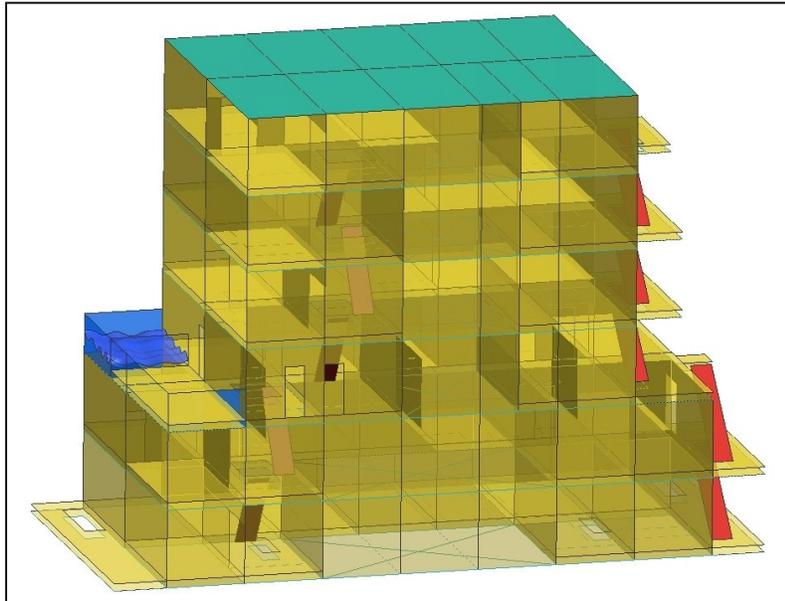




## **Modulare Leichtbaustrukturen für Aufbauten und schnelle Fahrzeuge der maritimen Industrie**



### **Modulare Leichtbaustrukturen für Schiffsaufbauten**

# **Schlus s b e r i c h t**

zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt

**“Modulare Leichtbaustrukturen für Aufbauten und  
schnelle Fahrzeuge der maritimen Industrie”**

im Verbundvorhaben

**„Leichtbaustrukturen im Schiffbau“**

zum Regionalen Innovationskonzept

„Aufbau einer Maritimen Allianz in der Ostseeregion“ des BMBF

Förderkennzeichen: 03i0724 A

Laufzeit des Projektes: 01.10.2002 bis 31.12.2005

Bearbeitet durch: Malchower Composite Engineering GmbH &  
Co. KG, Wismar

Begleitender Projektträger: Projektträger Jülich (PtJ),  
Außenstelle Berlin

Wismar, Juni 2006

Dipl.-Ing. Ch. Semlow  
Geschäftsführer

Prof. Dr. Puls  
Bearbeiter

## **Inhaltsverzeichnis**

- I.1 Kurzdarstellung zur Aufgabenstellung, zu den Voraussetzungen und zu den Partnern des Vorhabens
- II. Eingehende Darstellung
  - 2. Zielstellung des Vorhabens
  - 3. Erzielte Ergebnisse
    - 3.1 Bewertung von Werkstoffeigenschaften und Analyse der Einsatzmöglichkeiten
    - 3.2 Definition von ausgewählten Bauteilstrukturen und Möglichkeiten zur Modularisierung
    - 3.3 Konzipierung einer Fertigungstechnologie
    - 3.4 Dimensionierung von Bauteilstrukturen und Bauteilintegration in Großstrukturen
    - 3.5 Modellierung des Fertigungsprozesses von Bauteilstrukturen
    - 3.6. Fertigung von Demonstrationsmustern
  - 4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse
  - 5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen
  - 6. Geplante Veröffentlichungen
  - 7. Verzeichnis der Bilder und Tabellen
  - 8. Zusammenfassung

### Anlagen:

- . Erfolgskontrollbericht
- . Kurzfassung des Schlussberichtes

## I.1 Kurzdarstellung zur Aufgabenstellung, zu den Voraussetzungen und zu den Partnern des Vorhabens

---

Das Teilvorhaben

### **„Modulare Leichtbaustrukturen für Aufbauten und schnelle Fahrzeuge der maritimen Industrie“**

der Malchower Composite Engineering GmbH & Co. KG (MALCOM®) ist eingeordnet in das Verbundvorhaben des Regionalen Innovationskonzeptes „Aufbau einer Maritimen Allianz in der Ostseeregion“ des BMBF.

Die weiteren Teilvorhaben und die daran beteiligten Unternehmen sind:

- „Vorgefertigte schall- und wärme gedämmte Wandplatte für Schiffsausrüstungen“  
Förderkennzeichen 03i 0724 B  
bearbeitet durch:  
Innovations- und Bildungszentrum Hohen Luckow (IBZ)
  
- „Technologie für große Wickelstrukturen“  
Förderkennzeichen 03i 0724 D  
bearbeitet durch:  
AIR Fertigung-Technologie GmbH Hohen Luckow
  
- „Entwicklung von Plattenelementen aus Schaumaluminium und/oder mineralischen Schäumen vorrangig für Wandsysteme als modulare Leichtbaustrukturen im Schiffbau“  
Förderkennzeichen 03i 02724 E  
bearbeitet durch:  
IWE GmbH & Co. KG, Greifswald

Die Zusammenarbeit der Partner des Verbundvorhabens war unter Federführung der Malchower Composite Engineering GmbH & Co. KG auf der Grundlage eines Kooperationsvertrages geregelt.

Die Ausgangssituation und wichtige Bedingungen für die auszuführenden Arbeiten sind im Folgenden zusammenfassend beschrieben.

Die maritime Industrie Deutschlands ist ein bedeutender Wirtschaftsfaktor und benötigt für ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit innovative Produkt- und Fertigungslösungen auf hohem wissenschaftlich-technischem Niveau. Mit der dadurch erreichbaren hohen Qualität der Finalprodukte werden entscheidende Wettbewerbsvorteile erzielt.

Das Verbundvorhaben verbindet zu diesem Zweck Tätigkeiten in der industriellen Grundlagenforschung mit Untersuchungen zu technisch-technologischen Anwendungen für wettbewerbsstrategische, mittel- und langfristig umsetzbare Produktentwicklungen.

Damit werden Innovationspotentiale zur Produktoptimierung aktiviert und in einem nachhaltigen Prozess von Systemlösungen zur Verbesserung der Finalprodukte genutzt.

Es wird der regional wichtige Marktbereich der maritimen Industrie gestärkt.

Durch das Vorhaben erhöht sich die Fachkompetenz der Region zur Lösung komplexer Anforderungen an Systempartner von der Entwicklung bis zur Fertigung in der maritimen Branche.

Die Entwicklung modularer Leichtbaustrukturen führt zu neuen Fertigungsbereichen bei Zulieferern. Diese Zulieferer werden im regionalen Netzwerk in Zusammenarbeit mit Entwicklungspartnern auch den internationalen Markt bedienen und verbessern mit der entstehenden Wertschöpfung die wirtschaftliche Situation der Region nachhaltig.

Hauptzielstellung des Vorhabens der MALCOM® war die Entwicklung von Basistechnologien für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen (FVW) als Leichtbaumaterial in der maritimen Industrie, die durch hochbelastete Großstrukturen von Bauteilen mit einem großen Spektrum von Belastungskollektiven gekennzeichnet ist.

Die maritime Industrie ist von einem globalen Wettbewerb geprägt, der zu innovativen Produktentwicklungen zwingt.

Neben der Anforderung des Marktes nach geringen Herstellungskosten müssen diese Produkte den wirtschaftlich orientierten Anforderungen für die Nutzung genügen. Dazu zählen insbesondere:

- Hohe Geschwindigkeiten neuer Seetransportmittel
- Geringe Herstellungs-, Service- und Betriebskosten

Beide Kriterien werden durch die Anwendung von FVW erfüllt.

Die angestrebte Anwendungssystematik für eine Modularisierung von Leichtbaustrukturen ergibt eine wissenschaftlich fundierte Entscheidungsgrundlage für die Verfügbarkeit und Dimensionierung von Großstrukturen aus FVW.

Bei diesen Großstrukturen handelt es sich z. B. um

- Schornsteinverkleidungen,
- Strömungsleiteinrichtungen,
- Rümpfe und/oder Decks für schnelle Boote und Yachten, auch Bodeneffektfahrzeuge sowie
- Deckshäuser und Aufbauten.

Mit dem Vorhaben wird eine Methode entwickelt, die systematisierte Lösungen für den Einsatz von FVW in der maritimen Industrie, insbesondere bei Schutz- und Leiteinrichtungen im Großschiffbau und für tragende Strukturen schneller Seetransporte bereitstellt.

Die Aufgabenstellungen zur Anwendung von FVW werden durchgängig von der Konstruktion und Dimensionierung über die Fertigung bis zur Montage in oder auf dem Finalprodukt in einer Hand bearbeitet.

## II. Eingehende Darstellung

### 2. Zielstellung des Vorhabens

Gesamtzielstellung des Teilvorhabens der MALCOM® war die Analyse von Einsatzbedingungen für Faserverbundwerkstoffe (FVW) in der maritimen Industrie im Großschiffbau und bei schnellen Seetransportmitteln sowie die Entwicklung modularisierter Lösungen für ausgewählte Bauteilgruppen.

Um vor allem kleinen und mittelständischen Unternehmen die Möglichkeit zu erschließen, im Marktsegment des Leichtbaus mit FVW in der maritimen Industrie erfolgreich zu werden, sollten Arbeitsmethoden so entwickelt werden, dass im Verbund von KMU die vollständige Entwicklung, Fertigung und Montage von Leichtbauprodukten aus FVW vorgenommen werden kann.

Als Besonderheit im Vergleich mit Branchen, die typische Serienprodukte herstellen, sind Produkte in der maritimen Branche in der Regel Einzel- oder Kleinstserienprodukte.

Der technisch-technologische Ablauf des Gesamtprozesses ist in **Bild 2.1** dargestellt.

Für das Vorhaben wurden aus der Gesamtzielstellung folgende Teilaufgaben (TA) abgeleitet über deren Bearbeitung im nachfolgenden Abschnitt 3 berichtet wird.

#### Teilaufgabe 1: *Bewertung von Werkstoffeigenschaften und Analyse der Einsatzmöglichkeiten*

Bei Leichtbauprodukten aus FVW sind in der Regel bereits in der frühen Entwurfsphase Materialeigenschaften und Fertigungsbedingungen festzulegen.

Da für die Entwicklungsingenieure in der maritimen Industrie geeignete Übersichten nicht verfügbar sind, ist eine Materialdatenbank so aufzubauen, dass in Abhängigkeit von den bei Anwendungen geforderten Eigenschaften geeignete Materialien ausgewählt werden können.

#### Teilaufgabe 2: *Definition von ausgewählten Bauteilstrukturen und Möglichkeiten zur Modularisierung*

Für typische Bauteilstrukturen beim Bau von Großschiffen und schnellen Seetransportmitteln ist zu untersuchen, wie unter den Bedingungen der Einzel- und Kleinserienfertigung für das Endprodukt Produktelemente und Prozesse zu ihrer Entwicklung und Herstellung modularisiert werden können.

Durch die Modularisierung sind höhere Serieneffekte zu erschließen.

### Teilaufgabe 3: *Konzipierung einer Fertigungstechnologie*

Die Fertigungstechnologie hat folgende Bedingungen zu berücksichtigen:

- Bauteilgeometrie aus der Konstruktion
- Materialdimensionen aus Belastungsrechnungen
- Art und Aufwand des Modell- und Formenbaus als Fertigungsvorbereitung
- Fügevarianten in der Vor- und Endmontage zur Bauteilintegration
- Fertigungsaufwand des Endproduktes

Das zu entwickelnde Technologiekonzept liefert die Grundlagen für alle Entscheidungen über den inhaltlichen und zeitlichen Ablauf der Bauteilherstellung als Gesamtprozess von der Entwicklung bis einschließlich zur Montage im maritimen Finalprodukt.

### Teilaufgabe 4: *Dimensionierung von Bauteilstrukturen und Bauteilintegration in Großstrukturen*

Ausgehend von der Aufgabenstellung zum Einsatz von FVW erfolgt im Zusammenwirken zwischen CAD-Entwicklung und FEM-Berechnungen die Bauteildimensionierung. Damit verbunden wird eine Bauteilstrukturierung nach Materialarten und -mengen sowie die konstruktive Gestaltung von Verstärkungen und Schnittstellen mit einer entsprechenden geometrischen Zuordnung innerhalb von Großstrukturen des Finalproduktes vorgenommen.

Das Ergebnis ist eine optimierte Bestimmung des Material- und Fertigungsaufwandes für das FVW-Produkt innerhalb der CAD-definierten Geometrie.

Für die Integration der FVW-Bauteile in die Gesamtstruktur des Finalproduktes wird eine Methode zum Informations- und Datenaustausch zwischen dem Finalproduzenten, z. B. einer Werft und dem KMU als Baugruppen- bzw. Einzelteilhersteller erarbeitet.

### Teilaufgabe 5: *Modellierung des Fertigungsprozesses von Bauteilstrukturen*

Ausgehend von der Dimensionierung und Strukturierung sowie der anschließenden CAD-Konstruktion wird der Fertigungsprozess modelliert. Das erfolgt für die Arbeitsschritte

- Oberflächenmodellierung,
- Fertigungssimulation,
- Erzeugen von CNC-Steuerdaten,
- Modell- und Formenbau,
- Laminieren/Endbearbeitung,
- Montage.

Die Oberflächenmodellierung erfolgt für beliebige Freiformflächen.

Die Produktoberflächen der CAD-Konstruktion werden vollständig mathematisch beschrieben.

Damit werden die entscheidenden Grundlagen für eine maschinelle Fertigung von Modellen, Formen und des Laminates geschaffen.

Es werden Daten und Informationen generiert, mit denen für CNC-Werkzeugmaschinen und -Anlagen Steuerdaten erarbeitet werden, die von verschiedenartigen Maschinensteuerungen weiterverarbeitet werden können.

Für den Formen- und Modellbau werden Systeme entwickelt, die die Fertigung von FVW-Bauteilen in modularisierter Ausführung unterstützen.

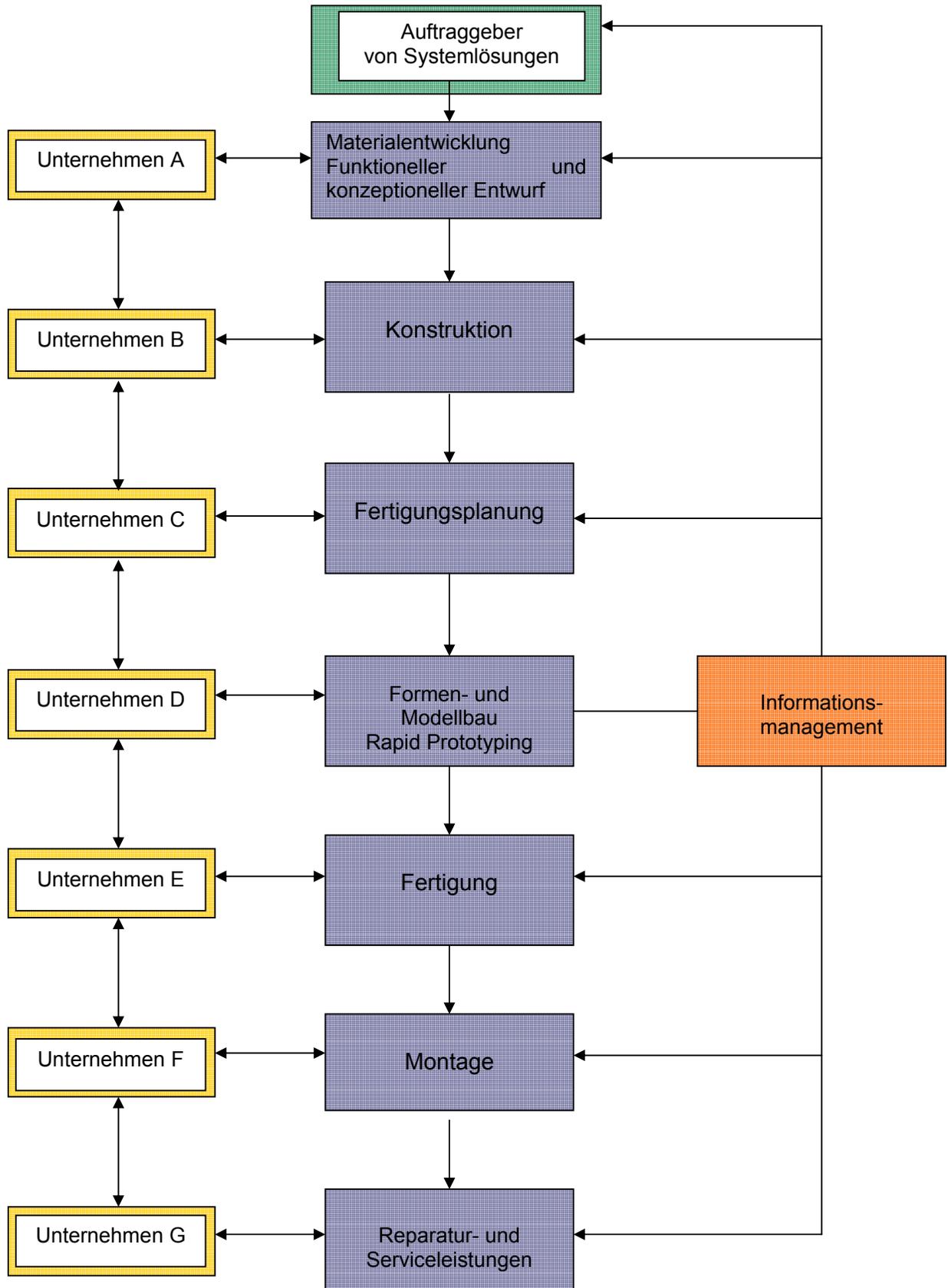
Die Modellierung des Fertigungsprozesses umfasst auch den Teilprozess des Laminierens. Es wird untersucht, für welche Bauteilmodule bestimmte Laminierverfahren einsetzbar sind.

Für die Montageprozesse ist eine inhaltliche Modellierung für die Einordnung in die Gesamtfertigung des Finalproduktes auszuführen.

Damit werden die Schnittstellen zu umgebenden Bauteilstrukturen definiert und eine Bestimmung der Fügeverfahren vorgenommen.

### Teilaufgabe 6: *Fertigung von Demonstrationsmustern*

Auf der Basis der definierten Bauteilstrukturen nach TA 2 werden modulare Bauteile zur Überprüfung der Teilergebnisse aus den TA 3 und TA 5 gefertigt. Entsprechende Anwendungen werden mit Finalproduzenten zur Prüfung und Erprobung vereinbart.



**Bild 2.1** Prozessablauf für den Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen

### 3. Erzielte Ergebnisse

#### 3.1 Bewertung von Werkstoffeigenschaften und Analyse der Einsatzmöglichkeiten

Für die geplanten Anwendungen von FVW in der maritimen Industrie ist ein breit gefächertes Spektrum von Eigenschaften durch die Materialien zu erfüllen.

Es gehört zu den Vorteilen der FVW im Vergleich mit metallischen Werkstoffen, dass Anwender in der Lage sind aus den Basiskomponenten der Werkstoffe, u. a. Fasern, Harze, Zuschlagstoffe, Materialkombinationen mit vorgegebenen Eigenschaften zu erzeugen.

Weil die Anzahl der Basiskomponenten und der damit zu erzeugenden Materialkombinationen sehr hoch ist, ist im Rahmen des Vorhabens zur Systematisierung und Vereinfachung der Arbeit eine Datenbank aufgebaut worden.

Ihre Grundstruktur und ausgewählte Details werden im Folgenden dargestellt. Basiskomponenten und daraus hergestellte FVW sind nach folgenden Gruppen systematisiert:

- Harze
- Fasern
- Additive
- Prepregs
- Lamine
- Spezialwerkstoffe
- Stützstoffe

Jeder Gruppe sind Einzelkomponenten zugeordnet. Eine kumulative Erweiterung der Daten ist in Abhängigkeit von neu eingehenden Informationen jederzeit möglich.

Die Datenbank ist mit einer Suchfunktion ausgestattet, welche bei Vorgabe von Eigenschaftsparametern die passende Komponente oder den Werkstoff ermittelt. Jeder Position sind die bekannten Hersteller zugeordnet, um auch Liefermöglichkeiten und Preise ermitteln zu können.

**Bild 3.1.1** zeigt als Beispiel eine Übersicht über Epoxydharze mit Angabe von mechanischen Eigenschaften.

**Bild 3.1.2** zeigt ein Suchergebnis für ein vorgegebenes Epoxydharz mit Angabe der mechanischen Eigenschaften.

In analoger Weise können Angaben zu elektrischen, thermischen, chemischen und weiteren Eigenschaften bereitgestellt werden.

In den **Bildern 3.1.3 bis 3.1.8** sind Beispiele für die Gruppen Fasern, Additive, Pre-  
pegs, Lamine, Spezialwerkstoffe und Stützstoffe dargestellt.

Als Einsatzbereiche für die FVW sind Strukturen von großen Schiffen und schnellen  
Seetransportmitteln vorgesehen.

Nach Prüfung der Anforderungen an neue Produktlösungen, die besser als bisherige  
metallische Konstruktionen sind, ergeben sich folgende zusammengefasste  
Aussagen:

Die größten Chancen für FVW im Großschiffbau ergeben sich bei Anwendungen in  
den Bereichen

- lasttragende Strukturen in Deckshausbereichen und Aufbauten,
- verkleidende und schützende Strukturen in Deckshaus- und  
Aufbautenbereichen,
- thermisch belastete Bauteile in Wohn-, Aufenthalts- und technischen  
Räumen,
- extrem leichte Strukturen für schnelle Seetransportmittel mit Mehrfach-  
funktionen als tragende, verkleidende und funktionsintegrierte Lösungen.

Wesentliche Eigenschaften, die von den FVW gefordert werden, sind

- sehr geringes Gewicht,
- Korrosionsbeständigkeit,
- UV-Beständigkeit bei Anwendungen in Außenbereichen,
- hohe mechanische Belastbarkeit,
- designerische Gestaltbarkeit mit hoher Oberflächengüte,
- hohe thermische Belastbarkeit und Isolierfähigkeit bei  
Anwendungen in speziellen Räumen.

Insbesondere zur Erfüllung der letztgenannten Eigenschaften sind die auf dem Markt  
verfügbaren Materialien nur sehr eingeschränkt verfügbar.

Im Vorhaben waren deshalb eigene Entwicklungen eingeplant.

Home Customers

**Search**

Search Edit Password Authorize Users Sign Out

Material	Zugfestigkeit [MPa]		E-Modul [MPa]		Biegefestigkeit [MPa]		E-Modul Biegung [MPa]		Druckfestigkeit [MPa]		Search
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	
Harze											

Name	Gruppe	Zugfestigkeit	E-Modul	Zug	Biegefestigkeit	E-Modul	Biegung	Druckfestigkeit
117LV-229	EP-Harz	69,66	3427,59	117,99	3234,48	101,67		
117LV-237	EP-Harz	74,62	3586,21	129,17	3655,17	109,01		
117LV-239	EP-Harz	66,08	3213,79	113,74	3000	106,83		
125-226	EP-Harz	71,63	3103,45	131,63	3613,79	108,25		
125-229	EP-Harz	70,67	3082,76	121,51	3503,45	101,54		
125-239	EP-Harz	59,88	3310,34	115,86	3496,55	102,67		
135-226	EP-Harz	59,51	3793,1	131,29	3724,14	113,29		
135-229	EP-Harz	62,7	3517,24	100,59	3448,28	112,61		
135-237	EP-Harz	68,5	3517,24	142,83	3724,14	116,03		
145-226	EP-Harz	74,35	3227,59	144,44	4262,07	106,77		
145-229	EP-Harz	72,92	3200	133,71	4234,48	100,62		
145-237	EP-Harz	72,91	3655,17	121,83	3862,07	117,5		
7900 ABC	EP-Harz	36	3130	118	3560			
AB 30-150	EP-Harz	39,31						
AB 4-15	EP-Harz	39,31						
AB 45-270	EP-Harz	44,83						
AB 8-90	EP-Harz	41,38						
Acrysol Decor Metal	Acryl-Harz							25
Acrysol Roc	Acryl-Harz							40
ADTECH	EP-Harz	41,42	2963,45	72	4000	105,38		

- - > >| [1/12]

**Bild 3.1.1 Auswahl von Epoxydharzen mit Angabe mechanischer Eigenschaften**

Home Customers

# Edit

Search Edit Password Authorize Users Sign Out

[Harze](#)

- [- EP-Harz](#) ✘ 117LV-229
- [- UP-Harz](#) ✘ 117LV-237
- [- UP-Schaum](#) ✘ 117LV-239
- [- PET-Harz](#) ✘ 125-226
- [- RTM-Harz](#) ✘ 125-229
- [- VE-Harz](#) ✘ 125-239
- [- Acryl-Harz](#) ✘ 135-226
- [- PC-Harz](#) ✘ 135-229
- [Fasern](#) ✘ 135-229
- [Additive](#) ✘ 135-229
- [Prepregs](#) ✘ 135-237
- [Laminate](#) ✘ 145-226
- [Spezial](#) ✘ 145-229
- [Stützstoffe](#) ✘ 145-237
- [Hersteller](#) ✘ 7900 ABC
- ✘ AB 30-150
- ✘ AB 4-15
- ✘ AB 45-270
- ✘ AB 8-90
- ✘ Acrystal Decor Metal
- ✘ Acrystal Roc
- ✘ ADTECH

- - > >| [1/12]

**Harze**

**Material:** 117LV-229      **Gruppe:** EP-Harz      **Hersteller:** PRO-SET

**Link:** <http://www.prosetepoxy.com> **Linked file:** [117LV%2D229.PDF](#),

Main
Mechanical
Electrical
Thermic
Chemical
Other

**Mechanische Eigenschaften**

Dichte [g/cm³]:	<input type="text"/>
Zugfestigkeit [MPa]:	69,66
Druckfestigkeit [MPa]:	101,67
Elastizitätsmodul_Zugversuch [MPa]:	3427,59
Schubmodul [MPa]:	<input type="text"/>
Querkontraktionszahl:	<input type="text"/>
Bruchdehnung [%]:	3,2
Elastizitätsmodul_Biegeversuch [MPa]:	3234,48
Biegefestigkeit [MPa]:	117,99
Schlagzähigkeit_Charpy [kJ/m²]:	<input type="text"/>
Barcolhärte:	<input type="text"/>
Kugeldruckhärte [MPa]:	<input type="text"/>
Reißdehnung [%]:	<input type="text"/>
Randfaserdehnung [%]:	<input type="text"/>
Härte_ShoreD:	83
Verarbeitung:	Handlaminiere; mit Härter 229

Bild 3.1.2 Übersicht und Suchergebnis für ein Epoxydharz mit vorgegebenen Eigenschaften

Home Customers

# Edit

Search Edit Password Authorize Users Sign Out

[Harze](#)  
[Fasern](#)  
[- Glasfaser](#)  
[- Kohlenstofffaser](#)  
[- Polymerfasern](#)  
[- Siliziumkarbid](#)  
[- Naturfasern](#)  
[- Kohlenstoffroving](#)  
[- Kohlenstoffmatte](#)  
[- Kohlenstoffgewebe](#)  
[- Kurzfaser](#)  
[- Glasfaserroving](#)  
[- Glasfaserrovinggewebe](#)  
[- Glasfasermatte](#)  
[- Polymergewebe](#)  
[- Polymerroving](#)  
[Additive](#)  
[Prepregs](#)  
[Laminat](#)  
[Spezial](#)  
[Stützstoffe](#)  
[Hersteller](#)

**Fasern Name**

- ✘ A-Glass
- ✘ Apollo HM
- ✘ Apollo HS
- ✘ Apollo IM
- ✘ AR\_Glas
- ✘ Aramid
- ✘ Arboform
- ✘ AS4
- ✘ AS4C
- ✘ AS4D
- ✘ AS-6
- ✘ Baumwolle
- ✘ BO030
- ✘ BO050
- ✘ Celion ST
- ✘ C-Glas
- ✘ D-Glas
- ✘ Donacarbo S
- ✘ Dyneema
- ✘ EC 14 P185

[1/8]

Hinzufügen

**Fasern**

Material: Apollo HM      Gruppe: Kohlenstoffroving  
Hersteller: Hysol Grafil  
Link: <http://www.grafil.com>      Linked file:

Main

Eigenschaften

Gruppe:	Kohlenstoffroving
Hersteller/Händler:	Hysol Grafil
URL_Link:	<a href="http://www.grafil.com">http://www.grafil.com</a>
Art:	
Dichte [g/cm³]:	
Zugfestigkeit [MPa]:	3400
Elastizitätsmodul_Zugversuch [MPa]:	390000
Biegefestigkeit [MPa]:	
Elastizitätsmodul_Biegeversuch [MPa]:	
Druckfestigkeit [MPa]:	
Elastizitätsmodul_Druckversuch [MPa]:	
Bruchdehnung [%]:	0,85
Schubmodul [MPa]:	
Querkontraktionszahl:	
Spez_Widerstand [ $\Omega_{cm}$ ]:	
Weiter_Bemerkungen:	

Speichern Zurücksetzen

     Durchsuchen...      Speichern

Bild 3.1.3 Übersicht und Suchergebnis für einen Fasertyp

Home Customers

## Edit

Search Edit Password Authorize Users Sign Out

	Additive Name	Additive
<a href="#">Harze</a>		
<a href="#">Fasern</a>		
<a href="#">Additive</a>	✗ <a href="#">Aktivverdünner H</a>	<b>Material:</b> Aktivverdünner H <b>Hersteller:</b> Suter-Kunststoffe
<a href="#">Prepregs</a>	✗ <a href="#">Alkalibestandig 410</a>	<b>Link:</b> <a href="http://www.swiss-composite.ch">http://www.swiss-composite.ch</a> <b>Linked file:</b>
<a href="#">Laminate</a>	✗ <a href="#">Alugriess</a>	
<a href="#">Spezial</a>	✗ <a href="#">Aluminiumkompulver</a>	
<a href="#">Stützstoffe</a>	✗ <a href="#">Antioxidation KE6502</a>	
<a href="#">Hersteller</a>	✗ <a href="#">Aufheller L11</a>	
	✗ <a href="#">Ausblühungsvermeidung 22</a>	
	✗ <a href="#">Baumwollflocken</a>	
	✗ <a href="#">BYK-A 500 / 501 / 515 ...</a>	
	✗ <a href="#">BYK-LP 6 665</a>	
	✗ <a href="#">BYK-R 605</a>	
	✗ <a href="#">BYK-S 740 / 750</a>	
	✗ <a href="#">BYK-W 920 / 966/ 980</a>	
	✗ <a href="#">Carbonfasermehl</a>	
	✗ <a href="#">Chemieschutzvlies</a>	
	✗ <a href="#">Entformungshilfe P130</a>	
	✗ <a href="#">Fillite</a>	
	✗ <a href="#">Flammschutz 12</a>	
	✗ <a href="#">Flexibilisator V51</a>	
	✗ <a href="#">Fließverbesserer M21</a>	
	- - > >  [1/3]	

**Main**

**Haupt Eigenschaften**

**Hersteller/Händler:**

**URL\_Link:**

**Eigenschaft:**

**Dichte [g/cm³]:**

**Weiter\_Bemerkungen:**

---

**Bild 3.1.4 Übersicht und Suchergebnis für ein Additiv**

Home Customers

**Edit**

Search Edit Password Authorize Users Sign Out

<p> <a href="#">Harze</a>  <a href="#">Fasern</a>  <a href="#">Additive</a>  <a href="#">Prepregs</a>  <a href="#">Laminat</a>  <a href="#">Spezial</a>  <a href="#">Stützstoffe</a>  <a href="#">Hersteller</a> </p>	<p><b>Prepregs Name</b></p> <p> <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">Araldit LY 556</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">CE 1021</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">CE 1201</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">CE 8011</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">CE 9204</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">CYCOM 5216-A</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">CYCOM 5216-E</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">CYCOM 5216-S</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">CYCOM 5250-4-G40-800</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">CYCOM 5250-4-IM7</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">DA 4090</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">DA 4518</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">DA 4518U</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">DA 4518U/E</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">DA 911U</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">DA409/E250</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">DA409U/G35</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">Grafil 34-600 EP</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">Grafil 34-700 EP</a>  <input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">HexPly 1990-193PW AS4</a> </p> <p> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> [1/6]         </p> <p> <input type="text"/>  <input type="button" value="Hinzufügen"/> </p>	<p> <b>Material:</b> Araldit LY 556  <b>Link:</b> </p> <p> <b>Prepregs</b>  <b>Gruppe:</b> Prepreg  <b>Hersteller:</b> Ciba-Geigy  <b>Hersteller:</b> Ciba-Geigy  <b>Linked file:</b> </p>
---	---	--

**Main**

**Eigenschaften**

<b>Gruppe:</b>	<input type="text" value="Prepreg"/>
<b>Hersteller/Händler:</b>	<input type="text" value="Ciba-Geigy"/>
<b>URL_Link:</b>	<input type="text"/>
<b>Art:</b>	<input type="text"/>
<b>Dichte [g/cm³]:</b>	<input type="text"/>
<b>Zugfestigkeit [MPa]:</b>	<input type="text" value="60"/>
<b>Elastizitätsmodul_Zugversuch [MPa]:</b>	<input type="text"/>
<b>Biegefestigkeit [MPa]:</b>	<input type="text"/>
<b>Elastizitätsmodul_Biegeversuch [MPa]:</b>	<input type="text"/>
<b>Druckfestigkeit [MPa]:</b>	<input type="text"/>
<b>Elastizitätsmodul_Druckversuch [MPa]:</b>	<input type="text"/>
<b>Bruchdehnung [%]:</b>	<input type="text" value="2"/>
<b>Schubmodul [MPa]:</b>	<input type="text"/>
<b>Querkontraktionszahl:</b>	<input type="text"/>
<b>Spez_Widerstand [Ωcm]:</b>	<input type="text"/>
<b>Härtungstemperatur [°C]:</b>	<input type="text"/>
<b>Weiter_Bemerkungen:</b>	<input type="text" value="mit und ohne Lösungsmittel verarbeitbar"/>

**Bild 3.1.5** Übersicht und Suchergebnis für ein Prepreg

Home Customers

## Edit

Search Edit Password Autorize Users Sign Out

Harze	Laminate Name	Material: Araldit MHY 956	Laminate
<a href="#">Fasern</a>	✗ Araldit MHY 956	Link:	Linked file:
<a href="#">Additive</a>	✗ BT'350E-1 (GraphitKöper)		
<a href="#">Prepregs</a>	✗ BT250E-1-C		
<a href="#">Laminate</a>	✗ BT250E-1-C-UD		
<a href="#">Spezial</a>	✗ BT250E-1-E		
<a href="#">Stützstoffe</a>	✗ BT250E-5 (GraphGew)		
<a href="#">Hersteller</a>	✗ BT250E-5 (S2Glas)		
	✗ BT250E-5 (T700)		
	✗ C-BX0900 (CarbonBi)		
	✗ C-BX1200(CarbonBi)		
	✗ C-BX1400 (CarbonBi)		
	✗ C-LA2012 (CarbonUni)		
	✗ C-LT2200(CarbonBi)		
	✗ E-LT1200-14P(GlassBi)		
	✗ E-LT1600(GlassBi)		
	✗ E-LT1900-14K(GlassBi)		
	✗ E-LT220(GlassBi)		
	✗ E-LT2800(Glass/Bi)		
	✗ E-LT3600(GlasBi)		
	✗ E-LT4400(GlasBi)		

[1/4]

Main

**Haupt Eigenschaften**

Hersteller:	<input type="text"/>
URL_Link:	<input type="text"/>
Harz:	EP-Harz
Faser:	Glas
Fasergehalt [Vol%]:	58
Faserorientierung:	<input type="text"/>
Dichte [g/cm³]:	1,1
Laminier_Verfahren:	<input type="text"/>
Zugfestigkeit [MPa]:	<input type="text"/>
Elastizitätsmodul_Zugversuch [MPa]:	<input type="text"/>
Biegefestigkeit [MPa]:	270
Elastizitätsmodul_Biegeversuch [MPa]:	17000
Druckfestigkeit [MPa]:	<input type="text"/>
Elastizitätsmodul_Druckversuch [MPa]:	<input type="text"/>
Bruchdehnung [%]:	<input type="text"/>
Schubmodul [MPa]:	<input type="text"/>
Querkontraktionszahl:	<input type="text"/>
Spez_Widerstand [ $\Omega\text{cm}$ ]:	<input type="text"/>

**Bild 3.1.6 Übersicht und Suchergebnis für ein Laminat**

Home Customers

# Edit

Search Edit Password Autorize Users Sign Out

[Harze](#)  
[Fasern](#)  
[Additive](#)  
[Prepregs](#)  
[Laminate](#)  
[Spezial](#)  
[Stützstoffe](#)  
[Hersteller](#)

**Spezial Name**

- ✗ Trennwachs WS
- ✗ ACMOSAN 82-177
- ✗ ACMOSAN 82-99E
- ✗ ACMOSAN P82-7099
- ✗ Farbentferner
- ✗ Faserspachtel
- ✗ Flexibilisator V51
- ✗ Harzreiniger tm
- ✗ Hochtemp.-Kleber
- ✗ Hochtemp.Kleber 1100
- ✗ Klebegel 8500
- ✗ Klebeharz A10
- ✗ Klebeharz A20
- ✗ Klebeharz P
- ✗ Klebepaste
- ✗ Kleber Neukadur PN444
- ✗ Klebstoff P-Bond
- ✗ Metallkleber
- ✗ Thixotropiermittel Aerosil200
- ✗ Trennemulsion F57/NC

- - > >| [1/2]

Hinzufügen

**Spezial**

Material: Trennwachs WS    Hersteller: mgs  
 Link: <http://www.mgs-online.com> Linked file:

Main

Haupt Eigenschaften

Hersteller/Händler:

URL\_Link:

Eigenschaft:

Dichte [g/cm³]:

Weiter\_Bemerkungen:

Anfrage senden Zurücksetzen

Durchsuchen... Speichern

Bild 3.1.7 Übersicht und Suchergebnis für einen Spezialwerkstoff

Home Customers

## Edit

Search Edit Password Authorize Users Sign Out

Harze  
 Fasern  
 Additive  
 Prepregs  
 Lamine  
 Spezial  
 Stützstoffe  
 - Hartschaum  
 - Integralschaum  
 - Sandwich  
 - Waben  
 - Weichschaum  
 - Zellschaum  
 Hersteller

**Stuetzstoffe Name**

- ✗ Airex R63.140
- ✗ Airex R63.50
- ✗ Airex R63.80
- ✗ Airex R82.110
- ✗ Airex R82.60
- ✗ Airex R82.80
- ✗ Airex S32.50
- ✗ Alcopan 85
- ✗ Alcupan 110
- ✗ Alu ECM4.8-77
- ✗ Alu ECP 6.4
- ✗ Aramidwabe
- ✗ Balsa\_Hirn Holz
- ✗ Baydur 20
- ✗ Baydur 40
- ✗ Baydur 60
- ✗ Baydur GS
- ✗ Baydur110
- ✗ Bayfit Design
- ✗ D 300

[1/5]

Hinzufügen

**Stuetzstoffe**

Material: Airex R63.140    Gruppe: Hartschaum    Hersteller: Airex  
 Link: <http://www.gaugler-lutz.de> Linked file: [Airex+R63%2E140.doc](#)

Main
Mechanical
Electrical
Thermic
Chemical
Other

**Mechanische Eigenschaften**

Dichte [g/cm³]:	<input type="text" value="0,14"/>
Zugfestigkeit [MPa]:	<input type="text" value="2,4"/>
Druckfestigkeit [MPa]:	<input type="text" value="1,6"/>
Elastizitätsmodul_Zugversuch [MPa]:	<input type="text" value="90"/>
Schubmodul [MPa]:	<input type="text"/>
Querkontraktionszahl:	<input type="text"/>
Bruchdehnung [%]:	<input type="text"/>
Elastizitätsmodul_Biegeversuch [MPa]:	<input type="text"/>
Biegefestigkeit [MPa]:	<input type="text"/>
Schlagzähigkeit_Charpy [kJ/m²]:	<input type="text" value="6,5"/>
Barcolhärte:	<input type="text"/>
Kugeldruckhärte [MPa]:	<input type="text"/>
Reißdehnung [%]:	<input type="text"/>
Randfaserdehnung [%]:	<input type="text"/>
Härte_ShoreD:	<input type="text"/>
Verarbeitung:	<input type="text" value="E-Modul Druck: 135MPa,G_Modul:37MPa,vc"/>

Speichern    Zurücksetzen

**Bild 3.1.8 Übersicht und Suchergebnis für einen Hartschaum**

### 3.2 Definition von ausgewählten Bauteilstrukturen und Möglichkeiten zur Modularisierung

---

Die Untersuchungen von ausgewählten Bauteilstrukturen und der Möglichkeiten zur Modularisierung erfolgen in den Anwendungsbereichen Deckshäuser, Decksverkleidungen und Strukturen von schnellen Seeverkehrsmitteln.

Es sollte herausgefunden werden, wie auch unter den Bedingungen der Einzel- und Kleinserienfertigung der Finalprodukte Schiff und schnelle Seeverkehrsmittel für ausgewählte Bauteilstrukturen durch Modularisierung Effekte einer Serienfertigung erschlossen werden können.

Dabei wird in diesem Zusammenhang unter Fertigung sowohl die Herstellung von Laminiermodellen als auch das Laminieren und Montieren von Bauteilen aus Faser-verbundwerkstoffen verstanden.

Deckshäuser bei Frachtschiffen gehören zu den Schiffsstrukturen, die in ihrer Form fast ausschließlich durch die funktionalen Anforderungen bei ihrer Nutzung und den Forderungen nach möglichst niedrigen Herstell- und Wartungskosten bestimmt werden.

Bei Seeschiffen hat dies zu einer äußeren Form geführt, die weitgehend durch ebene Flächen mit Abmessungen bis zu ca.  $H = 50$  m,  $B = 30$  m,  $T = 20$  m charakterisiert wird.

Für die innen liegenden Räume -Arbeitsräume, Kabinen, technische Räume, Flure, Treppenschächte- überwiegt diese Geometrie ebenfalls.

Wegen dieser relativ einfachen Formen wurde angenommen, dass sich lohnende Einsatzmöglichkeiten für FVW mit modularisierten Strukturen ergeben würden.

In Zusammenarbeit mit den anderen Partnern des Vorhabens wurde deshalb für Deckshäuser ein Gesamtkonzept zum modularisierten Aufbau und zur Fertigung entwickelt.

Für unterschiedliche Schiffstypen wurden weitgehend modularisierte Deckshausstrukturen entwickelt. Ein Beispiel zeigt **Bild 3.2.1**. Das Deckshaus wurde so strukturiert, dass es sich vollständig aus ebenen, rechtwinklig zueinander gestellten Flächenelementen aufbauen lässt, die durch gewickelte Stabtragwerke verbunden sind. Die Stabtragwerke übernehmen die globalen Belastungen im System. Entwicklung und Herstellung erfolgen durch den Vorhabenspartner AIR GmbH.

Die außen liegenden Flächenelemente übernehmen den Schutz der inneren Strukturen vor Wind- und Wettereinflüssen, einschließlich überkommenden Seewassers. Sie sollen korrosionsbeständig und ihre Oberfläche glatt und UV-beständig sein. In mehrere Öffnungen sind Türen einzusetzen, die den Zu- und Abgang nach außen gewährleisten.

Die innen liegenden Raumbegrenzungen -Wände, Türen, Fensterkästen, Decken und Fußböden- haben mechanische Belastungen infolge der Nutzung durch Crew und Passagiere aufzunehmen. Sie sind zusätzlich für Bedingungen hoher thermischer Belastungen und thermischer Isolierung auszulegen. Die thermischen Belastungen sind mit maximal 950 °C für 90 Min. angegeben, die Isolierfähigkeit nach SOLAS-Vorschriften gewährleistet bei höchster einseitiger thermischer Belastung von 950 °C einen maximalen Temperaturanstieg auf der gegenüber liegenden Wand bis auf 165 °C.

Die Befestigung der ebenen Flächenelemente an den Stabstrukturen erfolgt durch Schrauben und/oder Kleben.

Detaillierte Ansichten der verschiedenen Raumelemente mit Stützstrukturen in FVW-Bauweise zeigen die **Bilder 3.2.2 bis 3.2.6**.

Durch die Strukturierung der Raumbegrenzungen mit ebenen Flächenelementen ist deren Herstellung nach weitgehend vereinheitlichten Fertigungsmethoden möglich. Details dazu werden in den Abschnitten 3.3 und 3.5 dargelegt.

Insbesondere Decksverkleidungen bei Kreuzfahrt- und Ro-Pax-Schiffen sowie Megayachten weisen stark gekrümmte Oberflächen auf. Ihre Größe kann mehrere tausend Quadratmeter betragen. Ein Beispiel für die Decksverkleidung einer Megayacht zeigt **Bild 3.2.7**.

Bei einer geometrischen Zerlegung der Einzelteile lassen sich keine oder nur sehr wenige Elemente mit gleicher Oberflächengeometrie finden.

Für diese Strukturen ist der Formenbau sehr aufwendig. Sie werden herkömmlich durch Fräsen aus kompakten Schaumstoffblöcken hergestellt.

Es wurde deshalb untersucht, wie sich der Formenbau durch vereinfachte modularisierte Lösungen verbessern lässt.

Dazu erfolgte die Entwicklung einer Skelettbauweise. Es wird ein Stützgerüst, das aus ebenen Plattenelementen zusammengesetzt wird, als Laminiermodell aufgebaut. Ein Beispiel zeigt **Bild 3.2.8**.

Diese Laminiermodelle eignen sich vor allem für die Anfertigung von Sandwichlaminaten, die überwiegend bei Decksverkleidungen angewendet werden.

Die Modularisierung erfolgt hierbei auf der Ebene der Bauteilherstellung für das Skelettmodell.

Die ebenen Bauteile werden sämtlich nach verschachtelten Zuschnittplänen mit 3 D-Fräsen ausgeschnitten. Die Prozeduren zur Erzeugung der Steuerdaten sind weitgehend standardisiert.

Dadurch ergeben sich erhebliche Einsparungen gegenüber der Arbeitsweise mit kompakten 3 D-Formen.

Das Fügen der Einzelteile zum Skelettmodell ist durch Entwicklung einer Steck- und Schraubbauweise ebenfalls weitgehend standardisiert.  
Die Größe der Skelettmodelle lässt sich sehr gut an eine technologisch bedingte Teilung der herzustellenden Laminatstrukturen anpassen.

Die Einzelteile der Skelettmodelle sind als Module durch einfaches Umstecken zur Änderung der Fügefolge für die jeweils spiegelbildlichen Bauteile der anderen Schiffsseite nutzbar, so dass die Herstellkosten für diese Modelle annähernd halbiert werden.

Nach der Definition von ausgewählten Bauteilstrukturen für modularisierte Bauweisen mit FVW im Großschiffbau wurde weiterhin untersucht, für welche Arten solcher Strukturen diese Möglichkeiten bei schnellen Seetransportmitteln bestehen. Als Finalprodukte wurden dafür schnelle Yachten und Bodeneffektfahrzeuge ausgewählt.

Für diese Fahrzeugtypen gilt, dass sie mit extrem geringer Eigenmasse sehr hohe mechanische Belastungen aufnehmen müssen.

An die Genauigkeit der Bauteile werden Anforderungen gestellt, die maximale Toleranzen von  $\pm 2\text{mm}/10\text{ m}$  zulassen.

Als Baumaterial werden überwiegende teure Kohlefaserlaminat eingesetzt.

Auch für diese Fahrzeugtypen gilt die Aussage, dass sich bei einer geometrischen Zerlegung der Baustrukturen fast keine Elemente mit gleicher Oberflächengeometrie finden lassen.

Es wurde deshalb ebenfalls untersucht, wie sich der aufwändige Formenbau durch vereinfachte Lösungen verbessern lässt.

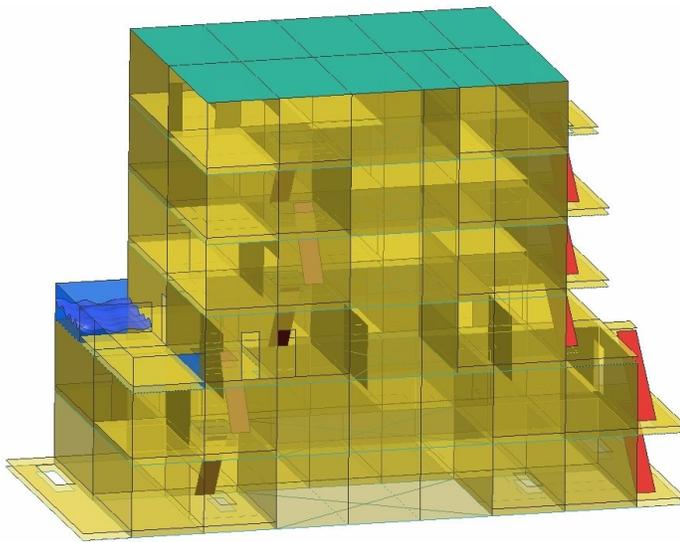
Auf Grundlage technischer Planungen wurde angenommen, dass die hohen Genauigkeitsanforderungen erfüllt werden konnten.

In den weiteren Arbeiten, über deren Ergebnis in den Abschnitten 3.3 und 3.5 berichtet wird, konnte diese Annahme bestätigt werden.

Für Teile der Rumpfstrukturen und der Flügel bei Bodeneffektfahrzeugen ist die Skelettbauweise im Formenbau anwendbar.

Die Systematik der Skelettbauweise mit Modularisierung/Standardisierung ist ebenfalls anwendbar für die Herstellung leichter, extrem belastbarer Spanten in Sandwichbauweise.

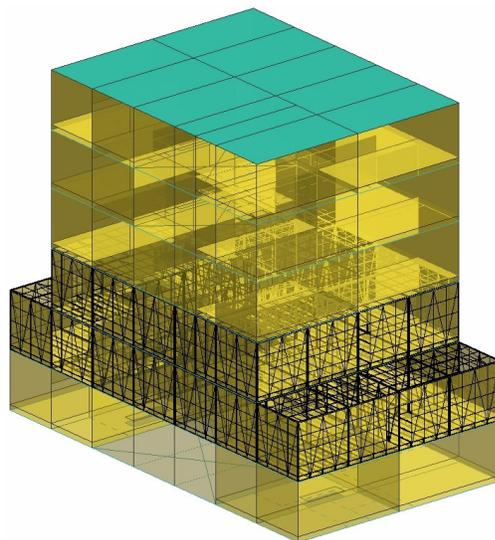
Ausgewählte Spantformen zeigt **Bild 3.2.9**.



*3 D-Modell*

*von*

- 5. Deckshaus Deck
- 4. Deckshaus Deck
- 3. Deckshaus Deck
- 2. Deckshaus Deck
- 1. Deckshaus Deck

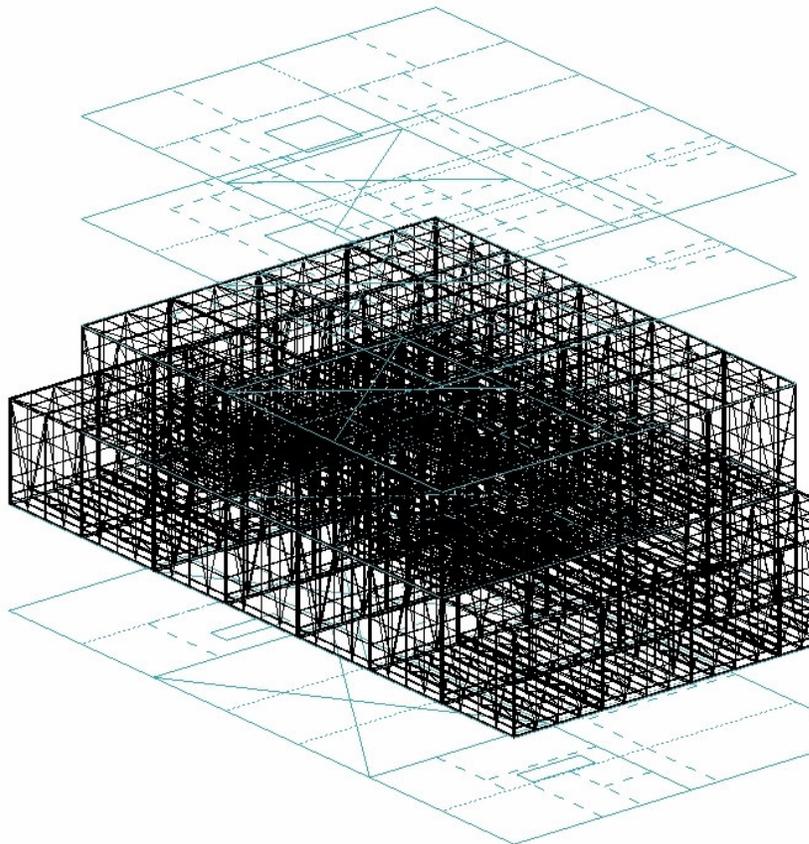


*Lage der Module*

*von*

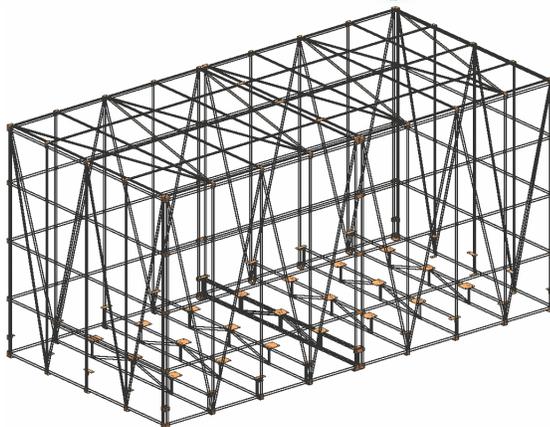
- 2. Deckshaus Deck
- 1. Deckshaus Deck

**Bild 3.2.1 Modularisierte Deckshausstruktur**

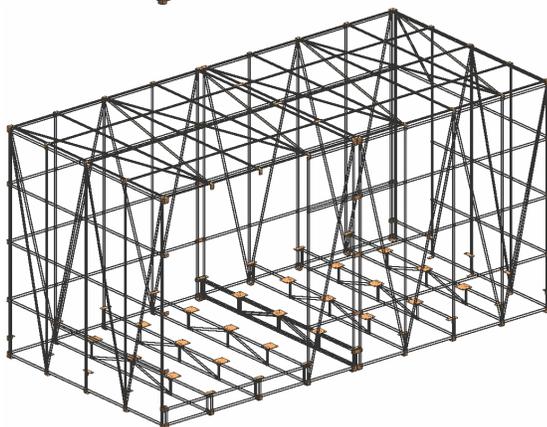


*Module  
von*

1. Deckshaus Deck
2. Deckshaus Deck

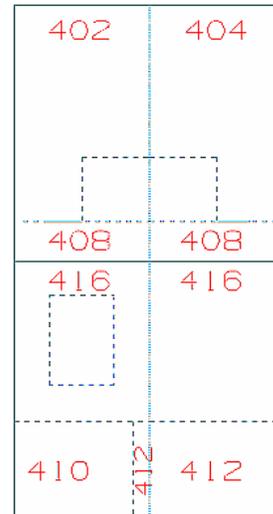
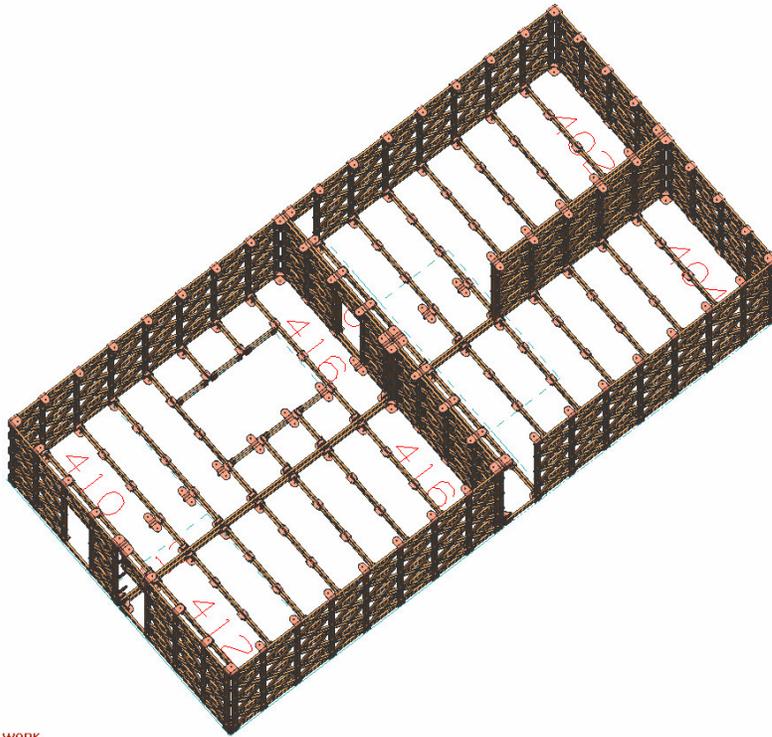


*Modul komplett*  
6.400 x 3.200 x 3.200

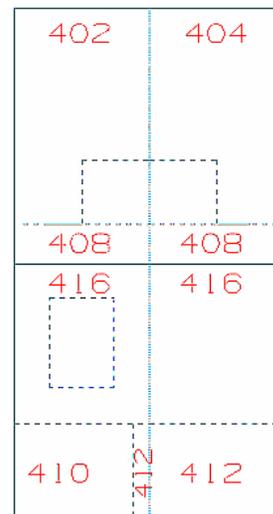


*Modul  
mit Öffnungen*

**Bild 3.2.2 Module mit Stützstrukturen des Deckshauses**

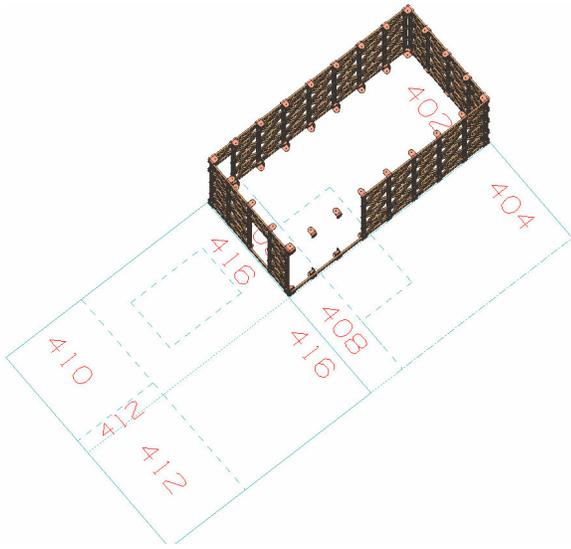


4 Module  
2. Deckhaus Deck  
ohne Decken

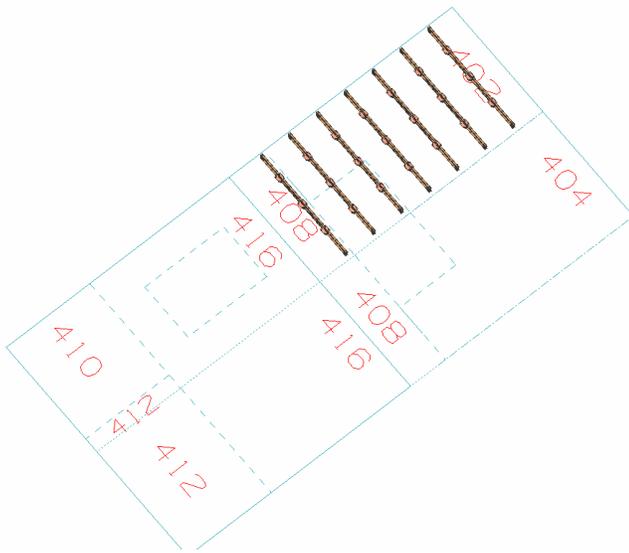


4 Module  
2. Deckhaus Deck  
ohne Fußböden

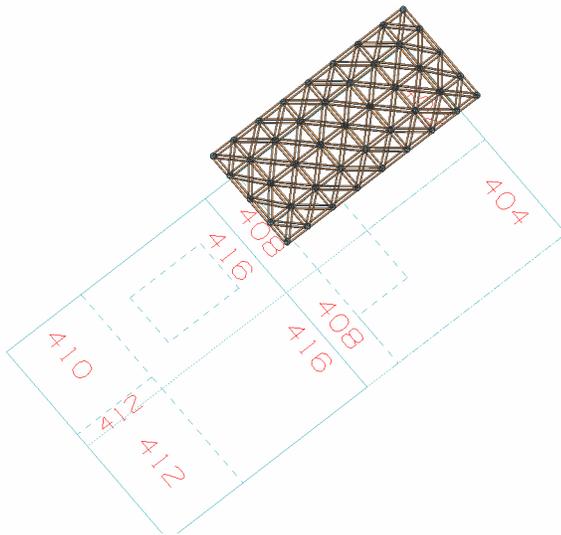
**Bild 3.2.3** Raummodule mit Stützstrukturen des Deckhauses



Modul 402/408  
Wände außen

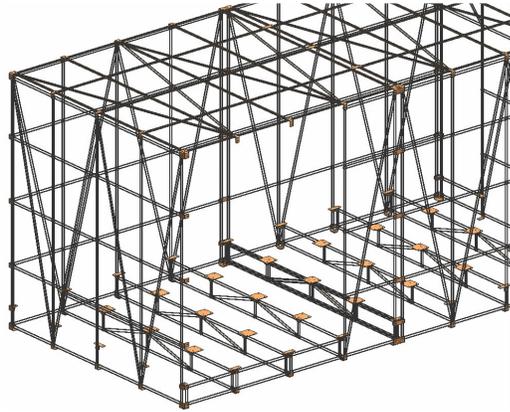


Modul 402/408  
Fußboden

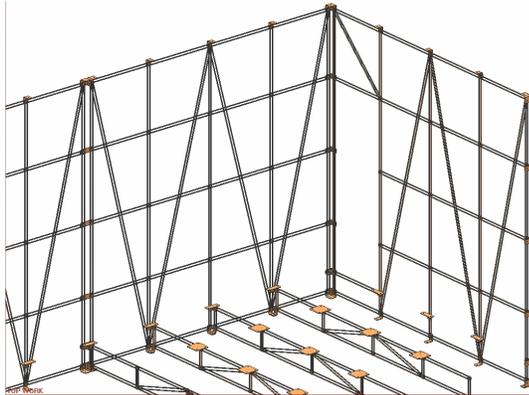


Modul 402/408  
Decke

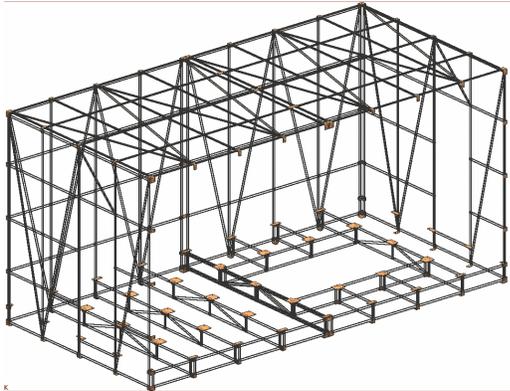
**Bild 3.2.4 Außenwände, Fußboden und Decke einer Kabine mit Stützstrukturen in modularer Bauweise**



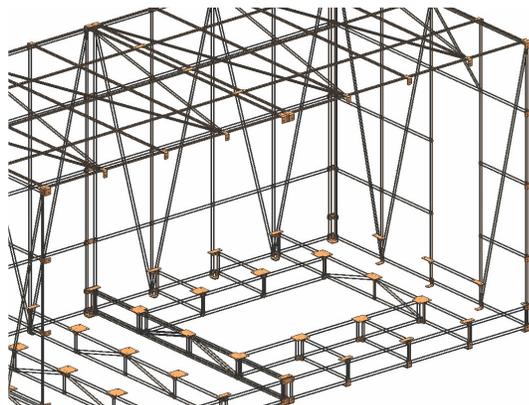
Öffnung für  
Sanitärzelle und Flur



Öffnung für  
Tür

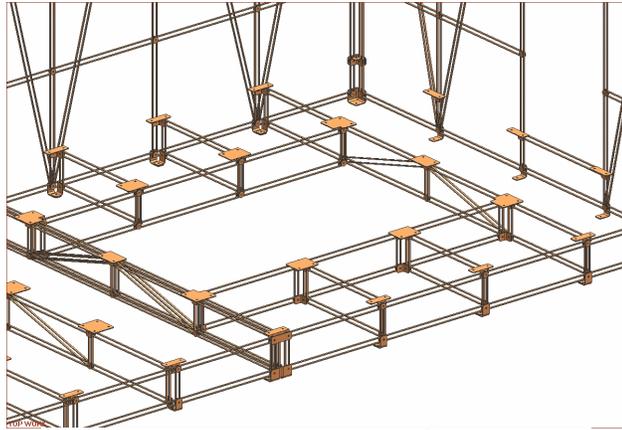


Modul ohne  
Seitenwand

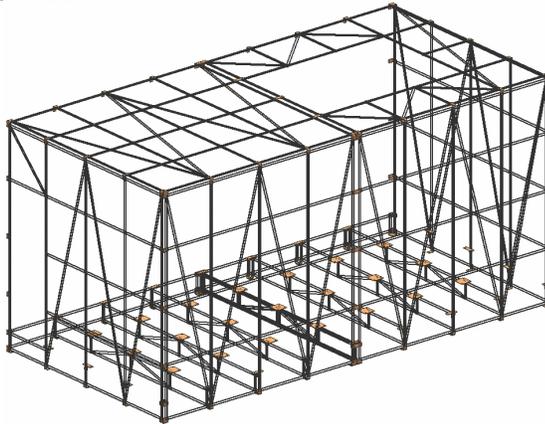


Öffnung für Tür

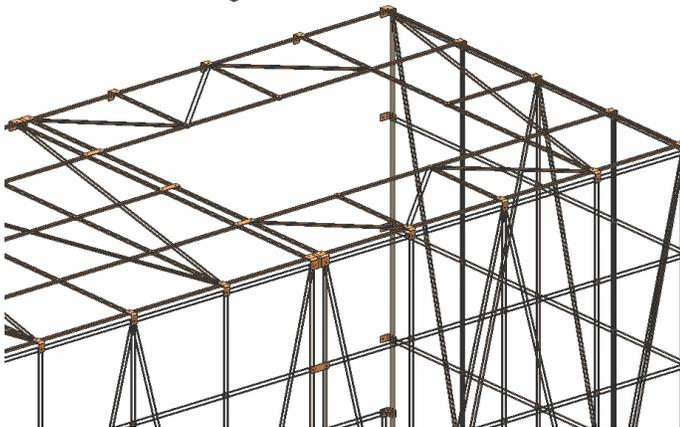
**Bild 3.2.5 Details der Modulbauweise mit Stützstrukturen (1)**



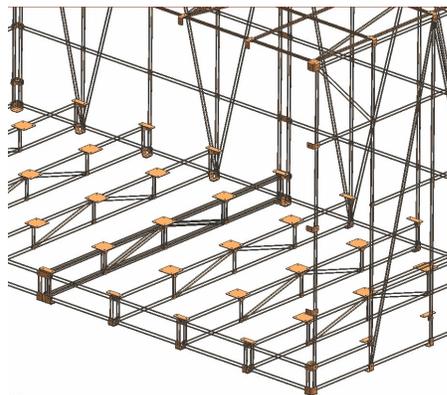
Treppenauge im  
Fußbodenbereich



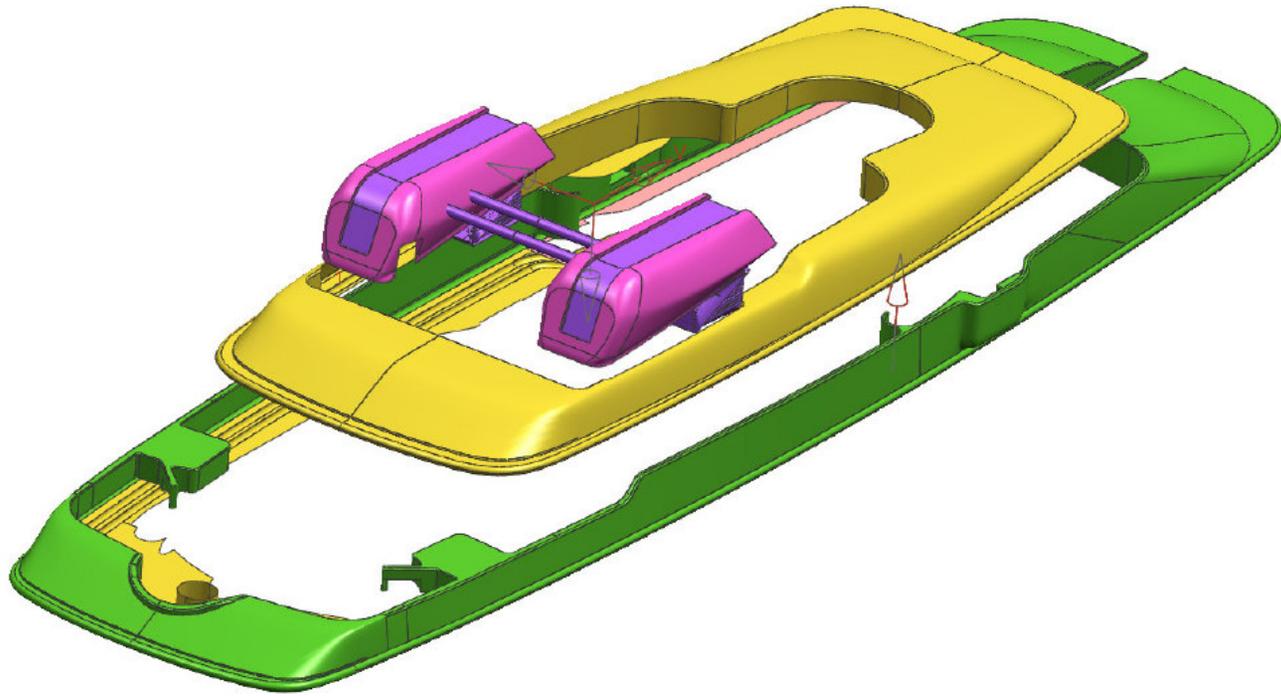
Treppenauge im  
Deckenbereich



Anschluss  
Decke-Wand



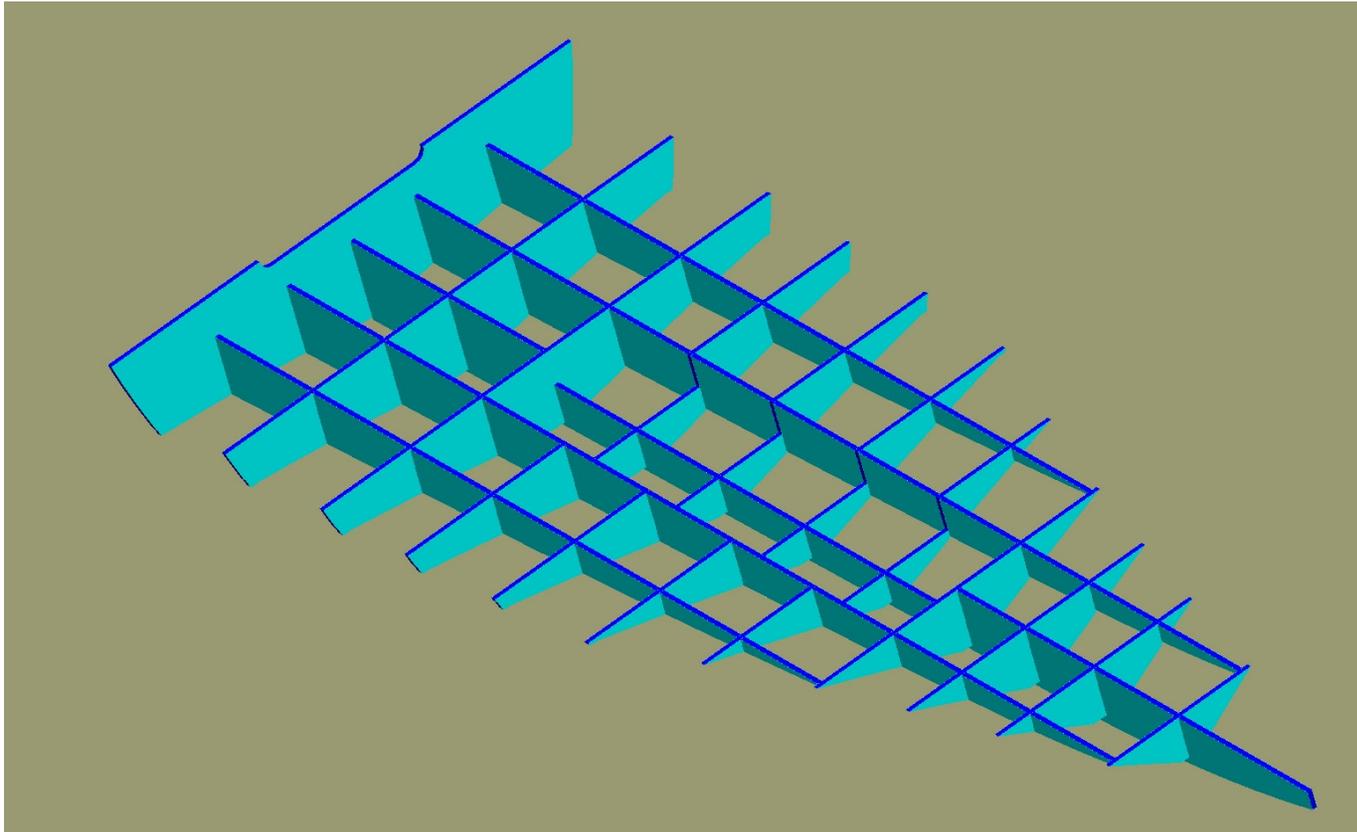
Anschluss  
Fußboden-Wand



**Bild 3.2.7** Decksverkleidung für eine Megayacht  
(L = 42,8 m; B = 12,8 m; H = 6,6 m)



**Bild 3.2.8** Beispiel einer Laminierform in Skelettbauweise



**Bild 3.2.9** Ausgewählte Spantformen in Leichtbauweise mit Sandwichstrukturen

### 3.3 Konzipierung einer Fertigungstechnologie

---

In dem Bereich der Fertigungstechnologie werden im Vorhaben die Untersuchungen zur Vorbereitung und Durchführung der Fertigung modularer Leichtbaustrukturen, einschließlich der Montageprozesse für die Integration der Strukturen in Finalprodukte, eingeordnet.

Als Besonderheit im Vergleich mit der typischen Serienfertigung von Produkten ist zu beachten, dass bei den modularen Leichtbaustrukturen wegen ihres unikalen Charakters und einer flexiblen Anpassung an Kundenwünsche der Entwicklungs- und Fertigungsprozess in hohem Maße iterativ gestaltet werden muss.

Die Konzipierung der Fertigungstechnologie hat deshalb zu berücksichtigen, dass bei Entwicklungs- und Baufortschritt neue Erkenntnisse zur Produktgestaltung und -herstellung in bereits durchlaufene Teilprozesse rückgekoppelt werden müssen. Das erfordert eine sehr detaillierte Konzeption und Arbeitsmethode, mit denen auch KMU in der Lage sind, ein **Produkt Lifecycle Management (PLM)** auszuführen.

Eine Gesamtübersicht über die erarbeitete Technologie zeigt **Bild 3.3.1**.

Bereits bei den Entwicklungsarbeiten im Basic- und Detailed Design und der Erarbeitung der Spezifikationen für die Zulieferer sind Fertigungsbedingungen und Fertigungsabläufe in erheblichem Umfang zu berücksichtigen.

Die Zusammenarbeit mit mehreren Partnern im Verbund bietet in Abhängigkeit vom herzustellenden Produkttyp oft eine Vielzahl von Möglichkeiten. Im Design erfolgt eine Bewertung und Vorauswahl von Varianten.

Die unmittelbare Fertigungsvorbereitung im Industrial Design legt schließlich die endgültigen Herstellungsvarianten für den Formenbau und die Fertigung von modularen Leichtbaustrukturen fest.

Die im Basic- und Detailed Design generierten Produktdaten zur Produktgeometrie werden für den Formenbau übernommen.

Es erfolgt die mathematische Beschreibung der Produktoberflächen mit Softwaretools zur Oberflächenmodellierung.

Nach Auswahl des Formentyps -Kompaktform aus Schaum, Hybridform aus Schaum und Flächen oder Skelettform- wird die Fertigungssimulation vorgenommen. Wegen der in der Regel großen Dimensionen werden meist Mehrachsfräsen zur Formenherstellung eingesetzt. Durch ihre Fertigungsmöglichkeiten, die Produktgeometrie und die Größe der zur Verfügung stehenden Bauplätze wird die Formenteilung bestimmt.

Im Industrial Design werden CNC-Daten zur Maschinensteuerung erzeugt. Für das Zusammenbauen der einzelnen Formenteile sind Fügemethoden festzulegen. Dabei haben sich Schraub- und Klebeverbindungen bewährt.

Für die Produktherstellung sind Laminier- und Montagepläne in Wechselwirkung zu erarbeiten.

Für den Zusammenbau von Einzelteilen und das Montieren im Finalprodukt werden ebenfalls verschiedene Fügeverfahren eingesetzt.

Vorzugsweise erfolgte das Fügen durch Kleben, Schrauben und Laminieren.

Beim Formenbau und der Teileherstellung ist die Möglichkeit externer Zulieferungen vorzusehen.

Insbesondere die Planung und Ausführung des dafür notwendigen Simultaneous Engineering und Simultaneous Manufacturing erfordert eine sichere Beherrschung zur Erzeugung, Übergabe und Weiterverarbeitung von Daten und Informationen im Rahmen eines PLM-Prozesses.

Diese hohen Anforderungen sind auch in der Endmontage in Zusammenarbeit mit dem Hersteller des Finalproduktes (z. B. einer Werft) zu erfüllen.

Da auch die Finalprodukte, z. B. bestimmte Schiffstypen, Einzel- oder Kleinserienprodukte sein können, sind notwendige Änderungen an den modularen Leichtbauprodukten rückwirkend bis zum Basic Design nicht auszuschließen.

Um die Beherrschung des Gesamtprozesses als PLM-Prozess zu gewährleisten, wurde bei MALCOM® UNIGRAPHICS als geeignetes Tool nach Analyse mehrerer Softwareprodukte ausgewählt.

Erste Anwendungen haben die hohe Leistungsfähigkeit bestätigt.

Die erarbeitete Gesamtkonzeption wurde für die Beispiele aus den Produktbereichen

- Deckshäuser,
- Schiffsausrüstungen,
- schnelle Seetransportmittel

in eine Planung untersetzt.

Eine anschauliche Darstellung wesentlicher Positionen ist in den **Bildern 3.3.2 bis 3.3.4** gegeben.

Die ausgewählten Planungsbeispiele belegen die Anwendbarkeit der erarbeiteten Gesamtkonzeption.



**Bild 3.3.1 Iterativer Entwicklungs- und Fertigungsprozess für modulare Leichtbaustrukturen**

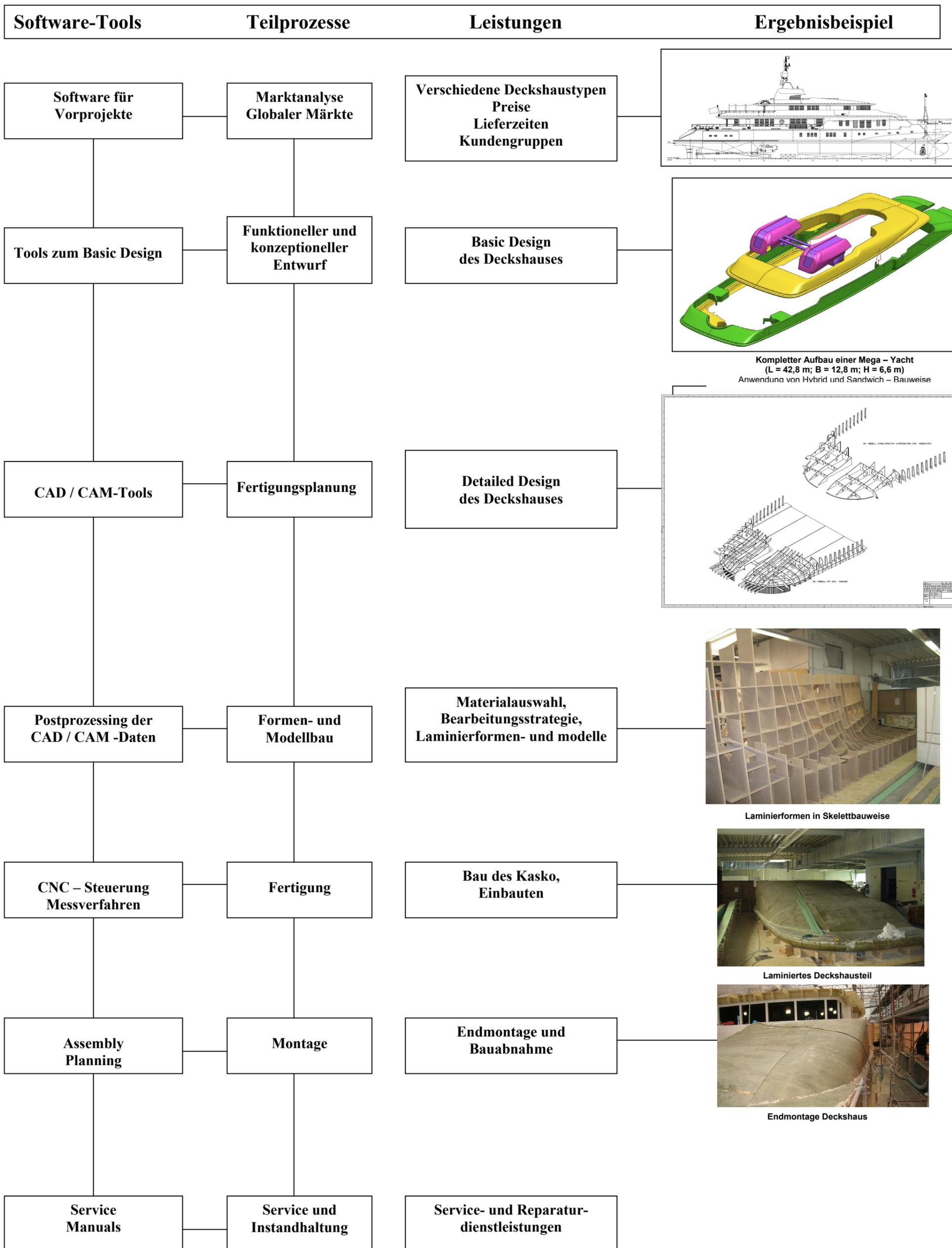


Bild 3.3.2 Entwicklungs- und Fertigungsplanung modularisierter Decksaufbauten in Leichtbauweise

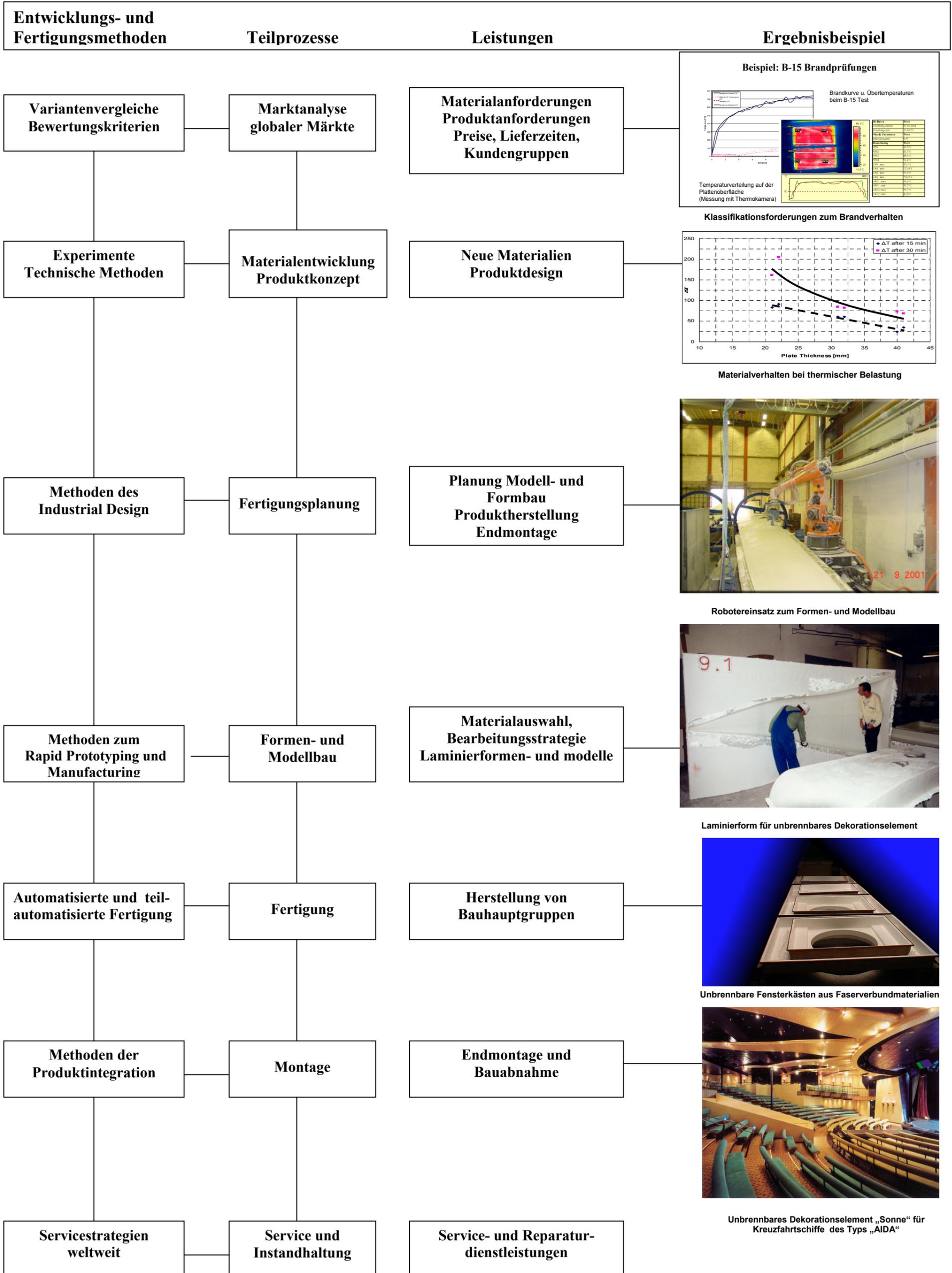


Bild 3.3.3 Entwicklungs- und Fertigungsplanung modularisierter Leichtbausysteme zur Schiffsausrüstung

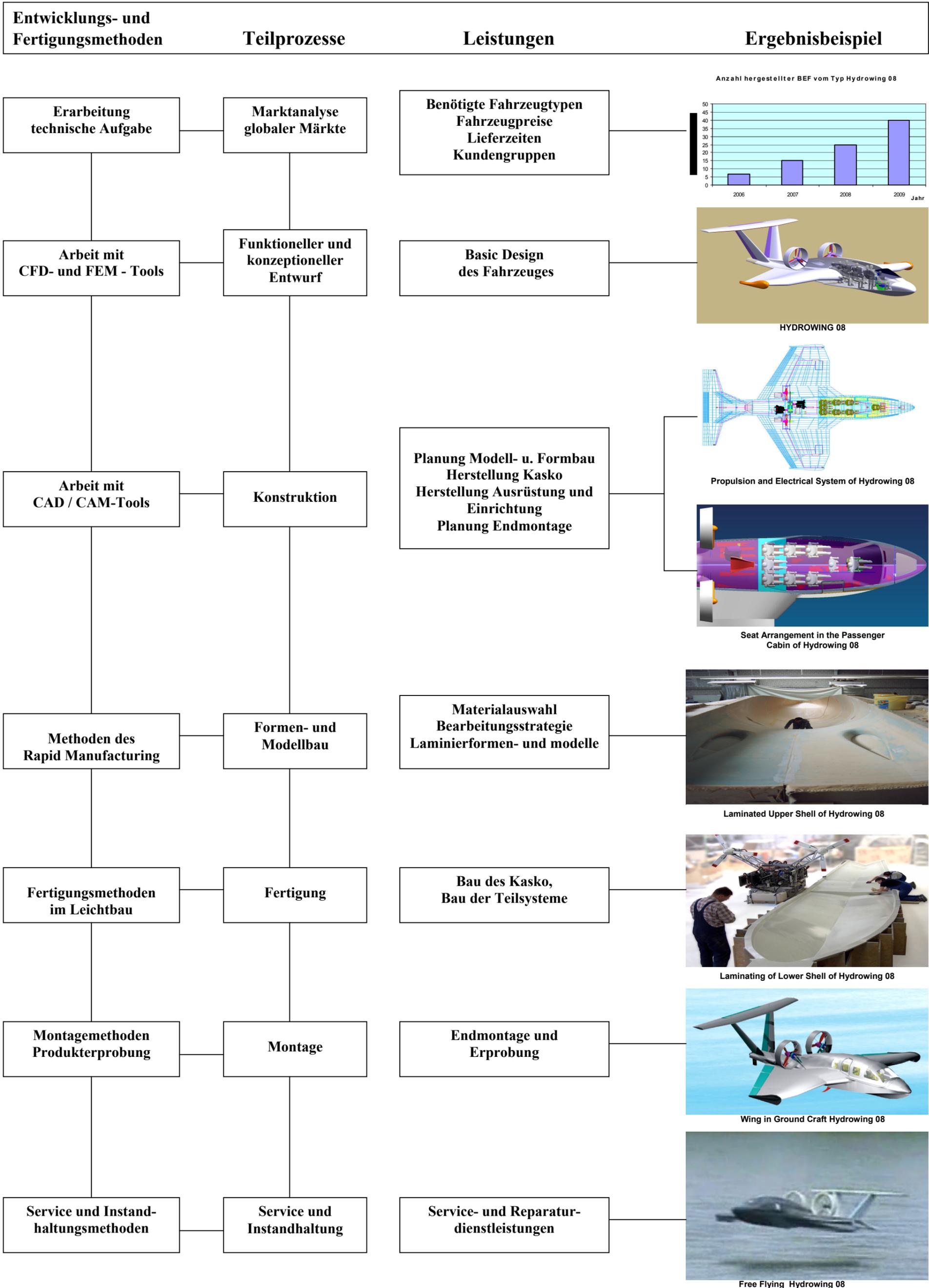


Bild 3.3.4 Entwicklungs- und Fertigungsplanung modularisierter Bodeneffektfahrzeuge

### 3.4 Dimensionierung von Bauteilstrukturen und Bauteilintegration in Großstrukturen

---

Zielstellung der Untersuchungen in der vorliegenden Teilaufgabe war die Analyse von Bauteilstrukturen hinsichtlich des Material- und Fertigungsaufwandes zu ihrer Herstellung.

Die für diese Untersuchungen geeigneten Dimensionierungsmethoden sollten ausgewählt oder entwickelt werden. Schließlich war eine Methode zur Integration von Einzelbauteilen und Komponenten in die Finalprodukte vorzunehmen.

Entsprechend der Festlegungen in den vorangegangenen Abschnitten wurden die Bauteilstrukturen aus den folgenden Anwendungsbereichen ausgewählt

- lasttragende Strukturen in Deckshausbereichen und Aufbauten,
- verkleidende und schützende Strukturen in Deckshaus- und Aufbaubereichen,
- thermisch belastete Bauteile in Wohn-, Aufenthalts- und technischen Räumen,
- extrem leichte Strukturen für schnelle Seetransportmittel als tragende, verkleidende und funktionsintegrierte Lösungen.

Zur Systematisierung der weiteren Untersuchungen wurden folgende Gruppen von Bauteilstrukturen gebildet, die sich hinsichtlich der Geometrie, der Funktion und der eingesetzten Materialien unterscheiden. Eine Gesamtübersicht ist in **Bild 3.4.1** dargestellt.

#### G1: Stabtragwerke mit Wickelstrukturen und Profilen

Anforderungen bestehen vor allem hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit. Thermische Belastungen überschreiten nicht 150 °C.

Im Vorhaben wurden in Zusammenarbeit mit dem Partner AIR GmbH vorrangig Stabtragwerke mit Wickelstrukturen untersucht.

#### G2: Ebene Flächentragwerke mit Kompaktlaminaten

Sie werden aus ebenen laminierten Strukturen gebildet, die versteift sein können. Als Versteifungen wurden im Vorhaben vorrangig Stabtragwerke nach G1 eingesetzt. Anwendbar sind auch vorgefertigte Profile aus Standardprogrammen.

Für diese Bauteilgruppen wurden auch thermisch hochbelastbare Materialien (T bis 1.100 °C) entwickelt, die aus Perlitzement mit Glasfaseranteilen bestehen.

**Bild 3.4.2** zeigt einen plattenförmigen Probekörper mit einer zusätzlichen, ebenfalls thermisch belastbaren, Verstärkung.

### G3: Ebene Flächentragwerke in Sandwichbauweise

Es wurden zwei Untergruppen ausgeführt; thermisch wenig belastbare Strukturen (T bis 150 °C) und thermisch hoch belastbare Strukturen (T bis 1.100 °C).

Bei Flächentragwerken der ersten Untergruppe werden als Kernmaterialien verschiedene Schaummaterialien und als Deckschichten Lamine eingesetzt. Bei den thermisch hoch belastbaren Flächentragwerken werden Perlitzemente als Kernmaterial mit Glasfaserlaminaten als Deckschicht eingesetzt. Versteifungen können mit den Stabtragwerken nach G1 oder mit vorgefertigten Profilen ausgeführt werden.

### G4: Gekrümmte Flächentragwerke mit Kompaktlaminaten

Das Laminieren erfolgt mit Laminiermodellen oder –formen, deren Oberflächen-geometrie derjenigen der herzustellenden Produkte im Positiv oder Negativ entspricht. Gekrümmte Versteifungen können einlaminieren werden. Für Modelle und Formen wurden im Vorhaben ausschließlich Hartschäume verwendet, die mit Mehrachsfräsen bearbeitet werden.

### G5: Gekrümmte Flächentragwerke in Sandwichbauweise

Für die gekrümmten Flächentragwerke werden als Kernmaterial gekrümmte Schaumstoffplatten verwendet, die zwei- oder dreiaxial verformbar sind. Die Deckschichten werden laminiert. Gekrümmte Versteifungen lassen sich relativ einfach in das Laminat einarbeiten.

Insbesondere für Produkte mit großen Abmessungen (L bis 45 m) wurde eine neuartige Modellbaumethode mit Skelettmodellen entwickelt und angewendet.

### G6: Fügestrukturen

Fügestrukturen/Fügeverfahren wurden angewendet, um FVW-Bauteile miteinander und/oder mit dem Finalprodukt zu verbinden.

Vorrangig wurden Verbindungen durch Kleben oder Laminieren hergestellt, bei Verbindungen von FVW mit metallischen Strukturen kommen auch Schraubverbindungen zum Einsatz.

Um Bauteile und Gesamtstrukturen hinsichtlich ihrer technischen Parameter und ihrer Kosten optimal auslegen zu können, sind dafür geeignete Berechnungs- und Dimensionierungsmethoden erforderlich.

Im Vorhaben wurde analysiert und erprobt, welche Methoden unter den Bedingungen der Einzel- und Kleinserienfertigung in KMU geeignet sind. Das zur Bewertung erforderliche Know-how wurde systematisiert und den Mitarbeitern vermittelt.

Eine qualitative Darstellung der Vorgehensweise bei der Auslegung von Faserverbundstrukturen zeigt **Bild 3.4.3**.

Für eine vorgegebene Aufgabe gibt es in der Regel zahlreiche Varianten, die zu einer Lösung führen.

Aus der im Vorhaben aufgebauten Datenbank werden auf der Grundlage von Anwendererfahrungen Faser- und Matrixmaterialien ausgewählt und damit Einzelschichten mit unidirektionaler Faserorientierung aufgebaut. Der Faservolumengehalt kann variiert werden. Die Parameter der Einzelschicht können bereits bekannt sein, theoretisch sind sie mit Methoden der Mikromechanik zu bestimmen.

Aus den Einzelschichten werden dann Mehrschichtlaminat aufgebaut. Schichtanzahl, Schichtentyp und Faserrichtungen können variiert werden. Die Berechnung der Mehrschichtlaminat gelingt mit Methoden der Makromechanik, im Vorhaben vorrangig mit FEM-Methoden, bei einfachen Strukturen mit Berechnungsformeln.

Aus den Schichtlaminaten werden schließlich die Bauteile komponiert. Zu ihrer Berechnung ist die Kenntnis der Belastungen, ihre Geometrie und die Art des Fertigungsverfahrens erforderlich.

Es erfolgt eine Optimierung des Materialeinsatzes bis zur Beanspruchungsgrenze vor dem Versagen.

Da Festlegungen in den einzelnen Bearbeitungsetappen teilweise gegenläufige Auswirkungen haben können, ist der Gesamtprozess u. U. iterativ mehrfach zu durchlaufen.

Die Mehrschichtverbundsysteme weisen ein anisotropes Spannungs-Dehnungsverhalten auf.

Eine Berechnung gelingt prinzipiell mit der Finiten Elemente Methode (FEM).

Um jedoch sowohl die sich örtlich stark ändernden Materialeigenschaften des Harz-Faser-Systems als auch die Zustandsgrößen Spannung und Dehnung ausreichend genau beschreiben zu können, wäre mit einer sehr großen Anzahl von diskretisierten Volumenelementen zu arbeiten.

Der Rechenaufwand wäre bei den relativ großen Bauteilen aus den geplanten Anwendungsbereichen sehr hoch. Es wird daher eine hierarchische Berechnungsmethode entwickelt, die drei Stufen umfasst.

In der ersten Stufe werden örtliche Eigenschaften in den Einzelschichtlaminaten, die aus den unterschiedlichen Eigenschaften von Harzen und Fasern und ihrer Wechselwirkungen resultieren, mit Methoden der Mikromechanik ermittelt.

Für eine Laminatschicht mit konstanter Faserdichte werden die anisotropen mechanischen Kennwerte des Verbundes ermittelt.

Bei der Beschreibung der Haftungseigenschaften zwischen Faser und Matrix wird deren Abhängigkeit von der Verarbeitungstechnologie empirisch berücksichtigt. Das Ergebnis sind Mischungsregeln, mit denen die Abhängigkeiten der Schichtkennwerte vom Faservolumengehalt beschrieben werden. Berücksichtigt werden auch unterschiedlich Wärmeausdehnungs- und Querkoeffizienten von Fasern und Matrix bei der Ermittlung der anisotropen Quell- und Wärmedämmung.

In der zweiten Stufe werden Mehrschichtlamine berechnet. Dabei wird jede Laminatschicht als homogenes Kontinuum betrachtet, die Berechnung erfolgt mit FEM. Die Flächenausdehnung der finiten Elemente ist an die Inhomogenität der Belastungen anzupassen.

In der dritten Stufe wird dann die Berechnung komplexer, aus Laminaten oder auch aus hybriden Strukturen bestehender Bauteile vorgenommen.

Nach der Ermittlung der belastungsabhängigen Bauteilverformungen erfolgt eine Kontrolle zur Einhaltung der Verformungsgrenzwerte, um einen Bruch einzelner Fasern zu verhindern. Beim Riss einzelner Faser behalten die noch verbliebenen intakten Fasern ihre volle Tragfähigkeit.

Das geschützte Bauteil ist noch belastbar. Aus Annahmen über die Häufigkeit von Lastzyklen wird unter Berücksichtigung empirischer Resultate eine Lebensdauerhypothese erstellt.

Für die Berechnung der Lamine wird angenommen, dass die übereinander gelegten Schichten zwar anisotrop aber homogen sind.

Für die Berechnung gilt dann eine konstante Faserdichte und –richtung soweit eine konstante Dichte. Es wird weiterhin angenommen, dass die Verbindung zwischen den Schichten die gleiche Festigkeit wie die des Matrixmaterials innerhalb der Schichten aufweist. Unter den genannten Bedingungen ist es zulässig, die klassische Laminattheorie anzuwenden. Grundlage dafür ist die Kirchhoffsche Plattentheorie.

Als Softwaretools zur Ausführung der Berechnungen wurden LamTech und ANSYS ausgewählt und angewendet.

Das FEM-Tool ANSYS verfügt über eigene integrierte Pre- und Postprozessoren und Schnittstellen zu CAD-Systemen.

Diese Flexibilität im Zusammenwirken mit CAD-Systemen war ein maßgeblicher Grund zur Auswahl von ANSYS und der Einordnung in die Prozesskette der Entwicklung und Herstellung von FVW-Produkten, **Bild 3.4.4**.

Es ist somit möglich, ANSYS mit den verschiedenen CAD-Systemen der maritimen Industrie, u. a. UNIGRAPHICS, NUPAS, AutoCAD, zu koppeln.

Um für die weiterführenden Arbeiten bei der Auslegung von Faserverbundbauteilen orientierende Angabe zur Masse und zu den Kosten zu haben, wurden dazu systematisierte Untersuchungen mit den Standardbauteilen Balken und Platten ausgeführt.

**Bild 3.4.5** zeigt für eine quadratische Platte mit Sandwichaufbau und konstanter Flächenlast bei allseitig freier Auflage die Bauteilmasse und die Bauteilkosten als Funktion der Belastung.

Die Resultate von Platten und GFK- und CFK-Deckschichten sind verglichen mit äquivalenten versteiften Platten aus Stahl und Aluminium.

Interessant ist, dass die GFK-Struktur wettbewerbsfähig mit Aluminiumstrukturen ausgeführt werden kann.

Das endgültige Design und die Dimensionierung von FVW-Bauteilen kann erst erfolgen, wenn es gelingt, deren Integration in die Strukturen des Finalproduktes vorzunehmen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Strukturen mit betriebseigenen CAD-Systemen bei den externen Auftraggebern geometrisch und funktionell definiert werden, während bei MALCOM<sup>®</sup> vorrangig mit UNIGRAPHICS gearbeitet wird.

Es sind deshalb Schnittstellen zwischen den CAD-Systemen vorzusehen.

Ein weiterer Schnittstellentyp ist für die Weiterverarbeitung der CAD-Daten im Formen- und Modellbau mit CNC-gesteuerten Fräsen vorzusehen. Die Weiterverarbeitung der Daten erfolgt bei der mathematischen Beschreibung der Produktoberflächen, der Frässimulation und schließlich der Generierung von Steuerdaten für die Fräsen.

Aus den Ergebnissen der Bauteilbeschreibung und der Beschreibung der Produktstruktur des Finalproduktes wird dann die Montagestrategie, inkl. der Fügestrategie abgeleitet.

Eine Übersicht über die Verknüpfung der genannten Teilprozesse gibt **Bild 3.4.6**. Um Übersichtlichkeit zu gewährleisten, ist die Verbindung zu den Berechnungstools nicht dargestellt.

Nach Festlegung der Bauteilgruppen und der Erprobung von Berechnungs- und Dimensionierungsmethoden sowie der Arbeitsweise für die Integration von Bauteilen in Finalprodukte sind für die in **Bild 3.4.1** angegebenen Bauteilgruppen G 1 bis G 6 die vorrangig einzusetzenden Materialarten und die Fertigungsaufwendungen unter den Bedingungen der Einzel- und Kleinserienfertigung bestimmt worden.

Die Resultate sind ebenfalls in Bild 3.4.1 eingetragen.

Die angegebenen Fertigungsaufwendungen sind als Mittelwerte aus den Zeitmessungen beim Laminieren von Beispielflächen zu verstehen. Sie werden sich mit zunehmender Erfahrung der Mitarbeiter bei größeren Fertigungsmengen und weiterer Optimierung der Prozessabläufe präzisieren lassen.

Die Werte sind für eine Zeit- und Kapazitätsplanung geeignet.

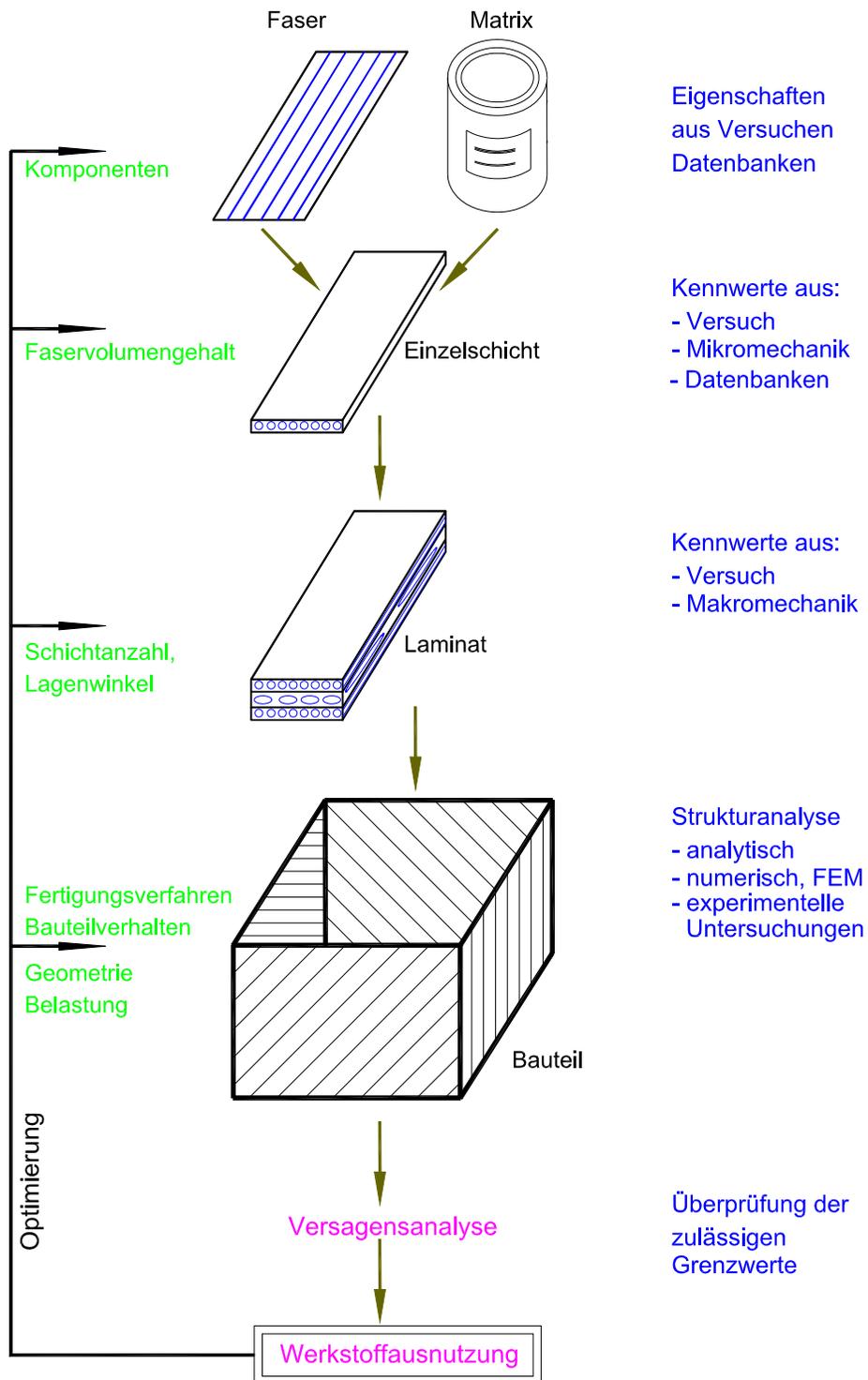
Hinzuweisen ist auf die vergleichsweise hohen Fertigungsaufwendungen im Formenbau für die Herstellung gekrümmter Flächentragwerke.

Bauteilgruppen	Materialarten	Fertigungsaufwendungen
<u>G 1:</u> Stabtragwerke	. Glasfaser mit Epoxydharz . Kohlefaser mit Epoxydharz	. Glasfaserlaminat 30,- €/kg . Kohlefaserlaminat 40,- €/kg  Zeitaufwand: ca. 0,5 h/kg
<u>G 2:</u> Ebene Flächentragwerke Kompaktlaminat	. Glasfaser mit Vinylesterharz . Glasfaser mit Polyesterharz . Kohlefaser mit Vinylesterharz  _____	Handlaminat: 0,25 h/kg  _____
	. Glasfaser mit Zement und Perlite (unbrennbare Platten)	Pressen: 0,05 h/kg
<u>G 3:</u> Ebene Flächentragwerke Sandwichbauweise	. Glasfaser mit Vinylesterharz ) <i>Kernmaterial</i> . Glasfaser mit Polyesterharz ) <i>Schaumstoff-</i> . Kohleplatten mit Vinylesterharz ) <i>platten</i>  _____	Deckschichten mit Handlaminat: 0,10 h/kg Deckschichten mit Vakuumziehen: 0,12 h/kg  _____
	. Glasfaser mit Polyesterharz; <i>Kernmaterial</i> <i>unbrennbare Platten</i>	Deckschichten im Handlaminat mit Flächenverklebung: 0,8 h/kg
<u>G 4:</u> Gekrümmte Flächentragwerke	. Glasfaser mit Vinylesterharz . Kohlefaser mit Vinylesterharz . Hartschaum für Formenbau	. Formenbau mit gefrästen Positivkernen aus Hartschaum: 4 h/m <sup>2</sup> - 6 h/m <sup>2</sup> . Formenbau mit gefrästen Negativ- werkzeugen: 6 h/m <sup>2</sup> - 8 h/m <sup>2</sup>  _____
		. Laminieren mit gefrästen Positivkernen: 0,25 h/kg . Laminieren mit gefrästen Negativ- werkzeugen: 0,25 h/kg
<u>G 5:</u> Gekrümmte Flächentragwerke Sandwichbauweise	. Glasfaser mit Vinylesterharz ) <i>Kernmaterial</i> . Glasfaser mit Polyesterharz ) <i>geskrümmte</i> . Kohleplatten mit Vinylesterharz ) <i>Schaumstoff-</i> <i>platten</i>	. Formenbau mit gefrästen Positivkernen aus Hartschaum: 4 h/m <sup>2</sup> - 6 h/m <sup>2</sup> . Formen mit gefrästen Negativ- werkzeugen: 6 h/m <sup>2</sup> - 8 h/m <sup>2</sup>  . Formen in Skelettbauweise 0,2 h/m <sup>2</sup> - 0,4 h/m <sup>2</sup>
<u>G 6:</u> Fügestrukturen	. Kleber: - Klebharze zum Fixieren - dauerelastischer Kleber für kraftschüssige Verbindungen	. ebene Stoßverbindungen durch Kleben und Laminieren: 0,5 h/m einseitig  . winklige Stoßverbindungen durch Kleben und Laminieren: 0,5 h/m einseitig  . Winkelverbindung oder Flächen- verbindung durch Kleben: 0,3 h/m

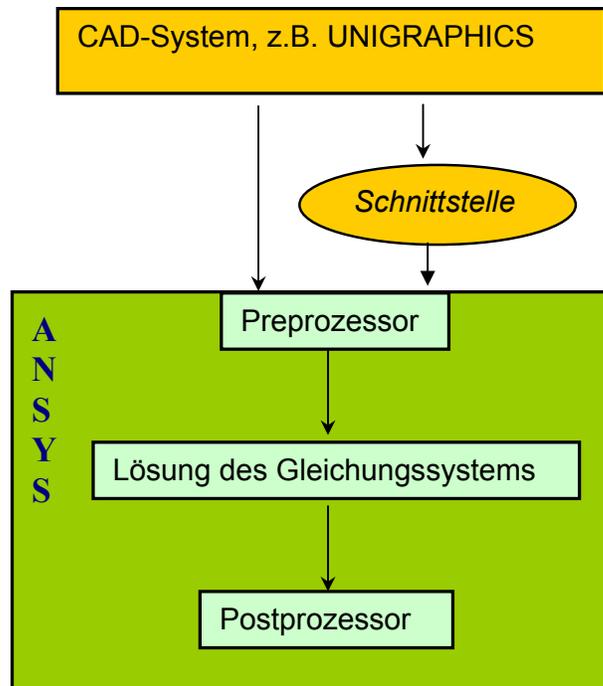
Bild 3.4.1 Material und Fertigungsaufwendungen für Bauteilgruppen GI



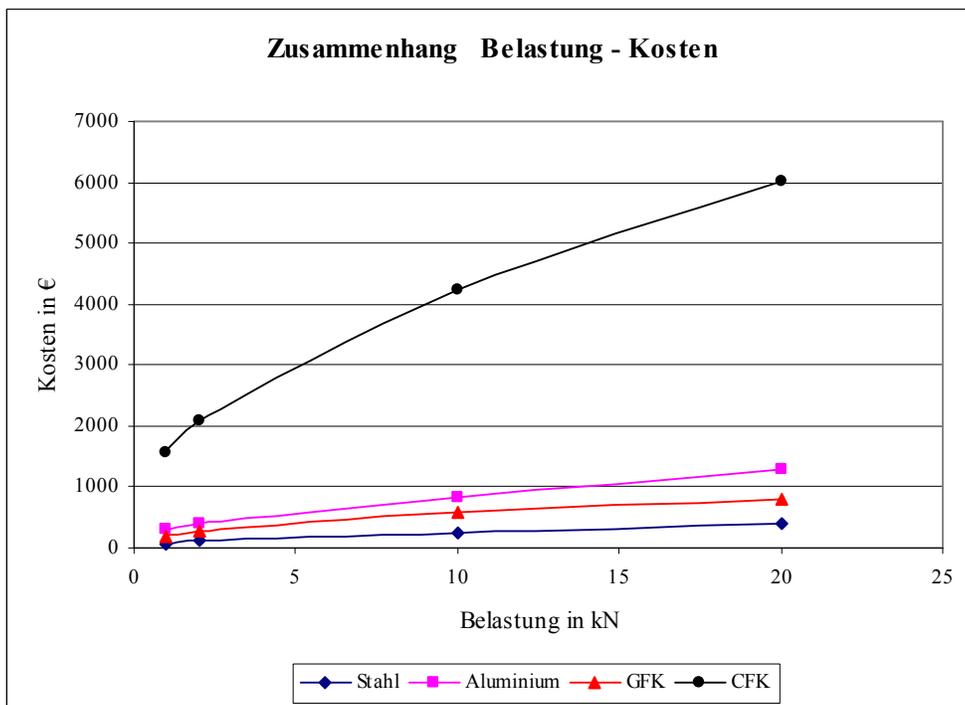
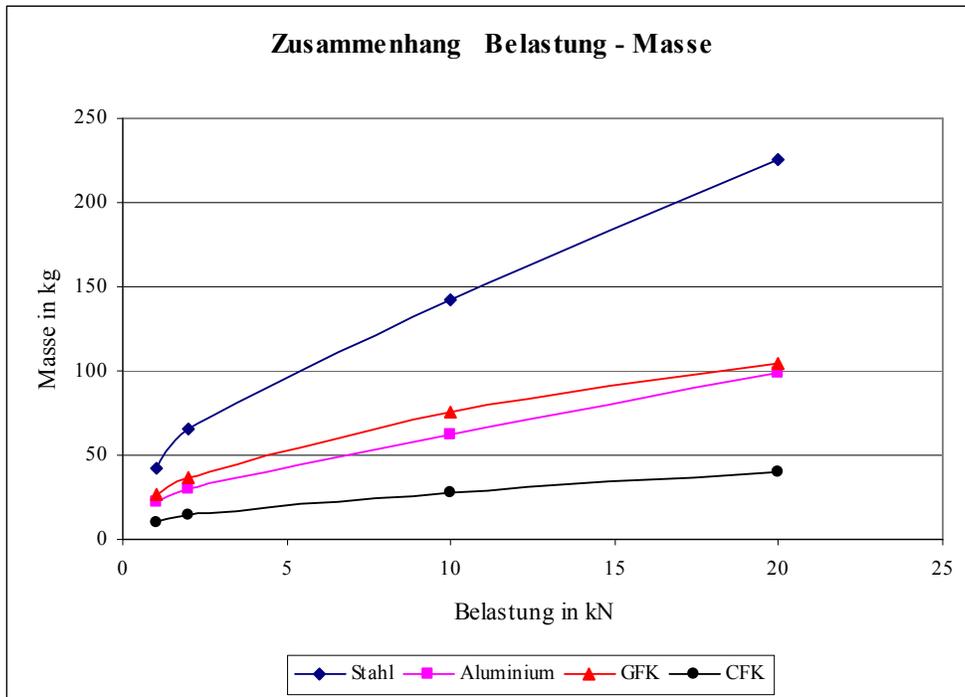
**Bild 3.4.2** Thermisch hochbelastbares Plattenmaterial (T bis 1.100 °C)  
mit Profilverstärkung



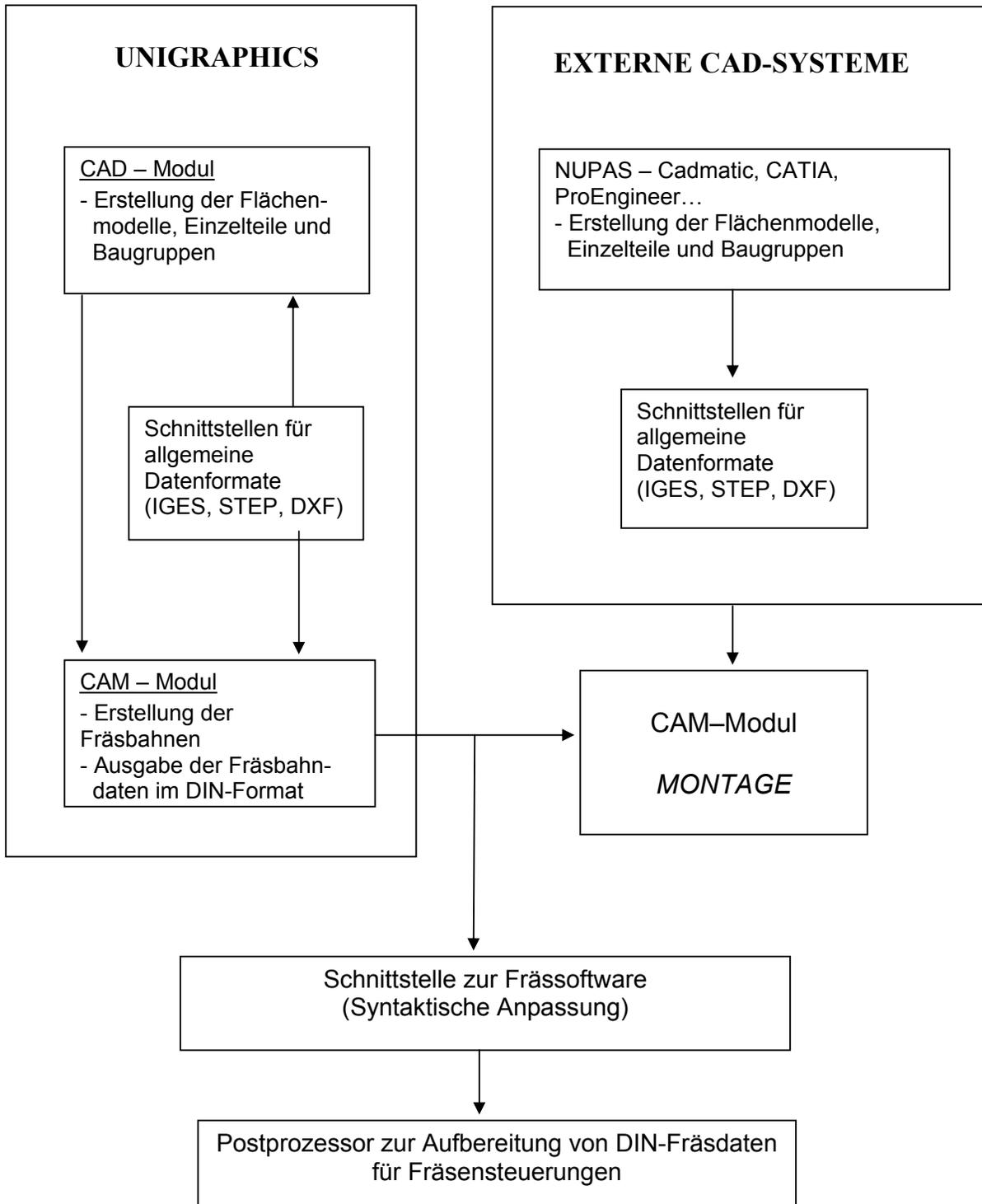
**Bild 3.4.3 Vorgehensweise bei der Auslegung von Faserverbundstrukturen**



**Bild 3.4.4** Kopplung von CAD-Systemen mit ANSYS



**Bild 3.4.5** Abhängigkeit der Bauteilmasse und der Kosten von Rechteckplatten mit konstanter Flächenlast in Sandwichbauweise mit GFK und CFK und für äquivalente Metallplatten



**Bild 3.4.6 Verknüpfung von Teilprozessen der Konstruktion, des Formenbaus**

### 3.5 Modellierung des Fertigungsprozesses von Bauteilstrukturen

---

Der Fertigungsprozess umfasst die vier Teilprozesse

- **Fertigungsplanung,**
- **Formen- und Modellbau,**
- **Bauteilfertigung,**
- **Montage.**

Fertigung und Montage sind für Formen und Modelle sowie laminierte Bauteile zu unterscheiden.

Wichtige Entscheidungen zum Fertigungsprozess wie die Produktgröße, Art der Materialien und Produktfunktionalitäten werden bereits in den Entwurfs- und Konstruktionsprozessen festgelegt. Die Modellierung des Fertigungsprozesses beginnt deshalb mit der Festlegung einer bidirektionalen Schnittstelle zwischen dem Design- und Fertigungsbereich, siehe auch **Bild 3.4.6**.

Nach Bereitstellung der Daten und Informationen für die Fertigungsplanung wird als nächster entscheidender Schritt die endgültige Festlegung einer geeigneten Teilung der zu laminierenden Produkte vorgenommen.

Diese Teilung wird bestimmt durch funktionale Anforderungen an das Produkt, durch die Begrenzungen der Fertigungsmaschinen und die Transportbegrenzungen für die Formen und Modelle, die Größe der verfügbaren Bauplätze zum Laminieren, die Transportbedingungen für die laminierten Bauteile und schließlich die Montagebedingungen.

Nach Auswertung dieser Bedingungen werden die Bauteilgrößen und -teilungen festgelegt.

Zur Vorbereitung des Formen- und Modellbaus erfolgt dann die vollständige mathematische Beschreibung und graphische Darstellung der Produktoberfläche für jedes herzustellende Modell- und Formteil. Dazu werden Oberflächenmodellierer eingesetzt, welche die Geometrieinformationen aus dem CAD-Prozess weiterverarbeiten.

Nach Analyse und Erprobung mehrerer Oberflächenmodellierer wurde bei MALCOM<sup>®</sup> das entsprechende Softwaremodul von UNIGRAPHICS zur Oberflächenmodellierung ausgewählt. Damit sind alle im Fertigungsprozess vorkommenden 3D -Oberflächen modellierbar.

Die Anwendung des Modellierungstools erfordert neben der Kenntnis der Software umfangreiche Anwendererfahrungen zur Leistungsfähigkeit von Spline-Funktionen im mathematischen Apparat der Oberflächenmodellierung. Solche Erfahrungen sind bei MALCOM<sup>®</sup> systematisch erworben worden.

Die **Bilder 3.5.1 bis 3.5.6** zeigen Ansichten von vollständig modellierten Produktoberflächen und von einzelnen Bauteilen und Baugruppen.

Insbesondere die Modellierung der Schnittstellen zwischen einzelnen Bauteilen mit der Bedingung einer geometrisch genauen Darstellung der Gesamtoberfläche erfordert ein hohes Maß an Sorgfalt und Erfahrung bei den Berechnungen.

Für die Herstellung von Formen und Modellen sind bei MALCOM<sup>®</sup> erfolgreich Methoden des Rapid Prototyping entwickelt worden. Die Herstellung der sehr großen Teile für die ausgewählten Anwendungen erfolgt ausschließlich mit Mehrachsfräsen. Zur Vorbereitung erfolgt unter UNIGRAPHICS die Frässimulation und mit einem Postprozessor, **Bild 3.4.6**, die Generierung der CNC-Steuerdaten.

Die herkömmliche Art des Modellbaus besteht im Fräsen der Modelloberflächen aus Schaumblöcken. In Abhängigkeit von der Anzahl der gewünschten Abformungen, der notwendigen Oberflächenqualität und Genauigkeit werden Schäume mit unterschiedlichen Materialdichten und –härten verwendet.

Vor allem die härteren Schäume sind teuer. Da ein großer Anteil des Modellmaterials nur zum Stützen der Gesamtstruktur verwendet wird, steigen die Kosten für die Gesamtmodelle proportional der dritten Potenz der Abmessungen.

Beispiele für gefräste Laminiermodelle aus homogenen Schaumstoffblöcken zeigen die **Bilder 3.5.7 und 3.5.8**.

Diese Art des Modellbaus ist von einer bestimmten Modellgröße wegen der hohen Kosten nicht mehr konkurrenzfähig. Die maximalen Abmessungen sind bei den im Vorhaben vorgesehenen Anwendungsbereichen etwa im Bereich  $\text{Vol} \leq 3 \text{ m}^3$ .

Für Modelle mit größeren Abmessungen, etwa im Bereich  $5 \text{ m} \leq L \leq 15 \text{ m}$ , wurde eine Baumethode mit einer Hybridbauweise entwickelt.

Es werden zunächst aus preiswerten Schaumblöcken mit geringer Dichte und einer Druckfestigkeit, die für das Laminieren nicht ausreicht, die gewünschten Oberflächen mit ca. 10 mm Untermaß gefräst. Auf die Oberfläche dieser Formen wird eine relativ teure druckfeste Zweikomponentenpaste mit vergleichsweise hoher Dichte (0,5 bis 0,7 g/cm<sup>3</sup>) mit einer Schichtstärke von 15 mm bis 20 mm aufgetragen. Nach dem Aushärten wird diese druckfeste Schicht auf das Sollmaß abgefräst.

Bei MALCOM<sup>®</sup> liegen Erfahrungen beim Bau solcher Hybridmodelle bis zu Längen von 15 m vor.

**Bild 3.5.9** zeigt als Beispiel das Laminiermodell der 15 m langen Oberschale für den Rumpf eines Bodeneffektfahrzeuges.

Für noch größere Produktdimensionen mit Abmessungen bis zu etwa 50 m ist zum Modellbau eine Skelettbauweise entwickelt worden. Dafür wird die räumlich gekrümmte Produktoberfläche mit zwei nahezu oder völlig senkrecht zueinander verlaufenden Linienscharen überzogen.

Die Geometrie der räumlich gekrümmten Linien wird auf ebene Platten (z. B. preiswerte Spanplatten) übertragen, die auf ein ebenes Fundament montiert und miteinander durch Schrauben und Stecken verbunden werden.

Die **Bilder 3.5.10 und 3.5.11** zeigen Beispiele dieser Skelettbauweise.

Die Bauweise ist besonders geeignet für Sandwichlamine, für die gekrümmte, textil verstärkte Schaumstoffplatten auf die Skelette gelegt und anschließend laminiert werden. Die Schaumstoffplatten sind gekrümmt und für 2 D-gekrümmte Flächen oder schmale 3 D-geformte Flächen geeignet.

Vorteile dieser Bauweise sind der geringe Materialpreis, leichte Modifizierbarkeit auch bei bereits gebauten Modellen und die Kombinierbarkeit von Einzelmodellen zu größeren Einheiten.

Die Bauweise wurde bei MALCOM® für die Herstellung laminiertes Produkte mit Längen bis zu 45 m erfolgreich angewendet.

Bei der Auswahl und Anwendung von Fertigungsmethoden zum Laminieren war zu berücksichtigen, dass die Produktherstellung ausschließlich in Einzel- oder Kleinserienproduktion mittelständischer Unternehmen für die gewählten Anwendungsbereiche erfolgen sollte.

Es wurden deshalb die drei Basistechnologien

- Handlaminiere,
- Vakuumziehen,
- Pressen

als technologische Vorzugslösungen ausgewählt und erprobt. Über die Fertigungsaufwendungen ist bereits im Abschnitt 3.4 berichtet worden. Ausgewählte Ergebnisse dazu sind im **Bild 3.4.1** dargelegt.

Ergänzend zu diesen Ausführungen wird hier die Fertigungsmethode zur Herstellung unbrennbarer, thermisch isolierender Platten beschrieben.

Das Ausgangsmaterial ist Perlit-Zement mit Glasfaserverstärkungen. Nach Mischen des Perlit-Zements mit Wasser wird dieser zusammen mit Glasfaserverstärkungen in Kastenformen eingelegt und durch Pressen verdichtet. Nach dem Ausformen erfolgt die Trocknung. Als Sonderform der Glasfaserverstärkung wurde das Aufkleben von dünnen Glasfaserlaminaten auf die Plattenoberflächen erfolgreich erprobt.

Typische Produktbeispiele aus dem Spektrum der im Vorhaben entwickelten Produkte zeigen die Bilder **3.5.12 bis 3.5.14**.

Bei den Montagethoden sind zwei Montagearten zu unterscheiden:

- a) Montage laminiertes Einzelteile zu Baugruppen
- b) Montage laminiertes Einzelteile und Baugruppen zu Finalprodukten

Um die Montage im *Fall a)* vornehmen zu können, wurden als Fügeverfahren in Abstimmung mit Klassifikationsgesellschaften das Kleben und Laminieren erprobt. Es hat sich für alle entwickelten Bauteile sehr gut bewährt.

Für die Montage der laminierten Einzelteile und Baugruppen in die Finalprodukte im *Fall b)* wurde ebenfalls Kleben und Laminieren angewendet. Zusätzlich wurde in Fällen mit besonders hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Verbindungen das Schrauben als Fügemethode angewendet.

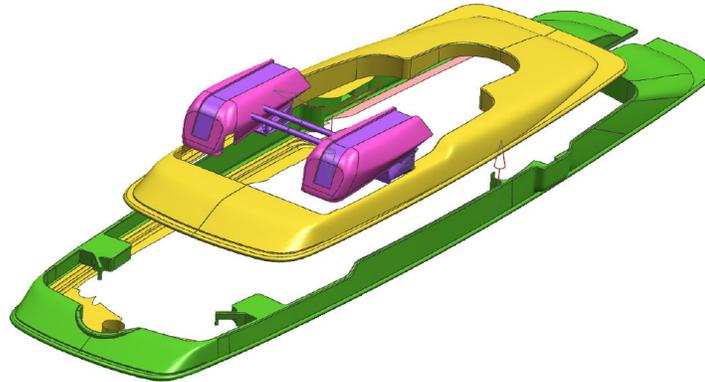
Um insbesondere sehr hohe Festigkeitsanforderungen zu erfüllen, werden Laminatstrukturen örtlich mit metallischen Strukturen verstärkt, in die dann die Schraubverbindungen eingebracht werden.

Ein Vorteil dieser Verbindungsart ist, dass sie zerstörungsfrei demontierbar ist.

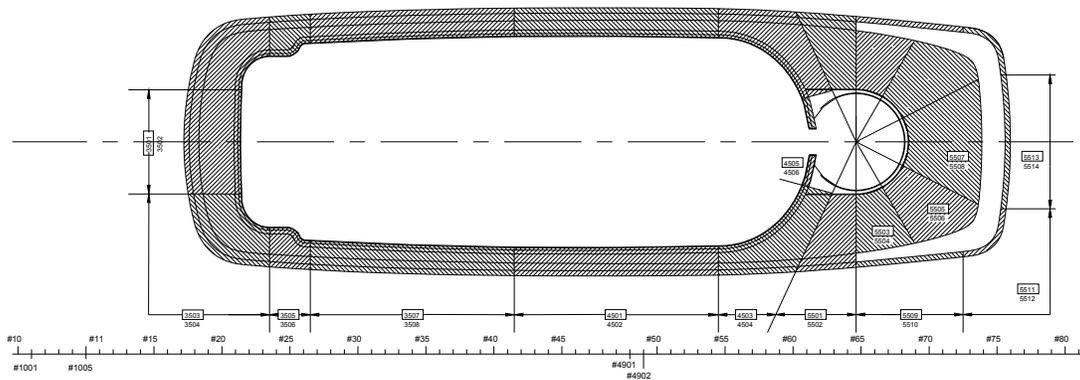
Für die Montage laminiertes Teile in metallische Strukturen hat sich gezeigt, dass eine montagefreundliche Anpassung der Konstruktionen für beide Bereiche vorteilhaft ist.

Als Beispiel zeigt **Bild 3.5.15** Stahlkonstruktionen eines Schiffsdecks zur Aufnahme laminiertes Decksverkleidungen. Um die Montage zu optimieren sind in die stählernen Tragstrukturen zusätzliche Faserverbundträger eingefügt worden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es gelungen ist, eine durchgehende und vollständige Modellierung der Fertigungsprozesse für die geplanten FVW-Produkte zu erarbeiten und ihre Anwendbarkeit nachzuweisen.



GFK-Aussenschanz Sundeck  
 Draufsicht (Sektionsteilung vorläufig)



GFK-Innenschanz Sundeck  
 Persp. Darstellung

Bb-Seite dargestellt, Stb-Seite sinngemäß

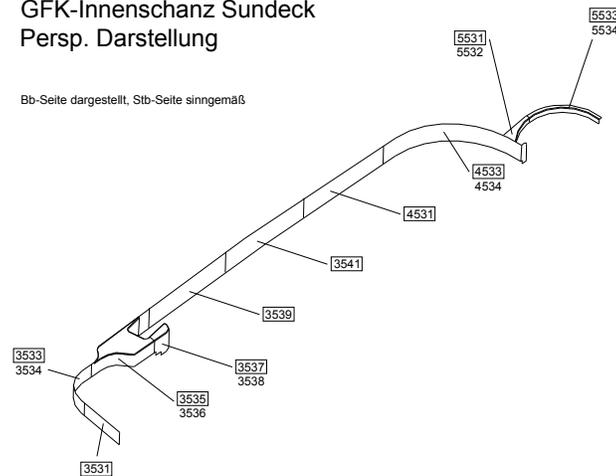
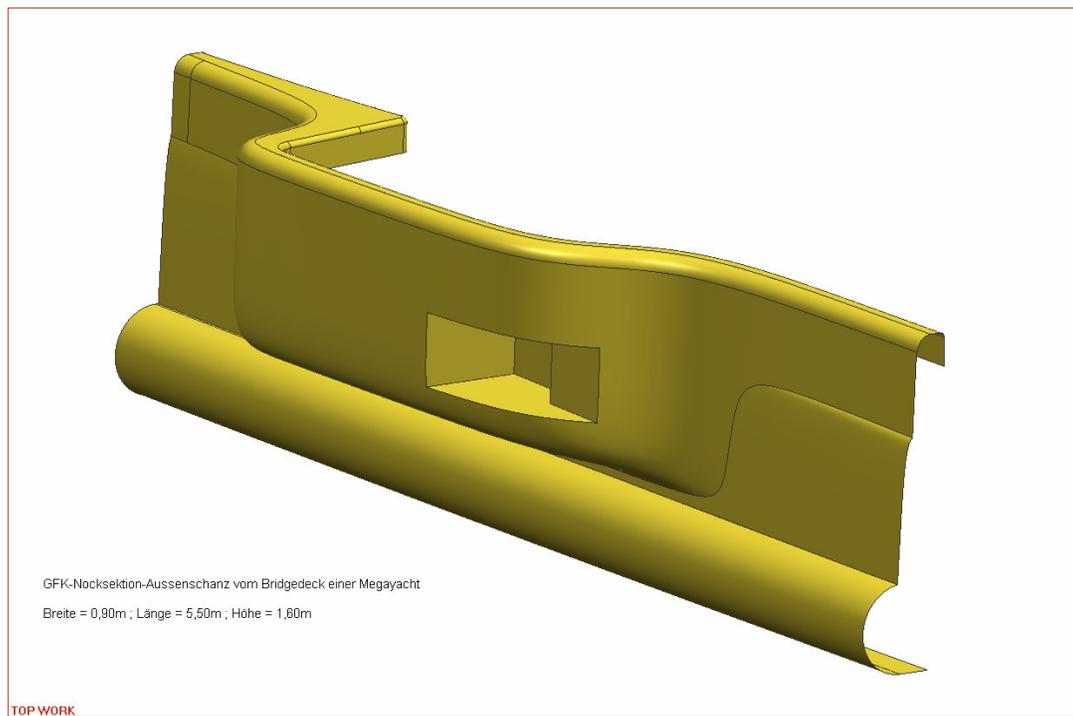
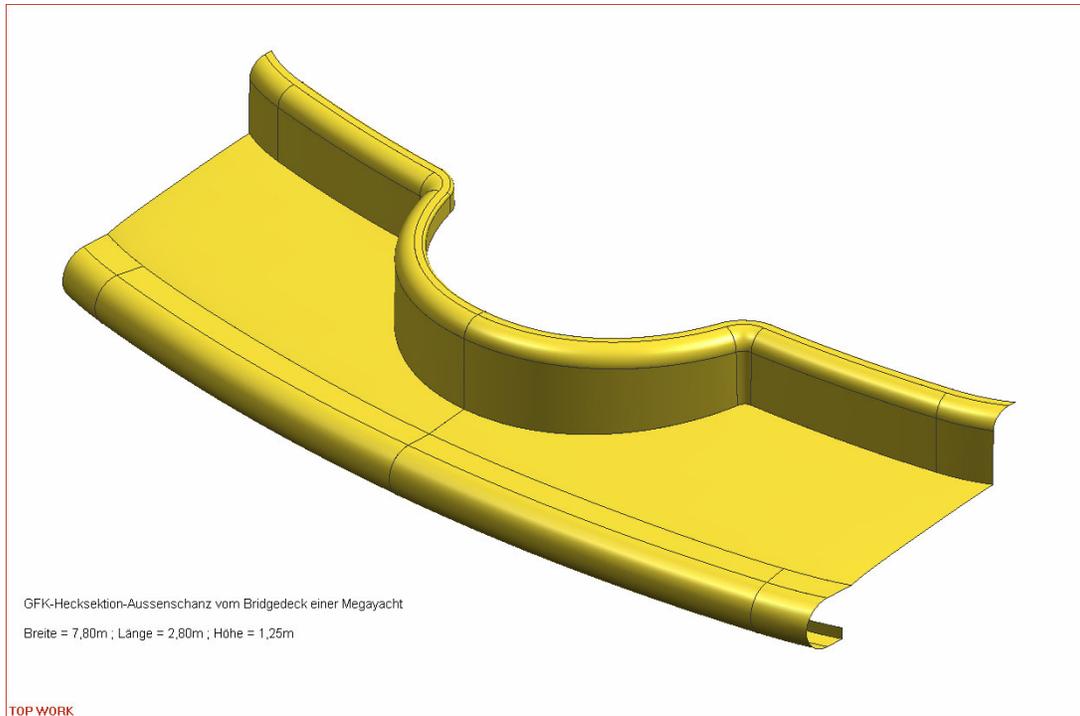
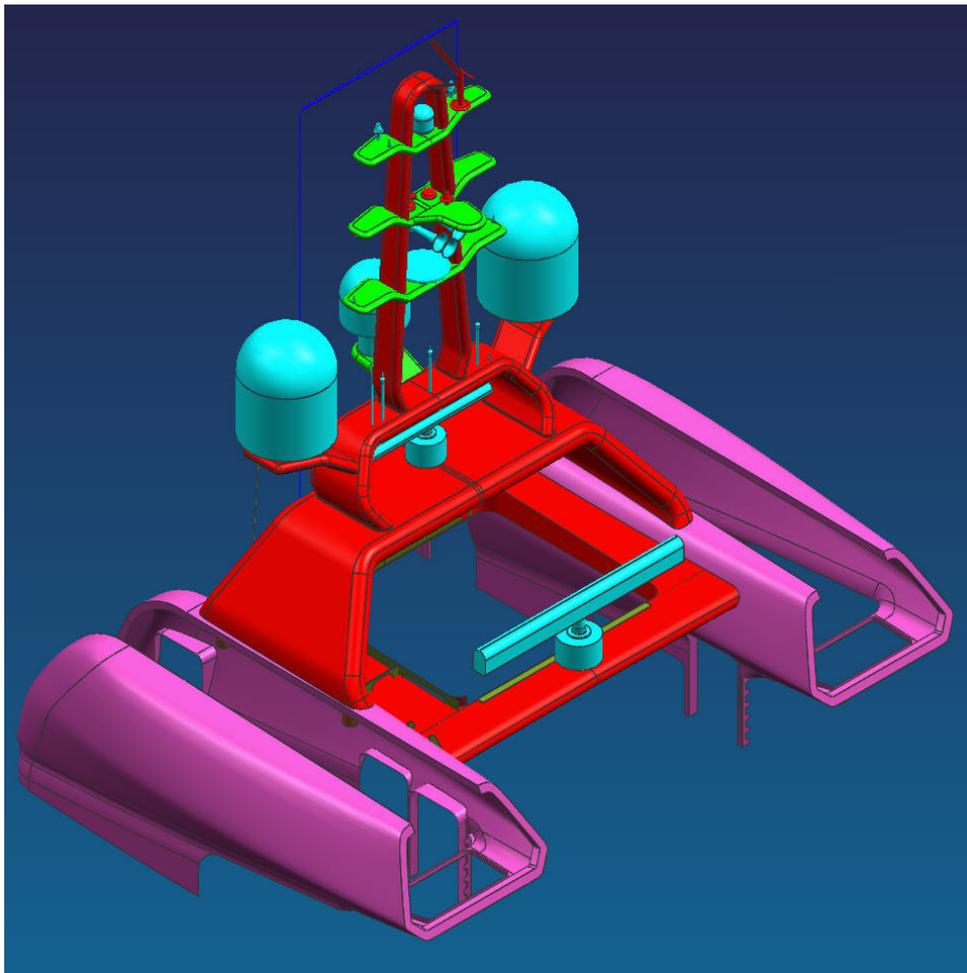


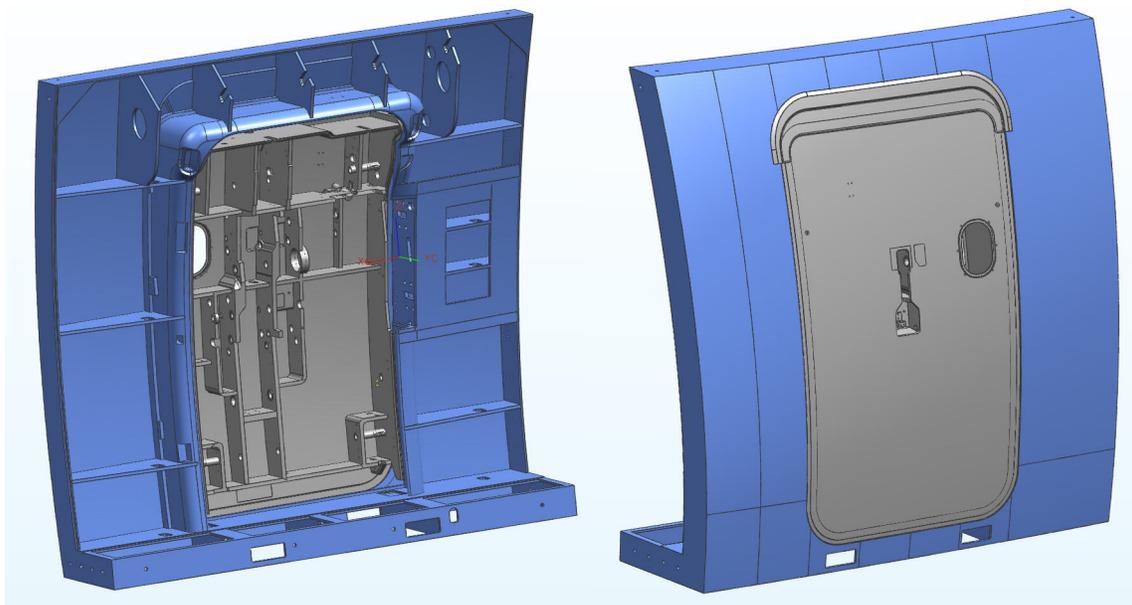
Bild 3.5.1 Oberflächenmodellierung kompletter Aufbaustrukturen einer Megayacht



**Bild 3.5.2 Oberflächenmodellierung von Modellteilen für Aufbautenstrukturen einer Megayacht**



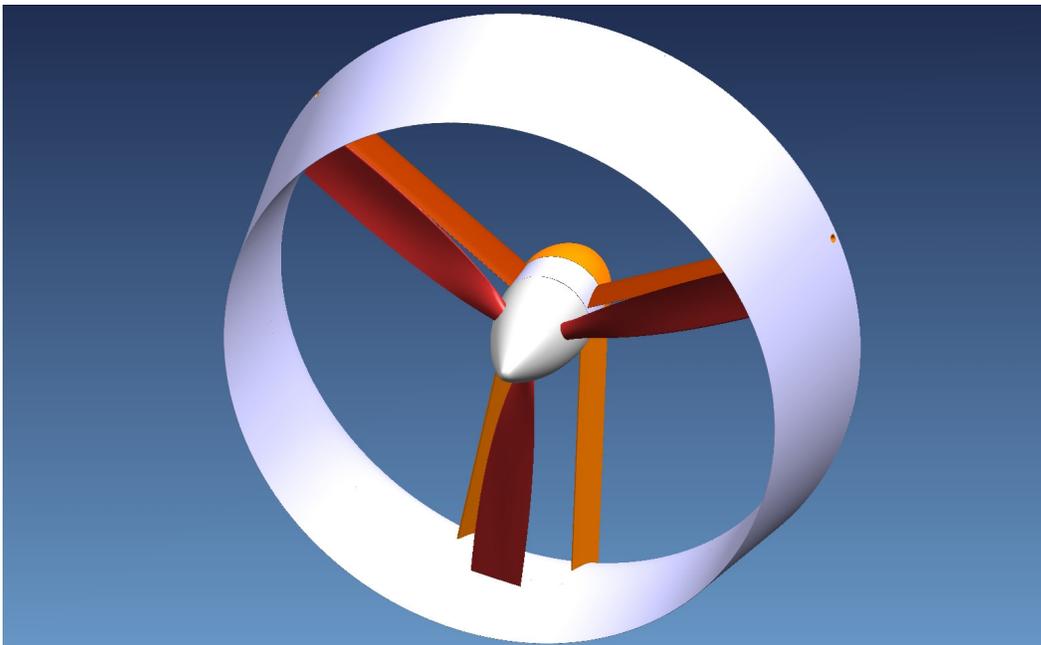
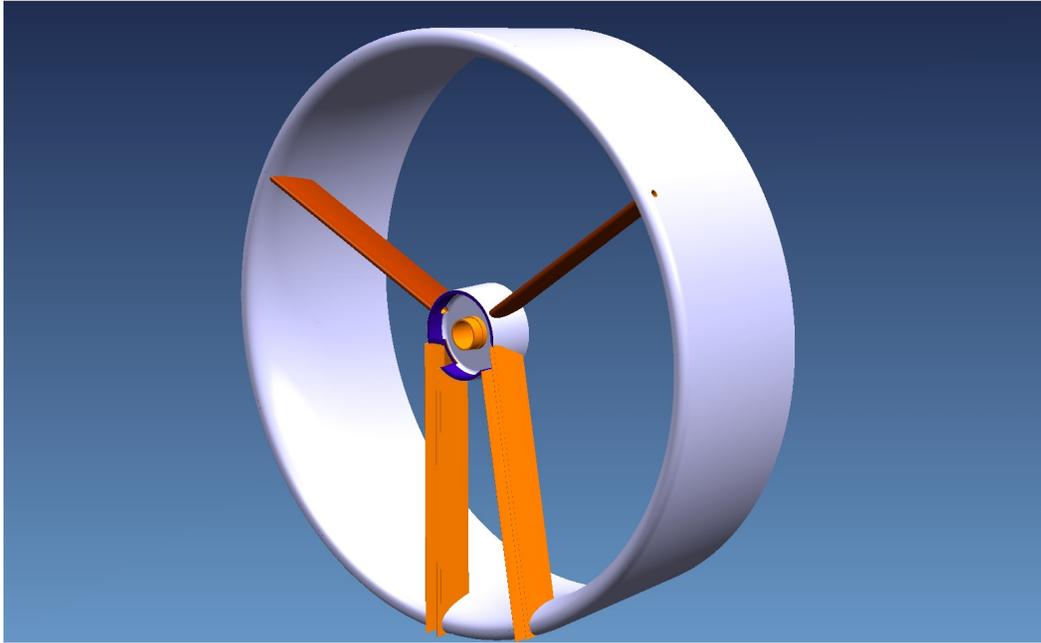
**Bild 3.5.3** Oberflächenmodellierung der vollständigen Strukturen eines Geräteträgers



**Bild 3.5.4** Oberflächenmodellierung einer Verkleidungsstruktur mit eingesetzten Türelementen



**Bild 3.5.5** Oberflächenmodellierung der vollständigen Oberfläche eines Bodeneffektfahrzeuges



**Bild 3.5.6** Oberflächenmodellierung von Düsen-Propeller-Kombinationen bei Faserverbundbauweise



**Bild 3.5.7**    **Gefräste Laminierform für Flügelemente eines Bodeneffektfahrzeuges**



**Bild 3.5.8 Laminiermodelle für Fahrpulte**



**Bild 3.5.9** Hybrides Laminiermodell für die Oberschale eines Bodeneffektfahrzeuges ( $L = 15\text{ m}$ )



**Bild 3.5.10 Skelettmodell zum Formenbau für Teile einer Decksrüstung**



**Bild 3.5.11** Skelettmodell zum Formenbau für die Flügeloberschale eines Bodeneffektfahrzeuges



**Bild 3.5.12 Bauteile einer Decksverkleidung mit Sandwichlaminaten**



**Bild 3.5.13 Mastkonstruktion mit mehrschichtigem Kompaktlaminat**



**Bild 3.5.14** Unbrennbares, thermisch isolierendes Paneel  
( $T = 950\text{ °C}$ , 90 Min. Isolierstandzeit)



## 3.6 Fertigung von Demonstrationsmustern

---

Diese Teilaufgabe des vorliegenden Entwicklungsvorhabens beinhaltete überwiegend Tätigkeiten zur Anwendung von Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchungen.

### 3.6.1 Schiffsaufbauten

-----

In Abstimmung mit der AKER Meerestechnik Werft in Wismar als potentieller Finalproduzent zur Nutzung der Entwicklungsergebnisse wurden Demonstrationsmuster aus modularen Baugruppen für Deckshäuser (Schiffsaufbauten) gefertigt.

Hierfür wurden Bauteilstrukturen nach

- G1 (Stabtragwerke mit Wickelstrukturen),
- G2 (Ebene Flächentragwerke mit Kompaktlaminaten),
- G3 (Ebene Flächentragwerke in Sandwichbauweise) sowie
- G6 (Fügestrukturen)

gemäß Gesamtübersicht **Bild 3.4.1** hergestellt und erprobt.

Es wurden Deckshausräume als modular aufgebaute Raumzellen mit vier unterschiedlichen geometrischen und statischen Anforderungen im Maßstab 1:10 für Anschauungs- und Kommunikationszwecke hergestellt sowie eine hieraus vereinzelt Raumecke im Maßstab 1:1 für die Darstellung von Verbindungs- und Fügetechniken an Knotenpunkten entwickelt, **Bilder 3.6.1 bis 3.6.7**.

Die Knoten der Stützstrukturen für die Flächenmodule wurden mit standardisierten Abständen sowie an einer Flächenseite mit einer frei gewählten Rasterbreite gesetzt. Damit wurde die maschinelle und automatisierbare Wickeltechnologie für die Stützstruktur beliebiger Flächenmodule durch den Projektpartner AIR GmbH nachgewiesen.

Deutlich ist in den Bildern zu erkennen, dass die einzelnen Stäbe der Stützstruktur unterschiedliche Dicken aufweisen, deren Durchmesser sich aus den Belastungsberechnungen ergeben und mit der Wickeltechnologie erfolgreich zur technischen Ausführung gebracht wurden.

Die Wand- und Deckenflächen bestehen aus ebenen Flächentragwerken mit frei wählbaren Abmessungen bis zu einer handhabbaren Größe von ca. 8 m x 3 m und in der Ausführung als Kompaktlaminat oder mit einem Sandwichaufbau.

Die Ausführung ist hauptsächlich von den Brandbeständigkeitsanforderungen abhängig und hinsichtlich ihrer Auswahlkriterien in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben.

Entsprechende Musterflächen sind in den **Bildern 3.4.2 und 3.5.14** zu sehen.

Vorzugsweise werden Standardmodule mit den Abmessungen entsprechend der zweifachen Stützstruktur-Rasterbreite und der ganzen Raumhöhe für Wände bzw. Raumbreite für Decken vorgesehen.

Die Befestigung der Flächenmodule an der Stützstruktur erfolgt auf metallischen Bauteilen durch geprüfte und von Klassifikationsgesellschaften zugelassene dauerelastische Verklebungen.

Das Verbinden (Fügen) der einzelnen Stützmodule zur Gesamtstruktur erfolgt ebenfalls mit metallischen Bauteilen durch Verschraubungen.

Diese Bauteile sind für die auftretenden Befestigungs- und Verbindungsarten standardisiert und dadurch als Massenartikel in einer Vorfertigung kostengünstig herzustellen.

Der Massevergleich der entwickelten modularen Aufbautenstruktur mit der herkömmlichen Fertigung für eine Raumzelle im 2. Deckhaus Deck, Raum 402/408, Außenlage, (vergleiche **Bild 3.2.3**) ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

<b>Pos.</b>	<b>Artikel /Bauteilbeschreibung</b>	<b>Masse (kg)</b>
<b>1.</b>	<b>Aufbautenzelle mit modularem Aufbau</b>	
1.1	Stützstruktur aus ca. 390 lfd. m gewickelten Stäben (Durchmesser durchschnittlich 50 mm, Dichte ca. 2,4 g/cm <sup>3</sup> ) mit Knotenpunkten	1.840
1.2	Verkleidungsmodule aus ca. 130 m <sup>2</sup> ebenen Flächentragwerken (Innen- und Außenwände, Decken ca. 17 kg/m <sup>2</sup> , Boden ca. 25 kg/m <sup>2</sup> )	2.370
1.3	Verbindungselemente	430
	<b>Summe</b>	<b>4.640</b>
<b>2.</b>	<b>Herkömmlicher Aufbau</b>	
2.1	Stahldecks und -wände ca. 70 m <sup>2</sup> , 8 mm dick mit Aussteifungsprofilen ca. 100 lfd. m, 120 x 10 mm	5.310
2.2	Wand- und Deckenpaneele (80 m <sup>2</sup> Innenwände, Decken mit ca.16 kg/m <sup>2</sup> , 20 m <sup>2</sup> Bodenaufbau mit ca. 42 kg/m <sup>2</sup> )	2.120
	<b>Summe</b>	<b>7.430</b>

Für eine Raumzelle in Innenlage (z.B. 404/408 **Bild 3.2.3**) sieht der Vergleich folgendermaßen aus:

<b>Pos.</b>	<b>Artikel /Bauteilbeschreibung</b>	<b>Masse (kg)</b>
<b>1.</b>	<b>Aufbautenzelle mit modularem Aufbau</b>	
1.1	Stützstruktur aus ca. 390 lfd. m gewickelten Stäben (Durchmesser durchschnittlich 50 mm, Dichte ca. 2,4 g/cm <sup>3</sup> ) mit Knotenpunkten	1.840
1.2	Verkleidungsmodule aus ca. 110 m <sup>2</sup> ebenen Flächentragwerken (Innen- und Außenwände, Decken ca. 17 kg/m <sup>2</sup> , Boden ca. 25 kg/m <sup>2</sup> )	2.030
1.3	Verbindungselemente	310
	<b>Summe</b>	<b>4.180</b>
<b>2.</b>	<b>Herkömmlicher Aufbau</b>	
2.1	Stahldecks und -wände ca. 50 m <sup>2</sup> , 8 mm dick mit Aussteifungsprofilen ca. 80 lfd. m, 120 x 10 mm	4.870
2.2	Wand- und Deckenpaneele (80 m <sup>2</sup> Innenwände, Decken mit ca.16 kg/m <sup>2</sup> , 20 m <sup>2</sup> Bodenaufbau mit ca. 42 kg/m <sup>2</sup> )	2.120
	<b>Summe</b>	<b>7.430</b>

Eine Überprüfung der erreichten Fertigungsgenauigkeit erfolgte mit eigenen, kalibrierten Messmitteln an den gefertigten Mustern.

Dabei wurde die Maßhaltigkeit der Stützstrukturen in Bezug auf die Abstandsmaße zwischen den Knotenmittelpunkten geprüft.

Die Abweichungen lagen in einer Toleranz kleiner 1 mm und sind damit für schiffbau-liche Anwendungen geeignet.

Ausgewählte ebene Flächenmodule für thermisch hoch belastbare Anwendungen als Innenwände auf Seeschiffen nach G2 (siehe Kapitel 3.4) wurden auf ihre Dicken- und Längentoleranz aus der Fertigung und nach Brandversuchen untersucht.

Die Dicken- und Längentoleranzen sind abhängig vom Herstellungs- und Zuschnitt-verfahren.

Bei den durchgeführten manuellen Press- und Trennverfahren traten Toleranzen in der Dicke von  $\pm 0,8$  mm und bei den Kantenlängen von  $\pm 1,5$  mm auf.

Diese Toleranzen sind durch maschinell geführte Verfahren zu reduzieren, insbesondere die Dickentoleranz ist auf  $\pm 0,1$  mm zu begrenzen. Dafür ist bei einer zukünftigen industriellen Fertigung ein Prozess zum Dickenschleifen vorzusehen.

Durch die thermischen Belastungen während der Brandtests traten Verformungen der untersuchten Flächen auf:

- Längenschumpf von durchschnittlich 2,1 %, gemessen über die Vertikal- und Horizontalkanten
- Durchbiegung im Flächenmittelpunkt von ca. 4 % einer Kantenlänge

Diese Verformungen sind für die geplanten Anwendungen unbedenklich, da sie durch die dauerelastischen Klebverbindungen mit der Stützstruktur aufgefangen werden und der Längenschumpf mit Winkelprofilen in den Raumkanten abgedeckt bleibt.

Die anwendungsrelevanten Festigkeiten ausgewählter Flächentragwerke wurden von potentiellen Nutzern durch subjektiv bewertete, praxisnahe Belastungstests geprüft.

Dazu wurde eine, als extrem belastet einzuschätzende, Türfläche gefertigt und in einer werkseigenen Versuchseinrichtung bei der Firma Metallbau Lethe in Hamburg eingebaut.

Diese Firma ist auf den Bau von Türen für den Schiffbau spezialisiert und hier wurden auch die Türbeschläge, wie Scharniere, Türschließer und Schloss in die Versuchsfläche eingesetzt.

Die Türfläche aus dem, im Vorhaben entwickelten Flächenmaterial hat den Gebrauchstest durch häufiges Öffnen und Schließen auch mit hohen Kräften bestanden und somit ist die Funktionalität für Wand- und Deckenmodule gegeben.

### 3.6.2 Flächenstrukturen für schnelle Wasserfahrzeuge

-----

In Abstimmung mit der MTE Meerestechnik Engineering GmbH in Rostock als Finalproduzent eines Bodeneffektfahrzeuges wurden modular aufgebaute Baugruppen für den Rumpf und die Flügel gefertigt.

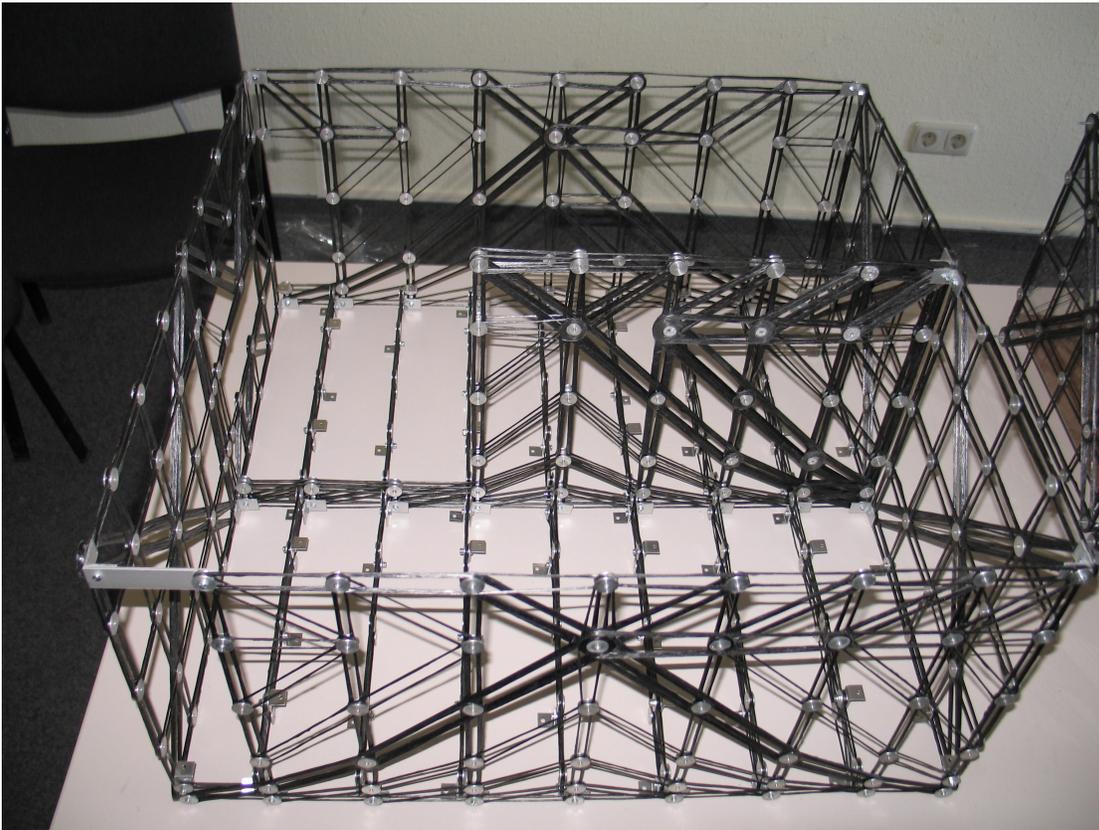
Hierfür wurden Bauteilstrukturen nach

- G3 (Ebene Flächentragwerke in Sandwichbauweise)
- G4 (Gekrümmte Flächentragwerke mit Kompaktlaminaten,
- G5 (Gekrümmte Flächentragwerke in Sandwichbauweise) sowie
- G6 (Fügestrukturen)

gemäß Gesamtübersicht **Bild 3.4.1** hergestellt und erprobt.



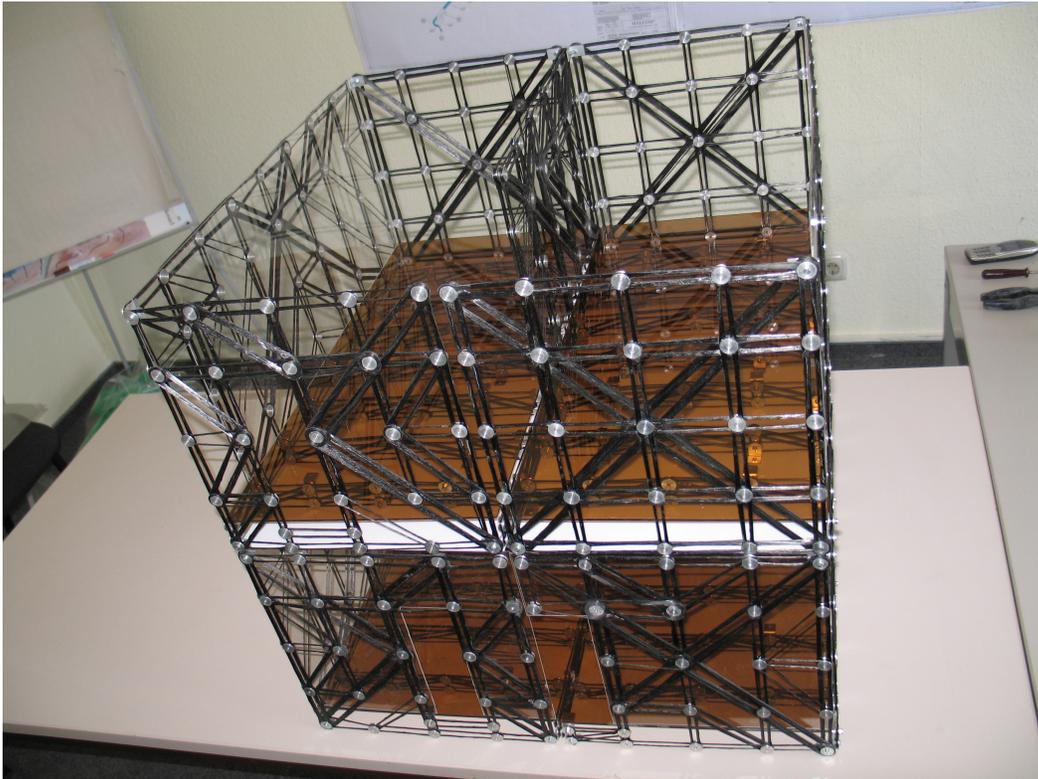
**Bild 3.6.1 Modell der Raumzellen-Module 410/412 des 2. Decks im Deckshaus**



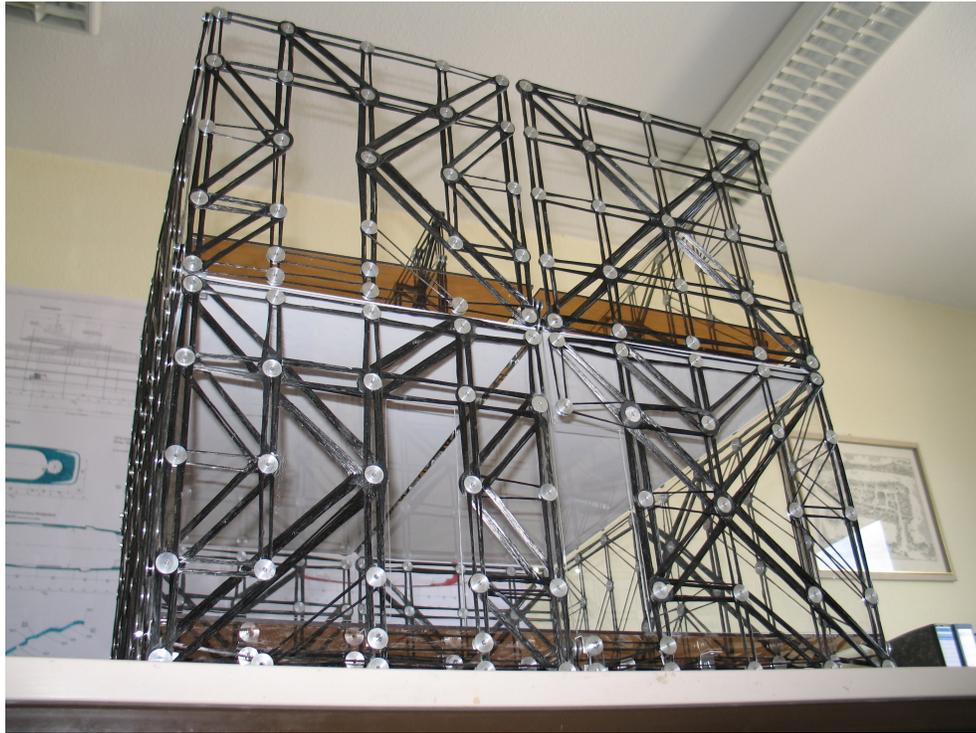
**Bild 3.6.2** Modell der Raumzellen-Module 402/404 des 2. Decks im Deckshaus



**Bild 3.6.3** Gefügte Modell-Module über eine Decksebene



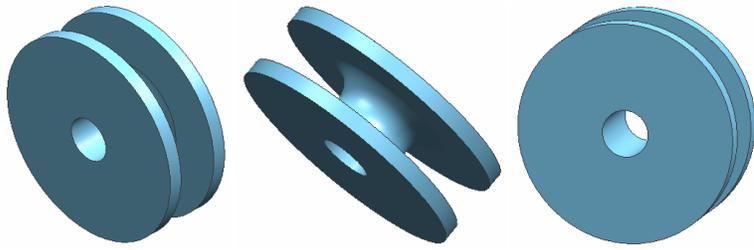
**Bild 3.6.4 Gefügte Modell-Module über 2 Decks**



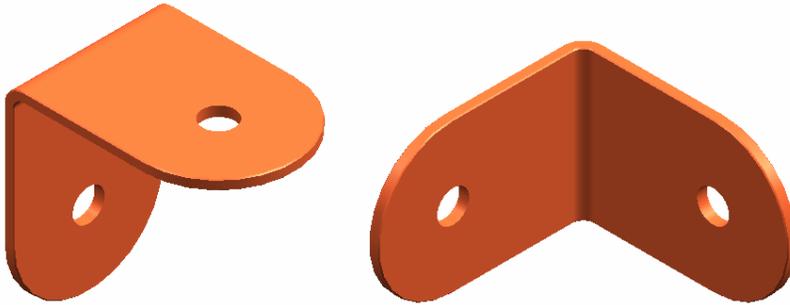
**Bild 3.6.5** Stützstruktur von 4 einzelnen Wänden, gefügt zu einer 2 x 2-Struktur



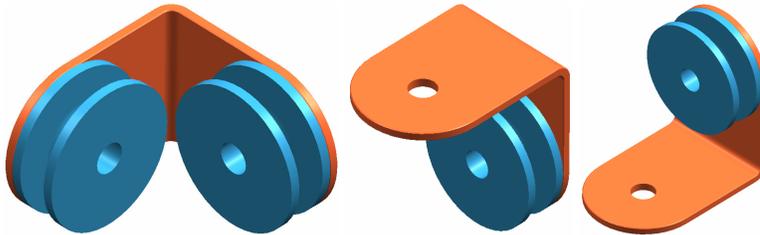
**Bild 3.6.6** Blick in eine Raumzelle mit Stützstruktur hinter Boden-, Decken- und Wandplatten



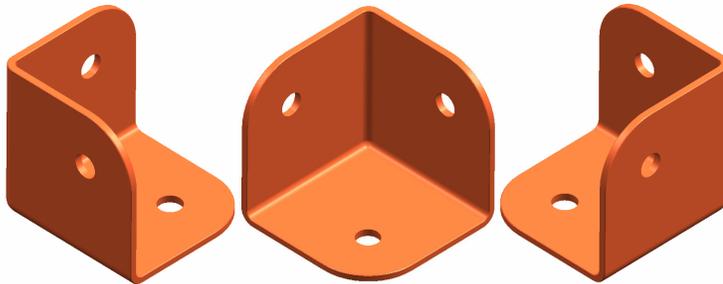
*Rolle für Wickel*



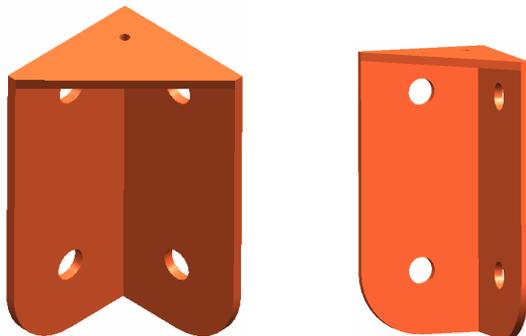
*Winkel zur Wand-  
bzw.  
Deckenverbindung*



*Winkel mit Position  
der Rollen*



*Eckwinkel (außen)*



*Eckwinkel für  
Fußboden (innen)*

#### **4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Es wird zunächst eine Bewertung des Nutzens der wissenschaftlich-technischen Resultate, anschließend der wirtschaftlichen Ergebnisse und danach der Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten vorgenommen.

Der wesentliche Nutzen der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse besteht in der Verfügbarkeit einer Arbeitsmethode zur durchgehenden Entwicklung, Fertigung und Montage modularer Leichtbaustrukturen für Aufbauten und schnelle Fahrzeuge der maritimen Industrie. Damit ist es möglich, unter den technisch-technologischen Bedingungen kleiner und mittelständischer Betriebe Leichtbaustrukturen in Faser-verbundbauweise bei Einzel- und Kleinserienfertigung herzustellen.

Für Decksaufbauten von Schiffen und Bodeneffektfahrzeuge ist es gelungen, völlig neue Produkte bzw. Produktkomponenten herzustellen, die bisher auf dem Markt nicht angeboten werden oder in Metallbauweise ausgeführt wurden.

Ergebnisse aus einzelnen Arbeitspaketen können simultan zur Bearbeitung wissenschaftlich-technischer Aufgaben auch außerhalb des im Vorhaben geplanten Anwendungsbereiches eingesetzt werden.

Die aufgebaute Werkstoffdatenbank ist im Unternehmen generell eine wertvolle Entscheidungshilfe bei der Auswahl und Bewertung der Eigenschaften von FVW für neue Produkte.

Durch die Modularisierung im Formen- und Modellbau und bei einer ausgewählten Gruppe von Bauteilstrukturen können Produkte und Produktkomponenten flexibler nach Kundenwünschen ausgelegt und gefertigt werden.

Die durchgehende Modellierung des Fertigungsprozesses, einschließlich der Herstellung von Demonstrationsmustern hat den Nachweis erbracht, dass die technischen Anforderungen der Kunden an FVW-Produkte und -Komponenten sicher erfüllt werden können.

Für die Geschäftstätigkeit des Unternehmens ist mit den Resultaten des Vorhabens der Aufbau eines neuen Geschäftsfeldes mit nationalen und internationalen Kunden auf dem maritimen Markt begonnen worden. Akquisition und Vertrieb wurden eingeleitet. Es wird damit gerechnet, dass im Zeitraum der ersten drei Jahre nach Abschluss des Vorhabens mindestens 25% des Gesamtumsatzes durch Leistungen im neuen Geschäftsfeld erzielt werden, in den darauf folgenden zwei Jahren ist ein Anwachsen auf ca. 40% des Gesamtumsatzes geplant. Das Unternehmen wird expandieren. Durch Kooperation mit anderen KMU, vor allem bei der Produkt-herstellung, werden zusätzliche Arbeitsplätze in der Region geschaffen und erhalten.

Durch die Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern im Vorhaben werden Produkte entwickelt, für die ein einzelnes Unternehmen nicht die wirtschaftlichen und personellen Voraussetzungen hat. Weitere Partner sind inzwischen in die Zusammenarbeit einbezogen worden.

Es erfolgt eine abgestimmte Vertriebsarbeit sowohl auf dem deutschen als auch auf dem internationalen Markt.

Wegen der steigenden Marktnachfrage ist geplant, die Entwicklungsaktivitäten zu Leichtbaustrukturen für Aufbauten und schnelle Fahrzeuge der maritimen Industrie kontinuierlich fortzusetzen.

Schwerpunkte sind dabei Produkte mit noch größeren Abmessungen bis zu L = 70 m, unbrennbare Spezialprodukte zur Schiffsausrüstung sowie Produkte mit hybriden Strukturen unter Verwendung metallischer und verschiedenartiger FVW – Materialien.

## **5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen mit Wirkung auf die durchgeführten Arbeiten sind nicht bekannt geworden.

## **6. Geplante Veröffentlichungen**

Ergebnisse sind als Präsentation in elektronischer und in Papierform aufbereitet und zahlreichen Interessenten zugänglich gemacht worden.

Über die Ergebnisse des Vorhabens ist weiterhin auf mehreren Veranstaltungen der „Maritimen Allianz Ostseeregion“ vorgetragen worden.

Es sind Vorträge vor Gremien der IHK in Rostock und die Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift geplant.

## **7. Verzeichnis der Bilder**

### Abschnitt 2

Bild 2.1 Prozessablauf für den Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen

### Abschnitt 3.1

Bild 3.1.1 Auswahl von Epoxydharzen mit Angabe mechanischer Eigenschaften

Bild 3.1.2 Übersicht und Suchergebnis für ein Epoxydharz mit vorgegebenen Eigenschaften

Bild 3.1.3 Übersicht und Suchergebnis für einen Fasertyp

Bild 3.1.4 Übersicht und Suchergebnis für ein Additiv

Bild 3.1.5 Übersicht und Suchergebnis für ein Prepreg

Bild 3.1.6 Übersicht und Suchergebnis für ein Laminat

Bild 3.1.7 Übersicht und Suchergebnis für einen Spezialwerkstoff

Bild 3.1.8 Übersicht und Suchergebnis für einen Hartschaum

### Abschnitt 3.2

Bild 3.2.1 Modularisierte Deckshausstruktur

Bild 3.2.2 Module und Stützstrukturen des Deckshauses

Bild 3.2.3 Raummodule mit Stützstrukturen des Deckshauses

Bild 3.2.4 Außenwände, Fußboden und Decke einer Kabine mit Stützstrukturen in modularer Bauweise

Bild 3.2.5 Details der Modulbauweise mit Stützstrukturen (1)

Bild 3.2.6 Details der Modulbauweise mit Stützstrukturen (2)

Bild 3.2.7 Decksverkleidung für eine Megayacht

Bild 3.2.8 Beispiel einer Laminierform in Skelettbauweise

Bild 3.2.9 Ausgewählte Spantformen in Leichtbauweise mit Sandwichstrukturen

### Abschnitt 3.3

- Bild 3.3.1 Iterativer Entwicklungs- und Fertigungsprozess für modulare Leichtbaustrukturen
- Bild 3.3.2 Entwicklungs- und Fertigungsplanung modularisierter Decksaufbauten in Leichtbauweise
- Bild 3.3.3 Entwicklungs- und Fertigungsplanung modularisierter Leichtbausysteme zur Schiffsausrüstung
- Bild 3.3.4 Entwicklungs- und Fertigungsplanung modularisierter Bodeneffektfahrzeuge

### Abschnitt 3.4

- Bild 3.4.1 Material und Fertigungsaufwendungen für Bauteilgruppen
- Bild 3.4.2 Thermisch hochbelastbares Plattenmaterial (T bis 1100 °C) mit Profilverstärkung
- Bild 3.4.3 Vorgehensweise bei der Auslegung von Faserverbundstrukturen
- Bild 3.4.4 Kopplung von CAD-Systemen mit ANSYS
- Bild 3.4.5 Abhängigkeit der Bauteilmasse und der Kosten von Rechteckplatten mit konstanter Flächenlast in Sandwichbauweise mit GFK und CF und für äquivalente Metallplatten
- Bild 3.4.6 Verknüpfung von Teilprozessen der Konstruktion des Formenbaus und der Montage

### Abschnitt 3.5

- Bild 3.5.1 Oberflächenmodellierung kompletter Aufbautenstrukturen einer Megayacht
- Bild 3.5.2 Oberflächenmodellierung von Modellteilen für Aufbautenstrukturen einer Megayacht
- Bild 3.5.3 Oberflächenmodellierung der vollständigen Strukturen eines Geräteträgers
- Bild 3.5.4 Oberflächenmodellierung einer Verkleidungsstruktur mit eingesetzten Türelementen

- Bild 3.5.5 Oberflächenmodellierung der vollständigen Oberfläche eines Bodeneffektfahrzeuges
- Bild 3.5.6 Oberflächenmodellierung von Düsen-Propeller-Kombination bei Faserverbundbauweise
- Bild 3.5.7 Gefräste Laminierform für Flügelemente eines Bodeneffektfahrzeuges
- Bild 3.5.8 Laminiermodelle für Fahrpulte
- Bild 3.5.9 Hybrides Laminiermodell für die Oberschale eines Bodeneffektfahrzeuges (L = 15 m)
- Bild 3.5.10 Skelettmodell zum Formenbau für Teile einer Deckshausverkleidung
- Bild 3.5.11 Skelettmodell zum Formenbau für die Flügeloberschale eines Bodeneffektfahrzeuges
- Bild 3.5.12 Bauteile einer Decksverkleidung mit Sandwichlaminaten
- Bild 3.5.13 Mastkonstruktion mit mehrschichtigem Kompaktlaminat
- Bild 3.5.14 Unbrennbares, thermisch isolierendes Paneel (T = 950 °C, 90 min Isolierstandzeit)
- Bild 3.5.15 Vorbereitung von Stahlkonstruktionen auf einem Schiffsdeck durch Einfügen zusätzlicher Faserverbundelemente zur Montage von Decksverkleidungen

### Abschnitt 3.6

- Bild 3.6.1 Modell der Raumzellen-Module 410/412 des 2. Deckshauses Deck
- Bild 3.6.2 Modell der Raumzellen-Module 402/404 des 2. Deckshauses Deck
- Bild 3.6.3 Gefügte Modell-Module über eine Decksebene
- Bild 3.6.4 Gefügte Modell-Module über 2 Decks
- Bild 3.6.5 Stützstruktur von 4 einzelnen Wänden, gefügt zu einer 2 x 2-Struktur
- Bild 3.6.6 Blick in eine Raumzelle mit Stützstruktur hinter Boden-, Decken- und Wandplatten
- Bild 3.6.7 Standardisierte Verbindungselemente für die gewickelten Stützstrukturen

## 8. Zusammenfassung

Gesamtzielstellung des Vorhabens war die Analyse der Einsatzbedingungen für Faserverbundwerkstoffe (FVW) in der maritimen Industrie im Großschiffbau und bei schnellen Seetransportmitteln sowie die Entwicklung modularisierter Lösungen für ausgewählte Baugruppen.

Um vor allem kleinen und mittelständischen Unternehmen die Möglichkeit zu erschließen, im Marktsegment des Leichtbaus mit FVW in der maritimen Industrie erfolgreich zu werden, wurden Arbeitsmethoden so entwickelt, dass im Verbund von KMU die vollständige Entwicklung, Fertigung und Montage von Leichtbauprodukten aus FVW vorgenommen werden kann.

Folgende Leistungen wurden ausgeführt:

Um eine schnelle und sichere Bewertung von Eigenschaften der Werkstoffe, die für neue Produkte benötigt werden, vornehmen zu können wurde eine rechnergestützte Werkstoffdatenbank für FVW-Materialien aufgebaut..

Aus dem Anwendungsbereich des Großschiffbaus und schneller Seetransportmittel wurden Bauteilstrukturen analysiert und festgelegt, welche technisch und wirtschaftlich vorteilhaft aus FVW herzustellen sind und gegenüber Produkten mit metallischen Werkstoffen Vorteile aufweisen. Schwerpunkte dabei waren Deckshaus- und Aufbaustrukturen von Seeschiffen und Komponenten von Bodeneffektfahrzeugen.

Um eine hohe Flexibilität in der Entwicklung und Herstellung unter den Bedingungen der Einzel- und Kleinserienfertigung zu erzielen, wurden modularisierte Lösungen entwickelt.

Zur Herstellung der FVW-Produkte und Produktkomponenten wurde eine durchgehende Fertigungstechnologie konzipiert. Sie enthält die Arbeiten zur Fertigungsplanung für den Modell- und Formenbau, das Laminieren und die Montage sowie die Realisierung dieser Teilprozesse. Die zur Produktherstellung benötigten Materialien wurden spezifiziert und Fertigungsaufwendungen kalkuliert.

In einem weiteren Abschnitt des Vorhabens wurden geeignete Methoden zur Bauteildimensionierung mit FVW- und hybriden Bauteilstrukturen analysiert und zur Anwendung ausgewählt.

Es wurden Softwaretools für die Entwicklung und Herstellung so bereitgestellt und modifiziert, dass eine problemlose Integration von FVW-Bauteilen in die Strukturen eines Finalproduktes beim Kunden möglich ist.

Abschließend erfolgte die Modellierung des Fertigungsprozesses für die ausgewählten Produktgruppen mit Schnittstellen zu den Entwicklungs- und Montageprozessen.

Für ein ausgewähltes Systemprodukt, eine Deckshausstruktur, wurde ein Demonstrationsmuster hergestellt. Es dient dem Nachweis der Anwendbarkeit der erzielten Resultate und der Ergebnisdemonstration vor potentiellen Kunden.

Mit der Verwertung der Vorhabensresultate wurde begonnen. Planungen für eine langfristige technische und wirtschaftliche Nutzung der Ergebnisse wurden erarbeitet.

Die Vorhabensziele wurden vollständig erreicht.