Schlussbericht

zum Forschungsvorhaben:

„Untersuchungen zum Einsatz moderner mechanischer Fügeverfahren für ausgewählte Montageaufgaben im Schiffbau“

Förderkennzeichen: 03SX142

Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie

Erarbeitet durch: Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Fertigungstechnik, A.-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

Dr.-Ing. Knuth-Michael Henkel

Dipl.-Wirt. Ing. Ben Becker

Dipl.-Ing. Torsten Heller

Prof. Dr.-Ing. Martin-Christoph Wanner

Unterstützt durch: Meyerwerft Papenburg / Neptun Reparaturwerft Rostock

Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & CO. KG

Laufzeit: 01.05.2002 - 31.12.2004

Rostock, August 2005

Inhaltsverzeichnis

1 Kurze Darstellung 3
1.1 Aufgabenstellung 3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 9
1.4.1 Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden 9
1.4.2 Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste 9
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 10
2 Eingehende Darstellung 11
2.1 Erzielte Ergebnisse 11
2.1.1 Ergebnisse des AP 111 11
2.1.2 Ergebnisse des AP 112 25
2.1.3 Ergebnisse des AP 121 29
2.1.4 Ergebnisse des AP 122 35
2.1.5 Ergebnisse des AP 211 37
2.1.6 Ergebnisse des AP 212 39
2.1.7 Ergebnisse des AP 221 40
2.1.8 Ergebnisse des AP 222 43
2.1.9 Ergebnisse des AP 311 44
2.1.10 Ergebnisse des AP 312 53
2.1.11 Ergebnisse des AP 321 56
2.1.12 Ergebnisse des AP 322 60
2.1.13 Ergebnisse des AP 411 67
2.1.14 Ergebnisse des AP 412 70
2.1.15 Ergebnisse des AP 421 71
2.1.16 Ergebnisse des AP 422 74
2.1.17 Ergebnisse des AP 430 76
2.2 Voraussichtlicher Nutzen 76
2.3 Paralleler Fortschritt anderer Stellen auf dem Forschungsgebiet 77
2.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse 78
3 Zusammenfassung der Ergebnisse 79

Literaturverzeichnis 81
Abbildungsverzeichnis 85
Tabellenverzeichnis 88

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Zielstellung dieses Vorhabens war die Ermittlung und Untersuchung schiffbaulicher Anwendungen, in denen das Schweißen als Fügeverfahren durch alternative mechanische Verfahren substituiert und damit eine Beseitigung der prinzipbedingten Nachteile des Schweißens vorgenommen werden kann. Es werden insbesondere schiffbauliche Montageprozesse in der Ausrüstung (Bild 1) für konventionelle Platte–Profil-Verbindungen und für lasergeschweißte Sandwichpaneele untersucht. Hierbei ist der Nachweis zu führen, dass diese Verfahrenssubstitutionen geeignet sind, Vorteile in den Bereichen Produktivität und Qualität zu erreichen.

Für die das Projekt begleitenden Werften sollte ein Instrument geschaffen werden, um dort mechanische und kombinierte Fügetechnik im Schiffbau anzuwenden, wo erhebliche Effekte hinsichtlich Fertigungskosten erzielt werden können. Aufgrund dieser Randbedingungen lassen sich für das Vorhaben folgende Aufgaben definieren:

- Ermittlung von Kostensenkungspotentialen bei Nacharbeiten infolge Schweißen (z.B. Nachkonservierung) durch den Einsatz mechanischer / hybrider Fügeverfahren in ausrüstungsintensiven Schiffsbereichen (z.B. Maschinenraum, Decksbereich laserstrahlgeschweißter Sandwichpaneele, dünnwandiger Tragverbände),
- Ermittlung verbesserter Möglichkeiten zum Verbinden verschiedener Werkstoffkombinationen und zur konstruktiven Gestaltung von Bauteilen,
- Ermittlung der Möglichkeiten einer flexiblen Montage und einer Durchlaufzeitverringerung im Ausrüstungsbereich durch den Einsatz mechanischer / hybrider Fügeverfahren,
- Erarbeitung einer kurz-, mittel- und langfristigen Vorgehensweise im Schiffbau zum verstärkten Einsatz innovativer mechanischer / hybrider Fügeverfahren, insbesondere in der Ausrüstung.

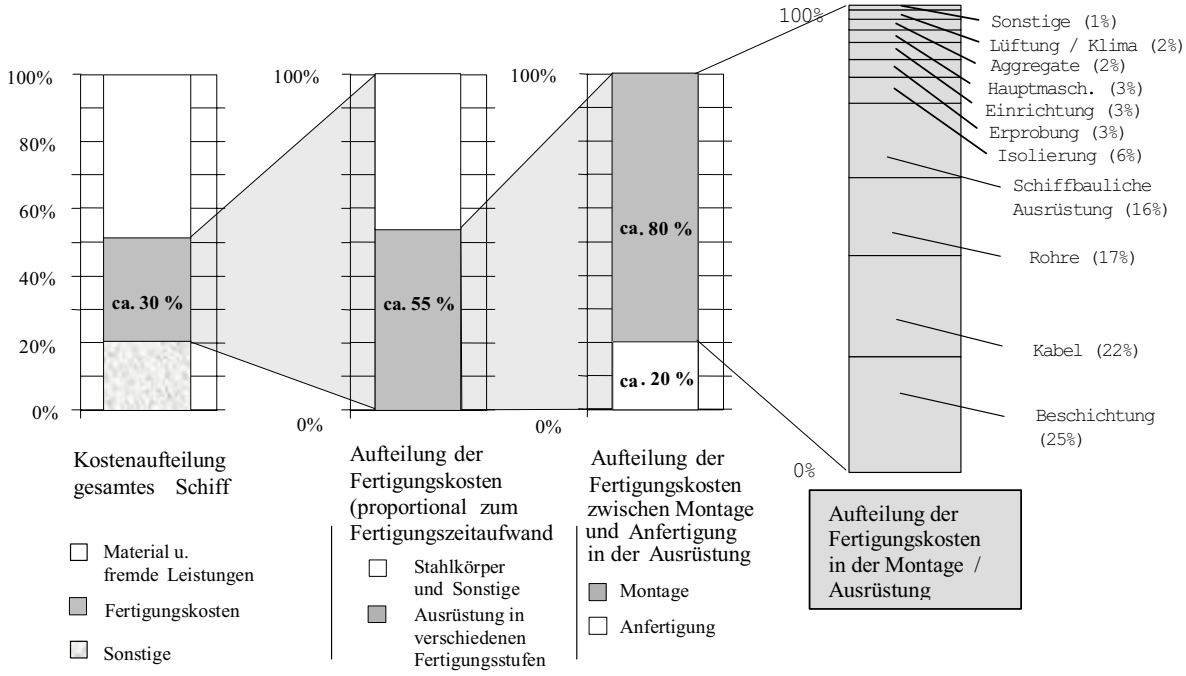


Bild 1: Durchschnittliche Kostenverteilung beim Bau von Containerschiffen [1]

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aufgrund der internationalen Wettbewerbssituation im Schiffbau existiert für die deutsche Schiffbauindustrie die permanente Aufgabe, Kostensenkungspotentiale speziell in den zeit- und personalintensiven Bereichen der Schiffsproduktion zu erschließen.
Fast die Hälfte dieser Fertigungskosten entfällt auf die Ausrüstung und Montage, z.B. von Kabel- und Rohrsystemen. In diesem Bereich der Fertigung hat sich in den letzten 50 Jahren das Schweißen in verschiedenen Verfahrensvarianten fest etabliert.
Trotz der Flexibilität und der ständigen Weiterentwicklung der Schweißverfahren konnten folgende Probleme prinzipbedingt nicht beseitigt werden:

- Zerstörung der bereits vorhandenen Konservierung, gefolgt von entsprechend aufwendigen manuellen Nacharbeiten bei nachträglichen Änderungen im Ausrüstungsbereich bzw. bei früh im Fertigungsprozess konservierten Sektionen, verbunden u.U. mit aufwendigen Sicherheitsvorkehrungen für Brandschutz während und nach dem Schweißen;

- Fügungen bestimmter Werkstoffpaarungen (Stahl-Aluminium, bestimmte Aluminiumlegierungen, Kunststoffe) sind nicht bzw. nur unzureichend möglich;

- Deformationen durch Wärmeeintrag und Richtaufwände entstehen, insbesondere bei lasergeschweißten Sandwichpaneelen ist die Beseitigung von Deformationen durch Richtarbeiten nur sehr schwer möglich.

Es liegt nahe, neben den herkömmlichen thermischen Verfahren im Bereich der Ausrüstung und Montage auf moderne mechanische Fügeverfahren, wie sie bereits erfolgreich in der der Automobilindustrie, im Schienenfahrzeugbau und anderen blechverarbeitenden Industriezweigen eingesetzt werden, zurückzugreifen.
Eine Analyse der speziellen Anforderungen des Schiffbaus an die eingesetzte Fügetechnik ist die Voraussetzung für eine Beurteilung und Auswahl alternativer Verfahren unter den Gesichtspunkten der Produktivität, Qualität und Wirtschaftlichkeit.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die bei der Beantragung dieses Vorhabens zugrunde gelegten Zeiten der einzelnen Arbeitspakete für die Durchführung des Vorhabens wurden während der Laufzeit konkretisiert und angepasst. Dies wurde innerhalb des Projektes in Zwischenberichten und Überarbeitungen der Arbeitspakete beschrieben.
Die Inhalte des Vorhabens beinhalteten im Wesentlichen die beiden Untersuchungskomplexe:
- Ausrüstung / Endmontage im Containerschiffbau mit dem Projektpartner Flensburger Schiffbau Gesellschaft
- Montage und Ausrüstung / Endmontage von Sandwichpaneelen und dünnwandigen Tragverbänden im Fahrgastschiffbau mit dem Projektpartner (Meyerwerft Papenburg / Neptun-Reparaturwerft Rostock).
Insbesondere wurde eine Modifizierung der Aufgaben des Untersuchungsbereiches „Sandwichpaneele“ vorgenommen, indem nach Absprache mit den Projektpartnern die Untersuchungen zur Ausrüstungsbauteilmontage bei Sandwichpaneelen / dünnwandigen Tragverbänden vor der Paneelmontage priorisiert wurden.
Die Übersichtsmatrix mit den Forschungskomplexen und den Arbeitspaketen (Bild 2), der Zeitplan (Bild 3) und eine Übersicht der jeweiligen Arbeitspakete (Bild 4, 5, 6) sind im Folgenden dargestellt:

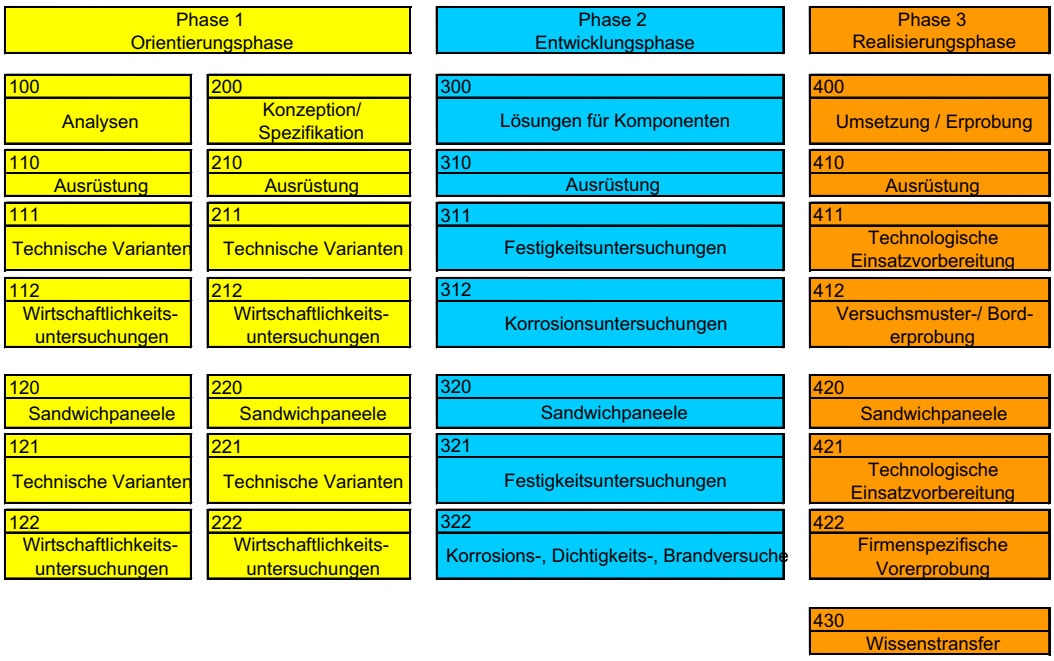


Bild 2: Übersichtsmatrix der Forschungskomplexe und Arbeitspakete

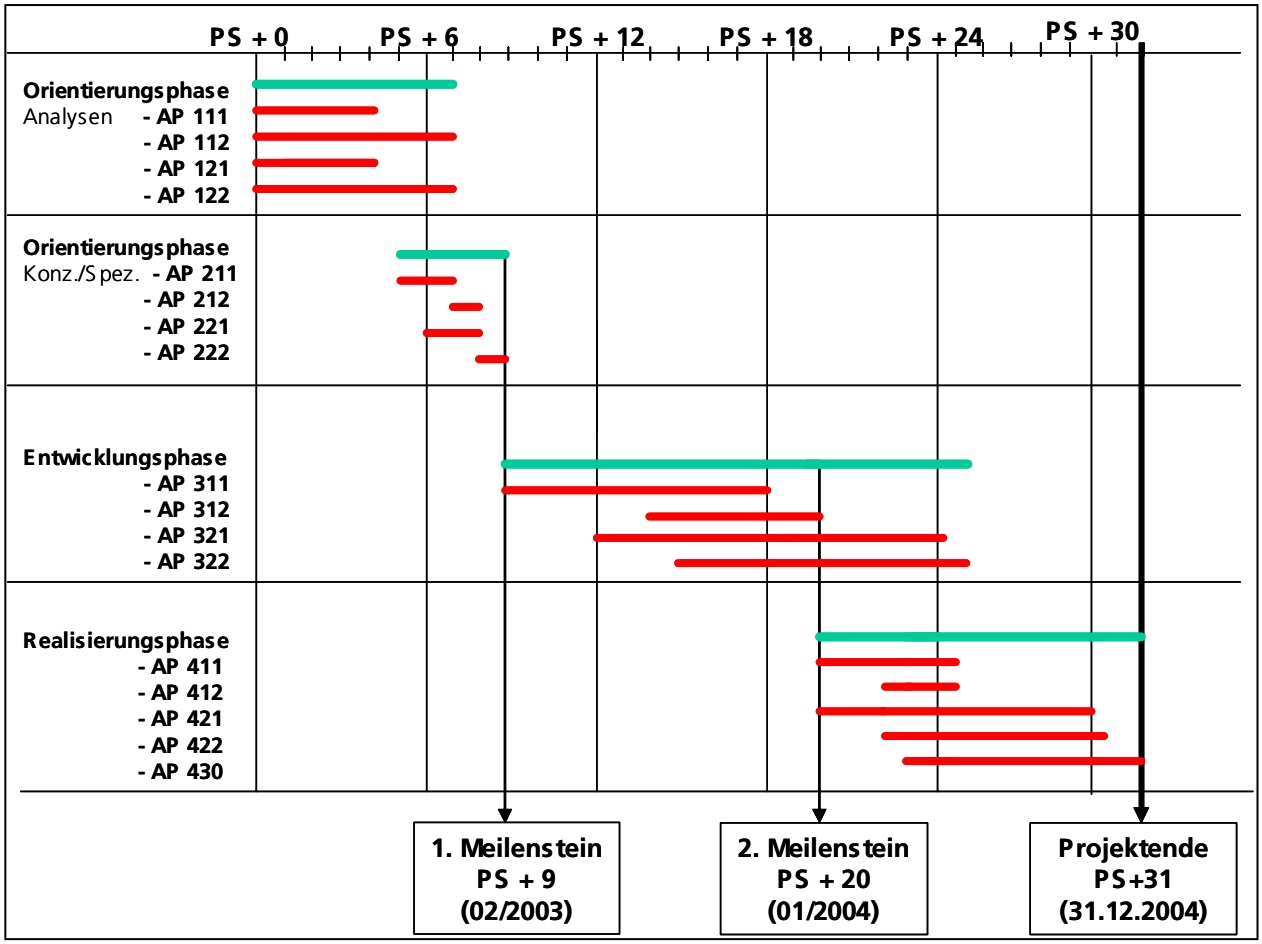


Bild 3: Zeitplan mit Meilensteinen

Phase 1 – Orientierungsphase: 100- Analysen / 200-Konzeption		
AP	**Aufgaben**	**Ergebnisse**
111	- Analyse der gegenwärtigen schiffbaulichen Montageaufgaben in der Ausrüstung unter dem Aspekt der grundsätzlichen Verfahrensauswahl von jetzt praktizierten und zukünftig möglichen Fügeprozessen - Prüfung der Eignung der Verbindungen für die Anwendung mechanischer Fügeverfahren sowie des Schweißens und Klebens bzw. Kombinationen von ihnen	- Ermittlung schiffbautechnischer konstruktiv-funktionaler Beurteilungskriterien für Fügeverbindungen in der Ausrüstung auf Grundlage der Analyse des Standes der Technik für relevante mechanische Fügeverfahren und spezielle Ermittlung der Einsatzmöglichkeiten der Klebverfahren im Schiffbau - Ermittlung der auf schiffbautypische Kriterien bezogenen Fügeverfahrenspezifiken für die evtl. einsatztauglichen Fügeverfahren
112	- Variantenvergleich bezüglich der Wirtschaftlichkeit thermischer, mechanischer und kombinierter Fügeverfahren in der Ausrüstung	- Ermittlung betriebswirtschaftlicher Bewertungskriterien relevanter Verfahren - soweit möglich, Quantifizierung über Kostensätze sowie Folgekosten wie Anpass- und Nacharbeiten
121	- Analyse der gegenwärtigen Aufgaben in der Verbindung von Sandwichpaneelen unter dem Aspekt der grundsätzlichen Verfahrensauswahl von jetzt praktizierten und zukünftig möglichen Fügeprozessen - Prüfung der Eignung der Verbindungen für die Anwendung mechanischer Fügeverfahren sowie des Schweißens und Klebens bzw. Kombinationen von ihnen	- Ermittlung schiffbautechnischer konstruktiv-funktionaler Beurteilungskriterien für Verbindungen von Sandwichpaneelen - Ermittlung der auf den Anwendungsfall bezogenen Fügeverfahrenspezifiken für die evtl. einsatztauglichen Fügeverfahren
122	- Variantenvergleich bezüglich der Wirtschaftlichkeit thermischer, mechanischer und kombinierter Fügeverfahren bei der Montage von Sandwichpaneelen	- Ermittlung betriebswirtschaftlicher Bewertungskriterien relevanter Verfahren - soweit möglich, Quantifizierung über Kostensätze sowie Folgekosten wie Anpass- und Nacharbeiten
211	- Auswahl der Anwendungen in der Ausrüstung, deren fügetechnische Optimierung den höchsten Effekt verspricht - Abstimmung von Verbindung und Peripherie aufeinander und Fügen von Ausrüstungselementen untereinander bzw. an die Musterbaugruppen	- Bestimmung des spezifischen Anpassungsbedarfes der einzusetzenden Fügeverfahren - Ermittlung praxisrelevanter Montagebedingungen durch Bestimmung von speziellen Forderungen der schiffbaulichen Anwendungen mittels Tests an Musterbaugruppen und Bewertung mit Industriepartnern
212	- Auswahl relevanter Anwendungen (Ausrüstung) für Entwicklungsphase (Tests) und Realisierungsphase (Umsetzung / Erprobung)	- Montage von ausgewählten Ausrüstungselementen an Musterbaugruppen: Spezifikation und Quantifizierung nach wirtschaftlichen Kriterien
221	- Auswahl der Fügeverfahren bei der Montage von Sandwichpaneelen, deren fügetechnische Optimierung den höchsten Effekt verspricht - Abstimmung von Verbindung und Peripherie aufeinander und Fügen von Sandwichpaneelproben untereinander	- Bestimmung des spezifischen Anpassungsbedarfes der einzusetzenden Fügeverfahren - Ermittlung praxisrelevanter Montagebedingungen durch Bestimmung von speziellen Forderungen der schiffbaulichen Anwendungen mittels Tests an Paneelproben
222	- Auswahl relevanter Fügeverfahren (Sandwichpaneelmontage) für Entwicklungsphase (Tests) und Realisierungsphase (Umsetzung / Erprobung)	- Spezifikation und Quantifizierung nach wirtschaftlichen Kriterien: Montage von ausgewählten Sandwichpaneelverbindungen

Bild 4: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 1 - Orientierungsphase

Phase 2 – Entwicklungsphase		
AP	**Aufgaben**	**Ergebnisse**
311	- Ermittlung der Tragverhaltenseigenschaften von mechanisch gefügten Ausrüstungselementproben durch statische und dynamische Festigkeitsuntersuchungen und exemplarische Rechnungen	- Festlegung der Parameter für Festigkeitsuntersuchungen der ausgewählten Anwendungsbeispiele entsprechend der Forderungen der Klassifikationsgesellschaften und anderer Industriebranchen - Herstellung von geeigneten Probenformen mit Berücksichtigung von Werkstoff, Verbinderart, Oberfläche etc. und Realisierung exemplarischer analytischer bzw. numerischer Rechnungen - Durchführung und Auswertung statischer und dynamischer Tragverhaltensuntersuchungen an Ausrüstungselementproben
312	- Ermittlung der Korrosionseigenschaften von mechanisch gefügten Ausrüstungselementproben durch schiffbauspezifische Tests	- Festlegung der Parameter für Korrosionsuntersuchungen der ausgewählten Anwendungsbeispiele entsprechend der Forderungen der Klassifikationsgesellschaften - Herstellung von geeigneten Probenformen und Realisierung der Tests - Vergleich der ermittelten Ergebnisse mit ähnlichen Ergebnissen aus Korrosionsuntersuchungen mechanisch gefügter Verbindungen in anderen Industriezweigen
321	- Ermittlung der Tragverhaltenseigenschaften von mechanisch bzw. kombiniert gefügten Sandwichpaneelproben durch statische und dynamische Festigkeitsuntersuchungen - Ermittlung der Tragverhaltenseigenschaften von mechanisch gefügten Verbindungen von Haltern an dünnwandigen Tragverbänden	- Festlegung der Parameter für Festigkeitsuntersuchungen entsprechend der Forderungen der Klassifikationsgesellschaften / Werft und anderer Industriebranchen - Herstellung von geeigneten Probenformen - Durchführung und Auswertung statischer und dynamischer Tragverhaltensuntersuchungen an Sandwichpaneelproben - Festlegung der Parameter für Festigkeitsuntersuchungen entsprechend der Forderungen der Klassifikationsgesellschaften / Werft - Herstellung von geeigneten Probenformen - Durchführung und Auswertung statischer und dynamischer Tragverhaltensuntersuchungen an dünnwandigen Tragverbänden
322	- Ermittlung der Korrosions-, Dichtigkeits- und Brandeigenschaften von mechanisch bzw. kombiniert gefügten Sandwichpaneelproben durch schiffbauspezifische Tests - Ermittlung der Korrosions-, Dichtigkeitseigenschaften an dünnwandigen Tragverbänden	- Festlegung der Parameter für Korrosions-, Dichtigkeits- und Branduntersuchungen für Sandwichpaneelproben bzw. Sandwichpaneele entsprechend der Forderungen der Klassifikationsgesellschaften / Werft - Vergleich der ermittelten Ergebnisse mit ähnlichen Ergebnissen mechanisch bzw. kombiniert gefügter Verbindungen in anderen Industriezweigen - Festlegung der Parameter für Korrosions- und Dichtigkeitsuntersuchungen für dünnwandige Tragverbände entsprechend der Forderungen der Klassifikationsgesellschaften / Werft - Herstellung von geeigneten Probenformen und Realisierung von Korrosions-, Dichtigkeitstests (Proben) - Vergleich der ermittelten Ergebnisse mit ähnlichen Ergebnissen mechanisch bzw. kombiniert gefügter Verbindungen in anderen Industriezweigen

Bild 5: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 2 - Entwicklungsphase

Phase 3 – Realisierungsphase		
AP	**Aufgaben**	**Ergebnisse**
411	- Aufbereitung der während der Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse, um die praktische Anwendung mechanisch gefügter Ausrüstungselemente mit den notwendigen technischen Daten zu ermöglichen	- Aufbereitung der Ergebnisse in Form von technischen Dokumentationen, um unter Berücksichtigung der Spezifik des Anwendungsfalles eine unmittelbare technologische Einsatzvorbereitung zu ermöglichen
412	- Überprüfung der während der Untersuchungen ermittelten Ergebnisse durch Erprobung der Montage von Ausrüstungselementen an Versuchsmustern	- Ermittlung, Aufbereitung und Auswertung der Versuchsmustererprobungsergebnisse mit den Projektpartnern und Vergleich der ermittelten Ergebnisse mit ähnlichen Tests mechanisch gefügter Verbindungen in anderen Industriezweigen
421	- Aufbereitung der während der Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse, um die mechanisch bzw. kombiniert gefügten Anwendungen bei Sandwichpaneelen / dünnwandigen Tragverbänden in der Praxis durch die Bereitstellung der notwendigen technischen Daten zu ermöglichen	- Aufbereitung der Ergebnisse in Form von technischen Dokumentationen, um unter Berücksichtigung der Spezifik des Anwendungsfalles eine unmittelbare technologische Einsatzvorbereitung zu ermöglichen
422	- Überprüfung der während der Untersuchungen ermittelten Ergebnisse durch Erprobung an Sandwichpaneelen / dünnwandigen Tragverbänden	- Ermittlung, Aufbereitung und Auswertung der Vorerprobungsergebnisse und Vergleich der ermittelten Ergebnisse mit ähnlichen Tests mechanisch gefügter Verbindungen in anderen Industriezweigen
430	- Wissenstransfer zur methodischen Herangehensweise der Einsatzvorbereitung und Einführung mechanischer und kombinierter Fügetechniken in die Ausrüstung und andere Bereiche im Schiffbau	- Durchführung eines Symposiums mit allen interessierten Schiffbau- und Zulieferunternehmen zur Vorstellung der Vorhabensergebnisse und Diskussion der Möglichkeiten der kurz-, mittel- und langfristigen Umsetzung und der Ermittlung des Bedarfes weiterführender Forschung auf diesem Forschungsgebiet

Bild 6: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 3 - Realisierungsphase

Der Bewilligungszeitraum für das Projekt wurde durch den Projektträger ohne Änderung der Kosten um 7 Monate bis zum 31. Dezember 2004 verlängert.
Die Bearbeitung des Projektes erfolgte weitestgehend entsprechend der geplanten Vorgehensweise. Als Grundlage für die Analysen dienten je ein Referenzschiffstyp der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft (Ro-Ro-Schiff) und der Meyerwerft / Neptun-Reparaturwerft Rostock (Binnenfahrgastschiff), die im Vorhaben untersuchte Thematik ist allerdings im Wesentlichen auch auf andere Schiffstypen, z.B. Containerschiffe, übertragbar.
In der Analysephase konnten die mit den bisherigen Fügevorgängen verknüpften Kostenstrukturen i.d.R. nur indirekt ermittelt werden, so dass bei den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen häufig Abschätzungen vorgenommen wurden. Bei den technischen Analysen und Erprobungen wurden i.d.R. eigene Fertigungs- und Laboreinrichtungen genutzt.
Nach Fertigstellung des Abschlußberichtes wird durch die Forschungsstelle ein Seminar organisiert, dass sich an Reedereien, Werften, Zulieferer und Dienstleister und Forschungseinrichtungen wendet. Dabei soll über die Ergebnisse des Vorhabens informiert werden, um Schwerpunkte weiterer Entwicklungen hinsichtlich mechanischer / hybrider Fügeverfahren mit den deutschen Werften abzustimmen und damit weiterführende FuE-Vorhaben zu initiieren.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden

Innerhalb des Vorhabens wurden Analysen auf den Werften vorgenommen und Laboruntersuchungen durchgeführt. Das Ermitteln und Bewerten von Lösungen erfolgte ausgehend von den Analysen und vom Stand der Technik. Die Verwertung der Analysedaten wurde durch die Werften genehmigt. Die experimentellen Untersuchungen wurden ausschließlich durch die Forschungsstelle durchgeführt, dazu wurden insbesondere technische Einrichtungen und Kenntnisse genutzt, die in der Forschungsstelle durch die seit 1992 existierende Arbeitsgruppe „Mechanische Fügetechnik“ existieren.

1.4.2 Angaben des Standes der Technik, der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Es wurden neben instituts- und universitätsinternen Materialien insbesondere folgende Informations- und Dokumentationsdienste genutzt:

- Datenbanken TEMA / FIZ Technik, INSPEC, GBV
- FhG Bibliothek,
- Alta Vista, Depanet u.a. Online-Suchdienste

Der überwiegende Teil der Veröffentlichungen in der Fachliteratur beinhaltet Untersuchungen zu den mechanischen Fügetechniken

- Durchsetzfügen (z.B. [2]),
- Stanznieten (z.B. [3]) und
- Blindnieten (z.B. [4]).

Die Anzahl der Publikationen nahm Ende der 80-er Jahre und insbesondere in den 90-er Jahren stark zu, dabei wurde neben den traditionellen Einsatzgebieten der mechanischen Fügetechnik im Flugzeugbau (z.B. [5]) vor allem zu Anwendungen im Automobil- (z.B. [6]) und Schienenfahrzeugbau (z.B. [7]) veröffentlicht. Aussagen zu Anwendungen der mechanischen Fügetechnik im Schiffbau beschränken sich auf Einzelfälle insbesondere im Aluminiumbereich (z.B. [8]).
Neben einer Vielzahl von Beiträgen zur Anwendungsverbreiterung in o.g. und weiteren Industriezweigen (z.B. [9]) ist in den letzten Jahren der Trend zu systematischen Untersuchungen insbesondere im Durchsetzfüge- und Stanznietbereich zu verzeichnen. Dabei wurde u.a. die Beschichtungsproblematik bearbeitet, insbesondere wurden spezielle Anwendungen des Automobilbaus untersucht (z.B. [10, 11]). Der Bereich der Korrosion mechanisch gefügter Verbindungen ist relativ wenig beforscht und veröffentlicht worden. In [12] sind zu dieser Thematik Untersuchungen mit korrosiv beanspruchten Bauteilen realisiert worden, die insbesondere die Prüfung der Schwingfestigkeit bei gleichzeitiger Korrosionsbelastung beinhalteten. Sowohl bei diesen Untersuchungen als auch bei den Veröffentlichungen zum Verhalten von beschichteten mechanisch gefügten Blechen steht die Spezifik des Dünnblechbereiches (bis ca. 3 mm) mit entsprechender Material- und Beschichtungsauswahl im Vordergrund.
Seit Mitte der 90-er Jahre wurden hauptsächlich Tragverhaltenseigenschaften und ihre Verbesserung bei Variation und Optimierung von Verbindern, Materialien und Setzprozessen für mechanisch gefügte Verbindungen untersucht (z.B. [13]).
Im Vergleich zu den o.g. mechanischen Fügeverfahren existiert eine relativ geringe Anzahl von Veröffentlichungen zur Thematik Schließringbolzenverbindungen, deren Anzahl allerdings in den letzten Jahren erheblich zugenommen hat (z.B. [14]). Während in den 70-er und 80-er Jahren Ermittlungen zu Schließringbolzen insbesondere für den alternativen Einsatz zu Schraubverbindungen durchgeführt wurden (z.B. [15, 16]), sind in letzter Zeit z.B. Untersuchungen zur Verbesserung der Tragverhaltenseigenschaften dieser hochfesten Fügetechniken in Weiterführung von Blindnietuntersuchungen veröffentlicht (z.B. [17]).

Das hohe Tempo der Entwicklung kombinierter Fügeverfahren in den 90-er Jahren (z.B. [18]) hat den Einsatz dieser Techniken für spezielle Applikationen forciert (z.B. [19]). Seit einigen Jahren ist dadurch z.B. bei Automobil- und Schienenfahrzeugherstellern ein Verfahrensmix von Fügetechniken (Kleben, mechanisches Fügen, Schweißen und deren entsprechende Kombinationen) zu beobachten (z.B. [20, 21]). Im Schiffbau ist dieser Trend nur vereinzelt zu erkennen, bei Leichtbauanwendungen mit geringeren Blechdicken kommt es hier verstärkt zu Laseranwendungen(z.B. [22]).
In der Schiffbauindustrie selbst wird der Einsatz alternativer Fügetechniken zum Schweißen (Kleben, mechanisches Fügen) punktuell diskutiert, systematische Untersuchungen zum Kleben sind nur teilweise vorhanden (z.B. [21]). Aus der intensiven Forschungstätigkeit im Schiffbau bezüglich der Auslegung und der Belastung geschweißter Strukturen (z.B. [23, 24]) können die im Rahmen des vorliegenden Forschungsthemas zu berücksichtigenden Randbedingungen entnommen werden. In der Vergangenheit sind in der Schiffsfertigung / Ausrüstung nur im Marineschiffbau und dort insbesondere im Aluminiumbereich Anwendungen bekannt geworden. In EU-Projekten unter Federführung einer deutschen Großwerft wird das Fügen von Sandwich-Paneelen durch Schweißen und Kleben untersucht (z.B. [25]).
Eine Liste der verwendeten Fachliteratur, deren Auswertung auch Gegenstand der Arbeiten war, ist im Anhang enthalten. Weiterhin wurden Produktinformationen von Zulieferfirmen über Prospekte sowie über im Internet angebotene Web-Seiten bezogen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben den Projektpartnern Meyerwerft / Neptun Reparaturwerft Rostock und Flensburger Schiffbau-Gesellschaft erfolgte eine Zusammenarbeit des Lehrstuhles Fertigungstechnik mit der kooperierenden Fraunhofer-Einrichtung (Anwendungszentrum für Großstrukturen in der Produktionstechnik), mit anderen Forschungseinrichtungen und Zulieferern, die auf dem jeweiligen Gebiet der mechanischen / hybriden Fügetechnologien tätig sind.
Hierbei handelt es sich hochschulseitig um die in Deutschland auf dem Gebiet der mechanischen Fügetechnik tätigen Universitäten in Paderborn, Magdeburg, Chemnitz, Dresden, Hannover und Rostock. Im Rahmen der AiF werden eine Vielzahl von Aktivitäten über die europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung in Hannover unterstützt. Hier werden zwar überwiegend Vorhaben aus dem Automobil-, Schienenfahrzeug- und Stahlbau bearbeitet (z.B. [26, 27]), allerdings können methodische Ansätze bei der Einführung mechanischer / hybrider Fügeverfahren in den Schiffbau häufig übernommen werden.
Der Deutsche Verband für Schweißtechnik und verwandte Verfahren e.V. hat seit 1999 prinzipiell seine Aktivitäten auch auf die mechanische Fügetechnik erweitert. Die Untersuchungen des DVS in seinen Arbeitsgremien haben für die vorliegende Thematik eine hohe Relevanz, da z.B. bei der beanspruchungsgerechten Gestaltung von Ausrüstungselementen an der tragenden Schiffskonstruktion die Analysen und Auslegungen beim Einsatz der mechanischen Fügetechnik berücksichtigt werden müssen [28]. Die Forschungsstelle pflegt eine enge Zusammenarbeit mit dem entsprechenden DVS-Gremien (z.B. AG MF 3, 4) und der SLV Mecklenburg-Vorpommern. Desweiteren ist die Forschungsstelle in eine Vielzahl laufender forschungsseitiger Aktivitäten der Werften insbesondere im Rahmen der BMBF/AiF-Forschung eingebunden, deren Erkenntnisse in die Bearbeitung des vorliegenden Forschungsvorhabens einfließen konnten.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 Ergebnisse des AP 111

Analyse der gegenwärtigen schiffbaulichen Fügeaufgaben in der Ausrüstung auf Grundlage der gegenwärtig praktizierten Fügeprozesse

Im Brücken-, Stahl- und Schiffbau wurden Ende der 40-er Jahre die bis dahin vorherrschenden Vollniettechnologien durch das Schweißen abgelöst. Andere Bereiche der industriellen Fertigung (z.B. Flugzeugbau, LKW-Bau) setzten hingegen weiter auf mechanische Fügeverfahren und trieben deren kontinuierliche Weiterentwicklung voran.
In der Schiffskörperfertigung und Ausrüstung von Schiffen dominiert gegenwärtig das Fügeverfahren Schweißen. In den insbesondere zu untersuchenden ausrüstungsrelevanten Bereichen dominieren als Fügeverfahren folgende Schweißverfahren (Bild 7):

- Metallschutzgasschweißen, hier vor allem Metallaktivgasschweißen (MAG),
- Lichtbogenhandschweißen (Bild 7)
- Lichtbogenbolzenschweißen (Bild 7).

Bild 7: Schweißtechnische Fügeverfahren, die in der Ausrüstung dominieren: Metallschutzgasschweißen (Bild links), Lichtbogenhandschweißen (Bild mitte), Lichtbogenbolzenschweißen (Bild rechts)

Insbesondere in der Ausrüstung existieren eine Vielzahl einzelner, schwer automatisierbarer Fügeaufgaben für die Befestigung von Halterungen für Rohre, Kabel, Lüfter, Rahmen, Treppen usw. vor allem im Maschinenraumbereich (Bild 9).
Die Ausrüstung im Schiffbau entspricht kostenseitig z.B. beim Bau von Containerschiffen den Aufwendungen für die Stahlkörpermontage (siehe Bild 1). Bei der Eingrenzung der zu untersuchenden schiffbaulichen Ausrüstungsbereiche spielte die Erfassung möglichst großer Kostenblöcke eine große Rolle. Daher wurde als Schwerpunkt von Analysen und nachfolgenden Untersuchungen innerhalb der Ausrüstung der Bereich der Montage von Ausrüstungselementen gewählt, der kostenseitig deutlich vor der Anfertigung dominiert. Bei der weiteren Analyse wurden insbesondere folgende Bereiche betrachtet:

- Beschichtung (Endmontage),
- Kabelverlegung / -halterung (Endmontage),
- Rohrverlegung / -halterung (Endmontage),
- div. Halterungen für Lüfter, Treppen usw. (Endmontage)
- schiffbauliche Ausrüstung (Vormontage / Sektionsmontage).

Bild 8: Beispiele für die Anwendung schweißtechnischer Fügeverfahren in der Endausrüstung an Oberdeck für Halterungen von Kästen etc., vereinzelter Einsatz von Verschraubungen (Bilder rechts)

Bild 9: Beispiele für die Anwendung schweißtechnischer Fügeverfahren in der Endausrüstung im Maschinenraum / unter Deck an Rohr-/ Kabelhalterungen und Rahmenstrukturen

Der insgesamt größere Teil der Montageaufgaben in der Ausrüstung wird auf teil- oder endkonservierten Bauteiloberflächen realisiert, die mit zunehmenden Ausrüstungsgrad in unmittelbarer Nachbarschaft mit feuerklassenrelevanter Ausrüstung (z.B. Isolierungen, Kabel) stehen. Beim Einsatz von Schweißverfahren ergibt sich daraus ein erhöhter sicherheitstechnischer Aufwand sowie Nachkonservierungsarbeiten (Bild 8, 9). Mit speziellen schweißtechnischen Modifikationen, z.B. Reduzierung der Streckenenergie, können zwar Verbesserungen erzielt werden, die grundsätzlichen Probleme insbesondere bei der Nachkonservierung bleiben jedoch bestehen.
Entschärft tritt diese Problematik bei der schiffbaulichen Ausrüstung in der Vormontage und der Sektionsmontage auf. Da hier noch keine Endkonservierung vorgenommen wurde, kann der Beschichtungs-Primer i.d.R. problemlos überschweißt werden. Der Vorausrüstungsgrad kann allerdings nicht beliebig gesteigert werden, so dass z.B. Türzargen und Kabelhalter, die bei bestimmten Schiffstypen in der Vor- oder Sektionsmontage verbaut werden (Bild 10), bei

anderen Schiffstypen erst wieder in der Endmontage nach der Endkonservierung an die Schiffsstruktur gefügt werden können.

Bild 10: Beispiele für die Anwendung schweißtechnischer Fügeverfahren in der Sektionsmontage / Endausrüstung vor der Endkonservierung (Laschtöpfe Bild mitte, Kabelhalter Bild rechts), ggf. Einbau erst nach Endkonservierung möglich (Türzarge Bild links)

In dieser ersten Analysephase konnten bereits wesentliche Kriterien ermittelt werden, die in der schiffbaulichen Praxis, insbesondere in der Ausrüstung, die Auswahl des Fügeverfahrens bestimmen (Tabelle 1). Dabei werden im Laufe der weiteren Untersuchungen insbesondere die verwendeten Blechdickenbereiche des Grundmaterials für eine Systematik genutzt.

Wichtige Auswahlkriterien hinsichtlich des Einsatzes thermischer und alternativer Fügeverfahren in der Ausrüstung
➢ Blechdicke Grundmaterial (Stahl): > ca. 6mm – Standard-Tragstruktur < ca. 6mm – dünnwandige Tragstruktur / Sandwichpaneel
➢ Beschichtung Grundmaterial: ohne, Primer, Endkonservierung
➢ Güte / Art des Grundmaterials
➢ Zugänglichkeit der Montagestelle

Tabelle 1: Einteilung des Einsatzes von Fügeverfahren in der Ausrüstung nach Auswahlkriterien

Analyse der Eignung mechanischer Fügetechnologien für schiffbauliche Fügeaufgaben in der Ausrüstung

Das mechanische Fügen ist ein Sammelbegriff für verschiedene Verfahren aus den Gruppen „Fügen durch Umformen“ und „Fügen durch An- und Einpressen“ (DIN 8593). Im Rahmen des Vorhabens werden hauptsächlich die Verfahren aus der Gruppe „Fügen durch Umformen“ betrachtet.
Charakteristisch für die Fügeverfahren dieser Gruppe ist ein örtliches (bisweilen auch vollständiges) Kaltumformen der Fügeteile und / oder Hilfsfügeteile. Die Umformkräfte können mechanischer, elektromagnetischer oder anderer Art sein. Bei modernen mechanischen Fügeverfahren handelt es sich um Blindnieten, Schließringbolzen, Stanznieten, Clinchen (Bild 11) sowie loch- / gewindeformende Schrauben und das Bolzensetzen (Bild 12).
Mechanisch gefügte Verbindungen sind im Allgemeinen durch Formschluss und gegebenenfalls zusätzlichen Kraftschluss gegen ungewolltes Lösen gesichert. Die Schraubenverbindungen stellen daher in gewissem Sinne auch ein mechanisches Fügeverfahren dar, allerdings findet keine örtliche Umformung statt, wodurch z.B. Probleme bei der dynamischen Belastbarkeit auftreten können.

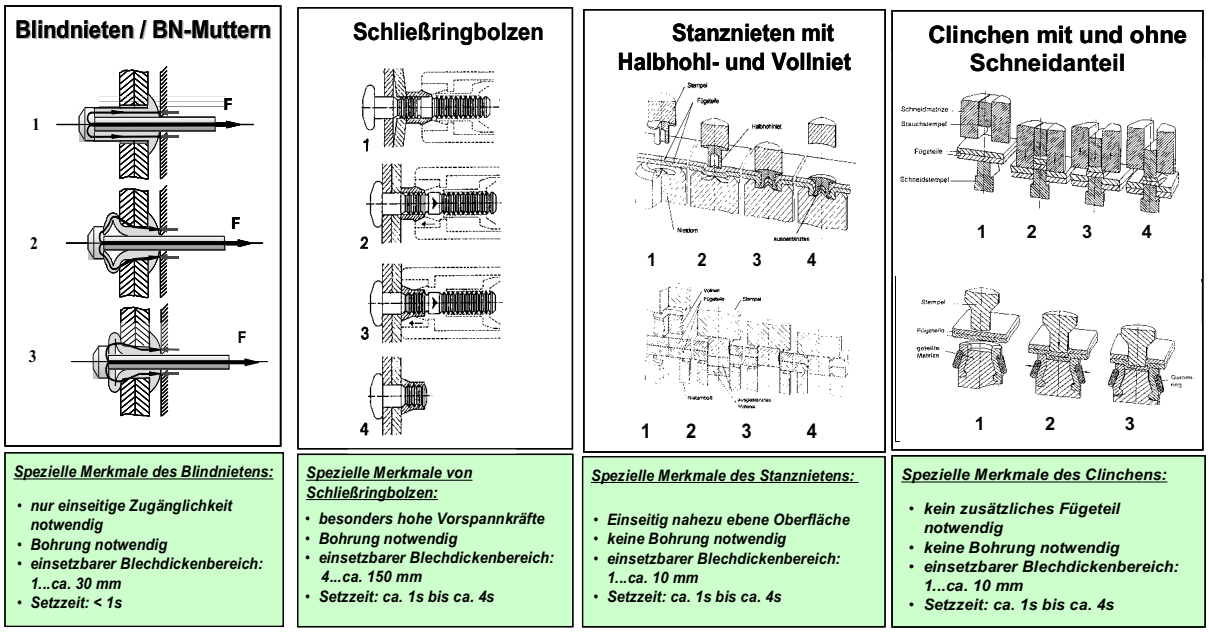


Bild 11: Verfahrensprinzip und Merkmale der Verfahren Blindnieten, Schließringbolzen, Stanznieten und Clinchen

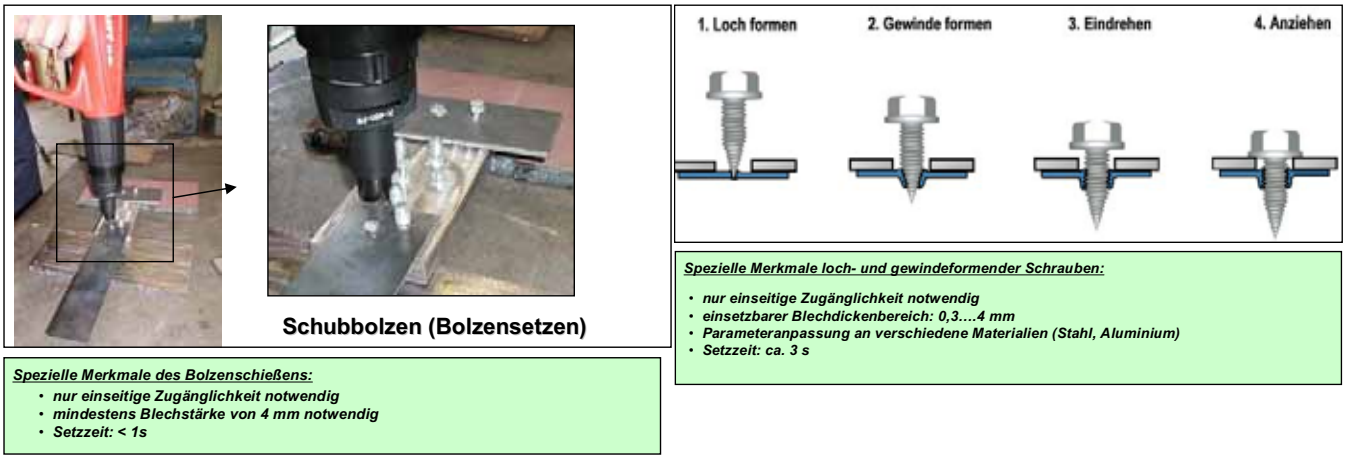


Bild 12: Verfahrensprinzip und Merkmale der Verfahren Schubbolzen (links) und loch- / gewindeformende Schrauben (rechts)

Die Anwendung mechanischer Fügeverfahren erfolgt sowohl durch leichte, robuste Handgeräte mit elektrischem oder pneumatischem Antrieb für den manuellen Einsatz (Bild 13), als auch über entsprechend automatisierte Handhabungsgeräte für den Einsatz in der flexiblen Fertigung von Klein- und Großserien (Bild 14).

Bild 13 Pneumatisches Handsetzgerät für Blindnieten Fa. Gesipa (links), Bolzensetzgerät für den Stahlbau Fa. Hilti (Mitte), Handgerät zum Clinchen/Stanznieten Fa. Avdel (rechts)

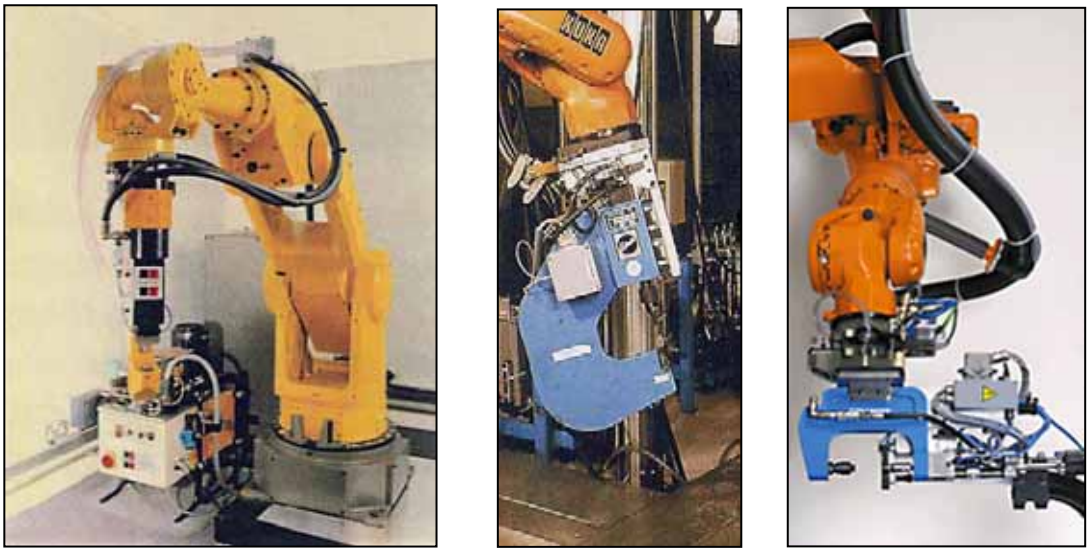


Bild 14 Automatisierter Einsatz von Stanznieten (links), Clinchen (Mitte) und Blindnieten (rechts)

Die Fügeverfahren Blindnieten und Schließringbolzen erfordern ein entsprechendes Vorlochen der Fügeteile. Durch das Umformen der Blindniethülse bei Blindnieten bzw. des Schließrings bei Schließringbolzen wird eine hochfeste form- und kraftschlüssige Verbindung erzeugt (Bild 15).
Das Fügen durch Stanznieten und Clinchen beruht auf einem Stempel-Matrizensystem. Das Fügeteil wird örtlich durch eine definierte Stempelkraft und Hilfsfügeteile (Stanznieten) umgeformt, eine Vor- oder Nachbearbeitung des Fügepunktes bzw. der Fügeteiloberfläche ist nicht notwendig (Bild 16), allerdings sind hinsichtlich eines Einsatzes im Schiffbau die Begrenzung der zu fügenden Blechstärke (max. 10mm Gesamtblechstärke) und die Notwendigkeit des Einsatzes von Setzbügeln ein nachteiliger Faktor.
Abhängig von der zu fügenden Blechdicke entstehen beim Stanznieten und Clinchen Fügekräfte von 10 – 100 kN, je nach Fügeaufgabe sind entsprechend dimensionierte Zangensysteme für den manuellen oder automatischen Einsatz verfügbar.

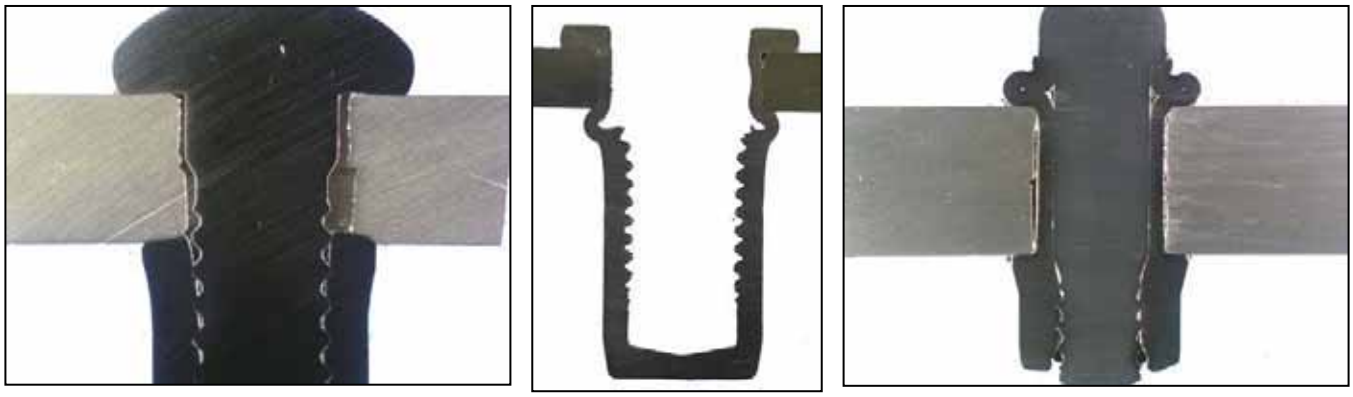


Bild 15: Schliffbild einer Schließringbolzenverbindung (links), Blindnietmutter (Mitte) und einer Blindnietbolzenverbindung (rechts)

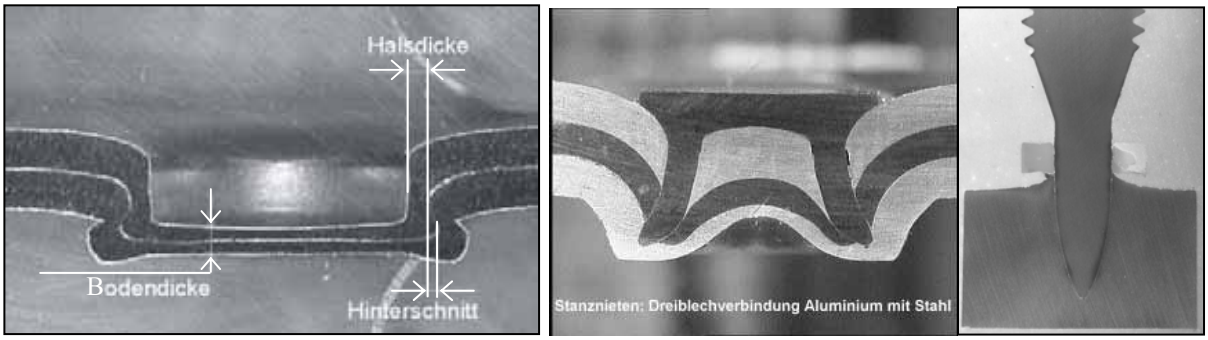
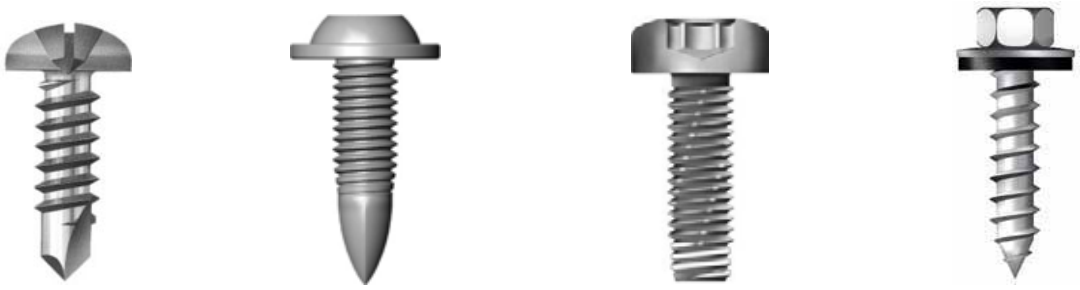


Bild 16: Schliffbild einer Clinchverbindung mit Verbindungsparametern (links), Dreiblech-Stanznietverbindung Aluminium-Stahl (Mitte), Schubbolzen in Stahl (rechts)

Loch- und gewindefurchende Schrauben erlauben eine Direktverschraubung in metallische Werkstoffe. Die Technologie beruht auf dem Prinzip des Fließlochformens und Gewindefurchens. Beim Eindrehen der Schraube wird der Bauteilwerkstoff zu einem Durchzug mit Gewindegängen umgeformt. Das Fließlochformen erfolgt entweder durch die Einbringung von Reibungswärme in das Grundmaterial über hohe Schrauberdrehzahl (1000 bis 5000 U/min) oder kaltumformend durch spezielle Schraubengeometrien und Andruckkräfte. Es entfällt sowohl Vorlochen als auch das aufwendige Gewindeschneiden (Bild 17).



Bohrschraube
Verbinden von Stahl und Aluminiumprofilen bis 2 mm

Fließlochformende FDS
Stahlbleche bis 2 mm
Aluminium bis 3,5 mm

Gewindefurchende Schraube
Verbinden von Stahl und Aluminiumprofilen mit Vorlochen, bis 20 mm

Gewindefurchende Dichtschraube
Aluminium-Kunststoff mit Vorlochen, bis 50 mm

Bild 17: Beispiele für loch- und gewindeformende Schrauben (Fa. EJOT)

Loch- und Gewindeformende Schrauben finden nach dem derzeitigen Stand der Technik hauptsächlich im Fügen von Feinblechen bis ca. 3 mm Blechdicke Anwendung. Für das Fügen von Materialstärken > 3 mm empfiehlt sich der Einsatz von gewindefurchenden Schrauben. Ihre Gewindegeometrie ist darauf ausgelegt, in ein vorgebohrtes Loch ein entsprechendes Gegengewinde zu formen.
Loch- und Gewindeformende Schrauben erfordern eine gute Umformbarkeit des Grundmaterials und werden daher hauptsächlich für Stähle bis zu einer Festigkeit von ca. 420 N/mm² sowie Aluminiumlegierungen und hybride Verbindungen, insbesondere Kunststoff-Aluminium, verwendet.
Die Direktmontage funktioniert über ein Bolzenschubwerkzeug nach dem Kolbenprinzip. Die freiwerdende Energie wird auf einen Kolben übertragen, der den Setzbolzen kontrolliert in den Untergrund treibt.
Die Schubbolzentechnik findet eine breite Anwendung in der Befestigung von Gewindebolzen im Bauwesen und im Stahlbau, unterschiedlichen Halteelementen für Kabel und Rohre bis hin zur Befestigung von Verkleidungen, Dämmplatten u.ä. an verschiedenen Stahl-, Aluminium- und Betonoberflächen (Bild 18).

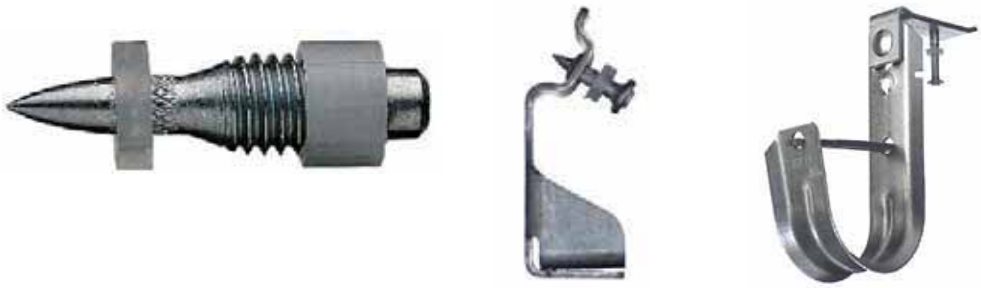


Bild 18: Beispiele für Befestigungselemente in Bolzenschubtechnik (Fa. Hilti): Schubbolzen M8 (links), Schubbolzen mit Hängesystem (Mitte), mit Kabelhalter (rechts)

Die mechanische Fügetechnik bietet dem Anwender wesentliche Vorteile in der Fertigung. Sie ermöglicht das hochfeste Verbinden verschiedener Materialien ohne Wärmeeintrag, dadurch werden aufwendige Nacharbeiten wie beispielsweise das Richten und Nachkonservieren beim Schweißen eingespart.
Die Vor- und Nachteile der mechanischen Fügetechnik sind verfahrensabhängig. Blindnieten und Schließringbolzen benötigen beispielsweise ein entsprechendes Vorlochen der Fügeteile. Stempel-Matrizensysteme wie Stanznieten und Clinchen sind auf eine beidseitige Zugänglichkeit mit Pressen bzw. einem C-Bügel angewiesen und können daher im Schiffbau nur begrenzt Anwendung finden.
Die wesentlichen Verfahrensmerkmale der wichtigsten mechanischen Fügeverfahren sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Kriterium	Blindnieten	Schließringbolzen	Stanznieten	Clinchen	loch- und gewinde - formende Schrauben
Hilfsfügeteil	Blindniet	Schließringbolzen, Schließring	Voll-/ Halbholstanzniet	nicht erforderlich	loch- u. gewinde-formende Schraube
Vorlochen	ja	ja	nein	nein	nein
Zugänglichkeit	einseitig	beidseitig	beidseitig mit C-Bügel	beidseitig mit C-Bügel	einseitig
Blechdickenbreich	0,5-30 mm	0,5-150 mm	0,5-10 mm	0,5-8 mm	0,5-2 mm

Tabelle 2: Wichtige Verfahrensmerkmale ausgewählter mechanischer Fügeverfahren hinsichtlich eines möglichen Einsatzes in der schiffbaulichen Ausrüstung

Analyse der Eignung von Klebtechnologien bzw. in Zshg. mit mechanischen Fügeverfahren für schiffbauliche Fügeaufgaben in der Ausrüstung

Verfahrensprinzip und Verbindungsformen

Beim Kleben werden Fügeteile mittels Klebstoff dauerhaft verbunden. Klebstoff wird laut DIN 16920 als nichtmetallischer Stoff definiert, der Fügeteile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbindet [29].
Der Begriff „strukturelles Kleben“ bezeichnet die konstruktive Gestaltung einer Klebverbindung mit hoher Steifigkeit bzw. statischer und dynamischer Festigkeit bei gleichmäßiger und günstiger Spannungsverteilung unter der Bedingung, dass die Klebung die an sie gestellten mechanischen und durch Alterungsvorgänge bedingten Beanspruchungen dauerhaft ohne Versagen erfüllt.
Neben der Funktion als kraftübertragendes Verbindungsmittel erfüllen Klebstoffe häufig zusätzliche Aufgaben als Dichtmittel, als Korrosionsschutz oder zur Dämpfung von mechanischen Schwingungen.
Das Erstellen einer Klebung besteht im Wesentlichen aus der Vorbereitung der zu klebenden Oberflächen, dem Auftragen des Klebstoffs und einem anschließenden Aushärten bzw. Abbinden. Der jeweilige Aufwand für die einzelnen Arbeitsphasen ist abhängig vom verwendeten Klebstoff, den zu fügenden Oberflächen und Materialien sowie von der angestrebten Qualität der Klebung.

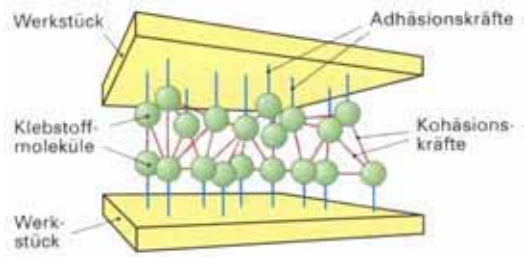


Bild 19: Kohäsions- und Adhäsionskräfte in einer Klebverbindung

Die durch den Klebstoff erzeugte Adhäsionsbindung (Bild 19) verlangt stets Fremdschichtfreiheit und/oder Benetzbarkeit der klebstoffseitigen Grenzflächen. Die Mindestanforderung für die Anwendung von Klebstoffen ist die Entfernung von Rost, galvanischen Schichten, Oxiden, Verfärbungen sowie Lack-/ Farbschichten und eine gereinigte bzw. entfettete Oberfläche [30].
Weitere Oberflächenbehandlungen zur Optimierung von Klebflächen unterteilen sich in mechanische, chemische, thermische und elektrische Verfahren (Bild 20). Ziel dieser Verfahren ist ein Entfernen von Fremdschichten und das Aufrauhen der Oberfläche, um eine optimale Adhäsionswirkung zu erzielen.

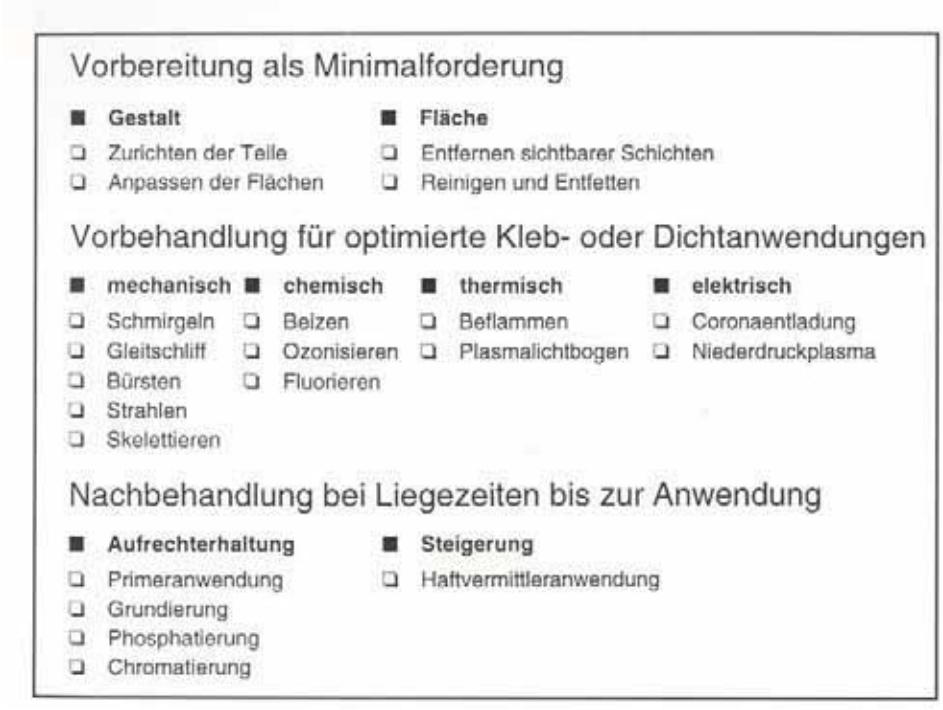


Bild 20: Anforderungen bei der Vor- und Nachbehandlung von Klebungen [30]

Die Verarbeitung von Klebstoff wird sowohl manuell über Handpistolen als auch vollautomatisch durch entsprechend automatisierte Handhabungssysteme durchgeführt. Abhängig von den Anforderungen zur Verarbeitung des Klebstoffs erfolgt eine Vorbehandlung des Klebstoffs (z.B. Mischen, Erwärmen, Aufschmelzen) bereits im Verarbeitungsgerät [31].
Es folgt die Auftragung einer definierten Menge Klebstoff in einer bestimmten Zeit, an einer vorgegebenen Position, mit einem festgelegten Auftragsbild auf das zu verklebende Werkstück.

Bild 21: Automatisierter Klebstoffauftrag durch Robotersysteme im Fahrzeugbau (links), Auftragspistole für manuellen Klebstoffauftrag (rechts)

Abhängig vom Klebstoff ist vor der Belastung der Klebung ein Aushärten bzw. Abbinden des Klebstoffs notwendig um die Festigkeit der Verbindung zu gewährleisten (Bild 22).
Kleb- und Dichtstoffe, die bereits im Ausgangszustand als hochmolekulare Verbindungen vorliegen, sind grundsätzlich löslich und/oder schmelzbar, ihre Verfestigung tritt durch physikalische Vorgänge wie Trocknung oder die Erstarrung der Schmelze ein [31].
Klebstoffe, die als Monomere vorliegen, deren Einzelmoleküle in der Lage sind ein Polymer auszubilden, vernetzen sich in der Regel durch einen chemischen Prozess mittels eines Katalysators bzw. Reaktionsmittels (Feuchtigkeit, Strahlung, Wärme, usw.).

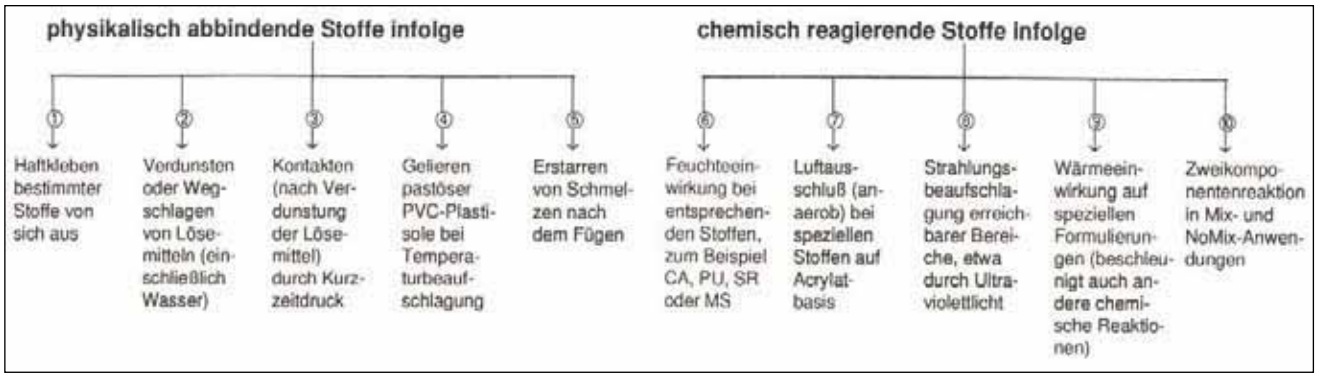


Bild 22: Verfestigungsmechanismen von Klebstoffen [30]

Durch Kleben können nahezu alle Werkstoffe miteinander und untereinander verbunden werden. Allerdings benötigt Kleben als flächiges Verbindungsverfahren eine möglichst große Fügefläche.
Ein Mittel zur überschlägigen Festigkeitsberechnung ist das Überlappungsverhältnis $Ü = l_ü/s$ mit $l_ü$ =Überlappungslänge und s =Fügeteildicke. Bei Flachverbindungen sollte das Überlappungsverhältnis 10 bis 20 betragen. Ein Überlappungsverhältnis von 1 wie z.B. bei Stumpfstößen ist zu vermeiden. Eine dementsprechende konstruktive Auslegung der Fügeteile ist notwendig. In Bild 23 sind typische Schweißverbindungen und mit ihrer möglichen Umsetzung als Klebung abgebildet [30].

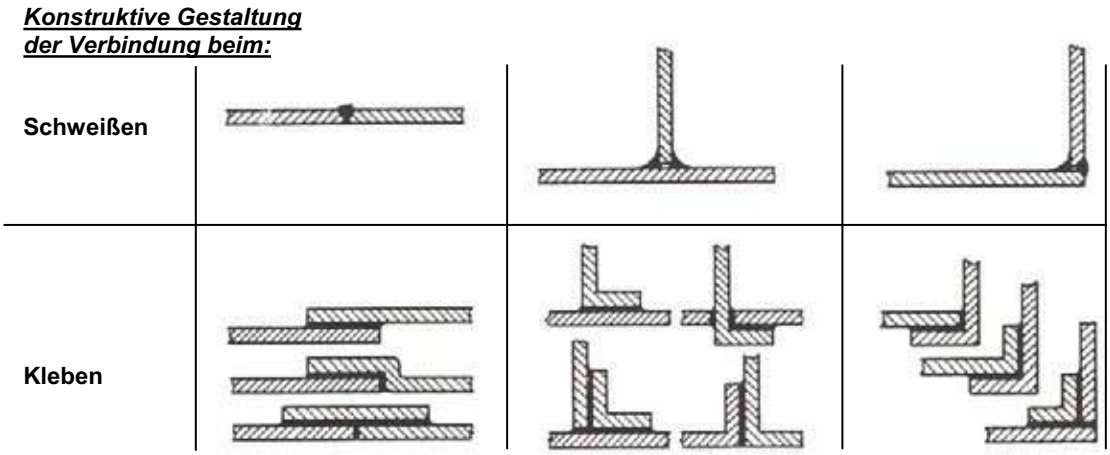


Bild 23: Konstruktive Gestaltungsprinzipien der Verbindung beim Schweißen (oben) und Kleben (unten) [31]

Die ständige Weiterentwicklung des Klebens im Bereich des Fahr- und Flugzeugbaus zeigt die Leistungsfähigkeit der Klebetechnologie als Alternative oder Ergänzung zu konventionellen Fügeverfahren. Durch die ständige Weiterentwicklung der Klebstoffsysteme und der klebgerechten Konstruktion mit konventionellen und modernen Konstruktionsmaterialien lassen sich immer mehr Verbindungsaufgaben allein oder in Kombination mit Klebverbindungen realisieren [18].
Die bekannten Probleme der thermischen Beständigkeit, Alterung durch chemische und physikalische Einflüsse sowie der vergleichsweise geringen Festigkeiten sind Gegenstand der herstellerseitigen Forschung und Entwicklung. Im zunehmenden Maße entstehen so auf spezielle Anforderungen abgestimmte Klebstoffsysteme, die einen wirtschaftlichen Einsatz des Klebens auch in Bereichen ermöglichen, die bisher anderen Fügetechnologien vorbehalten sind [29, 30, 31].

Vorteile von Klebverbindungen:

- Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe miteinander und untereinander
- Herstellung großflächiger Verbindungen möglich
- Keine „Verletzung“ der Fügeteile notwendig
- Ausgleichsmöglichkeit von Passungstoleranzen
- Keine bzw. geringe thermische Beeinflussung der Fügeteilwerkstoffe
- Gleichmäßige Spannungsverteilung in der Fügefläche
- Flüssigkeits- und gasdichte Verbindungen herstellbar
- Schwindungsdämpfende und isolierende Eigenschaft der Klebschicht

Nachteile von Klebverbindungen:

- Überlappung erforderlich
- Vorbehandlung der Klebefläche notwendig (Reinigen, Entfetten)
- Einhaltung der Prozessparameter erforderlich (Verarbeitungstemperatur, Mischungsverhältnisse)
- Geringere Festigkeit im Vergleich zu Schweißverbindungen unter Umwelteinflüssen
- Zeitabhängige Eigenschaftsveränderungen (Alterung durch chemische und physikalische Einwirkungen)
- Geringe thermische Beständigkeit (maximal 200°C)

Stand der Technik und erkennbare Entwicklungstrends

Derzeit existieren in Deutschland mehrere zehntausend unterschiedliche Kleb- und Dichtstofftypen für die unterschiedlichsten Anwendungen und Materialkombinationen. Der Unterschied zwischen Klebstoff und Dichtmittel ist dabei fließend. Ein verbessertes Abdichtungsvermögen geht einher mit einem elastischeren Klebstoffverhalten und somit einer geringeren Kraftübertragung (Bild 24).

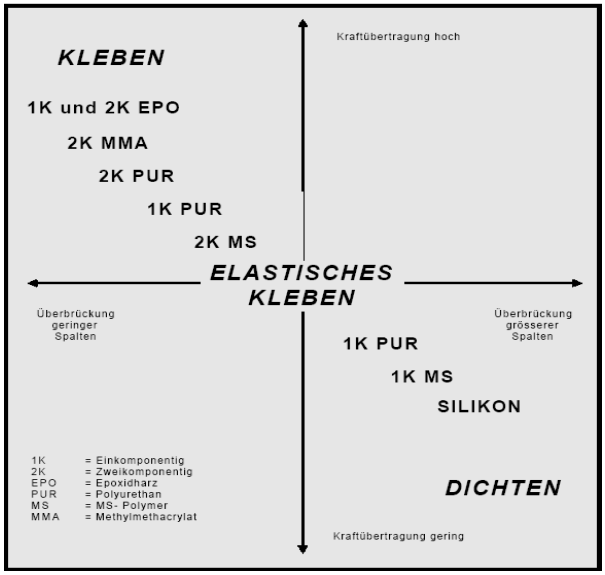


Bild 24: Einordnung von Dicht- und Klebstoffen bezüglich Eignung zur Kraftübertragung und Spaltüberbrückung [30, 32]

Die erreichbaren Festigkeiten von Klebverbindungen im statischen Zugversuch sind i.d.R. wesentlich geringer als Schweißverbindungen, dies kann allerdings durch konstruktive Maßnahmen zur Vergrößerung der Klebfläche ausgeglichen werden.
Die bereits angesprochene vergleichsweise geringe thermische Widerstandsfähigkeit von Klebverbindungen ist an exemplarischen Scherzugversuchen in Bild 25 dargestellt. Ab ca. 50 °C kommt es bei vielen Klebstoffarten zu einer drastischen Reduzierung der Festigkeitseigenschaften. Wobei durchaus Klebstoffe existieren, die problemlos bei Temperaturen von bis zu 200°C eingesetzt werden können.
Das Verhalten der Festigkeit von Klebverbindungen über die Zeit wird in Bild 26 am Beispiel einer Aluminiumklebung bei 52°C und 100%rel. Luftfeuchtigkeit gezeigt. Es ist ein deutlicher Abfall der Festigkeit innerhalb des ersten Jahres erkennbar, der sich allerdings im weiteren Zeitverlauf nicht fortsetzt [29].

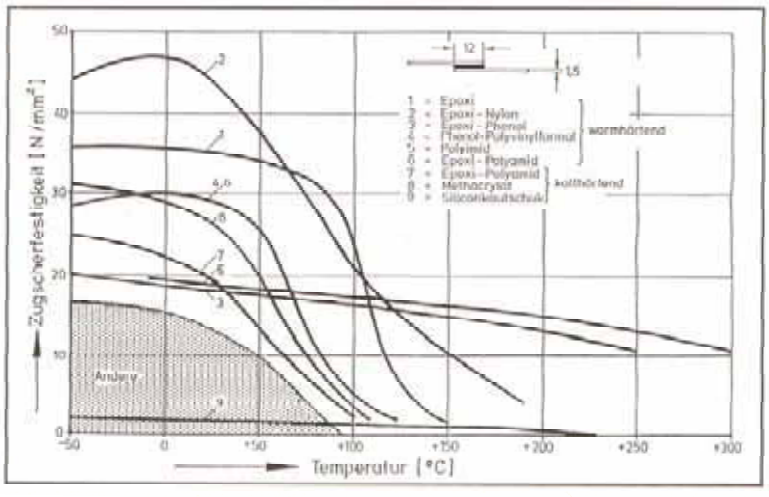


Bild 25: Scherzugfestigkeit bei thermischer Belastung von verschiedenen Klebstoffen [29]

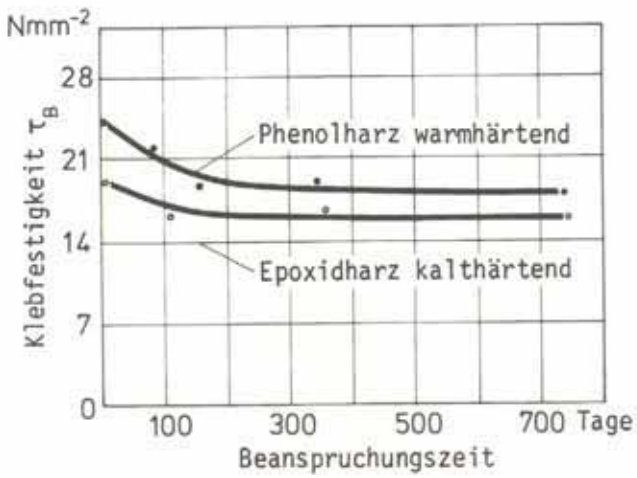


Bild 26: Beanspruchungsverhalten einer Aluminiumklebung bei 52°C und 100% rel. Luftfeuchtigkeit [29]

Die Auslegung einer Klebverbindung erfordert neben der Betrachtung der rein mechanischen Belastungen auch die Berücksichtigung von thermischen und alterungsbeschleunigenden Umwelteinflüssen.
Bisherige Einsatzbereiche des Klebens im Schiffbau beschränken sich auf die Schiffsausrüstung, in diesen Bereichen sind Anwendungen zum Verkleben von Kunststoffbauteilen aus GFK, zum Einkleben von Scheiben und Sitzbefestigungen sowie Klebungen zu Reparaturzwecken bekannt (Bild 27).

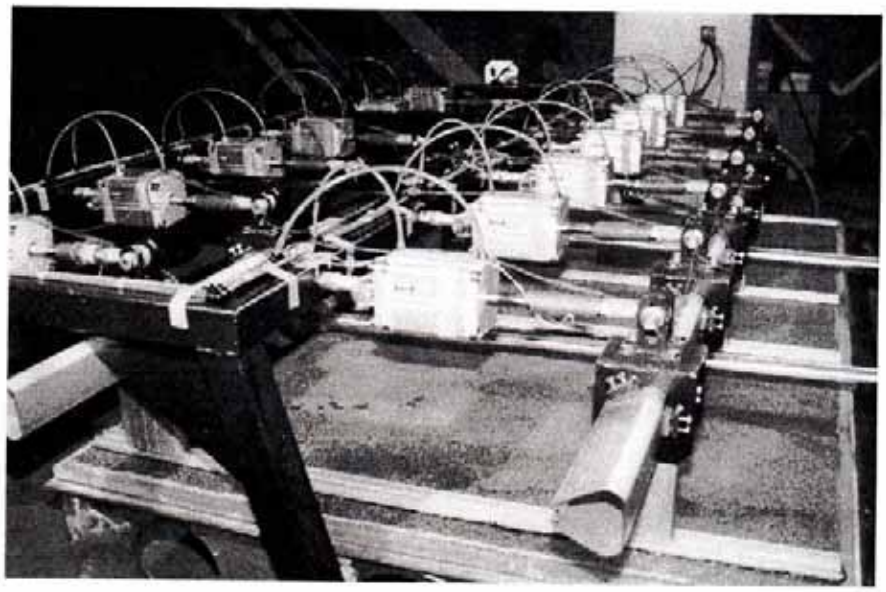


Bild 27: Belastungstest an geklebten Sitzbefestigungen im Schiffbau [33]

Die Entwicklung neuer Klebstoffe wird zurzeit vorwiegend vom Fahrzeug- und Flugzeugbau mit den folgenden Zielen vorangetrieben:

- Entwicklung kalthärtender Zweikomponenten-Klebstoffe mit vergleichbaren Festigkeiten und oberer Temperatureinsatzgrenze wie heißhärtende Einkomponenten-Klebstoffe

- Adhäsions- und Grenzflächenforschung zur Erstellung alterungsstabiler Verbindungen und Reduzierung von Vorbehandlungen der Klebflächen

- Simulation, Berechnung und Dimensionierung von Klebverbindungen

Die Entwicklung der Klebstoffe wird die Einsatzgrenzen des Klebens in Richtung höherer Festigkeiten, verbesserter Temperaturbeständigkeit, Altersbeständigkeit und einer einfacheren Verarbeitung aufweiten [33, 34, 35].
Neben der Weiterentwicklung der reinen Klebtechnologie kommt es in der Praxis zunehmend zur Anwendung kombinierter Fügeverfahren aus Kleben und mechanischem Fügen. Die Kombination von punktförmigen Verbindungen und Klebstoffen führt im Allgemeinen zu einer besseren Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften und zur Festigkeitssteigerung. Die Nachteile des jeweils anderen Verfahrens werden kompensiert.
Die Kombination aus mechanischem Fügen und Kleben bedeutet eine Erhöhung der Steifigkeit des jeweiligen Bauteils, verbunden mit einer höheren Schwingfestigkeit. Hinzu kommt der Dichteffekt der Klebstoffe.
Weitere Vorteile der Kombination beider Verfahren sind die Reduktion der Fügepunkte, eine Vermeidung von Spaltkorrosion, eine höhere Funktionssicherheit, eine weitaus geringere Versagensneigung bei Schälbeanspruchung und eine geringere Kriechneigung gegenüber einem rein geklebten Bauteil [18].
Im Flugzeugbau gehören die Klebeverfahren schon seit Jahrzehnten zum Standard in der Fertigung. Durch den Einsatz von Klebstoffen können Flugzeuge in extremer Leichtbauweise konstruiert werden. Es werden dabei Materialien wie Leichtmetalllegierungen und faserverstärkte Kunststoffe verwendet, die sonst nicht konsequent eingesetzt werden könnten.
Flugzeuge sind enormen Lastwechselreaktionen bei Start bzw. Landung und Temperaturschwankungen über eine Lebensdauer von ca. 30 Jahren ausgesetzt. Die bekannten Einschränkungen von Klebstoffen werden durch eine entsprechende konstruktive Gestaltung, die die Vorteile von Klebungen zur Geltung bringt, ausgeglichen.

Bild 28: Flügel eines Segelflugzeugs in Leichtbauweise aus geklebten GFK und Aluminium (links), Werkstoffmix aus Stahl, Aluminium und Kunststoffen durch Kleben am A380 (rechts)

Der Einsatz von Klebstoffen hat sich im Fahrzeugbau fest etabliert. Durch die Möglichkeiten unterschiedliche Materialien wie Stähle, Aluminium, Magnesium, Kunststoffe usw. zu fügen und durch die Integrierbarkeit zusätzlicher Funktionen wie Vibrationsdämpfung, elektrische Isolation und Korrosionsschutz, sowie hervorragende Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Fügeverfahren, wurden in den letzten Jahren bemerkenswerte Verbesserungen bei Gewicht, Sicherheit und Komfort bei gleichzeitiger Kosteneinsparung realisiert [29, 33].

Bild 29: Schienenfahrzeug in Leichtbauweise: Versteifung einer Stahlfachwerkkonstruktion durch elastisches Aufkleben von vorgefertigten GFK-Leichtbaustrukturen (links); BMW 6er Coupe: geklebte-stanzgenietete Stahl-Aluminiumkonstruktion (rechts)

Prinzipielle Einsatzmöglichkeiten im Schiffbau

Aufgrund der Altersneigung und der relativ geringen Warmfestigkeit fast aller zurzeit verfügbaren Klebstoffe sind bisher nur Klebverbindungen in Schiffsbereichen mit geringer Brandwahrscheinlichkeit und günstigen Umweltbedingungen zugelassen. Zukünftige Klebstoffentwicklungen bzw. die Kombination von Kleben mit anderen Fügeverfahren werden den Einsatzbereich des Klebens im Schiffbau erweitern.
Kurz- und mittelfristig ergibt sich ein Einsatzpotential in der Endausrüstung von Schiffen. Dies betrifft vor allem die alternative Befestigung von Rahmenstrukturen (Tür- , Fenster- und Lukenrahmen), Rohr- und Kabelhaltern und ähnlichen Ausrüstungselementen [36].
Der Einsatz der Klebtechnologie setzt ähnlich wie beim Schweißen eine genaue Kenntnis über die Einflussparameter und das Werkstoff- bzw. Klebstoffverhalten voraus. Mit dem entsprechenden Know-How und dem Einsatz moderner Klebstoffe können langfristig qualitativ hochwertige und für ausgewählte Anwendungen alterungsbeständige flächige Verbindungen hergestellt werden. Kurz- und mittelfristig treten allerdings Probleme bei der Herstellung der geeigneten Oberflächenbeschaffenheit sowie der Temperatur- und Alterungsbeständigkeit von Klebverbindungen im Schiffbau auf, so dass die Klebtechnologie insbesondere in Kombination mit mechanischen Fügeverfahren zu einer Reduzierung des Zeit- und Kostenaufwandes bei der Schiffsausrüstung führen kann.

2.1.2 Ergebnisse des AP 112

Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen thermischer und mechanischer Fügeverfahren in der Ausrüstung von Standard-Tragstrukturen

Im Bereich der Ausrüstung, Nachrüstung und Reparaturarbeiten entsteht beim Einsatz von thermischen Fügeverfahren mit zunehmender Ausrüstungsstufe ein entsprechender Mehraufwand, der hauptsächlich aus einem erhöhten Zeitaufwand für Vor- und Nacharbeiten sowie einem verstärkten Brandschutz resultiert.
In Tabelle 3 ist der maximale Ausbreitungsradius von Schweißfunken anhand von zwei thermischen Verfahren dargestellt. Insbesondere im Falle einer Nachrüstung oder von Reparaturarbeiten ist daher nicht nur der Brandschutz direkt an der Schweißung, sondern auch in der näheren Umgebung zu gewährleisten. Der daraus resultierende Mehraufwand gegenüber mechanischen Fügeverfahren ist von den jeweiligen Rahmenbedingungen abhängig (siehe Abschnitt 3.2.2) und somit nur schwer kalkulierbar. Daher wird in Tabelle 4 auf eine Abschätzung der Kosten zunächst verzichtet.

Brand- und Explosiongefährdeter Bereich	Horizontale Reichweite (bei üblichen Arbeitshöhen von ca. 2 bis 3 m)	Vertikale Reichweite	
Arbeitsverfahren		nach oben	nach unten
Schweißen (manuelles Gas- u. Lichtbogenschweißen)	bis zu 7,5 m	bis zu 4 m	bis zu 20 m
Thermisches Trennen	bis zu 10 m	bis zu 4 m	bis zu 20 m

Tabelle 3: Ausbreitung von Schweißfunken [50]

Mechanische Fügeverfahren haben hinsichtlich des Brandschutzes einen wesentlichen Vorteil gegenüber thermischen Verfahren, da kein bzw. nur ein sehr geringer Wärmeeintrag stattfindet.
Das Befestigen von Ausrüstungselementen wie z.B. Halter für Kabel- und Rohrsysteme erfolgt im Schiffbau häufig unter Zwangslagen. Dies wirkt sich auf die betrachteten thermischen und mechanischen Verfahren in etwa gleichem Maße durch einen erhöhten Fertigungsaufwand aus und wird im allgemeinen Wirtschaftlichkeitsvergleich nicht weiter berücksichtigt.
Die vorangegangenen Betrachtungen zeigen bereits, dass ein pauschaler Vergleich zwischen thermischen und mechanischen Fügeverfahren aufgrund der vielen Kosteneinflussfaktoren und verschiedenen Anwendungsfälle mit etlichen Problemen behaftet ist und zudem nur eine sehr eingeschränkte Aussagekraft besitzt.
Daher werden kostenseitige Untersuchungen in der Ausrüstung für ausgewählte Fügeverfahren und für 2 pauschale Anwendungsfälle in der Praxis durchgeführt:

Anwendungsfall	**Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für folgende Fügeverfahren**
Einseitiges Fügen punktförmiger Verbindungselemente mit Gewinde an Platte / Profil / Sandwich (Ausrüstungselement wird später befestigt)	Bolzenschweißen Blindnietmutter Schubbolzen **(*siehe Tabelle 5 / Tabelle 6)***
Einseitiges / beidseitiges Fügen von Ausrüstungselementen simultan mit Verbindungselement	MSG-/ LBH-Schweißen Blindnieten Schließringbolzen Schubbolzen / -nägel **(*siehe Tabelle 7)***

Tabelle 4: Kombination von Anwendungsfall und Fügeverfahren für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (Montage von Ausrüstungselementen von Standard-Tragstrukturen)

Für den Einsatz von Verbindungselementen mit Gewinde hat sich im Schiffbau das Verfahren Bolzenschweißen etabliert. Alternativ sollen der Einsatz von Schubbolzen mit Gewinde und von Blindnietmuttern / Blindnietgewindebolzen betrachtet werden.
Alle drei Verfahren besitzen spezifische Vor- und Nachteile, die ihr Anwendungsgebiet auf unterschiedliche Materialien bzw. Materialstärken einschränken. Ihr wirtschaftlicher Einsatz ist somit stets von der spezifischen Aufgabenstellung abhängig.
In einem beispielhaften Variantenvergleich wird das Setzen von Schweißbolzen, Blindnietmuttern und Schubbolzen hinsichtlich der entstehenden Kosten aufgrund von Erfahrungswerten abgebildet.
In Tabelle 5 werden zunächst als Grobübersicht die wesentlichen Arbeitsschritte und die erwarteten Zeiten unter „normalen“ Einsatzbedingungen (z.B. freies beschichtetes Plattenfeld von 5-10 mm Blechdicke) aufgelistet.

	Bolzenschweißen		Blindnietmutter		Schubbolzen	
	Arbeitsgang	Zeit [min]	Arbeitsgang	Zeit [min]	Arbeitsgang	Zeit [min]
Rüstzeiten	Brandschutz	n.a.	Anschluss des Setzgerätes an die Druckluftversorgung	0,3	Einstellen der Eintreibstufe durch Setztest an vergleichbaren Materialien	6
			Umrüsten des Setzgerätes auf erforderliches Gewinde	5		
	Einstellen der Setzparameter Strom, Zeit und Hub, eventuelle Setztest	3	Einstellen des Hubs, Hub mit Setztest überprüfen	3	Anlegen des Gehörschutzes	0,2
			Umrüsten der Bohrmaschine auf benötigten Bohrlochdurchmesser	4		
Verteilzeiten	Bolzenvorrat erneuern	n.a.	Vorrat an BN erneuern	n.a.	alle 10 Bolzen neue Treibladung einlegen	0,2
Haupt und Nebenzeiten	Oberflächenvorbereitung durch Abschleifen	0,4	Ankörnen	0,05		
	Einlegen des Bolzens	0,05	Vorlochen	0,6	Einlegen des Bolzens	0,1
	Positionieren des Bolzenschweißgerätes	0,05	BNM auf Gerät schrauben	0,05	Ansetzen/Andrücken des Bolzenschubgerätes	0,1
	Bolzen setzen	0,05	BNM-Setzgerät ansetzen	0,1	Setzen des Bolzens	0,05
	Setzgerät abziehen	0,05	BNM setzen und Gerät ausschrauben	0,05		

Tabelle 5: Prinzipielle Rüst-, Verteil-, Haupt- und Nebenzeiten für unterschiedliche Fügeverfahren

Zunächst wird ein Kostenvergleich durchgeführt, der das einseitige Fügen punktförmiger Verbindungselemente mit Gewinde an Platten, Profile bzw. dünnwandige Sandwichstrukturen beinhaltet (Tabelle 6). Dabei werden die Ausrüstungselemente zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt befestigt. Diese Arbeitsschritte sind fügeverfahrenunabhängig und werden in der Kostenrechnung nicht berücksichtigt.
Aus dem Kostenvergleich der einzelnen Varianten für Funktionselemente mit Gewinde geht das Setzen von Schubbolzen als kostengünstigste Variante hervor. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass dieses Verfahren weitgehend ohne Aufwand für Vor- oder Nacharbeiten auskommt und sehr geringe Verarbeitungszeiten aufweist. Der Einsatz von Schubbolzen als Alternative zu Schweißbolzen ist allerdings nur bei entsprechenden Blechdicken (mind. 6 mm, optimal 12 mm) und vergleichsweise geringen Anforderungen an die Festigkeitseigenschaften zu empfehlen.
Für das Setzen von Blindnietmuttern wurden in diesem Vergleich die höchsten Kosten ermittelt. Die Vorteile von Blindnietmuttern kommen vorzugsweise beim Verarbeiten von Dünnblechen und beschichteten bzw. schwer schweißbaren Materialien zum Tragen.
Während die Kosten für das Setzen einer Blindnietmutter nur unwesentlich von Beschichtungen und Materialart abhängen, haben diese Parameter einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten, die Festigkeitseigenschaften und die generelle Einsetzbarkeit des Bolzenschweißens. Da das Bolzenschweißen zur Zündung des Lichtbogens eine entsprechend vorbereitete Oberfläche benötigt, ist bei seiner Anwendung ein zusätzlicher Aufwand für Vor- und Nacharbeiten einzukalkulieren.

	Einheit	Bolzenschweißen		Blindnietmuttern		Schubbolzen	
Fixe Kosten							
Anschffungskosten	€		6000		2500		2000
Nutzungsdauer	Jahr		8		8		8
jährliche Nutzung	h/Jahr		1600		1600		1600
kalk. Zinsen (8%)	€/Jahr		60		25		20
kalk. Abschreibung (lin)	€/Jahr		750		312,5		250
Instandhaltungskosten	€/Jahr		100		100		100
Lagerkosten	€/Jahr		50		50		10
Summe Fixkosten	€/Jahr		960		487,5		380
Variable Kosten							
Materialkosten	€ /St	M10 x 30 Stahl	0,12	M10 Stahl	0,3	M10 Stahl	0,3
		Arbeitsgang		Arbeitsgang		Arbeitsgang	
Arbeitsgänge Zeitaufwand	min/St	Besch. entf.	0,4	Vorlochen	0,7	SB setzen	0,3
		Bolzen setzen	0,2	BNM setzen	0,2		
		Nachkonserv.	0,3				
Gesamtzeit	min/St		0,9		0,9		0,3
	St/h		67		67		200
Personalkosten	€/h		30		30		30
	€/St		0,45		0,45		0,15
Energiekosten							
Preis kWh	€/kWh		0,15		0,15		
Verbrauch	kWh/h		0,625		0,25		
Energiekosten	€/h		0,094		0,038		
~pro Stück	€/St		0,001		0,001		0
Summe variable Kosten	€/St		0,57		0,75		0,45

Tabelle 6: Kostenvergleich für das Befestigen eines Verbindungselementes mit späterer Befestigung des Ausrüstungselementes

Alle drei Verfahren haben ihre technischen Vorteile bezüglich bestimmter Anwendungsfälle. Geringe Blechdicken und schwer schweißbare Materialien / Edelstähle und gute Festigkeitseigenschaften sprechen für den Einsatz von Blindnietmuttern. Bei Materialstärken ab 10 mm und vergleichsweise geringen Anforderungen an die Haltekräfte können Schubbolzen eine sinnvolle Alternative sein. Bei der Verarbeitung unbeschichteter / geprimerter Stähle bzw. von Edelstählen sowie hohen Ansprüchen an die Festigkeitseigenschaften sind hingegen Schweißbolzen die wirtschaftlichste Lösung.
Das einseitige bzw. beidseitige Fügen von Ausrüstungselementen simultan mit Verbindungselement soll nachfolgend kostenseitig betrachtet werden. Die gängige Praxis zur Befestigung von Ausrüstungselementen besteht darin, hinderliche Oberflächenbeschichtungen zu entfernen und das Ausrüstungselement zu heften bzw. raupenförmig / komplett anzuschweißen. Die Anbringung von Ausrüstungselementen durch Schweißen an Sandwichpaneelen kann aufgrund der geringen Blechdicke (ca. 3 mm) mit zusätzlichem Aufwand verbunden sein. Häufig ist die Anbringung eines Dopplungsbleches erforderlich, um ein Anschweißen der Halterung zu ermöglichen.

Im folgenden Variantenvergleich werden die Kosten für die Befestigung eines Ausrüstungselementes mittels Schweißen, Blindnieten, Schließringbolzen und Schubbolzen verglichen. Im Vergleich mit der Schweißlösung wird angenommen, dass die mechanischen Fügeverbindungen mit 2 Verbindern realisiert werden. Der Zeit- und Kostenvergleich beruht im Wesentlichen auf eigenen Untersuchungen, Annahmen und Erfahrungswerten.

	Einheit	Schweißen		Blindnieten		Schließringbolzen		Schubbolzen	
Fixe Kosten									
Anschffungskosten	€		5000		2500		2500		2000
Nutzungsdauer	Jahr		8		8		8		8
jährliche Nutzung	h/Jahr		1600		1600		1600		1600
kalk. Zinsen (8%)	€/Jahr		50		25		25		20
kalk. Abschreibung (lin.)	€/Jahr		625		312,5		312,5		250
Instandhaltungskosten	€/Jahr		100		100		100		100
Lagerkosten	€/Jahr		50		50		50		10
Summe Fixkosten	€/Jahr		825		487,5		487,5		380
Variable Kosten									
Materialkosten	€ /St		0,12	Ø 6,4 G-Lock	0,18	Ø 6,4	0,14	Stahlnagel	0,3
Anzahl der Verbinder					2		2		2
		Arbeitsgang		Arbeitsgang		Arbeitsgang		Arbeitsgang	
Arbeitsgänge Zeitaufwand	min/St	Besch. Entf	0,6	Vorlochen	0,5	Vorlochen	0,5	SB setzten	0,3
		Schweißen	0,5	BNM setzen	0,2	SRB setzten	0,3		
		Nachkonsv.	0,6						
Gesamtzeit	min/St		1,7		1,4		1,6		0,6
	St/h		35		43		38		100
Personalkosten	€/h		30		30		30		30
	€/St		0,85		0,7		0,8		0,3
Energiekosten									
Preis kWh	€/kWh		0,15		0,15		0,15		0
Verbrauch	kWh/h		0,625		0,25		0,25		0
Energiekosten	€/h		0,094		0,038		0,038		0
~pro Stück	€/St		0,003		0,001		0,001		0
Summe variable Kosten	€/St		0,973		0,881		0,941		0,6

Tabelle 7: Kostenvergleich für das Befestigen eines Verbindungselementes mit simultaner Befestigung des Ausrüstungselementes

Wie schon im vorangegangenen Variantenvergleich erweist sich der Einsatz von Schubbolzen, in diesem Fall von Befestigungsnägeln, als günstige Alternative zum Schweißen. Dies ist wiederum auf die sehr schnelle Verarbeitung und den Wegfall von aufwendigen Vor- und Nacharbeiten zurückzuführen. Die Anwendung von Blindnieten und Schließringbolzen weist ebenfalls geringe Kostenvorteile gegenüber dem Schweißen auf. Hier ist ausschlaggebend, dass eventuelle Oberflächenbeschichtungen nicht entfernt werden müssen. Ein wesentlicher Zeit- und Kostenfaktor beim Einsatz von mechanischen Fügeverfahren mit Vorlochoperation stellt das Bohren dar. Der dafür anfallende Zeitaufwand ist von den jeweiligen Blechdicken, dem Bohrlochdurchmesser und den verwendeten Werkzeugen und Maschinen abhängig und kann stark variieren. Die hier verwendeten Werte gehen von einer direkten Zugänglichkeit im Schiffsrumpf / Maschinenraum mit „normalen“ Einsatzbedingungen (z.B. freies beschichtetes Plattenfeld von 5-10 mm Blechdicke) aus, der evtl. notwendige Anpassungsbedarf von Fügeeinrichtungen wird in Abschnitt 2.1.1. und 2.2.1 betrachtet.

2.1.3 Ergebnisse des AP 121

Analyse der gegenwärtigen schiffbaulichen Fügeaufgaben in der Sandwichpaneelmontage und -ausrüstung auf Grundlage der gegenwärtigen Fügeprozesse

In der Schiffskörperfertigung und Ausrüstung von Passagierschiffen und Flusskreuzfahrtschiffen werden seit einigen Jahren lasergeschweißte Sandwichpaneele eingesetzt. Aus fügetechnischer Sicht besteht dabei die prinzipielle Aufgabe,

a) Verbindungen der Paneele untereinander herzustellen und

b) Ausrüstungselemente auf den Paneelen zu befestigen.

Im Rahmen des Vorhabens sollte zunächst geklärt werden, ob die mechanischen / hybriden Fertigungsverfahren grundsätzlich geeignet sind, diese Aufgaben ganz oder teilweise zu übernehmen. Zuerst soll daher kurz der gegenwärtige Stand der Technik hinsichtlich der o.g. Fügeaufgaben dargestellt werden. In beiden Fällen dominiert gegenwärtig das Fügeverfahren Schweißen.
Die Längs- und Querverbindungen der Verbindungen der Paneele untereinander werden i.d.R. mit Stützprofilen versehen und mittels MSG-Schweißverfahren zunächst geheftet und dann verschweißt (Bild 30).

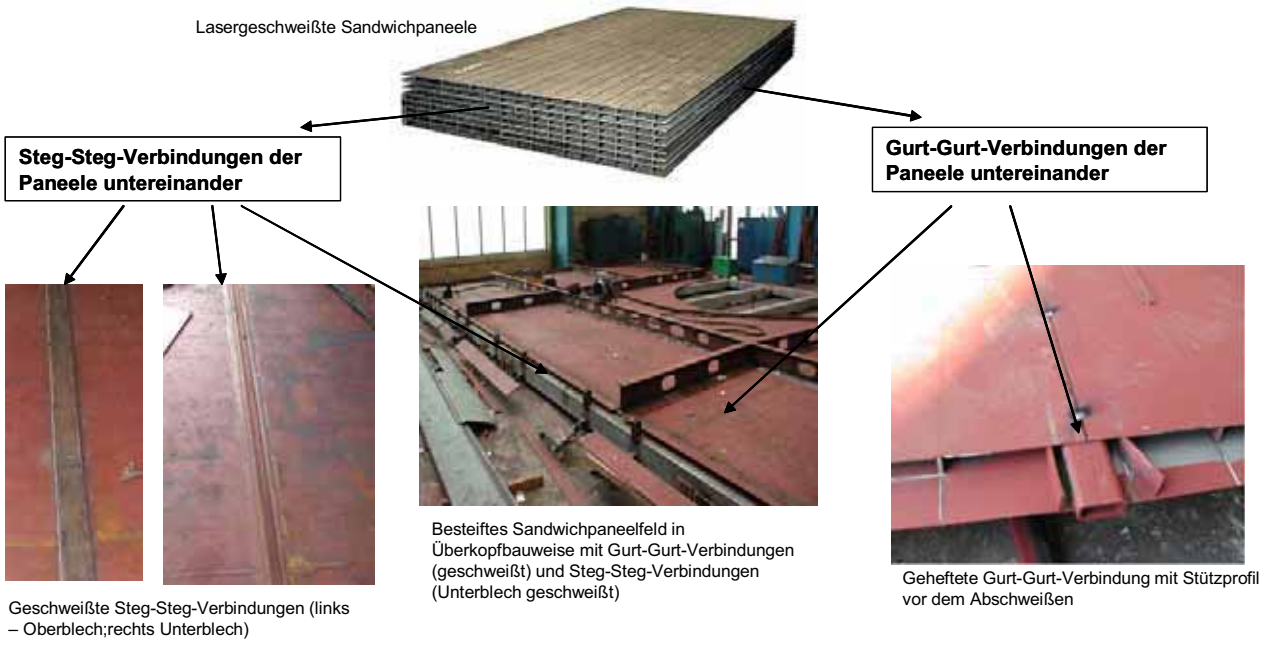


Bild 30: Verbindung von Steg-Steg und Gurt-Gurt-Verbindungen laserstrahlgeschweißter Sandwichpaneelfelder im Passagierschiffbau mittels Lichtbogenschweißverfahren

Die Befestigung der Ausrüstungselemente auf den Sandwichpaneelen beinhaltet eine Vielzahl einzelner Fügeaufgaben für die Befestigung von Halterungen für Rohre, Kabel, Lüfter, Rahmen, Treppen usw. vor allem im Maschinenraumbereich (Bild 31). Dabei kommen MSG-Schweißverfahren, E-Handschweißverfahren und Lichtbogenbolzenschweißverfahren zum Einsatz. Diese Schweißverfahren kommen auch bei der Ausrüstung im Containerschiffbau zum Einsatz (siehe Abschnitt 2.1.1, Bild 7).
Der insgesamt größere Teil der Montageaufgaben in der Ausrüstung wird auf teil- oder endkonservierten Bauteiloberflächen realisiert, die mit zunehmendem Ausrüstungsgrad in unmittelbarer Nachbarschaft mit feuerklassenrelevanter Ausrüstung (z.B. Isolierungen, Kabel) stehen. Beim Einsatz von Schweißverfahren ergeben sich daraus ein erhöhter sicherheitstechnischer Aufwand sowie aufwendige Nachkonservierungsarbeiten (Bild 31, links unten).

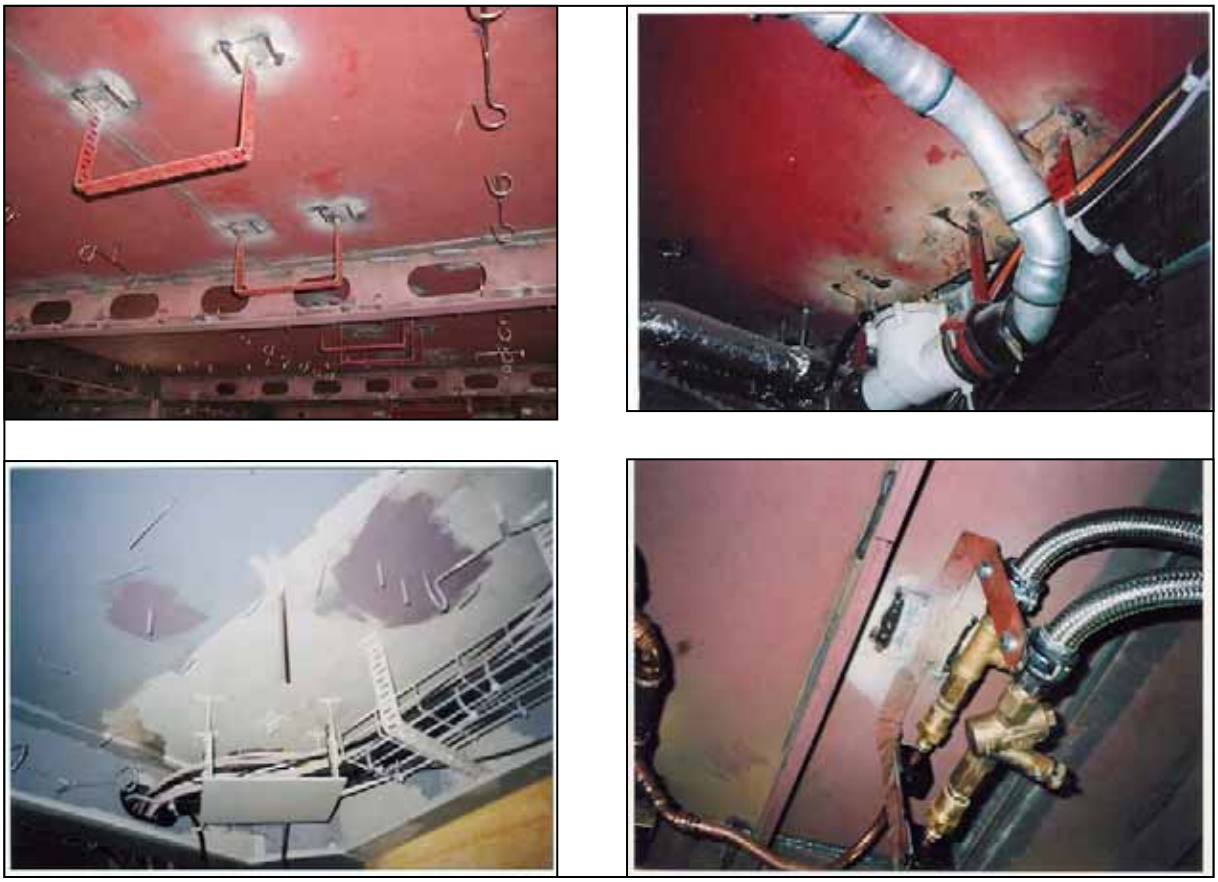


Bild 31: Verbindung von Rohrhalterungen / Kabelhaltern / Rahmenprofilen an lasergeschweißte Sandwichpaneele mit MSG-, Lichtbogenhand-, Bolzenschweißen

Eine besondere Rolle bei der Anwendung thermischer Fügeverfahren in der Ausrüstung spielt das Bolzenschweißen (Bild 32). Neben den konventionellen Gewindebolzen können eine Vielzahl von Geometrien von Ausrüstungselementen verschweißt werden, z.B. gebogene Kabelhalter (Bild 31, links oben, links unten). Das Bolzenschweißen bringt durch seine punktförmige Verbindungsstelle eine relativ geringe Energie in das umgebende Material ein, daher ist prinzipiell der Nacharbeitsaufwand (großflächiges Beschleifen und Beschichten) etwas geringer als beim MSG-Schweißen. Diese Tendenz wird durch spezielle Modifikationen des klassischen Bolzenschweißens mit Hubzündung (Bild 32, links), insbesondere dem Kurzzeitbolzenschweißen (Bild 32, rechts), noch verstärkt. Durch Einsatz einer Inverterstromquelle und einer speziellen Setzmechanik wird nur ein Teil der thermischen Energie im Vergleich zum Hubzündungsbolzenschweißen benötigt. Diese Verfahrensmodifikation wird aber in der Praxis noch relativ selten eingesetzt. In den weiteren Analysen soll es mit mechanischen Fügeverfahren verglichen werden, es sollen auch exemplarische Festigkeitsversuche (Abschnitt 2.1.11) mit Bolzenschweißverfahren durchgeführt werden.

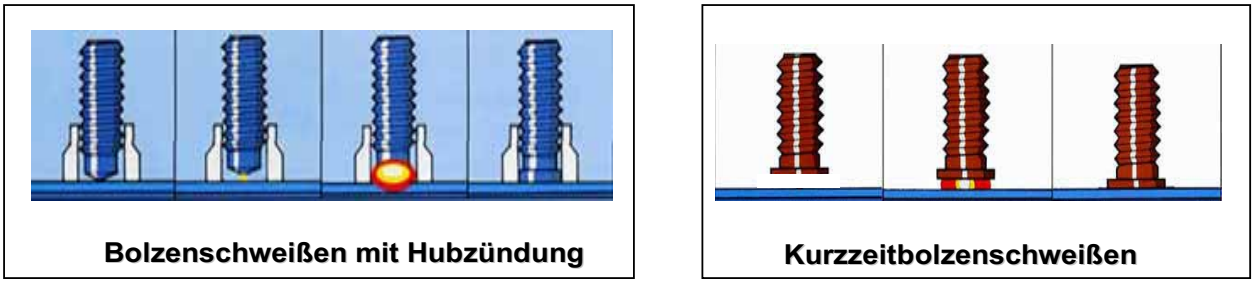


Bild 32: Verfahrensprinzip Bolzenschweißen mit Hubzündung (links) und Kurzzeitbolzenschweißen (rechts)

Ermittlung der Eignung von Fügeverfahren zur Verbindung von Sandwichpaneelen untereinander aus konstruktiv-fertigungstechnischer Sicht

Die Verbindung des Quer- und Längsstoßes von Sandwichpaneelen mit Kasten-/ Rundprofilen kann durch Einzelfügepunkte mit mechanischen oder thermischen Fügeverfahren (Bild 33) oder durch flächiges bzw. linienförmiges Fügen mit Kleb- oder thermischen Fügeverfahren realisiert werden.
Nachfolgend sollen ausschließlich die Möglichkeiten der Verbindung mit Einzelfügepunkten untersucht werden, da die mechanischen Fügeverfahren im Wesentlichen durch einzelne Fügepunkte realisiert werden. Die mechanischen Fügeverfahren Bolzenschießen, Clinchen und Stanznieten werden für die Sandwichpaneelmontage nicht weiter untersucht, da wichtige Einsatzkriterien hier nicht gegeben sind (Dicke der Verbindung, beidseitige Zugänglichkeit).
Bei der Verbindung von Sandwichpaneelen werden nachfolgend Varianten untersucht, die zusätzliche Kastenprofile beinhalten (Bild 33, links und Mitte) bzw. die ohne zusätzliche Kastenprofile sein könnten und deren Stege überlappt herausgeführt werden (Bild 33, rechts).

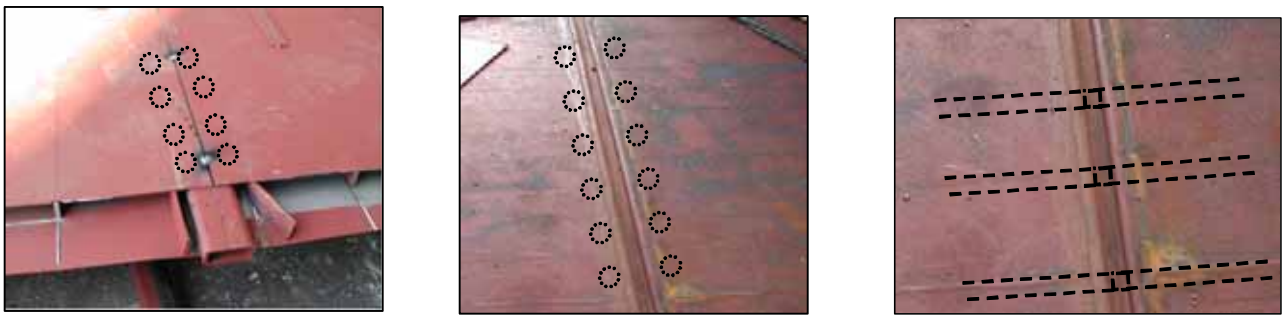


Bild 33: Möglichkeiten des mechanischen Fügens von Sandwichpaneelen: Querstoß mit Kastenprofil und fiktiven Fügepunkten (links), Längsstoß mit Kastenprofilen und fiktiven Fügepunkten (Mitte), Längsstoß mit fiktiven Stegüberlappungen (rechts)

Nachfolgend werden Vor- und Nachteile möglicher Fügeverfahren vorgestellt (Tabelle 8), zunächst die mechanischen Fügeverfahren und das Kleben, außerdem punktförmige und linienförmige thermische Fügeverfahren zum Vergleich.

Fügeverfahren	Vorteile	Nachteile
Blindnieten	- hohe Festigkeit - einseitige Zugänglichkeit - wärmefreies Fügen - geringe Geräteinvestition	- Vorbohren / Senken notwendig
Schließringbolzen	- sehr hohe Festigkeit - wärmefreies Fügen - geringe Geräteinvestition	-Vorbohren / Senken notwendig zweiseitige Zugänglichkeit beim Setzen
Umformschrauben	- wärmearmes Fügen - sehr geringe Geräteinvestition	-Vorbohren / Senken für Deckblech u.U.notwendig (bei größeren Blechdicken) -dynamische Festigkeits-untersuchungen notwendig
Kleben	- wärmefreies Fügen - geringe Geräteinvestition - Dichten und Fügen in einem Arbeitsgang	-Fügeflächenvorbereitung aufwendig - thermische Beständigkeit begrenzt (ca. 150°C/ Alterung
Laserschweißen	- linienförmige Fügung mit geringem Wärmeeintrag	-sehr hohe Geräteinvestition
Metall-Schutzgas-Schweißen (MSG)	- linienförmige Fügung mit Dichtfunktion und sehr hoher Festigkeit	- relativ hoher Wärmeeintrag (Thermodeformation, Brandschutz) - Zerstörung von Konservierung

Einseitiges Punktschweißen	- relativ hohe Fügegeschwindigkeit	- partielle Zerstörung von Konservierung - Wärmeeintrag (Brandschutz)
Buckelschweißen	- hohe Fügegeschwindigkeit	- partielle Zerstörung von Konservierung - Wärmeeintrag (Brandschutz) - Kosten für Buckel auf Profilen
Plasma-/MIG-Löten	- relativ hohe Fügegeschwindigkeit - linienförmige Fügung mit Dichtfunktion und hoher Festigkeit	- aufwendige Fügeflächenvorbereitung - Wärmeeintrag (Brandschutz)

Tabelle 8: Vor- und Nachteile von mechanischen und thermischen Fügeverfahren bei der Montage von Sandwichpaneelen untereinander

An die zu fügenden Sandwichpaneele werden konstruktive Anforderungen gestellt, sie werden nachfolgend mit den Vor- und Nachteilen der verschiedenen Fügeverfahren kombiniert und in einer Übersicht dargestellt (Tabelle 9).

Fügeverfahren / **Konstruktive Anforderungen**	*Blind-nieten*	*Schließ-ringbolzen*	*Umform-schrauben*	*Kleben*	*Laser-schwei-ßen*	*MSG.-schwei-ßen*	*Punkt-schwei-ßen*	*Buckel-schwei-ßen*	*Plasma-/ MIG-Löten*
▪ Dichtigkeit / Seewasserbeständigkeit (mit Dichtstoffen)	5	5	5	10	5	10	4	4	10
▪ Statische / dynamische Festigkeit (Schub- / Normalbelastung)	9	9	5	5	9	10	9	9	9
▪ zusätzliche Eigenspannungen	8	8	8	10	5	4	6	6	7
▪ Temperaturanfälligkeit der ▪ Fügeverbindung (-40 bis150°C	8	8	5	3	10	10	8	8	10
▪ Beinträchtigung vorhandener / zukünftiger Konservierungen	9	9	9	10	6	3	5	5	7
▪ Eignung für Fügung verschiedener Materialien	8	8	5	7	2	2	2	2	3
▪ Brandschutzanforderungen an Fügeumgebung	10	10	10	10	8	3	5	5	3
▪ notwendige Montagefreiheit	8	8	8	9	7	8	7	7	8

Wichtung:* *1 (ungeeignet) …..10 (sehr gut geeignet)

Tabelle 9: Vergleich der verschiedenen Möglichkeiten der Sandwichpaneelmontage entsprechend wichtiger konstruktiver Anforderungen

Im Ergebnis der Analyse kann festgestellt werden, dass von den betrachteten Fügevarianten die Blindniet- und Schließringbolzenvarianten eine mögliche und sinnvolle Alternative zu den eingesetzten MSG-Schweißverfahren sein könnten. Im Verlaufe des Vorhabens wurden allerdings die Möglichkeiten der Sandwichpaneelmontage mittels MSG-Verfahren deutlich verbessert, so dass im Weiteren nur exemplarisch die Möglichkeiten der Sandwichpaneelmontage mit mechanischen Fügeverfahren betrachtet werden.
Einen stärkeren Fokus bei den Untersuchungen erhielt nach Absprache mit den beteiligten Werften die Montage von Ausrüstungselementen an lasergeschweißte Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen.

Ermittlung der Eignung von Fügeverfahren zur Verbindung von Ausrüstungselementen an Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen aus konstruktiv-fertigungstechnischer Sicht

Die Verbindung von Rohr- und Kabelhaltern bzw. weiteren Halterungen an dünnwandige Sandwichpaneele wird häufig mit Dopplungen versehen und i.d.R. mit MSG-/ Lichtbogenhandverfahren geschweißt (Bild 34). Häufig wird auch das Bolzenschweißen eingesetzt, z.B. für die Befestigung verschiedener Kabel- und Rohrhaltergeometrien.

Bild 34: Geschweißte Rohr- und Kabelhalter sowie Schweißbolzen in der Ausrüstung von lasergeschweißten Sandwichpaneelen

Folgende mechanischen Fügeverbindungen konnten im Rahmen von Voruntersuchungen für die Ausrüstung von Sandwichpaneelen bereits als besonders geeignet eingestuft werden:
- Blindnieten,
- Blindnietmuttern / Blindnietbolzen.

Bild 35: Möglichkeiten des Einsatzes mechanischer Fügeverfahren bei der Befestigung von Ausrüstungselementen an Sandwichpaneelen: gesetzte Blindnietmutter in 3mm-Deckblech (links, Seiten- und Vorderansicht), Befestigung einer Rohrschelle durch Einschrauben in die Blindnietmutter (rechts)

In Tabelle 10 werden die Vor- und Nachteile optionaler mechanischer Fügeverfahren sowie heute eingesetzter und optionaler thermischer Fügeverfahren für die Sandwichpaneelausrüstung vorgestellt.

Fügeverfahren	Vorteile	Nachteile
Blindnieten	- hohe Festigkeit - einseitige Zugänglichkeit - wärmefreies Fügen - geringe Geräteinvestition	- Vorbohren / Senken notwendig
Blindnietmuttern / Blindnietbolzen	- Ausrüstungselement kann ein- bzw. aufgeschraubt werden - einseitige Zugänglichkeit - wärmefreies Fügen - geringe Geräteinvestition	- Vorbohren / Senken notwendig

Schließringbolzen	- sehr hohe Festigkeit - wärmefreies Fügen - geringe Geräteinvestition	-Vorbohren / Senken notwendig - zweiseitige Zugänglichkeit beim Setzen notwendig
Umformschrauben	- wärmearmes Fügen - sehr geringe Geräteinvestition	-Vorbohren / Senken für Deckblech notwendig -Bisherige Grenzblechstärke bei Stahl ohne Vorbohren ca. 3mm -dynamische Festigkeits-untersuchungen notwendig
Kleben	- wärmefreies Fügen - geringe Geräteinvestition	-Fügeflächenvorbereitung aufwendig -thermische Beständigkeit begrenzt (ca. 150°C) / Alterung
Metall-Schutzgas-Schweißen (MSG) / Lichtbogenhandschweißen	- hohe Fügegeschwindigkeit - gute Zugänglichkeit mit den Fügewerkzeugen	- relativ hoher Wärmeeintrag (Thermodeformation, Brandschutz) - Zerstörung von Konservierung

Tabelle 10: Vor- und Nachteile von mechanischen und thermischen Fügeverfahren bei der Ausrüstung von Sandwichpaneelen

Fügeverfahren **Konstruktive Anforderungen**	*Blind-nieten*	*Blindniet-muttern / -bolzen*	*Schließ-ringbolzen*	*Umform-schrauben*	*Kleben*	*MSG.-/ LBH-Schwei-ßen*
▪ Dichtigkeit / Seewasser-beständigkeit (mit Dichtstoffen)	5	5	5	5	10	10
▪ Statische / dynamische Festigkeit (Scher- / Zugbelastung)	9	7	9	5	5	10
▪ zusätzliche Eigenspannungen	8	8	8	8	10	4
▪ Temperaturanfälligkeit der ▪ Fügeverbindung (-40 bis150°C	8	8	8	5	3	10
▪ Beinträchtigung vorhandener / zukünftiger Konservierungen	9	9	9	9	10	3
▪ Eignung für Fügung verschiedener Materialien	8	8	8	5	7	2
▪ Brandschutzanforderungen an Fügeumgebung	10	10	10	10	10	3
▪ notwendige Montagefreiheit	8	8	8	8	9	8

***Wichtung:* 1 (ungeeignet) …..10 (sehr gut geeignet)**

Tabelle 11: Vergleich der verschiedenen Verbindungsmöglichkeiten bei der Sandwichpaneelausrüstung entsprechend wichtiger konstruktiver Anforderungen

Für dünnwandige Tragstrukturen (Blechdicke bis ca. 6 mm) gelten grundsätzlich die gleichen Aussagen hinsichtlich der o.g. Fügevarianten. Zusätzlich kommt hier das Verfahren Bolzenschießen hinzu, dessen Einsatzbereich blechdickenabhängig ist. Die Forderungen an die Kopf- und Scherzugfestigkeit der Ausrüstungselementebefestigung kann mit diesem Fügeverfahren erst ab ca. 5mm realisiert werden.

2.1.4 Ergebnisse des AP 122

Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen thermischer und mechanischer Fügeverfahren in der Montage von Sandwichpaneelen

Die vorangegangenen Betrachtungen zeigten bereits, dass ein pauschaler Vergleich zwischen thermischen und mechanischen Fügeverfahren aufgrund vieler Kosteneinflussfaktoren und verschiedener Anwendungsfälle nur eine eingeschränkte Aussagekraft besitzt und z.T. beispielhafte Annahmen getroffen werden müssen.
Daher werden kostenseitige Untersuchungen in der Sandwichpaneelmontage für 2 ausgewählte Fügeverfahren und für den Anwendungsfall der Querstoßmontage (siehe Abschnitt 2.1.3) vorgenommen. Die Untersuchungen für die Befestigung von Ausrüstungselementen an Sandwichprofilstrukturen sind in Abschnitt 2.1.2 mit enthalten.

Anwendungsfall	Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für folgende Fügeverfahren
Einseitiges Fügen von Steg-Steg-Verbindungen (Querstoß) in der Sandwichpaneelmontage	MSG-Schweißen Blindnieten (Schließringbolzen) **(*siehe Tabelle 13 / Tabelle 14)***

Tabelle 12: Kombination von Anwendungsfall und Fügeverfahren für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung (Montage von Sandwichpaneelen)

Für die Verbindung von Sandwichpaneelen untereinander hat sich das Metall-Schutzgas-Verfahren mit geringer Streckenenergieeinbringung etabliert. Alternativ sollen der Einsatz von hochfesten Blindnieten und Schließringbolzen betrachtet werden.
Als wirtschaftliche mechanische Fügeverfahren für das Verbinden von statisch und dynamisch hochbelasteten Großstrukturen hat sich der Einsatz von Blindnietbolzen und Schließringbolzen im Schienenfahrzeug- und Lastkraftwagenbau in den letzten Jahrzehnten bewährt. Die Kostenvorteile, die mechanische Fügeverfahren in diesen Industriezweigen bewirken, sind allerdings nur bedingt auf den Schiffbau zu übertragen.
Die Produktion von Schienenfahrzeugen und LKWs erfolgt in der Regel in Kleinserien, dies ermöglicht zum Teil den Einsatz standardisierter Bauteile und Baugruppen, wodurch beispielsweise ein kostengünstiges Vorbohren eines Großteils der erforderlichen Fügeelemente in spezialisierten Werkstätten durchgeführt werden kann. Zudem ermöglicht die bessere Zugänglichkeit der Bauteile den Einsatz spezieller hydraulischer / pneumatischer Bohrmaschinen, deren Einsatz aufgrund des Gewichtes und der Transportfähigkeit im Schiffbau nur begrenzt möglich wäre.
Ein wichtiger Punkt, der beim Einsatz von mechanischen Fügeverbindungen beachtet werden muß, ist die Notwendigkeit von Überlappverbindungen. Bei den Gurt-Gurt-Verbindungen (Querstoß) ist dies gewährleistet. Weitere Anwendungsfälle, wie Eckverbindungen, die schweißtechnisch mit einer Kehlnahtlösung versehen werden, können mit dem mechanischen Fügen nur durch eine Überlappverbindung, z.B. mit einem Winkel, gelöst werden.
Die Flanschdichtheit kann dort, wo sie erforderlich ist, durch den Einsatz von Dichtmitteln gewährleistet werden, deren Einbringung in die Verbindung einen weiteren Arbeitsgang darstellt und die Brandsicherheit u.U. herabsetzen könnte.
Ein direkter Vergleich hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit thermischer und mechanischer Fügeverfahren in der Montage ist aufgrund der vielfältigen Kosteneinflussfaktoren relativ schwierig. Zugänglichkeit, Materialart, Materialstärken, das Arbeiten in Zwangslagen und die Auslegung der Konstruktion haben erhebliche verfahrensabhängige Einflüsse auf die anfallenden Fertigungskosten. In einem beispielhaften Variantenvergleich werden für das MSG-/MAG-Schweißen sowie das Setzen von Blindnieten und Schließringbolzen die entstehenden Kosten aufgrund von Erfahrungswerten abgebildet. In Tabelle 13 werden zunächst als Grobübersicht die wesentlichen Arbeitsschritte und die erwarteten Zeiten aufgelistet.

	MAG-Schweißen	Zeit [min]	**Blindnieten**	Zeit [min]	**SRB**	Zeit [min]
Rüstzeiten	Brandschutz Wechsel von Drahtelektrode Einstellen der Schweißparameter	n. a.	Umrüsten des BN-Setzgerätes auf entsprechenden Zugkopf	5	Umrüsten des SRB-Setzgerätes auf entsprechenden Zugkopf	5
Verteilzeiten	Gasflasche wechseln Drahtspule wechseln Austausch von verbrauchter Düse	5 5 2	Vorrat an Blindnieten erneuern		Vorrat an SRB erneuern	
Haupt und Nebenzeiten	Fugenvorbereitung (Entfernen nicht leitender oder behindernder Beschichtungen) Aufnehmen des Brenners von der Ablage Aufsetzten des Kopfschutzhelmes Abzwicken des Drahtendes Positionieren des Brenners Schweißen Säubern der Schweißnaht		Auftrag von Dichtmittel Ankörnen Vorlochen Entfernen der Bohrspäne BN in das Loch einführen Setzgerät aufsetzen und auslösen Setzgerät abziehen		Auftrag von Dichtmittel Ankörnen Vorlochen Entfernen der Bohrspäne SRB in das Loch einführen Schließring aufsetzen Setzgerät aufsetzen und auslösen	

Tabelle 13: Rüst-, Verteil-, Neben- und Hauptzeiten für verschiedene Fügeverfahren in der Montage von Sandwichpaneelen

MSG-/MAG-Schweißen und Blindnieten werden nachfolgend näher betrachtet. Durch die Notwendigkeit der beidseitigen Zugänglichkeit bei Schließringbolzenverbindungen entfällt dieses Fügeverfahren für den betrachteten Anwendungsfall. Der Kostenvergleich zwischen den mechanischen Fügeverfahren Schweißen und Blindnieten in der Montage von Sandwichpaneelen zeigt, dass unter den angenommenen Rahmenbedingungen der Einsatz von Blindnieten zu wesentlich höheren Kosten führt (Tabelle 14).

	Einheit	Schweißen			Blindnieten	
Fixe Kosten						
Anschffungskosten	€			2500		2500
Nutzungsdauer	Jahr			8		8
jährliche Nutzung	h/Jahr			1600		1600
kalk. Zinsen (8%)	€/Jahr			25		25
kalk. Abschreibung (lin.)	€/Jahr			312,5		312,5
Instandhaltungskosten	€/Jahr			100		100
Lagerkosten	€/Jahr			50		50
Summe Fixkosten	€/Jahr			487,5		487,5
	€/h			0,3047		0,3047
Variable Kosten						
			Einheit		BN je Meter	16
Kosten für 1m						
Schweißzusatzwerkstoffe	kg	1	€/kg	1		
Abschmelzleistung	kg/m	3	€/m	3		
Schweißhilfsstoffe						
Schutzgas (geschätzt)	l/min	12	€/h	2,52		
			€/m	0,084		
Materialkosten					Niete (16 Stück)	8
			m/min	0,5	Dichtmittel €/m	0,2
	€/m			5,604		8,2
Arbeitsgänge Zeitaufwand	min/m	Arbeitsgang Nahtvorber. /-nachber. Schweißen		3 2	Arbeitsgang Dichtmittel auftrag Vorlochen Blindniete setzen	2 10 2
Gesamtzeit	min/m			5		14
	m/h			12,00		4,29
Personalkosten	€/h			30		30
	€/m			2,5		7
Energiekosten						
Preis kWh (geschätzt)	€/kWh			0,17		0,17
Verbrauch	kWh/h			1,141		0,456
Energiekosten	€/h			0,194		0,078
~pro Meter	€/m			0,016		0,018
Summe variable Kosten	€/m			8,12		15,22

Tabelle 14: Exemplarischer Kostenvergleich zum Fügen von Sandwichpaneelen durch Schweißen und Blindnieten

Insbesondere der Aufwand des Arbeitsganges des Vorlochens unter Vormontagebedingungen führt zu deutlichen Nachteilen des einzusetzenden mechanischen Fügeverfahrens Blindnieten. Die Schließringbolzenverbindung wurde in Tabelle 14 nicht weiter betrachtet, da die Notwendigkeit der zweiseitigen Zugänglichkeit zusätzliche Kostenaufwände verursacht.
Für einen wirtschaftlichen Einsatz mechanischer Fügeverfahren in der Sandwichpaneelmontage würden bereits in der Entwurfs- / Konstruktionsphase und der Vorfertigungsphase eines Schiffes entsprechende nietgerechte Konstruktionen bedingen, insbesondere hinsichtlich des Vorlochens. Bei unterschiedlichen Werkstoffkombinationen (z.B. schwer schweißbare Stähle, Aluminium, Kunststoffe) würde allerdings das Blindnieten, im Allgemeinen in Kombination mit Dicht- und Klebstoffen, eine effiziente Fügevarinate darstellen.

2.1.5 Ergebnisse des AP 211

Auswahl der Anwendungen / technischen Varianten in der Ausrüstung von Standard-Tragstrukturen

Nach der Analysephase sollen Anwendungen in der Ausrüstung ausgewählt werden, deren fügetechnische Optimierung den höchsten Effekt in der Anwendung verspricht. Dazu werden entsprechend einer Analyse in mehreren Werften die relevanten Ausrüstungselemente in Klassen zusammengefasst und nach den Kriterien Wiederholungsgrad in der Fertigung (W) und Rationalisierungspotential (R) zueinander in Beziehung gesetzt und das Gesamtrationalisierungspotential RxW ermittelt (Bild 36, Tabelle 15).

Gesamtrationalisierungs-potential (RxW)	ab 6	5 bis 6	4 bis 5	3 bis 4	2 bis 3	1 bis 2	0 bis 1
Einsatzfälle	Kabelbahnen(1) Kleinhalterung (2)	Rohrhalter bis DN 25 (3) Sammelhalter (4)	Lüfterklappen (5)	Schaltschrank bis 25 kg (6) Lampen (7) Schilder (8) Türfeststeller (9)	Geländer (10) Handläufe (11) Außentreppen (12)	Feuerlöschhalter (13) Rettungsringhalter (14) Schlauchkasten (15) Lautsprecher (16)	Stutzen (17) Wanddurchbruch (18) Decksdurchbruch (19)

Tabelle 15: Zusammenstellung der Einsatzfälle von Ausrüstungselementen nach ihrem prognostizierten Gesamtrationalisierungspotential mit den Klassen 0 bis 6 (RxW: 0 bis 1 = gering …. 5 bis 6 = hoch)

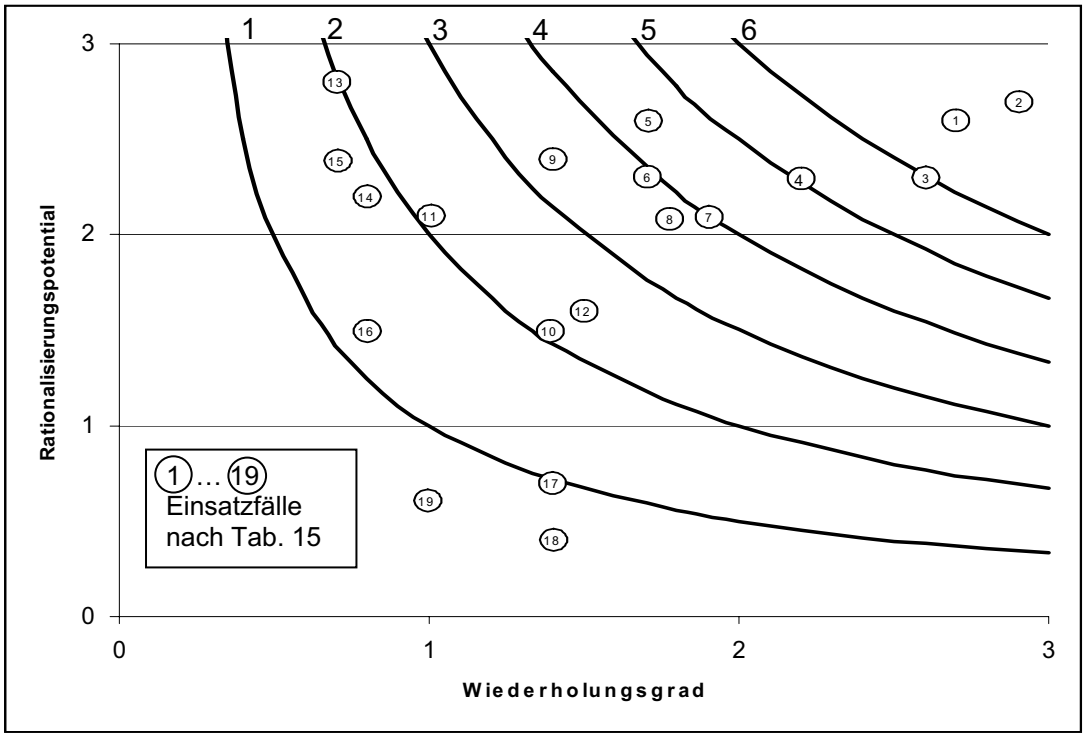


Bild 36: Ermittlung effizienter Anwendungsfälle für mechanische Fügeverfahren in der Ausrüstung (nach ihrem Rationalisierungspotential und dem Wiederholungsgrad geordnet)

Es ist aus den Untersuchungen ersichtlich, dass für die Substitution von Fügeverfahren in der Ausrüstung vor allem Rohr- und Kabelhalterungen sowie weitere Kleinhalterungen den größten wirtschaftlichen Effekt versprechen. Aus den Vergleichsuntersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von mechanischen Fügeverfahren in der Ausrüstung im Vergleich zu thermischen Verfahren werden daher die folgenden Verfahren hinsichtlich der Abstimmung von Verbindung und Peripherie untersucht:
- Blindnieten
- Blindnietmuttern
- Schließringbolzen
- Schubbolzen.

Zum Vergleich wird bei Bedarf das Bolzenschweißen hinzugezogen.
Bei der Auswahl der möglichen Anwendungen werden zunächst konstruktive Prinzipanwendungen zur Kombination mit den relevanten mechanischen Fügeverfahren ermittelt (Bild 37):

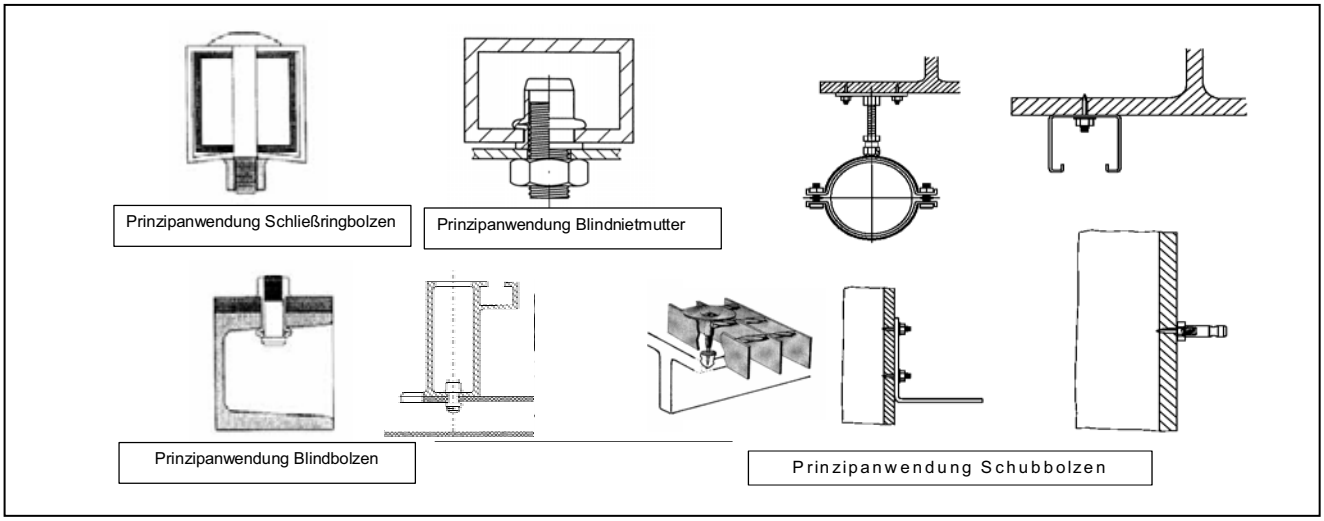


Bild 37: Darstellung von Prinzipanwendungen für die Anwendung mechanischer Fügeverfahren in der Ausrüstung von Standard- und dünnwandigen Tragstrukturen [54, 59]

Für die einzelnen mechanischen Fügeverfahren existiert i.d.R. ein spezifischer Anpassungsbedarf an die schiffbaulichen Anwendungen in der Ausrüstung. Diese Anpassung beinhaltet im Wesentlichen die Setzgeräte, die Verbindungselemente und die Vorbereitung der Platte und der zu fügenden Halterung (Tabelle 16).

Mechanisches Fügeverfahren	**Anpassungsbedarf an schiffbauliche Ausrüstungsanwendungen**		
	Setzgeräte	**Verbindungs-elemente**	**Vorbereitung Platte / Halterung**
Blindnieten /-bolzen	- evtl. kurze Bauhöhe / Ecklösung für Setz-geräte notwendig	-	- Loch in Platte / Halterung
Blindnietmuttern	- evtl. kurze Bauhöhe / Ecklösung für Setz-geräte notwendig	-	- Loch in Platte / Halterung
Schließringbolzen	- evtl. kurze Bauhöhe / Ecklösung für Setz-geräte notwendig	-	- Loch in Platte / Halterung
Schubbolzen	- evtl. kurze Bauhöhe / Ecklösung für Setzgeräte problematisch	- Bolzen / Nägel nur bis 10mm Durch-messer	-

Tabelle 16: Anpassungsbedarf der relevanten mechanischen Fügeverfahren an schiffbauliche Ausrüstungsanwendungen

2.1.6 Ergebnisse des AP 212

Auswahl der Anwendungen in der Ausrüstung von Standard-Tragstrukturen aus wirtschaftlicher Sicht

Aus Tabelle 15 und Bild 36 ergeben sich aus wirtschaftlicher Sicht (Gesamtrationalisierungspotential: RxW) folgende Anwendungsbeispiele:
-RxW=6…3, d.h. relativ hohes Rationalisierungspotential: Kabelbahnhalter, Rohrhalter, Schaltschrankbefestigung,
- RxW=1…2, d.h. relativ geringes Rationalisierungspotential, jedoch schnelle Umsetzung durch geringen Anpassungsbedarf: Klein- (Dünnblech)halterungen
Als Musterbaugruppen für die folgenden Untersuchungen im Ausrüstungsbereich werden kopf- und scherzugbelastete Flachprofilhalterungen ausgewählt (Bild 37). Dabei werden Lösungen für Blechdicken ab 8 mm untersucht. In Bild 38 ist eine entsprechend scherzugbelastete Rohrhalterung beispielhaft mit dem Verfahren Schubbolzen gefügt. Dieses Verfahren zeichnet sich durch ihre vor- und nacharbeitsfreie Verarbeitung aus, insbesondere die nicht notwendige Vorlochoperation ist ein Vorteil. Bei Blechdicken kleiner 10 mm und Gewindebolzen mit 10 mm Durchmesser ist allerdings eine Durchdringung des Grundmaterials möglich, was evtl. zu Nachkonservierungsaufwänden führen könnte (Bild 38). Der notwendige Lärmschutz und die im Vergleich zum Schweißen und Blindnieten/ Schließringbolzen geringeren statischen und dynamischen Verbindungsfestigkeiten stellen Nachteile dieses Verfahrens dar.

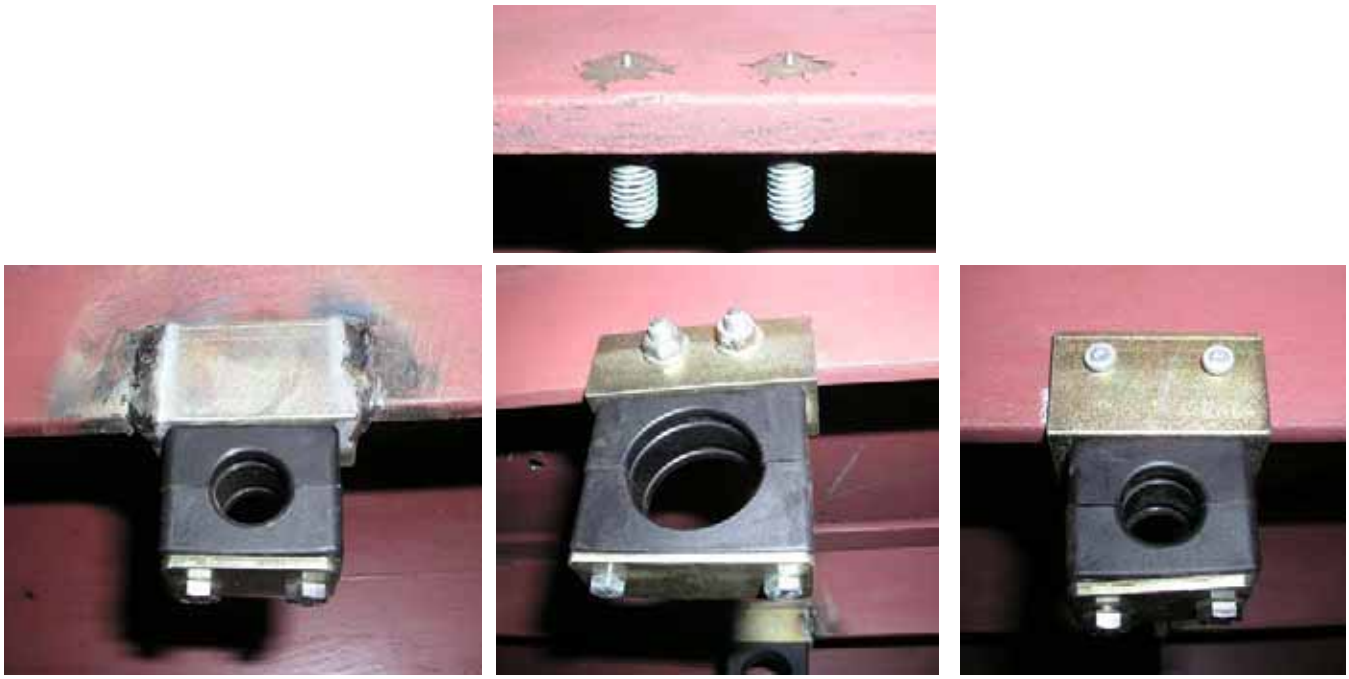


Bild 38: Befestigung eines Rohrhalters mittels MSG-Schweißen (links), Schubbolzen (Gewindebolzen – Mitte, Nagel- rechts)

Neben den Schubbolzenverbindungen werden Blindniet- und Schließringbolzen-verbindungen untersucht. Blindnietmutterverbindungen werden aufgrund ihrer höheren Einsatzeffizienz im Bereich geringerer Blechdicken im Rahmen der Sandwichpaneeltests untersucht (Siehe Abschnitt 2.1.7 und 2.1.8). Der Einsatz von mechanischen Fügeverfahren mit Vorlochoperation verursacht bei den im ausrüstungsrelevanten Schiffbau üblichen Blechdicken von Standard-Tragstrukturen (ca. 6-14 mm) vergleichsweise höhere Kosten als im Dünnblechbereich. Dies ist auf einen höheren Zeitbedarf beim Bohren und mit zunehmender Klemmlänge steigende Materialkosten des Blindnietes/ Schließringbolzen zurückzuführen. Mit zunehmender Blechdicke verschieben sich damit die Kosten-unterschiede zwischen Blindnieten/SRB und thermischen Verfahren zugunsten des Schweißens bzw. Bolzenschubverfahrens.

2.1.7 Ergebnisse des AP 221

Auswahl der Anwendungen / technischen Varianten in der Montage und Ausrüstung von Sandwichpaneelen und dünnwandigen Tragstrukturen

In Abschnitt 2.1.3 wurde festgestellt, dass für die Montage an Sandwichpaneelen aufgrund der Weiterentwicklung des Fügeverfahrens MSG-Schweißen während des Vorhabens nur exemplarische Untersuchungen zu mechanischen Fügetechniken in der Sandwichpaneelmontage vorzunehmen sind. Dabei kamen entsprechend der Präferenz für Blindnieten in Abschnitt 2.1.3 die hochfesten Verbinder Huck-Lok und Monobolt zum Einsatz. Die Verwendung von Schließringbolzen wäre zwar grundsätzlich möglich, erfordert allerdings eine zweiseitige Zugänglichkeit, die bei der Montage nicht vorausgesetzt werden kann.
Zum Vergleich wurden Untersuchungen mit den Schweißverfahren MAG und E-Hand durchgeführt. Konstruktiv war bereits für die Variante mit dem Fügeverfahren Schweißen eine Überlappung des Deckbleches mit einem Vierkantprofil vorgesehen worden, so dass eine Blindnietverbindung nach dem Bohren problemlos realisiert werden konnte (Bild 39).
Die praktische Erprobung des Verfahrens in Vorversuchen bestätigte, dass die notwendigen Vorlochoperationen im Vergleich zum Setzprozess einen Großteil der Gesamtarbeitszeit beanspruchten.

Bild 39: Mechanisches Fügen von Sandwichpaneelen mit Blindnieten (Steg-Steg-Querverbindung mit ø 6mm - Bild links, Eckverbindung mit Winkelprofil mit ø 10mm - Bild rechts)

In Bild 39 (rechts) ist das Fügen von Sandwichpaneelen als Eckverbindung dargestellt. Die zum Fügen notwendige Überlappung wurde durch einen zusätzlichen Winkel realisiert. Durch den Verzicht auf jegliche Heftschweißung traten zwei wesentliche Probleme während der Fertigung auf. Einerseits die Fixierung des Winkels und des Sandwichpaneels während des Vorlochens, und andererseits ein qualitätsgerechtes Vorlochen zwischen den Stegen des Sandwichpaneels stellten Anforderungen an zusätzliche Vorrichtungen zur Fixierung.
Das vergleichsweise durchgeführte Verschweißen von Sandwichpaneelen unter gleichen Bedingungen erwies sich durch ein relativ einfaches Heften der Verbindung und das folgende Abschweißen als das schnellere und somit kostengünstigere Verfahren für diese Aufgabenstellung, da sich die fixen Kosten der beiden Verfahren kaum unterscheiden (siehe Abschnitt 2.1.4).
Im visuellen Vergleich der Verfahren zeichnet sich das Blindnieten insbesondere durch eine verzugsfreie Verarbeitung und nacharbeitsfreie Optik aus (Bild 40 und 41 rechts). Dem gegenüber steht der vergleichsweise hohe Fertigungsaufwand, insbesondere des Vorbohrens, und u.U. die Notwendigkeit der Einbringung von Dichtmitteln.

Bild 40: Verbinden einer Sandwichpaneel-Eckverbindung mit E-Hand-Schweißung / Kehlnaht (links) und mit hochfesten Blindnieten (rechts)

Bild 41: Verbinden einer Sandwichpaneel-Stumpfnahtverbindung über MAG-Schweißung / Heftung (links) und mit hochfesten Blindnieten (rechts)

Die Versuche zeigen, dass das mechanische Fügen von Sandwichpaneelen im Schiffbau grundsätzlich durchführbar ist. Die Vorteile der mechanischen Fügetechnik kommen allerdings an den untersuchten Beispielen aus der schiffbaulichen Praxis kaum zum Tragen, die im Schiffbau vorherrschenden Materialarten und Konstruktionsprinzipien sind auf die Anwendung von thermischen Fügeverfahren ausgelegt und haben hinsichtlich der Paneelmontage z.Zt. einen für die Praxis befriedigenden Stand erreicht. Erst eine erhebliche Blechdicken- und Materialdifferenzierung (z.B. Kombination Stahl-Kunststoff) würde weitere Untersuchungen sinnvoll erscheinen lassen.
Im Verlaufe des Vorhabens wurde daher die Befestigung von Ausrüstungselementen an Sandwichpaneelen durch Blindnieten, Blindnietmuttern und vergleichsweise mit Schweißbolzen erprobt, die vorhandenen Blechdicken von 3-5 mm und die Unzugänglichkeit der Rückseite des Deckbleches eignen sich dabei sehr gut für Blindnietverfahren.
Schweißbolzen führen bei diesen Blechdicken aufgrund ihrer hohen Wärmeentwicklung mindestens zu einer Beschädigung der Farbschicht der Vorder- und Rückseite des Bleches, bei großen Bolzendurchmessern u.U. zu einem völligen Aufschmelzen des Bleches.
Bild 42 zeigt eine gesetzte Blindnietmutter im Vergleich zu einem Schweißbolzen. Hier musste im Vorfeld die Fügestelle angeschliffen werden. Es ist ebenfalls im Unterschied zum mechanischen Fügeverfahren eine gewisse Nacharbeit (Beschleifen, Nachkonservierung) erforderlich.

Bild 42: Gesetzte M10 Blindnietmutter (links) und Schweißbolzen (rechts) auf geprimertes Sandwichpaneel mit 3mm Blechdicke

Neben den Blindnietmuttern sind Blindnieten gut geeignet, auf Sandwichpaneelen Dünnblechhalterungen verschiedenster Art, z.B. zur Feuerlöscherbefestigung, anzubringen. Besonders vorteilhaft ist die Beibehaltung der Unversehrtheit der Zinkschicht der Halterung nach dem Fügevorgang aus Sicht des Korrosionsschutzes (Bild 43).

Bild 43: Einsatz von hochfesten Blindnieten (Ø 6,4 mm) auf Sandwichpaneel zur Befestigung einer Feuerlöscherhalterung

Die Vorversuche ergaben, dass insbesondere an Sandwichpaneelen die Befestigung von Ausrüstungsgegenständen mittels Blindnieten eine wirtschaftliche Alternative zu Schweißverfahren darstellt. Die geringen Blechdicken ermöglichen ein relativ schnelles Vorbohren.
Für die einzelnen mechanischen Fügeverfahren existiert i.d.R. ein geringer Anpassungsbedarf an die Anwendungen in der Ausrüstung von Sandwichpaneelen. Diese Anpassung beinhaltet im Wesentlichen die Vorbereitung der Platte und der zu fügenden Halterung (Tabelle 17).

Mechanisches Fügeverfahren	Anpassungsbedarf an schiffbauliche Ausrüstungsanwendungen		
	Setzgeräte	Verbindungs-elemente	Vorbereitung Platte / Halterung
Blindnieten /-bolzen	-	-	- Loch in Platte / Halterung
Blindnietmuttern	-	-	- Loch in Platte / Halterung

Tabelle 17: Anpassungsbedarf der relevanten mechanischen Fügeverfahren an die Ausrüstung von Sandwichpaneelen und dünnwandigen Tragstrukturen

2.1.8 Ergebnisse des AP 222

Auswahl der Anwendungen in der Sandwichpaneelausrüstung aus wirtschaftlicher Sicht

Aus Tabelle 15 und Bild 36 ergeben sich aus wirtschaftlicher Sicht (Gesamtrationalisierungspotential: RxW) folgende Anwendungsbeispiele für die Sandwichpaneelausrüstung, die im Wesentlichen mit den Ergebnissen der schiffbaulichen Ausrüstung übereinstimmen:

- RxW=6…3, d.h. relativ hohes Rationalisierungspotential: Kabelbahnhalter, Rohrhalter, Schaltschrankbefestigung,
- RxW=1…2, d.h. relativ geringes Rationalisierungspotential, jedoch schnelle Umsetzung durch geringen Anpassungsbedarf: Klein- (Dünnblech)halterungen

Als Musterbaugruppen für die folgenden Untersuchungen im Ausrüstungsbereich werden kopf- und scherzugbelastete Flachprofilhalterungen im Blechdickenbereich von 2 – 4 mm ausgewählt und mit den Fügeverfahren Blindnieten und Blindnietmuttern kombiniert.

2.1.9 Ergebnisse des AP 311

Ermittlung der statischen und dynamischen Tragverhaltenseigenschaften von mechanisch gefügten Ausrüstungselementproben

Die schiffbauliche Endausrüstung erfordert eine sichere Integration von verschiedenartigen Baugruppen in die tragende Schiffskonstruktion auf begrenztem Raum. Dies erfordert eine funktionsgerechte Gestaltung und beanspruchungsgerechte Dimensionierung der Ausrüstungselemente.
Die Ausrüstungselemente unterliegen sowohl statischen als auch dynamischen Beanspruchungen, die aus der aufzubringenden Tragkraft und zeitlich veränderlichen Lasten resultieren.
Auf dem Gebiet der Betriebsfestigkeit von Schiffskonstruktionen sind in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt worden. Klassifikationsgesellschaften, insbesondere der Germanische Lloyd, haben in den letzten Jahren entsprechende Regeln in ihre Bauvorschriften aufgenommen. Nach [37] ist ein Betriebsfestigkeitsnachweis für überwiegend dynamisch beanspruchte Bauteile zu führen. Ausrüstungsteile wie z.B. Halterungen sind dabei nur insofern zu berücksichtigen, falls sie die Schiffskonstruktion schwächen, z.B. durch die Einbringung von Kerbstellen.
Hinweise zur Berücksichtigung der in tragende Schiffkonstruktionen integrierte Ausrüstungsteile existieren kaum. Dies wird z.B. durch eine Auflistung von Konstruktionsdetails bestätigt, die nach dem Nennspannungskonzept zur Bewertung der Betriebsfestigkeit zu berücksichtigen sind [37]. Die im Rahmen des Vorhabens untersuchten Ausrüstungskonstruktionen sind hier nicht enthalten und besitzen daher keine Bewertungsgrundlage durch die Klassifikationsgesellschaften.
Die erforderlichen statischen und dynamischen Festigkeitsuntersuchungen an mechanisch gefügten Fügeverbindungen, die in der Schiffsausrüstung zur Anwendung kommen können, erfolgen daher in Anlehnung an Untersuchungen, die in anderen Industriezweigen, z.B. dem Schienenfahrzeug- und Lastkraftwagenbau, für die Befestigung von Ausrüstungselementen üblich sind.
Die dabei geforderten Untersuchungen zum Tragverhalten eines Verbindungselementes umfassen statische Kopf- und Scherzugversuche sowie ggf. die Ermittlung von Wöhlerlinien an definierten Ein- und Mehrelementproben. Das Untersuchungsprogramm umfasst die Fügeverfahren, die entsprechend schiffbaulicher Anwendungen ab einer Blechstärke von ca. 6 mm zum Einsatz kommen können. Dazu gehören Blindnieten, Schließringbolzen, Schubbolzen und zum Vergleich Schweißbolzen. Der Einsatz von Blindnietmuttern oder Blindnietgewindebolzen ist zwar prinzipiell möglich, aber bei den avisierten Blechdicken nicht wirtschaftlich sinnvoll.
In Tabelle 18 werden die durchgeführten Versuche und die dabei ermittelten Untersuchungsparameter dargestellt. Spezielle Verfahren für den Einsatz im Dünnblechbereich werden in Abschnitt 2.1.11 im Zusammenhang mit der Befestigung von Halterungen an Sandwichpaneele bzw. an dünnwandige Platte-Träger/Profilverbindungen behandelt.

Verbinder	Festigkeitsuntersuchungen		ermittelte Kennwerte
	statisch	dynamisch	
SRB	Scher-/Kopfzug	Scherzug	Zugfestigkeit, Wöhlerlinie
Schraube	Scherzug	Scherzug	Zugfestigkeit, Wöhlerlinie
Schubbolzen	Kopfzug		Zugfestigkeit
Schweißbolzen	Scher-/Kopfzug		Zugfestigkeit

Tabelle 18: Versuchsprogramm für Ausrüstungselementproben ab 6 mm Blechdicke

Im Rahmen der Aufgabenstellung ist es vorgesehen, aus den relevanten Ausrüstungselementen (Bild 44, links) die geeigneten Belastungs- und Probenformen zu generieren. Durch das Versuchsprogramm sollen die zwei wesentlichen Beanspruchungsfälle bei Ausrüstungselementen im Schiffbau untersucht werden, diese entsprechen dem überwiegend scherzugbeanspruchten Anwendungsfall (Bild 44, Mitte) und dem überwiegend kopfzugbeanspruchten Anwendungsfall (Bild 44, rechts).

Bild 44: Auswahl relevanter Ausrüstungselemente (links) und Beispiel für überwiegend scherzugbeanspruchten Rohrhalter (Mitte) und überwiegend kopfzugbeanspruchte Deckenhalterung (rechts)

Für die Probenformgestaltung können die relativ fundierten Vorgaben für mechanische Verbindungen genutzt werden, die im Rahmen von DVS/ EFB-Arbeitsgruppen auch unter Mitwirkung der Forschungsstelle normiert wurden (Bild 45).

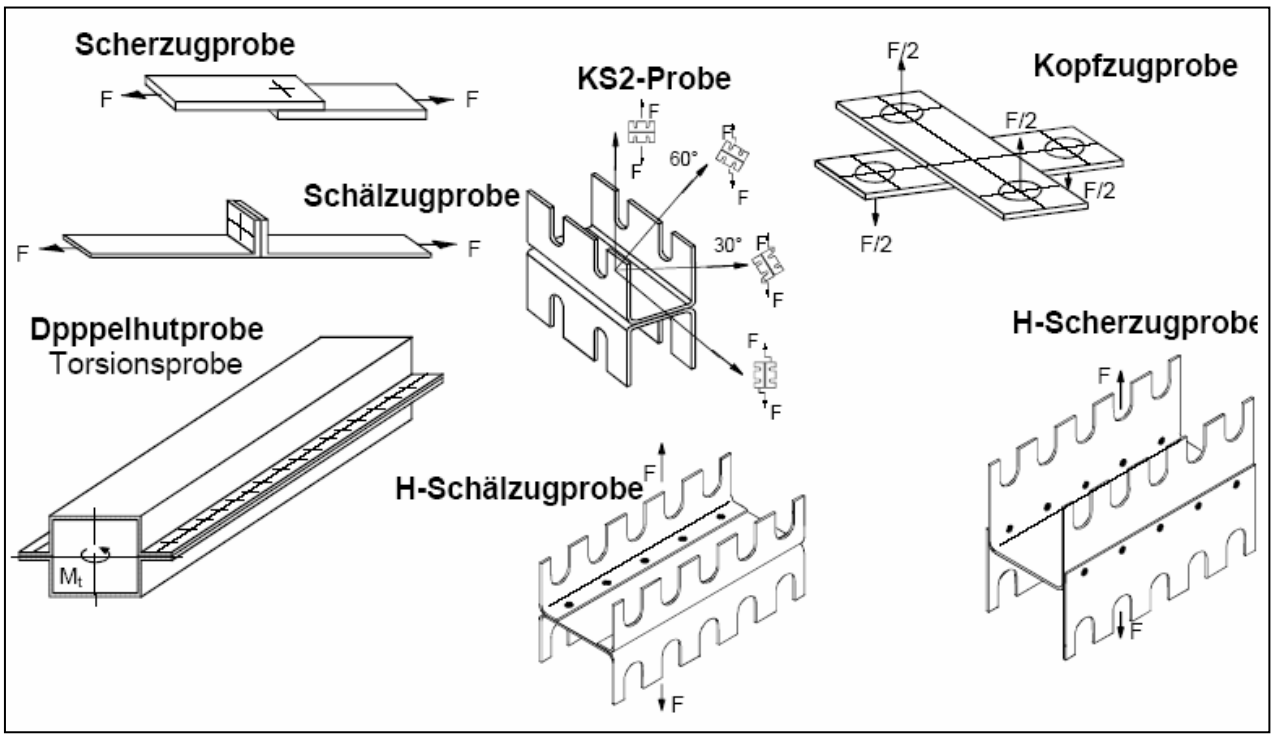


Bild 45: Typische Ein- und Mehrelementprobengeometrien zur Untersuchung von Tragfähigkeitseigenschaften [38]

Im Rahmen der durchgeführten Festigkeitsuntersuchungen mit Ein- und Mehrelementproben wurden entsprechend der Beanspruchungsfälle überwiegend Flachscherzug- und KS2-Proben verwendet (Bild 46).

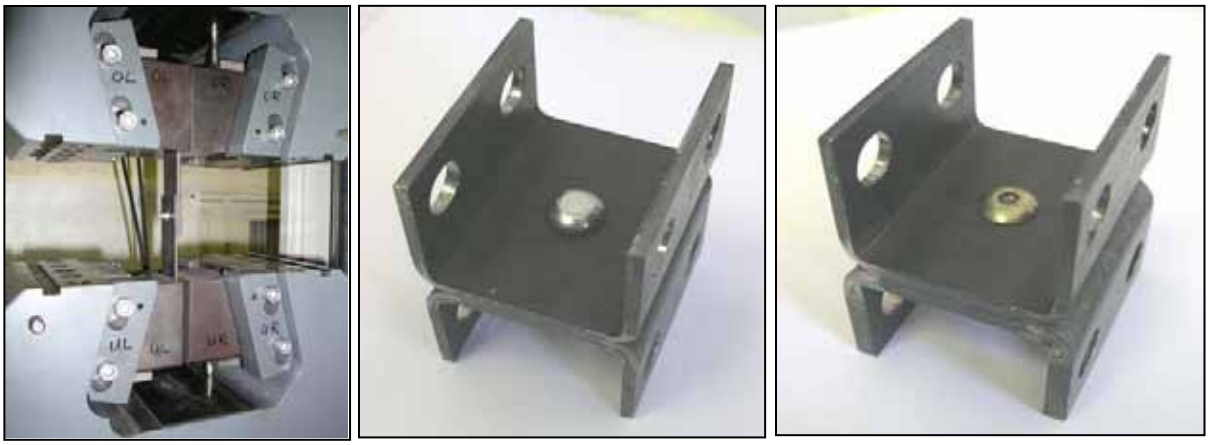


Bild 46: Scherzugversuche mit Flachproben und Schließringbolzen (links) sowie KS2-Proben mit Schließringbolzen (Mitte) und Blindnieten (rechts) für Kopf- und Scherzugversuche

Die Untersuchungen zur quasistatischen Kopfzugfestigkeit erfolgten für Schließringbolzen und Blindnieten an KS2-Proben mit einer Gesamtblechdicke von 8 mm. Schweißbolzen und Schubbolzen verschiedener Größen wurden auf Stahlplatten (Schiffbaustahl S235) mit einer Dicke von 18 mm gesetzt und auf Kopfzug geprüft (Tabelle 19). Diese Versuche erfolgten über entsprechende Vorrichtungen (Bild 47) an einer elektromechanischen Zug-/ Druckprüfmaschine Zwick Z 400 E.

Verbindungselement	Probenmaterial	Probenform
Standardschließringbolzen Ø 6,4 mm	Stahl; 5 mm / Stahl; 3 mm	KS II
Blindnieten Hem Lock Ø 6,4 mm	Stahl; 5 mm / Stahl; 3 mm	KS II
Schweißbolzen M10 Stahl 4.8	Stahl; t= 18 mm	Platte
Schubbolzen Stahl M6	Stahl; t= 18 mm	Platte
Schubbolzen Stahl M8	Stahl; t= 18 mm	Platte
Schubbolzen Stahl M10	Stahl; t= 18 mm	Platte

Tabelle 19: Versuchsprogramm zur Bestimmung der Kopfzugfestigkeit ausgewählter mechanisch gefügter Verbindungen

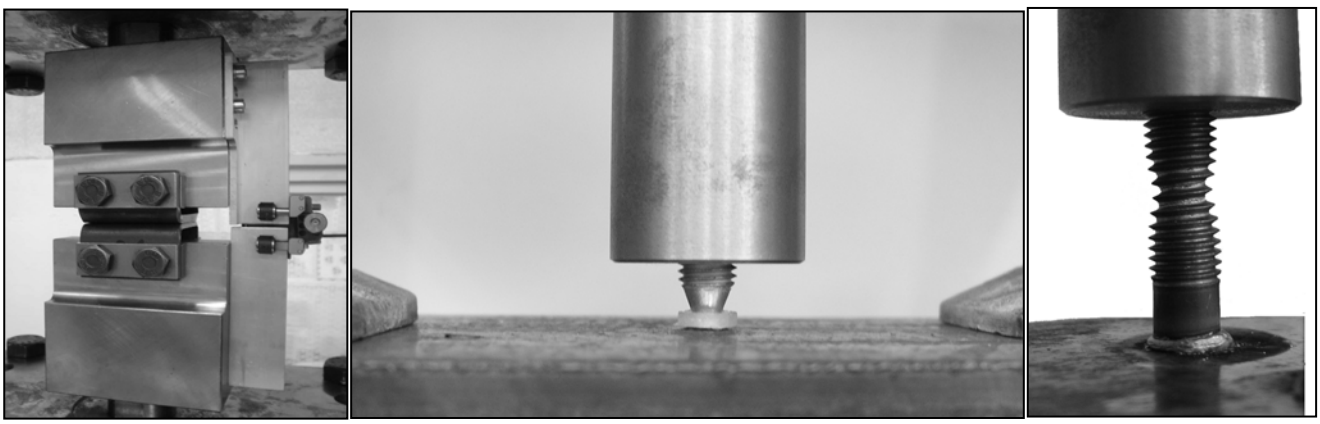


Bild 47: Kopfzugversuche an blindgenieteten KS2-Proben (links), Gewindeschubbolzen M8 (Mitte) und Schweißbolzen M10 (rechts)

Die Ergebnisse der Kopfzuguntersuchungen sind in Bild 48 dargestellt. Sie zeigen, dass Schweissbolzen, Schließringbolzen und Blindbolzen vergleichbare Festigkeitswerte im Kopfzugfall aufweisen, da die Festigkeit des Bolzenmaterials gut ausgenutzt wird. Schubbolzen schneiden bei diesen Untersuchungen wesentlich schlechter ab, da durch die Art der transienten elastisch-plastischen Umformung beim Eindringen des spitzen Schaftes in den Grundwerkstoff nur ein begrenzter Kraftschluss auftritt. Hier sind allerdings in Zukunft vielfältige Weiterentwicklungen zu erwarten. Es existiert z.B. seit kurzem eine Schubbolzenart mit stumpfer Spitze, bei der wenige Millimeter im Blech vorgebohrt werden muss. Dieser Mehraufwand führt z.T. zu wesentlich höheren Kopfzugfestigkeiten im Vergleich zu spitzen Schubbolzen.

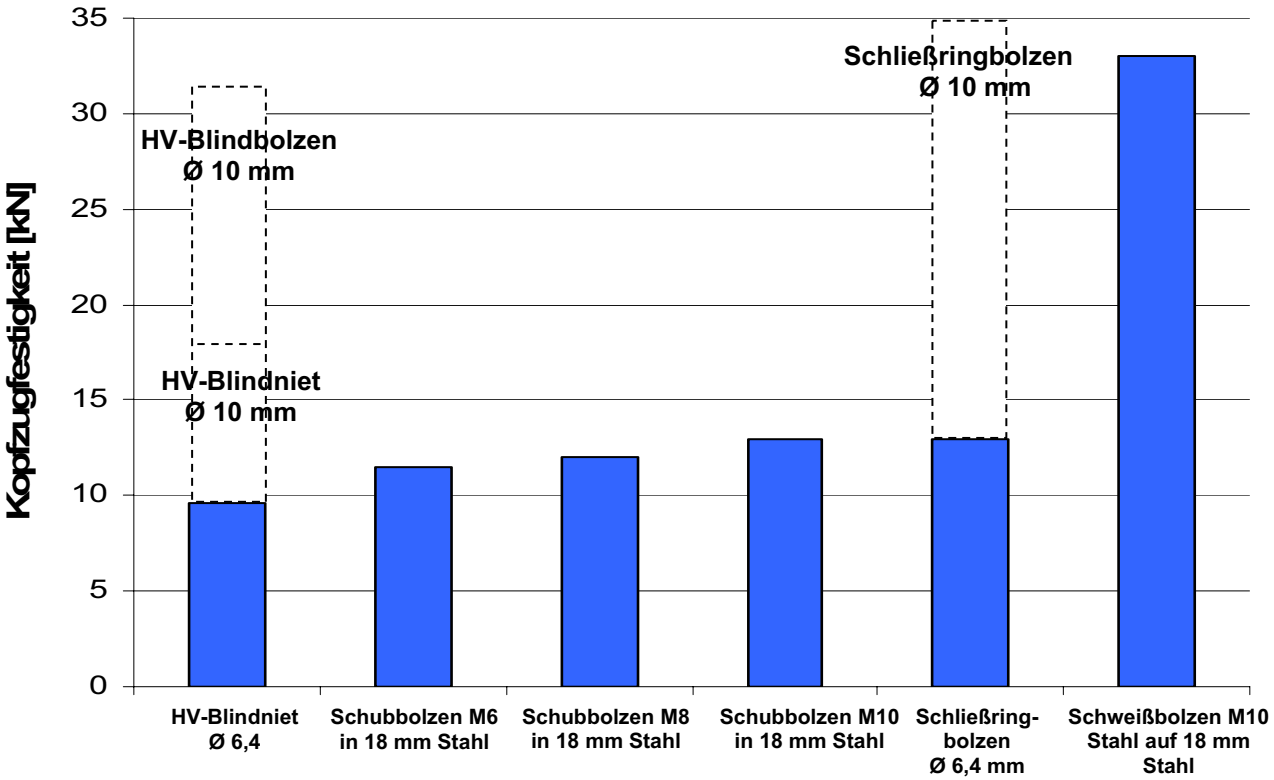


Bild 48: Zusammenfassung der ermittelten Kopfzugfestigkeiten von mechanisch gefügten Verbindungen und punktförmig-thermisch gefügten Schweißbolzenverbindungen

Im Rahmen von Scherzuguntersuchungen wurde u.a. das Verhalten von Proben untersucht, die z.B. der Scherzugbelastung von Halterungen an dünnwandigen Platte-Träger-/ Profilverbindungen entsprechen. Resultierend aus der geringeren Blechdicke verlagert sich das Verbindungsversagen unter statischer und dynamischer Beanspruchung zunehmend vom Verbindungselement in das Grundmaterial. In Bild 49 sind die Ergebnisse von Scherzuguntersuchungen für Schließringbolzenverbindungen mit Durchmesser 6,4 mm mit unterschiedlichen Blechdicken und unterschiedlichen Grundmaterialien dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass ab ca. 2 x 3mm Blechdicke die ertragbare Scherzugkraft bei allen Materialien nicht weiter ansteigen kann, da ausschließlich Verbinderversagen eintritt.

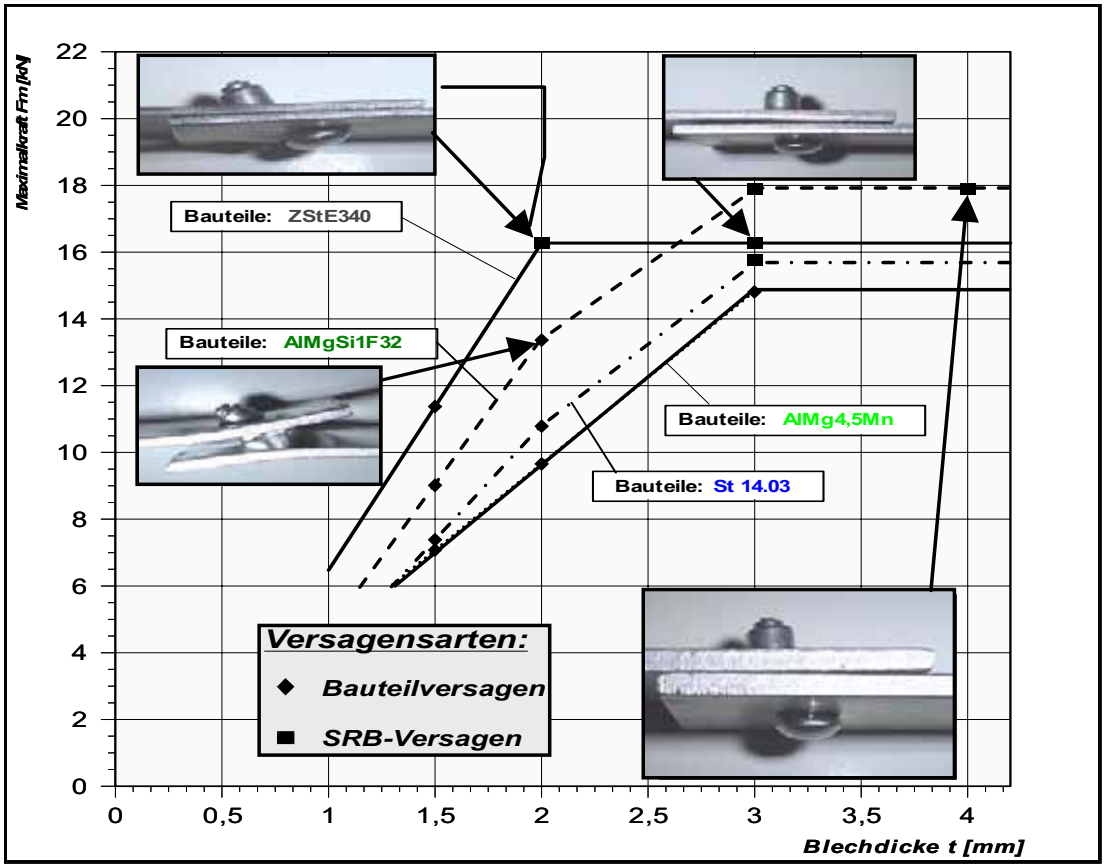


Bild 49: Scherzugfestigkeit und Versagensarten von Schließringbolzenverbindungen (ø 6,4 mm) für verschiedene Bauteilmaterialien

Die Ergebnisse der quasistatischen Scherzuguntersuchungen mit unterschiedlichen Verbindern sind in Bild 50 dargestellt (Schließringbolzen Ø 6,5 mm; Schrauben M6x16 / 4.8 nach ISO 4014; Schweißbolzen M6 / 4.8 nach [39]).
Der Vergleich zeigt, dass Schweißbolzen, Schließringbolzen, Schrauben, Blindnieten und auch Schubbolzen vergleichbare Scherzugfestigkeitswerte aufweisen, die hauptsächlich von der Güte des Verbindungselementes abhängen.

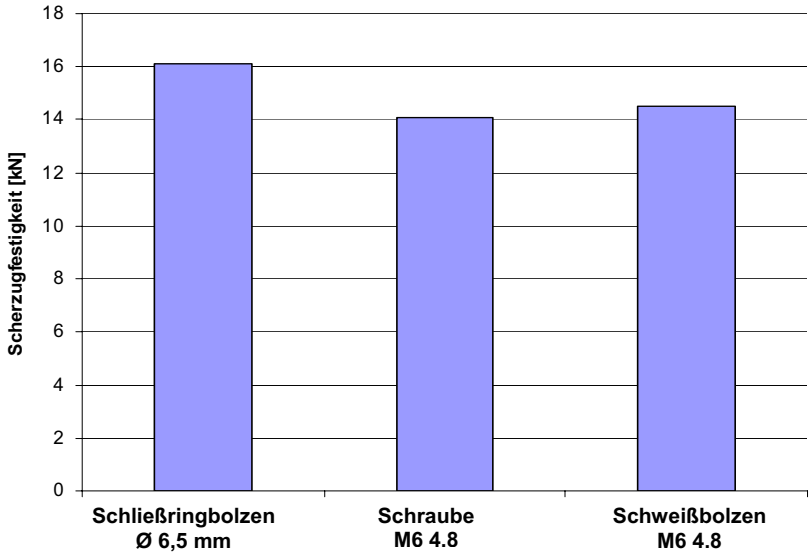


Bild 50: Vergleich von Scherzugfestigkeiten von mechanisch gefügten Verbindungen und punktförmig-thermisch gefügten Schweißbolzenverbindungen

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurden rechnerische Spannungsanalysen nach der Methode der finiten Elemente durchgeführt. Dabei kam das Programm ANSYS zum Einsatz.
Die durchgeführten FE-Simulationen von Scherzugversuchen an verschiedenen Schließringbolzenverbindungen (Bild 51) sollen klären, ob die gesuchten Versagenskennwerte und Versagensarten mit befriedigenden Ergebnissen auch numerisch ermittelt werden können. Dazu wurde zunächst das Einzelverbindungselement Schließringbolzen modelliert und zusammen mit Verbindungswerkstoff als Belastungsgrundfall „Scherzug“ einer numerischen Analyse unterzogen (Bild 51). Die numerischen Untersuchungen beinhalten als erstes die Bestimmung des Spannungs- und Deformationszustandes nach dem Setzen der Verbindung. Darauf aufbauend wird die Beanspruchung der Verbindung (Stahlproben mit 2 x 3 mm Materialstärke und Standardschließringbolzen Ø 6,4 mm bei quasistatischer Belastung) im Scherzug bis zum Versagen untersucht und mit experimentell ermittelten Deformations- und Versagenserscheinungen verglichen (Bild 52).
Die relevanten Kennwerte Streck- und maximale Scherkraft der Verbindung stimmen recht gut überein. Der Anstiegwinkel der Kurven ist etwas unterschiedlich und lässt Raum für weitere Untersuchungen zur Präzisierung der Steifigkeits- und Tribologiekennwerte.

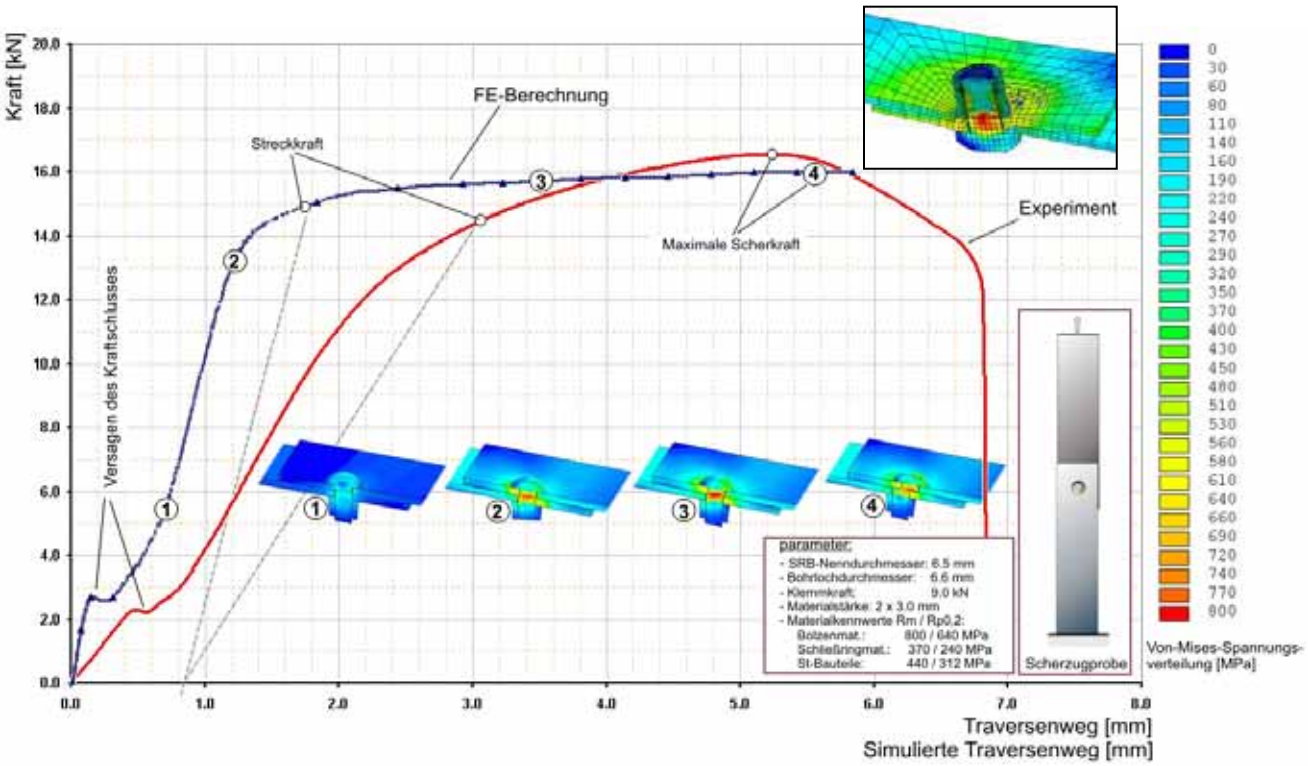


Bild 51: Vergleich von Kraft-Weg-Verläufen einer Scherzugprobe (Blechdicke 2x3 mm) für FE-Simulation und Experiment [40]

Bild 52 zeigt den Vergleich zwischen Versagensbildern aus experimentellen und rechnerischen Untersuchungen an verschiedenen Materialstärken. Es ergibt sich eine relativ gute Übereinstimmung des berechneten mit dem im Experiment beobachteten Versagensverhalten.

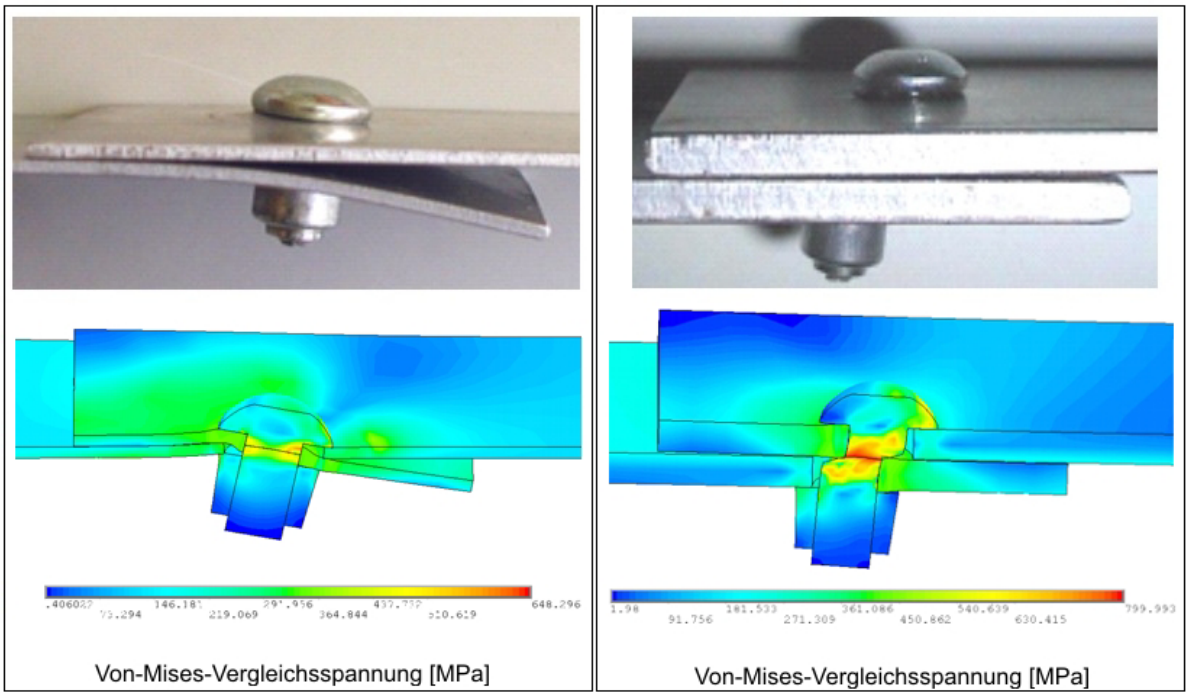


Bild 52: Vergleich von ausgewählten Versagensformen für Experiment (oben) und FE-Simulation (unten); Bilder links Bauteilversagen; Bilder rechts Verbinderversagen [40]

Über die Modellierung der Einzelelemente ist es möglich, sinnvolle Mehrelement- und Bauteilverbindungen zu erzeugen. Aufbauend auf Rechenergebnisse aus feinvernetzten Grundbelastungstypen wurden bereits 6-Element (Bild 53, links) bis 15-Elementverbindungen unter Belastung simuliert sowie mögliche Bauteilhalterungskonfigurationen im Scher- und Kopfzugfall nachgebildet (Bild 53, Mitte / rechts).

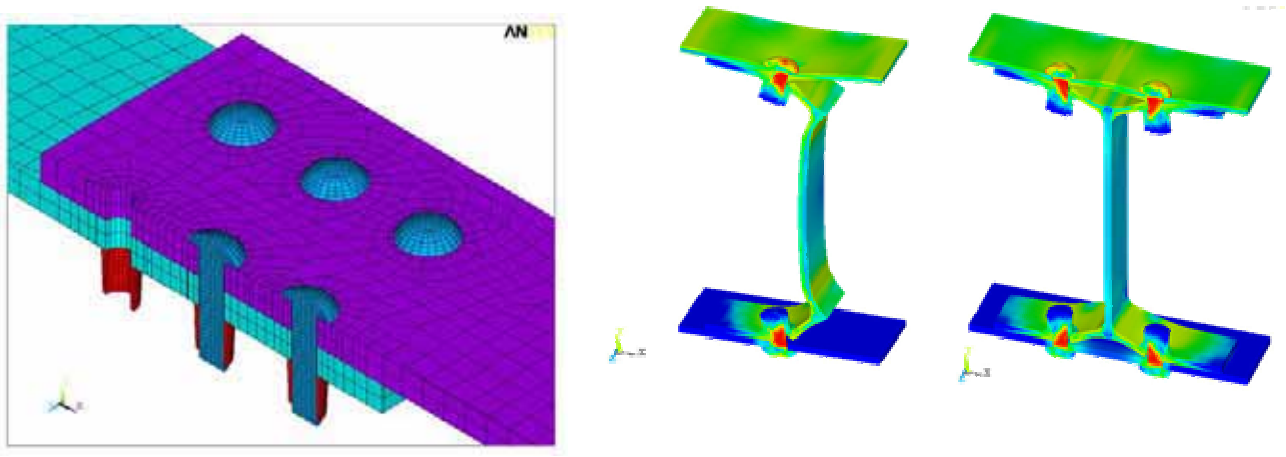


Bild 53: 3D-Modellierung von 6-Elementverbindungen (links) sowie Berechnung von Bauteilhalterungen mit 2 bzw. 4 Schließringbolzen im Lastfall (Mitte / rechts) [40]

Die Untersuchung der dynamischen Festigkeit von mechanischen Verbindungselementen erfolgte an Schließringbolzen (Ø 6,5 mm), Blindnieten (Ø 6,5 mm) und Schrauben (ISO 4014, M6x16) in 2 x 3 mm Einpunktflachproben aus Stahl. Untersucht wurde das Verhalten der mechanischen Verbindungselemente im Kurzzeitfestigkeits- und Zeitfestigkeitsbereich bis ca. $4*10^{-6}$ Lastwechsel unter dynamischer Scherzugbeanspruchung (Bild 54).

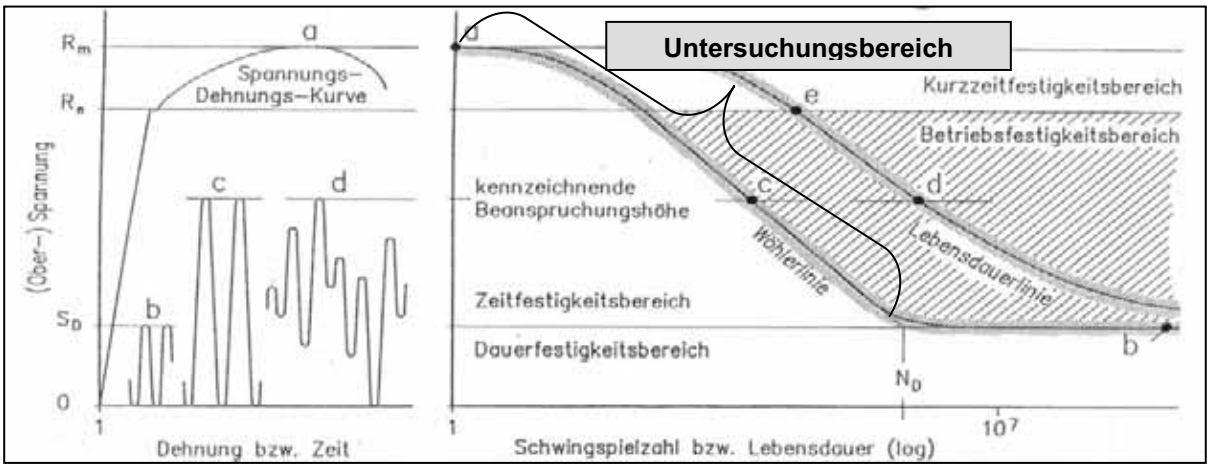


Bild 54: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Bauteilspannungen infolge dynamischer Belastung sowie der resultierenden Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit [41]

In den Bildern 55 und 56 werden die Ergebnisse der Versuche an Schließringbolzen-, Schrauben- und Blindnietverbindungen dargestellt. Die Auswertung der Versagensbilder ergibt im Bereich der Kurzzeitfestigkeit ein klares Abscheren des Verbindungselementes, welches mit geringer werdendem Lasthorizont erst in ein Mischversagen von Verbindungselement und Grundmaterial übergeht, und im Bereich der Dauerfestigkeit als reines Grundmaterialversagen endet.

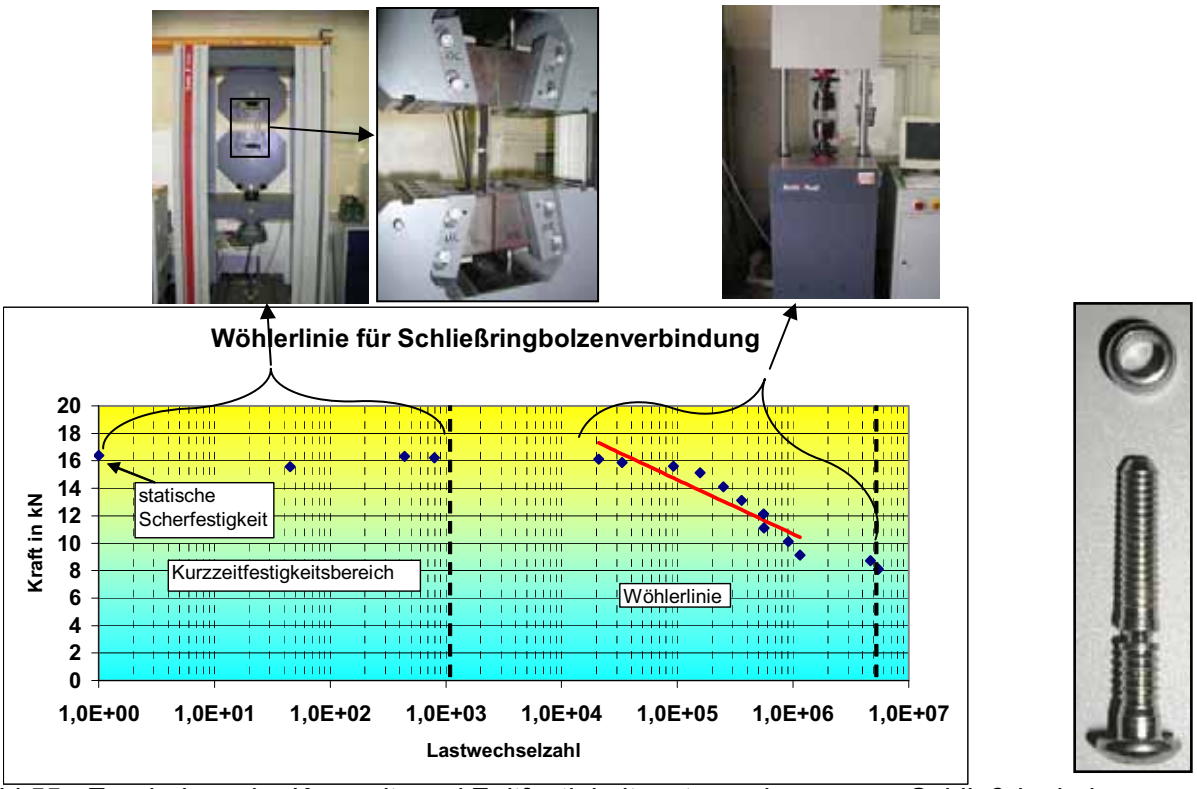


Bild 55: Ergebnisse der Kurzzeit- und Zeitfestigkeitsuntersuchungen an Schließringbolzenverbindungen (Ø 6,5 mm) mit den entsprechenden Prüfmaschinen (Bilder oben) [42]

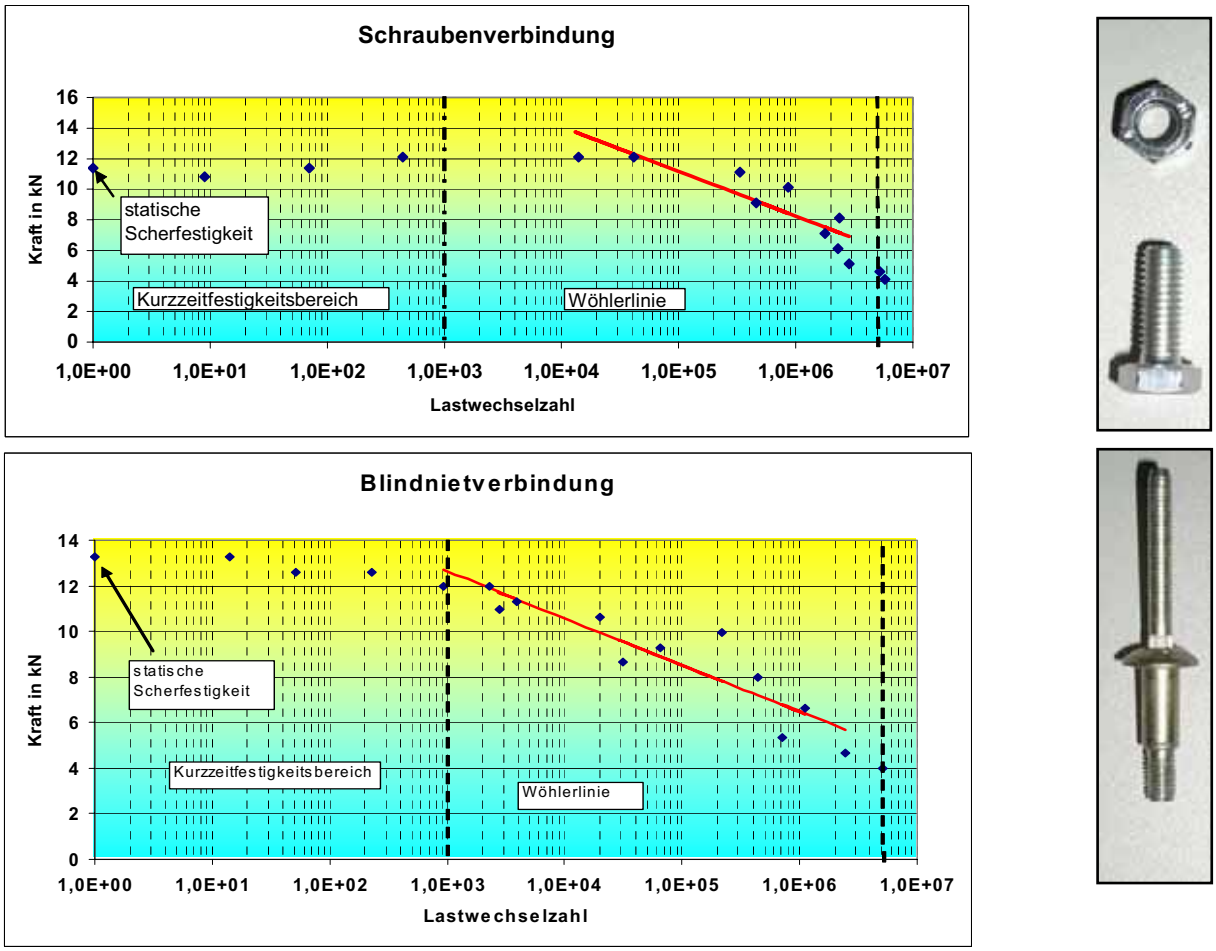


Bild 56: Ergebnisse der Kurzzeit- und Zeitfestigkeitsuntersuchungen an Schrauben- und Blindnietverbindungen (M6 bzw. Ø 6,5 mm) [42]

Die dynamischen Festigkeitsuntersuchungen wurden mit Zyklenzahlen bis zum Beginn der Dauerfestigkeit ($4*10^{-6}$ Lastwechsel) realisiert. Die hohe dynamische Festigkeit von Schließringbolzen ist insbesondere in der Einrollierung des Schließringes in die Bolzenrillen und die daraus resultierende Unlösbarkeit begründet.

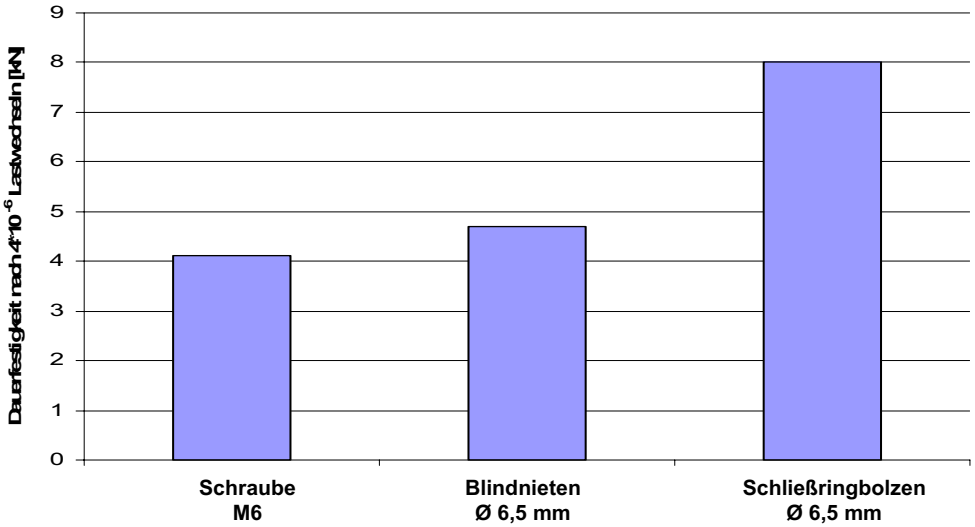


Bild 57: Ergebnisse der Zeitfestigkeit / Dauerfestigkeit von scherzugbeanspruchten Schrauben-, Blindniet- und Schließringbolzenverbindungen bei $4*10^{-6}$ Lastwechseln

2.1.10 Ergebnisse des AP 312

Ermittlung der Korrosionseigenschaften von mechanisch gefügten Ausrüstungselement-proben

Die verfügbaren Vorschriften der Klassifikationsgesellschaften bezüglich des Korrosionsschutzes im Schiffbau beziehen sich im Wesentlichen auf die Sicherstellung der Beständigkeit von Schweißnähten gegen interkristalline Korrosion [43] und die Sicherstellung der Beständigkeit gegen Korrosion in Ballasttanks bzw. am Unterwasserschiff [44], zu deren Erreichung neben einer Mindestschichtdicke von 250 µm vor allem ein kathodischer Schutz gehört. Die Ausführungen zum Korrosionsschutz von Laderäumen beinhalten im Wesentlichen die gleichen o.g. Schutzmaßnahmen zur Beschichtung, da hier von einer erheblichen korrosiven Wirkung der zu transportierenden Ladung ausgegangen wird.

Für die zu untersuchenden Ausrüstungselemente sind diese Vorgaben allerdings ungeeignet, da die korrosive Belastung im Maschinenraum und Unterdeckbereich vergleichsweise gering ist und daher in den Vorschriften nicht explizit aufgeführt wird, für Halterungen im Oberdeckbereich wäre die korrosive Belastung allerdings höher anzusetzen. In Ermangelung von direkten Hinweisen zur Durchführung von Korrosionsversuchen mit Ausrüstungselementen wurde überprüft, wie in ähnlich gelagerten Anwendungsfällen in anderen Industriezweigen vorgegangen wird [45]. Grundsätzlich wird zwischen Langzeit-, Kurzzeit- und Korrosionsschnelltests unterschieden, wobei Langzeittests die besten Aussagen ermöglichen, aber in der Regel unverhältnismäßig aufwendig sind.

Zur Beurteilung der optischen und funktionalen Eigenschaften unter korrosiver Belastung haben sich Kurzzeitprüfungen bewährt. Sie beinhalten insbesondere Salzsprühnebelprüfungen nach DIN 50021-SS, Prüfungen mittels Kondenswasserklima nach DIN 50017 und Prüfungen mittels Raumtemperatur nach DIN 50014. Die Aussagefähigkeit von Korrosionsschutzprüfungen z.B. zur Beurteilung der Schutzeigenschaften von Beschichtungssystemen kann dabei durch die Kombination verschiedener Kurzzeitprüfungen in einen Prüfzyklus gesteigert werden. Ein etablierter Prüfzyklus ist der sog. VDA-Wechseltest. Dabei handelt es sich um den Klima-Wechseltest der Automobilindustrie (VDA 621-415 „Prüfung des Korrosionsschutzes von Kraftfahrzeuglackierungen bei zyklisch wechselnder Beanspruchung“), der auch in anderen Industriezweigen Anwendung findet.
In theoretischen Voruntersuchungen [45] wurden diese Kurzzeitprüfzyklen als geeignet befunden, um Blindniet- und Schließringbolzenverbindungen hinsichtlich ihrer Korrosionsbeständigkeit zu prüfen. Da bisher noch keine diesbezüglichen experimentellen Untersuchungen vorlagen, wurde für 3 verschiedene wulst- und hülsenformende Blindniettypen in verschiedenen Metallflachproben die relativ „harte“ Prüfung des VDA-Wechseltestes durchgeführt (Verbinder / Material: Ø 6,5 mm; Hülse/ Dorn galvanisch verzinkt und chromatiert; Klemmstärken von 3,0 mm bis 12,0 mm in Stahl- und Aluminium-Bauteilen).
Es wurden eine Prüfdauer von 5 Prüfzyklen mit je 7 Tagen absolviert mit folgendem Ablauf je Prüfzyklus:
- 1 Tag = 24 h Salzsprühnebelprüfung nach DIN 50021-SS
- 4 Tage = 4 Zyklen Kondenswasserklima nach DIN 500178 KFW
- 2 Tage = 48 h Raumtemperatur 18 bis 28°C nach DIN 50014

Zur Durchführung der Korrosionsuntersuchungen wurden die o.g. Einpunkt-Überlappproben in eine Korrosionsprüfkammer (Typ SC/KWT 450 der Fa. Weiss Umwelttechnik GmbH) mit 450 Liter Prüfvolumen eingebracht (Bild 58).

Bild 58: Korrosionsprüfkammer Typ SC/KWT 450 mit mechanisch gefügten Einpunkt-Überlappproben

Die absolvierten Prüfzyklen werden aufgezeichnet und können online überprüft werden (Bild 59).

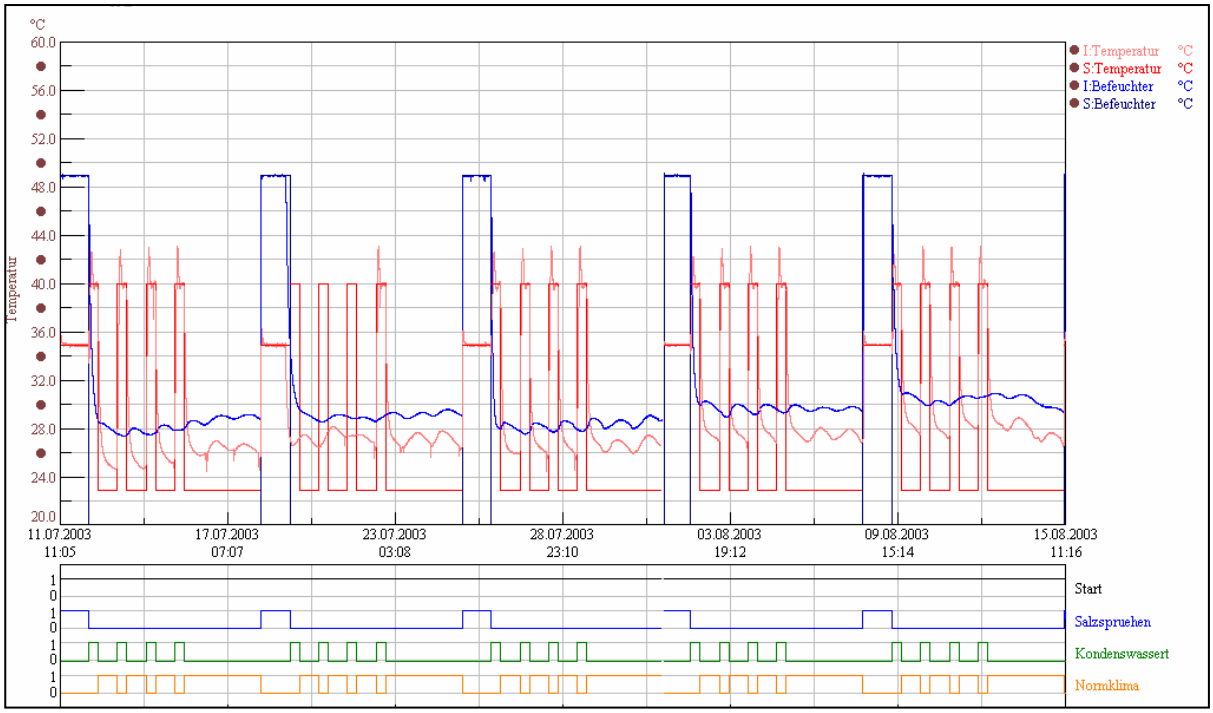


Bild 59: Online-Registrierung von VDA-Wechseltests für mechansich gefügte Einpunkt-Überlappproben mit SOLL-und IST-Werten für Temperatur (rote Kurven) und Befeuchtung (blaue Kurve) für 5 Prüfzyklen mit je 7 Tagen Prüfdauer

In Bild 60 sind typische Beispiele für Korrosionserscheinungen mechanisch gefügter Verbindungsproben nach den Kurzzeittests abgebildet. Alle eingesetzten mechanischen Verbindungselemente eignen sich prinzipiell gegen starken Korrosionseinfluß. Wichtige funktionelle Parameter der Verbindung, wie Dichtigkeit und Klemmkraft, bleiben erhalten. Die Einhaltung bestimmter Kennwerte wird bei einer korrosionschutztechnischen Prüfung ermittelt, hier eignet sich die Beurteilung des Rostgrades und die Beurteilung der Unterwanderung der Verbindungselemente nach EN ISO 4628-3 [46].

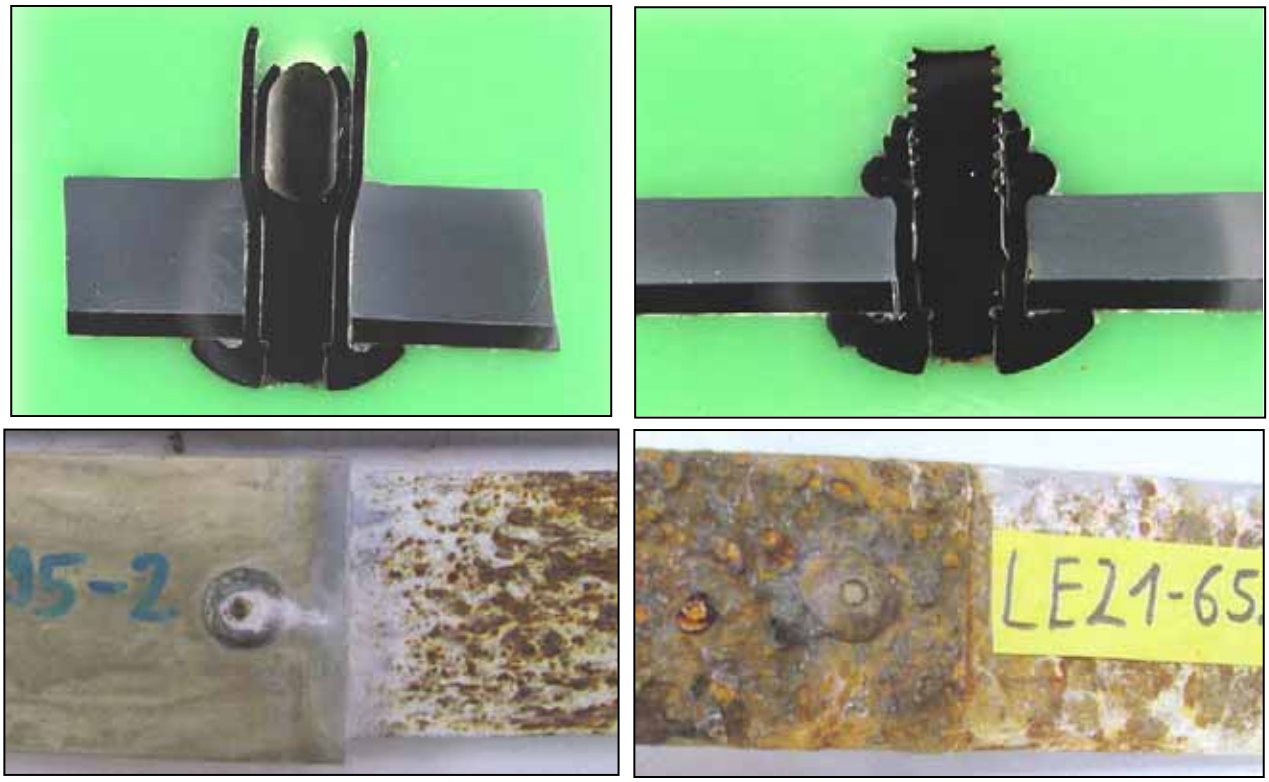


Bild 60: Beispiele für Korrosionserscheinungen Korrosionsbild einer Stahl/ Aluminium-verbindung (RA-K 40/70 / AlMgSi0,5 F22) mit Schliffbild des Verbindungselementes (oben) Korrosionsbilder von Stahl/Stahl (DP-K 30/40 / DC04) Blindnietverbindungen (unten)

Die diesbezüglichen Untersuchungen am Schliffbild bei Blindnieten mittels Lichtmikroskop zeigen leichte örtliche Korrosionserscheinungen im Bereich des Setzkopfes, am Nietdorn und im Inneren des Niethülsenbereiches, bei Schließringbolzen treten nur geringfügige äußere Korrosionserscheinungen auf. Der Rostgrad der verwendeten Verbindungselemente (Blindniet / Schließringbolzen), die in der Regel verzinkt eingesetzt wurden, fiel regelmäßig geringer als des Umgebungsmaterials aus.

2.1.11 Ergebnisse des AP 321

Ermittlung der Tragverhaltenseigenschaften von mechanisch gefügten dünnwandigen Mehrelementproben und Ausrüstungsverbindungsproben

Die Klassifikationsgesellschaften fordern für die tragenden Elemente der Schiffkonstruktion umfangreiche Nachweise der statischen und dynamischen Festigkeit [37], so auch für lasergeschweißte Sandwichpaneelstrukturen. Für die numerische Analyse von Schiffsstrukturen existieren allgemeine Richtlinien [47], die in der Regel auf Festigkeitsanalysen für geschweißte Verbindungen beruhen und die in langjährigen Untersuchungen ermittelte Beanspruchbarkeiten exemplarischer Konstruktionsdetails abbilden. Der daraus abgeleitete Detailkatalog mit entsprechenden Richtwerten für verschiedene Schweißverbindungen ermöglicht einen effizienten Betriebsfestigkeitsnachweis für die Gesamtstruktur.
Für mechanische Verbindungen ist bisher der Einfluss auf die Tragfähigkeit der gefügten Struktur nur in Sonderfällen für spezielle Anwendungen im Schienenfahrzeug- und Lastkraftwagenbau untersucht worden. Eine systematische Untersuchung mechanischer Verbindungen in Form eines den Schweißverbindungen vergleichbaren Detailkatalogs liegt nicht vor.
Im Verlaufe der Untersuchungen wurden die Betrachtungen der Möglichkeiten des mechanischen Fügens von Sandwichpaneelstrukturen reduziert zugunsten der Untersuchung diesbezüglicher Ausrüstungsverbindungen. Dennoch sollen ausgewählte Untersuchungen geeigneter Mehrelementverbindungen die grundsätzlichen Möglichkeiten des Fügens dünnwandiger Tragverbände veranschaulichen. Hier ist erfahrungsgemäß die H-Mehrelementprobe (Bild 61) geeignet, da diese Probe recht gut die Belastungsfälle an einem Sandwichpaneel nachbilden kann. Mit hochfesten Blindnieten wird geprüft, in wieweit die ermittelte Scherzugfestigkeit von Einzelverbindungen auf eine Mehrelementverbindung mit 10 Verbindern übertragen werden kann (Tabelle 20).

Verbinder	Festigkeitsuntersuchungen statisch (H-Probe)	ermittelte Kennwerte
Blindnieten	Scherzug	Zugfestigkeit

Tabelle 20: Versuchsprogramm für Mehrelementproben (H-Probe; 2x2 mm Stahl)

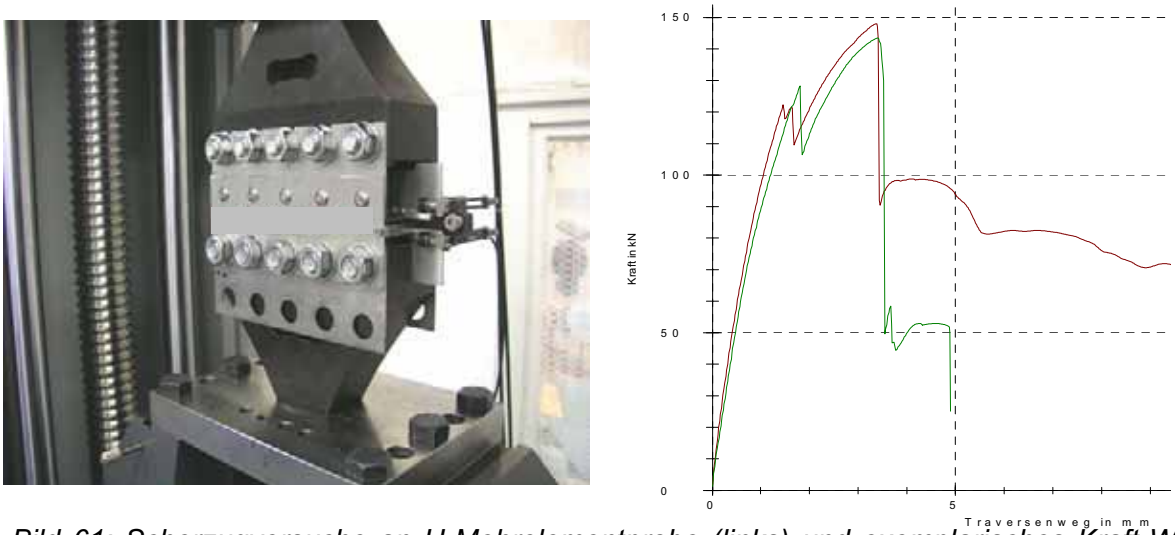


Bild 61: Scherzugversuche an H-Mehrelementprobe (links) und exemplarisches Kraft-Weg-Diagramm für zwei H-Proben (rechts)

Die Untersuchungen ergaben, dass bei Einzelscherzugfestigkeiten vergleichbarer Blindniete von ca. 13 kN die Scherzugfestigkeit der 10-Elementproben bei ca. 150 kN liegt. Hier wird bereits ein Vorteil von mechanischen Fügelementen sichtbar, da ein „Aufknöpfen“ der Verbindung nicht eintritt, sondern jedes Verbindungselement bis zum Versagen der Probe seinen vollständigen Traganteil in die Verbindung einbringen kann.

Die Anbringung von Haltern an dünnwandigen Tragverbänden von unter 6 mm Blechdicke ähnelt in der Anwendung von mechanischen Fügeverfahren den Möglichkeiten der Montage von Ausrüstungselementen in der Sandwichpaneelmontage. Unterschiede liegen lediglich in der bei Sandwichpaneelen zwingenden einseitigen Zugänglichkeit der Fügestelle. Daher werden für die Betrachtungen zur Scherzugfestigkeit neben den „einseitigen“ Verfahren Blindnieten, Schweißbolzen und Bohrschrauben auch die „zweiseitigen“ Verfahren Schließringbolzen und metrische Schrauben aufgeführt.
Die dünnwandigen Tragverbände stellen aufgrund des relevanten Blechdickenbereiches von bis zu 6 mm Gesamtblechdicke einen Spezialfall zu den Untersuchungen in Arbeitspunkt 311 dar. Resultierend aus der geringeren Blechdicke (als in AP 311) verlagert sich das Verbindungsversagen unter statischer und dynamischer Beanspruchung für gleiche Verbinderdurchmesser zunehmend vom Verbindungselement in das Grundmaterial, so dass ein Grundmaterialversagen eintritt. Mit verschiedenen Verbinderarten und –durchmessern kann dieser Effekt natürlich beeinflusst werden.
Bei der Montage von Ausrüstungselementen an Sandwichpaneelen kommen Verfahren zum Einsatz, die den relevanten Blechdickenbereich von ca. 2 mm – ca. 6 mm Gesamtblechdicke abdecken können. Dies sind die Verfahren Schweißbolzen und Blindnieten sowie die Verfahren, die bei geringen Blechdicken erst technisch bzw. wirtschaftlich einsetzbar sind, wie z.B. Blindnietmuttern / Blindnietgewindebolzen und loch- / gewindeformende Schrauben. So schränkt z.B. die gegenwärtige Verfahrensgrenze für loch- / gewindeformende Schrauben hinsichtlich der maximalen Blechdicke in Stahl von derzeit ca. 2,5 mm die Anwendungsmöglichkeiten stark ein. Desweiteren ist bei ihrem Einsatz häufig das Vorbohren eines Fügepartners, in diesem Fall der Halterung, erforderlich.
In Tabelle 21 werden die durchgeführten Versuche und die dabei ermittelten Untersuchungsparameter dargestellt.

Verbinder	quasistatsiche Festigkeitsuntersuchung	ermittelte Kennwerte
Blindnieten	Scher-/Kopfzug	Zugfestigkeit
Blindnietmuttern	Kopfzug	Zugfestigkeit
Blindnietgewindebolzen	Kopfzug	Zugfestigkeit
Schweißbolzen	Scher-/Kopfzug	Zugfestigkeit
Bohrschrauben	Scher- /Kopfzug	Zugfestigkeit

Tabelle 21: Versuchsprogramm für Ausrüstungsverbindungsproben bis 6 mm Blechdicke

Im Rahmen der durchgeführten Festigkeitsuntersuchungen wurden Einelementverbindungen in Form von Kopf- und Scherzugproben, KS2-Proben und Plattenstrukturen (Auspressversuch) getestet. Die Scherzugfestigkeit wurde für Blindnieten in 2 x 2 mm Stahlproben geprüft und mit Werten aus früheren Untersuchungen bzw. Literaturangaben bezüglich dieser Blechdicken verglichen (Bild 62).

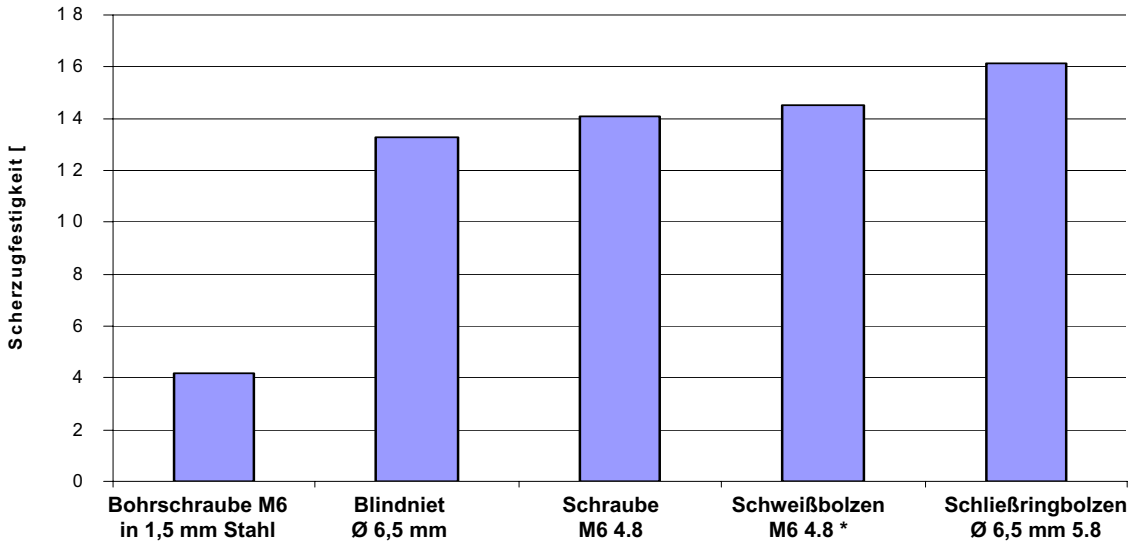


Bild 62: Scherzugfestigkeiten von dünnwandigen Ausrüstungsverbindungsproben

Die Ergebnisse belegen, dass abhängig von Grundmaterial und Blechdicke die Versagensart unterhalb einer bestimmten Blechdicke vom reinen Abscheren des Verbindungselementes in eine plastische Verformung des Grundmaterials übergeht und dabei immer weniger von der Qualität des Verbindungselementes, als vielmehr von der Güte und der Steifigkeit des Probenmaterials abhängt. Die Scherzugfestigkeitswerte der verschiedenen Verbindungssysteme liegen daher relativ dicht beieinander.

Im Schiffbau wird beim Anschweißen von Ausrüstungselementen an dünnwandige Strukturen angestrebt, Beschädigungen (z.B. Schwingungsrisse) an der tragenden Schiffskonstruktion, z.B. durch die Anbringung von Dopplungsblechen, zu vermeiden. Solche Maßnahmen erscheinen bei mechanisch gefügten Verbindungen insofern nicht mehr notwendig, da ohnehin eine Überlappverbindung geschaffen werden muss. Bei der Notwendigkeit von Mehrpunktverbindungen kommt gegenüber einer Schweißnaht der Vorteil einer elastoplastischen Lastverteilung zwischen den Fügeelementen zum Tragen, die bei hohen örtlichen Beanspruchungen zu einer Entlastung der höherbeanspruchten Verbindungselemente führt.

Die Kopfzugversuche erfolgten durch Auspressen bzw. das analoge Ausziehen des Verbindungselementes aus plattenförmigem Grundmaterial, in Bild 63 ist der Versuchsaufbau am Beispiel von Blindnietmuttern exemplarisch dargestellt.

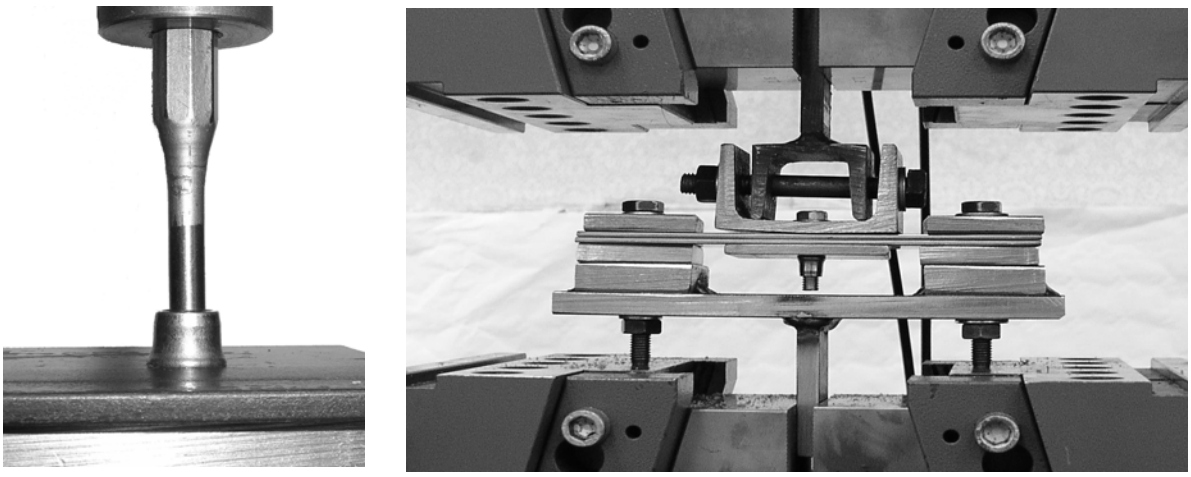


Bild 63: Auspressversuch mittels Dorns an einer Blindnietmutter (links), Kopfzugversuch zur Ermittlung der Kopfzugfestigkeit von Blindnietmuttern (rechts)

Das Versuchsprogramm (Tabelle 22) umfasste verschiedene Verbindungselemente, die in verschiedene Blechdicken gesetzt wurden. Es galt zu untersuchen, wie die verschiedenen vorhabensrelevanten Blechdickenbereiche sich im Zusammenspiel mit den Verbindungselementen auf die Kopfzugfestigkeit auswirken würden. Die Ergebnisse der jeweiligen Kopfzugversuche sind in Bild 64 dargestellt.

Verbindungselement	Probenmaterial	Probenform
Blindnieten Ø 6,4 mm	Stahl; 2 mm / Stahl; 2 mm	KS II
Blindnietmuttern M8 Stahl	Stahl; t= 4 mm	Platte
Blindnietmuttern M8 Edelstahl	Stahl; t= 4 mm	Platte
Blindnietgewindebolzen M8 Edelstahl	Stahl; t= 2 mm	Platte
Schweißbolzen M10 4.8	Stahl; t= 4 mm	Platte
Bohrschraube M6	Stahl; t= 1,5 mm	Platte

Tabelle 22: Versuchsprogramm Kopfzugversuche an dünnwandigen Ausrüstungsverbindungsproben

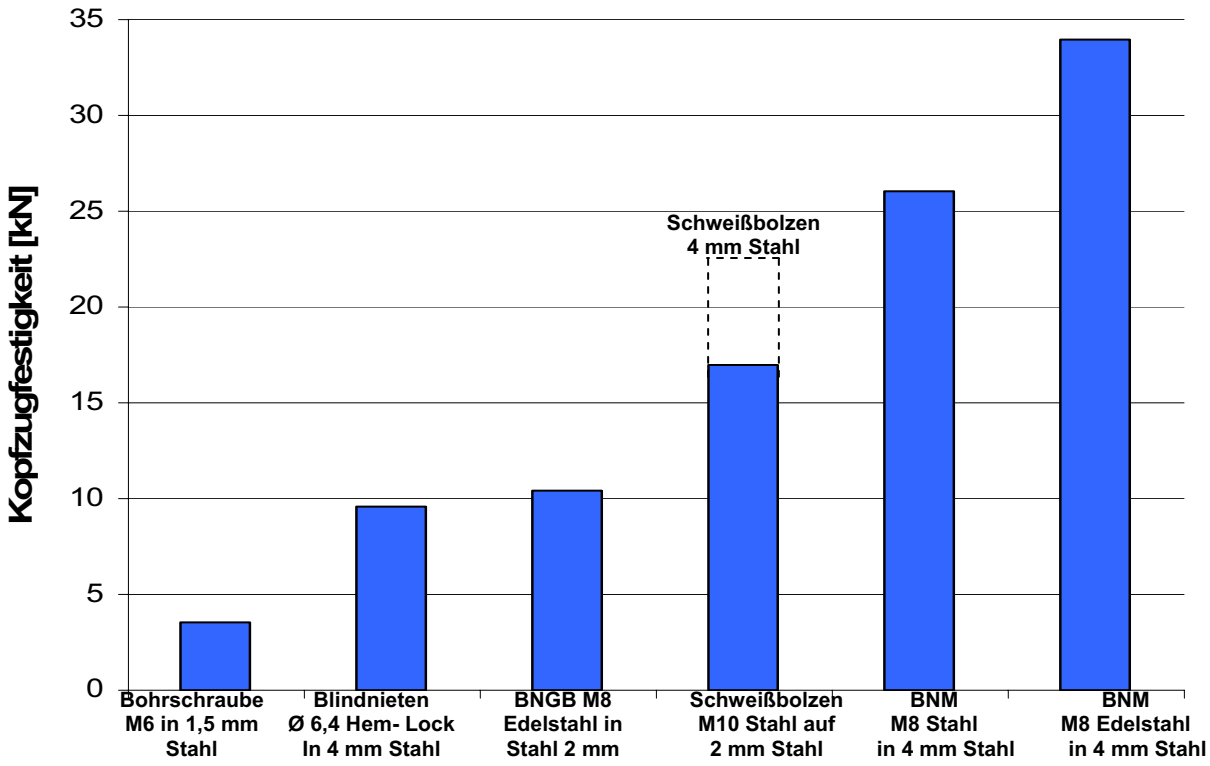


Bild 64: Kopfzugfestigkeiten von dünnwandigen Ausrüstungsverbindungsproben

Die Versuche zeigen, dass der Festigkeitsvorteil von Schweißbolzen gegenüber mechanischen Verbindungselementen im Bereich der Blechdicke von Sandwichpaneelen deutlich geringer ist als bei Blechdicken größer 6 mm. Die Kopfzugfestigkeit wird zunehmend durch das Grundmaterialversagen bestimmt (Bild 64) und führt somit zu einer Schädigung des Sandwichpaneels. Die untersuchten mechanischen Fügeelemente versagten hingegen hauptsächlich durch das Reißen der Niethülse (Blindnieten, Blindnietgewindebolzen) bzw. das Abscheren des Innengewindes (Blindnietmutter). Die Blindnietmuttern sind hier aufgrund ihres geometrischen Aufbaus in Kombination mit einem eingeschraubten Bolzen zur Aufnahme des Ausrüstungselementes den Blindnietgewindebolzen deutlich überlegen und werden daher in der Praxis bei vielen höherfesten Verbindungen bevorzugt.

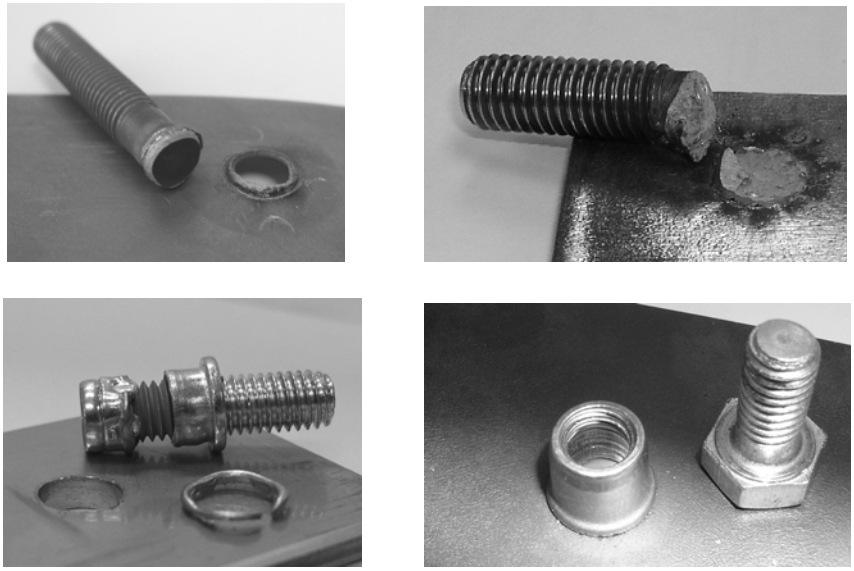


Bild 65: Versagensbilder unter Kopfzugbelastung von Schweißbolzen Stahl M10 auf 2mm Stahl (oben links) und 4mm Stahl (oben rechts), Blindnietgewindebolzen Edelstahl in 2 mm Stahl (unten links) und Blindnietmuttern Stahl M8 in 4 mm Stahl (unten rechts)

Die erreichbaren Festigkeiten mechanischer Fügeverfahren und der vergleichsweise geringe erforderliche Aufwand zum Vorlochen an dünnwandigen Tragverbänden und Sandwichpaneelverbindungen sowie das Entfallen aufwendiger Richt- und Nachkonservierarbeiten zeigen ein deutliches Rationalisierungspotential gegenüber der Anwendung von Schweißverfahren auf.

2.1.12 Ergebnisse des AP 322

Ermittlung der Korrosions-, Dichtigkeits- und Brandeigenschaften von mechanischen Fügeverbindungen mit Sandwichpaneelstrukturen und dünnwandigen Tragverbänden

Die Ergebnisse bezüglich der Korrosionseigenschaften mechanischer Verbindungselemente an Sandwichpaneelen und dünnwandigen Tragverbänden sind dem AP 312 (Korrosionsfestigkeit mechanisch gefügter Ausrüstungselemente) zu entnehmen. Die in AP 312 geprüften Anwendungsfälle belegen eine hohe Korrosionsbeständigkeit der untersuchten Blindniet- und Schließringbolzenverbindungen unabhängig von Grundmaterialdicke, -zusammensetzung und -beschichtung. Daher sollen nachfolgend insbesondere die Dichtigkeits- und Brandeigenschaften mechanisch gefügter Fügeverbindungen hinsichtlich der Montage von Ausrüstungselementen in relativ dünnwandige Strukturen untersucht werden.
Nach den Forderungen von Klassifikationsgesellschaften (z.B. [48]) erfolgt die Prüfung einer wasserdichten Struktur durch das Abspritzen mit einem kräftigen Wasserstrahl bzw. Abseifen. Eine folgende Sichtprüfung gilt als ausreichend. Spezielle Anforderungen an die Dichtsysteme von z.B. Rohrdurchführungen in Schotten und Decks umfassen neben der Brandsicherheit den Nachweis der Dichtigkeit über einen Zeitraum von 30 min gegenüber einem Druck, der mindestens der Wassersäule im Leckfall entspricht [49].
Bei einer erforderlichen Gasdichtheit müssen Schotten- und Decksdurchführungen so beschaffen sein, dass sie im Zusammenhang mit einer wie in Bild 66 dargestellten Prüfanordnung einer Druckprüfung mit Luft standhalten. Das Prüfmuster wird dabei einem Prüfdruck von 30 mbar über 30 Minuten ausgesetzt, ohne dass auf der freien Seite wahrnehmbar Luft austreten darf.

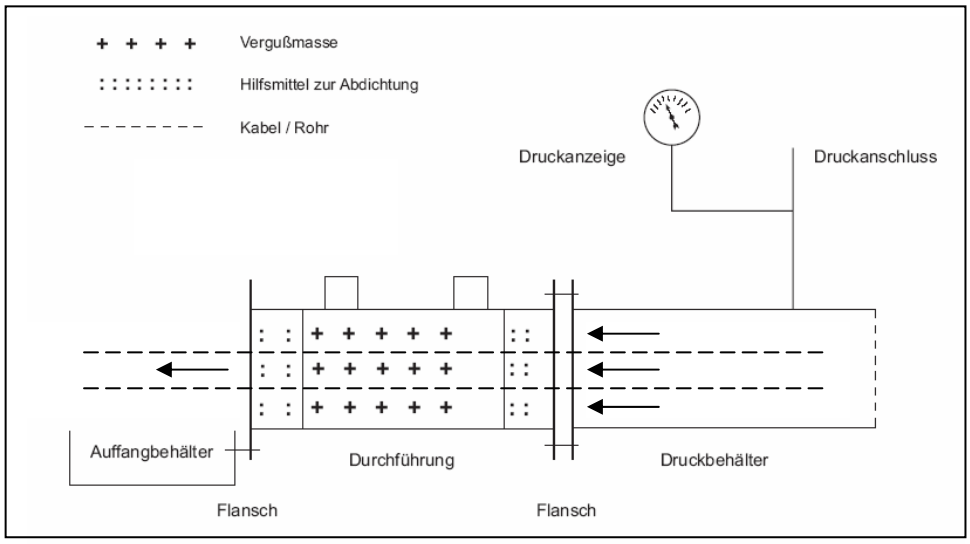


Bild 66: Prüfanordnung für Wasser- und Gasdichtigkeit am Beispiel eines Vergusssystems für Kabel und Rohre (nach [49])

Die Dichtigkeit mechanischer Verbindungselemente wird durch die Verbinderhersteller derzeit nur für spezielle Verbindungssysteme gewährleistet, für eine Vielzahl von Anwendungsfällen bestehen diesbezüglich noch Kenntnisdefizite.
Ausgehend von den schiffbaulichen Anforderungen [49] wurde ein Dichtigkeitsprüfstand entworfen, der sowohl Dichtigkeitsprüfungen mit stehender Wassersäule durch unterschiedliche Prüfmedien (Wasser, Reinigungslösung, usw.) als auch eine Prüfung auf Gasdichtheit ermöglicht. Hierzu mussten von der Forschungsstelle in Zusammenarbeit mit Verbinderherstellern eigene Prüfstände konzipiert werden (Bilder 67, 69).

Bild 67: Prüfstand zur Dichtigkeitsprüfung auf Wasser- und Gasdichtheit

Die Untersuchung der Dichtigkeit erfolgte mit mechanisch gefügten Verbindungen, die für die Montage von Ausrüstungselementen an Sandwichpaneelen bzw. für dünnwandige Tragverbände geeignet sind. Um eine möglichst umfassende Aussage zur Verbindungsdichtigkeit zu erhalten, wurden in jedes Prüfmuster jeweils 16 Verbindungselemente sowohl wechselseitig als auch einseitig gesetzt. Als Grundmaterial wurden 100 x 100 mm große Stahl- und Aluminiumplatten verwendet (Bild 68).

Bild 68: Prüfmuster für Dichtigkeitstest an Blindnieten (links), Blindnietbolzen (Mitte) und Schließringbolzen (rechts)

Die Prüfung erfolgte zunächst durch einen Test unter atmosphärischem Druck und 100 mm Wassersäule über eine Sichtprüfung auf austretende Feuchtigkeit oder Tropfenbildung nach ca. einer Stunde. Anschließend folgte eine Untersuchung auf Gasdichtheit unter einem Druck von 3 bar. Diese Versuche wurden in Setzrichtung der Verbinder durchgeführt und beschreiben die eigentliche Fügepunktdichtigkeit. Die durchgeführten Messungen erfolgten ohne den Einsatz von Dicht-/ Klebstoffen.

Prüfung auf Wasserdichtheit	*Prüfung auf Gasdichtheit*
• Druck: atmosphärisch • Prüfflüssigkeit: Wasser • Höhe der Wassersäule: 100 mm • Dauer der Prüfung: 1 h • Prüfkriterium: Sichtprüfung auf Feuchtigkeit/Tropfenbildung	• Druck: 3 bar Druckluft • Prüfkriterium: Druckabfallmessung bis auf 2,5 bar, Leckrate in mbar * l/s
Werkstoffe:	- 2 x 3mm S355 (1.0570) - 2 x 4mm AlMgSi0,5F22
Werkstoffoberfläche :	- blank - gestrahlt, mittlere Rauhtiefe ca. 50 µm

Tabelle 23: Prüfbedingungen für Prüfung von mechanisch gefügten Proben auf Wasser- und Gasdichtheit

Die Prüfung auf Gasdichtigkeit geht in der Regel weit über die Anforderungen in der schiffbaulichen Praxis hinaus. In anderen Industriezweigen (z.B. Nutzfahrzeugbau) wird jedoch häufig die Dichtigkeit von mechanisch gefügten Verbindungen, sowohl als Einzelelement als auch als Flanschverbindung, zunehmend gefordert. Daher wurden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen die höheren Anforderungen an die Gasdichtigkeit der mechanisch gefügten Verbindungen übernommen. Die blanke bzw. gestrahlte Bauteiloberfläche wurde hier als prüfverschärfendes Kriterium gewählt.

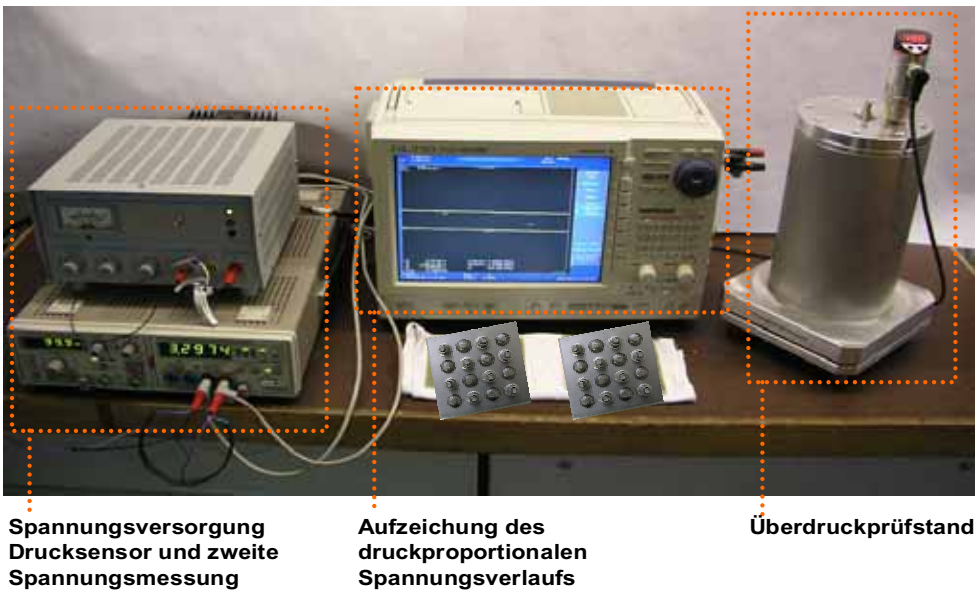


Bild 69: Prüfung verschiedener mechanischer Verbindungselemente auf Gasdichtheit über beliebige Zeiträume

Die Ergebnisse der Sichtprüfung bei einer 100 mm Wassersäule sind in Tabelle 24 dargestellt. Für die unter sehr hohen Setz- und Vorspannkräften verarbeiteten Blindbolzen und Schließringbolzen konnte keine Undichtigkeit festgestellt werden. Von mehreren Typen der untersuchten hochfesten Blindnieten wiesen einige hingegen partielle Undichtigkeiten an einem Teil der gesetzten Verbindungselemente auf. Es kam dabei zu einer sichtbaren Tropfenbildung bei den Versuchreihen an Stahl- (blank / gestrahlt) und gestrahlten Aluminiumverbindungen. Dies ist bei den betreffenden Verbindern i.d.R. auf die Dornverriegelung und eine nicht ausreichende Anformung des Blindnietes an das Grundmaterial zurückzuführen. Die Mehrzahl der untersuchten Blindnieten überstand allerdings die Prüfung auf Wasserdichtheit.

	2 x 3 mm Stahl		2 x 4 mm Al	
	blank	gestrahlt	blank	gestrahlt
Blindnieten Typ 1	✓	✓	✓	✓
Blindnieten Typ 2	✗	✗	✓	✗
Blindbolzen	✓	✓	✓	✓
Schließringbolzen	✓	✓	✓	✓

Tabelle 24: Ergebnisse zur Wasserdichtheit von verschiedenen mechanischen Verbindungselementen

Die weiterführenden Untersuchungen zur Quantifizierung der Gasdichtheit der Prüfmuster erfolgte durch die Erfassung der Zeitspanne, innerhalb der der beaufschlagte Druck von 3000 mbar auf 2500 mbar absinkt. Dies ermöglicht die gängige Bestimmung einer durchschnittlichen Leckrate in mbar*l/s pro Verbindungselement. Um einen messbaren Druckabfall innerhalb einer vertretbaren Zeitspanne zu messen, wurde ein wesentlich höherer Prüfdruck als die in [49] durch den Germanischen Lloyd geforderten 30 mbar aufgebracht. Anschließend wurden die Ergebnisse auf die für schiffbauliche Anwendungen geforderten Druckverhältnisse (Prüfdruck 30 mbar) umgerechnet (Tabelle 25).

	Ermittelte Leckrate über Druckabfallmessung	Umrechnung auf Druckverhältnisse nach GL
hochfeste Blindnieten	$4{,}4 * 10^{-3}$ mbar*l/s	$10 * 10^{-5}$ mbar*l/s
Blindbolzen	$1{,}3 * 10^{-3}$ mbar*l/s	$3 * 10^{-5}$ mbar*l/s
Schließringbolzen	$0{,}35 * 10^{-3}$ mbar*l/s	$0{,}8 * 10^{-5}$ mbar*l/s

Tabelle 25: Leckraten bei Gasdichtheit der untersuchten mechanischen Verbindungselemente und Umrechnung auf schiffbauliche Anforderungen

Zur Interpretation der Ergebnisse der bei der Prüfung ausströmenden Gasmengen ist anzumerken, dass bei einer Leckrate von $1*10^{-4}$ mbar*l/s die Ausströmdauer von 1 cm³ Luft bei einem bar ca. 2,7 Stunden beträgt. Eine Leckrate von $1*10^{-5}$ mbar*l/s erhöht die dazu notwendige Zeit auf 27 Stunden. Solche geringen Gasmengen sind durch einen häufig angesetzten 30-minütigen Minuten Drucktest nicht mehr feststellbar, die Verbindung kann nach den Kriterien des GL als gasdicht angesehen werden.
Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass wasser- und gasdichte Fügeverbindungen mit mechanischen Verbindungselementen insbesondere bei hohen Setz- und Klemmkräften geschaffen werden (z.B. mit Schließringbolzen, Blindbolzen), da eine vollständige und spaltfreie Anformung an das Grundmaterial stattfindet. Einige Blindnietarten sind hingegen, aufgrund von Oberflächenrauhigkeiten und teilweise undichten Dornverriegelungen, nur bedingt als wasser- und gasdicht zu bezeichnen. Es empfiehlt sich der zusätzliche Einsatz von Dichtmitteln.
Nach der Prüfung von Einzelelementverbindungen wurden die Möglichkeiten des Flanschdichtverhaltens von mechanisch gefügten Verbindungen geprüft, wie sie z.B. in der schiffbaulichen Ausrüstung bei Tür- und Fensterzargen vorkommen können. Da die Einzelelementedichtheit abgeprüft und bestätigt wurde, müssen die Bereiche zwischen den Verbindern untersucht werden. Aus Zeitgründen innerhalb des Vorhabens konnten hier allerdings nur erste Ansätze hinsichtlich einer Flanschprüfung realisiert werden. Es wurde daher im Rahmen der Untersuchungen nur die generelle Wirksamkeit von Dichtmitteln in einer mechanisch gefügten Verbindung geprüft. Zu diesem Zweck wurde eine geeignete 6-Punkt-Mehrelementprobe mit Blindbolzen und einem im Nutzfahrzeugbau eingesetzten Dichtmittel gefügt. Bei den Untersuchungen spielt die Erhaltung der Klemmkraft der mit Dichtmittel gesetzten Verbindung neben der Dichtigkeit selbst eine zentrale Rolle. Diese Untersuchung wurde einen Versuchsaufbau realisiert, der mit Hilfe neuartiger Foliensensoren die Klemmkraft über mehrere Wochen registriert. Anschließend wurden die Proben getrennt (Bild 70).

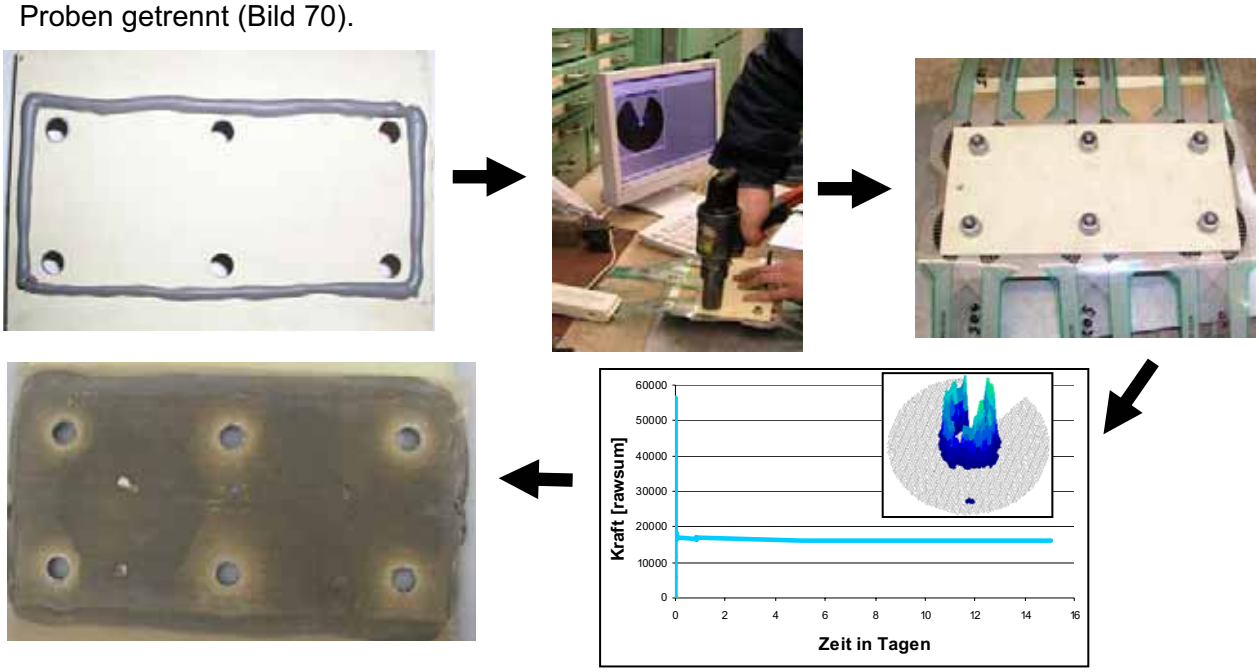


Bild 70: Applikation pastöser Dichtstoffe auf Mehrelementproben mit mehrwöchiger Klemmkraftmessung und gleichmäßiger Dichtstoffverteilung infolge Setzprozess

Der Versuch zeigt, dass sich aufgrund der Setz- und Klemmkräfte das gewählte Dichtmittel flächig im Flansch verteilt und somit eine wasser- und gasdichte Verbindung mit den gewählten Blindbolzen erzeugt werden kann. Die gewählte Verbinder-Dichtmittel-Kombination ermöglichte ein Verpressen des Dichtmittels im Flansch unmittelbar nach dem Setzprozeß und damit ein zeitstabiles Klemmkraftverhalten der Verbindung. Unter der Vielzahl möglicher Dichtmittel sollten bei Applikationen im Schiffbau u.a. die Anforderungen an den Brandschutz beachtet werden, die für Zusatzstoffe z.B. eine geringe Entflammbarkeit bei 200°C vorsehen.

Bei der Analyse schiffbauspezifischer Brandschutztests für mechanische Fügeverbindungen wurde grundsätzlich ermittelt, dass in brandgefährdeten Bereichen Werkstoffe aus Stahl oder vergleichbaren Materialien zum Einsatz kommen müssen und die Anwendung von brennbaren bzw. entflammbaren Stoffen weitgehend zu vermeiden ist [50].
Der Einsatz der meisten Klebstoffe und Dichtmittel ist somit aufgrund ihrer geringen Temperaturbeständigkeit bis ca. 200°C und ihrer überwiegenden Brennbarkeit in brandgefährdeten Bereichen zu vermeiden.
Mechanische Verbindungselemente wie Schubbolzen, Schließringbolzen, Blindnieten und Umformschrauben aus Stahl bzw. Edelstahl können hingegen problemlos in brandgefährdeten Bereichen eingesetzt werden. Eine Lösung der Verbindung im Brandfall oder in Nachfolge eines Brandes ist prinzipbedingt ausgeschlossen. Dennoch sollen nachfolgend die Anforderungen aufgezeigt werden, die mit speziellen Strukturen (z.B. mechanisch gefügte Verbindung mit Dichtstoff / Klebstoff) in brandgefährdeten Bereichen beachtet werden müssten.
Die Zulassung eines Werkstoffes bzw. einer Konstruktion im Rahmen der Brandsicherheit erfolgt durch eine Klasifikationsgesellschaft oder ein anerkanntes Testinstitut auf der Grundlage eines erfolgreich durchgeführten Standardbrandversuches. Der Standardbrandversuch erfolgt an einer relevanten Struktur mit einer Fläche von mindestens 4,65 m² und einer Höhe bzw. Länge von ca. 2,5 m (Bild 71). Die Struktur wird im Rahmen des Brandversuches einseitig eine Stunde gemäß einer festgelegten Zeit-Temperatur-Kurve zunehmend Temperaturen ausgesetzt (556°C nach 5 min bis 925°C nach 60 min).

Bild 71: Punktuelle Erfassung der Temperatur während eines Brandversuchs an einer Brandschutztür für Seeschiffe (links), Standardbrandversuch durch Temperaturmessung an festgelegten Messpunkten (rechts) [50]

Als Ergebnis des Brandversuches erfolgt eine Einteilung der Konstruktion in die Typen A, B und C, wobei die Typen A und B zusätzlich mit der Dauer bis zum Erreichen eines kritischen Temperaturniveaus auf der unbelasteten Seite angegeben werden. Die Temperatur darf dabei nicht mehr als 139 K über der festgelegten Zeit-Temperatur-Kurve liegen. Für einzelne Punkte, inklusive möglicher mechanischer Fügeelemente, ist eine Überschreitung von bis zu 180 K zulässig.

Hinsichtlich ihrer Brandeigenschaften verhalten sich mechanische Fügeelemente vergleichbar mit den bereits im Schiffbau eingesetzten Schraub- und Nietverbindungen. Die für Befestigungsschrauben im Ausrüstungsbereich vorgeschriebenen Grundmaterialien [51] werden durch SRB / BN ebenfalls erfüllt. Die an einem durchgehenden Bolzen auftretenden höheren Temperaturen, bedingt durch die verminderte Wärmeableitung, werden im Rahmen eines Standardbrandversuches über die Definition einer höheren Temperaturgrenze für punktuelle Bereiche und Verbindungen berücksichtigt.

2.1.13 Ergebnisse des AP 411

Ergebnisübersicht zur Einsatzvorbereitung der Montage von mechanisch / thermisch gefügten Ausrüstungselementen in Standard-Tragstrukturen

Die technischen und wirtschaftlichen Untersuchungen in den Arbeitspunkten AP 111, 112, 211, 212, 311 und 312 zur Montage von mechanisch gefügten Ausrüstungselementen für Standard-Tragstrukturen mit Blechdicken > ca. 6 mm umfassen insbesondere die mechanischen Fügeverfahren

- Blindnieten / Blindnietmuttern,

- Schließringbolzen,

- Schubbolzen.

Für diese Fügeverfahren wurde im Vergleich zum Bolzenschweißen / MAG-Schweißen und Schrauben nachgewiesen, dass hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften und der wirtschaftlichen Randbedingungen gute Möglichkeiten existieren, um eine Substitution von geschweißten Ausrüstungsverbindungen z.B. in der Endmontage vorzunehmen. Der Einsatz von mechanischen Fügeelementen erfordert allerdings im Einzelfall eine umfassende Betrachtung der Randbedingungen. Nachfolgend sollen wichtige technische Parameter aufgeführt werden, die für die Bereiche Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Fertigung notwendig sind, um zunächst die prinzipielle Einsatzfähigkeit eines Verfahrens für den jeweiligen Anwendungsfall in der schiffbaulichen Ausrüstung über eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung für Stahlwerkstoffe zu bestimmen (Tabelle 25, 26). Für alle mechanischen Fügeverfahren gelten dabei als gemeinsame Merkmale die Einsetzbarkeit unabhängig von Art und Dicke der Grundmaterialbeschichtung und der geringe Einweisungsaufwand der Mitarbeiter zum Bedienen der Setzgeräte.

Verfahren	Zugänglichkeit	Vorlochen	Blechdickenbereich	Lösbarkeit	Werkzeuge	Qualitätsüberprüfung	Bemerkungen
Blindnieten	einseitig	ja	0,25 – 40 mm	Lösen durch Ausbohren	manuell bis Ø 5 mm	Sichtprüfung	höhere Klemmbereiche u.U. möglich
					elektrisch bis Ø 6,5 mm	Erfassung von Kraft und Weg/Zeit	
					pneumatisch bis Ø 8 mm		
					hydraulisch bis Ø 27 mm		
Schließringbolzen	zweiseitig	ja	0,4 – 100 mm	Lösen durch Schneidaufsatz für Setzgeräte	manuell bis Ø 10 mm bei kleinen Stückzahlen	Sichtprüfung	höhere Klemmbereiche u.U. möglich
					pneumatisch bis Ø 10 mm bei kleinen/mittleren Stückzahlen	Erfassung von Kraft und Weg/Zeit	
					hydraulisch bei Dauerbetrieb in der Fertigung		
Blindnietmuttern	einseitig	ja	0,25 – 10 mm	Lösen durch Ausbohren	manuell	Sichtprüfung	höhere Klemmbereiche u.U. möglich
					elektrisch / pneumatisch	Erfassung von Kraft und Weg/Zeit	
Schubbolzen	einseitig	nein	ab 6 mm (Stähle bis 420 MPa Zugfestigkeit)	mechanisch Trennen	Handsetzgerät zur Befestigung von Rohr- und Elektrohaltern für Gewindebolzen bis M8 und Befestigungsnägeln	Sichtprüfung	Gehörschutz erforderlich
					Handsetzgerät zur Befestigung von Gewindebolzen bis M10, magazinierten Befestigungsnägeln	Sichtprüfung	
Metrische Schrauben	zweiseitig	ja (+ Gewindeschneiden)	ab 0,1 mm	Ausschrauben	manuelle und elektrische Handgeräte, drehmomentgeregelte Schrauber	Drehmomenterfassung	beliebige Klemmbereiche
Vergleich: Bolzenschweißen	*einseitig*	*nein*	*ab 0,5 mm*	*mechanisch Trennen*	*Handsetzgeräte, automatisierte Setzgeräte*	*Sichtprüfung*	

Tabelle 25 : Übersicht der relevanten mechanischen Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Standard-Tragstrukturen aus Stahlwerkstoffen (Teil 1)

Verfahren	Verbindungselement	Durchmesser Verbindungselement	Blechdickenbereich	Verbindungselementmaterial	Verbindungselementbeschichtung
Blindnieten	Standardblindnieten	Ø 3 - 6,4 mm	0,5 - 20 mm	Stahl, AL, Edelstahl, Kupfer	verzinkt, chromatiert
	Dichtblindniete, z.B. Magna-TITE BULB-TITE	 Ø 4,8 mm Ø 6,3 mm	 1,25 - 19 mm 1 - 12,7 mm	Stahl, Al + Dichtpolymer	verzinkt, chromatiert
	hochfest vorgespannte (HV) Blindnieten, z.B. Magna-LOK BOM	 Ø 4,8 - 9,5 mm Ø 4,8 - 19 mm	 1,5 - 18,5 mm 2,4 - 40 mm	 Stahl, Edelstahl, Al Stahl, Edelstahl	verzinkt, chromatiert, passiviert
Schließringbolzen	Standardschließringbolzen, z.B. C6L/120	Ø 4,8 - 19,1 mm	0,4 - 50 mm	Stahl, Edelstahl, Al	verzinkt, chromatiert
	Mehrbereichs-Schließringbolzen, z.B. Magna-Grip C50L / MHP	 Ø 4,8 - 19,1 mm Ø 12,7 - 28,6 mm	 0,4 - 50 mm 5 - 105 mm		
Blindnietmuttern	offnene / geschlossene Blindnietmuttern	M4 - M 14	0,25 - 10 mm	Stahl, Edelstahl, AL, Messing	verzinkt, chromatiert
Schubbolzen	Gewindeschubbolzen	M 6, 8, 10	ab 6 mm	Stahl, nichtrostender Stahl	verzinkt
	Befestigungsnägel				
	Schubbolzen mit Kabelhalter / Abhängesystem				
Metrische Schrauben	Normschrauben	beliebige Durchmesser	ab 0,1	Stahl (4.8, 8.8, 10.9) Edelstahl, Messing	verzinkt u.a.
Bolzenschweißen	Hubzündungsbolzen Kurzzeitschweißbolzen	M4 – M 30 M 4 – M 10	ab 2 mm ab 0,5 mm	Stahl (4.8, 8.8) Edelstahl, Alu, Messing	i.d.R. ohne

Tabelle 26 : Übersicht der relevanten mechanischen Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Standard-Tragstrukturen aus Stahlwerkstoffen (Teil 2)

Für ausgewählte Ausrüstungselementebefestigungen sind Festigkeitsnachweise an tragenden Elementen der Schiffkonstruktion erforderlich (siehe Abschnitt 2.1.9). Für die untersuchten mechanischen Verbindungen sollen nachfolgend belastbare statische Festigkeitsangaben aufgeführt werden, die sich sowohl aus experimentellen Ergebnissen, als auch aus Norm- und Merkblattangaben zusammensetzen [52, 53, 54, 59, 60, 61], die jeweils im Laufe der Untersuchungen überprüft wurden (Tabelle 27). Der relativ geringe Umfang der Angaben zur Verbindungsfestigkeit von mechanischen Fügungen im Vergleich zu eingeführten Verfahren, wie dem Schweißen bzw. dem Schrauben, hemmt häufig die Entscheidung des Anwenders in der Praxis, alternative mechanische Verfahren einzusetzen. So ist der Konstrukteur beim Einsatz von mechanischen Fügeverfahren stärker im Vergleich z.B. zum MAG-Schweißen darauf angewiesen, die Erfahrungen von Forschungseinrichtungen und Zulieferfirmen bei der Auslegung zu nutzen. Diese sind bereits vielfach in Normungsaktivitäten eingebunden, um zukünftige Anwendungen zu erleichtern (z.B. [38, 55, 56, 57, 58]) und diesbezügliche technische Kundendienste anzubieten.

Blind-nieten (nach DIN 7337)	Ø 5		Ø 6,4		Ø 8		Ø 10	
	Scher-zug [kN]	Kopfzug [kN]	Scher-zug [kN]	Kopfzug [kN]	Scher-zug [kN]	Kopfzug [kN]	Scher-zug [kN]	Kopfzug [kN]
Blind-bolzen	12,4	8,0	22,7	14,4	35,8	23,1	49,4	32,2
St	2,6	3,2	3,3 / 13,4*	4,0 / 9,5*	-	-	-	-
A2	4,2	5,0	-	-	-	-	-	-
Al	1,6	1,3	2,5	2,1	-	-	-	-

** Bereiche erheblich höherer Festigkeiten im Experiment im Vergleich zu Normwerten*

Standardschließringbolzen	Ø 5		Ø 6,5		Ø 8		Ø 10	
	Scherzug [kN]	Kopfzug [kN]	Scherzug [kN]	Kopfzug [kN]	Scherzug [kN]	Kopfzug [kN]	Scherzug [kN]	Kopfzug [kN]
Stahl (5.8)	7,6	6,3	13,5 / 16,1*	11,4 / 13*	21,0	17,4	30,3	25,0
Stahl (8.8)	10,8	8,3	19,1	14,4	29,8	23,8	42,7	35,1
Edelstahl	8,9	6,4	15,7	12,2	24,5	18,9	35,3	27,1

** Bereiche erheblich höherer Festigkeiten im Experiment im Vergleich zu Normwerten*

Gewindeschubbolzen / Kopfzugfestigkeit [kN]		
M 6	M 8	M 10
10 / 11,5*	10 / 12*	10 / 13*

** Bereiche erheblich höherer Festigkeiten im Experiment im Vergleich zu Normwerten*

Blindnietmuttern / Anzugsdrehmomente [Nm]					
Gewinde	M5	M6	M8	M10	M12
Stahl	6	10	24	48	82
Edelstahl	6	10	24		
Aluminium	4,5	8	17	27	

Blindnietmuttern / Kopfzugfestigkeit [kN]					
Gewinde	M5	M6	M8	M10	M12
Stahl	9	18	25 / 26*	31	75
Edelstahl	9	18	25 / 34*		
Aluminium	6	10	14	18	

** Bereiche erheblich höherer Festigkeiten im Experiment im Vergleich zu Normwerten*

Tabelle 27: Übersicht der statischen Festigkeiten für relevante mechanische Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Standard-Tragstrukturen aus Stahlwerkstoffen

Die angegebenen Festigkeitsangaben für die Verbindungen sind als Richtwerte anzusehen und bedürfen der Abstimmung mit der jeweiligen Blechdicke, bei Blindnietmuttern zusätzlich mit der Güte des Einschraubelementes und bei Schubbolzen mit der Güte des Grundmaterials.

2.1.14 Ergebnisse des AP 412

Versuchsmustererprobung mit mechanisch / thermisch gefügten Ausrüstungselementen an Standard-Tragstrukturen und Vergleich mit Trends in anderen Industriezweigen

Die während der Untersuchungen mit Ausrüstungselementen an Standard-Tragstrukturen ermittelten Ergebnisse wurden an ausgewählten Versuchsmustern getestet, die entsprechende Charakteristiken von Bauteilstrukturen aufweisen. So wurde zunächst eine Auswahl von Ausrüstungselementehalterungen vorgenommen und exemplarische Applikationstests an Versuchsmustern vorgenommen (Bild 72). Neben den anhand von Proben ermittelten Festigkeitswerten und Wirtschaftlichkeitskennziffern sollte die Praktikabilität der Verfahren exemplarisch überprüft werden und mit Erfahrungen aus anderen Wirtschaftszweigen verglichen werden.

Bild 72: Auswahl von Ausrüstungselementehalterungen (links) und exemplarische Applikationstests mit Gewindeschubbolzen, Schubnägeln, Blindbolzen und MAG-Schweißen an Versuchsmustern (rechts)

Im Ergebnis konnte für die Versuchsmusteranwendungen und die relevanten mechanischen Fügeverfahren eine grundsätzliche schiffbauliche Praxiseignung nachgewiesen werden. Es wurden handelsübliche Setzgeräte verwendet.
Ähnliche Applikationen in anderen Industriezweigen sind z.B. im Stahlbau und im Nutzfahrzeugbau zu finden und wurden durch intensive forschungsseitige Aktivitäten zur technischen Einsatzreife gebracht. Dadurch werden im Schienenfahrzeug- und LKW-Bau zunehmend Ausrüstungselementestrukturen mittels mechanischer Fügeverfahren an stabile Tragstrukturen appliziert (Bild 73), die Grundlage bilden insbesondere Festigkeitstests analog der Vorhabensuntersuchungen.

Bild 73: Beispiele von Ausrüstungselementeverbindungen mittels Schließringbolzen und Blindbolzen für Treppen (links), Aggregathalter (Mitte) und Traghalterung (rechts) [59]

2.1.15 Ergebnisse des AP 421

Ergebnisübersicht zur Einsatzvorbereitung der Montage von mechanisch gefügten Ausrüstungselementen an Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen

Die technischen und wirtschaftlichen Untersuchungen in den Arbeitspunkten AP 121, 122, 221, 222, 321 und 322 zur Montage von mechanisch gefügten Ausrüstungselementen an Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen mit Blechdicken < ca. 6 mm umfassen insbesondere die mechanischen Fügeverfahren

- Blindnieten / Blindnietmuttern

- Bohrschrauben.

- (Schubbolzen – dieses Fügeverfahren kann bisher erst ab ca. 5-6 mm Blechdicke im Sinne der Aufgabenstellung relevante Festigkeiten vorweisen, es wurde daher in Abschnitt 2.1.13, 2.1.14 behandelt)

Für die o.g. Fügeverfahren wurde im Vergleich zum Bolzenschweißen / MAG-Schweißen und Schrauben nachgewiesen, dass hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften und der wirtschaftlichen Randbedingungen gute Möglichkeiten existieren, um eine Substitution von geschweißten Ausrüstungsverbindungen vorzunehmen. Nachfolgend sollen wichtige technische Parameter aufgeführt werden, die für die Bereiche Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Fertigung notwendig sind, um zunächst die prinzipielle Einsatzfähigkeit eines Verfahrens für den jeweiligen Anwendungsfall in der schiffbaulichen Ausrüstung über eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung für Stahlwerkstoffe zu bestimmen (Tabelle 28, 29). Für alle mechanischen Fügeverfahren gelten dabei als gemeinsame Merkmale die Einsetzbarkeit unabhängig von Art und Dicke der Grundmaterialbeschichtung und der geringe Einweisungsaufwand der Mitarbeiter zum Bedienen der Setzgeräte.

Verfahren	Zugänglichkeit	Vorlochen	Blechdickenbereich	Lösbarkeit	Werkzeuge	Qualitätsüberprüfung	Bemerkungen
Blindnieten	einseitig	ja	0,25 – 40 mm	Lösen durch Ausbohren	manuell bis Ø 5 mm	Sichtprüfung	höhere Klemmbereiche u.U. möglich
					elektrisch bis Ø 6,5 mm	Erfassung von Kraft und Weg/Zeit	
					pneumatisch bis Ø 8 mm		
					hydraulisch bis Ø 27 mm		
Blindnietmuttern	einseitig	ja	0,25 – 10 mm	Lösen durch Ausbohren	manuell	Sichtprüfung	höhere Klemmbereiche u.U. möglich
					elektrisch / pneumatisch	Erfassung von Kraft und Weg/Zeit	
loch- und gewindeformende Schrauben	einseitig	nein	0,3 – 3 mm	Ausschrauben	Drehzahl-/ Drehmomentengeregelte Handschrauber	Sichtprüfung Erfassung von Drehmoment und Drehzahl	bei größeren Blechdicken z.Zt. noch Vorbohren notwendig
Bolzenschweißen	einseitig	nein	ab 0,5 mm	mechanisch Trennen	Handsetzgeräte, automatisierte Setzgeräte	Sichtprüfung	

Tabelle 28 : Übersicht der relevanten mechanischen Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen aus Stahlwerkstoffen (Teil 1)

Verfahren	Verbindungselement	Durchmesser Verbindungselement	Blechdickenbereich	Verbindungselementmaterial	Verbindungselementbeschichtung
Blindnieten	Standardblindnieten	Ø 3 - 6,4 mm	0,5 - 20 mm	Stahl, AL, Edelstahl, Kupfer	verzinkt, chromatiert
	Dichtblindniete, z.B. Magna-TITE BULB-TITE	 Ø 4,8 mm Ø 6,3 mm	 1,25 - 19 mm 1 - 12,7 mm	Stahl, Al + Dichtpolymer	verzinkt, chromatiert
	hochfest vorgespannte (HV) Blindnieten, z.B. Magna-LOK BOM	 Ø 4,8 - 9,5 mm Ø 4,8 - 19 mm	 1,5 - 18,5 mm 2,4 - 40 mm	 Stahl, Edelstahl, Al Stahl, Edelstahl	verzinkt, chromatiert, passiviert
Blindnietmuttern	offnene / geschlossene Blindnietmuttern und Blindnietbolzen	M4 - M 14	0,25 - 10 mm	Stahl, Edelstahl, AL, Messing	verzinkt, chromatiert
loch- / gewindeformende Schrauben	Schraubenform, z.B. FLS KFS	 M 3 – M 8 M 3 – M 6	 0,3 - 2 mm 0,3 - 2 mm	Stahl	verzinkt
Bolzenschweißen	Hubzündungsbolzen Kurzzeitschweißbolzen	M4 – M 30 M 4 – M 10	ab 2 mm ab 0,5 mm	Stahl (4.8, 8.8) Edelstahl, Alu, Messing	i.d.R. ohne

Tabelle 29 : Übersicht der relevanten mechanischen Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen aus Stahlwerkstoffen (Teil 2)

Für ausgewählte Ausrüstungselementebefestigungen an Sandwichpaneelen und dünnwandigen Tragstrukturen der Schiffskonstruktion sind Festigkeitsnachweise erforderlich (siehe Abschnitt 2.1.11). Für die untersuchten mechanischen Verbindungen sollen nachfolgend belastbare statische Festigkeitsangaben aufgeführt werden, die sich sowohl aus experimentellen Ergebnissen, als auch Norm- und Merkblattangaben zusammensetzten [*54, 59, 60, 61, 62*], die jeweils im Laufe der Untersuchungen überprüft wurden (Tabelle 30). Der relativ geringe Umfang der Angaben zur Verbindungsfestigkeit von mechanischen Fügungen im Vergleich zu eingeführten Verfahren, wie dem Schweißen bzw. dem Schrauben, führt in der Praxis häufig zur Beibehaltung konventioneller Fügeverfahren mit den entsprechenden Nachteilen, wie Nachkonservierungsaufwand bzw. Überdimensionierung der Struktur. Beim Einsatz von mechanischen Fügeverfahren ist der Anwender jedoch bisher stärker als z.B. beim MAG-Schweißen darauf angewiesen, die Erfahrungen von Forschungseinrichtungen und Zulieferfirmen bei der Auslegung zu nutzen. Diese sind bereits vielfach für die o.g. Fügeverfahren in Normungsaktivitäten eingebunden, um zukünftige Anwendungen zu erleichtern (z.B. [38, 55, 56, 57, 58]) und diesbezügliche technische Kundendienste anzubieten.

Blind-nieten (nach DIN 7337)	Ø 3		Ø 4		Ø 5		Ø 6,4		Ø 8		Ø 10	
	Scher zug [kN]	Kopfzug [kN]	Scher-zug [kN]	Kopfzug [kN]	Scher-zug [kN]	Kopfzug [kN]	Scher-zug [kN]	Kopfzug [kN]	Scher-zug [kN]	Kopfzug [kN]	Scher-zug [kN]	Kopfzug [kN]
Blind-bolzen	-	-	-	-	12,4	8,0	22,7	14,4	35,8	23,1	49,4	32,2
St	1,0	0,9	1,5	2,0	2,6	3,2	3,3 / 13,4*	4,0 / 9,5*	-	-	-	-
A2	1,8	2,0	2,5	3,5	4,2	5,0	-	-	-	-	-	-
Al	0,5	0,4	0,8	0,8	1,6	1,3	2,5	2,1	-	-	-	-

** Bereiche erheblich höherer Festigkeiten im Experiment im Vergleich zu Normwerten*

Kopfzugfestigkeit von loch- und gewindeformenden Schrauben Ø 6 mm in Stahl [kN]			
	Grundmaterial Festigkeit [N/mm²]		
Blechdicke [mm]	360	390	420
0,5	0,7	0,7	0,8
1	1,6 / 1,7*	1,8	1,9
1,5	3,0	3,3	3,5

** Bereiche erheblich höherer Festigkeiten im Experiment im Vergleich zu Normwerten*

Scherzugfestigkeit von loch- und gewindeformenden Schrauben Ø 6 mm in Stahl [kN]			
	Grundmaterial Festigkeit [N/mm²]		
Blechdicke [mm]	360	390	420
0,5	1	1,2	1,2
1	3	3,3	3,5
1,5	3,5	3,6	3,6

Blindnietmuttern / Anzugsdrehmomente [Nm]							
Gewinde	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12
Stahl	1,2	3	6	10	24	48	82
Edelstahl		3	6	10	24		
Aluminium	1	2	4,5	8	17	27	

Blindnietmuttern / Kopfzugfestigkeit [kN]							
Gewinde	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12
Stahl	5	7	9	18	25 / 26*	31	75
Edelstahl		7	9	18	25 / 34*		
Aluminium	3	4	6	10	14	18	

** Bereiche erheblich höherer Festigkeiten im Experiment im Vergleich zu Normwerten*

Tabelle 30 : Übersicht der statischen Festigkeiten für relevante mechanische Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen

Die angegebenen Festigkeitsangaben für die Verbindungen sind als Richtwerte anzusehen und bedürfen der Abstimmung mit der jeweiligen Blechdicke, bei Blindnietmuttern zusätzlich mit der Güte des Einschraubelementes.

2.1.16 Ergebnisse des AP 422

Versuchsmustererprobung mit mechanisch / thermisch gefügten Ausrüstungselementen an Sandwichpaneele und Vergleich mit Trends in anderen Industriezweigen

Die während der Untersuchungen mit Ausrüstungselementen an Sandwichpaneelen und dünnwandigen Tragstrukturen ermittelten Ergebnisse wurden an ausgewählten Versuchsmustern getestet, die entsprechende Charakteristiken von Bauteilstrukturen aufweisen. Es wurde eine Auswahl von Ausrüstungselementehalterungen vorgenommen und exemplarische Applikationstests an Versuchsmustern bzw. Vergleichsuntersuchungen mit thermischen Fügeverfahren durchgeführt (Bild 74). Neben den anhand von Proben ermittelten Festigkeitswerten und Wirtschaftlichkeitskennziffern sollte die Praktikabilität der Verfahren exemplarisch überprüft und mit Erfahrungen aus anderen Wirtschaftszweigen verglichen werden.

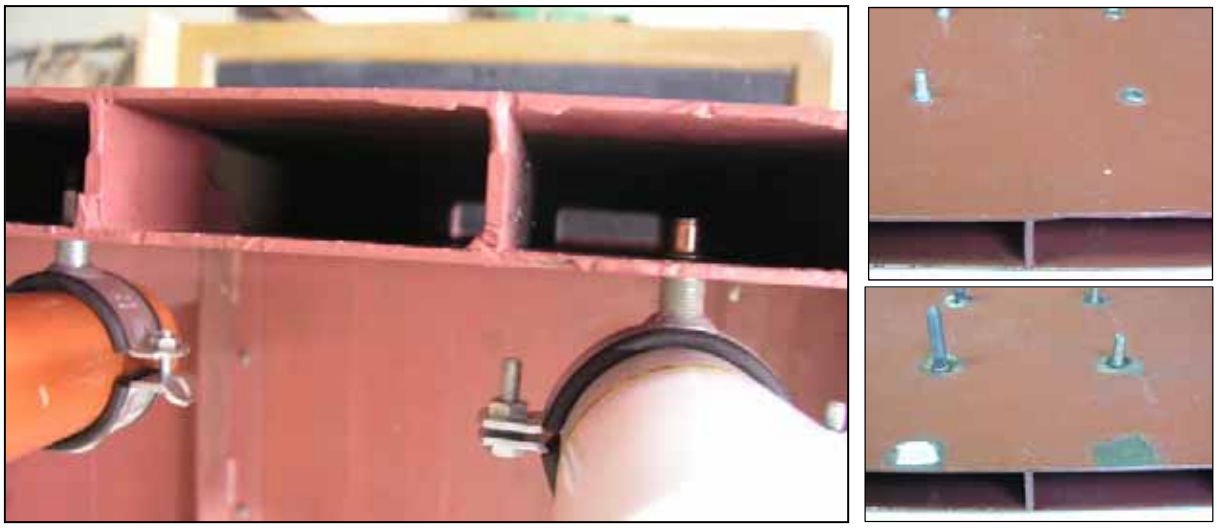


Bild 74: Exemplarische Applikationstests mit Rohrhalterungen und Blindnietmuttern an Sandwichpaneelstrukturen (links) sowie Vergleichsuntersuchungen von Blindbolzen / Blindnietmuttern und Schweißbolzen an Sandwichpaneel-Versuchsmustern (rechts)

Im Ergebnis konnte für die Versuchsmusteranwendungen und die relevanten mechanischen Fügeverfahren eine grundsätzliche schiffbauliche Praxiseignung nachgewiesen werden. Es wurden handelsübliche Setzgeräte verwendet.
Trotz der im Verlaufe des Vorhabens vorgenommenen Priorisierung von Untersuchungen zu Ausrüstungselementeverbindungen an Sandwichpaneelen wurden abschließend an Versuchsmustern verschiedene Möglichkeiten der Sandwichpaneelmontage (Längsstoß mit Gurt-Gurt-Verbindungen, Querstoß mit Winkel) mit verschiedenen Blindnietsystemen erprobt (Bild 75). Dabei wurden die Möglichkeiten der Verwendung handelsüblicher Anlagen getestet, insbesondere hinsichtlich Zugänglichkeit, Schlauchlängen u.a. Außerdem wurden Aspekte der Arbeitsorganisation, Ergonomie und Fertigung durch einen direkten Vergleich von blindgenietetem und geschweißtem Versuchsmusterflansch ermittelt (Bild 75). Die Ergebnisse von Abschnitt 2.1.4 (Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen) konnten bestätigt werden, insbesondere das Vorbohren der Löcher beim Blindnieten stellt im Vergleich zum MAG-Schweißen einen Nachteil dar.

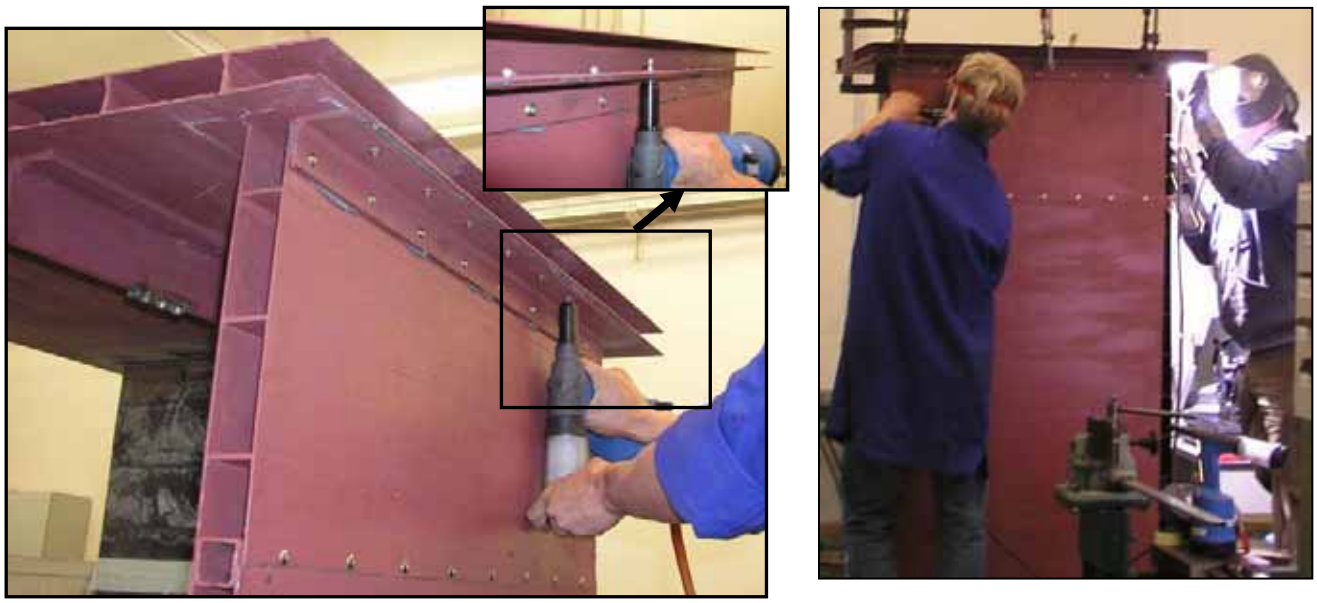


Bild 75: Erprobung verschiedener Möglichkeiten der Sandwichpaneelmontage (Längsstoß mit Gurt-Gurt-Verbindungen, Querstoß mit Winkel) mit verschiedenen Blindnietsystemen an Versuchsmustern (links) und Vergleich von Blindnieten und MAG-Schweißen am Versuchsmusterflansch (rechts)

In anderen Industriezweigen z.B. im LKW-Bau und im Schienenfahrzeugbau sind für dünnwandige Tragstrukturen und Sandwichpaneele vielfältige Applikationen durch intensive forschungsseitige Aktivitäten zur technischen Einsatzreife gebracht worden. Der Fokus liegt bei diesen Anwendungen zunehmend auf der Verbindung von vorausgerüsteten, vorbeschichteten Modulen sowie unterschiedlichen Materialkombinationen (Bild 76), die Grundlage dazu bilden insbesondere Festigkeitstests analog der Vorhabensuntersuchungen.

Bild 76: Beispiele für die Verbindung von dünnwandigen Trag- und Ausrüstungsstrukturen mittels Schließringbolzen und Blindbolzen im LKW-Chassis- und Aufbautenbereich (links), bei der Wagenkastenmontage im Schienenfahrzeugbau, Fa. Bombardier (mitte) und im Containerbau, Fa. Alcoa (rechts)

2.1.17 Ergebnisse des AP 430

Möglichkeiten des Wissenstransfers zur kurz-, mittel- und langfristigen Umsetzung der Vorhabensergebnisse

Ein wichtiges Ergebnis des Vorhabens stellt die Nutzung der Möglichkeiten zur kurz-, mittel- und langfristigen Umsetzung der Erkenntnisse in die Praxis dar. Dabei können folgende schiffbaulichen Anwendungsbeispiele benannt werden, die zunächst kurz- und mittelfristig umgesetzt werden könnten:
- Befestigung von Ausrüstungselementen wie Halterungen für Kästen, Rohre, Kabelbahnen, Treppen sowie Tür- und Fensterzargen in Standard-Tragstrukturen insbesondere im Maschinenraum und auf Decks; außerdem die Befestigung dieser Halterungen an Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen;
- Verbindung unterschiedlicher Materialkombinationen wie Stahl-Aluminium, Stahl-GFK, GFK-GFK.

Langfristig sind Anwendungen in speziellen Bereichen der schiffbaulichen Montage, z.B. im Deckshausbau, sowie in der Vormontage-, Sektions- und Endmontage geeigneter Tragstrukturen denkbar.
Die Möglichkeit des Wissenstransfers der Ergebnisse wird zunächst auf einem Symposium genutzt, zu dem alle interessierten Schiffbau- und Zulieferunternehmen, Dienstleister und Forschungseinrichtungen eingeladen werden und auf dem die Vorhabensergebnisse vorgestellt werden. Dabei werden die kurz-, mittel- und langfristigen Möglichkeiten des Einsatzes mechanischer und hybrider Fügeverfahren bezogen auf mögliche Anwendungsfälle skizziert und insbesondere die methodische Herangehensweise für Applikationsvorbereitungen diskutiert. Ein wichtiges Ergebnis wird die Abstimmung von Schwerpunkten zur weiteren Entwicklung mechanischer und hybrider Fügeverfahren für schiffbauliche Anwendungen mit den entsprechenden Anwendern, insbesondere Werften und Zulieferer sein, um weiterführende Forschungsvorhaben zu initiieren. Flankierend wird durch Veröffentlichungen in der Fachliteratur, durch Fachvortrage, Vorlesungen und die Mitarbeit in Fachorganen (z.B. Normung) ein breiter Wissenstransfer gewährleistet.

2.2 Voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen und Untersuchungen zeigen, dass im Bereich der schiffbaulichen Endausrüstung mechanische und kombinierte Fügeverfahren alternativ zu den klassischen thermischen Verfahren eingesetzt werden können und ein erhebliches Rationalisierungspotential für ausgewählte Anwendungen, insbesondere durch den Wegfall von Arbeitsschritten der Vor- bzw. Nachbearbeitung der gefügten Verbindung, besteht.
Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens tragen zur Beurteilung der Möglichkeiten des Einsatzes alternativer mechanischer Fügeverfahren im Rahmen schiffbaulicher Anwendungen bei. Es wurde der Nachweis geführt, dass Verfahrenssubstitutionen für ausgewählte Anwendungen technisch möglich und wirtschaftlich geeignet sind, um Effekte in den Bereichen Produktivität und Qualität zu erzielen. Die im Rahmen des Vorhabens ermittelten Anwendungsfälle für mechanische Fügeverfahren in der Schiffsausrüstung und -montage nach wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten unterstützen Werften und maritime Zulieferer bei Steigerung der Produktivität und Qualität in der Fertigung sowie der Senkung der Durchlaufzeiten.
Ausgehend von Anforderungen der maritimen Anwender und der Klassifikationsgesellschaften wurden umfangreiche Untersuchungen bezüglich der Eigenschaften verschiedener mechanisch gefügter Verbindungen durchgeführt. Diese umfassten statische und dynamische Festigkeits-, Korrosions- und Dichtigkeitsuntersuchungen an ausgewählten Proben- und Bauteilstrukturen. Die experimentell ermittelten Kennwerte ermöglichen eine Beurteilung der Tragfähigkeit und der Einsatzmöglichkeiten von mechanisch gefügten Verbindungen für ausgewählte Anwendungen in der schiffbaulichen Ausrüstung. Durch die Erprobung mechanischer

Fügetechnologien an schiffbaulichen Versuchsmustern erfolgte ein Vergleich ausgewählter Fügeverfahren unter wirtschaftlichen Gesichtpunkten hinsichtlich des zu erwartenden Kosten- und Zeitaufwands für ausgewählte Beispiele.
Die Analyse schiffbaulicher Fügeprozesse ergab insbesondere in der Endausrüstung ein bisher ungenutztes Rationalisierungspotential. Durch den Einsatz der mechanischen Fügetechnik können kostenintensive Arbeitsgänge, insbesondere durch den Wegfall von Vor- und Nacharbeiten an den gefügten Verbindungen, reduziert bzw. vermieden werden.
Kurz- und mittelfristig besteht der voraussichtliche Nutzen der Vorhabensergebnisse in Rationalisierungseffekten auf den Werften durch die Einführung mechanischer Fügeverfahren bei schiffbaulichen Anwendungen bei der Ausrüstungslementebefestigung, z.B. für Halterungen, Zargen, Treppen, und bei der Verbindung unterschiedlicher Materialkombinationen.
Langfristig besteht der voraussichtliche Nutzen der Vorhabensergebnisse in der Ermittlung von experimentellen und analytischen Grundlagen auch für weitere Anwendungen in der schiffbaulichen Fertigung, z.B. im Deckshausbereich, sowie in der Vor-, Sektions- und Endmontage geeigneter Tragstrukturen. Durch die Vorhabensaktivitäten wurden die Grundlagen für weitere Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Einführung innovativer mechanischer, hybrider und thermischer Verfahren geschaffen (u.a. [63]), um durch die angestrebte Erzielung von Kosten-, Durchlaufzeit- und Qualitätsvorteilen zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft des deutschen Schiffbaus beizutragen.

2.3 Paralleler Fortschritt anderer Stellen auf dem Forschungsgebiet

Während der Projektlaufzeit wurden seitens der Verbindungs- und Systemhersteller in Zusammenarbeit mit Forschungsstellen weitere Innovationen und Optimierungen zur mechanischen Fügetechnik entwickelt und auf dem Markt eingeführt. Hinsichtlich der für den Schiffbau relevanten mechanischen Fügeverfahren ist dabei insbesondere die Weiterentwicklung bei loch- und gewindeformenden Schrauben, bei Schubbolzen und bei Blindnieten zu nennen.
Durch systematische Untersuchung der Prozessparameter für loch- und gewindeformende Schrauben konnte z.B. die maximal zu fügende Blechdicke ohne Vorbohren in Stahlblech auf 3 mm erhöht werden, weitere Entwicklungen sind kurzfristig zu erwarten.
Permanente Weiterentwicklungen hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften von Blindnieten und Schließringbolzen werden von den jeweiligen Systemhäusern initiiert bzw. durch Anwender im Automobil- und Schienenfahrzeugbau (z.B. Fa. DaimlerChrysler, Fa. Siemens, Fa. Bombardier) unterstützt.
Auf dem Gebiet der Schubbolzenentwicklung wurde in den letzten Jahren insbesondere durch die Fa. Hilti eine intensive Beforschung für Anwendungen im Stahlbau realisiert. Dabei wurden auch schiffbauliche Anwendungen untersucht und z.B. hinsichtlich des Korrosionsschutzes optimierte Verbindungssysteme entwickelt.
In Deutschland sind in den letzten Jahren neben der Forschungsstelle an der Universität Rostock insbesondere die Universitäten Paderborn, Dresden, Chemnitz sowie Fraunhofer-Institute in Chemnitz und Bremen forschungsseitig auf dem Gebiet der mechanischen und hybriden Fügetechnik, vor allem im Fahrzeug- und Flugzeugbau, aktiv. Dies findet i.d.R. in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Systemhäusern und den Industrieanwendern im Rahmen öffentlich geförderter Untersuchungen bzw. über Industrieaufträge statt.
Allerdings sind hinsichtlich einer schiffbaulichen Applikation und Beforschung von mechanischen/ hybriden Fügetechnologien kaum Aktivitäten bekannt, bezüglich der Schnittstelle zu Klebtechnologien wäre hier das betreffenden Fraunhofer-Institut in Bremen zu nennen.

2.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Eine Veröffentlichung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens findet in der Fachpresse (z.B. Hansa, Blech/Rohre/Profile, wt Werkstattstechnik) und auf Fachmessen (z.B. SMM, Euroblech) durch die Veröffentlichung des Abschlussberichtes und durch die Einbindung der Forschungsergebnisse in die betreffenden Vorlesungsreihen an der Universität Rostock statt. Einen weiteren wichtigen Aspekt der Vorhabensumsetzung stellen Fachvorträge dar. Hier werden die Forschungsergebnisse u.a. vorgestellt in Fachveranstaltungen des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik und verwandte Verfahren (DVS), des Center of Maritime Technologies (CMT), der Fraunhofer Gesellschaft (IPA, IFAM), der Universität Rostock und in Veranstaltungen des BMBF-Projektträgers (PTJ). Auf diesen Fachveranstaltungen werden neben Vertretern aus Forschung und Wissenschaft vor allem Industrievertreter über die Vorhabensergebnisse informiert. Zur Präsentation der Ergebnisse im Nachgang des Vorhabens sind gezielte Veranstaltungen durch die Forschungsstelle (z.B. Symposium Mechanische Fügetechnik im Schiffbau) geplant, um einen direkten und schnellen Transfer der Ergebnisse in die maritime Wirtschaft zu unterstützen.

3 Zusammenfassung

Über die Hälfte der Fertigungskosten beim Bau von Seeschiffen entfallen auf die Ausrüstung, davon ca. 80 % durch Montageaufwände. Das als Fügeverfahren dominierende Schweißen zerstört verfahrensbedingt die vorhandenen Konservierungen und führt zu thermischen Deformationen, so dass häufig Nacharbeiten anfallen (Nachkonservieren, Richten). Auch der erforderliche Brandschutz führt mit zunehmender Ausrüstungsstufe zu erhöhten Aufwänden.
Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Anwendungsmöglichkeiten moderner mechanischer und kombinierter Fügeverfahren zu ermitteln und Erfahrungen, insbesondere aus dem Automobil- und Schienenfahrzeugbau, auf den Schiffbau zu übertragen. Dabei sollten die für einen Technologietransfer geeigneten Einsatzfelder untersucht und die resultierenden Zeit- und Kostenvorteile ermittelt werden.
Im Vorhaben erfolgte eine Analyse möglicher Anwendungsfälle für mechanische und hybride Fügetechnologien in den Bereichen der schiffbaulichen Endausrüstung und der Montage / Ausrüstung von Sandwichpaneelen nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Entsprechendes Potential wurde insbesondere bei der Befestigung von Ausrüstungselementen wie z.B. Halterungen für Kästen, Rohre, Kabel, Treppen und Tür-/ Fensterzargen ermittelt. Ausgehend von den Anforderungen der Klassifikationsgesellschaften wurden spezifizierte Proben hinsichtlich ihrer statischen und dynamischen Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Dichtigkeitseigenschaft untersucht. Auf der Grundlage dieser ermittelten Kennwerte wurden geeignete mechanische Fügeverfahren (z.B. Blindnieten, Schließringbolzen, Schubbolzen, Umformschrauben) experimentell überprüft und an Versuchsmustern erprobt. Der Einsatz von Klebstoffen bzw. mit Kleben kombinierter mechanischer Fügeverfahren wurde aufgrund der Brandeigenschaften, der geringen Warmfestigkeit und der Alterungsneigung fast aller z. Zt. verfügbaren Klebstoffe im Rahmen des Vorhabens nicht untersucht. Die Eignung der ausgewählten mechanischen Fügeverfahren wurde hinsichtlich des Fügens von Ausrüstungselementen an relativ dickwandige Standard-Tragstrukturen (Blechdicke größer ca. 6 mm) und an Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen (Blechdicke kleiner ca. 6 mm) untersucht und mit punktförmigen Bolzenschweißverbindungen verglichen. Im Vorhaben wurde folgende Eignung der Ausrüstungselementeverbindungen für die jeweiligen mechanischen Fügeverfahren ermittelt:

Ausrüstungselemente an Standard-Tragstrukturen:
Schubbolzen in den verschiedenen verfügbaren Varianten (Gewindebolzen, Befestigungsnagel mit / ohne Kabelhalter) stellen für die betreffenden Anwendungen eine zeit- und kostensparende Alternative zu Schweißverfahren dar. Die Festigkeitseigenschaften sind i.d.R. ausreichend, einsatzfallbezogene Betrachtungen sind jedoch notwendig. Blindnieten / Blindnietmuttern und Schließringbolzen stellen ebenfalls eine sinnvolle technische Alternative für Ausrüstungselementverbindungen dar, allerdings reduziert sich bei größeren Blechdicken der wirtschaftliche Effekt aufgrund des verfahrensbedingten Vorlochens.

Ausrüstungselemente an dünnwandige Tragstrukturen:
Der Einsatz von Blindnieten / Blindnietmuttern und Schließringbolzen ermöglicht die Erzielung erheblicher wirtschaftlicher Effekte, die Nachteile der Vorlochoperation fallen bei dünneren Blechdicken geringer aus. Die deutliche Reduzierung der Vor- und Nacharbeiten durch Blindnietverfahren bei gleichzeitig hoher statischer und dynamischer Festigkeit erschließt ein hohes Rationalisierungspotential für schiffbauliche Anwendungen.
Loch- und gewindeformende Schrauben stellen hinsichtlich möglicher Applikationen in Stahl mit Blechdicken größer 3 mm bisher technologisches Neuland dar, es existieren jedoch intensive Entwicklungsaktivitäten. Zukünftig wird dieses Verfahren aufgrund hoher Verbindungsfestigkeiten und wärmearmer vorlochfreier Setzprozesse eine größere Bedeutung erlangen können.

Ausrüstungselemente an Sandwichpaneele / Sandwichpaneelmontage:
Für die Applikation von Ausrüstungselementen an Sandwichpaneele gelten prinzipiell die o.g. Aussagen zur Verbindung mit dünnwandigen Tragstrukturen bis auf die Einschränkung, dass nur Verfahren mit einseitiger Zugänglichkeit zum Einsatz kommen sollten (Blindnieten / Blindnietmuttern, loch- und gewindeformende Schrauben), um wirtschaftliche Effekte erzielen zu können. Die Montage von Sandwichpaneelen durch den Einsatz von hochfesten Blindnieten und Blindbolzen ist prinzipiell möglich, allerdings werden durch die notwendige Vielzahl der Verbindungselemente in die bisherigen, nicht nietgerechten Strukturen i.d.R. keine wesentlichen wirtschaftlichen Effekte erzielt. Bei der Notwendigkeit des Fügens unterschiedlicher Materialkombinationen in Sandwichstrukturen würden dagegen die Vorteile mechanischer Fügeverfahren zum Tragen kommen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen und Untersuchungen zeigen, dass im Bereich der schiffbaulichen Endausrüstung die mechanischen Fügeverfahren alternativ zu den klassischen thermischen Verfahren eingesetzt werden können und ein erhebliches Rationalisierungspotential für ausgewählte Anwendungen, insbesondere durch den Wegfall von Arbeitsschritten der Vor- bzw. Nachbearbeitung der gefügten Verbindung besteht.
Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass kurz- und mittelfristig ein Umsetzungspotential für schiffbauliche Anwendungen insbesondere in der Endausrüstung des Maschinenraum- und Decksbereiches existiert. Bezüglich schiffbaulicher Entwicklungstendenzen des verstärkten Einsatzes von geringeren Blechdicken, von organischen und anorganischen Primärbeschichtungen, von höherfesten Stählen und von Materialkombinationen z.B. mit Aluminium / Kunststoffen existiert in weiteren Bereichen der schiffbaulichen Fertigung, z.B. in der Deckshausmontage, der Bedarf nach Alternativen zu klassischen Schweißverbindungen, so dass auch langfristig ein Rationalisierungspotential durch den Einsatz mechanischer Fügetechnologien zu erwarten ist.

Literaturverzeichnis

[1] Produktionstechnik des Schiffbaus im 21. Jahrhundert -Prognose 2005- Werft der Zukunft, Studie im Auftrag des VSM, Hamburg,1996.

[2] Klemens, U.; Budde, L.: Experten- und Datenbanksysteme in der Fügetechnik, VDI-Berichte, Band 1072 (1993), S.267-285.

[3] Pilgrim, R.: Mechanisches Fügen im Leichtbau. Stanznieten und Durchsetzfügen, Der Konstrukteur, Band 25 (1994), Heft 12.

[4] Klos, M.: Aktuelle Entwicklungen in der Blechmontage mit Schrauben und Blindnieten, Bänder Bleche Rohre, Band 38(1997) Heft 7/8.

[5] Claussen, U.; Clemann, R.: Mikrometer entscheiden über Sicherheit, Werkstatt und Betrieb, Band 131 (1998), Heft 11.

[6] Irving, B.: Herstellung der Automobile von morgen (in engl.), Welding Journal, New York, Band 74 (1995) Heft 8.

[7] Linder, J.; Melander, A.: Entwurfsdaten zur Schwingfestigkeit für neue Fügetechniken (in engl.), Svetsaren, Stockholm, Band 53 (1998) Heft 3.

[8] Huppatz, W. u.a.: Fügeverbindungen im Schiffbau – Korrosionsverhalten und Korrosionsschutz, Materials and Corrosion, Band 49(1998), Heft 6.

[9] Groebel, K.: Mechanische Verbindungselemente, Konstr. Elem. Methoden, Band 21 (1984), Heft 10.

[10] Voelkner, W.: Verbinden organische beschichteter Bleche aus Stahl durch Stanznieten, Forschung f.d. Praxis, Düsseldorf, Band P265 (1998).

[11] Beenken, H.: Besonderheiten bei der fügetechnischen Verarbeitung oberflächenveredelter Stahlbleche, Bänd. Blech. Ro., Band 38 (1997) H.10.

[12] Göklü, S. u.a.: Einfluß von Korrosion auf die Schwingfestigkeit gefügter Bauteile aus Feinblech, Forsch. f. d. Praxis, Düsseldorf, Bd. P227 (1999).

[13] Hahn, O. u.a.: Stanznieten organisch beschichteter Aluminiumbleche, Blech Rohre Profile, Band 46 (1999) Heft 4.

[14] Grandt, J.: Schließringbolzen – ein Schnellmontagesystem, Stahl (1998) Heft 5.

[15] N.N.: Empfehlungen für die Anwendung von HV-Schrauben und Schließringbolzen im Stahlbau; Techn. Kommission d. Schweiz. ZS für Stahlbau.

[16] N.N.: Richtlinien für Verbindungen mit Schließringbolzen im Anwendungsbereich des Stahlbaues mit vorwiegend ruhender Belastung, DAST, Stahlbau-Verlag Köln, 1970.

[17] Zorn, H.; Henkel, K.: Korrelation zwischen Bauteileigenschaften und Form-Kraftschluss von Blindniet- und SRB-Verbindungen, Tagungsband der 6. Fügekonferenz, Paderborn, 1998.

[18] Wittke, K.; Füssel, U.: Kombinierte Fügeverbindungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.

[19] Dorn, L.: Konstruktionsgerechte Auswahl von Fügeverfahren nach technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten, DVS-Berichte, Band 187 (1997).

[20] Bischoff, J. u.a.: Kleben nicht vorbehandelter Stahlbleche, Ingenieur-Werkstoffe, Düsseldorf, 1995, Heft 1.

[21] Groth, H. u. a.: Erweiterung des Einsatzbereiches der Klebtechnik im Schiffbau, Machbarkeisstudie, BMBF-Vorhaben 18S0169, 2000.

[22] N.N.: Laser-Schneid- und Schweißtechnik, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, Hamburg, 2001, Heft 9.

[23] Paetzold, H.: Schwingfestigkeit von untergeordneten Ausrüstungsbefestigungen an der tragenden Schiffskonstruktion, Universität Hamburg-Institut für Schiffbau, AiF/FDS-Forschungsbericht 263/1995.

[24] N.N.: Beanspruchungsgerechte Gestaltung von Ausrüstungselementen an der tragenden Schiffskonstruktion, TU Hamburg-Harburg, AiF/FDS-Forschungsvorhaben 2/1999 – 2/2001

[25] ADVANCED COMPOSITE SANDWICH STEEL STRUCTURES, Europäische Forschungsvorhaben Nr.10862 – 5th Frameworkprogramme Growth KA II, 2000-2002.

[26] Voelkner, W. u.a.: Einfluß einer organischen Beschichtung auf die tribologischen und umformtechnischen Mechanismen beim Durchsetzfügen von Stahlfeinblechen, Abschlußbericht zum EFB/AiF-Forschungsvorhaben 10881B, 1999.

[27] Bräunlich, H. u.a.: Verhalten v. Oberflächebeschichtungen auf Stahlblechen beim Umformen, Forschung f. d. Praxis, Band P 278 (1998).

[28] Schäden an Schweißkonstruktionen – Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V., internes Material der Arbeitsgruppe A 6.2, 1999.

[29] Habenicht, G.: Kleben; Grundlagen, Technologie, Anwendung; 3. Aufl.; Springer Verlag; Berlin; 1997.

[30] Endlich, W.: Kleben und Dichten – aber wie?; Leitfaden für den Praktiker; DVS-Verlag GmbH; Düsseldorf; 1996.

[31] Brandenburg, A.: Kleben metallischer Werkstoffe (Fachbuchreihe Schweißtechnik; Bd. 144) ; DVS-Verlag GmbH; Düsseldorf; 2001.

[32] Wanner, M.C.; u. a.: Füge-, Dicht- und Montagetechnologien für ein innovatives Ladesystem auf Kunststoffbasis (ILAS); laufendes BMBF-Forschungsvorhaben (Inno-Regio); FhG-AGP, Rostock; 2005.

[33] Exner, S.: Kleben im Schiffbau; DVS-Symposium „Trends in der Schweiß- und Klebtechnik“; Bremen; 2003.

[34] Kleinert, H.: Neues in der Schweistechnik 2002 - Klebtechnik; Schweißen und Schneiden (2003) Heft 7; DVS-Verlag GmbH; Düsseldorf; 2003.

[35] DVS – Berichte Band 222: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik; DVS-Verlag GmbH; Düsseldorf; 2003.

[36] Groth, H. u.a.: Erweiterung des Einsatzbereiches der Klebtechnik im Schiffbau; Abschlußbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 18S0169;Peenwerft GmbH, ISM GmbH, MBU GmbH, Universität Rostock, IFAM Bremen; 2000.

[37] Germanischer Lloyd: Bauvorschriften & Richtlinien 2004; I-1-1, Abschnitt 20: Schiffskörper, Betriebsfestigkeit, Germanische Lloyd AG, Hamburg, 2004.

[38] Merkblatt DVS/EFB 3430-1; Blindnieten, 2005

[39] Trillmich, R.; Welz: Bolzenschweißen, DVS-Verlag; Düsseldorf; 1997.

[40] Al-Raheb, O.: Beitrag zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften von Schließringbolzenverbindungen durch FEM-Simulationen, Dissertation, Universität Rostock, 2005.

[41] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, Springer Verlag, Berlin, 2002.

[42] Griesch, S.: Untersuchung des Übergangsbereichs von statischer Festigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit von mechanisch gefügten Verbindungen mit Vorlochoperation, Lehrstuhl Fertigungstechnik, Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock, 2005.

[43] Germanischer Lloyd: Bauvorschriften & Richtlinien 2004; I-1-1, Abschnitt 35: Schiffskörper, Korrosionsschutz, Germanische Lloyd AG, Hamburg, 2004.

[44] Germanischer Lloyd: Bauvorschriften & Richtlinien 2004; I-1-1, Abschnitt 34: Schiffskörper, Besondere Anforderungen für Unterwasserbeschichtungen, Germanische Lloyd AG, Hamburg, 2004.

[45] Wegener, D.; Göllner, J.; Burkert, A.; Heyn, A.: Qualitätssicherung und Früherkennung der Korrosionsneigung bei mechanisch gefügten Blechen, EFB-Forschungsbericht Nr. 181, Hannover, 2002.

[46] DIN-Taschenbuch 168, Korrosionsschutz von Stahl durch Beschichtungen und Überzüge 2, 4. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995.

[47] Germanischer Lloyd: Bauvorschriften & Richtlinien 2004; V-1-2, Richtlinien für die Betriebsfestigkeitsanalyse von Schiffskonstruktionen, Germanische Lloyd AG, Hamburg, 2004.

[48] Germanischer Lloyd: Bauvorschriften & Richtlinien 2004; VI-7-4: Prüfanforderungen für Dichtsysteme von Schott- und Decksdurchführungen, Germanische Lloyd AG, Hamburg, 2004.

[49] Germanischer Lloyd: Bauvorschriften & Richtlinien 2004; I-2-1, Abschnitt 26: Schiffskörper, Prüfung auf Dichtigkeit, Germanische Lloyd AG, Hamburg, 2004.

[50] Germanischer Lloyd: Bauvorschriften & Richtlinien 2004; I-1-1, Abschnitt 22: Baulicher Brandschutz auf Seeschiffen, Germanische Lloyd AG, Hamburg, 2004.

[51] Germanischer Lloyd: Bauvorschriften & Richtlinien 2004; I-1-2, Seeschiffe, Maschinenanlagen, Germanische Lloyd AG, Hamburg, 2004.

[52] DIN-Taschenbuch 43, Mechanische Verbindungselemente 2; 9. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.

[53] DIN-Taschenbuch 193, Mechanische Verbindungselemente 5; 4. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005.

[54] Produktinformationen, GEBR. TITGEMEYER Gmbh & Co. KG, Hannover, 2003.

[55] Merkblatt DVS/EFB 3435-1; Schließringbolzensysteme, Stand 2005.

[56] Merkblatt DVS/EFB 3440-1; Funktionselemente, 2005.

[57] Merkblatt DVS/EFB 3440-3; Blindnietmuttern, -gewindebolzen, 2005.

[58] Merkblatt DVS/EFB 3440-4; Loch- und Gewindeformende Schrauben, 2005.

[59] Produktinformationen, Hilti Deutschland GmbH, München, 2005.

[60] Produktinformationen, Avdel Verbindungselemente, Langen, 2003.

[61] Produktinformationen, Huck, Alcoa International Ltd., Telford, Shropshire, 2004.

[62] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-426, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2005.

[63] Projektskizze zum BMBF-Vorhaben: „Neue unkonventionelle Hochleistungstechnologien zum Fügen in schiffbaulichen Vorfertigungs-, Montage- und Ausrüstungsprozessen, MCC Maritime Consulting Center GmbH, Rostock, Wismar, 2005.

Abbildungsverzeichnis

		Seite
Bild 1	Durchschnittliche Kostenverteilung beim Bau von Containerschiffen	3
Bild 2	Übersichtsmatrix der Forschungskomplexe und Arbeitspakete	5
Bild 3	Zeitplan mit Meilensteinen	5
Bild 4	Übersicht der Arbeitspakete in Phase 1 – Orientierungsphase	6
Bild 5	Übersicht der Arbeitspakete in Phase 2 – Entwicklungsphase	7
Bild 6	Übersicht der Arbeitspakete in Phase 3 – Realisierungsphase	8
Bild 7	Schweißtechnische Fügeverfahren in der Ausrüstung	11
Bild 8	Beispiele für die Anwendung schweißtechnischer Fügeverfahren in der Endausrüstung an Oberdeck	12
Bild 9	Beispiele für die Anwendung schweißtechnischer Fügeverfahren in der Endausrüstung im Maschinenraum / unter Deck	12
Bild 10	Beispiele für die Anwendung schweißtechnischer Fügeverfahren in der Sektionsmontage / Endausrüstung vor der Endkonservierung	13
Bild 11	Verfahrensprinzip und Merkmale der Verfahren Blindnieten, Schließringbolzen, Stanznieten und Clinchen	14
Bild 12	Verfahrensprinzip und Merkmale der Verfahren Schubbolzen und loch- / gewindeformende Schrauben	14
Bild 13	Pneumatisches Handsetzgerät für Blindnieten, Bolzensetzgerät für den Stahlbau, Handgerät zum Clinchen/Stanznieten	15
Bild 14	Automatisierter Einsatz von Stanznieten, Clinchen und Blindnieten	15
Bild 15	Schliffbild einer Schließringbolzenverbindung, Blindnietmutter und einer Blindnietbolzenverbindung	16
Bild 16	Schliffbild einer Clinchverbindung mit Verbindungsparametern, Dreiblech-Stanznietverbindung Aluminium-Stahl und Schubbolzen in Stahl	16
Bild 17	Beispiele für loch- und gewindeformende Schrauben	16
Bild 18	Beispiele für Befestigungselemente in Bolzenschubtechnik	17
Bild 19	Kohäsions- und Adhäsionskräfte in einer Klebverbindung	18
Bild 20	Anforderungen bei der Vor- und Nachbehandlung von Klebungen	18
Bild 21	Automatisierter Klebstoffauftrag durch Robotersysteme im Fahrzeugbau und Auftragspistole für manuellen Klebstoffauftrag	19
Bild 22	Verfestigungsmechanismen von Klebstoffen	19
Bild 23	Konstruktive Gestaltungsprinzipien der Verbindung beim Schweißen und Kleben	20
Bild 24	Einordnung von Dicht- und Klebstoffen bezüglich Eignung zur Kraftübertragung und Spaltüberbrückung	21
Bild 25	Scherzugfestigkeit bei thermischer Belastung von verschiedenen Klebstoffen	21
Bild 26	Beanspruchungsverhalten einer Aluminiumklebungen bei 52°C und 100% rel. Luftfeuchtigkeit	22
Bild 27	Belastungstest an geklebten Sitzbefestigungen im Schiffbau	22

		Seite
Bild 28	Flügel eines Segelflugzeugs in Leichtbauweise, Werkstoffmix aus Stahl, Aluminium und Kunststoffen durch Kleben am A380	23
Bild 29	Schienenfahrzeug in Leichtbauweise; BMW 6er Coupe: geklebte-stanzgenietete Stahl-Aluminiumkonstruktion	24
Bild 30	Verbindung von Steg-Steg und Gurt-Gurt-Verbindungen laserstrahlgeschweißter Sandwichpaneelfelder	29
Bild 31	Verbindung von Rohrhalterungen / Kabelhaltern / Rahmenprofilen an lasergeschweißte Sandwichpaneele	30
Bild 32	Verfahrensprinzip Bolzenschweißen	30
Bild 33	Möglichkeiten des mechanischen Fügens von Sandwichpaneelen	31
Bild 34	Geschweißte Rohr- und Kabelhalter sowie Schweißbolzen in der Ausrüstung von lasergeschweißten Sandwichpaneelen	33
Bild 35	Möglichkeiten des Einsatzes mechanischer Fügeverfahren bei der Befestigung von Ausrüstungselementen an Sandwichpaneelen	33
Bild 36	Ermittlung effizienter Anwendungsfälle für mechanische Fügeverfahren in der Ausrüstung	37
Bild 37	Darstellung von Prinzipanwendungen für die Anwendung mechanischer Fügeverfahren in der Ausrüstung	38
Bild 38	Befestigung eines Rohrhalters mittels MSG-Schweißen und Schubbolzen	39
Bild 39	Mechanisches Fügen von Sandwichpaneelen mit Blindnieten	40
Bild 40	Verbinden einer Sandwichpaneel-Eckverbindung mit E-Hand-Schweißung / Kehlnaht und mit hochfesten Blindnieten	41
Bild 41	Verbinden einer Sandwichpaneel-Stumpfnahtverbindung über MAG-Schweißung / Heftung und mit hochfesten Blindnieten	41
Bild 42	Gesetzte M10 Blindnietmutter und Schweißbolzen auf geprimerten Sandwichpaneel	42
Bild 43	Einsatz von hochfesten Blindnieten auf Sandwichpaneel zur Befestigung einer Feuerlöscherhalterung	42
Bild 44	Auswahl relevanter Ausrüstungselemente und Belastungsfälle	45
Bild 45	Typische Ein- und Mehrelementprobengeometrien zur Untersuchung von Tragfähigkeitseigenschaften	45
Bild 46	Scherzugversuche mit Flachproben und Schließringbolzen sowie KS2-Proben mit Schließringbolzen und Blindnieten	46
Bild 47	Kopfzugversuche an blindgenieteten KS2-Proben, Gewindeschubbolzen und Schweißbolzen	46
Bild 48	Zusammenfassung der ermittelten Kopfzugfestigkeiten	47
Bild 49	Scherzugfestigkeit und Versagensarten von Schließringbolzenverbindungen für verschiedene Bauteilmaterialien	48
Bild 50	Vergleich von Scherzugfestigkeiten	48
Bild 51	Vergleich von Kraft-Weg-Verläufen einer Scherzugprobe für FE-Simulation und Experiment	49
Bild 52	Vergleich von ausgewählten Versagensformen für Experiment und FE-Simulation	50

Seite

Bild 53 3D-Modellierung von 6-Elementverbindungen 50

Bild 54 Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit 51

Bild 55 Ergebnisse der Kurzzeit- und Zeitfestigkeitsuntersuchungen an Schließringbolzenverbindungen 51

Bild 56 Ergebnisse der Kurzzeit- und Zeitfestigkeitsuntersuchungen an Schrauben- und Blindnietverbindungen 52

Bild 57 Ergebnisse der Zeitfestigkeit / Dauerfestigkeit von Schrauben-, Blindniet- und Schließringbolzenverbindungen 52

Bild 58 Korrosionsprüfkammer Typ SC/KWT 450 mit mechanisch gefügten Einpunkt-Überlappproben 54

Bild 59 Online-Registrierung von VDA-Wechseltests für mechanisch gefügte Einpunkt-Überlappproben mit SOLL-und IST-Werten 54

Bild 60 Beispiele für Korrosionserscheinungen 55

Bild 61 Scherzugversuche an H-Mehrelementproben 56

Bild 62 Scherzugfestigkeiten von dünnwandigen Ausrüstungsverbindungsproben 58

Bild 63 Auspressversuch mittels Dorns und Kopfzugversuche von Blindnietmuttern 58

Bild 64 Kopfzugfestigkeiten von dünnwandigen Ausrüstungsverbindungsproben 59

Bild 65 Versagensbilder unter Kopfzugbelastung 60

Bild 66 Prüfanordnung für Wasser- und Gasdichtigkeit 61

Bild 67 Prüfstand zur Dichtigkeitsprüfung auf Wasser- und Gasdichtheit 61

Bild 68 Prüfmuster für Dichtigkeitstest an hochfesten Blindnieten, Blindnietbolzen und Schließringbolzen 62

Bild 69 Prüfung verschiedener mechanischer Verbindungselemente auf Gasdichtheit 63

Bild 70 Applikation pastöser Dichtstoffe auf Mehrelementproben mit mehrwöchiger Klemmkraftmessung 64

Bild 71 Erfassung der Temperatur während eines Brandversuchs 65

Bild 72 Auswahl von Ausrüstungselementehalterungen und exemplarische Applikationstests 70

Bild 73 Beispiele von Ausrüstungselementeverbindungen 70

Bild 74 Exemplarische Applikationstests mit Rohrhalterungen und Blindnietmuttern Vergleichsuntersuchungen von Blindbolzen/ -nietmuttern und Schweißbolzen 74

Bild 75 Erprobung verschiedener Möglichkeiten der Sandwichpaneelmontage 75

Bild 76 Beispiele für die Verbindung von dünnwandigen Trag- und Ausrüstungsstrukturen mittels Schließringbolzen und Blindbolzen 75

Tabellenverzeichnis

		Seite
Tabelle 1	Einteilung des Einsatzes von Fügeverfahren in der Ausrüstung	13
Tabelle 2	Wichtige Verfahrensmerkmale ausgewählter mechanischer Fügeverfahren	17
Tabelle 3	Ausbreitung von Schweißfunken	25
Tabelle 4	Kombination von Anwendungsfall und Fügeverfahren für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen	25
Tabelle 5	Prinzipielle Rüst-, Verteil-, Haupt- und Nebenzeiten für unterschiedliche Fügeverfahren	26
Tabelle 6	Kostenvergleich für das Setzen von Schweißbolzen / Blindnietmuttern / Schubbolzen	27
Tabelle 7	Kostenvergleich für das Befestigen eines Ausrüstungselementes mit simultanen Fügevorgang	28
Tabelle 8	Vor- und Nachteile von mechanischen und thermischen Fügeverfahren bei der Montage von Sandwichpaneelen	31
Tabelle 9	Vergleich der verschiedenen Möglichkeiten der Sandwichpaneelmontage	32
Tabelle 10	Vor- und Nachteile von mechanischen und thermischen Fügeverfahren bei der Ausrüstung von Sandwichpaneelen	33
Tabelle 11	Vergleich der verschiedenen Verbindungsmöglichkeiten bei der Sandwichpaneelausrüstung	34
Tabelle 12	Kombination von Anwendungsfall und Fügeverfahren für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	35
Tabelle 13	Rüst-, Verteil, Neben- und Hauptzeiten für verschiedene Fügeverfahren in der Montage von Sandwichpaneelen	36
Tabelle 14	Exemplarischer Kostenvergleich zum Fügen von Sandwichpaneelen durch Schweißen und Blindnieten	36
Tabelle 15	Zusammenstellung der Einsatzfälle von Ausrüstungselementen nach ihrem prognostizierten Gesamtrationalisierungspotential	37
Tabelle 16	Anpassungsbedarf der relevanten mechanischen Fügeverfahren an schiffbauliche Ausrüstungsanwendungen	38
Tabelle 17	Anpassungsbedarf der relevanten mechanischen Fügeverfahren	43
Tabelle 18	Versuchsprogramm für Ausrüstungselementproben	44
Tabelle 19	Versuchsprogramm zur Bestimmung der Kopfzugfestigkeit ausgewählter mechanisch gefügter Verbindungen	46
Tabelle 20	Versuchsprogramm für Mehrelementproben	56
Tabelle 21	Versuchsprogramm für Ausrüstungselementproben	57
Tabelle 22	Versuchsprogramm Kopfzugversuche	59
Tabelle 23	Prüfbedingungen für Prüfung von mechanisch gefügten Proben auf Wasser- und Gasdichtheit	62
Tabelle 24	Ergebnisse zur Wasserdichtheit von verschiedenen mechanischen Verbindungselementen	63

Seite

Tabelle 25 Leckraten bei Gasdichtheit der untersuchten mechanischen Verbindungselemente 64

Tabelle 25 Übersicht der relevanten mechanischen Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Standard-Tragstrukturen aus Stahlwerkstoffen (Teil 1) 67

Tabelle 26 Übersicht der relevanten mechanischen Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Standard-Tragstrukturen aus Stahlwerkstoffen (Teil 2) 68

Tabelle 27 Übersicht der statischen Festigkeiten für relevante mechanische Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Standard-Tragstrukturen aus Stahlwerkstoffen 69

Tabelle 28 Übersicht der relevanten mechanischen Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen aus Stahlwerkstoffen (Teil 1) 71

Tabelle 29 Übersicht der relevanten mechanischen Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen aus Stahlwerkstoffen (Teil 2) 72

Tabelle 30 Übersicht der statischen Festigkeiten für relevante mechanische Fügeverfahren für eine Primärauswahl bei der Verbindungsauslegung von Ausrüstungselementen in Sandwichpaneele und dünnwandige Tragstrukturen 73