

# **Schlussbericht**

**zum Forschungsvorhaben:**

**„Entwicklung hochbelastbarer, anforderungsgerechter  
Verbindungen für Strukturen in Hybridbauweise aus  
Faserverbundkunststoffen und Metall für maritime  
Applikationen“**

**Förderkennzeichen: 03i4326A**

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

Erarbeitet durch: Fraunhofer Anwendungszentrum  
Großstrukturen in der Produktionstechnik  
Joachim- Jungius Str. 9  
18059 Rostock

Dr.-Ing. Rolf Schneidenbach  
Prof. Dr.-Ing. Martin-Christoph Wanner

Laufzeit: 01.08.2004 - 30.06.2006

Rostock, August 2006

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurze Darstellung .....</b>	<b>3</b>
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	10
1.4.1	Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden .....	10
1.4.2	Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	11
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	13
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung .....</b>	<b>13</b>
2.1	Werkstoff- und Verbindungsuntersuchungen des Rumpflaminats an Proben und Bauteilgeometrien in GFK- und Hybridbauweise .....	13
2.1.1	Varianten der Fügeverbindungen im Yachtbau .....	13
2.1.2	Einflussfaktoren auf Verbindungen im maritimen Bereich.....	17
2.1.3	Korrosionsverhalten von Verbindungen.....	18
2.1.4	Analyse von Grundmaterial-, Festigkeitseigenschaften und Verbindungsfestigkeit .....	19
2.1.4.1	Experimentelle Ermittlung der Festigkeitseigenschaften des Bodenlaminates .....	20
2.1.4.2	Ermittlung des Glasfasermasseanteils des Außenhautlaminates nach EN ISO 1172 [30] .	25
2.1.4.3	Festigkeitseigenschaften des Rückgratmaterials (UP) .....	28
2.1.4.4	Festigkeitseigenschaften des Bondinglaminates .....	29
2.1.4.5	Experimentelle Ermittlung der Scherzugfestigkeit von Fügeverbindungen mit unterschiedlichen Klebstoffen .....	30
2.1.5	Belastungen der Struktur .....	35
2.2	Entwicklung und Prüfung von Verbindungsvarianten für Basis- und Bauteilproben in Mischbauweise (Verbindung des Rückgrates an den Rumpf).....	37
2.2.1	Systematisierung und Bewertung relevanter Fügetechnologien ausgehend von den auftretenden Belastungen in den Fugebereichen (für die Stützkonstruktion, für ausrüstungsrelevante Verbindungen) .....	37
2.2.1.1	Typisierung möglicher Fügeverfahren für die Rückgratverbindung.....	38
2.2.1.2	Entwicklung und Prüfung von Basisproben .....	42
2.2.1.3	Auswertung der Prüfergebnisse [33].....	44
2.2.1.4	Auswahl geeigneter Fügeverbindungen .....	48

2.2.2	Spezifizierung der Füge-technologie durch Ermittlung der Kennwerte und Vergleich der Varianten .....	49
2.2.2.1	Zugversuche an Bauteilproben .....	49
2.2.2.2	Vergleich der Bauteilproben .....	57
2.2.3	Betriebswirtschaftliche Untersuchung ausgewählter Fügevarianten .....	58
2.3	Fe – Belastungsanalyse von GFK – Rumpf und Stahl – Rückgrat .....	61
2.3.1	Ermittlung der Spannungen im Längsträger (Beispiel Spannung $\sigma_{zx}$ ) .....	61
2.3.2	Vergleich der experimentell ermittelten Scherfestigkeiten der Verbindungsvarianten als Basisproben mit berechneten Schubspannungen bei durchgängiger Verbindung .....	63
2.3.3	Vergleich der experimentell ermittelten Scherfestigkeiten der Verbindungsvarianten als Basisproben mit berechneten Schubspannungen bei lokaler Anbindung .....	64
2.3.4	Vergleich der Zugfestigkeiten .....	65
2.4	Vergleich der Steifigkeit der Varianten Stahl Rückgrat und GFK- Rückgrat .....	69
2.5	Vergleich der Masse der Modelle mit GFK- und Stahlrückgrat .....	71
2.6	Untersuchungen zur Befestigung von Ausrüstungselementen (Winchen, Poller, Klampen) am Deck .....	72
2.6.1	Darstellung der Ausgangssituation .....	72
2.6.2	Auswertung der Prüfergebnisse .....	76
2.6.3	Wirtschaftliche Untersuchung .....	78
2.7	Untersuchungen zur Deck-Rumpf-Verbindung .....	80
2.7.1	Verbindung Deck-Rumpf .....	80
2.8	Voraussichtlicher Nutzen .....	89
2.9	Paralleler Fortschritt anderer Stellen auf dem Forschungsgebiet .....	90
2.10	Veröffentlichung der Ergebnisse .....	91
<b>3</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>91</b>
	Abbildungsverzeichnis .....	94
	Literaturverzeichnis .....	99

# 1 Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabe bestand darin, bezüglich hochbeanspruchter Applikationen von Faserverbundkunststoffen (FVK) einen Beitrag zu leisten. Das Vorhaben steht im Zusammenhang mit einer zunehmenden Nachfrage nach Produkten aus Faserverbundkunststoffen im maritimen Bereich. Im Segelyachtbau bewegt sich der Markt zu größeren Booten oberhalb 10 m Länge. Die Hersteller können diesen Markt jedoch nur erschließen, wenn ein optimales Preis-Leistungs-Verhältnis erzielt werden kann. Grundlage dafür ist der Einsatz innovativer Serienbautechnologien und materialtechnisch und konstruktiv optimierte Lösungen. Diese Schiffe müssen sich hinsichtlich Leistungsfähigkeit durch sehr gute Segeleigenschaften, optimale Raumausnutzung und Langlebigkeit auszeichnen. Andererseits muss der Serienyachthersteller günstiger produzieren als der Einzelhersteller. Bestehende Fertigungskonzepte auf Basis des reinen Einsatzes von GFK als Material für die tragenden Strukturen von Yachten oberhalb von 10 m Länge behindern diese Entwicklungen insbesondere hinsichtlich der notwendigen Fertigungszeiten.



Abbildung 1: Serienfertigung von Yachten mit Längen zwischen 10 – 15 m, Einlaminieretes Rückgrat aus GFK, Laminieren von Elementen des Rückgrates

Für die betreffenden hochbeanspruchte Applikationen treten bei alternativen Rumpfstrukturen bisher nicht gelöste Problemstellungen auf, die insbesondere die Gestaltung von Verbindungen zwischen Strukturen aus FVK und Stahl bzw. Aluminium, nachfolgend als Hybridstrukturen bezeichnet, betreffen. Dies betrifft vor allem die Zusammenführung von Strukturen von FVK- Materialien und Metallen mit grundlegend unterschiedlichen Materialeigenschaften, z.B. Elastizitätsmodul, spezifischer Wärmeausdehnungskoeffizient. Derzeit wird zur Stabilisierung im unteren Bereich des Rumpfes ein „Rückgrat“ aus GFK einlaminier (Abbildung 1), das in der Fertigung sehr aufwendig ist und dessen Fügung mit dem Rumpf die Durchlaufzeit wesentlich beeinflusst.

Als innovativer technologischer Ansatz zur Entwicklung neuer Segelyachten entstand deshalb im Rahmen eines Forschungsvorhabens die Idee, die Stützkonstruktion für einen Serienyachttyp als Stahlstruktur zu entwickeln, zu testen und einzusetzen. Systematische Untersuchungen zur Anbindung von Metallkonstruktionen an GFK-Rümpfe liegen bisher nicht vor, die von Klassifikationsgesellschaften herausgegebenen Vorschriften für Wassersportfahrzeuge existieren nur für den GFK- Laminat- und Sandwichaufbau. Eine weitere, allerdings untergeordnete Problemstellung, stellt das Fügen schiffbaulicher Ausrüstungselemente dar, die ebenfalls als FVK- Stahl- Verbindungen ausgeführt werden sollen. Die Verwendung von Strukturen im Yachtbau aus unterschiedlichen Materialien muss daher für die im maritimen Einsatz bestehenden komplexen Belastungen aus Seegang, Wellenschlag, unterschiedlichen Windlasten, Temperaturschwankungen und Korrosionsbelastungen durch Kondens- bzw. Seewasser untersucht und in Konstruktion und Fertigung berücksichtigt werden.

## ***1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde***

Das Projekt ordnet sich in die Zielstellung des InnoRegio ein, die Innovationskraft der kunststoff- verarbeitenden Unternehmen in der Region zu erhöhen. Dabei beziehen sich die Zielstellungen im Projekt speziell auf den Bereich:

- Entwicklung innovativer Produkte (Produktorientierte Projekte)

Das Vorhaben dient der Schaffung der Voraussetzungen für die Entwicklung innovativer Produkte im Komplex „Faserverbundwerkstoffe in der maritimen Industrie“. Die Arbeiten im Projekt unterstützen maßgeblich die Entwicklung innovativer, hochwertiger und exportwirksamer Hochseesegelyachten. Bei einem zu erwartenden Erfolg des Projektes können die Ergebnisse bereits kurzfristig wirtschaftlich und beschäftigungspolitisch wirksam werden, indem sie bei der Entwicklung kommender Segelyachten in das Segment der Premiumclass Eingang finden.

Die Problematik wurde als Verbundprojekt bearbeitet. Beteiligt sind mit dem YZG ein regionaler Industriepartner und 2 regionale F&E Dienstleister, der Techno-Trans e.V. und das Fraunhofer Anwendungszentrum Großstrukturen in der Produktionstechnik. Das FAG übernahm die Aufgabe der Koordination.

Die Teilprojekte mit den entsprechenden Antragstellern sind nachfolgend aufgeführt:

- TP1: „Entwicklung von Entwurfsmethoden zur konstruktiven Gestaltung des Übergangsbereiches von FVK-Strukturen (GFK) zu Metallstrukturen (Stahl bzw. Aluminium) für maritime Anwendungen“
  - Antragsteller: TechnoTrans e.V. (TTG)
- TP2: „Entwicklung anforderungsgerechter Fügetechnologien für den Übergangsbereich von FVK-Strukturen (GFK) zu Metallstrukturen (Stahl bzw. Aluminium) für maritime Anwendungen“
  - Antragsteller: Fraunhofer Anwendungszentrum Großstrukturen in der Produktionstechnik e.V. (FhAGP)
  - UA: UniHRO - Labortechnische Arbeiten
- TP3: „Entwicklung eines Gesamtkonzeptes zum Einsatz hochbelastbarer Hybridstrukturen aus FVK (GFK) und Metall (Stahl bzw. Aluminium) für neue Serienyachten oberhalb 10 m Länge“
  - Antragsteller: HANSE Yachts Yachtzentrum Greifswald GmbH & Co. KG (YZG)

Der TechnoTrans e.V. zeichnet für die konstruktive Gestaltung des Übergangsbereiches von GFK-Rumpfstruktur und Metall-Rückgratstruktur verantwortlich.

Das Fraunhofer AGP bearbeitet schwerpunktmäßig die Thematik des mechanischen Fügens und Klebens im Übergangsbereich von GFK-Rumpfstruktur und Metall-Rückgratstruktur und übernimmt die notwendigen Festigkeits- und Funktionsuntersuchungen. Die Versuche betreffen Material-, Verbindungs- und Bauteiluntersuchungen. Die Vorbereitung, Begleitung und Auswertung der Versuche erfolgt im Schwerpunkt durch das Fraunhofer AGP.

Die labortechnischen Arbeiten werden per Unterauftrag durch die Universität Rostock, Lehrstuhl Fertigungstechnik, ausgeführt. Als labortechnische Ausstattung stehen dort u.a. ein 100 kN - Hochfrequenzpulsator (Fa. Roell-Amsler), eine 400 kN-Prüfmaschine (Fa. Zwick) und eine 450 L-Korrosionsprüfkammer (Fa. Weiss) zur Verfügung.

Die HANSE Yachts Yachtzentrum Greifswald GmbH & Co. KG ist für das Gesamtkonzept der zu entwickelnden Hybridstruktur für Serienbauten zuständig. Zudem stellt es die Materialproben, die Verbindungsproben und die Bauteilproben für die durchzuführenden Festigkeits- und Funktionsuntersuchungen bereit.



Abbildung 3: Zeitplan mit Meilensteinen

Die Arbeiten für den Bereich Fügen werden im Folgenden näher beschrieben. Die Analysephase beinhaltet zwei wesentliche Blöcke:

- Die Analyse der Verbindungsmöglichkeiten der unterschiedlichen Werkstoffe wie Gfk und Metall.
- Analyse der Eingesetzten Materialien, insbesondere die Vom Yachthersteller eingesetzten Gfk- Materialien für Rumpf-, Rückgrat- und Bondinglaminat zum Verbinden beider Strukturen.

Phase 1 – Orientierungsphase		
AP	Aufgabe	Ergebnisse
120	Fügen	
121	Fügeverbindungen im Yachtbau mit Einsparpotentialen für die Serienfertigung	Beschreibung der relevanten FVK und FVK-Metall- Verbindungen im Yachtbau und Bewertung bzgl. Des Einsatzes alternativer Fügetechnologien
122	-Materialproben des Laminats an unterschiedlichen Punkten des Rumpfes -Verbindungsproben der bisherigen Übergangsbereiche Verstärkungsstruktur GFK/ Rumpf -Verbindungsproben aus Bereichen des Oberdecks, auf denen hochbelastete Ausrüstungsgegenstände befestigt werden -Anfertigung Proben	-Nachweis der Werkstoffkenndaten des bestehenden FVK - übertragbare Belastungen der Übergangsbereiche Verstärkungsstruktur GFK/Rumpf und der Fügeelemente in Bereichen mechanisch und funktional belasteter Ausrüstungen -Probekörper

Abbildung 4: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 1 - Orientierungsphase

Die Entwicklungsphase beinhaltet die Darstellung von Gestaltungsgrundsätzen für die Fügeverfahren

- Laminieren von Metall-Rückgratstruktur mit der GFK-Rumpfstruktur
- Kleben von Metall-Rückgratstruktur mit der GFK-Rumpfstruktur

- Mechanische Fügen (Blindnieten, Schrauben, Schließringbolzen) + Kombination aus mechanischem Fügen und Kleben von Metall-Rückgratstruktur mit der GFK-Rumpfstruktur

Weiterhin wurden die verwendeten Materialien bezüglich Ihren spezifischen mechanischen und maritimen Belastungen untersucht.

Ein dritter Arbeitspunkt beinhaltet die Systematisierung erarbeiteter Fügetechnologien als Basis zur Entscheidungsfindung für deren Einsatz.

Phase 2 – Entwicklungsphase: Konzeption		
AP	Aufgabe	Ergebnisse
220	<b>Fügen</b>	
221	Bewertung möglicher konstruktiver Gestaltungskonzepte des Übergangsbereiches von FVK-Strukturen (GFK) zu Metallstrukturen (Stahl bzw. Aluminium) ausgehend von beanspruchungsgerechten Fügeverbindungen	Gestaltungsgrundsätze für mechanische Fügeverbindungen und Klebeverbindungen
222	-Definition des Einflusses der spezifischen mechanischen und maritimen Umgebungsbedingungen auf das Fügen der Werkstoffkombinationen FVK-Stahl, FVK-Alu, FVK-FVK  -Anfertigung Proben	-Definition des Einflusses der spezifischen maritimen Umgebungsbedingungen auf die Vorauswahl der Fügetechnologie  -Probekörper
223	Systematisierung und Bewertung relevanter Fügetechnologien ausgehend von den auftretenden Belastungen in den Fügebereichen (für die Stützkonstruktion, für ausrüstungsrelevante Verbindungen)  -Anfertigung Proben	Entscheidung für den Einsatz einer/ mehrerer Fügetechnologien  -Probekörper

Abbildung 5: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 2 – Entwicklungsphase: Konzeption

Die Realisierungsphase beinhaltet die Durchführung von Basis- und Bauteilversuchen, wobei die Probenform nach GL-Vorschrift (in Anlehnung) entwickelt und realisiert wurde. Die festgelegten Fügeverfahren werden den konstruktiven und geometrischen Bedingungen der Realität angepasst. Ziel ist, am Ende der Realisierungsphase eine Gesamtkonstruktion für ein Metallrückgrat zu verabschieden.

Phase 2 – Entwicklungsphase: Realisierung		
AP	Aufgabe	Ergebnisse
<b>320</b>	<b>Fügen</b>	
321	Spezifizierung der Versuche lt. Standards (Klassifikation)	Abgestimmte Versuche zur Gewährleistung der Anforderungen der Klassifikationsgesellschaften und zur Vermeidung von Bauteilschäden
322	Nachweis der ausgewählten Fügeverfahren und Bestimmung der Fügeparameter in Standardtests bzgl. Festigkeit, Dichtigkeit, Korrosionsbeständigkeit  -für die Rumpf-Rückgrat-Konstruktion  -für ausrüstungsrelevante Verbindungen  -Anfertigung Probekörper	Spezifizierung der Füge-technologie durch Ermittlung der Kennwerte und Vergleich der realen Beanspruchungen mit den realisierbaren Werten  (Tests - Verbindungsproben)  -Probekörper

Abbildung 6: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 2 – Entwicklungsphase: Realisierung

Ziel der Testphase ist die Einschätzung der Gesamtkonstruktion nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten und die Prüfung von technischen Details auch hinsichtlich einer Optimierung.

Phase 2 – Testphase		
AP	Aufgabe	Ergebnisse
<b>420</b>	<b>Fügen</b>	
421	Zusammenführung der Ergebnisse der spezifizierten Füge-technologie mit dem konstruktiv gestalteten Übergangsbereich von FVK-Strukturen (GFK) zu Metallstrukturen (Stahl bzw. Aluminium) zu einer Gesamtlösung  -Probekörper anfertigen	Definition einer anforderungsgerechten Verbindung für Strukturen mit dem konstruktiv gestalteten Übergangsbereich von FVK-Strukturen (GFK) zu Metallstrukturen (Stahl bzw. Aluminium) zu einer anforderungsgerechten Verbindung für Strukturen in Hybridbauweise (Tests- Bauteilproben)  -Probekörper
422	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Füge-technologien	Randbedingungen für einen wirtschaftlichen Einsatz der spezifizierten Füge-technologien/ der Materialien
423	Beschreibung der Übertragbarkeit der nachgewiesenen Füge-technologie auf hochbeanspruchte Übergangsbereiche von FVK- und Metallstrukturen im Großschiffbau	Einsatzmöglichkeiten im Großschiffbau, Randbedingungen

Abbildung 7: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 3 - Testphase

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 Bearbeitung des Projektes erfolgte weitestgehend entsprechend der geplanten Vorgehensweise. Als Grundlage für die Analyse diente die auf der Yachtwerft Greifswald produzierte und vom Konstruktionsbüro Judel/Vrolijk & Co. Engineering GmbH entwickelte Hanse Yacht H461.

Bei den technischen Analysen und Erprobungen wurden i.d.R. eigene Fertigungs- und Laboreinrichtungen genutzt.

## ***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**

Im Yacht- und Bootsbau ist es üblich, das Rückgrat aus dem gleichen Material aus dem der Rumpf besteht, herzustellen und einzubauen. Das Vorhaben basiert auf der auf der Yachtwerft Greifswald produzierten Hanse Yacht H461. Insbesondere in der Analysephase wurden Unterlagen des Konstruktionsbüros Judel / Vrolijk & Co. Engineering GmbH verwendet. Der Einsatz eines Metallrückgrates in einem GFK-Rumpf ist nicht bekannt.

Im heutigen Serienyachtbau in GFK-Bauweise wird der Boden des Rumpfes durch Quer- und Längsverbände, das so genannte Rückgrat, ausgesteift. Das Rückgrat wird dabei schon im Vorfeld in einer Form gefertigt und später als Baugruppe in die fertige Rumpfschale einlaminieren. Es kommt dabei ein sog. Kantenlaminat aus kunstharzgetränktem Glasfasergewebe zum Einsatz, welches die Verbindung zwischen Rumpfschale und Rückgrat, sicherstellt.



*Abbildung 8: Einlaminiertes Rückgrat in den GFK - Rumpf*

Diese Verbindung wird so dimensioniert, dass die einwirkenden Kräfte aus Mast, Rumpfschale und Kiel sicher übertragen werden können. Abbildung 8 zeigt ein einlaminiertes Rückgrat in den Rumpf. Für Yachten von 6 – 24 m müssen für den Einbau des Rückgrates in den Rumpf die Bestimmungen des Germanischen Lloyd [1] zugrunde gelegt werden. Die Verbindung des Rückgrates mit dem Rumpf wird unter Punkt 2.1.1 Varianten der Fügeverbindungen im Yachtbau eingehender betrachtet.

Innerhalb des Vorhabens wurden Laboruntersuchungen durchgeführt. Das Ermitteln und Bewerten von Lösungen erfolgte ausgehend von den Analysen und vom Stand der Technik. 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 Füge-technik“ existieren. Die Laboruntersuchungen erfolgten nach den derzeit gültigen Prüfvorschriften.

#### **1.4.2 Angaben 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 Füge-Techniken

- Laminieren (z.B. [2]),
- Kleben (z.B. [3] und
- Mech.Fügen (z.B. Schrauben) (z.B. [4]).

Diese Füge-Techniken stehen im Focus der Untersuchungen, wenn es darum geht, ein Metallrückgrat in den GFK-Rumpf zu integrieren. Die Problematik des Yachtbaus, speziell auch von Yachten mit Kunststoff-Rumpf wird in [5] bis [9] bezüglich Konstruktion, Bau und Berechnung dargestellt, wobei in [5] und [10] auch auf die Reparatur von GFK-Strukturen eingegangen wird. Die gegenwärtig bevorzugte Technologie zum Verbinden von Gfk-Bauteilen ist das Laminieren. Dem Laminieren, speziell im Boots- und Yachtbau liegen Bestimmungen des Germanischen Lloyd zugrunde. In [1] sind für die Bemessung von Schiffkörper von 6 bis 24m Länge Vorschriften für die Bemessung der Lamine der Bauteile z.B. Außenhautlaminat, Steifenprofile und für das Verbindungslaminat zum Anlaminieren z.B. Profil an Außenhaut, Schott an Außenhaut. Der Einbau des GFK-Rückrates wird wie das Verbinden eines Hutprofils dimensioniert. Beim Anlaminieren eines Metallrückgrates wird auf diese Vorschrift zurückgegriffen. Anforderungen an die Werkstoffe, sowie Abnahme und Prüfung der FVK sind in [11] geregelt.

Grundlagen, Technologie und Anwendung des Fügeverfahrens Kleben werden beispielsweise in [3],[12],[13] aufgezeigt. Grundlagen der Gestaltung von Klebverbindungen sowie Beispiele für ungünstige oder klebgerechte Gestaltung werden auch in [14] dargestellt. In [15,3,16] wird besonders auf die Vorbereitung der Fügeteile, speziell auf die Oberflächenbehandlung insbesondere für Zinküberzüge eingegangen. Grundlegende Aussagen zum Feuerverzinken werden in [17] behandelt.

Bezüglich des Klebens im Schiffbau schreibt der GL in [11] vor, dass nur GL- zugelassene Klebstoffe verwendet werden dürfen. Dabei sind die vom Hersteller vorgegebenen Einsatzgrenzen, sowie die Verarbeitungshinweise einzuhalten. Zur Dimensionierung von Klebverbindungen werden keine Angaben gemacht. Zur Gestaltung wird darauf verwiesen, dass eine klebgerechte Konstruktion, bei der Schälmomente und –Kräfte möglichst vermieden werden sollen.

Bei den Untersuchungen zum Kleben von FVK und Metall im Schiffbau kann nur eingeschränkt auf bereits durchgeführte Arbeiten u.a. Arbeiten der Peene-Werft zur „Erweiterung des Einsatzbereiches der Klebtechnik im Schiffbau“ (Machbarkeitsstudie) [18] und der Ergebnisse eines FuE-Vorhabens der Lürssen Werft „Schnelle Einrumpffähren“ [19] aufgebaut werden.

Die Untersuchungen der Peene-Werft beschränken sich auf den Werkstoff Stahl. Es werden Einsatzmöglichkeiten analysiert, Anforderungen an die konstruktive Gestaltung beschrieben und auf beeinflussende Faktoren auf das Kleben im Schiffbau[18],[20] eingegangen.

Im Yachtbereich werden vorzugsweise metrische Schrauben aus nichtrostendem Stahl eingesetzt, die Industrie hält dafür ein vielfältiges Sortiment mit unterschiedlichen Dimensionen und Kopfformen (z. B. [21],[22]) vor. Als Alternative für metrische Schrauben bieten sich gewindeformende Schrauben an. Diese sind sowohl für Leichtmetalle, wie z.B. Aluminium aber auch für Thermo- und Duroplaste und GFK verfügbar[23],[24].

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Neben den Projektpartnern Yachtzentrum Greifswald und Techno-Trans 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 Füge Technologien tätig sind.

## **2 Eingehende Darstellung**

### **2.1 Werkstoff- und Verbindungsuntersuchungen des Rumpflaminats an Proben und Bauteilgeometrien in GFK- und Hybridbauweise**

#### **2.1.1 Varianten der Fügeverbindungen im Yachtbau**

Die im GFK- Bootsbau übliche Verbindungstechnik zwischen Rumpf und Einbauten besteht im Anlaminieren. Dies gilt sowohl für Eckverbindungen, als auch für Stoßverbindungen. Unter Eckverbindungen versteht man z.B. das Anlaminieren von Versteifungsprofilen (Hutprofile, I-Profile oder Schotten durch sog. Bondinglaminat). Stoßverbindungen entstehen z.B. beim Zusammenfügen von zwei Rumpfhälften zu einer Rumpfschale durch sog. Kiellaminat.

Beim Einbau des Rückgrates entstehen Eckverbindungen. Um ein fehlerfreies Anlaminieren bzw. Überlaminieren des Stoßes realisieren zu können, muß der Stoß mit Klebstoff (Spachtel) aufgefüllt und die Kehle ausgeformt werden. Damit ergibt sich eine feste Unterlage für die 1. Lage des Bondinglaminates. Der Radius der Ausformung muß der Steifigkeit des Bondinglaminates angepasst sein, damit sich keine Luftblasen durch Ablösen (Rückfedern) des Laminates, welches im Handauflegeverfahren anlaminiert wird, bilden können. Zum Laminieren von Eckverbindungen wird im YZG Bondinglaminat mit einer Faserbindung von  $\pm 45^\circ$  verwendet, wodurch sich ein gutes Anschmiegen der Fasern an den Radius realisieren lässt. Die sorgfältige Ausführung der Kehle ist von größter Wichtigkeit, da das Bondinglaminat die tragende Funktion der Verbindung übernimmt. Es muss auf die zu übertragenden Belastungen und die zu verbindenden Werkstoffe hin konstruiert werden. Dazu erfordern die Vorgaben des Germanischen Lloyd [1] eine Bemessung des Bondinglaminates für das Anlaminieren der Einbauten nach einzusetzendem Glasgewicht und Dicke des Laminates. Bezüglich der Ausführung wird für das Anlaminieren von Aussteifungen wie z.B. Hutprofilen, eine Verlängerung der Überlappung ausgehend von 25 mm, um 12 mm pro 600 g/mm<sup>2</sup> Fasergewicht gefordert. Dabei ist eine Mindestüberlappungsbreite von 50 mm zu erzeugen (vgl. [1]).

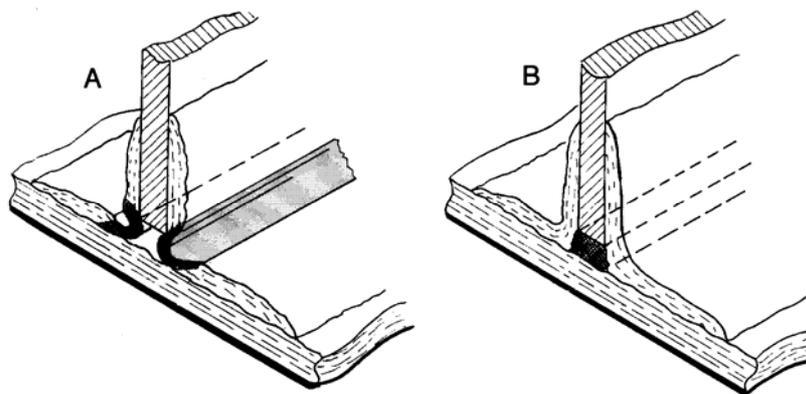


Abbildung 9: Auffüllen von Hohlräumen [5]

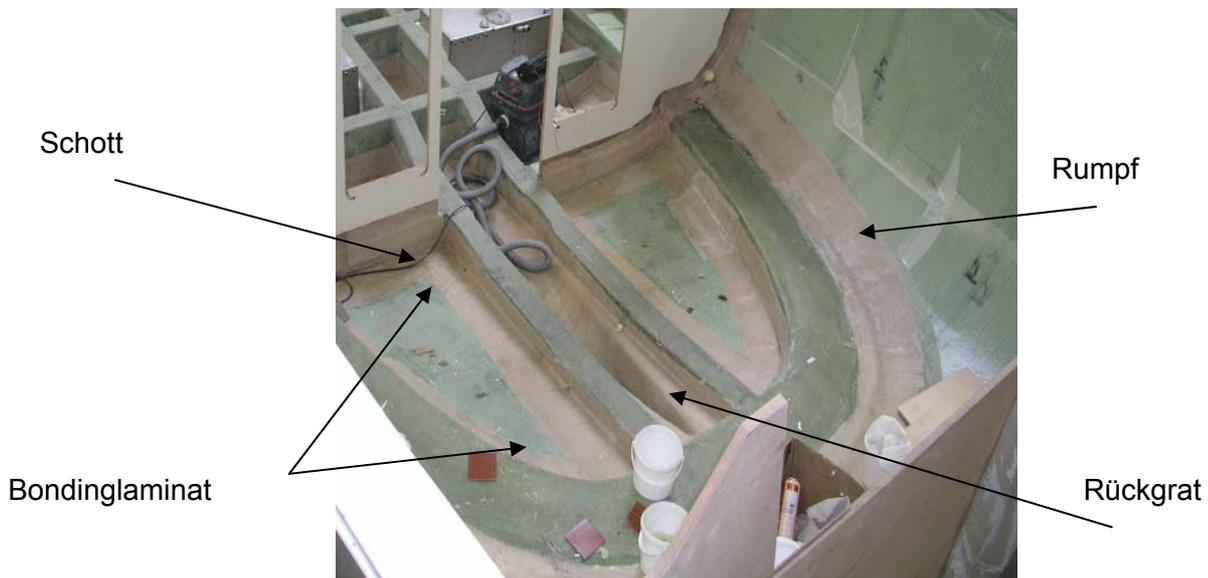
Die Verbindungsmethode des Anlaminierens wird für die Bauteile Rückgrat (GFK -GFK), Schotte (GFK-wasserfestes Sperrholz) und das Hängeknie (GFK-Wasserfestes Sperrholz) für die Aufnahme des Püttings angewendet.

Die beim Einbau des Gfk- Rückgrates in den Gfk- Rumpf vorherrschende Fügeverbindung ist das Kleben und das Laminieren, wobei das Kleben dem Fixieren des Rückgrates und der Vorbereitung der Fuge (Abbildung 10) dient. Deshalb wird teilweise schon beim Einkleben

überstehender Klebstoff entfernt. Nach dem Entfernen einer Andrückvorrichtung nach Aushärten des Klebstoffes werden die Fugen ausgeformt bzw. Spalte aufgefüllt.



*Abbildung 10: Herausquellender Klebstoff an der Verbindung Ruchgrat-Rumpf unter der Andrückvorrichtung nach [25]*



*Abbildung 11: mit Kantenlaminat befestigtes GFK-Rückgrat [25]*

Die im YZG hergestellten Bootsrümpfe und Verbindungen werden unter Anwendung von glasfaserverstärktem Epoxidharz gefertigt. Das verwendete kalthärtende Epoxid - Laminierharzsystem ST Ampreg 22 der Firma CTM ist speziell auf die Anforderungen im Yachtbau ausgelegt. Es ermöglicht eine maximale Verarbeitungsdauer von bis zu 9 Stunden die eine unterbrechungsfreie Herstellung besonders großer Strukturen, wie Yachtrümpfen,

möglich macht. Das Rückgrat wird im Handauflegeverfahren aus glasfaserverstärktem Polyesterharz in einer Negativform hergestellt. Als Bondinglaminat wird Rovingelege mit einer Faserausrichtung von  $\pm 45^\circ$  auf Epoxydharzbasis eingesetzt. Das Rückgrat wird entsprechend seiner Belastung in mehrere Bereiche dimensioniert, wobei Steg und Gurt unterschiedlich dimensioniert werden.

Abbildung 12 zeigt den Laminataufbau.



Abbildung 12: Aufbau des Rückgratlaminateaufbaus

**Beschläge und Ausrüstungsgegenstände** werden im Boots- und Yachtbau traditionell mit Hilfe von korrosionsbeständigen Schrauben aus Edelstahl befestigt. Üblicherweise handelt es sich um genormte Schrauben die mit Muttern und Sicherungsscheiben gegen ein Lösen gesichert werden. Das setzt allerdings eine zweiseitige Zugänglichkeit der Verbindung voraus. Alternativ wird die Funktion der Mutter durch in die Struktur integrierte Metallplatten übernommen. Schwierigkeiten ergeben sich bei der Verwendung von Schrauben auf GFK-Strukturen. Zur Übertragung punktueller Belastungen ist GFK nur eingeschränkt geeignet. Aus diesem Grund sollte die Belastung auf eine möglichst große Fläche verteilt werden. Besonders belastete Beschläge sollten zusätzlich mit tragenden Bootsteilen verbunden werden [5]. Die Position wichtiger Verbindungspunkte muss schon bei der Konstruktion festgelegt und dieser Bereich durch dickere Laminat-, Holz- oder Metalleinlagen verstärkt werden [5] (Abbildung 13).

A) Holzunterlage B) Metallplatte  
C) Verstärkungslaminat D) große Unterlegscheiben

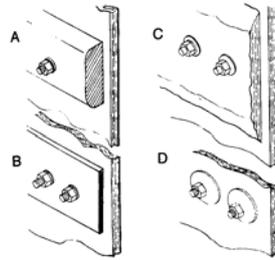


Abbildung 13: bessere Kräfteverteilung durch verschiedene Unterlagen [5] S.121]

Im Yachtzentrum Greifswald werden die Schraubverbindungen für die Ausrüstungsgegenstände oder die Decksbefestigung mit handelsüblichen metrischen Edelstahlschrauben realisiert. Die Schrauben für die Ausrüstungsgegenstände werden in eine einlamierte Aluminiumplatte geschraubt. Das dafür notwendige Gewinde wird im Vorfeld in die Metallplatte geschnitten. Es wird somit eine zweiseitige Montage verhindert, was einen Austausch oder eine Reparatur wesentlich erleichtert. Diese Verbindung sowie Alternativmethoden wie z.B. gewindeformende Schrauben für Leichtmetall oder Duroplast werden im Abschnitt 2.6 näher untersucht. Bei der Verschraubung von Rumpfschale und Deck werden metrische Schrauben entweder als Durchgangsschrauben mit Gewindeplättchen oder in gewindegesschnittenes Aluminium geschraubt. Alternativmethoden werden in Abschnitt 2.7 geprüft.

### 2.1.2 Einflußfaktoren auf Verbindungen im maritimen Bereich

Werkstoffe, die im maritimen Bereich eingesetzt werden, sind anders als Werkstoffe an Land einer Vielzahl von zusätzlichen Einflüssen ausgesetzt. Den Umgebungsbedingungen entsprechend müssen die verwendeten Werkstoffe gegen Medien wie z.B. Salzwasser, Öle, Fette, Kraftstoffe oder Lösungsmittel beständig sein. Das gilt für Metalle als auch für Faserverbundkunststoffe.

Kunststoffe, also auch GFK, sind grundsätzlich unempfindlich gegenüber Korrosion. Sollten jedoch Medien wie Salzwasser in das Laminat eindringen, kann es zu einer Schwächung des Verbunds kommen. Fehlerhafte Bereiche machen sich durch ein Aufquellen oder durch Ablösen einzelner Lagen des Laminats bemerkbar (Osmose). Diese Schädigungen sind durch sorgfältige Fertigung, sowie eine durchdachte Konstruktion der Bauteile auf ein

Minimum reduzierbar. Die Möglichkeit einer Schädigung kann jedoch aufgrund der begrenzten Wasserdurchlässigkeit aller Kunststoffe nicht verhindert werden.

Einen weiteren großen Einfluss auf die Haltbarkeit von Verbindungen haben die thermischen Bedingungen. Polyester – und Epoxidharze sind duroplastische Kunststoffe, welche nach dem Aushärten nicht mehr flüssig gemacht werden können. Obwohl sie nicht schmelzen können, nehmen sie wesentlich früher als z.B. Metalle Schaden bei Erwärmung. Zudem sind sie brennbar.

Die Formbeständigkeit heute verwendeter Harze ist im Allgemeinen bis ca. 60-70°C problemlos [5]. Durch die schlechte Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Kunststoffe kommt es auch z.B. in tropischen Gefilden kaum zu Problemen. Im Gegensatz dazu heizen sich z.B. Metalldecks bei starker Sonneneinstrahlung sehr stark auf. Metallbeschläge auf einem Kunststoffdeck können den umgebenden Kunststoff stark erhitzen und zu einer Schwächung des Bereiches führen. Ständig erhitze Bereiche wie z.B. Maschinenraum oder Heizungsräume sollten nicht unmittelbar von Kunststoffen umgeben sein, da die Dauerbelastung mit Wärme zu Delaminationen und Formverlust in Faserverbänden führen kann [5]. Die Klebfestigkeit der Kunststoffe nimmt dabei stark ab. Bei tiefen Temperaturen ist zunächst nur ein geringfügiger, oftmals kaum messbarer Anstieg der Festigkeit zu erkennen. Bei einer Hybridbauweise sind die verschiedenen Längenausdehnungskoeffizienten von Metallen und Kunststoffen zu berücksichtigen und deren Auswirkungen durch geeignete Maßnahmen wie z.B. elastische Anbindungen zu berücksichtigen.

### **2.1.3 Korrosionsverhalten von Verbindungen**

Abhängig von dem verwendeten Fügeverfahren ist unterschiedliches Korrosionsverhalten der Fügepartner zu beobachten. Dabei spielt vor allem Korrosion in Flüssigkeiten wie z.B. Salzwasser eine wichtige Rolle.

Das Vorhandensein von metallischen Werkstoffen in einem maritimen Klima kann vor allem bei unedlen Metallen wie Stahl zu großen Problemen führen. Die Befestigung des in dieser Arbeit untersuchten verzinkten Stahlrückgrates mit mechanischen Fügeelementen wie Schrauben oder Nieten, kann zu Korrosionsproblemen an den Kontaktstellen zwischen Befestigungsmaterial und verzinktem Stahl führen. An diesen Punkten kann es zu sog. Kontaktkorrosion kommen, welche immer dann auftritt, wenn metallische Werkstoffe mit unterschiedlichen elektrochemischen Potentialen bei Anwesenheit eines Elektrolyten wie z.B. Wasser, in leitender Verbindung stehen [26]. Bei Erfüllung dieser Voraussetzungen wird der unedlere Werkstoff schneller und der edlere Werkstoff langsamer korrodieren. Der unedlere Werkstoff wird umso intensiver angegriffen, je unterschiedlicher die

Korrosionspotentiale, je kleiner die Fläche des unedlen Werkstoffs im Vergleich zum edleren, je höher die Temperatur, die Elektrolytfähigkeit und je geringer der Ohmsche Widerstand bei der jeweils vorliegenden Werkstoffkombination sind [26]. Die im Yachtbau übliche Verwendung von Befestigungsmaterial aus rostfreiem Stahl führt bei einer Verarbeitung mit verzinktem Stahl jedoch aufgrund der großen Fläche des verzinkten Stahlrückgrates im Vergleich zur geringen Fläche der Schrauben zu keiner bzw. zu einer vernachlässigbaren Kontaktkorrosion an den Fügstellen. Wäre das Rückgrat aus Edelstahl und die Befestigungselemente verzinkt, würden sich diese aufgrund der kleinen Fläche und der großen Potentialunterschiede in kurzer Zeit aufgelöst haben.

Die Verwendung von metallischem Befestigungsmaterial in faserverstärkten Kunststoffen ist unter dem Gesichtspunkt der Korrosion problemlos.

Bei der Befestigung von Ausrüstungsgegenständen kann es ebenfalls zu Kontaktkorrosion aufgrund von verschiedenen Werkstoffen kommen. Die vom YZG in diesen Bereichen verwendete Materialkombination Edelstahl-Aluminium, ist grundsätzlich durch mögliche Kontaktkorrosion gefährdet. Das Eindringen von Wasser wird durch das Einsetzen der Schrauben mit Spachtel- bzw. Dichtmasse verhindert. Die Edelstahlschraube, welche derzeit in eine Halteplatte aus Aluminium geschraubt wird, kommt dadurch nicht in Kontakt mit Wasser, was zu Korrosion zwischen beiden Metallen hätte führen können. Die Abdichtung der Verbindungsstellen nach außen als auch innen, verhindert auch das Eindringen von Schwitzwasser oder durch das Laminat absorbierte Feuchtigkeit.

#### **2.1.4 Analyse von Grundmaterial-, Festigkeitseigenschaften und Verbindungsfestigkeit**

In Zusammenarbeit mit dem Yachthersteller wurde in einer Analysephase untersucht, welche Werkstoffkennwerte für Grundmaterialien und Verbindungen existieren und welche Werte für Basis- und Bauteilproben ermittelt werden müssen (Abbildung 14). Dazu wurden neben den relevanten Werkstoffkennwerten die relevanten FVK- und FVK- Metall-Verbindungen ermittelt.

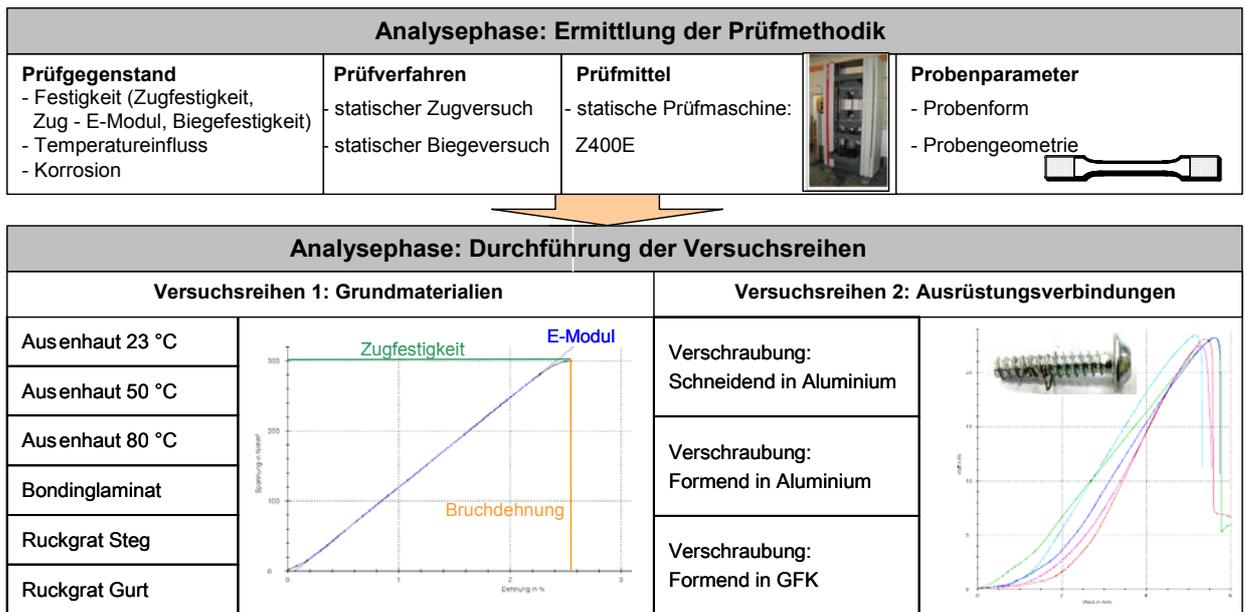


Abbildung 14: Vorgehensweise bei der experimentellen Analyse der Grundmaterialeigenschaften

### 2.1.4.1 Experimentelle Ermittlung der Festigkeitseigenschaften des Bodenlaminates

Zur experimentellen Prüfung des Bodenlaminates für den praktizierten Laminataufbau wurde

- Die Zugfestigkeit
- Der Zug-E-Modul
- Die Biegefestigkeit

ausgewählt. Als Vergleichswerte wurden die Nach GL-Vorschrift [11] berechneten und zur Dimensionierung verwendeten Werkstoffkennwerte des Bodenlaminates Abbildung 15 verwendet.

Eingabe :		
Glasgewichtsanteil der Verstaerkungslage	psi	0.530
Ist die Biegefestigkeit (Bruch) und der Glas-		nein
gewichtsanteil der Laminatplatte durch Pruefungen		
gemaess C.5 bis C.7 bestimmt worden :		
Verwendung von Spritzlaminaten :		nein
Dichte der Faser	RhoF	2.600 [Mg/m**3]
Dichte des Harzes	RhoH	1.200 [Mg/m**3]
Bei 0, RULES-Wert wird gesetzt		
Ergebnisse :		
Zugfestigkeit	Rm	212 [N/mm**2]
E-Modul (Zug)	Ez	14860 [N/mm**2]
Biegefestigkeit (Bruch)	SIGbB	248 [N/mm**2]
Druckfestigkeit (Bruch)	SIGdB	152 [N/mm**2]
Scherfestigkeit (Bruch)	TB	80 [N/mm**2]
Schubmodul	G	3141 [N/mm**2]
Interlaminare Scherfestigkeit	TAUiB	13 [N/mm**2]

Abbildung 15: Werkstoffkennwerte des Bodenlaminates

Bezeichnung Matte	Ausrichtung Fasern
Combi 700	0°/90°
QE 1203	0°/90° +/-45°
Combi 1350	0°/90°
QE 1203	0°/90° +/-45°
Combi 700	0°/90°

Abbildung 16: Laminataufbau des Bodenlaminates

Die Zugfestigkeit und der Zug- E-Modul für das EPOXY- Rumpfmateriale wurde im Zugversuch ermittelt. Dazu wurden die Proben in Anlehnung an [27] entsprechend des geltenden Laminatplanes (Abbildung 16) gefertigt. Der Zugversuch erfolgt mit der Zugmaschine Zwick Z400E unter Raumtemperatur.

Da der Bootskörper sich u. U. bis auf 80°C (besonders bei dunkel lackierten Yachten) aufheizen kann, wurde die Abhängigkeit der Zugfestigkeit und des Zug- E- Moduls von der Temperatur ermittelt. Dazu wurden die Proben unbelastet bis auf Prüftemperatur erwärmt und zügig bis zum Bruch belastet. Dabei wurden 2 Serien aufgenommen, wobei die Probekörper der 2. Serie von einem anderen Team angefertigt wurden. Die untenstehende

Tabelle (Abbildung 17) zeigt die Ergebnisse für die Zugfestigkeit und den Zug-E-Modul als Mittelwert von 6 Zugproben in Abhängigkeit der Probentemperatur.

T	Kennwerte	Zugfestigkeit		E-Modul	
		Charge 1	Charge 2	Charge 1	Charge 2
23°C	Mittelwert	<b>315</b>	<b>286</b>	<b>13889</b>	<b>12622</b>
	Standardabw.	14	6	772	475
	Variationsk.	4,4	2,1	5,5	3,8
50°C	Mittelwert	<b>308</b>	<b>277</b>	<b>12478</b>	<b>11695</b>
	Standardabw.	15	17	452	1010
	Variationsk.	4,8	6,2	3,6	8,6
80°C	Mittelwert	<b>246</b>	<b>205</b>	<b>11862</b>	<b>11195</b>
	Standardabw.	14	21	378	821
	Variationsk.	5,5	10,0	3,2	7,3

Abbildung 17 zeigt die Zugfestigkeiten und die E-Moduli der beiden Chargen in Abhängigkeit der Prüftemperatur.

Aufgeführt sind die Ergebnisse der zwei Serien als Charge 1 und Charge 2. Für den Vergleich wurden die Werte der Charge 2 (geringere Werte erzielt gegenüber Charge 1) herangezogen. Damit ist die gemessene Zugfestigkeit bei Raumtemperatur ca. 30% höher und der Zug -E- Modul ca. 15% geringer. Zur Einordnung der Genauigkeit der Messergebnisse kann ein relativ geringer Variationskoeffizient festgestellt werden. Zur Einordnung der Genauigkeit der Mittelwerte muß festgehalten werden, dass mit Bauteilproben (Dicke ca.14mm) gearbeitet wurde und damit die Norm (Vorgabe ist eine Probendicke von 2-10mm) nur bedingt anwendbar ist.

Im Vergleich der beiden Chargen kann festgestellt werden, dass die ermittelten Zugfestigkeiten um ca.12% und die E-Moduli um ca. 7% differieren.

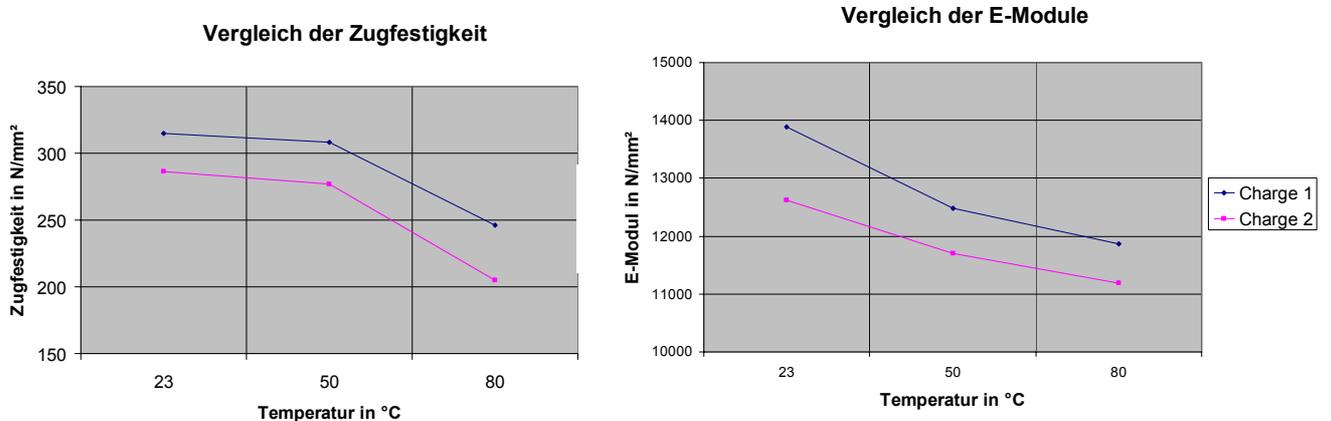


Abbildung 18: Zugfestigkeit und E-Modul des Bodenlaminates für den Einsatzbereich von 23°C bis 80°C

Festzustellen ist ein Festigkeitsverlust von ca. 20% für charge 1 und ca. 28 % für charge 2 und bewegt sich damit nach [28] (Abbildung 19) im für einen GFK-Werkstoff üblichen Rahmen. Der E-Modul verringert sich um ca. 15 %. Für die Temperaturabhängigkeit der Parameter ist für beide Chargen die gleiche Tendenz festzustellen.

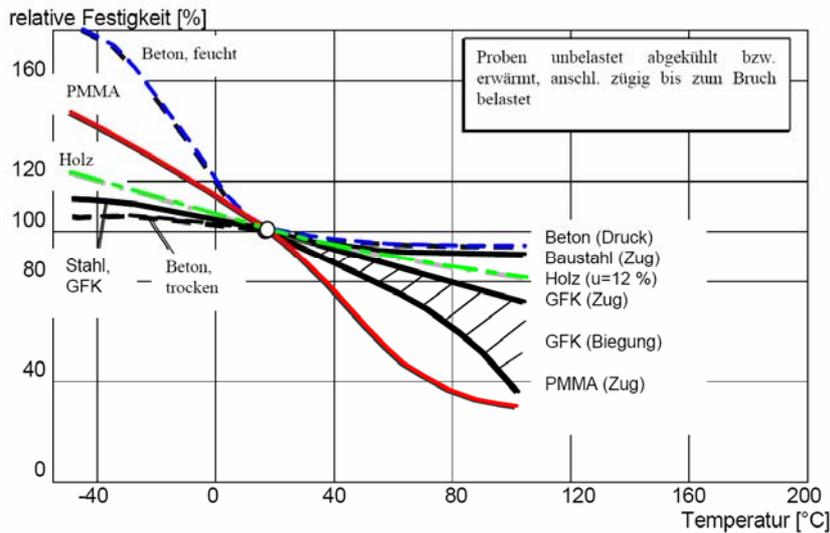


Abbildung 19: Einfluss der Prüftemperatur auf die Festigkeit [8]

Die **Biegefestigkeit** des Bodenlaminates wurde im Drei- Punkt- Biegeverfahren nach [29] ermittelt.

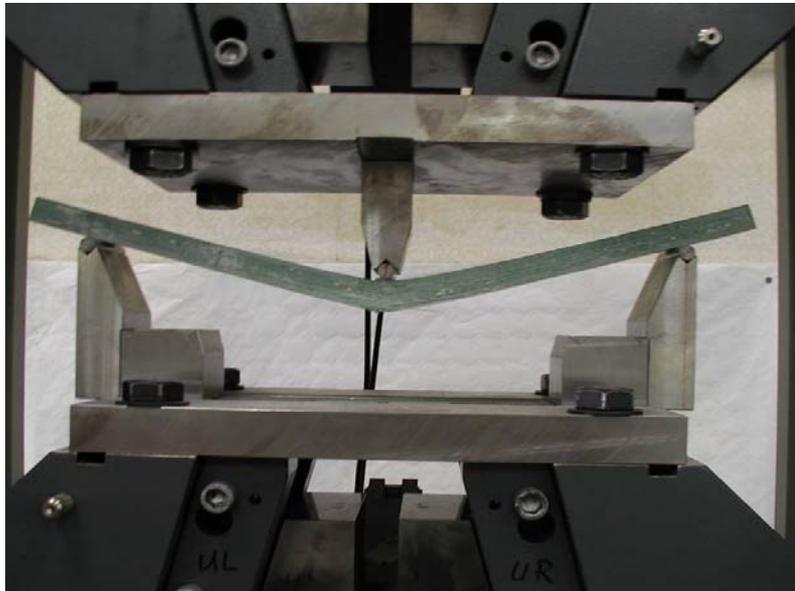


Abbildung 20: Vorrichtung für den Biegeversuch eingebaut in den Prüfraum der Prüfmaschine Z400 E

Da es sich bei dem Glasfasersystem Combi 1350 um eine Kombination von Glasfasergelege und Wirrfasermatte handelt, ist die Einordnung in die Werkstoffklasse nicht eindeutig. Deshalb wurden Biegeproben für Werkstoffklasse II (mit Matten, kontinuierlichen Matten, mit Gewebe oder Mischformaten verstärkte Kunststoffe) und III (Transverse unidirektionale, unidirektionale und multidirektionale Verbundstoffe (Glasfasersysteme)) gefertigt und geprüft. Der Biegeversuch wurde auf einer universellen Biegevorrichtung auf einer Zug-Druck-Prüfmaschine Zwick Z400E durchgeführt. Abbildung 20 zeigt die Prüfvorrichtung in den Spannbacken der Prüfmaschine während des Versuches. Die Meßreihen sind in

Abbildung 21 dargestellt.

Parametertabelle: WK II

Probennr.	Biegefestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	E-Modul in N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung in %
1	328,90	14239,04	2,69
2	350,36	14277,19	2,89
3	346,63	14287,03	2,85
4	342,84	14111,76	2,90
5	344,94	14887,89	2,82
$\bar{x}$	342,74	14360,58	2,83
s	8,21	302,95	0,08
v [%]	2,39	2,11	3,00

Parametertabelle WK III

Probennr.	Biegefestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	E-Modul in N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung in %
1	326,80	14909,82	2,66
2	340,08	14845,58	2,79
3	311,75	13846,03	2,72
4	327,04	15204,05	2,63
5	334,44	14966,77	2,77
6	339,80	14372,05	2,95
$\bar{x}$	329,99	14690,71	2,76
s	10,67	495,33	0,12
v [%]	3,23	3,37	4,19

Abbildung 21: Parametertabellen der Werkstoffklassen

Es ergibt sich folgender Vergleich der Ergebnisse der beiden Werkstoffklassen:

- E-Modul                      Abweichung WK III zu WK II liegt bei 2,25%
- Biegefestigkeit            Abweichung WK III zu WK II liegt bei 3,9%
- Bruchdehnung              Abweichung WK III zu WK II liegt bei 2,5%

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass sich die gemessene Biegefestigkeit von  $\sigma_B = 330$  MPa (Werkstoffklasse III) und  $\sigma_B = 348$  MPa (Werkstoffklasse II) für den verwendeten Werkstoff nicht signifikant unterscheiden.

#### 2.1.4.2 Ermittlung des Glasfasermasseanteils des Außenhautlaminates nach EN ISO 1172 [30]

Diese Norm legt zwei Kalzinierungsverfahren zur Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehaltes von glasfaserverstärkten Kunststoffen fest.

Das Prinzip der Kalzinierung, ein Probenkörper wird gewogen und anschließend bei einer festgelegten Temperatur kalziniert/verbrannt. Der Probenkörper wird dann erneut gewogen und der nichtbrennbare Anteil (Textilglas und Mineralfüllstoff) wird durch Bestimmung der Massedifferenz des Probenkörpers vor und nach dem Kalzinieren, der Textilglasanteil bestimmt.

#### Probengewinnung

Die Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllgehaltes muss gleichzeitig an mindestens zwei Proben durchgeführt werden. Das Prüfergebnis ist der Mittelwert der Messung an beiden Probenkörpern, vorausgesetzt, die Differenz zwischen den beiden Messungen beträgt weniger als 5%. Ist das nicht der Fall, muss ein dritter, nahezu identischer Probenkörper geprüft werden, die drei Werten müssen dann zur Ermittlung des Ergebnisses berücksichtigt werden. Die Proben wurden einer zur Verfügung stehenden Stoffprobe entnommen (Abbildung 22) Durch Trennung wurden 7 massegleicher Proben von 10,0g (I - VII) (Abbildung 22 (links): Materialstück zur Probenherstellung

Abbildung 23) Benötigt werden nach [30] mindestens 2 bzw. 3 Proben zur Fasermassenbestimmung.

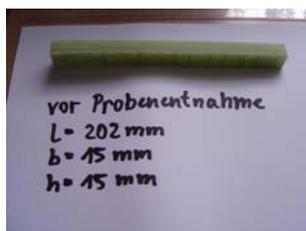


Abbildung 22 (links): Materialstück zur Probenherstellung

Abbildung 23 (rechts): 7 massegleiche, 10g - Proben

## Verfahrensauswahl

Die Wahl des zur Bestimmung des Textil- und Mineralfüllgehaltes angewendeten Verfahrens hängt von der An- oder Abwesenheit von Mineralfüllstoffen ab. Die in der internationalen Norm [30] beschriebenen Verfahren sind:

**A:** zur Bestimmung des Textilglasanteiles bei Abwesenheit von Mineralfüllstoffen und

**B:** zur Bestimmung des Textilglasanteils, wenn beide Bestandteile vorhanden sind.

Verbundbestandteile: 1. Harzanteil: Ampreg 22 (Epoxidharz)

2. Glasanteil: E-Glas

Im Verbund liegen keine chemisch gebundenen oder ungebundenen Bestandteile vor, die während einer Verbrennung ausgasen können.

Ausgewähltes Verfahren nach [30]: **Verfahren A**

### Die Vorgehensweise nach Verfahren A

#### (Wägung jeweils nach Abkühlung auf Raumtemperatur)

1. Bestimmung der Masse der getrockneten Tiegel (**m1**)
2. Bestimmung der gemeinsamen Masse von Tiegel und Probe (**m2**)
3. Bestimmung der gemeinsamen Masse von Tiegel und Glasfaserrückstand nach Kalzinierung/Verbrennung bei 630°C (**m3**)

Das Verfahren wurde für drei Proben ( I, II, IV) durchgeführt.

### Prüfungsdurchführung

Nach einer Probenverbrennung/-kalzinierung von 1 Stunde und nochmals 30 Minuten wurde bei den drei Proben für Masse 3 das Erreichen von Massekonstanz der Glasfaserrückstände nachgewiesen. Die Prüfergebnisse wurden in der folgenden Tabelle (Abbildung 24) dargestellt.

	Tiegel 1	Tiegel 2	Tiegel 3
M1[g]	14,2978	15,6285	15,0601
Probe/Tiegel	I / 1	II / 2	IV / 3
m2[g]	24,2612	25,5999	25,0300
m3[g]	20,1099	21,4690	20,9223

Abbildung 24: Ergebnistabelle der Gewichtsmessungen vor und nach der Kalzinierung

## Glasfasermasseanteil

Berechnungsvorschrift nach [30]/ 7.1.4.

Für jeden Probenkörper ist der Textilgehalt  $M_{\text{Glas}}$  anzugeben in Prozent von der Ausgangsmasse. Berechnet wird dieser mittels folgender Formel:

$$M_{\text{Glas}} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100\%$$

Die Ergebnisse der Berechnung auf Grundlage dieser Formel sind in folgender Abbildung kurz dargestellt.

Probe	I	II	IV	Ø I,II,IV
$M_{\text{Glas}}[\%]$	58,33	58,57	58,8	<b>58,57</b>

Für die vorgeschriebene Mittelwertbildung des Masseanteil aus den 3 Proben lag die Abweichung des Masseanteils der Proben untereinander unter den als maximal vorgeschriebenen 5% (gemäß [30] 7.1.4)

Der Glasfasermassenanteil an der Verbundgesamtmasse beträgt auf Basis der drei herangezogenen Proben und vorgeschriebener Durchschnittsermittlung 58,57%.

### 2.1.4.3 Festigkeitseigenschaften des Rückgratmaterials (UP)

Das GFK-Rückgrat setzt sich aus regional unterschiedlichen Laminaten (Abbildung 25), welche sich in der Zusammensetzung des Fasermaterials unterscheiden, zusammen.



Abbildung 25: Laminat des GFK-Rückgrates

Dabei werden die Gurte und Stege extra ausgelegt. Um die Festigkeit der Gurte zu erzielen, werden zusätzlich zu den Wirrfasermatten und Rovinggeweben UD-fasern (unidirektionales Gelege) einlaminiert. Im Zusammenhang der Überprüfung der Festigkeitseigenschaften wird Laminat 1 betrachtet. Als Matrix wird ungesättigtes Polyesterharz und als Faser E – Glas verwendet.

Bezeichnung Faser	Anzahl	Faserausrichtung
CSM300	15	ungerichtet
XE 500	12	+/-45°
UD450	9	0°

Bezeichnung Faser	Anzahl	Faserausrichtung
CSM 300	7	ungerichtet
XE 500	6	+/-45°

Abbildung 26: Laminatzusammensetzung des Gurtes (Bild Links) und des Steges (Bild rechts)

Abbildung 26 zeigt die Laminatzusammensetzung des Gurtes (Bild Links) und des Steges (Bild rechts). Geprüft wurden jeweils 5 Proben von Gurt und Steg. Ausgewertet wurde nach Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient. Abbildung 27 zeigt die Ergebnisse für Gurt und Steg. Als Mindestkennwerte des Basislaminates sind für die Zugfestigkeit 85 N/mm<sup>2</sup> und für den E-Modul 6350 N/mm<sup>2</sup> nach Vorschrift [11] vorgegeben.

Probennr.	Zugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	E-Modul in N/mm <sup>2</sup>	Probennr.	Zugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	E Modul in N/mm <sup>2</sup>
1	164	8996	1	86	5651
2	164	9551	2	82	5732
3	182	10558	3	94	6111
4	147	8622	4	90	5482
5	142	8392	5	97	5407
<b>Mittelwert</b>	<b>160</b>	<b>9224</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>90</b>	<b>5677</b>
<b>Standardabw.</b>	<b>14</b>	<b>774</b>	<b>Standardabw.</b>	<b>5</b>	<b>246</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	<b>8,9</b>	<b>8,4</b>	<b>Var.-koeffizient [%]</b>	<b>5,6</b>	<b>4,3</b>

Abbildung 27: Ergebnisse der einzelnen Proben

### 2.1.4.4 Festigkeitseigenschaften des Bondinglaminates

Das Bondinglaminat als Verbindungslaminat zum Anlaminieren des Rückgrates an die Rumpfschale wird nach [1] nach dem Glasgewicht und der Breite des Flanschanschlusses ausgelegt. Im speziellen Fall der H 461 besteht das Laminat aus 7 Lagen Glasfasergelege XE 803 mit einer Faserausrichtung von +/-45°. Geprüft wurde die Zugfestigkeit in 0° und 90°-Richtung. Die Ergebnisse sind in Abbildung 28 dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass sich zwei Ergebnisklassen mit jeweils geringer Streuung in Abhängigkeit der Faserausrichtung ergeben, wobei die Zugfestigkeit der Gruppe 1 ca. doppelt so groß ist als die Zugfestigkeit der Gruppe 2 bei einer Differenz des Faserwinkels von 20°. Bei ausrichtungstechnisch willkürlicher Entnahme des Bondinglaminatstücks ist bei theoretischen Berechnungen und Annahmen mit der geringen Festigkeit zu rechnen.

Potential in der Praxis liegt in der definierten Entnahme aus der Bahn.

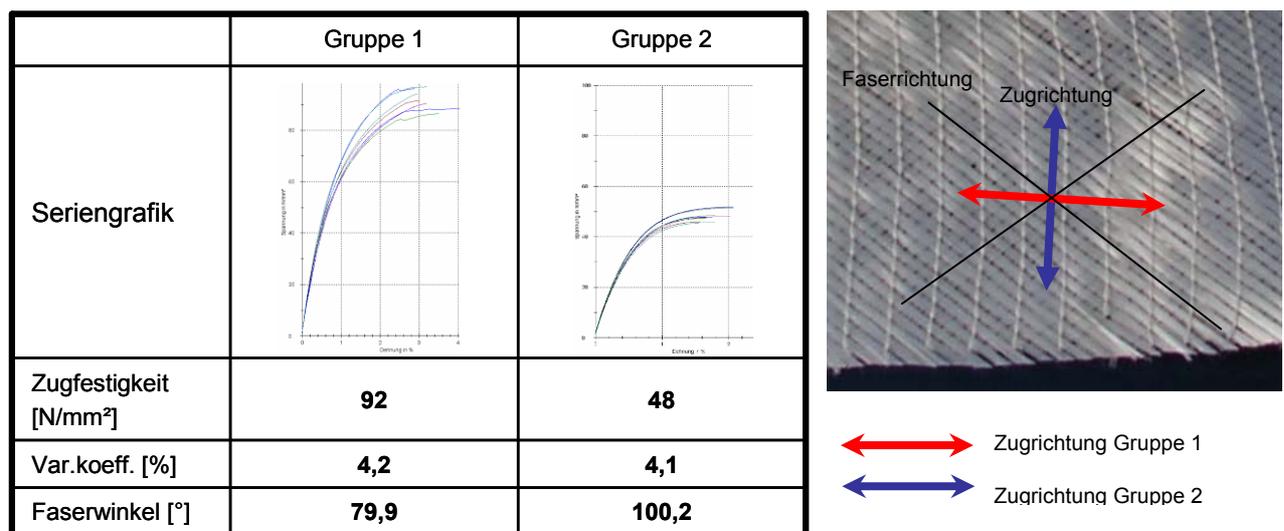


Abbildung 28: Ergebnisse der Prüfungen

### 2.1.4.5 Experimentelle Ermittlung der Scherzugfestigkeit von Fügeverbindungen mit unterschiedlichen Klebstoffen

Unterschiedliche Klebstoffe mit GL-Zulassung werden auf Scherzugfestigkeit geprüft und gegenübergestellt. Die Auswahl der Kleber erfolgte auf Basis der Verarbeitungsansprüche und Ansprüche an Betriebstemperatur und maximale Spaltüberbrückung im Rahmen des Projekts. Die Kleber sind 1 oder 2 Komponentenkleber. Die Hersteller gewährleisten eine Anwendbarkeit des Klebers unter industriellen Fertigungsbedingungen mit langen Topfzeiten. Alle Kleber weisen auf Basis der GL-Prüfverfahren eine hohe Wasser- und Lösungsmittelbeständigkeit, sowie den geforderten Betriebstemperaturbereich auf. Die Auswahl der betrachteten Klebstoffe ermöglichen entsprechend den Herstellervorgaben eine Klebspaltüberbrückung von mind. 10mm und sind mit den im Projekt verwendeten Werkstoffen anwendbar.

#### Die geprüften Klebstoffe

Klebstoff	Basis	Komponenten	Spalt max. [mm]	Max.Topf-zeit [min]*	Scherzugfestigkeit [MPa] (DIN 1465 [32], DIN 53283 [31])** <sup>3</sup>
Büfa 0139	Venylester	1-C	10	22	k.A.
MGS L135	Polyurethan	2-C	50	180* <sup>2</sup>	15 - 20
MGS 235	Polyurethan	2-C	20 (30)	90* <sup>2</sup>	21
Spabond 130	Epoxyd	2-C	50	30* <sup>2</sup>	22 - 28
Spabond 340	Epoxyd	2-C	20	180* <sup>2</sup>	25 - 33

\* bei Raumtemperatur 23°C und Normalklima, gemäß technischem Datenblatt des Herstellers

\*<sup>2</sup> Erhöhung der Topfzeit durch Zusatzkomponenten des Herstellers möglich

\*<sup>3</sup> gemäß technischem Datenblatt des Herstellers

#### Geometrische Parameter

**Die Proben wurden in Anlehnung an DIN EN 1465 [31] gefertigt.**

- Die Überlappungslänge beträgt 50mm.

- Die Klebspaltdicke beträgt 5mm.

Für die Prüfverfahren für Spabond 130,340 und MGS L135, 235 wurde GFK auf Epoxidbasis verwendet.

Für die Prüfverfahren für Büfa 0139 wurde GFK auf Polyesterbasis verwendet.

### Die Prüfung

Geprüft wurde die Scherzugfestigkeit einer GFK-GFK-Verbindung mit dem jeweiligen Klebstoff. In Anlehnung der DIN 1465 wurde die Prüfgeschwindigkeit mit 3mm/min angesetzt, um innerhalb eines Zeitraums von  $65 \pm 20$  sek ein Verbindungsversagen zu erreichen.

Die Regulierung der Prüfgeschwindigkeit durch die Prüfmaschine ZWICK 400e erfolgte lagegeregelt. Geprüft wurde bei Raumtemperatur und Normaklima.

Beobachtet wurden neben der Bruchlast und Scherzugfestigkeit der Verbindung auch der Ort und Art des Versagens sowie das Bruchbild.

### Versuchsablauf

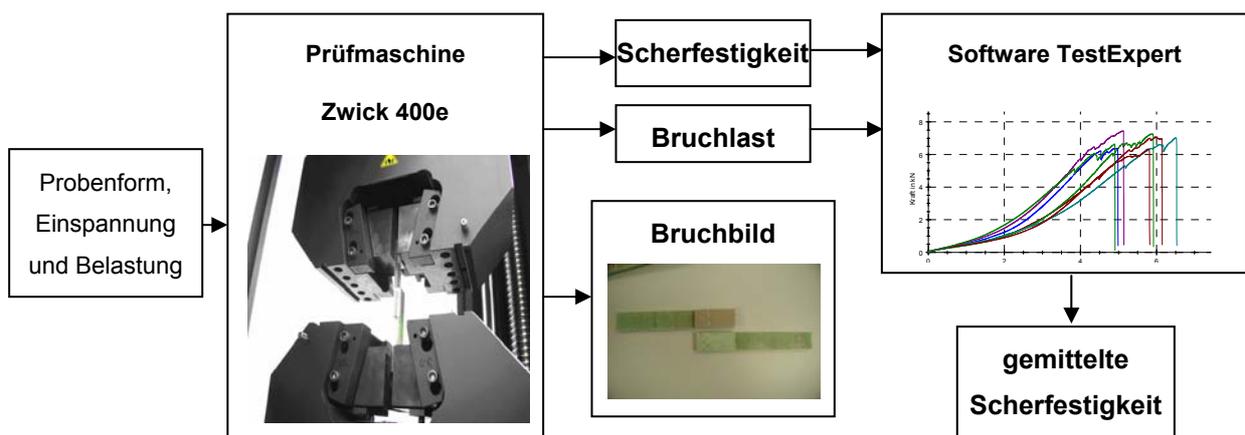


Abbildung 29: Ablauf – und Auswertungsschema der Scherfestigkeitsprüfung

### Erreichte Scherzugfestigkeiten

Kleber	SPABOND 340	Spabond 130	MGS 235	MGS L135	Büfa 0139
Scherzugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	<b>6,15</b>	<b>5,2</b>	<b>5,23</b>	<b>4,96</b>	<b>4,22</b>

## **Bruchbild**

Alle geprüften Verbindungen mit den gewählten Klebern versagen am Übergang Klebschicht- GFK.

Das Bruchbild zeigt ein Herausreißen von Glasfaser- und Matrixmaterial aus den obersten Schichten des verklebten GFK. Die Klebschicht weist bei allen Proben bei zerstörter Probe optisch keine Schädigung auf.

## **Abschlusskommentar**

Die Klebstoffe Spabond 130 und 340 werden bisher erfolgreich in der Produktion im Yachtzentrum Greifswald eingesetzt. Beide Kleber gewährleisteten neben MGS 235 bei der Verklebung von GFK im Vergleich mit den anderen geprüften

GL- zugelassenen Klebern die höchste Scherfestigkeit im Versuch.

Die Festigkeit einer geklebten Verbindung wird durch den Kleber selbst, durch seine fachlich richtige Verarbeitung sowie der verklebten Werkstoffe und der Bauteilgeometrie bestimmt.

Die Größe von Verbindungs- und Überlappungsflächen bei Klebungen hat Einfluss auf den Spannungsverlauf -u.a. bei Scherzugbelastung- innerhalb der Klebung.

Um eine Aussage über den Einfluss der Größe der Überlappungsfläche treffen zu können, wurde für die Kleber Spabond L135 und Spabond 235 die Überlappungslänge der GFK-Fügeteile variiert.

## **Variation der Probengeometrie für Spabond 130 und Spabond 340**

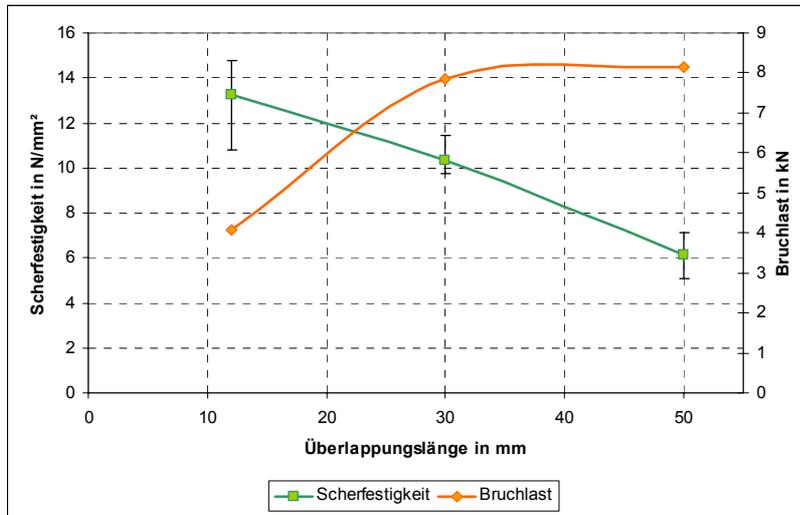
Der Spannungsverlauf in einer geklebten Verbindung gilt generell als nicht konstant, wird aber als konstant angenommen, um Vergleiche zwischen den Klebern zu ermöglichen.

Um den Einfluss der Größe der Überlappungsfläche auf die Gesamtfestigkeit der GFK-Verbindung abzuschätzen, wurde für die Kleber Spabond 130 und Spabond 340 die Überlappungslänge am Probenkörper variiert.

Die restliche Probengeometrie, wie Materialstärke und Klebschichtdicke wurde beibehalten.

Folgende Überlappungslängen wurden geprüft: 12, 30, 50mm.

### Gegenüberstellung Scherzugfestigkeit – Bruchlast für Spabond 340



Überlappungs- länge[mm]	Scherzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
12	13,25
30	10,34
50	6,15

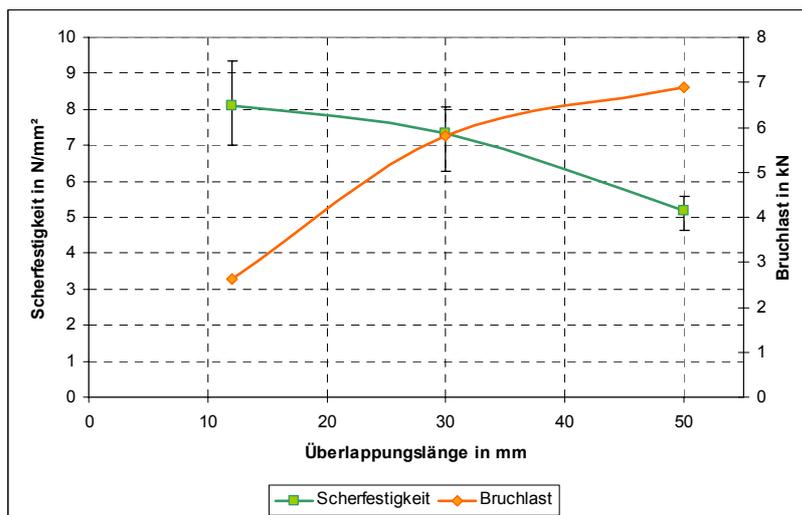
Abbildung 30: Einfluss der Überlappungslänge auf Scherzugfestigkeit bei SPABOND 340

#### Anmerkung

Bei einer Überlappung von 50mm ist die Bruchlast erwartungsgemäß hoch, im Vergleich zu geringerer Überlappungslänge ist die Scherfestigkeit dagegen niedrig.

Bei einer Überlappungslänge von 12mm gegenüber 50mm wird eine Zunahme der Scherzugfestigkeit um 115% festgestellt.

### Gegenüberstellung Scherzugfestigkeit – Bruchlast für Spabond 130



Überlappungs- Länge [mm]	Scherzug- festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
12	8,11
30	7,32
50	5,2

Abbildung 31:: Einfluss der Überlappungslänge auf Scherzugfestigkeit bei SPABOND 130

Bei einer Überlapplänge von 12mm gegenüber 50mm wird eine Zunahme der Scherzugfestigkeit um 56% festgestellt.

***Eine Reduzierung der Überlappungsfläche verringert die maximal tragbare Kraft der Verbindung.***

***Eine Reduzierung der Überlappungsfläche erhöht aber die maximale Scherzugfestigkeit in der Verbindung.***

### **Rückschlüsse für die Auslegung und Dimensionierung**

Bei allen Klebstoffen werden die Herstellervorgaben für die maximale Scherzugfestigkeit der jeweiligen Kleber nicht erreicht.

Der Kleber wird nicht auf seine maximale Festigkeit geprüft, vielmehr die Festigkeit des Fügeteils. An allen verwendeten Fügeteilen wurde ein Adhäsionsbruch oder ein Bruch in den oberen Lagen des Fügeteils beobachtet. Die Klebschicht blieb unbeschädigt.

Die Ergebnisse der Prüfungen sind untereinander vergleichbar, ermöglichen jedoch keine konkreten Aussagen zur Beanspruchung und dem Leistungsspektrum des jeweiligen Klebers mit den verwendeten Materialien.

Die Berücksichtigung ungleichmäßiger Spannungsverläufe in einer Klebung muss bei der konstruktiven Auslegung bedacht werden ohne genaue Kenntnis der Spannungsverteilung bei Belastung.

Das Auftreten vornehmlich zusammengesetzter Beanspruchungen in der Praxis erschwert bei derzeitigem Kenntnisstand eine detailliert genaue Vorhersage des Verhaltens einer Klebung unter einem konkreten Belastungsbild.

Durch Beachten von Dimensionierungsgrundsätzen für Klebeverbindungen und somit gezielt gerichtete Krafteinleitung in Klebungen begünstigen einen wirtschaftlichen und sicheren Langzeiteinsatz der geprüften Klebstoffe.

## 2.1.5 Belastungen der Struktur

Parallel zu werkstofftechnischen Untersuchungen des vom Praxispartner eingesetzten Materials wurde mit der Modellierung des Schiffsrumpfes begonnen. Dazu wurde ein Geometriemodell erstellt, welches sich aus allen relevanten Bauteilen (Rumpfschale, Deck, Schotte, Rückgrat) zusammensetzt.

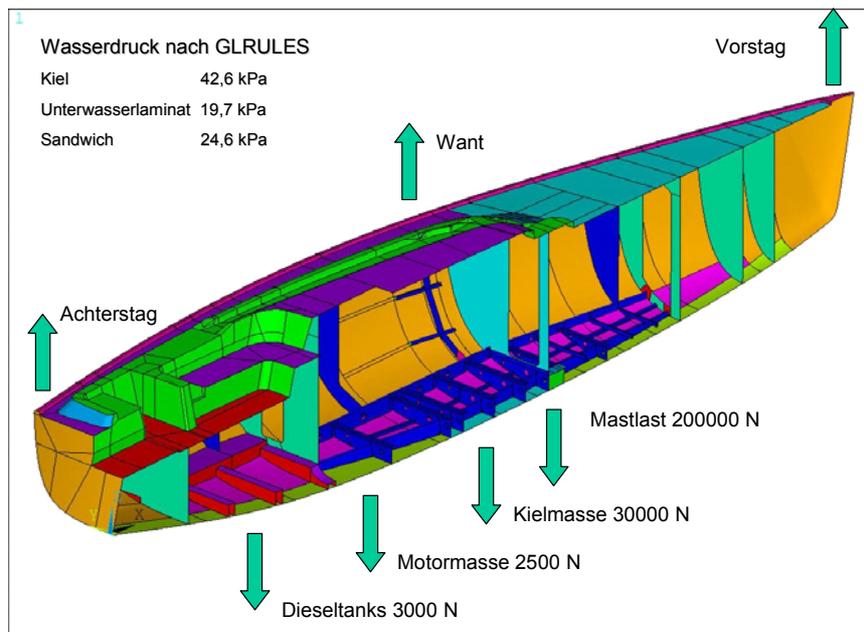


Abbildung 32: Belastungsplan der Rumpfstruktur

Dieses Modell wurde mit den entsprechenden Belastungen (siehe Belastungsplan,

Abbildung 32) beaufschlagt. Die durch das Rigg eingeprägten Kräfte in Achterstag, Vorstag und Want charakterisieren den ungünstigsten Fall, die aus der maximalen Windlast resultierenden Kräfte auf die Seile. Aus dem geometrischen Modell wurde ein FE-Modell zur Berechnung der Spannungen und Verformungen generiert.

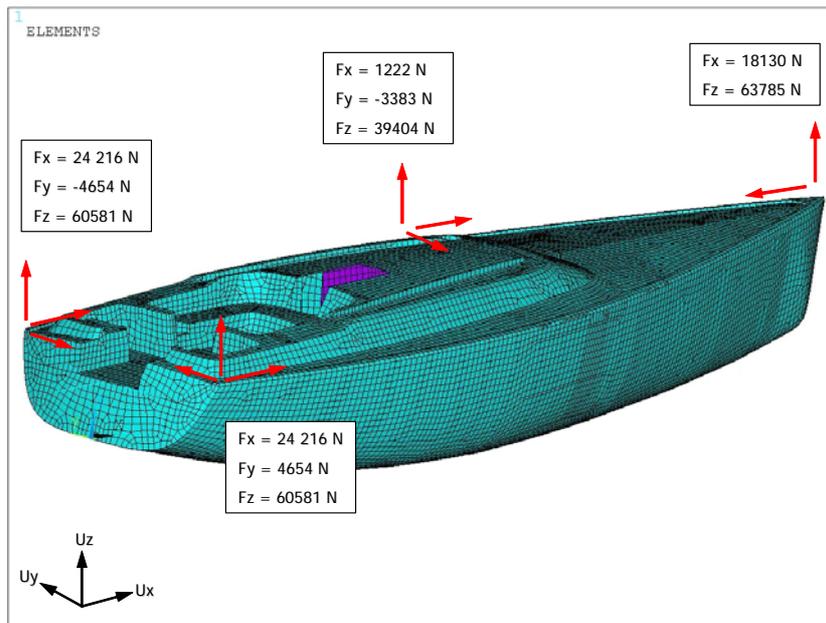


Abbildung 33: Modellierung der äußeren Belastung durch Seilkräfte aus dem Rigg

Diese Modellierung wurde für den Rumpf mit eingebautem Rückgrat vorgenommen. Dabei wurde neben der konventionellen GFK- Variante eine Stahl-Rückgratvariante eingesetzt. Diese Variante basiert auf einem Entwurf (Abbildung 34), der werkstoffseitigen und konstruktiv-technischen Analysen sowie der durch den Anwender vorgegebenen fertigungsseitigen und betriebswirtschaftlichen Randbedingungen.

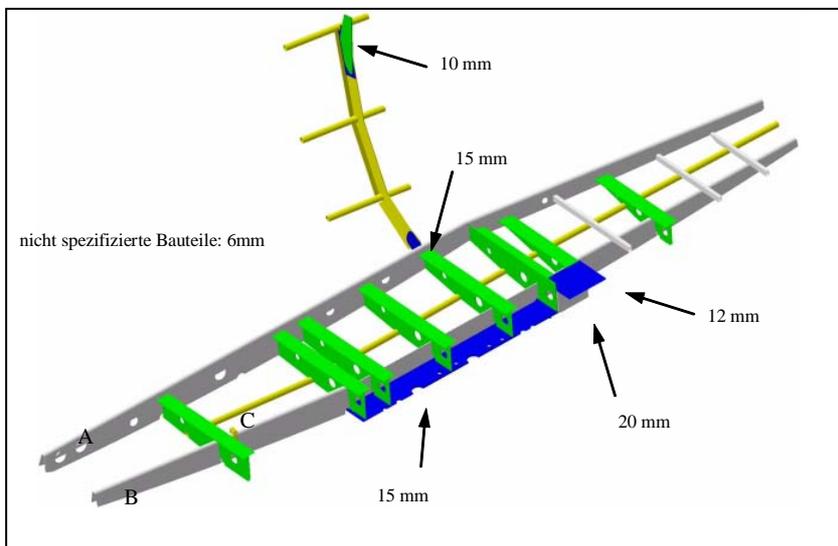


Abbildung 34: Entwurf einer Stahl-Rückgratvariante mit verwendeten Materialdicken

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde das sehr aufwendig herzustellende GFK-Rückgrat durch eine feuerverzinkte Stahlkonstruktion substituiert. Diese wird als Vorzugsvariante hinsichtlich der Verstärkung des Rumpfes in die weiteren Betrachtungen

einbezogen. Diese Variante ist Basis für die Gestaltung des Übergangsbereiches der GFK-Struktur (Rumpf) zur Metallstruktur (Rückgrat ) bildet die Vorzugsvariante.

## **2.2 Entwicklung und Prüfung von Verbindungsvarianten für Basis- und Bauteilproben in Mischbauweise (Verbindung des Rückgrates an den Rumpf)**

### **2.2.1 Systematisierung und Bewertung relevanter Fügeverfahren ausgehend von den auftretenden Belastungen in den Fugebereichen (für die Stützkonstruktion, für ausrüstungsrelevante Verbindungen)**

Für den Hauptuntersuchungsgegenstand im Projekt, die Integration von stark beanspruchten Metallstrukturen in Rümpfe für Segelyachten aus FVK (GFK) sollen für die Konzepte der konstruktiven Gestaltung des Übergangsbereiches von GFK-Rumpfstruktur und Metall-Rückgratstruktur Gestaltungsgrundsätze für das Fügen mit unterschiedlichen Fügeverfahren definiert werden.

Diese basieren auf folgenden in Betracht kommenden Fügeverfahren:

- Laminieren von Metall-Rückgratstruktur mit der GFK-Rumpfstruktur
- Kleben von Metall-Rückgratstruktur mit der GFK-Rumpfstruktur
- Mechanische Fügen (Blindnieten, Schrauben, Schließringbolzen) + Kombination aus mechanischem Fügen und Kleben von Metall-Rückgratstruktur mit der GFK-Rumpfstruktur.

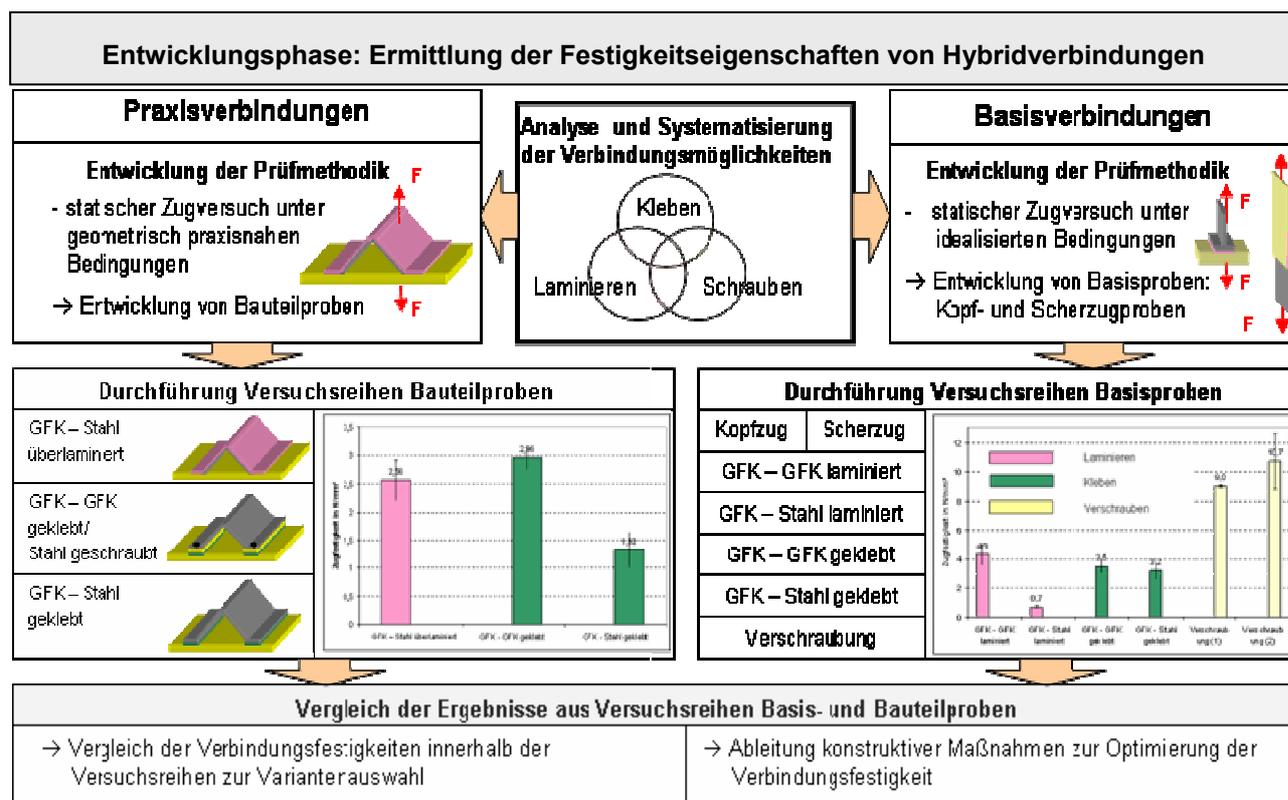


Abbildung 35: Vorgehensweise bei der experimentellen Ermittlung der Verbindungseigenschaften von GFK-Stahl-Hybridverbindungen

Das Schema in Abbildung 35 gibt einen Überblick über die Arbeiten in der Entwicklungsphase, über die versuchstechnische Umsetzung der Kombination der oben stehenden Fügeverfahren. Zur Untergliederung der möglichen Lösungsmöglichkeiten für Rückgratverbindungen bietet sich die Verwendung einer stufenweise vollzogenen Typisierung einiger Merkmale der Verbindungen an.

### 2.2.1.1 Typisierung möglicher Fügeverfahren für die Rückgratverbindung

Die zur Gliederung in der Tabelle (Abbildung 36) herangezogenen Merkmale, sind die verwendete Füge-technik (Laminieren, Kleben, mech. Fügen) und die Verbindungsarten (Stoffschluß, Kraftschluß, Formschluß) zwischen Rumpf und Stahlträger. Weiterhin geht als Merkmal die Vorbehandlung des verzinkten Stahlträgers ein. Jede Merkmalsausprägung ist mit einem Buchstaben oder einer Nummer versehen, so dass sich als Ergebnis eines Durchlaufs des Schemas eine Kennzahl ergibt, die die Verbindungsvariante nach den genannten Merkmalen charakterisiert.

Merkmal	Merkmalsausprägung		
	Laminieren (A)	Kleben (B)	mechanisch Fügen (C)
Fügetechnik Träger			
Fügetechnik Rumpf	Laminieren (A)	Kleben (B)	mechanisch Fügen (C)
Verbindungsarten Träger	Stoffschluss (1)	Formschluss (2)	Kraftschluss (3)
	(4)		
		(5)	
	(6)		(6)
	(7)		
Verbindungsarten Rumpf	Stoffschluss (1)	Formschluss (2)	Kraftschluss (3)
	(4)		
		(5)	
	(6)		(6)
	(7)		
Vorbehandlung Träger	keine (0)		
		Reinigen (1)	
		Schleifen (2)	
			Strahlen (3)
			Primern (4)

Abbildung 36: Typisierung der Fügeverbindungen

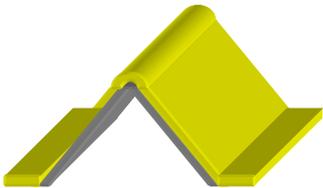
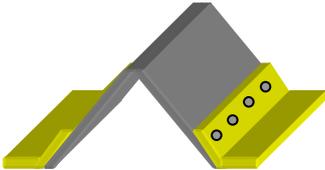
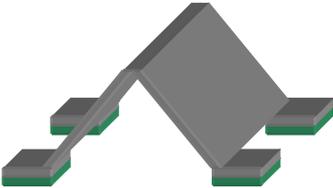
Diese Typisierung ermöglicht eine Vereinfachung der Lösungsfindung und ermöglicht eine systematische Einordnung unterschiedlicher Lösungsvarianten der Verbindung Träger-Rumpf. Jede ermittelte Variante dieser Verbindung kann unter einem Kürzel zusammengefasst werden. Das soll an einem Beispiel verdeutlicht werden:

Das Kürzel AA411 bedeutet, dass für die Verbindung zum Stahlträger und zum Rumpf jeweils das Laminieren (A) gewählt wurde. Die Verbindungsart am Stahlträger ist durch einen Stoff- und Formschluss (4) gekennzeichnet, zum Rumpf besteht nur ein Stoffschluss (1). Die Vorbehandlung des verzinkten Stahlträgers besteht aus einer Reinigung mit Aceton(1).

Anhand der Typisierung lassen sich Vorschläge (Abbildung 37) für mögliche Verbindungsvarianten erarbeiten und einordnen. In der Grafik sind die dargestellten Vorschläge zur besseren Anschaulichkeit ohne das Außenhautlaminat dargestellt, auf welchem die Träger zu befestigen sind.

Aus den Vorschlägen zur Gestaltung der Verbindung zwischen Rumpf und Rückgrat lassen sich folgende relevante Verbindungsvarianten (Basisvarianten) ableiten:

- GFK-GFK anlamiert (AA411)
- GFK-GFK geklebt (CB511(2))
- Stahl-GFK anlamiert (AA411)
- Stahl-GFK geklebt (BB111)
- Stahl-GFK geschraubt(CB511(2))

Verbindungsbezeichnung	Grafik	Beschreibung
AA411		<ul style="list-style-type: none"> <li>- derzeitige Lösung</li> <li>- komplettes Überlaminieren des Trägers an die Rumpfschale mit Bondinglaminat</li> <li>- aufwendige Übergangsgestaltung an den Kanten notwendig</li> </ul> Nachteil: hoher Materialeinsatz
AA111		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anlaminieren des Trägers an die Rumpfschale mit Bondinglaminat</li> <li>- aufwendige Übergangsgestaltung mit Spachtel an den Kanten notwendig</li> </ul>
(AC)A711		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Anlaminieren des Trägers wie bei AA11x, jedoch nach Aushärten zusätzliche Sicherung am Träger mit Schrauben</li> <li>- Verschraubung mit gewindefurchenden Schrauben möglich →Gewindeschneiden entfällt</li> <li>-Bohrspäne fallen beim Vorbohren der Schraubenlöcher in das Innere des Rückgrats und beginnen zu rosten</li> <li>- Kontaktkorrosion in den Bohrlöchern möglich</li> </ul>
BB111		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flansch vor dem Verzinken anschweißen</li> <li>- mit geeignetem Klebstoff wird die Klebefuge ausgefüllt und gleichzeitig ein Stoffschluss erzielt</li> </ul> Nachteile: Klebstoffe nur bedingt geeignet zum Fügen von feuerverzinktem Stahl

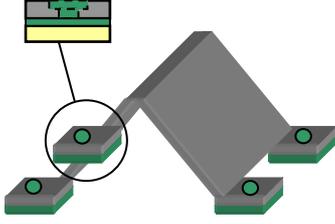
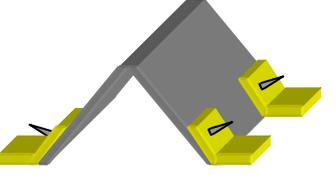
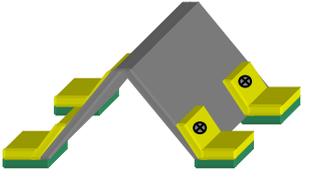
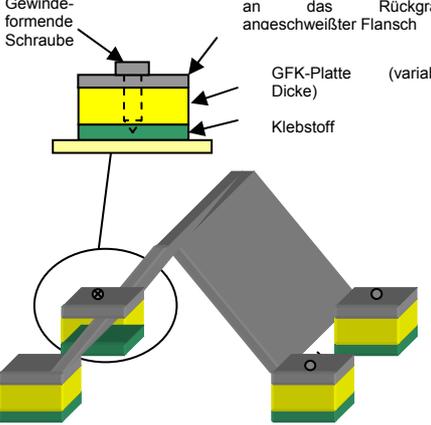
<p><b>BB411</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flansch vor dem Verzinken anschweißen</li> <li>- Rückgrat in den Rumpf einlassen</li> <li>- bei leicht angehobenem Rückgrat Klebstoff unter die angeschweißten Bleche bringen</li> <li>-Rückgrat vollständig herablassen</li> <li>-überquellenden Klebstoff verspachteln und Bohrungen mit Klebstoff auffüllen</li> </ul> <p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-schnell und einfach anzubringen</li> <li>-Zusätzliche Festigkeit durch Formschluss</li> </ul> <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-trotz Formschluss wahrscheinlich zu geringe Festigkeit der Klebeverbindung</li> </ul>
<p><b>AB411</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- angespitzte Bolzen werden vor dem Verzinken an den Stahl angeschweißt und ermöglichen zusätzlich Formschluss mit dem Laminat</li> </ul> <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-evtl. Probleme beim Anschweißen der Bolzen (Wärmeeintrag,</li> <li>- erhöhter Aufwand beim Laminieren</li> <li>- hervorstehende Bolzen im Nachgang kürzen</li> </ul>
<p><b>CB511</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flansch wird vor dem Kleben an Träger angeschraubt → keine Späne im Inneren des Rückgrats</li> <li>- Gewindefurchende Schrauben können verwendet werden um den Aufwand zu minimieren</li> <li>- verwendete Winkel haben einen Öffnungswinkel &gt; 90° (evtl. Sonderanfertigung), ansonsten müsste die Winkelabweichung durch Klebstoff ausgeglichen werden.</li> </ul> <p>Nachteil:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Kontaktkorrosion in den Bohrlöchern möglich, sehr aufwendig herzustellen</li> </ul>
<p><b>CB511</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- vor dem Verzinken werden seitlich Bleche parallel zum Bodenlaminat an den Träger angeschweißt</li> <li>- an vorher markierten Punkten im Rumpf werden GFK-Platten aufgeklebt.</li> <li>-Rückgrat in den Rumpf einsetzen</li> <li>-Rückgrat einsetzen</li> <li>-Löcher in die GFK-Platten bohren</li> <li>-Gewindeformende Schrauben eindrehen</li> </ul> <p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- hohe Festigkeit der Verbindung</li> <li>- durch Einsatz unterschiedlicher Plattendicken können auch größere Fugen überbrückt werden</li> </ul>

Abbildung 37: Verbindungsvorschläge Rumpf-Rückgrat

Um einen Vergleich der Festigkeit dieser Verbindungen zu erhalten, werden Kopf- und Scherzugversuche an Basisproben durchgeführt.

### 2.2.1.2 Entwicklung und Prüfung von Basisproben

Grundlage für die Entwicklung und Prüfung von Basisproben sind die drei am höchsten bewerteten Lösungsmöglichkeiten nach Abbildung 42. Basisproben sollen jede Verbindungsmöglichkeit einzeln realisieren und damit vergleichbar machen. Einflüsse aus Kombinationen mehrerer Verbindungsmöglichkeiten werden dadurch ausgeschlossen. Bevorzugt werden dazu zwei Möglichkeiten, welche die Festigkeit einer Verbindung charakterisieren, Scherzug- und Kopfzugproben. Zur Probengestaltung wird eine Überlappungslänge von 50 mm festgelegt. Dieses Maß entspricht einer minimalen Flanschbreite für die Verbindungsart Laminieren. Die Probenbreite wird in Anlehnung an [31] mit 25mm festgelegt. Die Dicke der Fügeteile entspricht den eingesetzten Materialien. Abbildung 38 zeigt die Abmessungen der Scherzug- und Kopfzugproben beispielhaft für eine geklebte Stahl- GFK- Verbindung.

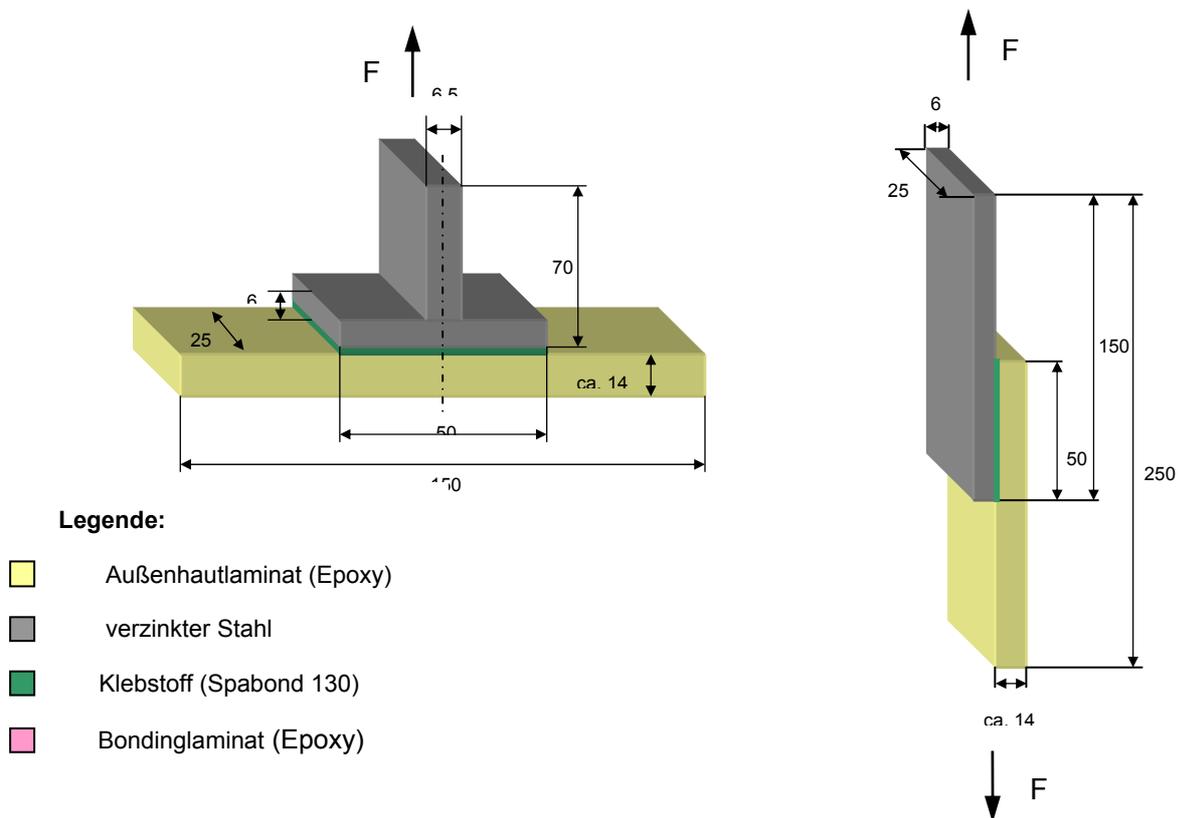


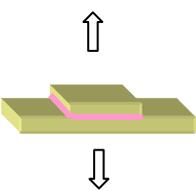
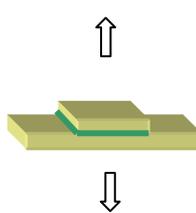
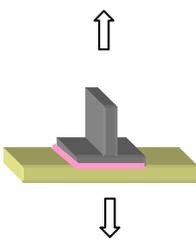
Abbildung 38: Abmessungen der Basisproben

Das Prüfprogramm beinhaltet Proben als Kombination der unterschiedlichen Werkstoffe (GFK-Bodenlaminat, feuerverzinkter Stahl) und den 3 o.g. Fügetechnologien. Es werden für jede auftretende Verbindungsart der drei ausgewählten Lösungsvorschläge jeweils eine

Probenreihe aus mindestens fünf Proben aus Scherzug- und Kopfzugproben hergestellt und geprüft. Abbildung 39 zeigt die Zusammenstellung der Basisproben.

Dazu gehören folgende Verbindungen:

- GFK-GFK anlamiert (AA411)
- GFK-GFK geklebt (CB511(2))
- Stahl-GFK anlamiert (AA411)
- Stahl-GFK geklebt (BB111)
- Stahl-GFK geschraubt(CB511(2))

Probennummer	Grafik		Beschreibung
	Scherzug	Kopfzug	
1			GFK-GFK anlamiert, Bondinglaminat 3-lagig wird zwischen 2 Außenhautplatten laminiert
2			GFK-GFK geklebt, Klebstoff (Spabond 130) mind. 5 mm dick
3			Stahl-GFK anlamiert, Bondinglaminat 3-lagig wird zwischen verzinkten Stahl und Außenhautlaminat laminiert

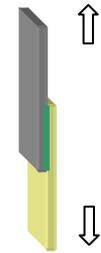
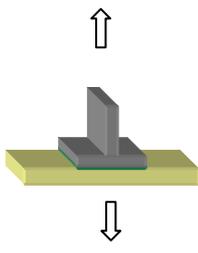
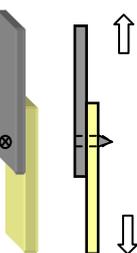
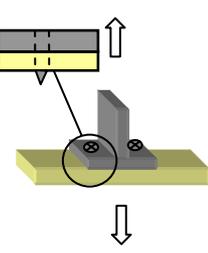
4			Stahl-GFK geklebt, Klebstoff (Spabond 130) mind. 5 mm dick
5			Stahl- GFK geschraubt, gewindeformende Schraube M6 wird im GFK befestigt

Abbildung 39: Zusammenstellung der Basisproben (Kopf- und Scherzugproben)

Die Basisproben wurden im Zugversuch in Versuchsreihen mit jeweils 5 Proben geprüft. Dabei wurde jede Probe bis zum Versagen belastet. Ermittelt wurde die Maximalkraft. Für jede Messreihe wurde zusammenfassend der Mittelwert der Maximalkraft, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient berechnet.

### 2.2.1.3 Auswertung der Prüfergebnisse [33]

Es erfolgt bei der Auswertung eine Aufteilung der Basisproben in Kopfzug- und Scherzugproben. Für jede Probenart sind sowohl die Maximalkräfte, als auch die Festigkeiten im Vergleich abgebildet.

Wie gut zu erkennen ist, sind die Ergebnisse der Versuche sehr unterschiedlich ausgefallen. Erwartungsgemäß lieferte die Kombination GFK-Stahl, geschraubt, die festeste Verbindung. Da der tragende Querschnitt dieser Verbindung allein durch die Schraube gestellt wird, ergeben sich im Vergleich zu den anderen Verbindungsproben wesentlich höhere mittlere Scherzugfestigkeiten in der Größenordnung von 688 N/mm<sup>2</sup>. Die Kopfzugproben erreichten Werte von 470 N/mm<sup>2</sup>. Bezogen auf die Überlappungsfläche 25 x 50mm ergeben die Festigkeiten 10,7 N/mm<sup>2</sup> bzw. 7,8 N/mm<sup>2</sup>. Diese Berechnung ist nur für den Vergleich der geschraubten Proben mit den geklebten und laminierten Proben zulässig um die Relationen der Ergebnisse zu erkennen.

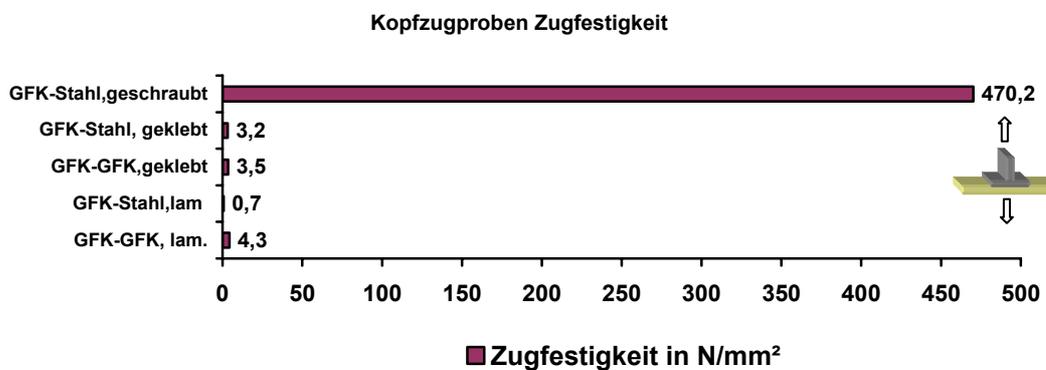
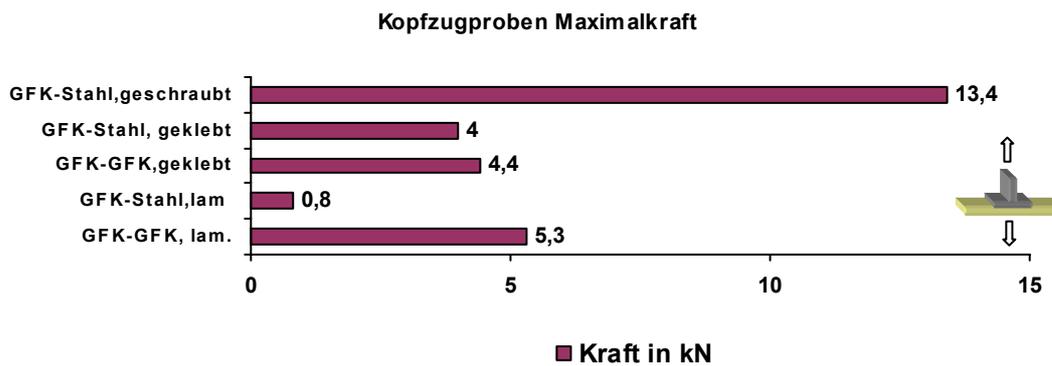


Abbildung 40: Vergleich der Kopfzugproben

Die höheren Werte der Scherzugzugproben sind mit der wirksamen Vorspannung der Schrauben zu erklären. Es muss zuerst die durch die Vorspannung entstandene Reibung zwischen den Prüfkörper überwunden werden, bis der Schraubenquerschnitt zum Tragen kommt. Die Kopfzugproben versagten erst durch ein Ausreißen der Schrauben aus den bereits stark verformten Proben. Eine Schraubverbindung zwischen GFK und Stahl kann als sehr sichere und dauerhafte Verbindung bezeichnet werden. Die Wahl der Anzahl der verwendeten Schrauben ermöglicht eine anforderungsgerechte Anpassung an die zu erfüllenden Anforderungen einer Verbindung.

Als ebenfalls sicher zu bezeichnen ist die Verbindung GFK-GFK, laminiert. Die mittlere Kopfzugfestigkeit der Verbindung lag bei 4,3 N/mm<sup>2</sup>, die Scherzugfestigkeit bei 11,6 N/mm<sup>2</sup>. Als Grund für die schwächere Kopfzugfestigkeit ist die für Faserverbundwerkstoffe ungünstige, senkrecht zum Faserverlauf gerichtete, Belastungsrichtung zu vermuten.

Die Prüfung dieses umfangreich eingesetzten Fügeverfahrens ermöglicht nun eine Einschätzung der Anforderungen im Yachtbau im Hinblick auf die Verbindungsgüte. Die

Ergebnisse können als Richtwert für sichere Verbindungen herangezogen werden, um andere Verfahren besser bewerten zu können.

Für die Verbindung GFK-Stahl, laminiert, konnten verhältnismäßig geringe Festigkeiten Kopfzugfestigkeit  $0,7 \text{ N/mm}^2$ , Scherzugfestigkeit  $1,3 \text{ N/mm}^2$  festgestellt werden. Die Verbindungen aller Proben versagten zwischen dem verzinkten Stahl und dem Bondinglaminat. Die Brüche verliefen vollkommen sauber, d.h. es fanden sich keine Rückstände des Laminats auf dem Stahl. Dieses Verhalten lässt auf ein geringes Haftvermögen des Laminats auf Stahl schließen.

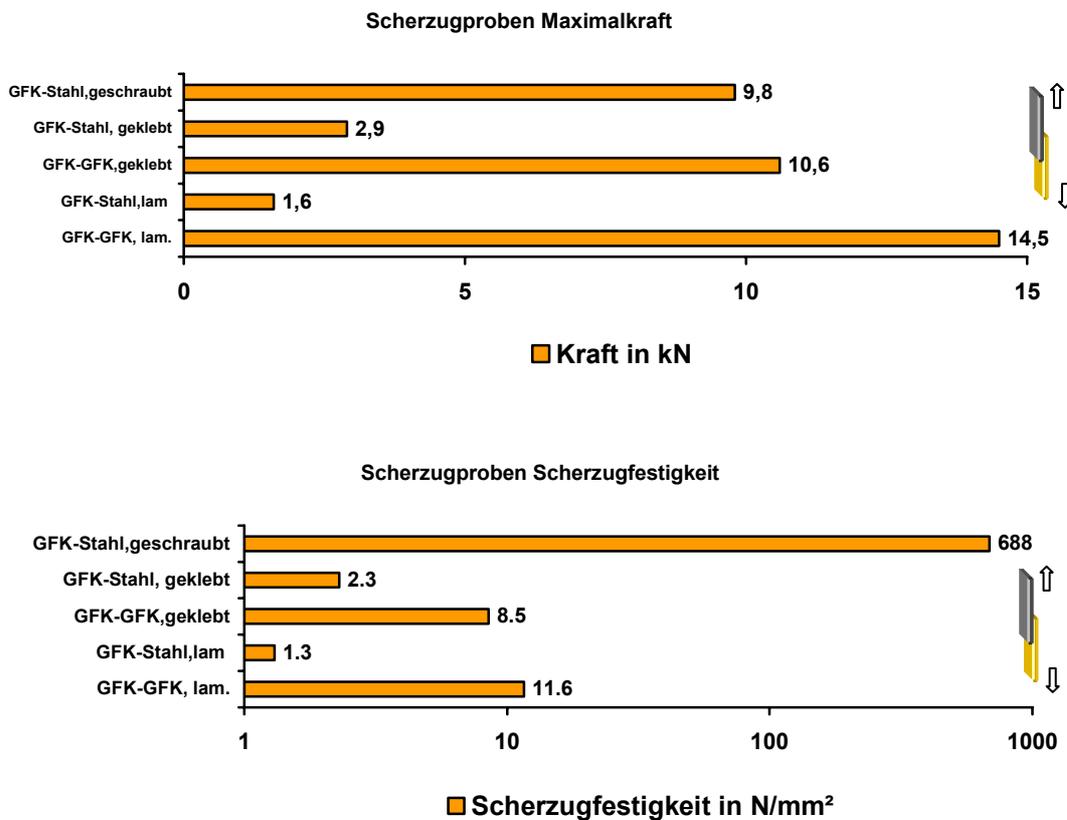


Abbildung 41: Vergleich der Scherzugproben

Die Verbindungsproben für die Verbindungsverfahren GFK-GFK, geklebt und GFK-Stahl, geklebt versagten erst bei wesentlich höheren Lasten. Dieses Verhalten ist vor allem dem verwendeten Klebstoff zuzuschreiben. Besonders die Verbindung GFK-GFK, geklebt, erreichte bei beiden Belastungszuständen annähernd die Werte der laminierten GFK-Proben. Die Scherzugfestigkeit von  $8,5 \text{ N/mm}^2$  dieser Verbindung ist im Vergleich zur angegebenen Scherzugfestigkeit des Klebstoffes von  $14,4 \text{ N/mm}^2$  um einiges geringer. Da die Proben sowohl in der Randschicht als auch im Klebstoff versagten könnte die mit 5mm, relativ dicke Klebstoffschicht der Proben, wahrscheinlich der Grund für die geringeren Werte

sein. Die mittlere Kopfbzugfestigkeit war mit  $3,5 \text{ N/mm}^2$  ebenfalls relativ nah an den Werten der laminierten GFK-Proben. Die Kopfbzugproben versagten alle an der Randschicht der GFK-Träger. Dieses Verhalten ist mit der Beschaffenheit des Laminats zu erklären. Besteht die Randschicht des GFK-Probekörpers aus einer Wirrfasermatte versagte diese Verbindung früher, als bei einer äußersten Faserschicht aus Glasfasergewebe.

Das gute Ergebnis der Kopfbzugfestigkeit mit  $3,5 \text{ N/mm}^2$  bei der Verbindung GFK-Stahl, geklebt bestätigt eine grundsätzliche Eignung dieser Technologie. Die Haftung des Klebstoffs am verzinkten Stahl war wesentlich besser als bei den laminierten Proben. Es konnte hierbei eine Abhängigkeit der Klebfestigkeit von den auf dem Stahl verbliebenen Klebstoffresten festgestellt werden. Je höher der Anteil dieser Klebstoffreste war, desto höher war die Kopfbzugfestigkeit. Durch eine Oberflächenbehandlung des Stahls ist die Festigkeit der Verbindung sicher noch zu erhöhen. Das etwas schwächere Abschneiden der Scherzugfestigkeit mit  $2,3 \text{ N/mm}^2$  ist auf die schlechten Haftungseigenschaften des Stahls zurückzuführen. Hier sollte im Rahmen von weiteren Untersuchungen, ebenfalls die Wirksamkeit anderer Oberflächenbehandlungen geprüft werden.

Die Variationskoeffizienten der Versuchsreihen waren abhängig von der Verbindung sehr unterschiedlich. Vor allem die Ergebnisse der geklebten und laminierten Verbindungsproben streuten mit Werten zwischen  $7,2 \%$  und  $27,7 \%$  sehr stark um die Mittelwerte. Grund dafür sind einerseits die vielen Einflussfaktoren wie z.B. Sauberkeit und Temperatur während der Herstellung der Verbindung, aber auch die Abhängigkeit der Materialien von deren Verarbeitung (Faserausrichtung, Mischungsverhältnis etc.). Obgleich die starke Streuung der Messwerte nach wesentlich umfangreicheren Versuchsreihen verlangt, muss diese Eigenheit der Materialien akzeptiert werden und bei der Auslegung von Verbindungen berücksichtigt werden. Die Streuung der geschraubten Scherzugproben kann mit  $2,3 \%$  als relativ gering bezeichnet werden. Da hier zum großen Teil die Schrauben der Versagensgrund waren, wurde in diesen Fällen ohnehin nur eine Scherzug- bzw. Zugfestigkeitsprüfung der Schrauben gemacht. Durch die Festigkeitsuntersuchung der verschiedenen Verbindungsproben konnten die Stärken und Schwächen jedes Verfahrens gut aufgezeigt werden.

Aus den gewonnenen Ergebnissen kann eine Bewertung der Verbindungen abgeleitet werden, welche die Grundlage für später zu treffenden Auswahlentscheidungen ist.

Abschließend kann angemerkt werden, dass die weiterhin in anderen Bootstypen verwendete Fertigungstechnologie GFK-GFK, laminiert, als belastbare Verbindung bezeichnet werden kann.

### 2.2.1.4 Auswahl geeigneter Fügeverbindungen

Die Auswahl der geeignetsten Lösungsvorschläge bedarf einerseits einer technischen Beurteilung und andererseits wirtschaftlicher Untersuchungen. Die in Abbildung 42 erstellte Beurteilungsmatrix zeigt die wichtigsten technischen Kriterien, welche mit Hilfe von gewichteten Punktzahlen bewertet werden. Die Wichtigkeit der einzelnen Kriterien wird durch die Gewichtungsziffer festgelegt. Dabei gilt, je geringer die Gewichtungsziffer, desto weniger Einfluss hat das Kriterium auf die Gesamtbewertung der Variante. Die einzelnen Punktwerte für die verschiedenen Kriterien werden nach subjektiven Gesichtspunkten verteilt. Im Anschluss werden die Punktwerte mit der Gewichtungsziffer multipliziert, um den gewichteten Punktwert eines Kriteriums zu erhalten. Die Summe aller gewichteten Punktwerte jeder Lösungsvariante ergibt die Gesamtsumme, aus der sich die Rangfolge der Varianten ableiten lässt. Die Variante mit der höchsten Gesamtpunktzahl ist den nachfolgenden Vorschlägen vorzuziehen.

																	
Technische Kriterien	Gewichtungsziffer 1-10 unwichtig - wichtig	AA411		AA111		AC711		BB111		BB411		AB411		CB511(1)		CB511(2)	
		Pkt. zahl	gew.Pkt. zahl	Pkt. zahl	gew.Pkt. zahl	Pkt. zahl	gew.Pkt. zahl	Pkt. zahl	gew.Pkt. zahl	Pkt. zahl	gew.Pkt. zahl	Pkt. zahl	gew.Pkt. zahl	Pkt. zahl	gew.Pkt. zahl	Pkt. zahl	gew.Pkt. zahl
Festigkeit der Verbindung	10	9	90	5	50	6	60	4	40	4	40	5	50	9	90	9	90
Korrosionsbeständigkeit	8	10	80	10	80	8	64	10	80	8	64	9	72	8	64	8	64
Montagefreundlichkeit	7	3	21	3	21	2	14	6	42	5	35	3	21	5	35	6	42
Lösbarkeit der Verbindung	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	21	10	30
keine Vorarbeiten	6	8	48	8	48	7	42	8	48	5	30	5	30	6	36	6	36
keine Nacharbeiten	7	9	63	9	63	5	35	9	63	7	49	7	49	6	42	6	42
Alterungsbeständigkeit	5	8	40	6	30	5	25	8	40	6	30	7	35	6	30	6	30
hohe Prozesssicherheit	5	5	25	5	25	5	25	7	35	6	30	5	25	7	35	7	35
Schwierigkeitsgrad Fertigung	8	5	40	7	56	5	40	8	64	5	40	4	32	5	40	6	48
Summe der gewichteten Punktwerte		407		373		305		412		318		314		393		417	
Rangfolge der Lösungsvorschläge		3.		5.		8.		2.		6.		7.		4.		1.	

Abbildung 42: Wertungstabelle geeigneter Lösungsvorschläge

Die technische Beurteilung der verschiedenen Lösungsvorschläge beinhaltet verschiedene Kriterien wie „Festigkeit“, „Korrosionsbeständigkeit“, „Montagefreundlichkeit“ etc..

Punkte wie „Vorarbeiten“ und „Nacharbeiten“ beschreiben das Ausmaß an zusätzlichen Tätigkeiten wie z.B. Reinigen der Oberflächen, Vorbohren von Löchern oder Einschrauben von Befestigungsmaterialien. Das Kriterium Prozesssicherheit beschreibt, inwieweit die fehlerfreie Herstellung der einzelnen Varianten durch Einschränkungen wie z.B. Fertigungsungenauigkeiten, Verarbeitungsschwierigkeiten usw. gefährdet ist. Mit dem Kriterium „Schwierigkeitsgrad Fertigung“ wird der technische Anspruch zur

Verbindungsherstellung beschrieben. Alle Bewertungen sind so zu verstehen, dass gute Eigenschaften hoch bewertet werden und schlechtere niedrig bewertet werden. Als optimale Verbindung ist letztendlich die Lösung mit der höchsten Punktzahl zu betrachten, da sie die technischen Anforderungen am besten erfüllt.

Die aus den acht Möglichkeiten ermittelte theoretische Optimallösung ist die Lösungsvariante CB511(2) welche mit 417 Punkten vor der Variante BB111 (412 Pkte.), Variante AA111 (407 Pkte.) und Variante CB511(1) (393 Pkte.) liegt. Für eine detaillierte Beurteilung der Varianten werden die aus Tabelle 6 ermittelten ersten beiden Lösungsvorschläge CB511(2), BB111 sowie die Lösung AA411 genauer betrachtet. Darüber hinaus wird auch die ursprüngliche Lösung mit anlaminiertem GFK-Rückgrat (vergleichbar mit Variante AA111, jedoch mit GFK-Rückgrat anstelle des Stahlrückgrates) genauer untersucht. Die derzeitigen Verfahren müssen herangezogen werden, um eine Vergleichsmöglichkeit zu den neuen Lösungen zu erhalten.

## **2.2.2 Spezifizierung der Fügetechnologie durch Ermittlung der Kennwerte und Vergleich der Varianten**

### **2.2.2.1 Zugversuche an Bauteilproben**

Zur Ermittlung der Kennwerte wurden Bauteilproben entsprechend der Rangfolge nach Abbildung 42 entwickelt und im Zugversuch geprüft. Bei der Dimensionierung der Fügestelle wurde von einer Flanscbreite von 50 mm ausgegangen. Das entspricht der Mindestflanscbreite für das Anlaminieren eines Hutprofils an den Rumpf. Kantenlaminat nach [2]. Die Bauteilproben bilden die exakte Geometrie der Rumpf-Rückgratverbindung ab und ermöglichen so genauere Aussagen über die Festigkeiten der verschiedenen Verbindungen. Folgende Varianten werden geprüft:

- Überlaminierter feuerverzinkter Stahlträger AA411
- geklebter feuerverzinkter Stahlträger BB111
- Geschraubt und geklebter feuerverzinkter Stahlträger CB511

Die Variante AA411 ist gekennzeichnet durch ein Aufkleben des Stahlträgers auf das Außenhautlaminat, ein Ausformen der Kehle mit Klebstoff und anschließendem

Überlaminieren mit 6 Lagen Bondinglaminat. Der Probenaufbau ist dargestellt in Bild Abbildung 43.

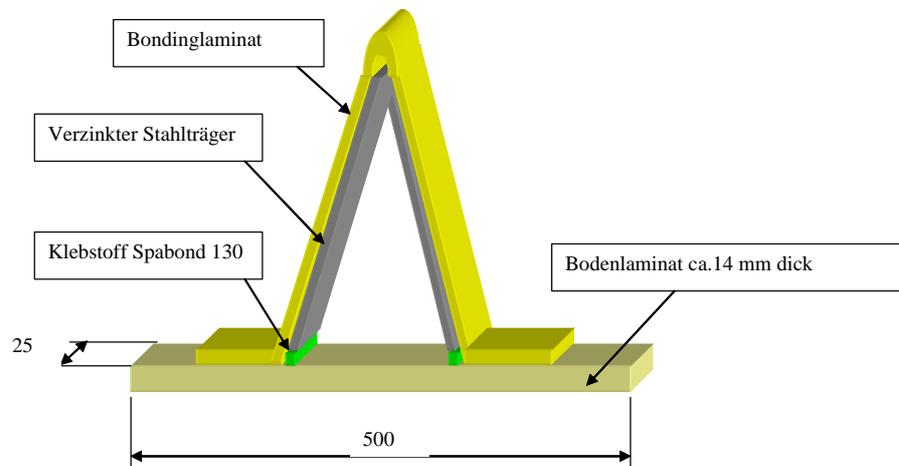


Abbildung 43: Versuchsaufbau der Bauteilprobe AA41

Diese Probeform wird in zwei Ausführungen geprüft:

- Laminiert wie in der Praxis üblich
- Bondinglaminat an der Außenhaut bei 50mm Flanschbreite getrennt

Variante BB111 ist gekennzeichnet durch einen beidseitig am Träger angeschweißten Flansch mit 50 mm Breite, welcher ganzflächig an das Außenhautlaminat geklebt wird. Dargestellt ist diese Variante auf Bild Abbildung 44

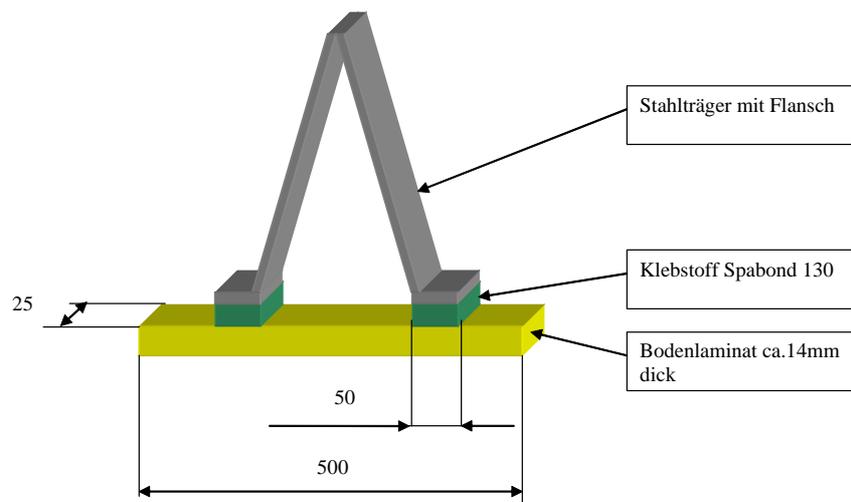


Abbildung 44: Versuchsaufbau der Bauteilprobe BB111

Variante CB511 ist gekennzeichnet durch einen angeschweißten Flansch, an welchen ein GFK –Pad geschraubt wird .Dabei sind die Bohrungen schon vor dem Verzinken eingebracht worden. Das GFK –Pad wird vorzugsweise mit gewindeformenden Schrauben angeschraubt. Anschließend wird das Rückgrat an den Kontaktpunkten in den Rumpf geklebt. Dabei werden unterschiedliche Luftspalte zwischen GFK-Pad und Rumpf durch den Klebstoff ausgeglichen. Dargestellt ist diese Variante auf Abbildung 45

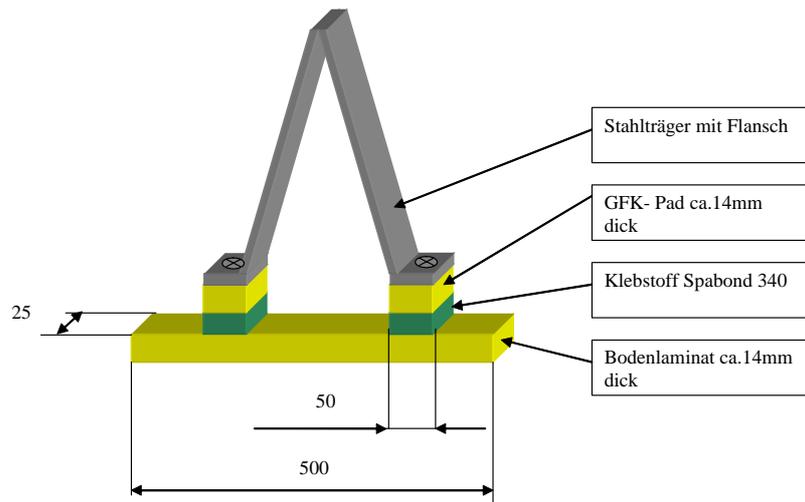


Abbildung 45: Versuchsaufbau der Bauteilprobe CB511

Die Varianten der Trägerbefestigung wurden im Zugversuch auf der Prüfmaschine Z 400 E geprüft. Die Breite der Einzelprobe wurde auf 25mm (Breite der Basisproben) festgelegt. Abbildung 46 zeigt die Einspannung der Probe in der Prüfmaschine. Dabei ist die Probe in eine Vorrichtung eingespannt. Im Zugversuch wird die Probe dann bis zum Bruch belastet. Dabei wird der Kraftverlauf über den Traversenweg aufgenommen. Ein Abbruch des Versuchs erfolgt bei einem Kraftabfall auf 80 % der Maximalkraft. Für eine Serie wird der Mittelwert der Maximalkraft, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient dokumentiert.



Abbildung 46: Versuchsaufbau: die Bauteilprobe in der Prüfmaschine

### 2.2.2.1.1 Überlaminierter feuerverzinkter Stahlträger AA411 (Praxisausführung)

Die Maximalkraft der Einzelproben der Variante AA411 sowie der Traversenweg sind in Abbildung 47 erfasst. Zum Vergleich der einzelnen Serien wurde weiterhin der Mittelwert der Maximalkraft für die Serie AA4111 von 6,16 kN ermittelt.

Probenrnr	Maximalkraft in kN	Maximallänge in mm	Versagensart	Legende
1	6,40	1,95	Verbindungselement	□
2	6,46	1,87	Verbindungselement	□
3	6,75	2,10	Verbindungselement	□
4	4,79	1,48	Verbindungselement	□
5	6,37	1,63	Verbindungselement	□
6	6,18	1,68	Verbindungselement	□
Statistik:				
$\bar{x}$	<b>6,16</b>	<b>1,78</b>		
s	<b>0,70</b>	<b>0,23</b>		
$v$ [%]	<b>11,31</b>	<b>12,82</b>		

Abbildung 47: Tabelle der Versuchsergebnisse der Bauteilprobe AA411(praxisnah)

Der Verlauf der Zugkraft über den Weg ist in Abbildung 48: links - Bruchverhalten der Bauteilprobe; rechts - dargestellt. Dabei zeigt der Kraftverlauf einen linearen Anstieg bis zum Bruch einer der beiden Verbindungen des überlaminierten Trägers zum Rumpf. Ein plötzlicher Kraftabfall ist die Folge, wobei im weiteren Verlauf deutlich die zweite Verbindung zum Tragen kommt. Plötzliche Kraftabfälle von 50 – 100 N, die in der Diagrammkurve als Pik deutlich werden, deuten auf ein Brechen der Stahl – Klebe – Verbindung hin, bevor die Laminat – GFK Verbindung zum Tragen kommt. Damit ist es schwierig, ein eindeutiges Bruchkriterium festzulegen und deshalb wurde die Maximalkraft als Kriterium für die Festigkeit der Verbindung gewählt. Der Bruch erfolgte an der Kontaktstelle Bondinglaminat – Außenhautlaminat (Abbildung 48)

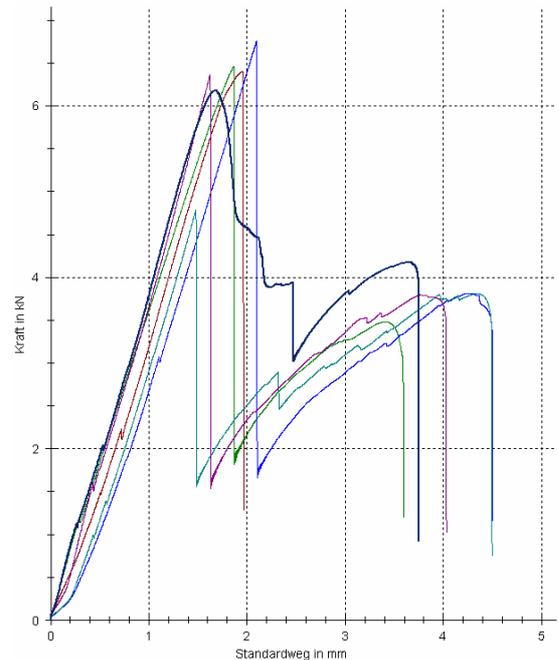
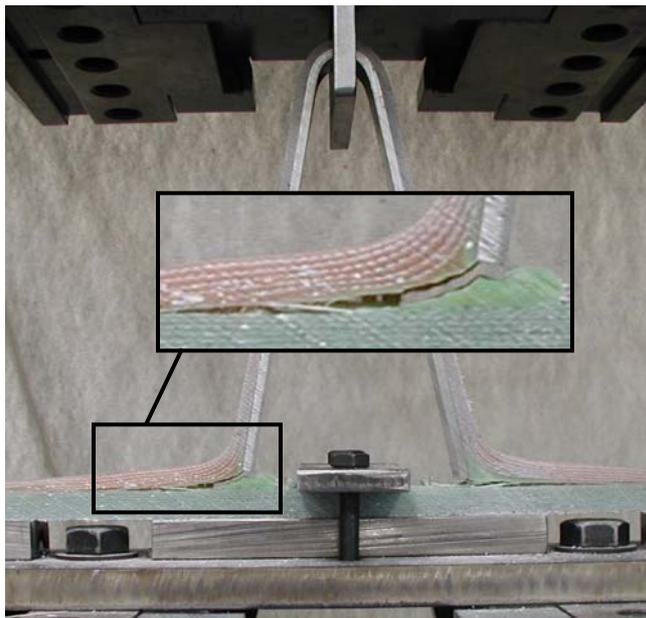


Abbildung 48: links - Bruchverhalten der Bauteilprobe; rechts - Kraft - Weg - Diagramm des Versuchs

### 2.2.2.1.2 Überlaminierter feuerverzinkter Stahlträger AA411 (geschnitten)

Probenrnr	Maximalkraft in kN	Maximallänge in mm	Versagensart	Legende
1	5,83	1,85	Verbindungselement	□
2	5,72	1,95	Verbindungselement	□
3	7,11	1,98	Verbindungselement	□
4	7,75	2,69	Verbindungselement	□
5	6,35	2,19	Verbindungselement	□
6	5,54	1,62	Verbindungselement	□
Statistik:				
$\bar{x}$	<b>6,38</b>	<b>2,05</b>		
s	<b>0,88</b>	<b>0,36</b>		
$v$ [%]	<b>13,74</b>	<b>17,78</b>		

Abbildung 49: Tabelle der Versuchsergebnisse der Bauteilprobe AA411(geschnitten)

Bei dieser Serie ist ein ähnlicher Kraft – Weg – Verlauf wie bei der Serie Praxisausführung zu erkennen. Der Mittelwert der Maximalkraft von 6,38 kN stellt sich bei einem mittleren Traversenweg von 2,05 mm ein. (Abbildung 49) Auch hier sind die Pik in den Kraftanstiegen deutlich sichtbar. Nach dem Bruch einer der beiden Verbindungen erfolgte ein Kraftabfall auf 80 % des Maximums. Der Bruch erfolgte an der Kontaktstelle Bondinglaminat – Außenhautlaminat (Abbildung 50).

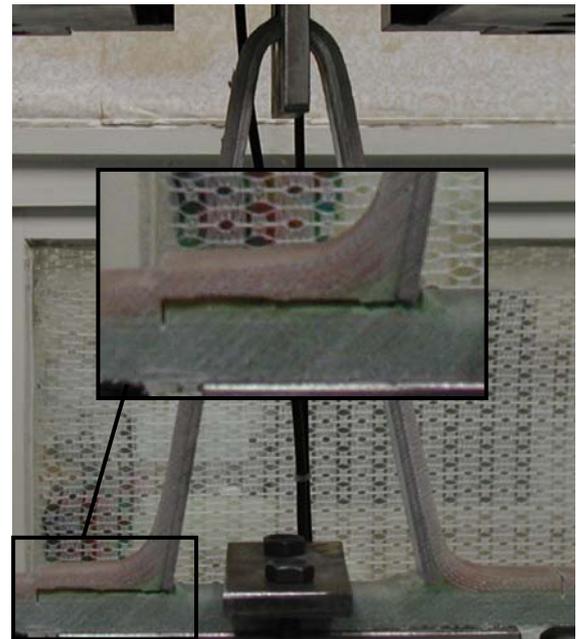
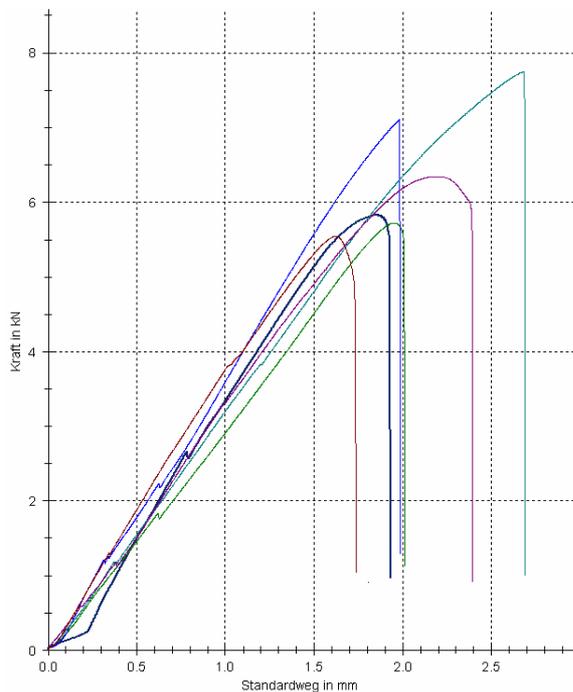


Abbildung 50: Kraft - Weg - Diagramm des Versuchs (links); Bruchverhalten der Bauteilprobe (rechts)

### 2.2.2.1.3 geklebter feuerverzinkter Stahlträger BB11

Probenrnr	Maximalkraft in kN	Maximallänge in mm	Versagensart	Legende
1	2,27	0,83	Verbindungselement	□
2	3,79	1,24	Verbindungselement	□
3	2,55	0,75	Verbindungselement	□
4	3,79	1,05	Verbindungselement	□
5	3,13	1,01	Verbindungselement	□
6	4,49	1,16	Verbindungselement	□

Statistik:		
$\bar{x}$	<b>3,34</b>	<b>1,01</b>
s	<b>0,84</b>	<b>0,19</b>
$v[\%]$	<b>25,13</b>	<b>18,81</b>

Abbildung 51: Tabelle der Versuchsergebnisse der Bauteilprobe BB111

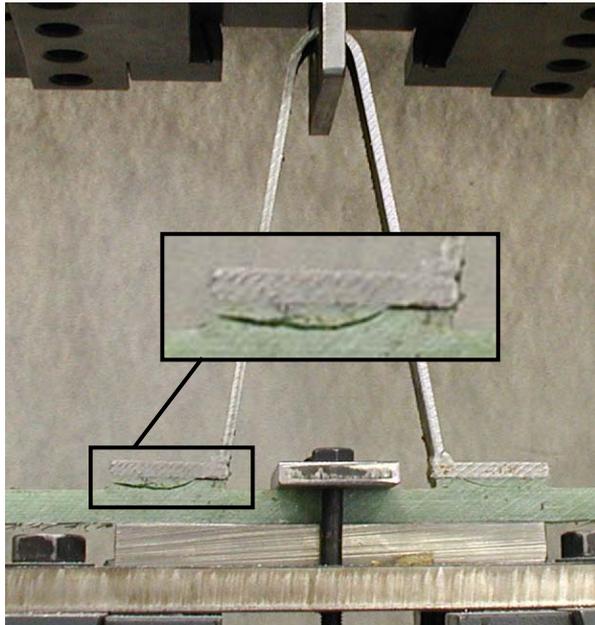


Abbildung 52 links -: Bruchverhalten der Bauteilprobe

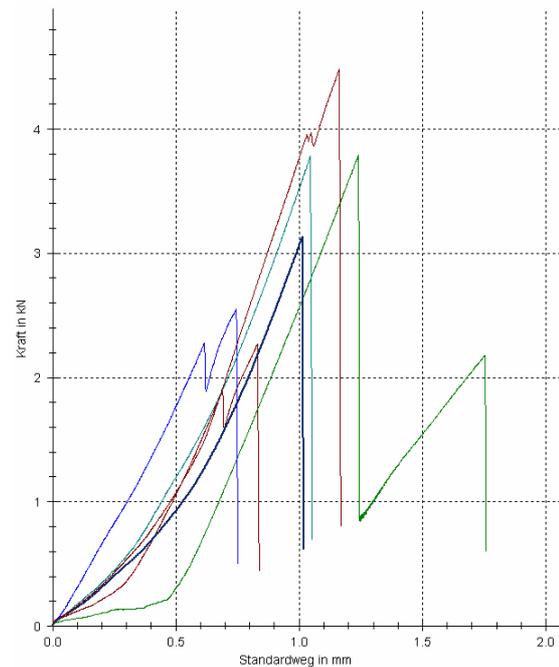


Abbildung 53:rechts - Kraft - Weg - Diagramm des Versuchs

Für die Serie wurde eine mittlere Maximalkraft von 3,34 kN bei einem Traversenweg von 1,01 mm ermittelt (Abbildung 51). Der Anriß erfolgte an der Verbindung Klebstoff – Stahl. Die Rissausbreitung erfolgte teilweise durch den Klebstoff (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die hohe Streuung der einzelnen Diagrammkurven macht deutlich, dass die Rissfortschreitung nach dem Anriß sehr unterschiedlich verlaufen kann (Abbildung 52 links -: Bruchverhalten der Bauteilprobe

Abbildung 53). Das ist zurückzuführen auf die Probenvorbereitung (Reinigung des verzinkten Stahls) und auf die Ausführung der Klebung in der Kehle.

### 2.2.2.1.4 Geschraubt und geklebter feuerverzinkter Stahlträger CB511

Probenr	Maximalkraft in kN	Maximallänge in mm	Versagensart	Legende
1	6,21	2,49	Verbindungselement	□
2	8,71	3,12	Verbindungselement	□
3	7,14	2,50	Verbindungselement	□
4	7,40	1,73	Verbindungselement	□
Statistik:				
$\bar{x}$	<b>7,36</b>	<b>2,46</b>		
s	<b>1,03</b>	<b>0,57</b>		
$v[\%]$	<b>13,99</b>	<b>23,24</b>		

Abbildung 54: Tabelle der Versuchsergebnisse der Bauteilprobe CB511

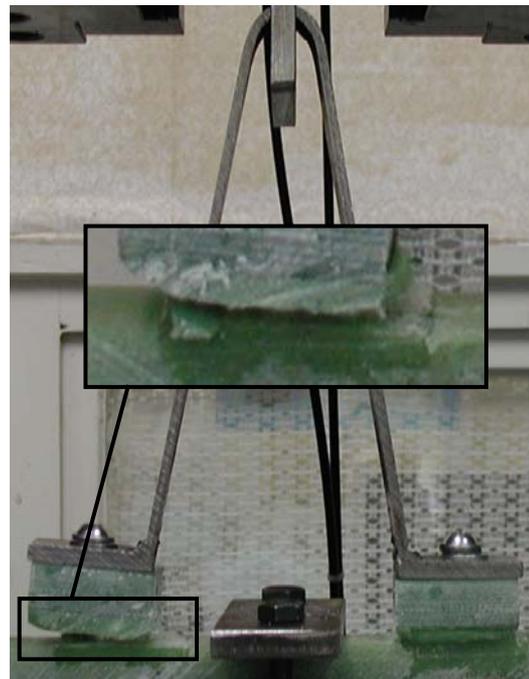
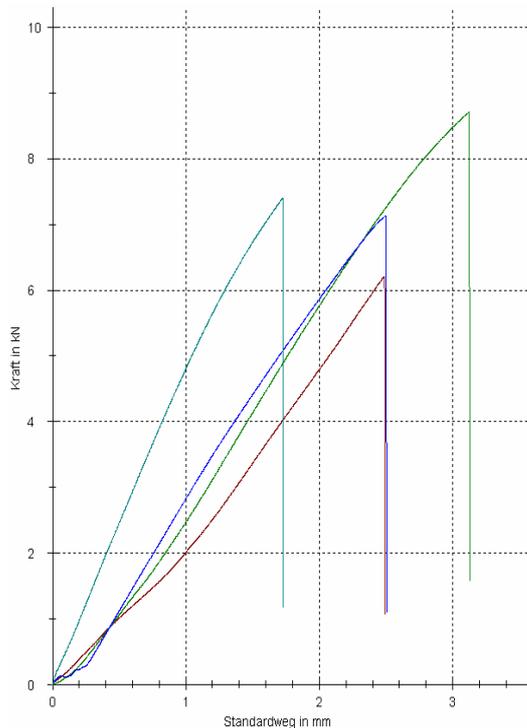


Abbildung 55: Kraft - Weg - Diagramm des Versuchs (links); Bruchverhalten der Bauteilprobe (rechts)

Für die Serie wurde eine mittlere Maximalkraft von 7,36 kN bei einem Traversenweg von 2,46 mm ermittelt. (Abbildung 54) Es erfolgt ein gleichmäßiger Kraftanstieg bis zum Bruch der Klebverbindung. Es ist kein Anriß erkennbar, die Verbindung bricht sofort. Der Bruch

erfolgt an der Verbindungsfläche angeschraubtes GFK-Pad – GFK-Außenhaut. Die Schraubverbindung blieb fest. (Abbildung 55)

### 2.2.2.2 Vergleich der Bauteilproben

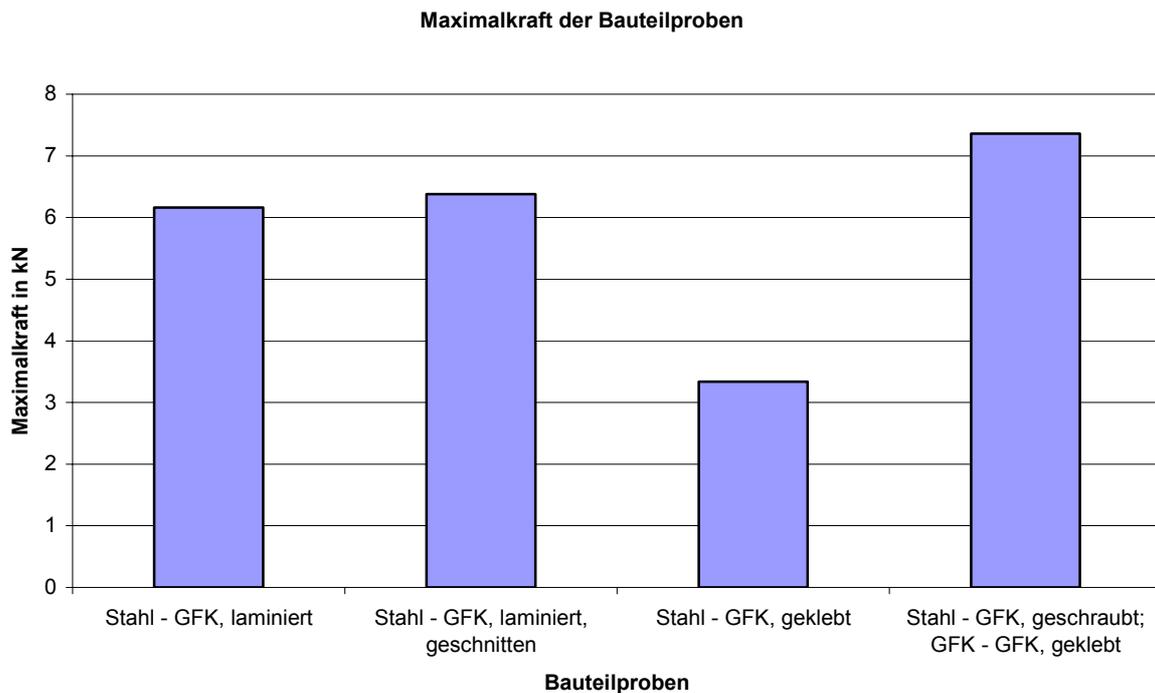


Abbildung 56: Vergleich der erfaßten mittleren Maximalkraft der einzelnen Bauteilproben

In

Abbildung 56 sind die mittleren Maximalkräfte der einzelnen Serien gegenübergestellt. Danach trägt die Verbindung Stahl geschraubt – GFK geklebt die größte Kraft. Die Variante Stahl- GFK, geklebt trägt weniger als 50 % der ersteren Variante. Die überlaminierten Varianten tragen etwa 85 %. Im Vergleich der beiden Varianten Stahl – GFK, laminiert kann festgestellt werden, dass sie annähernd gleich belastbar sind, also kein Vorteil in einer Flanschbreite von >50mm besteht. Die Streuung der Einzelproben ist relativ hoch. Das lässt darauf schließen, dass subjektive Einflüsse bei den Verfahren Laminieren und Kleben von Bedeutung sind. Die hohe Streuung der Verbindung Stahl – GFK, geklebt ist zurückzuführen auf die Probenvorbereitung (Reinigung des verzinkten Stahls) und auf die Ausführung der Klebung in der Kehle.

Um einen Zusammenhang zwischen Messung und Rechnung herzustellen, werden die an den Verbindungen auftretenden Normalspannungen berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass, obwohl bei der Prüfung der Bauteilproben immer nur eine Seite gebrochen war, die Kraft bis zum Bruch von beiden Auflagern gleichwertig aufgenommen wurde. Deshalb wird zur Spannungsberechnung die Fläche beider Auflagern in die Berechnung miteinbezogen. Ermittelt wird dann die mittlere Spannung, ausgehend von einer Gleichverteilung über die Verbindungsfläche. Die Ergebnisse der Spannungsberechnung sind in Abbildung 57 dargestellt.

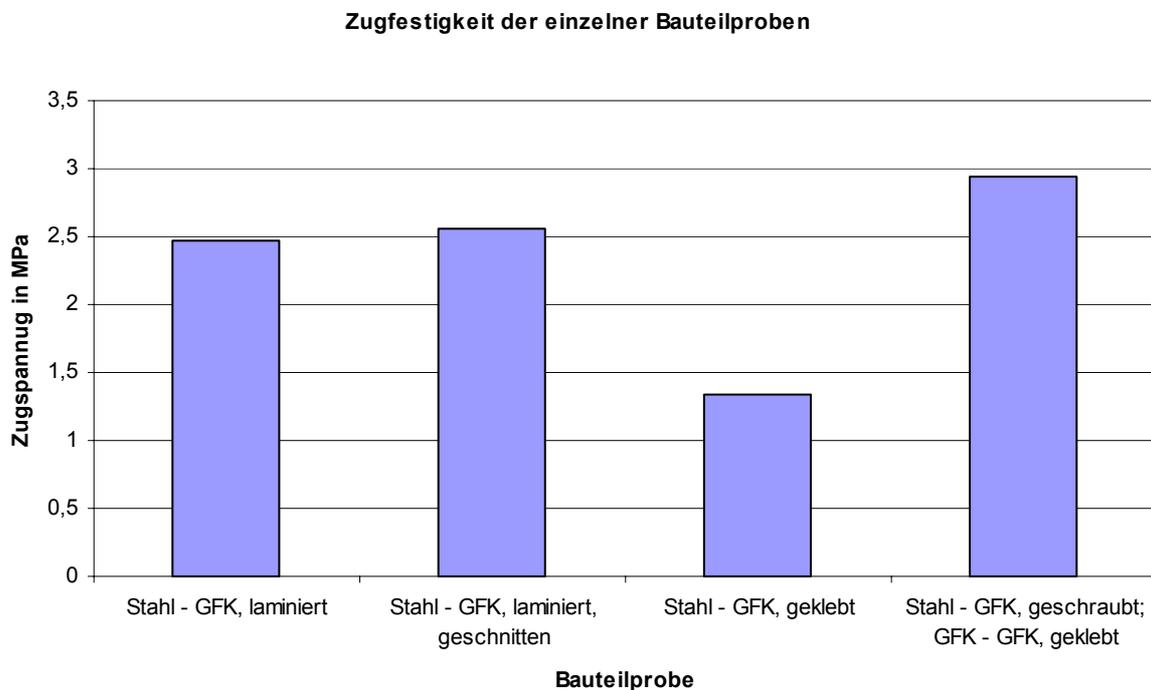


Abbildung 57: Vergleich der berechneten Zugspannung der Bauteilproben

### 2.2.3 Betriebswirtschaftliche Untersuchung ausgewählter Fügevarianten

Eine betriebswirtschaftliche Betrachtung der unterschiedlichen ausgewählten Fügevarianten wird in [13] vorgenommen. Zielstellung ist der wirtschaftliche Vergleich bei Einbau der GFK – Rückgratvariante zur Stahl-Variante. Außerdem werden bezüglich der Stahlvariante die technisch höchstbewerteten Anbindungsvarianten Variante AA411 (Überlaminieren), BB111 (Kleben) und CB511(2)(Kleben und Schrauben) untersucht. Dabei bezieht sich die

Kostenrechnung auf einen Vergleich der Fertigungskosten für den Einbau des Rückgrates einschließlich der Kosten für das Rückgrat. Die Fertigungskosten konnten aufgrund einer Analyse des Fertigungsablaufes auf Basis der Fertigungszeit und mit Hilfe von Angaben des Yachtherstellers ermittelt werden. Trotz relativ grober Angaben über Materialverbrauch und Fertigungszeiten, welche dem Handauflegeverfahren geschuldet sind, konnten Kostenunterschiede zwischen den Varianten ermittelt werden. Einen herausragenden Kostenvorteil von ca. 40% (Abbildung 58) bietet schon die Substitution des im Handauflegeverfahren aufwendig herzustellenden Rückgrates.

Die modifizierten Varianten des Rückgrates für die alternativen Fügeverfahren können trotz geringer Mehrkosten den großen Kostenvorteil gegenüber dem GFK-Teil erhalten.

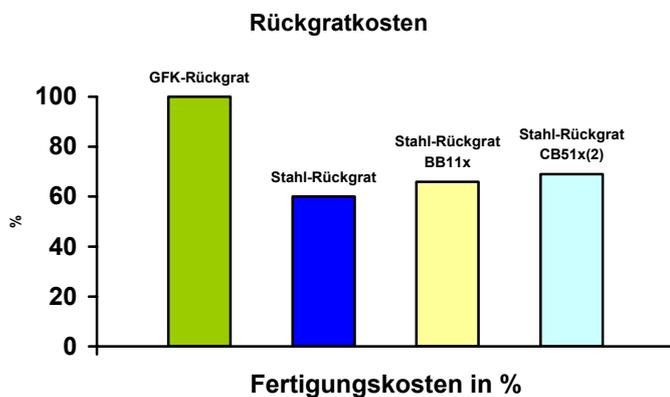


Abbildung 58: Fertigungskosten Rückgrat

Der Kostenvergleich in Tabelle 7 verdeutlicht die zum Teil erheblichen Kostenunterschiede der verschiedenen Fügeverfahren. Der Vergleich beschränkt sich auf die Betrachtung der Haupteinflussfaktoren bei der Kostenentstehung. Dazu gehören die Herstellungskosten für das Rückgrat, die Materialkosten des benötigten Materials, der Fertigungslohn ausgehend von den Fertigungszeiten, die Sondereinzelkosten der Fertigung sowie die anfallenden Abschreibungskosten. Andere Kostenarten haben nur sehr geringen Einfluss auf die Verbindungskosten bzw. ändern sich nicht bei einem Verfahrenswechsel.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Variante Stahl, geklebt mit 17,7% Kostenersparnis gegenüber der derzeit verwendeten Variante Stahl, überlaminiert die günstigste Alternative. Durch den Wechsel vom GFK-Rückgrat zum Stahlrückgrat konnte bereits eine Ersparnis von 46,3% realisiert werden.

	GFK, anlaminiert	Stahl, überlaminiert	Stahl, angeklebt	Stahl, geschraubt +geklebt
<b>Rückgratkosten</b>				
	3328 € <sup>1</sup>	2000 € <sup>1</sup>	2200 € <sup>2</sup>	2300 € <sup>2</sup>
<b>Materialkosten</b>				
Laminat	220 € (100 kg) <sup>1</sup>	264 € (120 kg) <sup>1</sup>		
Klebstoff	240 € (60 kg) <sup>1</sup>	200 € (50 kg) <sup>1</sup>	120 € (30kg) <sup>2</sup>	100 € (25kg) <sup>2</sup>
Schrauben				90 € (300 Stck.) <sup>2</sup>
GFK-Streifen				132 € (60 kg) <sup>2</sup>
<b>Fertigungslohn</b>				
	630 € (42 h) <sup>1</sup>	600 € (40 h) <sup>1</sup>	195 € (13 h) <sup>2</sup>	390 € (26 h) <sup>2</sup>
<b>Abschreibungs- und Sonderkosten<sup>2</sup></b>				
Laminierform	70 €			
Andrückvorrichtung	10 €	10 €	10 €	10 €
Arbeitsschutz und Hilfsmittel	30 €	20 €	20 €	20 €
Werkzeuge (Schrauber)				10 €
<b>Gesamtkosten</b>	<b>4528 €</b>	<b>3094 €</b>	<b>2545 €</b>	<b>3052 €</b>
<b>Ersparnis</b>	<b>-1434 €</b>	<b>0 €</b>	<b>549 €</b>	<b>42 €</b>
<b>Ersparnis in %</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>17,7%</b>	<b>1,4%</b>

<sup>1</sup> - vom YZG zur Verfügung gestellte Daten

<sup>2</sup> - durch Annahmen erstellte Daten

Abbildung 59: Kostenvergleich der Rückgratverbindungen

Die Alternativlösung Stahl, geschraubt und geklebt, ist mit einem Kostenvorteil von 1,4% etwa gleich teuer wie die derzeitige Lösung. Anstelle einer flächigen Befestigung des Rückgrates könnte durch eine punktuelle Anbindung zusätzlich Fertigungszeit und -material eingespart werden. Die Reduzierung auf 150 Schrauben, würde unter Berücksichtigung der eingesparten Materialien, der verringerten Fügezeit von 4,3 h und den geringeren Rückgratkosten von ca. 50 Euro zu Gesamtkosten von 2772 Euro führen. Das würde eine Kostenersparnis von 10,4% bedeuten. Ein Wechsel des Verfahren wäre in diesem Fall sinnvoll.

Da die Fertigung der Verbindungen fast vollständig durch Handarbeit gekennzeichnet ist, ist im Hinblick auf weiterhin steigende Löhne vor allem die Fertigungsvariante Stahl-geklebt besonders interessant, da sie den mit Abstand geringsten Anteil an Fertigungszeit in Anspruch nimmt. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den hier dargestellten Kosten für die alternativen Fügemethoden, nur um Schätzungen handelt.

Die Auswertung der prozentualen Anteile von primären und sekundären Fertigungsvorgängen, sowie Transport und Handhabungsanteilen der einzelnen Lösungen, lassen Rückschlüsse auf die Herstellungsabläufe zu. Bis auf die Variante Stahl, geschraubt und geklebt, sind die Anteile der primären Tätigkeiten zwischen 61% und 62%. Diese Arbeiten können weder zeitlich noch örtlich vom Fügevorgang getrennt werden, so dass

gerade diese Anteile, zeit -und kostenbestimmend für die Verfahren sind. Anders ist der Fall bei den sekundären Tätigkeitsanteilen. Diese können teilweise aus der laufenden Produktion ausgegliedert werden, wie z.B. die Herstellung von GFK-Streifen oder das Anschrauben der GFK-Streifen an das Rückgrat.

Der Fügevariante Stahl, geschraubt und geklebt, hat mit ca. 12% einen relativ hohen Anteil an Transport -und Handhabungsvorgängen. Diese Eigenschaft bestätigt den Mehraufwand an Arbeit bei kombinierten Fügeverfahren. Eine Senkung dieses Anteils durch Fremdvergabe einzelner Arbeitsschritte würde sich kostensenkend auswirken.

## 2.3 Fe – Belastungsanalyse von GFK – Rumpf und Stahl – Rückgrat

### 2.3.1 Ermittlung der Spannungen im Längsträger (Beispiel Spannung $\tau_{zx}$ )

Parallel zu den Bauteilversuchen und der Ermittlung der Kostenstruktur der Varianten A;B;C wurde durch den Projektpartner Techno Trans nach einer Belastungsanalyse (Pkt. 2.1.4.5) eine FE- Spannungsberechnung durchgeführt. Ziel ist die Berechnung der Spannungen  $\sigma_z$ ,  $\tau_{zx}$  und  $\tau_{zy}$  an der Verbindung des Rückgrates zum Rumpf. Dabei erfolgte die FE-Modellierung der Spannungsverteilung im Rückgrat (Abbildung 60 links) und in der Rumpfhülle (Abbildung 61 rechts) bei maximalen äußeren Belastungen (Riggposition erzeugt maximale Kräfte in den Vor- und Achterstagen sowie der Luv- Wante)

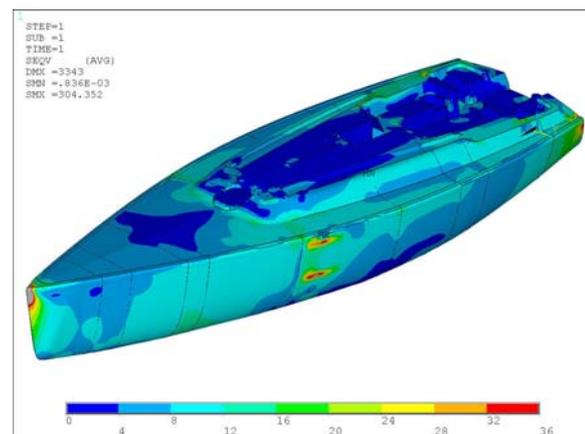
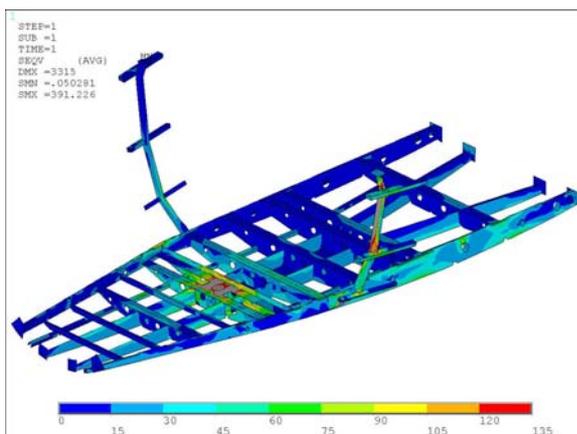


Abbildung 60 (links): FE- Modellierung der Spannungsverteilung im Rückgrat

Abbildung 61(rechts): FE- Modellierung der Spannungsverteilung in der Rumpfhülle

Für das Modell Abbildung 60 wurden Schalenelemente angesetzt, so dass eine linienförmige Kraftübertragung der in den Rumpf eingeleiteten Kräfte realisiert wurde. Die Kraftübertragung erfolgte somit über Knotenpunktpfade an der Verbindungsstelle Rückgrat-

Rumpf. Um die Spannung im Träger und in der Außenhaut zu berechnen, wurden zusätzliche Pfade in 50 mm Abstand von der Fügestelle eingerichtet (Abbildung 62). Die Anordnung des ausgewählten Trägers im Rückgrat zeigt Abbildung 63. Berechnet werden die Schubspannungen  $\tau_{zx}$  und  $\tau_{zy}$  entlang des Pfades 3.

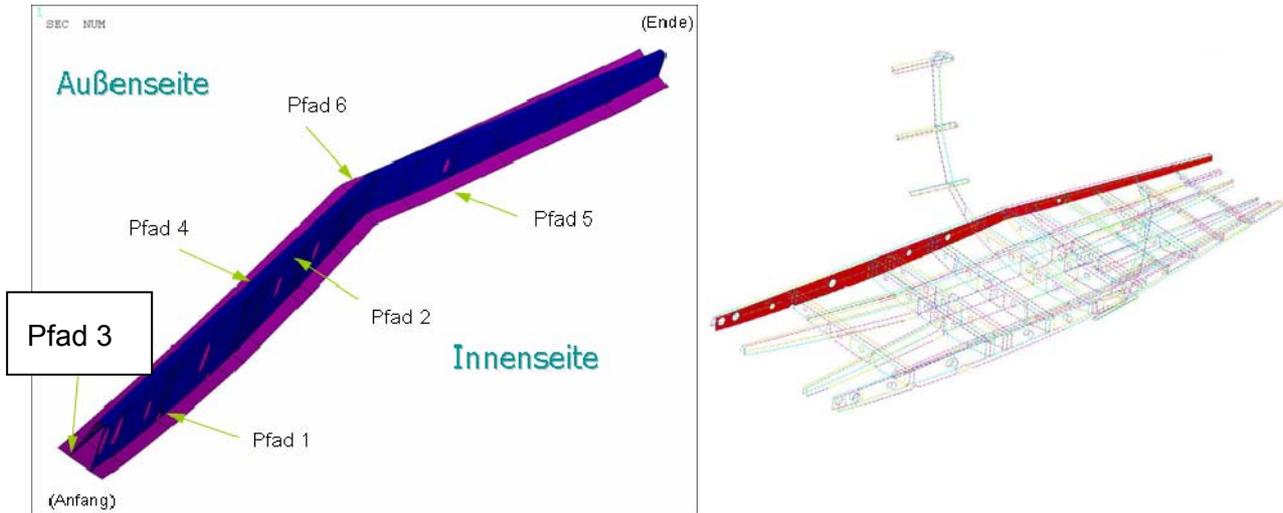


Abbildung 62(links): Festlegung der Knotenpunktpfade am äußeren Träger zur Berechnung der Spannungen im Träger, in der Außenhaut und an der Fügestelle Träger-Außenhaut

Abbildung 63(rechts): Position der ausgewählten Elemente des äußeren Trägers im Rückgrat

Abbildung 64 zeigt den Verlauf der Spannung  $\tau_{zx}$  über die Länge des äußeren Trägers an der Verbindungsstelle (Pfad 3). Bei Betrachtung dieses einen Knotenpfades kann  $\tau_{zy}$  kann nur im Laminate berechnet werden.

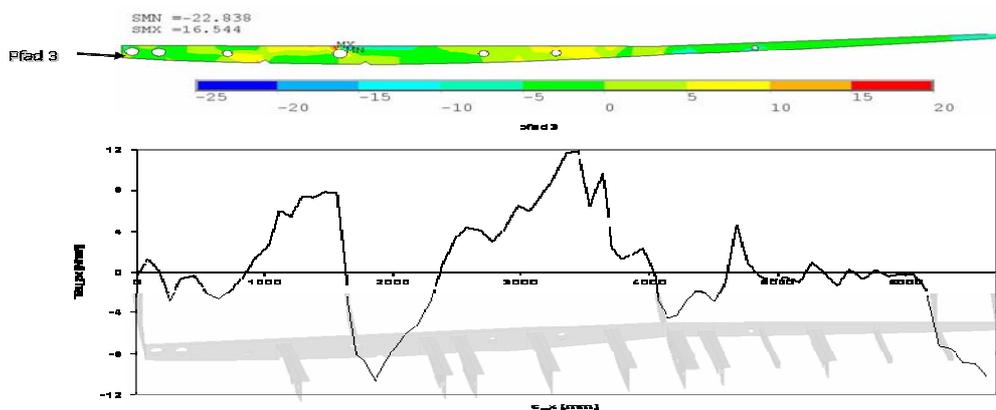


Abbildung 64: Verlauf der Spannung  $\tau_{zx}$  über die Länge des Trägers

### 2.3.2 Vergleich der experimentell ermittelten Scherfestigkeiten der Verbindungsvarianten als Basisproben mit berechneten Schubspannungen bei durchgängiger Verbindung

Die berechneten Maximalspannungen  $\tau_{zx}$ , im Träger und im Laminat und  $\tau_{zy}$  im Laminat wurden aus den Spannungsverläufen ermittelt und sind in Tabelle Abbildung 66 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Schubspannungen auf den Innenseiten des Trägers größer sind als auf der Außenseite.  $\tau_{zy}$  bewegt sich im Bereich von -17 MPa (Stahl) bis +2 MPa (GFK).

Ein Vergleich der berechneten Spannungen  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{zy}$  erfolgt mit gemessenen Spannungen aus dem Scherzugversuch der Basisproben (Abbildung 65). Geht man von den Spannungen im Laminat aus, können diese von der Verbindung GFK- GFK laminiert (entspr. dem überlamierten Träger), GFK- GFK geklebt und der geschraubten Verbindung aufgenommen werden. Die Varianten GFK-Stahl laminiert und GFK-Stahl geklebt erfüllen nicht die Anforderungen an der Verbindungsstelle bei durchgängiger Anbindung.

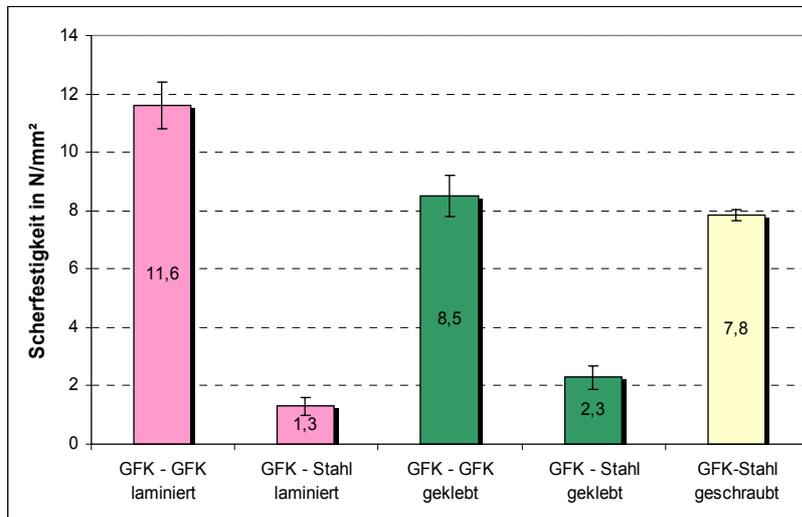


Abbildung 65: Vergleich der Scherfestigkeit der Basisproben

Flächige Anbindung		Tau zx Träger		Tau zx Außenhaut		Tau zy Außenhaut:	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
Äußerer Langträger	Außenseite	12	-11	1,9	-1	4	-1
	Innenseite	12	-17	2,1	-1	4,5	0

Abbildung 66: die Maximalkräfte der Proben

### 2.3.3 Vergleich der experimentell ermittelten Scherfestigkeiten der Verbindungsvarianten als Basisproben mit berechneten Schubspannungen bei lokaler Anbindung

Eine örtliche Befestigung des Trägers am Rumpf durch z.B. Laschen wird in der Berechnung durch stahlverstärkte Segmente in der Größenordnung von 50 x 50 mm<sup>2</sup> realisiert. Diese Punkte werden alle 500 mm gesetzt (orange Quadrate)(Abbildung 67). Als Ergebnis der

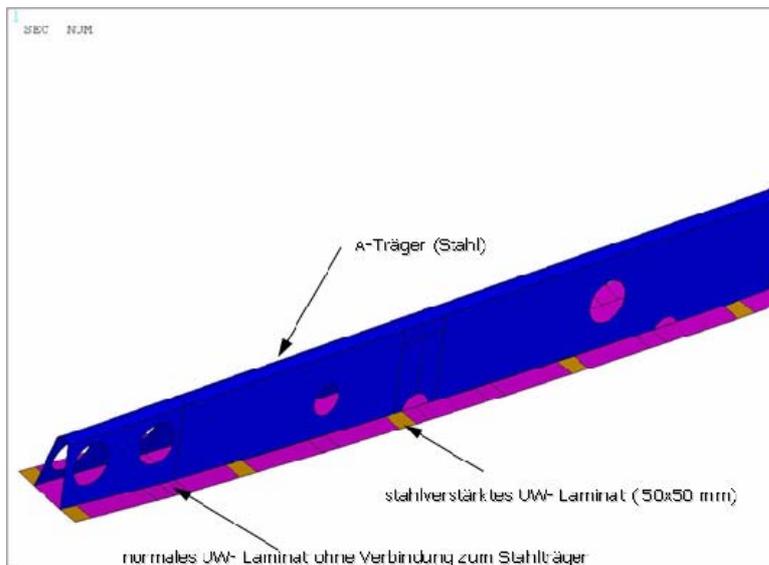


Abbildung 67: Verbindung des Rückgrates an den Rumpf mittels Flanschen

Berechnung ergibt sich folgendes Spannungsbild: Abbildung 68. Die Extremwerte der

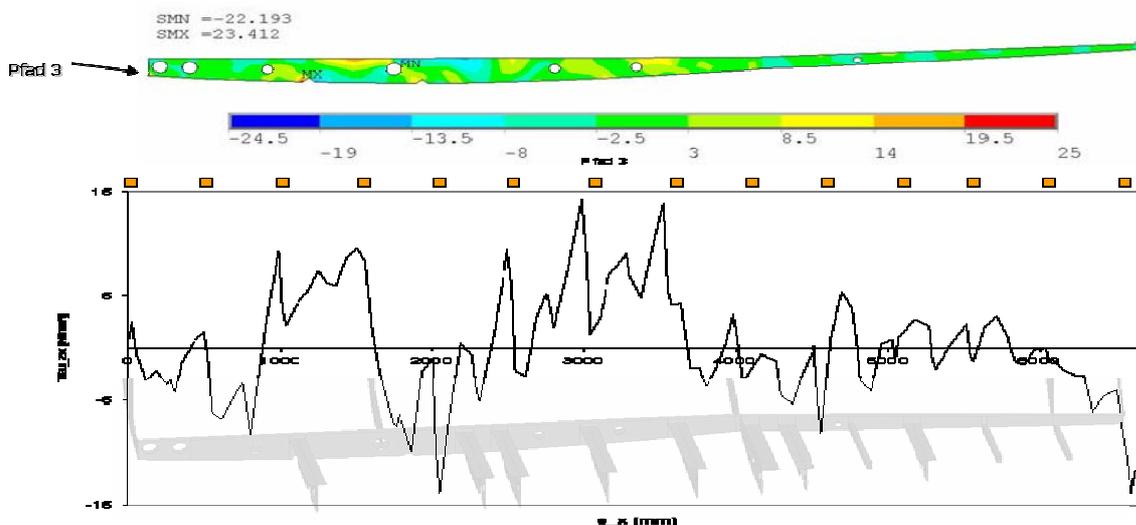


Abbildung 68: Spannungsverlauf über die Länge des Trägers bei örtlicher Anbindung

Spannungen sind in Tabelle Abbildung 69 abgebildet. Gegenüber der durchgängig angebrungenen Variante sind bei gleicher Tendenz des Spannungsverlaufes grundsätzlich höhere Extremwerte der Spannungen  $\tau_{zx}$  und  $\tau_{zy}$  zu verzeichnen.

#### Lokale Anbindung

Äußerer Längsträger		Tau $z_x$ Träger		Tau $z_x$ Außenhaut		Tau $z_y$ Außenhaut	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
Äußerer Längsträger	Außen-seite	14	-14	4,1	-3,2	17	-8
	Innen-seite	12	-22	6,1	-1,7	12	-1

Abbildung 69: Maximalspannungen im äußeren Längsträger

Die hohe Spannung von 17 MPa für  $\tau_{zy}$  in der Außenhaut verringert sich, wenn die Anzahl der Anbindungspunkte in diesem Bereich erhöht wird und sich damit der Abstand der einzelnen Anbindungspunkte zueinander wird verringert. Im Vergleich mit den Scherzugfestigkeiten (Abbildung 73) sind die Varianten GFK- GFK laminiert, GFK- GFK geklebt und die geschraubte Verbindung einsetzbar. Die Varianten GFK-Stahl laminiert und GFK-Stahl geklebt erfüllen schon bei durchgängiger Anbindung die Anforderungen an der Verbindungsstelle nicht und sind damit nicht einsetzbar.

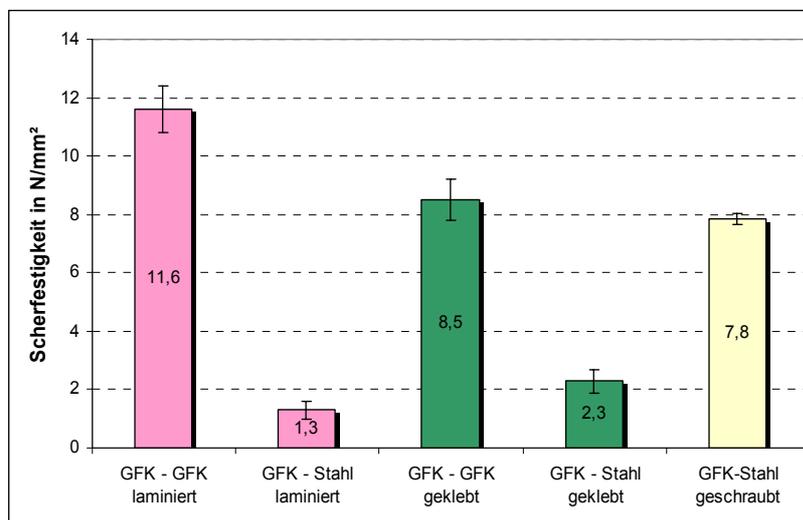


Abbildung 70: Scherfestigkeitsvergleich der Varianten

### 2.3.4 Vergleich der Zugfestigkeiten

Als Basis für die Ermittlung der Zugfestigkeit, wurden die Ergebnisse der Zugversuche an den Bauteilproben mit den präferierten Verbindungsvarianten genutzt. Da das globale Modell

aus Schalen mit ungenügender Nachbildung der Verbindungsstellen besteht, waren ein direkter Vergleich mit diesen Ergebnissen und die damit verbundene direkte Bewertung der Verbindung Rückgrat-Rumpf nicht möglich. Um den Vergleich zu erzielen, ist daher eine genaue Modellierung der Bauteilproben (Solid-Elemente statt Schalen) notwendig. Dazu wurde das Belastungsregime aus den Zugversuchen übernommen. Angesetzt wurde die im Bauteilversuch ermittelte maximale Spannung bis zum Bruch. Das Bruchverhalten der einzelnen Bauteilproben ist unter 2.2.2.1 Zugversuche an Bauteilproben eingehend betrachtet worden. Auf dieser Basis gewinnt man durch eine detaillierte Nachbildung des Zugversuchs als Solidmodell vergleichbare Spannungswerte zum globalen Modell. Die im Solidmodell auftretenden Maximalspannungen werden im globalen Modell als Grenzwerte für die Belastbarkeit gesetzt. Obwohl im globalen Schalenmodell die Verbindungsstellen nicht ausreichend modelliert sind, ermöglichen die so ermittelten Grenzwerte trotzdem eine Beurteilung der gewählten Variante für die Rückgratanbindung

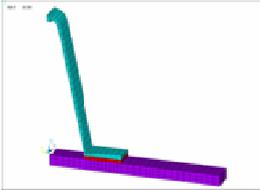
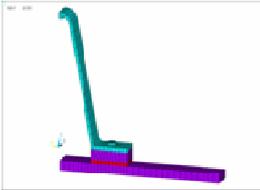
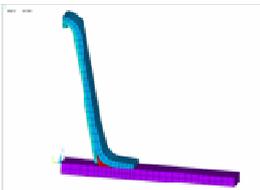
	FEM-Modell	Maximale Belastung im Modell (aus Zugversuchen ermittelt)
GFK-Stahl-geklebt		3340 N
GFK-GFK-geklebt (mit Verschraubung)		7360 N
GFK-Stahl-überlaminiert (geschnitten)		6380 N

Abbildung 71: maximale Belastungen (aus dem Zugversuch ermittelt)

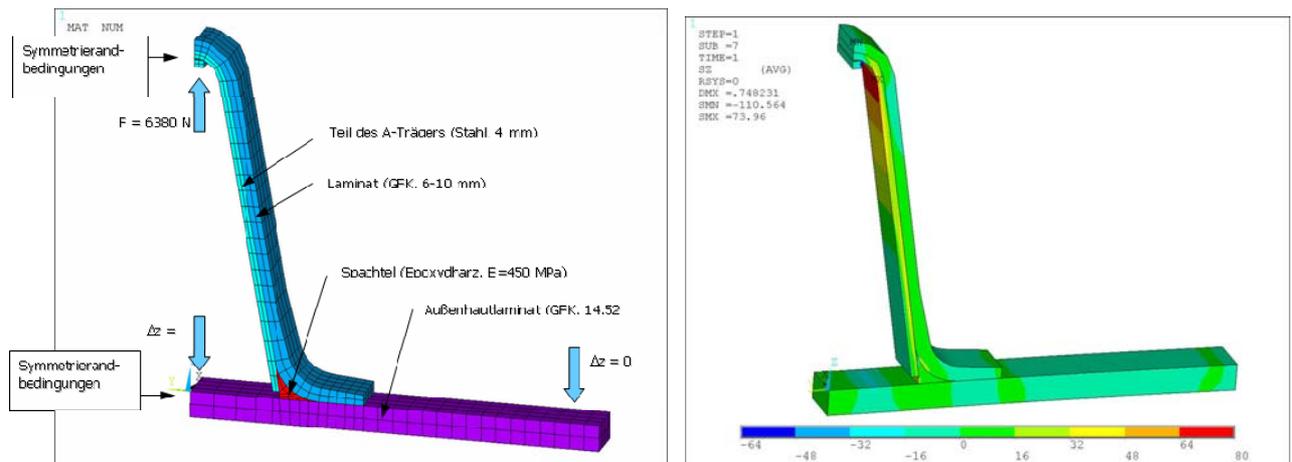


Abbildung 72(links): FEM- Modell für die Trägeranbindung (Variante A)

Abbildung 73(rechts): Spannungsverlauf an der Fügestelle

Die Modellierung des Solidmodells (Abbildung 72) lässt Aussagen über den Spannungsverlauf (Abbildung 73) über die Flanschbreite zu. So wird beispielsweise für den überlamierten Träger unter der Annahme, dass der Spachtel mitträgt, der Spannungsverlauf  $\sigma_z$  durch die Flanschbreite dargestellt. (Abbildung 74)

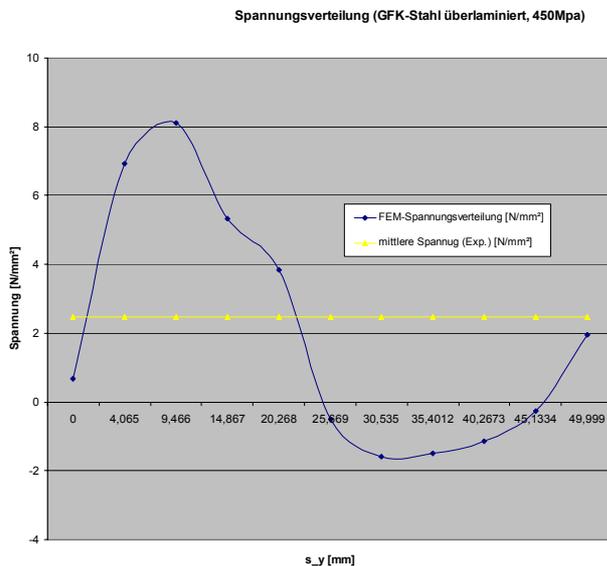
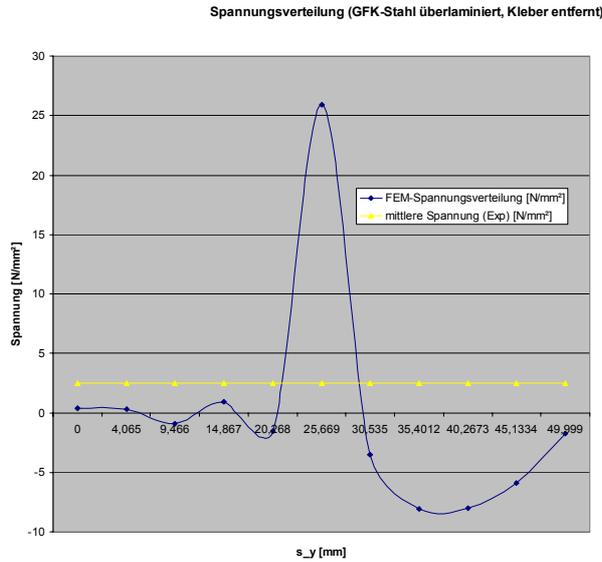


Abbildung 74: Spannungsverlauf über die Flanschbreite Variante A mit Füllspachtel

Aus der Zugkraft resultiert die Zugspannung im vorderen Teil des Flansches. Am Ende des Flansches bildet sich Druck aus. Eine Berechnung ohne Spachtel (nur das Laminat trägt) verlagert sich die Zugspannung in die Kerbe zwischen Laminat und Außenhaut und steigt um 200 % an. (Abbildung 75) Durch die ungünstige Kraftverteilung tritt gerade in der Kerbe eine hohe Spannung auf, was zum Anriß führen könnte. Deshalb ist eine sorgfältige Ausformung

der Kehle notwendig, um ein Spannungsverteilung bei der auch der Spachtel mitträgt, zu



erhalten.

Abbildung 75: Spannungsverlauf über die Flanschbreite Variante A ohne Füllspachtel

Durch die detaillierte Nachbildung des Zugversuchs werden vergleichbare Spannungswerte für das Schalmodell ermittelt. Dabei dienen  $\sigma_{z \max}$  im Stahlträger und  $\sigma_{y \max}$  im Rumpflaminat in Indikator für das Versagen der Verbindung zwischen Rückgrat und Rumpfschale. Die ermittelten maximalen Spannungen sind in Tabelle Abbildung 76 zusammengefasst.

	<b>max. sz</b> [MPa]	<b>max. sy</b> [MPa]
GFK-Stahl-geklebt	38	8
GFK-GFK-geklebt (mit Verschraubung)	84	17
GFK-Stahl-überlaminiert	73	16

Abbildung 76: Grenzspannungen der Varianten

Diese Spannungen werden im globalen Modell als Grenzwerte für die Beanspruchung angenommen. Durch einen Vergleich wird geprüft, wie sich die im globalen Modell durch

maximale äußere Lasten errechnete Spannung zu dieser Grenzspannung verhält. Beispielhaft ist für Variante A die Spannungsverteilung aufgrund der äußeren Belastung dargestellt. Die in der Abbildung 77 abgebildete Skale zeigt die Spannungen bis zum zulässigen Grenzwert. Es ist erkennbar, dass sich das abgebildete Farbspektrum des Modells eher im mittleren Bereich der Skale befindet und der Grenzwert nicht überschritten wird.

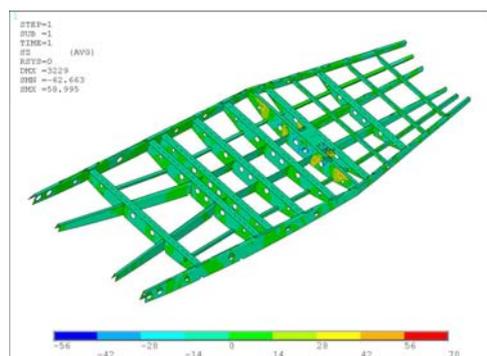


Abbildung 77: Spannungsverlauf im globalen Modell der Variante A

## 2.4 Vergleich der Steifigkeit der Varianten Stahl Rückgrat und GFK-Rückgrat

Zur Beurteilung der Steifigkeit beider Varianten wurde in der FE- Berechnung die von Mises Spannung im Rumpf mit eingebautem Rückgrat (Stahl (Abbildung 78) oder GFK (Abbildung 79)) unter maximalen äußeren Belastungen berechnet. Die Spannungen werden jeweils in der Rumpfhülle sowie im Stahl- und im GFK- Rückgrat abgebildet. Es ist auffällig, dass sich die Spannung um die Mastaufnahme konzentriert. Beim Stahlrückgrat ist dies besser verteilt, was auf eine höhere Steifigkeit schließen lässt, welche auch auf den Rumpf übertragen wird.

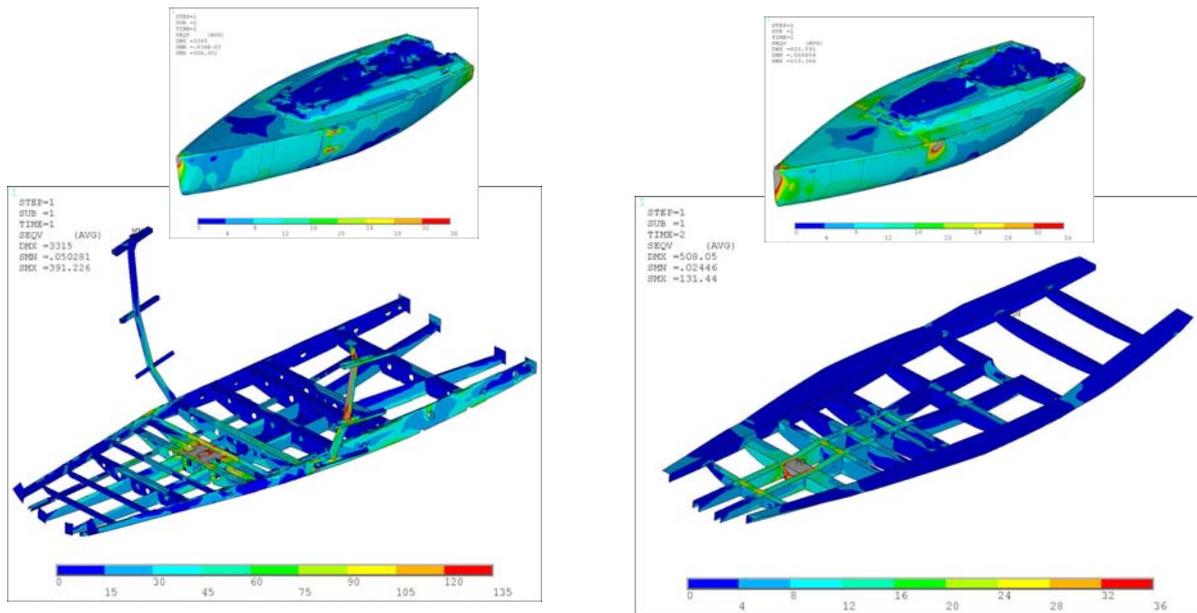


Abbildung 78 (links): von Mises Spannungsverteilung im Stahlrückgrat und im Rumpf

Abbildung 79 (rechts): von Mises Spannungsverteilung im GFK- Rückgrat und im Rumpf

Im Vergleich der beiden Varianten ist demnach eine höhere Steifigkeit des mit dem Stahlrückgrat ausgesteiften Rumpfes festzustellen. Das äußert sich in einer geringeren Durchbiegung des Rumpfes über der Kiellinie. (Abbildung 80) Der Rumpf mit GFK- Rückgrat weist etwa eine 20% höhere Durchbiegung auf als die Stahlrückgrat- Variante.

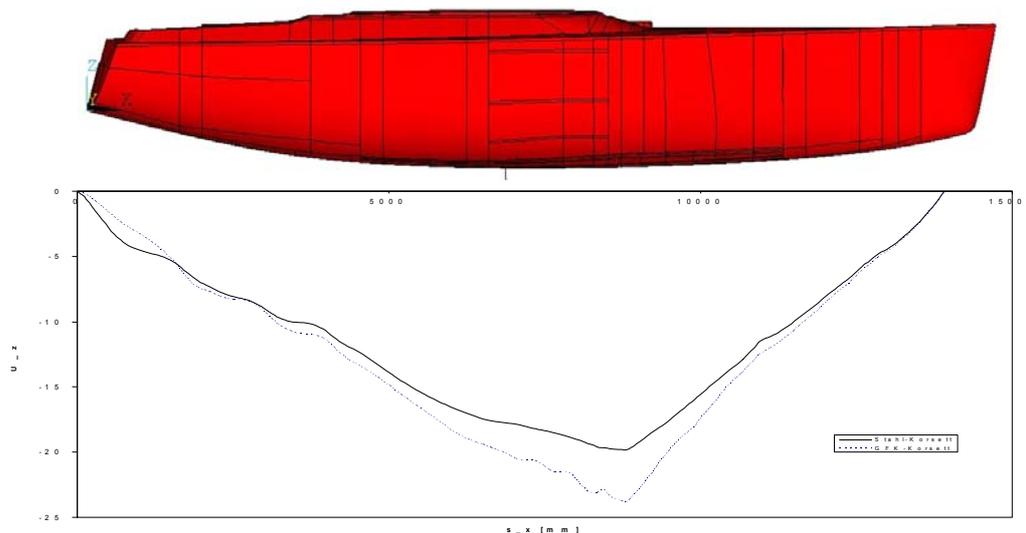


Abbildung 80: Durchbiegung der beiden Varianten in Längsrichtung des Rumpfes

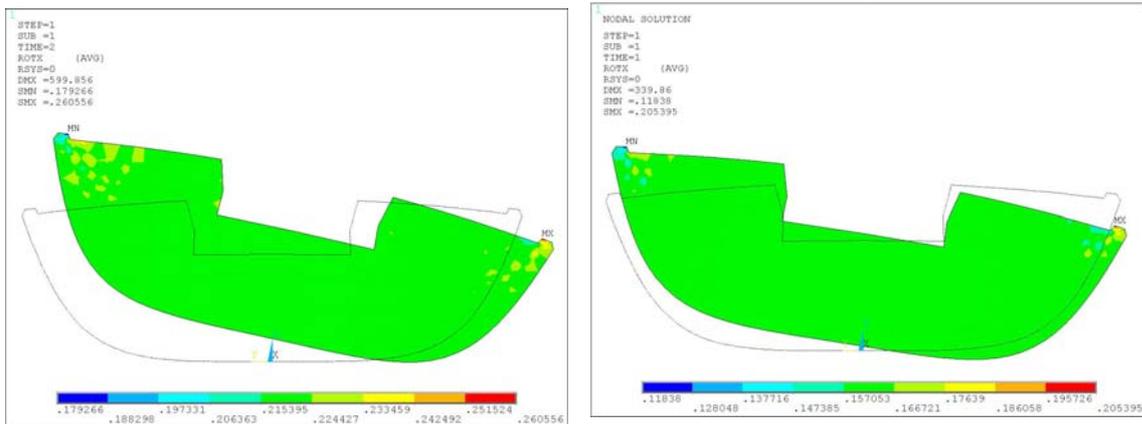


Abbildung 81 (links): Torsionsvermögen Rumpf mit GFK - Rückgrat

Abbildung 82 (rechts): Torsionsvermögen Rumpf mit Stahlrückgrat

Die höhere Steifigkeit des Rumpfes mit Stahlrückgrat äußert sich ebenfalls bei einer Betrachtung des Torsionsvermögens des Rumpfes. Dargestellt an der Verdrehung des Spiegels ist für den Rumpf mit GFK – Rückgrat ein Verdrehwinkel von etwa  $13^\circ$  und für das Stahlrückgrat nur etwa  $10^\circ$  festzustellen.

## 2.5 Vergleich der Masse der Modelle mit GFK- und Stahlrückgrat

Berechnung der Masse aus dem ANSYS FEM-Modellen (berücksichtigt sind lediglich elementierte Komponenten)

- Modell mit GFK-Rückgrat: 3210 kg
  - GFK-Rückgrat pur 699 kg
  - Schwerpunkt  $x = 6461,5$   $y = 0,01531$   $z = 50,265$
- Modell mit Stahl-Rückgrat: 3455 kg
  - Stahl-Rückgrat pur 1009 kg
  - Schwerpunkt  $x = 6691,4$   $y = 0,02686$   $z = -6,1438$
- Massedifferenz: 245 kg
- Dichten der verwendeten Materialien:
  - Stahl 7800 kg/m<sup>3</sup>
  - Balsa 97 kg/m<sup>3</sup>
  - Sperrholz 800 kg/m<sup>3</sup>
  - Hartschaum 130 kg/m<sup>3</sup>
  - GFK 1900 kg/m<sup>3</sup>

## **2.6 Untersuchungen zur Befestigung von Ausrüstungselementen (Winchen, Poller, Klampen) am Deck**

### **2.6.1 Darstellung der Ausgangssituation**

Die bei einer Segelyacht notwendigen Ausrüstungsgegenstände auf dem Deck werden zur Übertragung und Einleitung von lokalen Belastungen wie z.B. Seilkräften benötigt. Für die Befestigung auf dem GFK-Deck ist es notwendig die Befestigungspunkte örtlich zu verstärken, um die eingebrachten Lasten sicher übertragen zu können. Die meist aus Metall oder faserverstärktem Kunststoff bestehenden Objekte werden direkt auf die, mit Gelcoat geschützte, Außenhaut der Yacht geschraubt (Abbildung 83).



*Abbildung 83: Ausrüstungsgegenstände [25]*

Für die Befestigung der notwendigen Ausrüstungsgegenstände wie z.B. Winchen, Schienen oder Klampen werden rostfreie, metrische Schrauben verwendet. Die Verwendung von Schrauben ermöglicht jederzeit ein Austauschen oder Entfernen von Ausrüstungsgegenständen z.B. bei Reparaturen. Zur Erhöhung der örtlichen Festigkeit werden Unterlegplatten aus Aluminium oder GFK verwendet (Abbildung 84). Die Befestigung der Ausrüstungsgegenstände kann durch Durchgangsschrauben mit Unterlegscheiben und Mutter oder durch Einschrauben in die Verstärkung erfolgen. Beide Varianten werden praktiziert. Die zweite Variante hat den Vorteil, dass von einer Seite montiert werden kann.

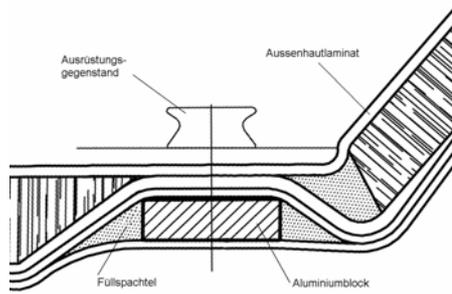


Abbildung 84: Verbindungsaufbau [25]

Diese Variante gilt als Ausgangsvariante für die Untersuchung mit der Zielstellung kostengünstigere Varianten, z.B.: durch Einsatz von selbstfurchenden Schrauben, zu ermitteln. Bei der Ausgangsvariante werden die Befestigungsschrauben in die, mit einer 10 mm starken Metallplatte aus AlMg4.5Mn verstärkten, GFK- Decksplatte geschraubt. Die einzubringenden Löcher werden vorgebohrt und die Aluminiumplatte im Anschluss mit Gewinden versehen, in die die Schrauben greifen können.

Alternative Varianten sind der Einsatz von gewindeformenden Schrauben in Leichtmetall (z.B. Altracs aus V2A) und gewindeformende Schrauben in GFK (z.B. DELTA PT, 8.8, verzinkt). Als Ausgangsvariante wurde die Metrische Schraube M8 (Schraube 1.) eingesetzt.

Die reale Verbindung des Ausrüstungsgegenstandes durch einen Flansch mit mehreren Schrauben wird versuchstechnisch auf eine Schraubverbindung reduziert. Dabei liegt der Focus auf dem Einsatz Gewindeformender Schrauben, Speziell für den Einsatz in Aluminium.

Diese Verbindung wird in Kopfzugversuchen in einer Prüfvorrichtung, mit der Prüfmaschine Zwick/Roell Z400E mit folgenden Parametern geprüft.

**Versuchsparameter:** Prüfungsgeschwindigkeit: 2mm/min

Prüfklima: Normklima (23°C, 50% RF)

- **metrische M8-Schraube (V2A) in AlMg4.5Mn (Gewinde geschnitten)**

**Verbindungsparameter:** Aluminiumplatte mit eingeschnittenem Gewinde M6

- **gewindeformende M8-Schraube (ALtracs, Vergütungsstahl) in AlMg4.5Mn (Gewinde von Schraube geformt)**

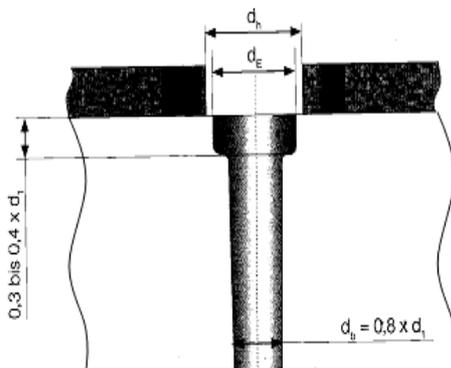
**Verbindungsparameter:** Bohrlochdurchmesser:  $d_b=7,4$  mm

Einschraubdrehmoment  $M_E=3,5$  bis  $5$  Nm \*

Anziehdrehmoment  $M_A=10$  bis  $12$  Nm \*

Überdrehmoment  $M_U=16$  bis  $18$  Nm \*

- **gewindeformende M8-Schraube (DELTA PT, 8.8, verzinkt) in GFK-Außenhaut (Gewinde von Schraube geformt)**



**Verbindungsparameter:**

Bohrlochdurchmesser:  $d_b=6,4$  mm

Entlastungsbohrung:  $d_E=8,2$  mm

Tiefe der Entlastungsbohrung:  $t=3,2$  mm

Einschraubdrehmoment  $M_E=2$  bis  $3$ Nm \*

Anziehdrehmoment  $M_A=6$  bis  $8$ Nm \*

Überdrehmoment  $M_U=12$  bis  $14$ Nm \*

\* Verbindungsparameter auf Empfehlung der Firma EJOT GmbH & Co.KG

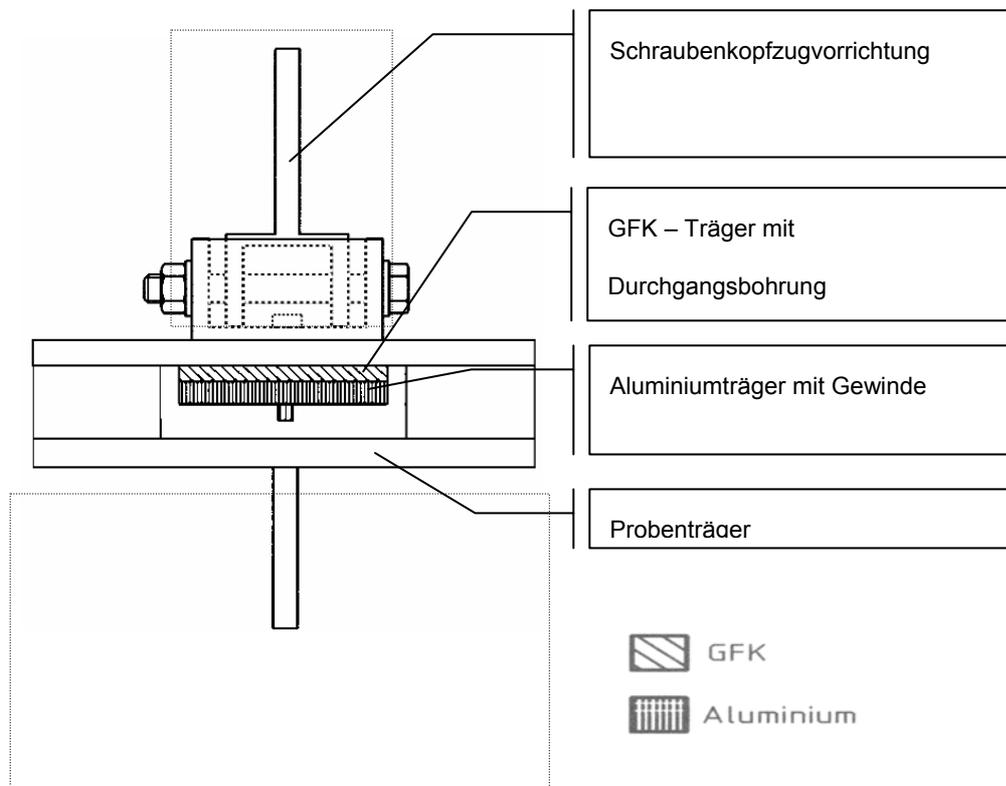
**Versuchsaufbau:**

Abbildung 85: schematischer Aufbau der Kopfzugvorrichtung

Die Verbindungsproben werden in Zusammenhang mit der Prüfvorrichtung erzeugt. Es wird die Schraube mit dem entsprechenden Anziehmoment in eine 10mm dicke AlMg4,5 – Platte bzw. 14mm dicke GFK – Platte geschraubt. Dabei wird zur Realisierung der realen Verhältnisse eine Unterlegplatte aus GFK-Decksmaterial verwendet.

In die Aluminium- bzw. GFK-Platte wird das Schraubenloch in der vorgeschriebenen Größe gebohrt und für Variante 1.) das benötigte Gewinde geschnitten.

Die Schraube wird in der Kopfzugvorrichtung mit der Aluminium- bzw. GFK-Platte verschraubt und mit dem vorgeschriebenen Drehmoment angezogen. Die Kopfzugvorrichtung wird in die Einspannklemmen der Zwick/Roell-Zugmaschine symmetrisch eingespannt. Von jeder Variante werden mindestens fünf Proben geprüft. Jede Probe wird bis zum Versagen belastet, wobei die Maximalkraft ermittelt wurde. Als Prüfergebnisse der Versuchsreihen wurden der Mittelwert arithmeth. Mittelwert  $\bar{x}$  der Maximalkraft, die Standardabweichung  $s$  und der Variationskoeffizient  $v$  ermittelt.

Die Ergebnisse werden in folgender Tabelle Abbildung 86 dargestellt.

## 2.6.2 Auswertung der Prüfergebnisse

Beschreibung der Schraubenverbindung					
Schraube: metrisch, M8, Material: V2A Tragender Werkstoff: Aluminiumplatte, d=10mm,		Schraube: Ejot Altracs, M8, selbstfurchend, Vergütungsstahl Tragender Werkstoff: Aluminiumplatte, d=10mm		Schraube; Ejot Delta PT, M8, selbstfurchend, 8.8 Tragender Werkstoff: GFK, d=15mm	
Ergebnisse					
Probennr	Maximalkraft in kN	Probennr	Maximalkraft in kN	Probennr.	Maximalkraft in kN
1	30,9	1	35,0	1	23,1
2	30,9	2	35,4	2	23,2
3	31,1	3	35,2	3	23,2
4	31,2	4	34,1	4	23,5
5	31,1	5	32,0	5	22,5
Statistik:		Statistik:		Statistik:	
$\bar{x}$	31,0	$\bar{x}$	34,3	$\bar{x}$	23,1
s	0,1	s	1,4	s	0,4
v [%]	0,4	v [%]	4,1	v [%]	1,6
Versagensart					
 Probe 1,2,4,5 (Schraubenhals gebrochen, oben)   Probe 3 (Gewinde im Alu -Träger ausgerissen, unten)		 Gewinde im Aluminium-Träger ausgerissen		 Schraubengewinde abgesichert	

Abbildung 86: Prüfergebnisse für metrische Schraube M8, Ejot Altracs und Ejot DELTA PT

Die Zusammenfassung der aufbereiteten Messwerte für einen Verfahrensvergleich ist in Abbildung 87 dargestellt.

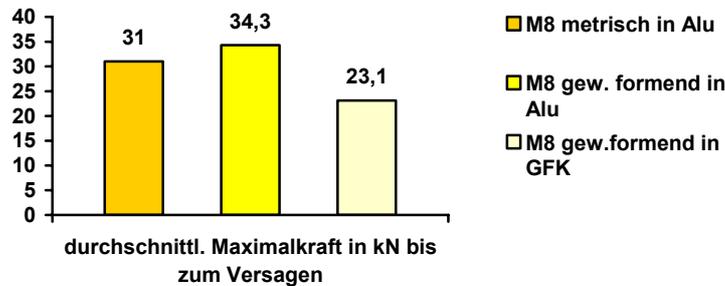


Abbildung 87: Maximalkräfte bis zum Versagen der Verbindungen

Die zum Versagen der Verbindung führende Kraft betrug bei den metrischen Schrauben in Aluminium im Durchschnitt 31 kN, bei den gewindeformenden Schrauben 34,3 kN und bei den gewindeformenden Schrauben in GFK 23,1 kN. Bei den Verbindungsproben mit metrischen M8 Schrauben aus Edelstahl versagten bis auf eine Probe alle anderen am Schraubenhals. Die aus vergütetem Stahl bestehenden gewindeformenden Schrauben überschritten diesen Wert in allen Proben und führten zu einem Versagen des eingewinnten Gewindes im Aluminium.

Die sich deutlich von den Metallschrauben unterscheidenden gewindeformenden Schrauben für duroplastische Kunststoffe der Marke DELTA PT haben bei den Versuchen durch ein Abscheren der Gewindegänge versagt. Durch die tief einschneidenden, schmalen Gewindegänge erreichten die Schrauben nur eine wesentlich geringere durchschnittliche Maximalkraft von 23,1 kN. Die Variationskoeffizienten der Versuchsreihen lagen bei 0,4%, 4,1% und 1,6%, so dass die Streuung der Einzelwerte als relativ gering bezeichnet werden kann.

Aufgrund der unterschiedlichen Schraubematerialien können nicht Festigkeitsparameter, sondern müssen die ertragbaren Maximalkräfte zur Einschätzung der Verbindung dienen. Danach trägt die Verbindung durch die gewindeformende Schraube in Leichtmetall ca.10% mehr als die gegenwärtig eingesetzte M8-Schraube und kann damit zur Substitution der herkömmlichen Verbindung empfohlen werden. Die Verbindung, gewindeformende Schraube in GFK ist in der geprüften Ausführung (8.8-Schraube, verzinkt) nicht geeignet. Die Verbindung kann aber schon durch den Einsatz einer Schraube höherer Festigkeit verbessert werden.

### 2.6.3 Wirtschaftliche Untersuchung

In einer wirtschaftlichen Untersuchung werden die Fügeverbindungen durch die metrischen M8 Schrauben und die gewindeformende Schraube für Leichtmetall untersucht. Eine Kostenrechnung in [33] unter Einbeziehung folgender Einflussfaktoren:

- Kosten des Befestigungsmaterials
- Vor -und Nachbereitende Tätigkeiten
- Fügeprozess
- Kosten für Spezialwerkzeug
- Anzahl und Arbeitsdauer der Mitarbeiter
- Abschreibungskosten für Maschinen, Vorrichtungen und Werkzeuge
- Fertigungszeit (Arbeitsablauf)

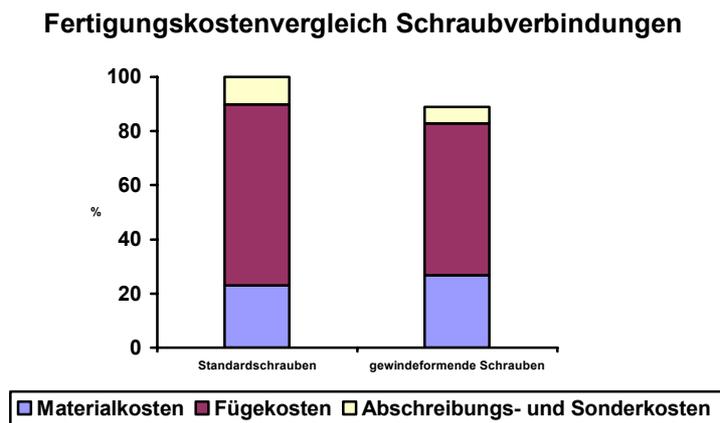


Abbildung 88: Kostenvergleich Schraubverbindungen [33]

hat gezeigt, dass eine Kostenersparnis von 11% bei Verwendung gewindeformender Schrauben gegenüber der gegenwärtig eingesetzten M8- Schraube möglich ist. Die Kostenanalyse basiert auf einer Analyse der Fügezeiten, der Lohnkosten von 25 Euro/h und mittleren Materialkosten von 0,30 Euro/Stück für Standardschrauben sowie 0,35 Euro/Stück für gewindeformende Schrauben. Es ergibt sich das in Bild 7 gezeigte Kostenverhältnis. Den größten Anteil an der Kostendifferenz haben die Fügekosten, welche wiederum die Fügezeiten als Grundlage haben. Die Fügezeiten wurden für die einzelnen Arbeitsschritte der gegenwärtig praktizierten Verbindungstechnologie durch Zeitnahmen bei dem Projektpartner YZG ermittelt. Die Daten der untersuchten Alternativlösung sind Schätzwerte und wurden auf Basis der im YZG gesammelten Erfahrungen und Beobachtungen erstellt.

Die Arbeitsabläufe mit den entsprechenden Arbeitsschritten und dazugehörigen Zeiten, sowie die Aufstellung der Kosten sind in [33] detailliert dokumentiert worden.

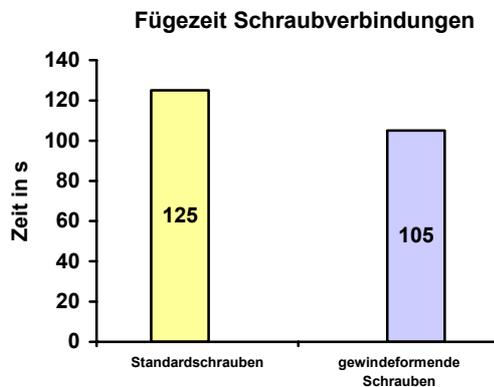


Abbildung 89: Fügezeitvergleich Schraubverbindungen

Dabei werden die aus der Analyse der Arbeitsschritte und dazugehörigen Zeiten in einer Gegenüberstellung der Fügezeiten für die betrachteten Schraubverbindungen zusammengefasst. Es ergibt sich für die Herstellung einer Verbindung mit gewindeformenden Schrauben eine Zeitersparnis von ca. 20 Sekunden gegenüber herkömmlichen Schrauben. Dieser Zeitvorteil ist allein durch Einsparungen von vorbereitenden Tätigkeiten wie Gewindeschneiden zu erzielen. Die Verkürzung der Fügezeit führt somit zu einer Einsparung von Lohnkosten und einer Beschleunigung der Arbeitsprozesse während der Produktion. Bei ca. 120 zu setzenden Schrauben für Ausrüstungsgegenstände pro Yacht, ergibt sich eine Arbeitszeiteinsparung von ca. 40 min pro Yacht. Neben der Zeitersparnis ergeben sich ebenfalls Einsparungen im Werkzeugverschleiß und -verbrauch.

Die Substitution der derzeitigen Verbindungsmethode durch den Einsatz gewindeformender Schrauben ist in der Produktion einfach und schnell umsetzbar. Es fallen bei einer Einführung keine bzw. nur geringe Umstellungskosten z.B. für eine Mitarbeiterschulung, an. Eine Verwendung gewindeformender Schrauben macht auch in anderen Bereichen der Produktion Sinn. Dazu gehört die Decksbefestigung oder die Befestigung anderer Anbauteile und Einrichtungsgegenstände in der Yacht. Die Vielzahl von Schraubenformen und -größen ermöglicht eine einfache Anpassung an die Anforderungen der Verbindungen.

Ein bereichsübergreifender Einsatz dieser Schrauben, z.B. im Bereich der Deck-Rumpf-Verbindung eröffnet somit weitere Kosteneinsparungspotentiale.

## 2.7 Untersuchungen zur Deck-Rumpf-Verbindung

Zielstellung ist eine Verbesserung der Kleb-Schraubverbindung, wobei insbesondere die Schraubverbindung hinsichtlich einer kostengünstigeren Variante untersucht werden soll.

### 2.7.1 Verbindung Deck-Rumpf

Die konstruktive Ausbildung der Deck-Rumpf-Verbindung ist in Abbildung 90 dargestellt. Die Fügeverbindung ist eine Kleb-Schraubverbindung. Der Klebstoff fungiert dabei als Dicht- und Verbindungsmedium. Die Schrauben werden als

Durchgangsschrauben mit Mutter oder als Durchgangsschrauben mit Gewindeplättchen eingesetzt. Eine Besonderheit der Verbindung besteht darin, dass als Verstärkung des Rumpfflansches Aluminiumstreifen (AlMg 4,5) unter den Flansch geklebt werden. Die Herstellung der Verbindung verläuft folgendermaßen:

- Vorbereiten des Rumpfflansches durch Anschleifen
- Auftragen des Klebstoffes auf den Rumpfflansch
- Aufsetzen und Ausrichten der Deckschale
- Bohren und Versenken der Durchgangsbohrungen
- Verschrauben der Fügeile

#### HULL TO DECK JOINT

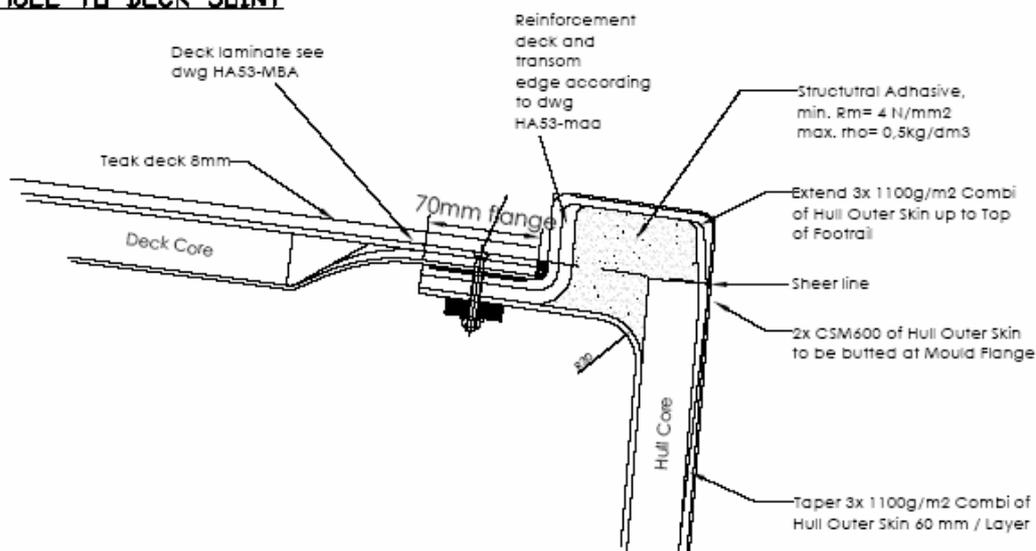


Abbildung 90: konstruktive Deck-Rumpf-Verbindung

Nachteil dieser Verbindung ist die notwendige beidseitige Zugänglichkeit. Die realisierte Verbindung aus Sicht der Rumpfseite unter Einsatz von Gewindeplättchen zeigt Abbildung 91



*Abbildung 91: konstruktive Deck-Rumpf-Verbindung mit Durchgangsschrauben und Gewindeplättchen)*

Eine weitere, auch praktizierte Variante ist die Herstellung der Schraubverbindung durch Gewindeschneiden in das Aluminium und das Anschrauben der Deckschale mittels Edelstahl A2 M6-Schrauben.

Als alternative Verbindungsvarianten werden gewindeformende Schrauben in Leichtmetall und gewindeformende Schrauben für Duroplast (auch für GFK einsetzbar) verwendet.

Um die unterschiedlichen Fügevarianten vergleichend einschätzen zu können, werden Kopfzugversuche durchgeführt. Die Versuche werden in einer Prüfvorrichtung (Abbildung 92) mit der Prüfmaschine Zwick/Roell Z 400E mit folgenden Parametern geprüft:

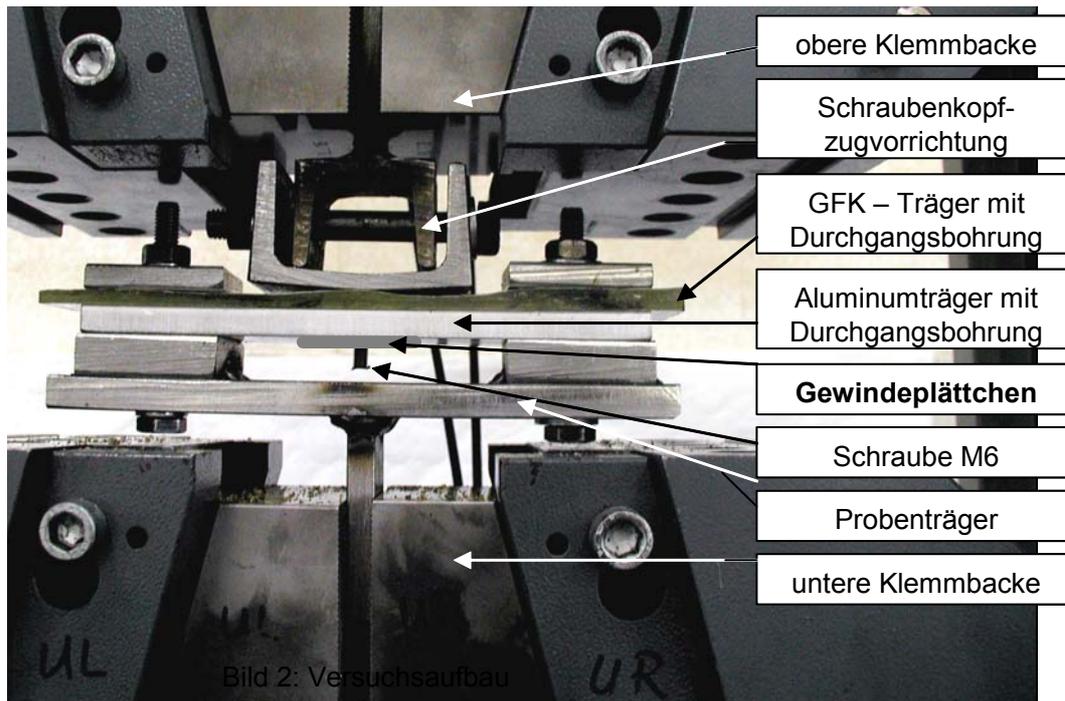


Abbildung 92: Prüfvorrichtung mit Trägern und Verbindungselementen,

**Versuchsparameter:** Prüfgeschwindigkeit: 2mm/min

Prüfklima: Normklima (23°C, 50% RF)

Nachfolgend sind die zu prüfenden Verbindungsvarianten mit den entsprechenden Verbindungsparametern aufgeführt:

- Schraubverbindung mit Aluminiumträger

**Verbindungsparameter:**

- Schraube: M6, Material: Edelstahl A2
- Tragender Werkstoff: Material: AlMg 4,5 Mn, Dicke: 10 mm

- Schraubverbindung mit Gewindeplättchen

**Verbindungsparameter:**

- Schraube: M6, Material: Edelstahl A2
- Tragender Werkstoff: Material: Edelstahl A2, Gewindegänge: 3

- Schraubverbindung selbstfurchend in Aluminium

**Verbindungsparameter:**

- Schraube: EJOT ALtracs®, Material: Vergütungsstahl AT10
- Tragender Werkstoff: Material: AlMg 4,5 Mn, Dicke: 10 mm
- Anziehdrehmoment: 10 bis 12 Nm

- Schraubverbindung selbstfurchend in GFK

**Verbindungsparameter:**

- Schraube: EJOT Delta PT®, Material: Edelstahl A2
- Tragender Werkstoff: Material: GFK (Außenhaut), Dicke: 13 mm
- Anziehdrehmoment: 6 bis 8 Nm
- Aufwendige Bohrlochgestaltung: Im Gegensatz zu den Varianten 1-3 ist hier eine aufwendigere Gestaltung des Bohrloches notwendig. Das Bohrloch für die selbstschneidende Schraube wird 0,8x kleiner ausgeführt (4,8mm) als der Außendurchmesser der Schraube von 6mm. Weiterhin wird am Kopf der Bohrung eine 6,2mm Durchmesser große und 2,4mm tiefe Entlastungsbohrung angesetzt, die zur Aufnahme des beim Gewindeschneiden entstehenden Abraummateri als dient, um Spannungen durch überschüssige Material an den ersten Gewindegängen, bzw. eine plane Oberfläche des Trägermaterial zur Verschraubungen mit Decks- oder Aufbauteilen zu gewährleisten.

In Abbildung 93 ist die Bohrlochgestaltung schematisch dargestellt.

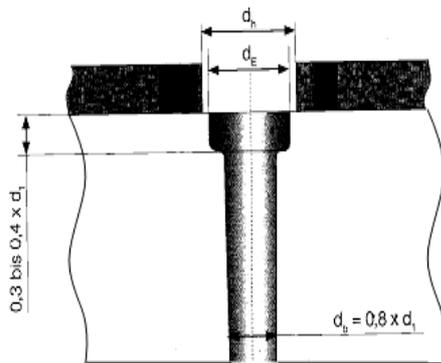


Abbildung 93: Bohrlochgestaltung für die gewindeformende Schraube

Die Verbindungsproben werden im Zusammenbau mit der Prüfvorrichtung erstellt. Die Schraube wird mit dem entsprechenden Anziehmoment in bzw. bei Variante 2.) durch eine 10mm dicke AlMg4,5 – Platte bzw. 13mm dicke GFK – Platte geschraubt. Zur Gewährleistung der realen Verhältnisse wird eine Unterlegplatte aus GFK-Decksmaterial zwischen Aluminiumträger und Schraubenkopfzugvorrichtung eingebracht.

In die Aluminium- bzw. GFK-Platte wird das Schrauben loch in der vorgeschriebenen Größe gebohrt und für Variante 1.) das benötigte Gewinde geschnitten, für Variante 2 ein entsprechendes Durchgangsloch gebohrt.

Die Schraube wird in der Kopfzugvorrichtung mit der Aluminium- bzw. GFK-Platte verschraubt und mit dem vorgeschriebenen Drehmoment angezogen. Die Kopfzugvorrichtung wird in die Einspannklemmen der Zwick/ Roell-Zugmaschine symmetrisch eingespannt. Von jeder Variante werden mindestens fünf Proben geprüft. Jede Probe wird bis zum Versagen belastet, wobei die Maximalkraft ermittelt wurde. Als Prüfergebnisse der Versuchsreihen wurden der arithmeth. Mittelwert  $\bar{x}$  der Maximalkraft, die Standardabweichung  $s$  und der Variationskoeffizient  $v$  ermittelt.

Die Ergebnisse werden in folgender Tabelle dargestellt (Abbildung 94).

Beschreibung der Schraubenverbindung							
- Schraube: M6 Material:Edelstahl A2 - Tragender Werkstoff: Material: AlMg 4,5 Mn Dicke: 10 mm				- Schraube: M6 Material: Edelstahl A2 - Tragender Werkstoff: Material: Edelstahl A2 Gewindgänge: 3			
Ergebnisse							
	Probennr	Maximalkraft in kN			Probennr	Maximalkraft in kN	
	1	13,4			1	13,2	
	2	13,2			2	13,1	
	3	13,4			3	13,2	
	4	13,2			4	13,2	
	5	13,4			5	13,3	
	Statistik:				Statistik:		
	$\bar{x}$	13,3			$\bar{x}$	13,2	
	s	0,1			s	0,1	
	v [%]	0,7			v [%]	0,6	
Versagensart							
- Versagensstelle: Schraubenhals - Bruchspannung: $\sigma_{max} = 802 \text{ MPa}$ → Aluminiumprofil überdimensioniert				- Versagensstelle: Schraubenhals - Bruchspannung: $\sigma_{max} = 793 \text{ MPa}$			
Beschreibung der Schraubenverbindung							
- Schraube: EJOT ALtracs ® Material: Vergütungsstahl AT10 - Tragender Werkstoff: Material: AlMg 4,5 Mn Dicke: 10 mm - Anziehdrehmoment: 10 bis 12 Nm				- Schraube: EJOT Delta PT® Material: Edelstahl A2 - Tragender Werkstoff: Material: GFK (Außenhaut) Dicke: 13 mm - Anziehdrehmoment: 6 bis 8 Nm - Aufwendige Bohrlochgestaltung			
Ergebnisse							

Probennr	Maximalkraft in kN	Probennr	Maximalkraft in kN
1	18,8	1	11,5
2	19,0	2	11,3
3	19,8	3	11,3
4	19,9	4	11,2
5	19,8	5	11,3
Statistik:		Statistik:	
$\bar{x}$	19,5	$\bar{x}$	11,3
S	0,5	S	0,1
v [%]	2,4	v [%]	0,9

Versagensart	
 <p>Bruchstelle</p> <p>- Versagensstelle: Schraubenhals - Bruchspannung <math>\sigma_{max} &gt; 1172</math> MPa</p>	 <p>Bruchstelle</p> <p>- Versagensstelle: Schraubenhals - Bruchspannung: <math>\sigma_{max} = 795</math> MPa</p>

Abbildung 94: Prüfergebnisse der Verbindungsprüfungen in Aluminium- und GFK – Platte

In Auswertung der Kopfzugversuche kann festgestellt werden, dass beide Alternativen (Var.3 und Var.4) den herkömmlichen Varianten bezüglich der Festigkeit gleichwertig sind.

Art der Schraubenverbindung	Bearbeitungsaufwand	Kosteneinflussfaktoren	
		zeitbezogen	materialbezogen
Aluminiumträger mit Gewinde	1. Vorbohren 2. Gewinde schneiden 3. Schraube setzen	Gewinde schneiden Verschrauben	Aluminiumträger Schrauben
Gewindeplättchen	1. Vorbohren 2. Plättchen fixieren 3. Schraube setzen	Fixierung Verschrauben	Gewindeplättchen Schrauben
Schraube selbstfurchend in Aluminium	1. Vorbohren 2. Schraube setzen	Verschrauben (Überdrehmoment ist zu beachten)	Aluminiumträger Schrauben
Schraube selbstfurchend in GFK	1. Vorbohren 2. Schraube setzen	Verschrauben (Überdrehmoment ist zu beachten)	Schrauben

Abbildung 95: Bearbeitungsaufwand und Kosteneinflussfaktoren für verschiedene Schraubenverbindungen

Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der Verbindungsvarianten sind in Abbildung 95 die Arbeitsschritte und die wichtigsten Kosteneinflussfaktoren dargestellt. Damit liegt das größte Einsparpotential beim Einsatz der gewindeformenden Schrauben im Wegfall des Arbeitsschrittes Gewindeschneiden gegenüber Variante 1. Gegenüber Variante 2 ist lediglich eine einseitige Zugänglichkeit erforderlich.

Variante 3 kann ohne notwendige konstruktive Änderungen an der Verbindungsstelle empfohlen werden. Bei Einsatz der Variante 4 ist das Einsparpotential noch höher, wobei konstruktive Änderungen notwendig wären. Statt des Aluminiumstreifens muss das GFK des Rumpfflansches verstärkt werden (bei Einsatz der Schraube EJOT Delta PT® mit 6mm Aussendurchmesser sind ca. 12mm Einschraubtiefe erforderlich). Der Nachteil dieser Variante, die aufwendige Bohrlochgestaltung, kann z.B. durch den Einsatz einen Stufenbohrers kompensiert werden. Zur Ermittlung der minimalen Einschraubtiefe für EJOT PT 0,6, in der ein Schraubenauszug erfolgt, wurden statische Ausreißversuche durchgeführt.

In 4 Versuchen wurden Einschraubtiefen von 4, 6, 8 und 10mm getestet. In den Ausreißversuchen mit Einschraubtiefen von 4,6 partiell auch bei 8mm, hat sich heraus gestellt, das die Einschraubtiefen zu gering dimensioniert waren und das selbstgeschnittene Gewinde ausgerissen ist.

Dieser Effekt, ist im Diagramm (Abbildung 96) des Versuchs mit 6mm Einschraubtiefe gut zu erkennen. Das Ausreißen der einzelnen Gewindegänge ist an den mehrfachen Anstiegen der Kraft im Kraft-Weg Diagramm dargestellt.

Das Resultat des Versuchs, die ausgerissene Schraube aus dem GFK-Trägermaterial. mit dem ausgerissenen Material in den Gewindegängen der Schraube ist in Abbildung 97 dargestellt

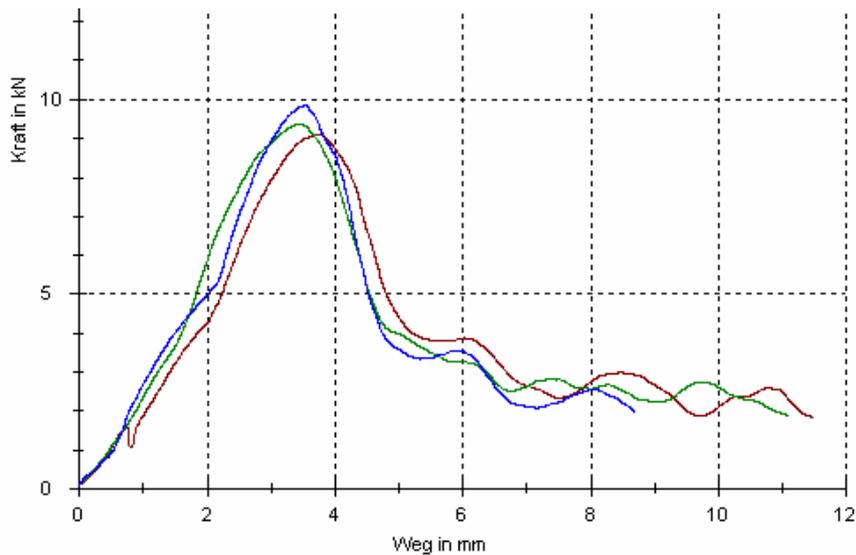


Abbildung 96 (links): Kraft-Weg Diagramm, Ausreißversuch mit Einschraubtiefe: 6mm

Abbildung 97 (rechts): Ausgerissene Schraube aus GFK-Trägermaterial bei Einschraubtiefe: 6mm

Bei einer Einschraubtiefe von 8 bis 12 mm, reißt das Gewinde nicht aus, als Versagensart stellt sich mit dem Bruch der Schraube unterhalb des Kopfes dar.

Im Kraft-Weg-Verlauf (Abbildung 98) stellt sich diese Versagensart als konstanter Kraftabfall, ohne zwischenzeitliche Anstiege, bis zum Bruch des Schraubenkopfes dar. In Abbildung 99 ist die in das GFK-Trägermaterial eingeschraubte Schraube mit, nach Versuchsende, abgerissenem Kopf dargestellt.

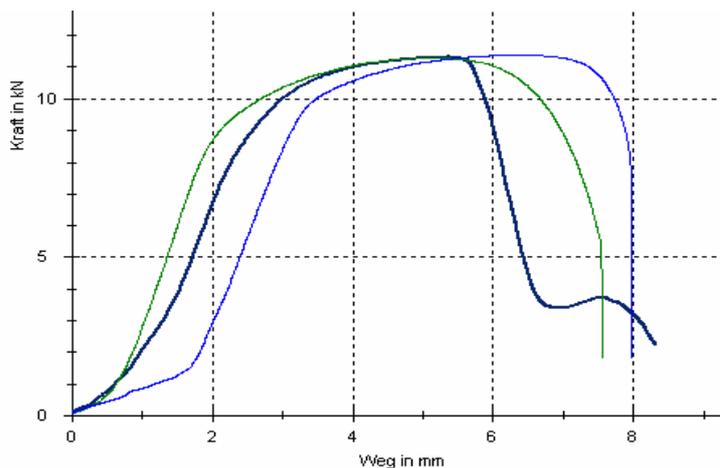


Abbildung 98(links) : Kraft-Weg Diagramm, Ausreißversuch mit Einschraubtiefe: 9mm

Abbildung 99(rechts): Abgerissener Schraubenkopf bei Einschraubtiefe: 8mm

Zusammenfassend ist die Abhängigkeit der Maximalkraft von der Einschraubtiefe in der folgenden Grafik (

Abbildung 100) dargestellt. Für das verwendete GFK (Bodenlaminat) ergibt sich daraus eine Mindesteinschraubtiefe von 8mm.

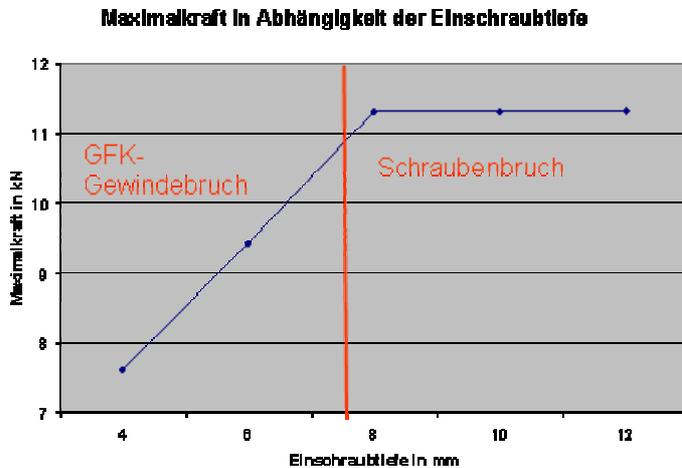


Abbildung 100: Maximalkraft in Abhängigkeit der Einschraubtiefe

## 2.8 Voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen und Untersuchungen zeigen, dass das Fügekonzept zur Integration einer Versteifungsstruktur aus Metall in einen GFK-Rumpf einer Yacht umsetzbar ist. Die Substitution einer GFK-Versteifungsstruktur durch ein feuerverzinktes Stahlrückgrat wurde am Beispiel einer ausgewählten Yacht, der H 461 nachgewiesen. Dazu wurden systematische Untersuchungen der eingesetzten Materialien und deren Verbindungen unter Einbeziehung unterschiedlicher Fügetechnologien ermittelt. Auf dieser Grundlage wurde über die Definition der betriebswirtschaftlichen und fertigungstechnischen Randbedingungen des Anwenders und eine konstruktiv-technische Analyse des GFK-Rückgrates eine geeignete Stahl- Rückgratvariante ermittelt. Durch den Anwender wurde die Fertigung eines Stahl- Rückgrates mit anschließender Konservierung initiiert. Systematische experimentelle Untersuchungen zu Verbindungsmöglichkeiten des Rückgrates mit dem Rumpf führten zu zwei wirtschaftlich und technisch präferierten Varianten, wobei die technisch und organisatorisch weniger aufwendige Variante (Einkleben und Überlaminieren ) realisiert wurde. Ein betriebswirtschaftlicher Vergleich hinsichtlich einer Materialsubstitution ergab einen deutlichen Kostenvorteil der feuerverzinkten Stahlstruktur gegenüber dem GFK-Rückgrat. Weiteres Potential liegt in der Ausführung der Verbindung des Rückgrates zum Rumpf. Hier sind durch ein partielles Überlaminieren der Längsträger weitere Kostensenkungen zu erwarten. Durch die fertigungstechnisch und ökonomisch günstigere Herstellung einer Schweißkonstruktion gegenüber einem im

Handauflegeverfahren in einer Negativform laminierten Rückgrat ist man in der Lage, schneller auf konstruktive Änderungen der Rumpfgeometrie zu reagieren. Das bezieht sich besonders auf die relativ hohen Kosten der Form und die hohen arbeitszeitlichen Aufwendungen bei der Fertigung der GFK- Struktur.

Langfristig besteht der voraussichtliche Nutzen darin, dass das erworbene Know-how nicht nur für einen Typ der Serie (hier H461), sondern auch für größere, gegenwärtig schon gebaute Yachten oder Neukonstruktionen mit hohen Steifigkeitsansprüchen bzw. erweiterten Anbindungsmöglichkeiten im Kielbereich angewendet wird.

Bezüglich der Befestigung von Ausrüstungselementen an Deck und der Deck- Rumpf- Verbindung wurden Untersuchungen an konventionellen Verbindungen und Alternativmethoden durch den Einsatz gewindeformender Schrauben in Leichtmetall und in GFK durchgeführt. Hier ist der Einsatz gewindeformender Schrauben in Leichtmetall für Ausrüstungselemente beim Anwender in Planung. Bezüglich der Deck- Rumpf- Verbindung werden gewindeformende Schrauben in Leichtmetall bereits eingesetzt, gewindeformende Schrauben in GFK sind in Planung.

## ***2.9 Paralleler Fortschritt anderer Stellen auf dem Forschungsgebiet***

Bekannt gewordene Hybridverbindungen zur Aussteifung der Rumpfschale beziehen sich insbesondere auf den Kielbereich beim Einsatz von Stringerrahmen oder Unterlegblechen, welche in GFK- Strukturen, GFK-Rückgrat oder Aussteifungen mit Hutprofilen, integriert werden.

Die Entwicklung gewindeformender Schrauben für Leichtmetalle, Duro- und Thermoplast ist in den letzten Jahren sehr stark vorangeschritten. Durch kompetente Beratung seitens der Schraubenhersteller (z.B. Fa. Ejot, Betzer) und der innerhalb des Projektes durchgeführten Versuche war eine kurzfristige Einführung gewindeformender Schrauben durch den Anwender möglich.

Die Liste der GL- zugelassenen Klebstoffe wurde in den letzten Jahren um einige auch für den Yacht- und Bootsbau modifizierte Klebstoffe mit hoher Spaltüberbrückbarkeit und langen Topfzeiten namhafter Klebstoffhersteller (z.B. BÜFA, MGS) erweitert. Der Anwender (YZG) verwendet weiterhin die erfahrungsgemäß geeigneten GL- zugelassenen Klebstoffe Klebstoffe.

## **2.10 Veröffentlichung der Ergebnisse**

Eine Veröffentlichung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens erfolgt durch Veröffentlichungen in der Fachpresse (z.B. Hansa, Interaktiv ) und auf Messen (z.B. SMM, Euroblech) und im Abschlußbericht. Einen weiteren wichtigen Aspekt der Vorhabensumsetzung stellen Fachvorträge dar. Hier werden die Forschungsergebnisse u.a. vorgestellt in Fachveranstaltungen des Center of Maritime Technologies (CMT) z.B. auf der „1 st European Conference on Production Technologies in Shipbuilding“, der EFB z.B. EFB-Kolloquium 2006, der Fraunhofer Gesellschaft (IPA, IFAM), der Universität Rostock und in Veranstaltungen des BMBF-Projekträgers (PTJ). Auf diesen Fachveranstaltungen werden neben Vertretern aus Forschung und Wissenschaft vor allem Industrievertreter über die Vorhabensergebnisse informiert.

## **3 Zusammenfassung und Ausblick**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte insbesondere die Fragestellung untersucht werden, ob die gegenwärtig aufwendige GFK-Rückgratherstellung und –verbindung in Rumpffstrukturen von Segelyachten durch eine neuartige Stahlkonstruktion und eine GFK-Stahl-Hybridverbindung ersetzt werden kann. Dazu wurden in einer Analysephase relevante Fügeverbindungen hinsichtlich einer Versteifungsstruktur (Rückgrat) analysiert und Werkstoffkenndaten wie z.B. Zugfestigkeit und e- Modul der verbauten Materialien wie Bodenlaminat des Rumpfes (Epoxy), Rückgratlaminat (UP) oder Bondinglaminat (Epoxy) untersucht. In einer Konzeptionsphase erfolgte eine Systematisierung der möglichen Fügetechnologien: Laminieren, Kleben und Schrauben hinsichtlich der Herstellung einer GFK- Stahl- Hybridverbindung. Grundlage dafür war eine feuerverzinkte Stahlkonstruktion als Vorzugsvariante. Durch die Verwendung einer Beurteilungsmatrix konnte aus der Vielzahl der Lösungsvorschläge die aus technischer Sicht am höchsten bewerteten Varianten herausgestellt werden:

- **Variante A:** feuerverzinkter Stahlträger mit Bondinglaminat überlaminiert und an das Rumpflaminat anlamiert.
- **Variante B:** feuerverzinkter Stahlträger mittels Laschen auf GFK- Pads geschraubt und diese an das Rumpflaminat geklebt
- **Variante C:** feuerverzinkter Stahlträger mittels Laschen direkt an das Rumpflaminat geklebt.

Diese Varianten wurden in einem betriebswirtschaftlichen Vergleich der GFK-Rückgratvariante gegenübergestellt. Dabei ergab sich hinsichtlich der Materialsubstitution

ein deutlicher Kostenvorteil der Stahlstruktur gegenüber der GFK- Variante. Der Hauptanteil der Kostenreduktion wurde dabei an den vergleichsweise hohen Herstellungskosten des GFK- Rückgrates festgestellt. Im Vergleich der alternativen Varianten ergab sich ein Kostenvorteil von ca. 18 % von Variante C und von 1,4 % von Variante B gegenüber von Variante A. Der Kostenvorteil von Variante B könnte durch eine Optimierung der Abstände der Anbindungspunkte (gerechnet mit 200 mm Abstand) noch erhöht werden. Weiterhin wurden in der Konzeptionsphase experimentelle Untersuchungen zur Festigkeit der aus der Systematisierung der Fügetechnologien hervorgegangenen Varianten in Form von Basis- und Bauteilproben durchgeführt. Dabei wurden für die Basisproben die möglichen Materialkombinationen (GFK-GFK; GFK-Stahl und die Fügetechnologien: Laminieren; Kleben; Schrauben) kombiniert und die Festigkeit in Kopf- und Scherzugversuchen verglichen. Höchste Festigkeitswerte wurden dabei für die Schraubverbindung gemessen. Geringste Festigkeitswerte wurden für die Materialkombination GFK- Stahl geklebt gemessen. In der Realisierungsphase wurden die drei Varianten als Bauteilproben ausgebildet und im Zugversuch geprüft. Dabei geben die Bauteilproben die realen geometrischen Verhältnisse der Konstruktion wieder. Als Ergebnisse der Zugversuche wurden die erreichte Maximalkraft bis zum Bruch der Verbindung und das Bruchverhalten ermittelt. Im Vergleich stellte sich die Variante B als festeste Verbindung ( $F_{\max} = 7,4 \text{ kN}$ ) gegenüber Variante A ( $F_{\max} = 6,3 \text{ kN}$ ) und Variante C ( $F_{\max} = 3,3 \text{ kN}$ ) dar. Durch FE-Rechnung (durchgeführt vom Projektpartner TechnoTrans) konnte eine Vergleichsbasis für die Aussagen der Haltbarkeit der meßtechnisch geprüften Varianten geschaffen werden. In einer Gegenüberstellung der berechneten Spannungen an der Fügestelle konnten die Variante A und B die geforderten Festigkeitsanforderungen erfüllen. Beide Varianten wurden mit vollständiger Anbindung über die Länge des Trägers gerechnet. Hier bieten sich Ansatzmöglichkeiten für eine Optimierung der Verbindung z.B. durch teilweise Verbindung der Längsträger an den Rumpf.

Ein Steifigkeitsvergleich zwischen den Varianten GFK- Rückgrat – Stahl- Rückgrat ergab eine höhere Steifigkeit des Rumpfes mit eingebautem Stahlrückgrat. Das spiegelt sich wieder in einer geringeren Deformation des Rumpfes sowohl hinsichtlich der Durchbiegung in Längsrichtung als auch der Torsion des Rumpfes. Durch die höhere Masse des Stahlrückgrates ergibt sich eine Schwerpunktverlagerung in Kielrichtung. Zu einer Optimierung der Stahlmasse könnte das Laminat in die Dimensionierungsrechnung miteinbezogen werden.

Bezüglich der Schraubverbindung der Ausrüstungsgegenstände kann durch Substitution der gegenwärtig verwendeten Technologie durch die Anwendung gewindeformender Schrauben in Leichtmetall bei gleicher Festigkeit der Verbindung eine Kosteneinsparung von bis zu 11% erzielt werden. Eine Anwendung in der Praxis ist demnach zu empfehlen. Bei der Deck-Rumpf- Verbindung gilt dies ebenso, wobei hier zusätzlich auch der Einsatz gewindeformender Schrauben in GFK denkbar ist. Hier wäre eine ausreichende Materialdicke des Rumpfflansches notwendig.

Im Rahmen der bisherigen Arbeiten konnte ein wirksamer Beitrag zur Aufgabenstellung des Yachtherstellers geleistet werden, funktions- und kostenoptimierte Rumpf-Rückgrat-Verbindungen zu entwickeln, die in der Serienfertigung Anwendung finden.

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Serienfertigung von Yachten mit Längen zwischen 10 – 15 m, Einlaminiertes Rückgrat aus GFK, Laminieren von Elementen des Rückgrates .....	3
Abbildung 2: Übersichtsmatrix des Verbundprojektes mit den Forschungskomplexen.....	6
Abbildung 3: Zeitplan mit Meilensteinen.....	7
Abbildung 4: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 1 - Orientierungsphase .....	7
Abbildung 5: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 2 – Entwicklungsphase: Konzeption .....	8
Abbildung 6: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 2 – Entwicklungsphase: Realisierung .....	9
Abbildung 7: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 3 - Testphase .....	9
Abbildung 8: Einlaminiertes Rückgrat in den GFK - Rumpf .....	11
Abbildung 9: Auffüllen von Hohlräumen [5] .....	14
Abbildung 10: Herausquellender Klebstoff an der Verbindung Rückgrat-Rumpf unter der Andrückvorrichtung nach [25].....	15
Abbildung 11: mit Kantenlaminat befestigtes GFK-Rückgrat [25] .....	15
Abbildung 12: Aufbau des Rückgratlaminats .....	16
Abbildung 13: bessere Kräfteverteilung durch verschiedene Unterlagen [5] S.121] .....	17
Abbildung 14: Vorgehensweise bei der experimentellen Analyse der Grundmaterialeigenschaften .....	20
Abbildung 15: Werkstoffkennwerte des Bodenlaminates .....	21
Abbildung 16: Laminataufbau des Bodenlaminates .....	21
Abbildung 17 zeigt die Zugfestigkeiten und die E-Moduli der beiden Chargen in Abhängigkeit der Prüftemperatur. ....	22
Abbildung 18: Zugfestigkeit und E-Modul des Bodenlaminates für den Einsatzbereich von 23°C bis 80°C.....	22
Abbildung 19: Einfluss der Prüftemperatur auf die Festigkeit [8].....	23
Abbildung 20: Vorrichtung für den Biegeversuch eingebaut in den Prüfraum der Prüfmaschine Z400 E.....	24
Abbildung 21: Parametertabellen der Werkstoffklassen .....	24
Abbildung 22 (links): Materialstück zur Probenherstellung .....	25

Abbildung 23 (rechts): 7 massegleiche, 10g - Proben .....	25
Abbildung 24: Ergebnistabelle der Gewichtemessungen vor und nach der Kalzinierung .....	26
Abbildung 25: Lamine des GFK-Rückgrates .....	28
Abbildung 26: Laminatzusammensetzung des Gurtes (Bild Links) und des Steges (Bild rechts) .....	28
Abbildung 27: Ergebnisse der einzelnen Proben .....	29
Abbildung 28: Ergebnisse der Prüfungen.....	29
Abbildung 29: Ablauf – und Auswertungsschema der Scherfestigkeitsprüfung .....	31
Abbildung 30: Einfluss der Überlappungslänge auf Scherzugfestigkeit bei SPABOND 340.33	
Abbildung 31:: Einfluss der Überlappungslänge auf Scherzugfestigkeit bei SPABOND 13033	
Abbildung 32: Belastungsplan der Rumpfstruktur .....	35
Abbildung 33: Modellierung der äußere Belastung durch Seilkräfte aus dem Rigg .....	36
Abbildung 34: Entwurf einer Stahl-Rückgratvariante mit verwendeten Materialdicken .....	36
Abbildung 35: Vorgehensweise bei de experimentellen Ermittlung der Verbindungseigenschaften von GFK -Stahl- Hybridverbindungen .....	38
Abbildung 36: Typisierung der Fügeverbindungen.....	39
Abbildung 37: Verbindungsvorschläge Rumpf-Rückgrat.....	41
Abbildung 38: Abmessungen der Basisproben .....	42
Abbildung 39: Zusammenstellung der Basisproben (Kopf-und Scherzugproben) .....	44
Abbildung 40: Vergleich der Kopfzugproben .....	45
Abbildung 41: Vergleich der Scherzugproben .....	46
Abbildung 42: Wertungstabelle geeigneter Lösungsvorschläge .....	48
Abbildung 43: Versuchsaufbau der Bauteilprobe AA41 .....	50
Abbildung 44: Versuchsaufbau der Bauteilprobe BB111 .....	50
Abbildung 45: Versuchsaufbau der Bauteilprobe CB511 .....	51
Abbildung 46: Versuchsaufbau: die Bauteilprobe in der Prüfmaschine .....	51
Abbildung 47: Tabelle der Versuchsergebnisse der Bauteilprobe AA411(praxisnah).....	52

Abbildung 48: links - Bruchverhalten der Bauteilprobe; rechts - Kraft - Weg - Diagramm des Versuchs .....	53
Abbildung 49: Tabelle der Versuchsergebnisse der Bauteilprobe AA411(geschnitten) .....	53
Abbildung 50: Kraft - Weg - Diagramm des Versuchs (links); Bruchverhalten der Bauteilprobe (rechts) .....	54
Abbildung 51: Tabelle der Versuchsergebnisse der Bauteilprobe BB111 .....	55
Abbildung 52 links -: Bruchverhalten der Bauteilprobe .....	55
Abbildung 53:rechts - Kraft - Weg - Diagramm des Versuchs .....	55
Abbildung 54: Tabelle der Versuchsergebnisse der Bauteilprobe CB511 .....	56
Abbildung 55: Kraft - Weg - Diagramm des Versuchs (links); Bruchverhalten der Bauteilprobe (rechts) .....	56
Abbildung 56: Vergleich der erfaßten mittleren Maximalkraft der einzelnen Bauteilproben ...	57
Abbildung 57: Vergleich der berechneten Zugspannung der Bauteilproben .....	58
Abbildung 58: Fertigungskosten Rückgrat .....	59
Abbildung 59: Kostenvergleich der Rückgratverbindungen .....	60
Abbildung 60 (links): FE- Modellierung der Spannungsverteilung im Rückgrat .....	61
Abbildung 61(rechts): FE- Modellierung der Spannungsverteilung in der Rumpfhülle .....	61
Abbildung 62(links): Festlegung der Knotenpunktpfade am äußeren Träger zur Berechnung der Spannungen im Träger, in der Außenhaut und an der Fügestelle Träger-Außenhaut.....	62
Abbildung 63(rechts):Position der ausgewählten Elemente des äußeren Trägers im Rückgrat .....	62
Abbildung 64: Verlauf der Spannung $t_{zx}$ über die Länge des Trägers .....	62
Abbildung 65: Vergleich der Scherfestigkeit der Basisproben .....	63
Abbildung 66: die Maximalkräfte der Proben .....	63
Abbildung 67: Verbindung des Rückgrates an den Rumpf mittels Flanschen .....	64
Abbildung 68: Spannungsverlauf über die Länge des Trägers bei örtlicher Anbindung .....	64
Abbildung 69: Maximalspannungen im äußeren Länsträger .....	65
Abbildung 70: Scherfestigkeitsvergleich der Varianten .....	65
Abbildung 71: maximale Belastungen (aus dem Zugversuch ermittelt) .....	66

Abbildung 72(links): FEM- Modell für die Trägeranbindung (Variante A).....	67
Abbildung 73(rechts): Spannungsverlauf an der Fügestelle .....	67
Die Modellierung des Solidmodells (Abb Abbildung 96: Bearbeitungsaufwand und Kosteneinflußfaktoren für verschiedene Schraubenverbindungen.....	67
Abbildung 75: Spannungsverlauf über die Flanschbreite Variante A mit Füllspachtel .....	67
Abbildung 76: Spannungsverlauf über die Flanschbreite Variante A ohne Füllspachtel .....	68
Abbildung 77: Grenzspannungen der Varianten .....	68
Abbildung 78: Spannungsverlauf im globalen Modell der Variante A .....	69
Abbildung 79 (links): von Mises Spannungsverteilung im Stahlrückgrat und im Rumpf .....	70
Abbildung 80 (rechts): von Mises Spannungsverteilung im GFK- Rückgrat und im Rumpf ...	70
Abbildung 80: Durchbiegung der beiden Varianten in Längsrichtung des Rumpfes .....	70
Abbildung 82 (links): Torsionsvermögen Rumpf mit GFK - Rückgrat.....	71
Abbildung 83 (rechts): Torsionsvermögen Rumpf mit Stahlrückgrat.....	71
Abbildung 83: Ausrüstungsgegenstände [25].....	72
Abbildung 84: Verbindungsaufbau [25] .....	73
Abbildung 86: schematischer Aufbau der Kopfzugvorrichtung.....	75
Abbildung 87: Prüfergebnisse für metrische Schraube M8, Ejoy Altracs und Ejoy DELTA PT76	
Abbildung 87: Maximalkräfte bis zum Versagen der Verbindungen.....	77
Abbildung 89: Kostenvergleich Schraubverbindungen [33].....	78
Abbildung 90: Fügezeitvergleich Schraubverbindungen .....	79
Abbildung 91: konstruktive Deck-Rumpf-Verbindung.....	80
Abbildung 92:konstruktive Deck-Rumpf-Verbindung mit Durchgangsschrauben und Gewindeplättchen) .....	81
Abbildung 93: Prüfvorrichtung mit Trägern und Verbindungselementen,.....	82
Abbildung 94: Bohrlochgestaltung für die gewindeformende Schraube.....	84
Abbildung 95:Prüfergebnisse der Verbindungsprüfungen in Aluminium- und GFK – Platte ..	86
Abbildung 96: Bearbeitungsaufwand und Kosteneinflußfaktoren für verschiedene Schraubenverbindungen .....	86

Abbildung 97 (links): Kraft-Weg Diagramm, Ausreißversuch mit Einschraubtiefe: 6mm .....	88
Abbildung 98 (rechts): Ausgerissene Schraube aus GFK-Trägereinschrmaterial bei Einschraubtiefe: 6mm.....	88
Abbildung 99(links) : Kraft-Weg Diagramm, Ausreißversuch mit Einschraubtiefe: 9mm .....	88
Abbildung 100(rechts): Abgerissener Schraubenkopf bei Einschraubtiefe: 8mm .....	88
Abbildung 101: Maximalkraft in Abhängigkeit der Einschraubtiefe .....	89

## **Literaturverzeichnis**

- [1] Rules for Classification I Ship Technology, Part 3 Special Craft, Chapter 3 Yachts and Boats up to 24m, GL 2003
- [2] Faserverbundbauweisen : Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix; Manfred Flemming - Berlin [u.a.] : Springer, 1999
- [3] Kleben; Grundlagen, Technologie, Anwendung; Habenicht, G.; 3. Aufl.; Springer Verlag; Berlin; 1997.
- [4] Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, 17.Aufl.; Beitz, W., Büttnner, K.-H.; Springer-Verlag, 1990
- [5] Plessis Du Plessis, H. (1999): Kunststoffyachten; Delius Klasing Verlag, 1999
- [6] Yachtbau : Schiffbau, Ausru stung und Einrichtung, Tendenzen und Entwicklungen, Maschinenbau, Elektrotechnik/ Kurt Reinke. - 4., u berarb. und erw. Aufl. - Bielefeld : Delius Klasing, 1994
- [7] Yachtbau : Entwurf, Konstruktion und Berechnung von Segelyachten/ Artur Tiller. - 2., verb. u. erg. Aufl. - Berlin : Schmidt, 1937
- [8] Das ideale Schiff : Typen, Ausstattung, Kosten; Reissig, Claus; 1.Aufl. Bielefeld, Delius Klasing Verlag, 2002
- [9] Yachtbau und Yachtsegeln/ Ernst Ku hl. - Berlin : Wedekind, 1910
- [10] Rumpf- und Decksreparaturen; Don Casey; 1. Aufl., Bielefeld; Delius Klasing, 1998
- [11] GL-Vorschriften II -Teil 2 ‚Nichtmetallische Werkstoffe‘, Kapitel 1 ‚Faserverbundwerkstoffe und Kleben, Abschnitt 1: Anforderungen an Werkstoffe und Fertigung; GL , 2006
- [12] Fügen von Kunststoffen : Grundlagen, Verfahren, Anwendung ; mit 31 Tabellen; Helmut Potente. - München [u.a.] : Hanser, 2004
- [13] Bond it : Nachschlagewerk zur Klebtechnik; Frank Leibinger; 3., neu bearb. und erw. Aufl., Landsberg am Lech : DELO, 2002
- [14] Maschinenelemente, Normung, Berechnung, Gestaltung; Roloff, Matek; Viewegs Fachbücher der Technik; 17.überarb. Aufl., Wiesbaden, Vieweg, 2005
- [15] Handbuch Fertigungstechnologie Kleben, Hennemann, O.-D.; Brockmann, W.; Kollek,H., Carl Hanser Verlag München, Wien 1992

- [16] Fertigungstechnik mit Kleb- und Dichtstoffen; Endlich, W.; Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1995
- [17] Handbuch Feuerverzinken; Maaß, P.; Peißker, P.; Leipzig; Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, 1970
- [18] Peene-Werft Wolgast: Erweiterung des Einstzbereiches der Klebtechnik im Schiffbau Machbarkeitsstudie, Abschlussbericht, 1999
- [19] Fr. Lürssen Werft: Schnelle Einrumpffähren; Abschlussbericht; 1998
- [20] Seminararbeit "Klebetchnologie für die Verbindung von Faserverbundwerkstoffen untereinander bzw. mit metallischen Strukturen für die Anwendung in der maritimen Industrie, Alexander Kujumdshiev, Universität Rostock, 2004
- [21] Internetpräsentation der Fa. Ludwig Kraus Eisenwaren & Werkzeuge  
[www.Edelstahl-Kraus.de](http://www.Edelstahl-Kraus.de)
- [22] Internetpräsentation **des Internet Schrauben-Shop** [www.online-schrauben.de](http://www.online-schrauben.de)
- [23] Internetpräsentation der Fa. **Schrauben Betzer GmbH & Co. KG**  
[www.betzer.de/produkte.htm](http://www.betzer.de/produkte.htm)
- [24] Internetpräsentation der Fa. EJOT HOLDING GmbH & Co. KG [www.ejot.de](http://www.ejot.de)
- [25] Unterlagen HANSE-Yachts, Yachtzentrum Greifswald GmbH & Co. KG
- [26] Meckelburg, E. (1990) Korrosionsverhalten von Werkstoffen, VDI Verlag Düsseldorf 1990
- [27] EN ISO 527-4 – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 4 : Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-5 :1997) ; Deutsche Fassung EN ISO 527-4 :1997
- [28] Internetpräsentation der Universität Weimar  
[www.uni-weimar.de/~fib/Lehre/bauing/kunststoffe.pdf/](http://www.uni-weimar.de/~fib/Lehre/bauing/kunststoffe.pdf/)
- [29] EN ISO 14125 - Faserverstärkte Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften (ISO 14125 ; 1998) ; Deutsche Fassung
- [30] EN ISO 1172 – Textilverstärkte Kunststoffe – Prepregs, Formmassen und Lamine – Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts ; Kalzinierungsverfahren (ISO 1172 ; 1996) ; Deutsche Fassung
- [31] DIN EN 1465 – Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit hochfester Überlappungsklebung (ISO 4587 ;1979, modifiziert) ; Deutsche Fassung EN 1465 : 1994

- [32] DIN 53283 – Prüfung von Metallklebstoffen ; Bestimmung der Bindefestigkeit von einschnittig überlappten Klebungen im Zugversuch
- [33] Diplomarbeit: Technische und wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von GFK-Metall- Verbundsstrukturen im Bootsbau” ; Kujumdshiev, A. ; Universität Rostock ; Lehrstuhl Fertigungstechnik, 2006