

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

1	Kurze Darstellung	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	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
2	Eingehende Darstellung	13
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 σ_{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
3	Zusammenfassung und Ausblick	91
	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 Füge-technologien 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.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wird als Verbundvorhaben ausgeführt und setzt sich zusammen aus o.g. Teilprojekten. Jeder Projektpartner arbeitet nach seinem speziellen, dem Teilprojekt und damit den Kernkompetenzen entsprechenden Arbeitsplan. Die Übersichtsmatrix des Verbundprojektes mit den Forschungskomplexen zeigt Abbildung 2.

Phase 1		Phase 2		Phase 3	
Orientierungsphase		Entwicklungsphase		Testphase	
100	200	300	400		
Analyse	Konzeption	Realisierung	Erprobung		
110	210	310	410		
Konstruktive Gestaltung	Konstruktive Gestaltung	Konstruktive Gestaltung	Konstruktive Gestaltung		
120	220	320	420		
Fügen	Fügen	Fügen	Fügen		
130	230	330	430		
Gesamtkonzept Hybridstruktur	Gesamtkonzept Hybridstruktur	Gesamtkonzept Hybridstruktur	Gesamtkonzept Hybridstruktur		

Abbildung 2: Übersichtsmatrix des Verbundprojektes mit den Forschungskomplexen

Der Zeitplan (

Abbildung 3) und eine Übersicht der jeweiligen Arbeitspakete (Abbildung 4-9) sind im Folgenden dargestellt:

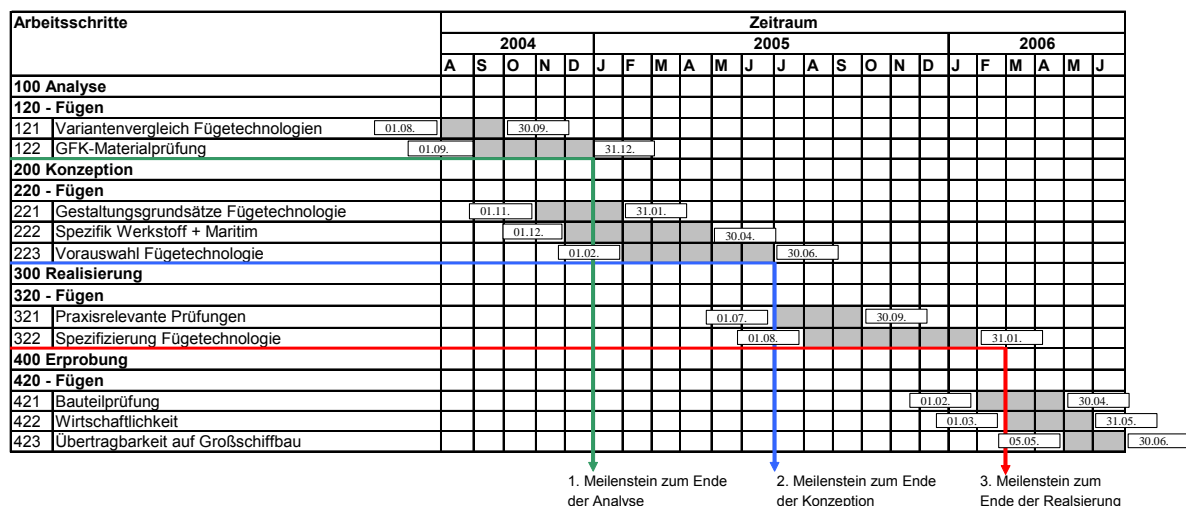


Abbildung 3: Zeitplan mit Meilensteinen

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	Fügen	
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
320	Fügen	
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 Füge­technologie 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
420	Fügen	
421	Zusammenführung der Ergebnisse der spezifizierten Füge­technologie 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 Füge­technologien	Randbedingungen für einen wirtschaftlichen Einsatz der spezifizierten Füge­technologien/ der Materialien
423	Beschreibung der Übertragbarkeit der nachgewiesenen Füge­technologie auf hochbeanspruchte Übergangsbereiche von FVK- und Metallstrukturen im Großschiffbau	Einsatzmöglichkeiten im Großschiffbau, Randbedingungen

Abbildung 7: Übersicht der Arbeitspakete in Phase 3 - Testphase