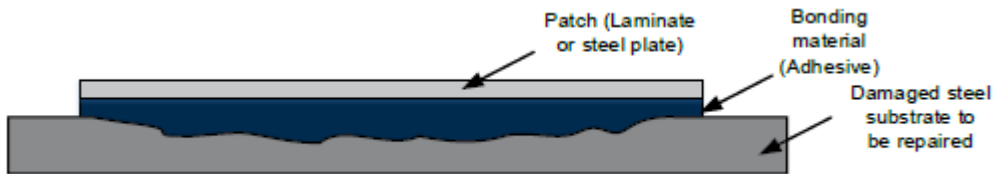


Abbildung 24: Klebereparatur von korrodierten Substratstrukturen (American Bureau of Shipping, September 2019)

Kapitel 1 des Leitfadens befasst sich mit der Reparatur von Stahlkonstruktionen mit Verbundwerkstoffen, Kapitel 2 mit der Reparatur von Rohrleitungssystemen mit Verbundwerkstoffen. Für Schiffbauanwendungen ist der Inhalt von Kapitel 1 relevanter. Es ist zu beachten, dass Risse systematisch nicht in den Rahmen von Verklebungsreparaturen fallen. Die verschiedenen Abschnitte in Kapitel 1 können wie folgt zusammengefasst werden:

- Abschnitt 1: Allgemeiner Überblick, einschließlich einer Liste der zur Überprüfung erforderlichen Unterlagen und der Risikobewertung der Reparaturmethode.
- Abschnitt 2: Richtlinien zur Bewertung der Kritikalität von Korrosion und Ermüdungsrissen, um festzustellen, ob die Reparatur mit Verbundwerkstoffen durchführbar ist.
- Abschnitt 3: Die Grundsätze der geklebten Reparaturkonstruktion, einschließlich der Klassifizierung von Reparaturkategorien, Materialsicherheitsfaktoren, Methodik für die Strukturanalyse, Festigkeitsprüfung der reparierten Verbindung und einer Liste der Elemente, die in den Konstruktionsbericht aufgenommen werden sollen. Abbildung 25 zeigt ein Flussdiagramm, das den Entscheidungsprozess für die Patch-Reparatur zeigt.
- Abschnitt 4: Materialeigenschaften, die für die Konstruktions- und Festigkeitsanalyse benötigt werden, sowie zugehöriges Testprogramm.
- Abschnitt 5: Allgemeine Empfehlungen zu den Installations- / Fertigungsspezifikationen und Verfahren für die Reparatur mit Verbundwerkstoffen. Dies schließt auch das Qualitätskontrollverfahren für Klebeverbindungen ein.
- Abschnitt 6: Informationen zur ABS-Material- / Komponentenzertifizierung, zur Begutachtung der Reparatur und zur Betriebsbegutachtung.

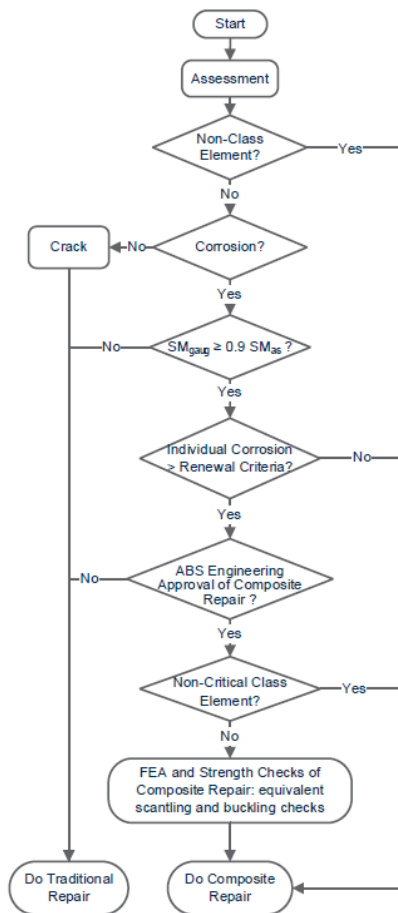


Abbildung 25: Entscheidungsprozess für Patch-Reparatur (American Bureau of Shipping, September 2019)

Die Anforderungen zum **Prüfprogramm zur Materialqualifizierung** sind wie folgt definiert:

- Die Testbedingung sollte repräsentativ für die Betriebsumgebung sein, wie in Kapitel 1, Abschnitt 3 der Regeln angegeben
- Der Prüfkörper sollte nach dem gleichen Verfahren wie die eigentliche Reparatur hergestellt werden.
- Das im Prüfkörper verwendete Pflaster sollte repräsentativ für die eigentliche Reparatur sein.
- Der ursprüngliche Zustand der Stahloberfläche (vor der Oberflächenbehandlung) sollte der zu reparierenden Oberfläche ähnlich sein.
- Die Oberflächenbehandlung sollte mit der für die Anwendung vor Ort verwendeten identisch sein.
- Das Laminat sollte auf die gleiche Weise wie bei der tatsächlichen Anwendung hergestellt werden.
- Die Rohstoffe sollten mit denen identisch sein, die in der tatsächlichen Anwendung verwendet werden.
- Die Aufstellung sollte repräsentativ für die tatsächliche Reparatur sein.
- Das Klebstoff- / Kernelastomer sollte das gleiche sein wie bei der tatsächlichen Anwendung und sollte auf die gleiche Weise aufgetragen werden.
- Der Aushärtungsplan von Laminat und Klebstoff / Kernelastomer sollte der gleiche sein wie bei der tatsächlichen Anwendung

Die Mindestanforderung für das Materialprüfprogramm ist aus der folgenden Abbildung ersichtlich. Dieses Schema zeigt deutlich die Bedeutung der Chargensensitivität und die Bewertung der Varianz der Ergebnisse.

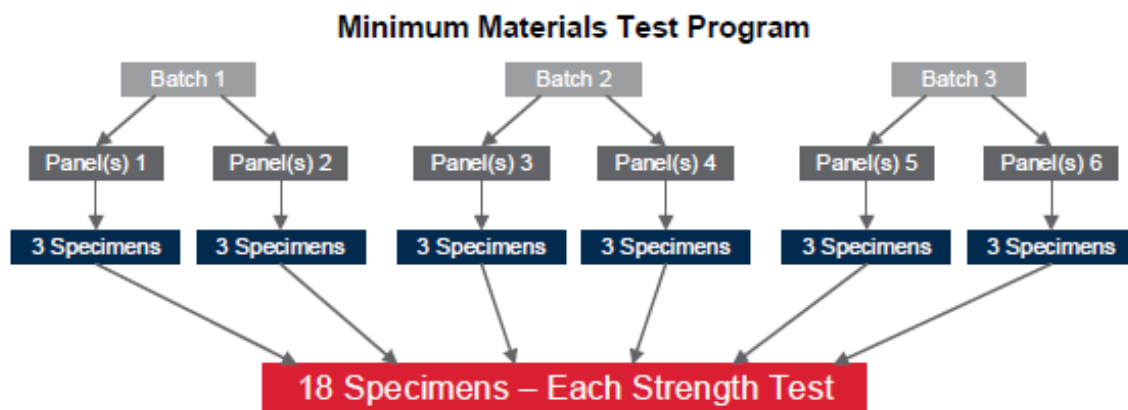


Abbildung 26: Mindestprüfprogramm nach (American Bureau of Shipping, September 2019)

Kapitel 1, Abschnitt 5, Unterabschnitt 4 der Richtlinie enthält Anleitungen zur **Qualitätskontrolle**. Die wichtigsten identifizierten Prozessparameter sind:

- **Oberflächenvorbereitung von Substrat und Patch:** Die Oberflächenvorbereitung sollte in geeigneter Weise erfolgen, um eine zufriedenstellende Verbindung mit dem Substrat zu erreichen. Jede Substanz, die das Anhaften an der Stahloberfläche verhindert, wird als Verunreinigung angesehen. Oberflächenreinigungsmethoden umfassen trockenes Strahlen, Elektrowerkzeuge und Wasserstrahlen mit oder ohne Schleifmittel.
- **Materialhandhabung und -vorbereitung**
- **Klebschichtdicke:** Die Klebschichtdicke kann die Festigkeit, insbesondere die Schälfestigkeit, der Grenzfläche beeinflussen und sollte innerhalb der angegebenen Grenzen liegen. Die richtige Klebschichtdicke sollte durch Befestigungen oder Abstandshalter sichergestellt werden, bis der Klebstoff ausreichend ausgehärtet ist, um eine Bewegung des Pflasters zu verhindern.
- **Anpressdruck:** Während des Aushärtens sollte der zwischen dem Pflaster und der Substratmetalloberfläche ausgeübte Druck so gesteuert werden, dass die Klebschichtdicke nicht beeinflusst wird. Ein geeigneter Druck sollte gemäß dem angegebenen Verfahren eingehalten und kontrolliert werden.
- **Ausrichtung:** Das Laminatpflaster sollte mit der richtigen Faserorientierung in Bezug auf die Substratgeometrie wie angegeben installiert werden. Das Pflaster sollte sorgfältig auf dem Untergrund ausgerichtet sein. Bei der Installation sollte eine akzeptable Ausrichtungstoleranz eingehalten werden.
- **Aushärtetemperatur und -zeit:** Die Aushärtetemperatur und -zeit des Klebstoffs sollten kontrolliert werden, um eine ausreichende Festigkeit gemäß den technischen Datenblättern des Klebstoffs zu erhalten. Barcol-Härtetests können an allen gehärteten Polymermaterialien durchgeführt werden. Die Härteprüfwerte sollten innerhalb der angegebenen Werte und der bei der Qualifizierungsprüfung erhaltenen Werte liegen.

Kapitel 1, Abschnitt 3, Unterabschnitt 2.7 des Leitfadens betrachtet **mögliche Versagensarten** der Verbindungen an. Diese könnten für alle Klebverbindungen im maritimen Umfeld relevant sein. Sie lauten wie folgt:

- Rissbildung in der Klebeschicht: Wenn ein Riss repariert wird, entwickelt sich normalerweise sehr schnell ein anfänglicher Riss durch die Dicke der Klebeschicht direkt über dem zu reparierenden Riss. Dieser Riss wird angehalten, wenn er das verstärkte Pflaster erreicht.
- Ermüdung der Bindungsschicht und Ausbreitung der Ablösung: Wenn die reparierte Komponente einer zyklischen Belastung ausgesetzt ist, kann ein Ablösungsriss in der Verbindungsschicht entstehen und sich ausbreiten, wodurch das Pflaster teilweise vom Substrat getrennt wird.
- Rissbildung an der freien Kante: Ein Riss an der Ablösung kann sich von den freien Rändern der Reparatur auslösen und ausbreiten, wodurch das Pflaster teilweise vom Substrat getrennt wird.
- Bruch der Klebschicht: Wenn die auf das Pflaster übertragene Belastung die Kapazität der Klebschicht überschreitet, kann die Klebschicht brechen, was zu einem Reparaturfehler führt.
- Blasenbildung: An den Grenzflächen zwischen der Klebschicht und dem Substrat / Patch kann sich aufgrund von Verunreinigungen an der Grenzfläche Flüssigkeit ansammeln und Druck erzeugen. Wenn dieser Druck die Haftung der Klebeschicht überschreitet, kann es zu Blasenbildung und dann zu Delamination kommen.
- Kriechbruch: Wenn eine permanente Last aufgebracht wird, kann ein Kriechen und ein anschließender Kriechbruch eine teilweise oder vollständige Trennung des Pflasters vom Substrat verursachen. Diese Art von Fehler tritt normalerweise auf, wenn sich die Betriebstemperatur der Glasübergangstemperatur T_g des Klebstoffs nähert.
- Änderungen der Eigenschaften der Klebschicht aufgrund der Betriebsumgebung: Änderungen der Temperatur und der chemischen Umgebung können die Kapazität der Klebschicht verringern und zu vorzeitigem Versagen führen, wie z. B. Quellen der Klebschicht / Laminatpflaster, Plastifizierung oder Beanspruchung.
- Substratkorrosion: Wenn die Klebeschicht einer korrosiven Umgebung ausgesetzt ist, tritt Korrosion auf dem Substrat hinter der Patch-Reparatur auf und kann zu einem vorzeitigem Versagen der Klebschicht führen.

Die Class NK-Richtlinie für die Verwendung von Strukturklebstoffen (ClassNK, December 2015) gilt für Strukturklebstoffe, die in folgenden Verbindungen verwendet werden:

- 1) Alle Verbindungen von Materialien, Ausrüstung usw. außer strukturelle Bauteile des Rumpfes für FVK-Schiffe
- 2) Alle Verbindungen von Materialien, Ausrüstung usw., die nicht den in den geltenden Vorschriften für Stahl- und Aluminiumschiffe festgelegten Materialien entsprechen
- 3) Alle Verbindungen, die nicht in exponierten Bauteilen erheblich anfällig für Meerwasser oder hohe Temperaturen sind

Zulassungsprozedur

Der Hersteller, der die Genehmigung einholen möchte, muss den Antrag mit folgendem Referenzmaterial und folgenden Daten einreichen:

- 1) Firmenhintergrund und kurze Beschreibung der Fabrik
- 2) Zusammenfassung der wichtigsten Produktionsstätten
- 3) Produktspezifikationen
- 4) Herstellungsprozess

- 5) Produktqualitätskontrollsystem (einschließlich interner Inspektionsstandards und organisatorischer Einrichtung der Inspektionsabteilung)
- 6) Produktqualitätssicherungssystem (einschließlich Verfahren zur Bearbeitung von Schadensfällen)
- 7) Produktlagermethode
- 8) Verpackungs-, Verpackungs- und Kennzeichnungsverfahren
- 9) Serviceaufzeichnungen
- 10) Andere Dokumente, die von ClassNK als notwendig erachtet werden

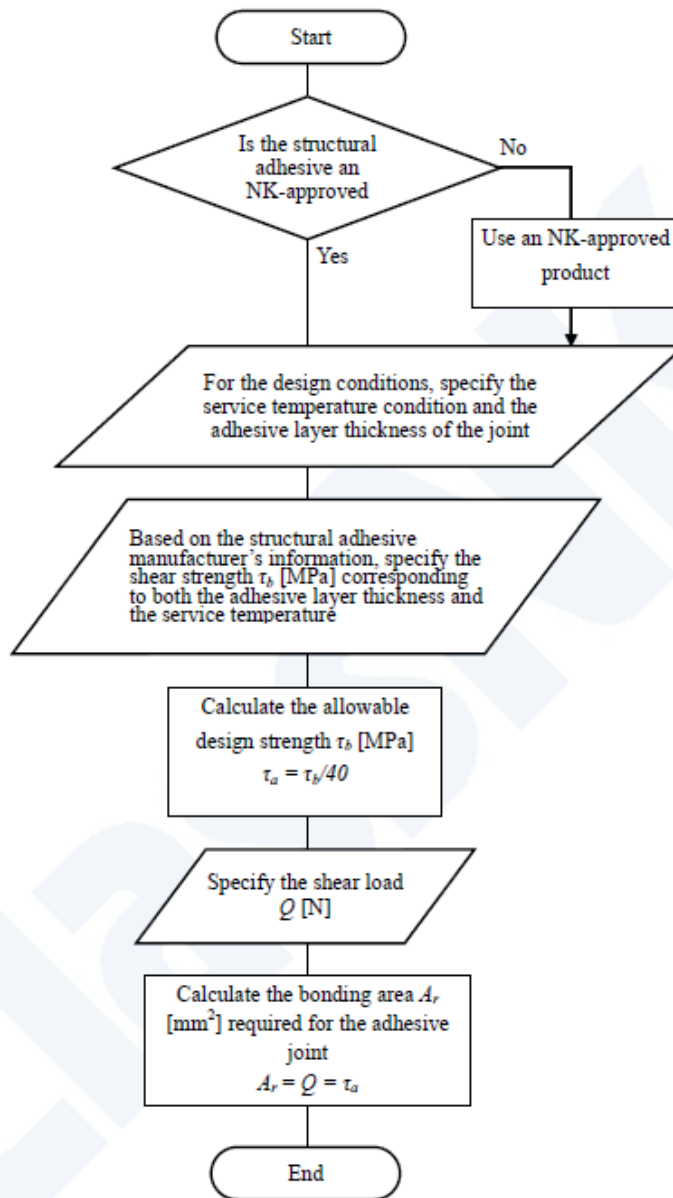
Die Liste der von ClassNK für Strukturklebstoffe geforderten Tests sowie die Testverfahren, die eingehalten werden müssen, sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

	Tests	Procedure/ Standard
a)	Density	Density cup method or the pycnometry method specified in <i>JIS K6833-1(2008)</i>
b)	Viscosity	Measurement method specified in <i>JIS K6833-1(2008)</i>
c)	Glass Transition Temperature	Differential thermal analysis or the Differential scanning calorimetry specified in <i>JIS K7121 (1987)</i>
d)	Durometer hardness	<i>JIS K7215(1986)</i>
e)	Cure shrinkage	Measurement method of moulding shrinkage specified in <i>JIS K6911(2006)</i> or that of cure shrinkage specified in <i>JIS K6024(2008)</i> .
f)	Lap shear strength	<i>JIS K6850(1999)</i>
g)	Lap shear fatigue strength	<i>JIS K6864(1999)</i> . The test load is to be periodically applied at a maximum stress of 3.5MPa and a stress ratio of 0.1 for 10^6 cycles.
h)	Peel strength	<i>JIS K6854-3(1999)</i> . The test speed is to be 100mm/min.

Tabelle 16: Prüfprogramm strukturelle Klebstoffe ClassNK

Designprozedur

Die ClassNK-Richtlinie zur Verwendung von Strukturklebstoffen bietet auch eine Berechnungsmethode, die angepasst werden kann, um die zulässige Beanspruchung und die Klebfläche für bestimmte Anwendungen zu bestimmen. Dies ist in Kapitel 3 der Richtlinien aufgeführt. Ein Flussdiagramm, das dieses Verfahren zusammenfasst, ist in Abbildung 27 dargestellt.



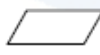
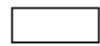

-  : Data input (designer collects information on the structural adhesive, etc. and specify the data to be input for the following calculations)
-  : Designer performs processing such as calculation
-  : Judgment (designer makes a judgment according to the situation)

Abbildung 27: Designprozedur strukturelle Klebstoffe ClassNK

E. Literaturverzeichnis

- (IMO), International Maritime Organization. (1974, as amended). *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)*.
19. Kolloqium: *Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik*. (18. 12 2019). Von <https://dechema.de/GFKT2019.html> abgerufen
- AB 2019 - *5th International Conference on Structural Adhesive Bonding*. (18. 12 2019). Von <https://paginas.fe.up.pt/~abconference/ab2019/> abgerufen
- Abdel Wahab (Ed.), M. (2015). *Joining composites with adhesives: theory and applications*. U.S.A.: DEStech Publications, Inc.
- Abdel Wahab, M. (2014). *Mechanics of Adhesives in Composite and Metal Joints*. Pennsylvania, USA: DEStech Publications .
- Abdel Wahab, M. M. (2012). Fatigue in Adhesively Bonded Joints: A Review. *ISRN Materials Science*. doi:10.5402/2012/746308
- ADHESION '19. (19. 12 2019). Von 14th International Triennial Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives: <https://www.iom3online.org/adhesion2019> abgerufen
- Alía, C., Arenas , J. M., Suárez, J. C., & Pinilla, P. (2020). Mechanical behaviour of vinylester adhesive joints used in laminated material for steel structures. *Marine Structures*, 69. doi:<https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.102687>
- Alia, C., Arenas, J. M., Suárez, J. C., & Pinilla, P. (2016). Mechanical behavior of polyurethane adhesive joints used in laminated materials for marine structures. *Ocean Engineering*, 113, S. 64-74.
- Allan, R. C., Bird, J., & Clarke, J. D. (1988). Use of adhesives in repair of cracks in ship structures. *Materials Science and Technology*, S. 853-859. doi:10.1179/mst.1988.4.10.853
- American Bureau of Shipping. (2019). *ABS Rules for Materials and Welding*.
- American Bureau of Shipping. (September 2019). *Composite Repairs of Steel Structures and Piping*.
- Arenas, J. M., Alía, C., Narbóna, J. J., & et el. (2013). Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium–composite material bonding. *Composites Part B: Engineering*, 1, S. 417-423.
- Arouche, M. M., Budhe , S., Teixeira de Freitas, S., Banea, M. D., & de Barros, S. (2018). Effect of moisture on the adhesion of CFRP-to-steel bonded joints using peel tests. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.
- Bandeira, C. F., Kenedi, P. P., Souza, L. F., & de Barros, S. (2018). On the use of thermographic technique to assess the fatigue performance of bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, S. 137-142.
- Banea, M., & da Silva, L. (2009). Adhesively bonded joints in composite materials: An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*.
- Bekkers, B.-J., & Custers, K. (kein Datum). ADHESION: Lessons learned about adhesive bonding in ship structures. *HISWA Symposium*.

- Blumentritt, B., Glück, N., & Flügge, W. (2019). Halterungen im Unterwasserbereich klebtechnisch fügen (Teil 1). *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 63(6), S. 42-47.
- Blumentritt, B., Glück, N., & Flügge, W. (2019). Halterungen im Unterwasserbereich klebtechnisch fügen (Teil 2). *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 63(7-8), S. 42-47.
- Bordes, M., Davies, P., Cognard, J.-Y., Sohier, L., Sauvant-Moynot, V., & Galy, J. (2009). Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(6), S. 595-608.
- Borrie, D., Liu, H., Zhao, X. L., Singh Raman, R. K., & Bai, Y. (2015). Bond durability of fatigued CFRP-steel double-lap joints pre-exposed to marine environment. *Composite Structures*, 131, S. 799-809.
- Boutar, Y., Naïmi, S., Mezlini, S., & et al. (2018). Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesivethickness. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, S. 143-152.
- Brede, M., Klapp, O., Nagel, C., Wulf, A., Reinert, T., & Exner, S. (2003). Mit Klebstoffen konstruieren: „easy-to-use“-Dimensionierung im Schiffbau. *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 47(7-8), S. 14-17.
- Budhe, S., Banea, M. D., de Barros, S., & da Silva, L. F. (2017). An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 72, S. 30-42.
- Bureau Veritas . (May 2019). *VeriSTAR News Offshore*. Von http://www.veristarnews.com/en/may-2019-offshore/structural-bond-strength-jip-gets-underway_2504.html abgerufen
- Bureau Veritas. (2015). *NI613 Guidance Note on Adhesive Joints and Patch Repair*.
- Bureau Veritas. (July 2018). *NR 320 - Certification Scheme of Materials and Equipment for the Classification of Marine Units*.
- Bureau Veritas. (November 2018). *NR 546 - Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey*.
- Cao, J., & Grenestedt, J. L. (2004). Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(9), S. 1091-1105.
- Çavdar, S., Teutenberg, D., Meschut, G., & et al. (2019). Stress-based fatigue life prediction of adhesively bonded hybrid hyperelastic joints under multiaxial stress conditions. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102483>
- Chen, Q., Guo, H., Hill, D. J., & Su, X. (2016). Fatigue durability assessment of automotive adhesive joints by an in situ corrosion fatigue test. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(15), S. 1-12.
- ClassNK. (December 2015). *Guideline for use of Structural Adhesives*.
- Costa, H. R., Reis, J. M., Souza, J. P., & et al. (2015). Experimental investigation of the mechanical behaviour of spot welding–adhesives joints. *Composite Structures*, 133, S. 847-852.
- Costa, M., Viana, G., da Silva, L. F., & Campilho, R. D. (2016). Environmental effect on the fatigue degradation of adhesive joints: A review. *The Journal of Adhesion*, 93(1-2: Papers from the 3rd Luso-Brazilian Conference on Adhesion and Adhesives (CLBA2016), Rio de Janeiro, Brazil, 25–27 January 2016), S. 127-146.

- da Costa, M. (2017). Development of a cohesive zone model for adhesive joints that includes humidity and fatigue degradation.
- da Silva, L. F., Pirondi, A., & Öchsner (Hrsg.), A. (2011). *Hybrid Adhesive Joints*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- Davies, P. (2012). Accelerated Aging tests for marine energy applications. In *Durability of Composites in a Marine Environment* (S. 165-178). Springer.
- Davies, P. (2017). Marine Industry. In L. F. da Silva, & et al. (Hrsg.), *Handbook of Adhesion Technology*. Springer International Publishing.
- Davies, P. (kein Datum). Tests with Moisture. In *Testing Adhesive Joints - Best Practices* (S. 323-327). Wiley - VCH.
- de Vicente, M. (2018). Numerical Optimization of Hybrid Panel Joints by Mixed Adhesive/Welded Method on Shipbuilding. *Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 3: Structures, Safety, and Reliability*. Madrid: ASME. doi:<https://doi.org/10.1115/OMAE2018-77028>
- Di Bella, G., Galtieri, G., Pollicino, E., & Borsellino, C. (2013). Mechanical characterization of adhesive joints with dissimilar substrates for marine applications. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 41, S. 33-40.
- DIN-Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS). (March 2016). *Adhesive bonding technology – Quality requirements for adhesive bonding processes*.
- DIN-Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS). (March 2016). *DIN 2304 - Adhesive bonding technology – Quality requirements for adhesive bonding processes*.
- Djeumen, E., Chataigner, S., Créac'hacdec, R., Sourisseau, Q., Quéméré, M. O., Court, J. P., . . . Sayed, F. (2020). Creep investigations on adhesively bonded fasteners developed for offshore steel structures. *Marine Structures*, 69. doi:<https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.102660>
- DNV GL. (April 2012). *DNV-RP-C301 Recommended Practice for Design, Fabrication, Operation and Qualification of Bonded Repair of Steel Structures*. DNVGL.
- DNV GL. (August 2017). *DNVGL-ST-C501 Composite Components*. DNVGL.
- DNV GL. (Dec. 2015). *Rotor Blades for wind turbines*.
- DNV GL. (March 2016). *Type Approval - Adhesive Systems*.
- DNV GL. (October 2015). *Rules for Classification of Ships*. DNVGL.
- Dodkins, A., Sheno, R., & Hawkins, G. (1994). Design of joints and attachments in FRP ships' structures. *Marine Structures*, 7(2-5), S. 365-398.
- Doobe, M. (2018). *Kunststoffe erfolgreich kleben*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Ebersold, F., Hesselbach, J., Winkel, A., Estephan, D., & Böhm, S. (2020). Erarbeitung eines Carbon Footprint für Klebanwendungen. *20. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik*. Würzburg: Dechema e.V.
- Enabling Qualification of Hybrid Structures for Lightweight and Safe Maritime Transport*. (kein Datum). Von <https://www.qualify-euproject.com/> abgerufen

- Enciso, B., Paz, E., Trujillo, C., Abenojar, J., & Martínez, M. A. (2019). Durability of Steel Joints with Ductile Adhesive Subjected to Fatigue Tests. In M. Abdel Wahab (Hrsg.), *Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Fatigue and Wear. FFW 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer.
- EURADH 2018. (18. 12 2019). Von 12th European Adhesion Conference: <https://paginas.fe.up.pt/~euradh2018/> abgerufen
- EURADH 2020. (18. 12 2019). Von 13th European Adhesion Conference: <http://www.euradh2020.com/> abgerufen
- Fibreship Project. (2020). Von <http://www.fibreship.eu/> abgerufen
- Fraunhofer IFAM. (2003). *Jahresbericht*.
- Fraunhofer IFAM. (kein Datum). *Weiterbildung Klebtechnik*. Von <https://www.weiterbildung.ifam.fraunhofer.de/de/klebtechnik.html>. abgerufen
- Fröck, L., Glück, N., & Nagel, C. (2015). Eine wirtschaftliche Alternative zum Schweißen - Metall-Leitungen im Schiffbau klebtechnisch fügen (Teil 1). *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 59(10), S. 42-47.
- Fröck, L., Glück, N., & Nagel, C. (2016). Den Bedingungen auf der Werft gewachsen - Metall-Leitungen im Schiffbau klebtechnisch fügen (Teil 4). *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 20(1-2), S. 36-41.
- Gaiotti, M., Ravina, E., Rizzo, C., & Ungaro, A. (2018). Testing and simulation of a bolted and bonded joint between steel deck and composite side shell plating of a naval vessel. *Engineering Structures*, 172, S. 228-238.
- GAK. (September 2019). Neue Vorhaben aus der klebtechnischen Forschung. *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 63(9), S. 42-47.
- Galvez, P., Abenojar, J., & Martinez, M. A. (2019). Durability of steel-CFRP structural adhesive joints with polyurethane adhesives. *Composites Part B: Engineering*, 165, S. 1-9.
- Galvez, P., Abenojar, J., & Martinez, M. A. (2019). Effect of moisture and temperature on the thermal and mechanical properties of a ductile epoxy adhesive for use in steel structures reinforced with CFRP. *Composites Part B: Engineering*, 176. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107194>
- Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik (Hrsg.). (2016). *Roadmap Klebtechnik - Dem Kleben Vertrauen schenken*. Frankfurt am Main: DECHEMA e.V.
- Gilmore, J. W., Losset, M. J., Murphy, S. D., & Walks, J. P. (2016). Expanded Adhesive Outfitting Applications. *SNAME-SMC-2016-097*. Bellevue, Washington, USA : The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Glück, N., & et al. (2018). Schiffbau. In M. (. Doobe, *Kunststoffe erfolgreich kleben*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Glück, N., & Fröck, L. (2017). Kleben statt schweißen. *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 61(6), S. 46-53.
- Golaz, B., Michaud, V., Lavanchy, S., & Månson, J.-A. E. (2013). Design and durability of titanium adhesive joints for marine applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 45, S. 150-157.

- Habenicht, G. (2009). *Kleben* (6. Ausg.). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Habenicht, G. (2016). *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei* (7. Ausg.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Han, X., Crocombe, A. D., Anwar, S. N., & Hu, P. (2014). The strength prediction of adhesive single lap joints exposed to long term loading in a hostile environment. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 55, S. 1-11.
- Hartwig, Andreas. (2020). Biobasierte Klebstoffe im Überblick. 20. *Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik*. Würzburg: Dechema e.V.
- Hartwig, Andreas; Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen. (2020). Biobasierte Klebstoffe im Überblick. 20. *Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik*. Würzburg: Dechema e.V.
- Hashim, S. A. (1999). Adhesive bonding of thick steel adherends for marine structures. *Marine Structures*, 12(6), S. Marine Structures.
- Hashim, S. A. (1999). Adhesive bonding of thick steel adherends for marine structures. *Marine Structures*, 12(6), S. 405-423.
- Hayashibara, H., Iwata, T., & Ando, T. (2019). Degradation of structural adhesive bonding joints on ship exposure decks. *Journal of Marine Science and Technology*.
- He, X. (2011). A review of finite element analysis of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, S. 248-264.
- Heshmati, M., Haghani, R., & Al-Emrani, M. (2016). Effects of moisture on the long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints used in bridges. *Composites Part B: Engineering*, 92, S. 447-462.
- Heshmati, M., Haghani, R., & Al-Emrani, M. (2017). Durability of bonded FRP-to-steel joints: Effects of moisture, de-icing salt solution, temperature and FRP type. *Composites Part B*, 119, S. 153-167.
- Horton, T., Spinks, G. M., & Isles, N. A. (1992). Structural adhesive performance in marine environments. *Polymer '91 International Symposium, Melbourne, 10-15 February 1991*. .
- IAA 2020 - 1st International Conference on Industrial Applications of Adhesives 2020. (18. 12 2019).
Von <https://web.fe.up.pt/~iaa2020/> abgerufen
- Industrieverband Klebstoffe e.V.: *Klebstoffe im Fahrzeugbau*. (2020). Von <https://www.klebstoffe.com/die-welt-des-klebens/anwendungsgebiete/fahrzeugbau.html> abgerufen
- IRT Jules Verne. (2015-2018). *Research Project VICOMTE*.
- Iwata, T., & Hayashibara, H. (2019). Durability and flammability evaluation of SGA structural adhesive joints consisting of a thick adhesive layer for shipbuilding. *The Journal of Adhesion*, 95(5-7), S. 1-18.
- Jarry, E., & Shenoi, R. A. (2006). Performance of butt strap joints for marine applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26(3), S. 162-176.

- Jiang, X., Kolstein, M. H., Bijlaard, F. S., & Qiang, X. (2015). Experimental investigation on mechanical behavior of FRP-to-steel adhesively-bonded joint under combined loading-part 1: Before hygrothermal aging. *Composite Structures*, 125, S. 672-686.
- Jiang, X., Qiang, X., Kolstein, M. H., & Bijlaard, F. S. (2015). Experimental investigation on mechanical behaviour of FRP-to-steel adhesively-bonded joint under combined loading – Part 2: After hygrothermal ageing. *Composite Structures*, 125, S. 687-697.
- Jurczak, W., & Jurczak, K. (2017). Possibilities of Belzona Adhesive Joints Application for Austenitic Steel Used in Ship Constructions. *Advances in Science and Technology*, 11(4), S. 134-140.
- Kinloch, A. J. (1987). *Adhesion and Adhesives*. Springer.
- Kleben statt nieten - Kühlfahrzeugproduktion. (2014). *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 58(4), S. 32-35.
- Kotsidis, E. A., Yarza, P., Tsouvalis, N. G., & de la Mano, R. (2015). Static and fatigue tests of hybrid composite-to-steel butt joints. *5th International Conference on Marine Structures (MARSTRUCT 2015)*, At Southampton, UK. doi:10.1201/b18179-82
- Li, H. C., Herszberg, I., Mouritz, A. P., Davis, C. E., & Galea, S. C. (2004). Sensitivity of embedded fibre optic Bragg grating sensors to disbonds in bonded composite ship joints. *Composite Structures*, 66(1-4), S. 239-248.
- Li, H., Zhang, J., Zhong Shen, H., & Li Wei, X. (2019). Multiaxial fatigue experiments and life prediction for silicone sealant bonding butt-joints. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 103.
- Lloyd's Register of Shipping. (July 2013). *Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials*.
- Mandolino, C., Lertora, E., & Gambaro, C. (2013). Effect of surface pretreatment on the performance of adhesive-bonded joints. *Key Engineering Materials*, 554-557, S. 996-1006.
- Matmatch. (18. 12 2019). Von <https://matmatch.com/> abgerufen
- McGeorge, D., & Weitzenböck, J. (2005). *BONDSHIP project guidelines*. Høvik: Det Norske Veritas.
- Meniconi, L. C., & et el. (2014). Experimental fatigue and aging evaluation of the composite patch repair of a metallic ship hull. *Applied Adhesion Science*, 2(27).
- Miyano, Nakada, & Sekine. (2004). Accelerated testing for long-term durability of GFRP laminates for marine use, *Composites Part B*. Elsevier.
- Miyano, Nakada, Ichimura, & Hayakawa. (2008). Accelerated testing for long-term strength of innovative CFRP laminates for marine use, *Composites Part B*. Elsevier.
- Miyano, Nakada, McMurray, & Muki. (1997). Prediction of Flexural Fatigue Strength of CRFP Composites under Arbitrary Frequency, Stress Ratio and Temperature. *Journal of Composite Materials*(31: 619).
- Monteiro, J., Akhavan-Safar, A., Carbas, R., & et el. (2019). Influence of mode mixity and loading conditions on the fatigue crack growth behaviour of an epoxy adhesive. *FFEMS Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. doi:<https://doi.org/10.1111/ffe.13125>
- Mouton, L., Paboeuf, S., Verhaeghe, C., & Elenbaas, M. (2019). Composite superstructure bonded to a Navy ship steel hull: Characterisation of the wave loads applied on the joint. *SAMPE Europe*. Nantes, France.

- Myslicki, S., Bletz-Mühldorfer, O., Diehl, F., Lavarec, C., Vallée, T., Scholz, R., & Walther, F. (2018). Fatigue of glued-in rods in engineered hardwood products — part I: experimental results. *The Journal of Adhesion*, 99(5-7), S. 675-701.
- Nagel, C., Brede, M., Fröck, L., & Glück, N. (2015). Dimensionierung nach analytischen Methoden - Metall-Leitungen im Schiffbau klebtechnisch fügen (Teil 3). *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 59(12), S. 38-43.
- Nagel, C., Brede, M., Fröck, L., & Glück, N. (2015). Kennwertermittlung und Validierung - Metall-Leitungen im Schiffbau klebtechnisch fügen (Teil 2). *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 59(11), S. 36-41.
- Niermann, D., Groß, A., Brede, M., & Hennemann, O.-D. (2005). Qualitätssicherung in der Klebtechnik (Teil 1): Konstruktionsphase. *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 49(7-8), S. 36-38.
- Osnes, H., & McGeorge, D. (2009). Experimental and analytical strength analysis of double-lap joints for marine applications. *Composites Part B: Engineering*, 40(1), S. 29-40.
- Osnes, H., Guthu, G. O., & McGeorge, D. (2011). Strength of bonded overlap composite joints in marine applications. In P. Camanho, & L. Tong (Hrsg.), *Composite Joints and Connections - Principles, Modelling and Testing* (S. 399-422). Woodhead Publishing.
- Özes, Ç., & Neşer, N. (2015). Experimental Study on Steel to FRP Bonded Lap Joints in Marine Applications. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Paboeuf, S., Durand, S., Favry, A., Billaudeau, E., Casari, P., & Mouton, L. (2018). Methodology for consideration of ageing in the design of tidal turbine blades. *ECCM*. Athens, Greece.
- Paillusseau, C., ERROTABEHERE, X., SAYED-AHMAD, F., Mouton, L., & Cholley, J. M. (kein Datum). Gamechanging Structural Repair Solution for FPSO. *Offshore Technology Conference*. Brazil.
- Possart, W., & Brede, M. (2018). *Adhesive Joints - Ageing and Durability of Epoxies and Polyurethanes*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Pröbster, M. (2013). *Elastisch Kleben*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Rahmani, A., & Choupani, N. (2019). Experimental and numerical analysis of fracture parameters of adhesively bonded joints at low temperatures. *Engineering Fracture Mechanics*, 207, S. 222-236.
- RAMSSES Project*. (2020). Von <https://www.ramsses-project.eu/> abgerufen
- Rasche, M. (2012). *Handbuch Klebtechnik*. München: Carl Hanser Verlag.
- Reisgen, U., & Stein, L. (2016). *Grundlagen der Fügetechnik - Schweißen, Löten und Kleben* (Bd. 161). Düsseldorf: DVS Media.
- Roland, F., Manzon, L., Kujala, P., Brede, M., & Weitzenböck, J. (2004). Advanced Joining Techniques in European Shipbuilding. *Journal of Ship Production*, 3, S. 200-210.
- Roy, A., Nadot, Y., & Casari, P. (2008). ADHESIVE BONDING FOR STRUCTURAL MARINE APPLICATIONS. *RINA - International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts, Papers* (S. 133-138). The Royal Institution of Naval Architects .
- Schliekelmann, R. (1972). Kleben von Stahl, Merkblatt 382, Düsseldorf, 1970. In *Metallkleben-Konstruktion und Fertigung in der Praxis*. DVS Düsseldorf: Stahl-Informationszentrum (Hrsg.).

- Schneider, B., Beber, V. C., Schweer, J., Brede, M., & Mayer, B. (2018). An experimental investigation of the fatigue damage behaviour of adhesively bonded joints under the combined effect of variable amplitude stress and temperature variation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, S. 41-49.
- Scott Bader. (11. October 2017). *Scott Bader*. Von <https://www.scottbader.com/news/scott-baders-structural-adhesives-gain-classnk-certificates-approval-steel-gfrp-applications-ship-building-industry/> abgerufen
- Shahani, A. R., & Pourhosseini, S. M. (2018). The effect of adherent thickness on fatigue life of adhesively bonded joints. *FFEMS Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. doi:<https://doi.org/10.1111/ffe.12931>
- Shenoi, R. A., & Hawkins, G. L. (1992). Influence of material and geometry variations on the behaviour of bonded tee connections in FRP ships. *Composites*, 23(5), S. 335-345.
- Shenoi, R. A., & Violette, F. L. (1990). A Study of Structural Composite Tee Joints in Small Boats. *Journal of Composite Material*, 24(6), S. 644-666.
- Shishesaz , M., & Hosseini , M. (2018). Effects of joint geometry and material on stress distribution, strength and failure of bonded composite joints: an overview. *The Journal of Adhesion*. doi:10.1080/00218464.2018.1554483
- Sousa, J. M., Correia, J. R., & Cabral-Fonseca, S. (2018). Some permanent effects of hygrothermal and outdoor ageing on a structural polyurethane adhesive used in civil engineering applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84, S. 406-419.
- Speth, D. R., Ping Yang, Y., & Ritter, G. W. (2010). Qualification of adhesives for marine composite-to-steel applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2, S. 55-62.
- Succio, D., Rizzuto, E., Gambaro, C., & Lertora, E. (2015). Bonded joints in shipbuilding: A technological approach to the characterization of actual performances. In C. Guedes Soaras, & T. A. Santos (Hrsg.), *Maritime Technology and Engineering* (Bd. 1). London: Taylor & Francis Group.
- Teixeira de Freitas, S., Banea, M. D., Budhe, S., & de Barros, S. (2017). Interface adhesion assessment of composite-to-metal bonded joints under salt spray conditions using peel tests. *Composite Structures*, 164, S. 68-75.
- Tighe, R. C., Dulieu-Barton, J. M., & Quinn, S. (2018). Infrared Techniques for Practical Defect Identification in Bonded Joints. *Experimental Techniques*, 2, S. 121-128.
- Tomlinson, S., & Lopez-Anido, R. (2019). Comparison of Surface Treatments for Secondarily Bonded Joints of Marine Grade Composites. *Materials Performance and Characterization*, 8(1), S. 122-134. doi:<https://doi.org/10.1520/MPC20180085>
- Valenza, A., Fiore, V., & Fratini, L. (2011). Mechanical behaviour and failure modes of metal to composite adhesive joints for nautical applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(5-8), S. 593-600.
- Viana, G., Costa, M., Banea, M. D., & da Silva, L. F. (2016). A review on the temperature and moisture degradation of adhesive joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 231(5), S. 488-501.

- Wacker, G., Brügge, D., Fach, K., & Franzelius, W. (2004). Theory and practice: Requirements for adhesive bonding in marine structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 218(4), S. 217-226.
- Wang, X., Mieth, U., & Cappelletti, A. M. (2004). Numerical methods for design of bonded joints for ship structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 218(4), S. 247-258.
- Waugh, R. C. (2014). Development of infrared techniques for practical defect identification in bonded joints. *Thesis*.
- Weitzenböck (Hrsg.), J. (2012). *Adhesives in Marine Engineering*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Wiegard, B., Ehlers, S., Klapp, O., & Schneider, B. (2018). Bonded window panes in strength analysis of ship structures. *Ship Technology Research*, 65(2), S. 102-121.
- Yang, Y. P., Ritter, G., & Speth, D. (2011). Finite Element Analyses of Composite-to-Steel Adhesive Joints. *Advanced Materials & Processes*, 169(6), S. 24-28.
- Yu, Q.-Q., Gao, R.-X., Gu, X.-L., Zhao, X.-L., & Chen, T. (2018). Bond behavior of CFRP-steel double-lap joints exposed to marine atmosphere and fatigue loading. *Engineering Structures*, 175, S. 76-85.
- Zhang, F., Yang, X., Wang, H.-P., & et al. (2013). Durability of adhesively-bonded single lap-shear joints in accelerated hygrothermal exposure for automotive applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, S. 130-137.