

Abschlussbericht des Forschungsvorhabens

**Leichtbau durch
funktionsintegrierende Strukturen in
Multi Material Design –
Hybride Sandwichbauweisen für
Schienenfahrzeuge
- PURtrain -**



Projektlaufzeit: 01.05.2008 – 31.10.2011

Projektpartner

BOMBARDIER

Bombardier Transportation GmbH
Am Rathenaupark
16761 Hennigsdorf

KraussMaffei

Krauss - Maffei Technologies GmbH
Krauss-Maffei-Straße 2
80997 München

 Bayer MaterialScience

Bayer MaterialScience AG
Business Unit Polyurethanes
B 108
D-51368 Leverkusen

 **DECS**
KUNSTSTOFF- UND GERÄTECHNIK

DECS GmbH
Rheinmetallstr. 20
99610 Sömmerda

 **Fraunhofer**
ICT

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7
76327 Pfinztal - Berghausen

 **DLR**
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Fahrzeugkonzepte (FK)
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

IFB

 Institut für
Flugzeugbau

Universität Stuttgart
Institut für Flugzeugbau
Pfaffenwaldring 31
70569 Stuttgart

 **wbk**
Institut für Produktionstechnik

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
wbk Institut für Produktionstechnik
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03X3019 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Autorenverzeichnis	- 6 -
Abkürzungen	- 7 -
1 Einleitung	- 8 -
1.1 Zielsetzung	- 9 -
2 Konzeption und Architektur	- 11 -
2.1 Erstellung des Lastenhefts	- 12 -
2.2 Benchmark, Bauweisen und Verfahren, Kostenkalkulation	- 13 -
2.2.1 Benchmark.....	- 13 -
2.2.2 Bauweisen und Verfahren.....	- 16 -
2.2.3 Kostenkalkulation.....	- 18 -
2.3 Bauweisenkonzept des Bauteils	- 19 -
2.4 Einbindung in die umgebende Struktur.....	- 21 -
3 Produktionstechnologie	- 21 -
3.1 Fasersprühprozess.....	- 21 -
3.1.1 Weiterentwicklung des Sprühmischkopfes.....	- 21 -
3.1.2 Untersuchung am Sprühmischkopf.....	- 21 -
3.1.3 Luftunterstützung für eine bessere Glasfaserverteilung.....	- 21 -
3.1.4 Glaszuführung über PTFE-Schlauch und Rohrkonstruktion .	- 21 -
3.1.5 Serientaugliche Gesamtkonstruktion	- 21 -
3.2 Versuchswerkzeug.....	- 21 -
3.3 Ablegeeinheit für Endlosfaserstrukturen.....	- 21 -
3.3.1 Vorgehensweise	- 21 -
3.3.2 Konzeption der Sprüheinheit.....	- 21 -
3.3.3 Konstruktion der Sprüheinheit.....	- 21 -
3.3.4 Integration in die Anlagentechnik und Durchführung erster Ablegeversuche mit einem schnell reagierenden Polyurethansssystem.....	- 21 -
3.3.5 Durchführung von Ablegeversuchen zur Integration in Polyurethan-Sandwichverbunde	- 21 -
3.3.6 Herstellung der Proben	- 21 -
3.3.7 Charakterisierung der abgelegten Endlosfaserstränge.....	- 21 -
3.3.8 Zusammenfassung	- 21 -

4	Werkstoffe und Halbzeuge	- 21 -
4.1	Faserverstärkte Polyurethane	- 21 -
4.1.2	Untersuchungen zur Faservorzugsorientierung im Fasersprühprozess	- 21 -
4.1.3	Einfluss von Glasfaserlänge und Glasfasergehalt auf die Zugsteifigkeit und Zugfestigkeit von verpresstem, langglasfaserverstärktem Polyurethan.....	- 21 -
4.2	Polyurethane Sandwichstrukturen.....	- 21 -
4.2.1	Bestimmung der Deckschichtdicken	- 21 -
4.2.2	Charakterisierung der Deckschichteigenschaften.....	- 21 -
4.2.3	Charakterisierung des Schubmoduls der Kernstrukturen.....	- 21 -
4.2.4	Charakterisierung der Sandwicheigenschaften.....	- 21 -
4.3	Brandschutz	- 21 -
4.3.1	Entwicklung eines halogenfreien Flammschutzmittels	- 21 -
4.3.2	Bahnnorm CEN/TS 45545	- 21 -
4.3.3	Brandschutzentwicklung	- 21 -
4.3.4	Prüfung anhand der Bahnnorm vom Prototyp und Musterteil vom Fraunhofer ICT	- 21 -
4.4	Gefaltete Kernstrukturen	- 21 -
4.4.1	Alternative Halbzeuge.....	- 21 -
4.4.2	Geometrieauslegung	- 21 -
4.4.3	Mechanische Versuche.....	- 21 -
4.4.4	Weiterentwicklung des kontinuierlichen Herstellungsprozesses.....	- 21 -
4.4.5	Bemusterung	- 21 -
5	Prototypenbau	- 21 -
5.1	Bauteilberechnung.....	- 21 -
5.1.1	Statische Dimensionierung	- 21 -
5.1.2	Strukturoptimierung zur Analyse von lokalen Lastpfaden und Verstärkungsstrukturen.....	- 21 -
5.2	Konstruktion des Demonstrator	- 21 -
5.3	Werkzeugherstellung für den Demonstrator	- 21 -
5.4	Fertigung des Demonstrators	- 21 -
6	Verifikation und Validierung	- 21 -
6.1	Verifikation der mechanischen Eigenschaften.....	- 21 -

6.1.1	Vorversuche an zwei Bodenplatten	- 21 -
6.1.2	Abgleich der Versuche am Demonstrator mit den statischen Berechnungen	- 21 -
6.2	Verifikation der akustischen Eigenschaften	- 21 -
6.3	Validierung des Demonstrators	- 21 -
7	Zusammenfassung	- 21 -
8	Quellenverzeichnis	- 21 -
9	Anhang	- 21 -
9.1	Systematische Vorgehensweise der Bauteilkonzeption in Anlehnung an [VDI-93]	- 21 -
9.2	Bauumfang der konventionellen Bauweise.....	- 21 -
9.3	Überblick über die erarbeiteten Bauweisenkonzepte.....	- 21 -

Autorenverzeichnis

Dr. Martin Schön
Bombardier Transportation GmbH
Am Rathenaupark
16761 Hennigsdorf

Josef Renkl
Krauss - Maffei Technologies GmbH
Krauss-Maffei-Straße 2
80997 München

Dr. Bernd Rothe
Bayer MaterialScience AG
Business Unit Polyurethanes
B 108
D-51368 Leverkusen

Dipl.-Wirt.-Ing. Conrad Brodhun
DECS GmbH
Rheinmetallstr. 20
99610 Sömmerda

Dipl.-Ing. Jan Kuppinger
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7
76327 Pfinztal - Berghausen

Dr. Ulrich Fehrenbacher
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7
76327 Pfinztal - Berghausen

Dipl.-Ing. Gerhard Kopp
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Fahrzeugkonzepte (FK)
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Dipl.-Ing. Marc Grzeschik
Universität Stuttgart
Institut für Flugzeugbau
Pfaffenwaldring 31
70569 Stuttgart

Dipl.-Ing. Alexander Ochs
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
wbk Institut für Produktionstechnik
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe

Abkürzungen

AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
BMC	Bulk Moulding Compound
BTEAC	Benzyltriethylammoniumchlorid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DOPO	9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthren-10-oxid
Gew.-%	Gewichtsprozent
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GMT	Glasplattenverstärkte Thermoplaste
LFT	Langfaserverstärkte Thermoplaste
MMD	Multi Material Design
NMR	nuclear magnetic resonance
OEM	Original Equipment Manufacturer
PUR	Polyurethane
RTM	Resin Transfer Moulding
SMC	Sheet Moulding Compound
S-RIM	Structural Resin Injection Moulding
2-K	Zwei Komponenten
4-K	Vier Komponenten

1 Einleitung

(Jan Kuppinger, Martin Schön)

Das Forschungsvorhaben positioniert sich vor dem Hintergrund des in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegenen Verkehrsaufkommen sowie dem global zu beobachtenden Klimawandel und dem daraus resultierenden Zwang zu konsequentem Umdenken und Handeln beim Umgang mit Ressourcen und bei der Emission von Treibhausgasen. Der Verkehrssektor trägt durch die Erzeugung großer Mengen an Kohlenstoffdioxid nachweislich und in erheblichem Maße zum Klimawandel bei. Neben dem Straßenverkehr müssen demnach auch für das stetig zunehmende Verkehrsaufkommen im Bereich der Schienen gebundenen Verkehrsmittel Lösungen gefunden werden, um einen signifikanten Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen des Verkehrssektors zu leisten und damit gleichzeitig die Vorteilhaftigkeit gegenüber anderen Verkehrsträgern weiter auszubauen.

Ein Ansatzpunkt hierbei ist die Verringerung der massebezogenen Fahrwiderstände durch konsequenten und funktionsintegrierten Leichtbau. Insbesondere im Nahverkehr trägt diese Maßnahme, aufgrund der kurzen Haltestellenabstände mit dem damit verbundenen häufigen Beschleunigen und Verzögern des Fahrzeugs, wesentlich zur Verminderung des Energiebedarfs und damit zur Reduzierung der Emissionen bei. Im Hochgeschwindigkeitsverkehr ermöglicht Leichtbau eine Erhöhung der Nutzlast bei gleich bleibendem Energieverbrauch sowie neuartige Fahrzeugkonzepte mit höherer Kapazität und gesteigertem Raumkomfort.

Eine geringere Fahrzeugmasse wirkt sich jedoch nicht nur positiv auf den Energieverbrauch, sondern auch auf den Fahrkomfort sowie den Verschleiß im Rad-Schienen-Kontakt aus. Zudem haben sich die Ansprüche an die Sicherheit und den Komfort im Bereich des Schienenverkehrs signifikant erhöht und in der Vergangenheit zu einer Gewichtszunahme der Fahrzeuge, ähnlich wie in der Automobilindustrie, geführt. Die hierdurch entstehenden Zielkonflikte sollen in diesem Vorhaben durch eine optimale Integration von verschiedenen Funktionen am Beispiel einer selbsttragenden Verkleidungsstruktur (Einhausung) gelöst und demonstriert werden. Dabei finden Komfortfunktionen wie z. B. die akustische Dämmung, Oberflächeneigenschaften (Optik), Sicherheitsfunktionen wie z. B. Aufnahme von Missbrauchslasten oder der High-Velocity-Impact von kleinen Objekten, ebenso Berücksichtigung wie die mechanischen und strukturellen Anforderungen (Steifigkeit, Dichtigkeit, Medienbeständigkeit, etc.).

Neben den beschriebenen technischen und umweltpolitischen Anforderungen sehen sich die Schienenfahrzeughersteller mit einem starken Preisverfall bei kleiner werdenden Losgrößen konfrontiert. Innovative Leichtbaumaterialien werden daher im traditionell eher konservativen Wagonbau aus Kostengründen nur in geringem Umfang eingesetzt. Insbesondere die Herstellung von Rohstoffen, Halbzeugen und Komponenten für Schienenfahrzeuge ist in großem Umfang bereits in Billiglohnländer verlagert. Die Abwanderung personalintensiver Arbeit führte in dieser Branche in den vergangenen Jahren zu einem Abbau von Arbeitsplätzen in Deutschland.

Um diesen Trend entgegen zu wirken ist es für unsere Gesellschaft von existenzieller Bedeutung, Innovationen in den Bereichen Materialien, Verarbeitungsverfahren und Maschinentechologien zu generieren um auf diese Weise neu Arbeitsplätze zu schaffen, bzw. vorhanden Arbeitsplätze zu sichern.

1.1 Zielsetzung

Zielsetzung des Vorhabens ist die Herstellung gewichts- und kostenoptimierter Leichtbauteile, deren Materialaufbau den entsprechenden Bauteilbelastungen und den zu integrierenden Funktionen angepasst ist.

Für die Fertigung von mittleren Serienstückzahlen wie sie im Schienenfahrzeugbau üblich sind, eignen sich unter anderem das Polyurethan Fasersprühen. Die dazu erforderliche und zu entwickelnde Anlagen-, Automations-, Füge- und Fertigungstechnik in Kombination mit der werkstofflichen Innovation, führt zu technologisch hochinnovativen Fertigungsprozessen.

Die wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen in diesem Vorhaben ergeben sich damit entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Dem innovativen Konzept einer modularen Bauweise von Schienenfahrzeugen folgend, werden gemeinsam mit dem Endanwender (OEM) zunächst die mechanischen Anforderungen an eine für die integrierte Fertigung geeignete selbsttragenden Verkleidungsstruktur (Einhausung) festgelegt und die Systemgrenzen definiert. Mit Hilfe von FEM-Berechnungen werden die bestehenden Lastpfade im Bauteil ermittelt. Parallel zur Lastpfadbestimmung werden die konzeptionelle Produktstruktur, die Konzeption des vorgesehenen Sandwichaufbaus und die Konstruktion der selbsttragenden Verkleidungsstruktur (Einhausung) vorangetrieben. Hierbei wird auch die Verwendung metallischer Einleger bzw. Rahmenprofile im Bauteil bewertet und ggf. konstruktiv einbezogen. Weiterführend wird die Implementierung des fertigen Moduls in die bestehende Prozesskette der Wagenherstellung aufgezeigt.

Grundlegende wissenschaftliche Arbeitsziele sind die Entwicklung geeigneter Materialien und deren Aufbau zu einer lokal verstärkten Sandwichstruktur. Das Polyurethan-Matrixmaterial muss vor allem hinsichtlich der Erfüllung der anspruchsvollen Brandschutzbestimmungen weiterentwickelt werden. Ein besonders hervorzuhebendes Ziel ist der gradierte Werkstoffaufbau, der mittels (hoch) faserverstärkten Sandwichdeckschichten die strukturelle Integrität und gleichzeitig eine hohe Oberflächengüte ermöglicht. Die Problematik des Bauteilverzugs ist bei langfaserverstärktem Polyurethan im Allgemeinen zwar sehr gering, bei großen Bauteilen jedoch nicht zu unterschätzen und somit ein nicht zu vernachlässigender Arbeitspunkt im Rahmen des Vorhabens.

Parallel zur beschriebenen Werkstoffentwicklung im Bereich der Polyurethansysteme ist die Verfahrens- und Fertigungstechnik für die Herstellung von Sandwichverbunden auf Basis von Polyurethanen im Fokus des Vorhabens. Hierbei ist insbesondere durch die Vielzahl an Verfahrensvarianten, z.B. dem Einsatz von faserverstärkten, geschäumten Polyurethanen oder die Verwendung von Polyurethan als Klebstoff für

die Anbindung der Kernschichten an die Sandwichdeckschicht, ein entsprechender Entwicklungsaufwand zu leisten. Die Entwicklung eines modifizierten Fasersprühkopfes, sowie eine für die entsprechenden Funktionen ausgelegte Ablegevorrichtung für Endlosfasern ist dabei einer der Schwerpunkte im Vorhaben. Dabei ist des weiteren zu prüfen, welche verfahrenstechnischen Anpassungen bzw. Neuentwicklungen hinsichtlich der Dosierung von Füllstoffen, welche ggf. zur Verbesserung des Brandverhaltens zugegeben werden müssen, durchzuführen sind und inwiefern in diesem Zusammenhang eine verschleißfestere Düsentechologie entwickelt werden muss.

Ein weiterer Fokus ist die automatisierte, kontinuierliche Herstellung der als funktionsintegrierende Sandwichkernschicht vorgesehenen Faltschichten. Hierbei muss der Einsatz alternativer Materialien zur Faltung der Schichten und die Beschichtungen der ausgewählten Faltschichten zur Erfüllung des Brandschutzes untersucht werden.

Für den hier vorgeschlagenen, faserverstärkten Faltschichten-Polyurethan-Verbund sind zudem technologische Lösungen im Bezug auf das Verhalten des Verbundes an den Schnittstellen der unterschiedlichen Werkstoffe im Gesamtmodul zu erarbeiten. Um die Eigenschaften von Bauteilen in der numerischen Simulation diesbezüglich verlässlich vorhersagen zu können, werden parallel entsprechende Berechnungsmethoden zur Abbildung des Werkstoffversagens und der Fügungen entwickelt.

Abschließendes Ziel des Projektes ist es, geeignete Prüfmethoden für das Gesamtmodul bzw. für Bauteilsegmente zu definieren, zu evaluieren und möglichst zu standardisieren. Auf dieser Basis sollen praxistaugliche numerische Modelle für verschiedene FE-Programme abgeleitet und anhand des Versuchsbauteils verifiziert werden.

2 Konzeption und Architektur

(Gerhard Kopp, Martin Schön)

Das technische Gesamtziel des Projekts PURtrain ist die Konzeption einer gewichts- und kostenoptimierten Multi-Material-Design (MMD) Struktur für Schienenfahrzeuge. Im Rahmen des Projekts wurden zur Verifizierung der neuartigen Struktur eine selbsttragende Verkleidungsstruktur (Einhausung bzw. Motorkapselung) für Diesel, E- und andere Motoren eines Schienenfahrzeuges prototypisch dargestellt und erprobt. Als Referenz- bzw. Vergleichsstruktur ist die Motorkapselung des Itino der Firma Bombardier ausgewählt worden (Abbildung 1).



Abbildung 1: Bild des Dieseltriebzug Itino der Firma Bombardier [Bom-09]

Die Verkleidung ist als Abkapselung für unterschiedliche Motoren und Komponenten ausgelegt und wird an den Boden des Wagenkastens verschraubt.

Auf Grund der notwendigen Montagereihenfolge der Komponenten und der Zielsetzung die hybride Sandwichkapselung prototypisch darzustellen, wurden die Anschlussplatten bzw. Schottbleche (in Abbildung 2 blau dargestellt) von der derzeitigen Struktur übernommen und nur die Bodenwanne und die Klappen als Neukonzeption im Weiteren ausgeführt. Diese Struktur weist zudem die gleichen Anbindungspunkten zum Wagenkasten auf, so dass eine direkte Umsetzung im vorgegebenen Bauraum und mit den entsprechenden Schnittstellen gegeben ist. Die weiteren, an das Bauteil gestellten technologisch komplexen Eigenschaften lagen in der Gewichtseinsparung von mindestens 30%, der Realisierung einer montagegerechten Konstruktion des

Gesamtbauteils, sowie seiner Modularität. Ergänzende Zielstellungen waren die störungsfreie Erstmontage der Power-Pack-Verkleidung und eine optimale Zugänglichkeit des Power-Packs für notwendige Wartungsarbeiten. Wirtschaftlich betrachtet sollte eine Kosteneinsparung in Höhe von 30% realisiert werden.

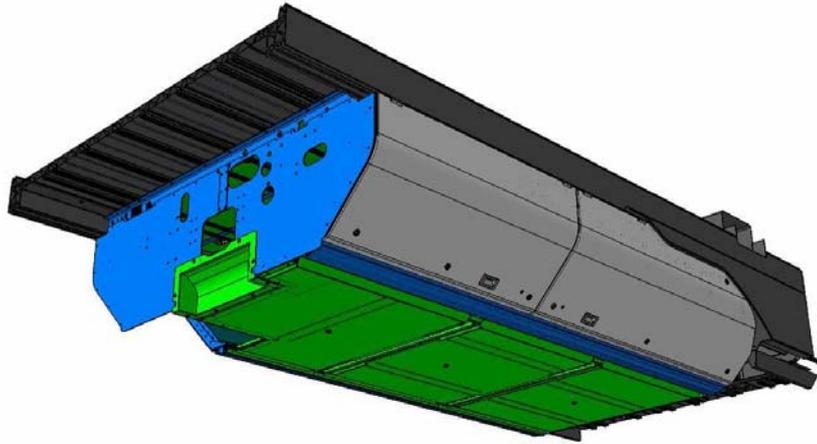


Abbildung 2: Motorkapselung mit Anbindung an den Wagenkasten in konventioneller Bauweise

Um eine optimierte Motorkapselung zu realisieren, wird eine systematische Vorgehensweise in Anlehnung an durchgeführt. Diese Neukonzeption der selbsttragenden Verkleidungsstruktur erfolgt in einem Top-Down-Prozess. Die methodische Vorgehensweise nach [VDI-93] ist im Anhang detailliert dargestellt und eingehend in folgenden Arbeiten beschrieben: [Dub-05, Pah-07, Rot-00, Rot-01, VDI-04, VDI-82, VDI-87, VDI-93, VDI-97a, VDI-97b, VDI-97c, VDI-98a, VDI98b].

Aus den vom Betrieb abgeleiteten Anforderungen, wie z.B. Lastfälle, Steifigkeit, Festigkeit, Brandschutz, Schalldämmung, Schwingungsdämpfung, notwendige Reparaturmöglichkeiten, Modularität, Oberflächengüte, Medienbeständigkeit, der Detaillierung dieser Anforderungen in spezifische Auslegungskriterien und der Festlegung der Bauteil- bzw. Systemgrenzen (vgl. Kapitel 2.1) erfolgt die Ableitung der Funktionsstruktur. Darauf aufbauend wurden Prinziplösungen für die Motorkapselung unter Berücksichtigung der Projektziele abgeleitet. Zu dieser Konzeptfindung („Vorentwürfe“) wurden unterschiedliche Methoden, wie die Möglichkeiten des Brainstormings („intuitiv betonte Methode“), der einfachen Materialsubstitution („allgemein anwendbare Methode“) und der funktionellen Ableitung („systematische Suche“) angewendet. (vgl. [Dub-05]) Nach der systematischen Beurteilung der Lösungen wurde die Bauweisenkonzeption durch die Auswahl der besten Lösung abgeschlossen (Kapitel 2) und die Detaillierung und Ausarbeitung der Bauweise konnte erfolgen (vgl. Kapitel 5).

2.1 Erstellung des Lastenhefts

(Martin Schön, Gerhard Kopp)

Im Lastenheft sind alle notwendigen Anforderungen der Motorkapselung aufgeführt. Insbesondere sind dabei folgende Punkte spezifiziert:

- 1) Konstruktionsprinzipien
- 2) Integrationsanforderungen
- 3) Systemanforderungen
- 4) Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartungsfreundlichkeit und Life Cycle Cost
- 5) Sicherheit
- 6) Technischer Support
- 7) Dokumentation
- 8) Validierung und Verifikation
- 9) Anhang

2.2 Benchmark, Bauweisen und Verfahren, Kostenkalkulation

(Gerhard Kopp, Martin Schön, Conrad Brodhun)

Die derzeitige Bauweise des Wagenkastens ist durch die traditionelle Verwendung von Stahl in Differenzial- und Aluminium in Integralbauweise gekennzeichnet. Jedoch wurden auch schon in der Vergangenheit immer wieder Ideen in Richtung Faserverbund- oder Hybridbauweise dargestellt, um neue Möglichkeiten der Fertigung von Schienenfahrzeugen aufzuzeigen. Vereinzelt wurden Unterbaugruppen (z.B. nicht oder nur teilweise tragende Dächer) auch als Sandwichkonstruktionen ausgeführt [Koe-11].

2.2.1 Benchmark

Als Benchmark für die im Rahmen des Projekts entwickelte Sandwichstruktur dient eine konventionelle selbsttragende Verkleidungsstruktur, wie sie derzeit im Einsatz ist. (vgl. Abbildung 3)

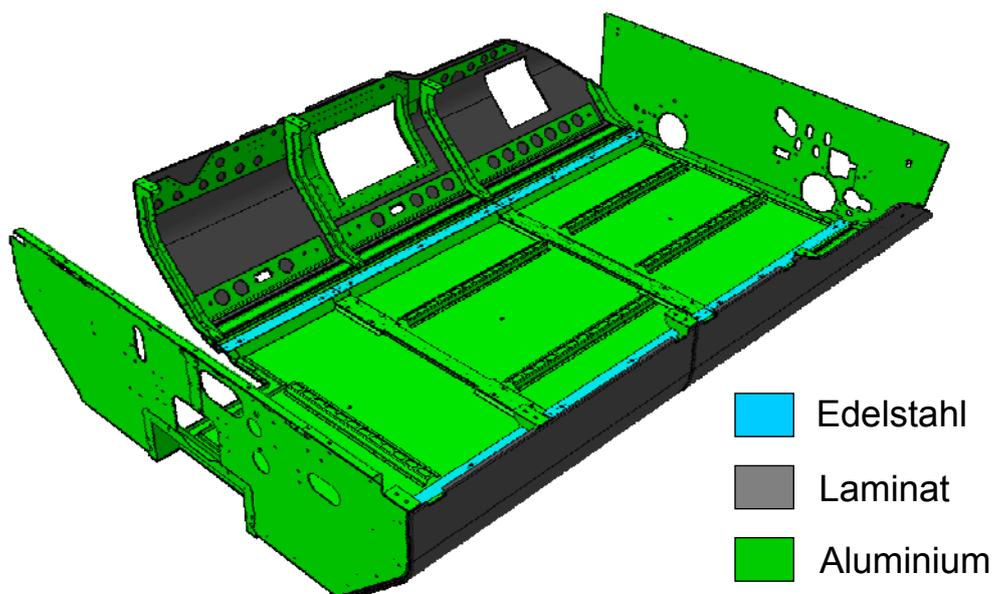


Abbildung 3: Darstellung der selbsttragenden Verkleidungsstruktur (Einhausung) in konventioneller Bauweise

Für den detaillierten Vergleich bezüglich der Strukturauslegung wurde das Simulationsmodell der konventionellen Bauweise aufgebaut. Der Bauumfang umfasste dabei das Gerüst mit einer einteiligen und einer zweiteiligen Abschlussplatte, zwei seitlich angeordneten Strangpressprofilen und neun Verstrebungen, sowie vier Seitenklappen mit Scharnier, Schloss, etc und einer Bodenwanne bestehend aus einem Außengerippe, zwei Querverstrebungen, drei Grundplatten, fünf Versteifungen und einer Verschalung (vgl. Anhang 11.2). Die Analyse und FEM-Berechnung des DLR Instituts für Fahrzeugkonzepte der Struktur erfolgt mittels repräsentativen Lastfällen in Anlehnung an DIN EN 12663 [DIN-12663] und mit der Firma Bombardier Transportation abgestimmten Missbrauchs- bzw. Zusatzlastfällen, die aus den betrieblichen Anforderungen abgeleitet wurden. Für die Bewertung der Strukturen wurden dabei unter anderem die Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen mittels folgender Lastfälle untersucht:

1. Eigenfrequenzanalyse mit geschlossenen Seitenklappen
2. 5 g Belastung in x- bzw. Fahrtrichtung mit geschlossenen Seitenklappen
3. 5 g Belastung in y- bzw. Querrichtung mit geschlossenen Seitenklappen
4. 5 g Belastung in z- bzw. Vertikalrichtung mit geschlossenen Seitenklappen

Kommentar: Die Beschleunigungen wurden insbesondere deshalb auf 5 g gesetzt und keine geringeren Beschleunigungen angenommen, um Zusatzgewichte z.B. auf Grund von notwendigen Dämm- und Isoliermatten zu berücksichtigen.

5. Zusatzlastfall: Flächenlast von 100 kg / m² auf die Bodenplatten
6. Zusatzlastfall: Durchbiegung der Bodenplatten unter Eigengewicht in z-Richtung bei geöffneten Seitenklappen
7. Zusatzlastfall: Belastung der Bodenplatten durch 100 kg in z-Richtung bei geöffneten Seitenklappen lokal an sieben unterschiedlichen Positionen zwischen den Streben

Bei diesen Berechnungen wurden sowohl die Steifigkeitswerte als auch die maximalen Belastungen und Festigkeiten ausgewertet, um diese mit der Neukonzeption der Motoreinhausung zu vergleichen. Die eingesetzten Solver Nastran und Hyperworks Optistruct stellten dabei geeignete Materialmodelle zur Verfügung. Aus Abbildung 4 werden die verwendeten Berechnungsmodelle ersichtlich und Abbildung 5 zeigt die wesentlichen Ergebnisse der Berechnung, die im Rahmen der festigkeitstechnischen Analyse berücksichtigt wurden.

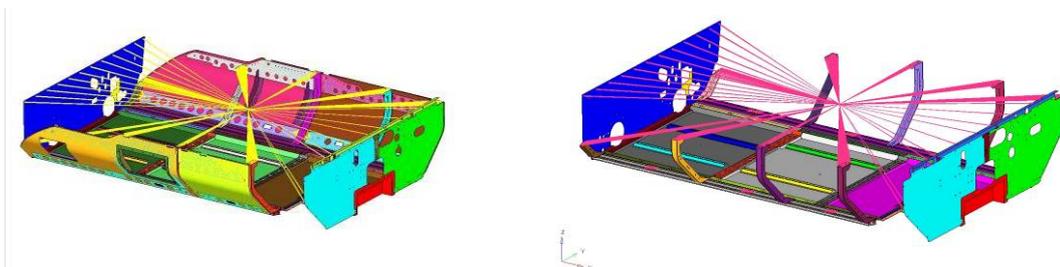
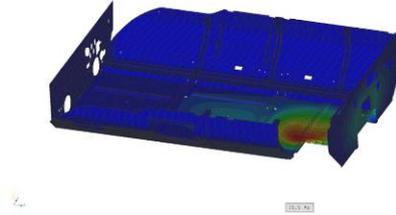


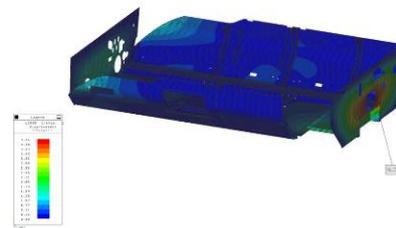
Abbildung 4: Darstellung der Berechnungsmodelle mit geschlossenen und „offenen“ Seitenklappen

Eigenfrequenzen

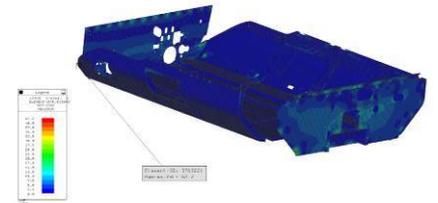


Erste Eigenfrequenz bei: 15,5 Hz

5 g Belastung in x-Richtung

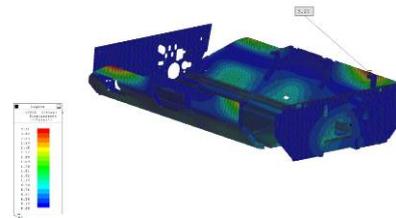


max. Verformung: 4,4 mm



max. Spannung: 62,2 N/mm²

5 g Belastung in y-Richtung

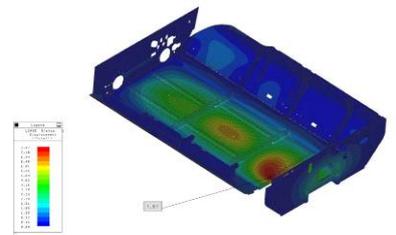


max. Verformung: 3,2 mm

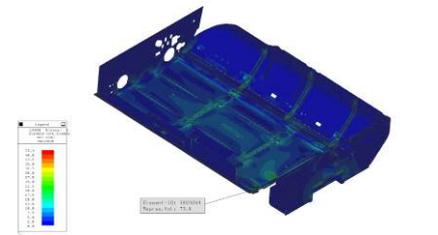


max. Spannung: 41,1 N/mm²

5 g Belastung in z-Richtung

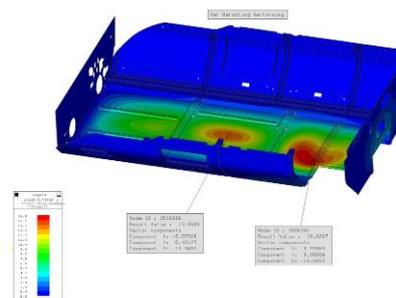


max. Verformung: 7,9 mm

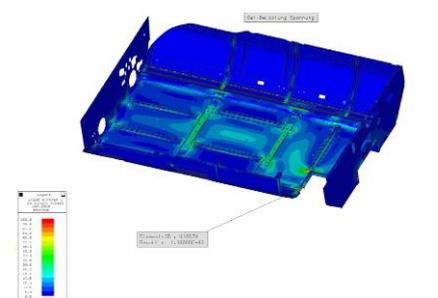


max. Spannung: 73,4 N/mm²

Flächenlast von 100 kg / m²

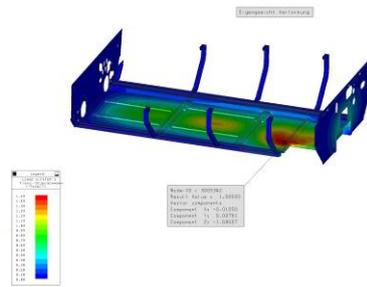


max. Verformung: 16,0 mm

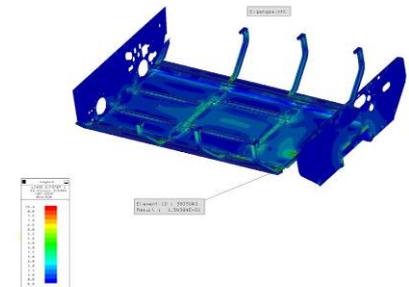


max. Spannung: 138,0 N/mm²

Durchbiegung unter Eigengewicht (offene Klappen)

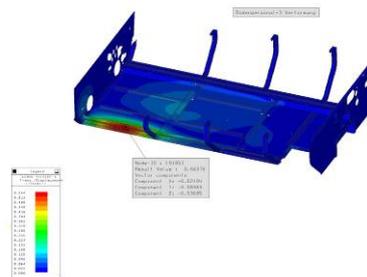


max. Verformung: 1,7 mm

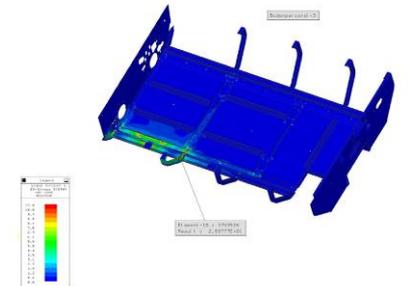


max. Spannung: 15,4 N/mm²

Lokale Belastungen der Bodenplatten durch 100 kg in z-Richtung (offene Klappen); Beispiel Belastung rechts hinten



max. Verformung: 0,5 mm



Max. Spannung: 27,0 N/mm²

Eigenfrequenzen [Hz] bzw. Verformung [mm]

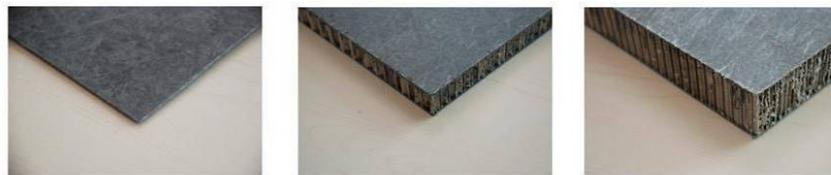
Von-Mises Vergleichsspannung [N/mm²]

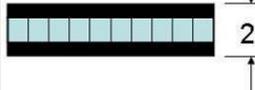
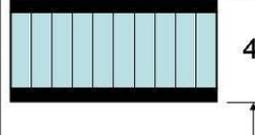
Abbildung 5: Beanspruchung der Motoreinhausung bei den vorgegebenen Lastfällen

Die Berechnungsergebnisse zeigten dabei, dass die notwendigen Steifigkeiten für diese Lastfälle gewährleistet sind und auch die maximal zulässigen Spannungen nicht überschritten wurden.

2.2.2 Bauweisen und Verfahren

Aktuelle Arbeiten im Bereich von strukturellen Baugruppen in Leichtbauweise umfasst Sandwichstrukturen mit Glasfaser- oder auch Kohlefaserverstärkungen mit konventionellen Harzsystemen (z.B. Epoxidharz), aber auch metallische Verbundstrukturen. Dabei werden als Sandwichstrukturen, Verbundkonstruktionen aus einem Kern mit hohem spezifischen Volumen und zwei vor allem zug- und druckbeanspruchten Deckschichten oder Häuten bezeichnet. Durch diesen Aufbau ergeben sich hohe Bauteilsteifigkeiten und -festigkeiten bei gleichzeitig geringem Gewicht. Zudem haben Sandwichstrukturen gute Schall- und Isolationseigenschaften (siehe Abbildung 6 und [Kop-09]).



			
	Massives Bauteil	„Dünnere Kern“	„Dicker Kern“
Rel. Biegesteifigkeit E*J	100%	Bis 700%*	Bis 3700%*
Rel. Gewicht	100%	103% – 108%*	106% - 120%*

* Abhängig von Kern- und Deckschichtauswahl

Erhöhung der spezifischen Biegesteifigkeit (E*J) durch den „Sandwichereffekt“

Abbildung 6: Wirkprinzip von Sandwichstrukturen [Kop-10]

Jedoch zeigt sich, dass der Einsatz dieser Verbundstrukturen in technischen Produkten heutzutage noch sehr eingeschränkt ist. Diese liegt vor allem an den höheren Kosten für die Herstellung der Bauteile insbesondere bei größeren Stückzahlen, so dass vor allem Sandwichstrukturen dort genutzt werden, wo der technische Nutzen den zusätzlichen Aufwand weit überwiegt (z.B. Gewichtersparnis im Flugzeugbau oder die genutzten Isolationseigenschaften in der Bauindustrie) [Kop09].

Um die Zielsetzung der Herstellung von gewichts- und kostenoptimierten Leichtbauteilen im Forschungsvorhaben zu erfüllen, eignen sich unter anderem das Polyurethan Fasersprühen. Hiermit kann die Fertigung von mittleren Serienstückzahlen, wie sie im Schienenfahrzeugbau bzw. bei der ausgewählten Motoreinhausung üblich sind, kostengünstig erfolgen. Zudem ergeben sich erheblich Leichtbaupotentiale auf Grund des realisierbaren Faserverbund-Sandwichaufbaus. (vgl. Abbildung 7)

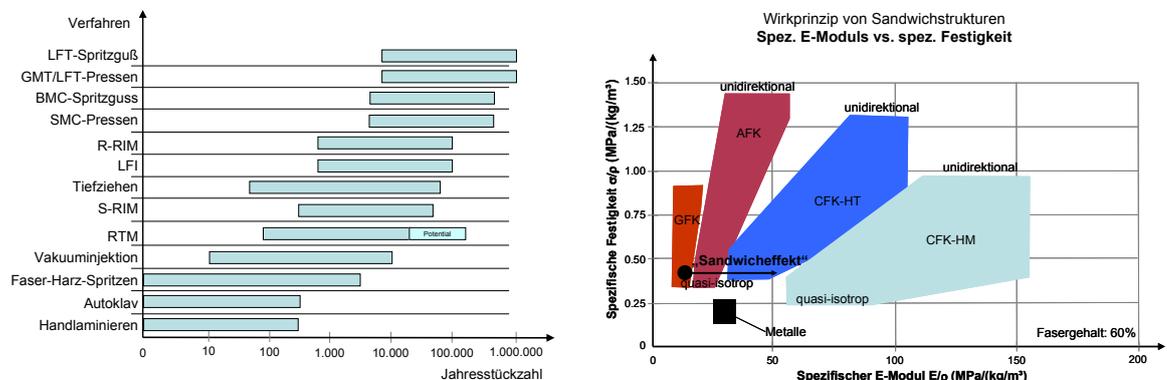


Abbildung 7: Darstellung der Kosten- und Gewichtsvorteile bei der Kombination des Fasersprühprozesses mit einem Polyurethan-GFK-Sandwichaufbaus bei mittleren Stückzahlen, links: [Sch-11], rechts: [Kop-10]

2.2.3 Kostenkalkulation

Um neben den Leichtbaupotentialen eine Kostenanalyse zu erhalten, liegt für die Sandwich-Motoreinhausung ein Modell der Herstellkosten vor. Dabei wurden unter den Herstellkosten nur die Materialkosten, Fertigungskosten und die Kosten für die Montage verstanden und keine weiteren Bestandteile der Selbstkosten, wie z.B. Entwicklungskosten, berücksichtigt (vgl. dazu [Ehr-07]). Das Modell basiert zum einen auf einem grundsätzlichen Fertigungskonzept, das entwickelt wurde, und zum anderen aus einem ersten Produktionsablauf.

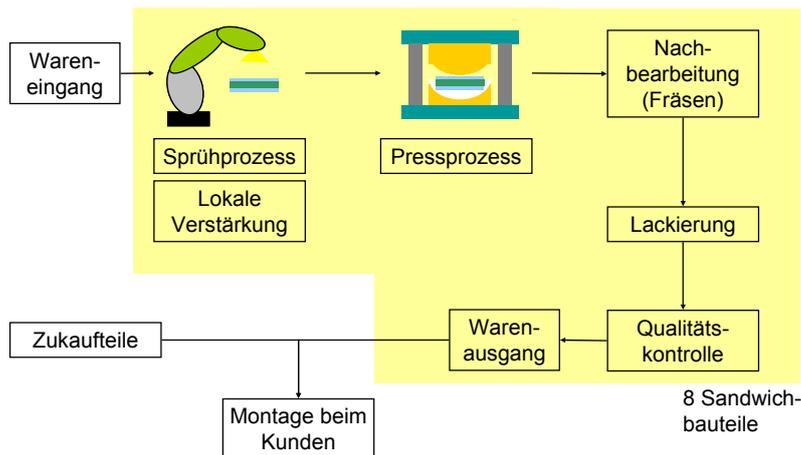


Abbildung 8: Schematische Darstellung des möglichen Fertigungsablaufs

Somit konnten Aussagen über Schnittstellen zwischen den notwendigen Anlagen (Bestimmung der Anzahl paralleler Prozesse), der Arbeitsabfolge, dem notwendigen Personal- und Materialeinsatz ebenso bestimmt werden, wie zum Beispiel die Größe der benötigten Fabrikfläche. Insbesondere werden bei der Kostenanalyse folgende Parameter berücksichtigt:

- Materialkosten
- Investitionen/Abschreibung
- Werkzeugkosten
- Energiekosten
- Kosten für Fabrikgelände bzw. Betrieb
- Personalkosten (Lohn und Gehalt)
- Kapitalkosten

Die Herstellkosten wurden hierbei auslastungsbezogen ermittelt. Dies bedeutet, dass davon ausgegangen wird, dass die notwendigen Anlagen auch für die Fertigung von anderen Bauteile bzw. Strukturen verwendet werden können, wenn diese nicht ausgelastet sind. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse des Modells ist die Aufteilung der Herstellkosten in die unterschiedlichen Einflussparameter in Abbildung 9 mittels fiktiver Werte dargestellt. Die genauen Vorteile der neuartigen Motoreinhausung bezüglich Gewichts als auch der Kosten sind in Kapitel 7 beschrieben.

Gesamtkosten Motoreinhausung (auslastungsbezogen)

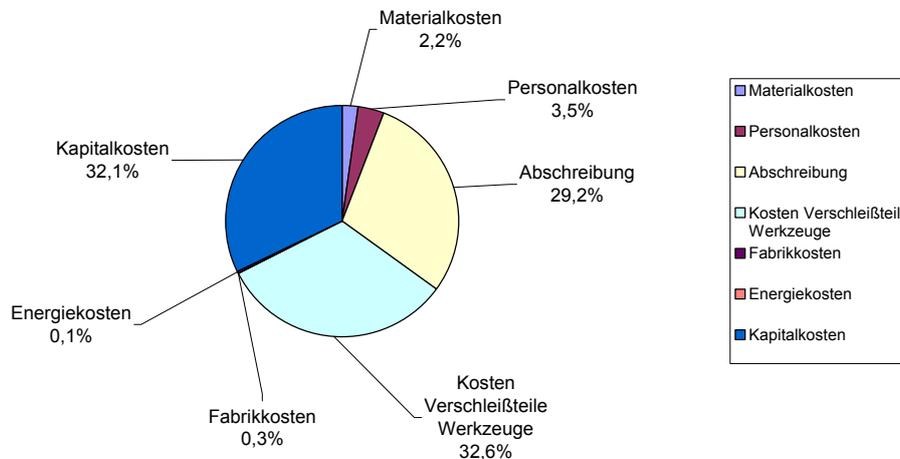


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Gesamt- bzw. Herstellkosten der neuartigen Motoreinhausung (Berechnung mit auslastungsbezogenen Kosten; Darstellung mit fiktiven Werten)

2.3 Bauweisenkonzept des Bauteils

(Martin Schön, Gerhard Kopp, Conrad Brodhun)

Ausgehend vom Lastenheft für die Motoreinhausung (vgl. Kapitel 2.1) und in Hinblick auf die Übertragung sämtlicher Anforderungen auf die Gegebenheiten der Herstellung von Polyurethan-Kunststoffbauteilen wurden die Funktionsstruktur für das Bauteil erstellt (vgl. Abbildung 10). Die Gesamtfunktion der Struktur besteht darin, den Motor und die Einbauten abzukapseln. Die erste Abstufung dieser Funktion besteht in der Definition der Hauptfunktionen. Diese sind:

1) Gesetzliche Anforderungen und Normen erfüllen

Anforderungen aus gesetzlichen Bestimmungen und Normen müssen für die Motorkapselung beachtet werden. Insbesondere muss das Lichtraumprofil eingehalten werden, die ausgewählten Werkstoffe müssen anwendbar sein, die akustische Dämmung des Motors muss für die Umgebung gewährleistet sein, die Brandschutzanforderungen müssen erfüllt werden, die Verbindungstechnik muss gemäß den Vorschriften ausgeführt werden und die Anforderungen an die Isolation müssen berücksichtigt sein.

2) Stoffe Ein- und Ausleiten

Um den Betrieb des Motors zu gewährleisten, müssen Stoffe ein- und ausgeleitet werden können.

3) Kräfte aufnehmen

Die Motorkapselung muss insbesondere mechanische Kräfte aufnehmen. Die sind insbesondere aerodynamische Kräfte, Impact-Belastungen, Dauerfestigkeiten und

Maximalkräfte (Schock). Dabei muss die notwendige Steifigkeit und Festigkeit gewährleistet sein und die Eigenfrequenzen berücksichtigt werden.

4) Betriebsbelastungen aufnehmen

Zu den auftretenden Betriebslasten gehören insbesondere Temperatur, Feuchtigkeit, Dichtheit gegenüber Druck, Wasser und Staub, Abrieb, Graffiti, Missbrauch, lokale Belastungen und die Reinigung bzw. Entwässerung.

5) Zugänglichkeit gewährleisten

Um die Zugänglichkeit zu gewährleisten, muss die Motorkapselung es ermöglichen von der Seite und von Unten in den Innenraum zu gelangen. Die Zugänglichkeit von Oben ist durch eine Klappe im Wagenkastenboden gewährleistet.

6) Flexibilität gewährleisten

Da unterschiedliche Motoren und Einbauten möglich sind, muss die Einhausung flexibel bzw. sehr variabel und anpassungsfähig bezüglich geometrische Änderungen sein.

7) Demontage gewährleisten

Eine einfache Demontage muss gewährleistet sein.

8) Designansprüche genügen

Bei der Konzeption der Struktur muss die Oberflächengüte und auch die unterschiedliche Farbgebung berücksichtigt werden.

Bei Bedarf werden diese Hauptfunktionen in Teilfunktionen unterteilt.

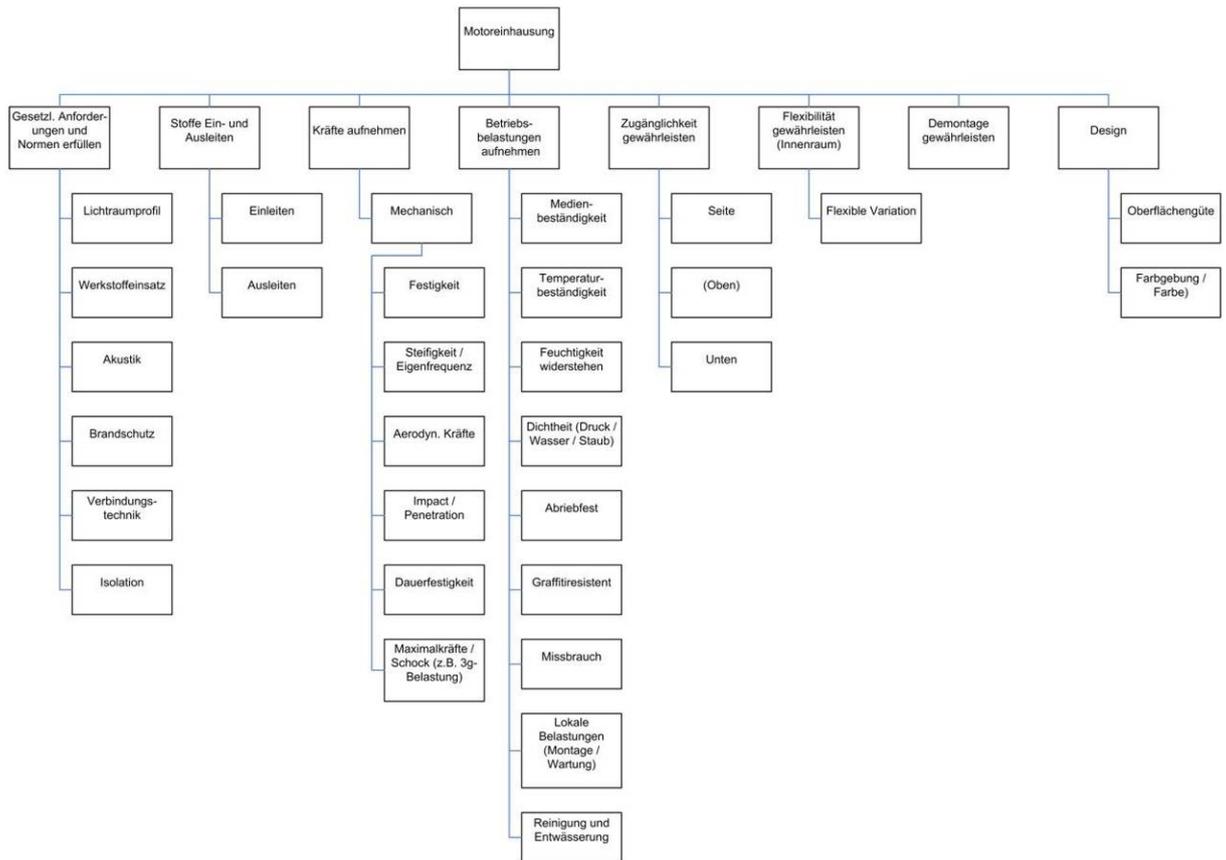


Abbildung 10: Funktionsstruktur der Motorkapselung

Darauf aufbauend wurden Prinziplösungen für die Motorkapselung unter Berücksichtigung der Projektziele abgeleitet. Zu dieser Konzeptfindung („Vorentwürfe“) wurden unterschiedliche Methoden genutzt, wie die Möglichkeiten des Brainstormings („intuitiv betonte Methode“), der einfachen Materialsubstitution („allgemein anwendbare Methode“) und der funktionellen Ableitung („systematische Suche“). Die Bewertung der Konzepte erfolgt in einer zweistufigen Bewertung. Dabei wurden in der 1. Phase sogenannte „K.O.-Kriterien“ definiert, die zum Ausschluss von nicht geeigneten Konzepten führen. Nur die Konzepte die alle „K.O.-Kriterien“ erfüllten, wurden anschließend in der 2. Phase anhand von gewichteten Kriterien verglichen (vgl. Abbildung 11). Die Konzepte 8 und 11 sind in Abbildung 11 durch die Nicht-Erfüllung der „K.O.-Kriterien“ schon als nicht geeignet verworfen worden. Eine genauere Beschreibung der Konzepte findet sich im Anhang.

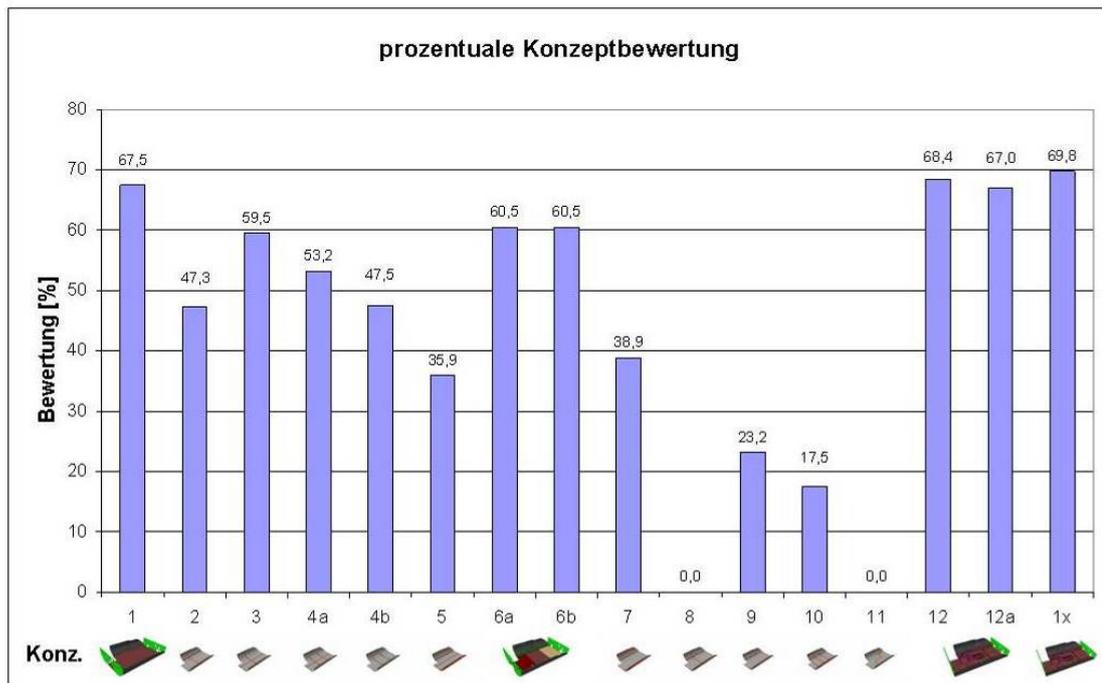


Abbildung 11: Übersicht über die Bewertung der erarbeiteten Konzepte

Nach der systematischen Beurteilung der erarbeiteten Lösungen wurde die Bauweisenkonzeption durch die Auswahl der besten Lösung (Konzept 1x) abgeschlossen.

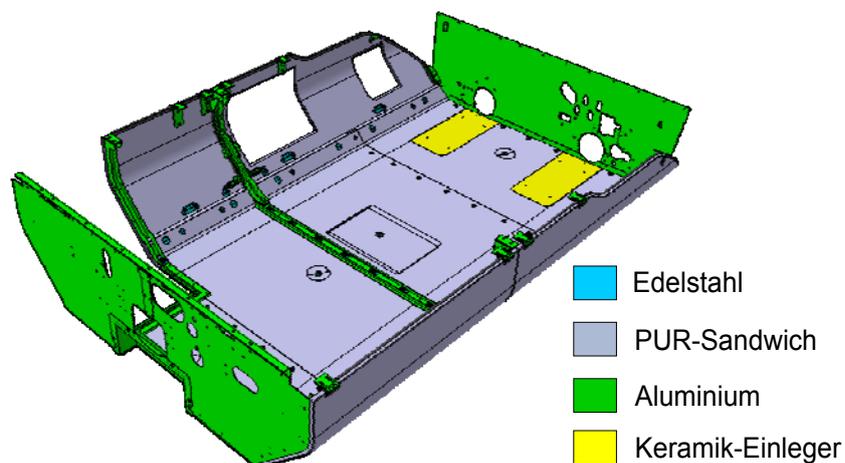


Abbildung 12: Darstellung des ausgewählten Konzepts 1x

Das ausgewählte Konzeption 1x besteht aus den Schottblechen, die unverändert in Aluminium vom der Referenzstruktur übernommen werden. An diese und den Wagenkasten werden die Bodenwanne und Seitenklappen aus PUR-Sandwichstrukturen befestigt, so dass die Gesamtanzahl der Bauteile stark reduziert werden kann. Zudem galt es durch konstruktive Maßnahmen den Bauteilvibrationen vorzubeugen. Zur Verbesserungen der thermischen Eigenschaften sind zudem keramische Einleger in die Bodenplatten im Bereich der Abgasführung integriert. Die

konstruktive und berechnungstechnische Detaillierung und Ausarbeitung der Bauweise ist in Kapitel 5 beschrieben.

2.4 Einbindung in die umgebende Struktur

(Gerhard Kopp, Martin Schön, Conrad Brodhun)

Zentrales Thema des funktionsintegrierten Sandwichverbundes ist die Fügetechnologie bzw. „Einbindung in die umgebende Struktur“. Im Rahmen des Vorhabens wurden Lösungen für vier Anwendungsfälle bearbeitet und entwickelt:

1. Die Anbindung der Unterflurabdeckung an die Wagenkastenstruktur muss hinsichtlich der Lastübertragung entlang der Lastpfade, der Verzugs- und Toleranzproblematik, der Körperschalldämmung, sowie der langen Nutzungsdauer entwickelt werden.
2. Eine weitere Herausforderung ist die Verbindung der Bauteilsegmente untereinander. Für eine sichere Verbindung kraftschlüssige Übergänge von einem Segment zum nächsten geschaffen werden. Hierfür werden Klebe-, Spleiß- oder andere Konzepte analysiert.
3. Eine Anbindung von Halterungen, Befestigungsteilen oder von Montage- und Reparaturklappen kann über punktuelle Inserts, eingebettete Profile oder andere konzeptionell integrierte Lösungen erfolgen. Dabei sind speziell die lokalen hohen Lasten zu berücksichtigen, die in die Sandwichstruktur eingeleitet werden müssen, ohne dass z.B. die Kernstruktur versagt.
4. Die Anbindung der Deckschichten an den Kern wird durch die adhäsiven Eigenschaften des Polyurethans sichergestellt. Hierfür ist es somit nicht notwendig eine zusätzliche Klebstoffschicht zwischen Kern und Deckschichten zu verwenden, wie es z.B. bei einem Sandwichaufbau von Aluminiumdeckschichten und Aluminiumhoneycomb notwendig ist. (vgl. dazu [Kop-09])

Bei der Konzeption der Montagereihenfolge und der notwendigen Fügetechniken muss zwischen geometrisch verschiedenen Verbindungsarten unterschieden werden [Mih-09]:

1. *Stoßverbindungen von Sandwichelementen*
2. *Eckverbindungen von Sandwichelementen*
3. *T-Verbindungen von Sandwichelementen*
4. *Randanbindungen von Sandwichelementen*
5. *Anbindungen senkrecht zu den Deckschichten*

Bei der Konzeption der Motoreinhausung sind insbesondere auf Grund des Fertigungsprozesses der Sandwichstrukturen und der Anbindung an die Wagenkastenstruktur Stoßanbindungen, Randanbindungen und Anbindungen senkrecht zu den Deckschichten mittels Inserts ausgewählt worden. Dies ermöglichte einen optimierten Kraftfluss und erfüllte die Anforderungen an die lange Lebensdauer und der Möglichkeit von Reparatur- und Demontearbeiten (vgl. Abbildung 13).

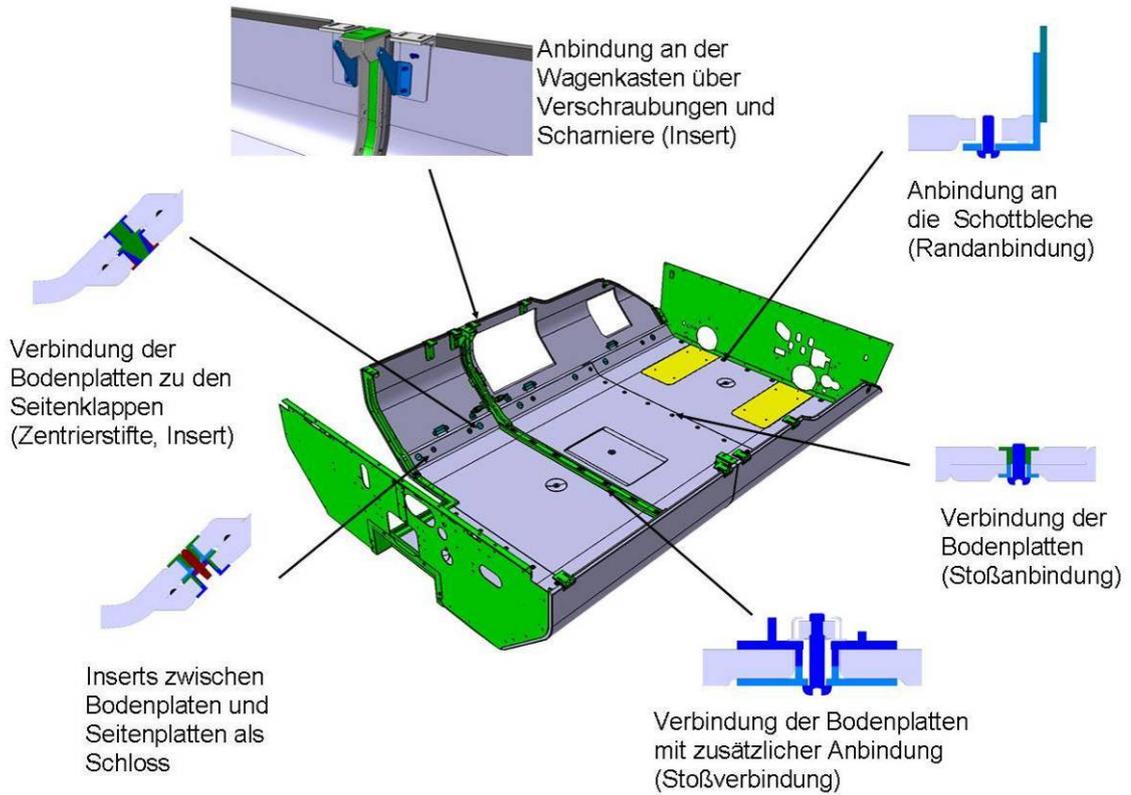


Abbildung 13: Konstruktive Darstellung der Verbindungstechnik der Motoreinhausung

3 Produktionstechnologie

3.1 Fasersprühprozess

(Josef Renkl)

In diesem Kapitel ist die Weiterentwicklung der Polyurethan-Fasersprühtechnologie beschrieben. Zielsetzung war die Entwicklung eines füllstofftauglichen 4-Komponenten-Fasersprühmischkopfs. Mit Hilfe dieser Neuentwicklung sollte es zukünftig möglich sein, durch das zu und abschalten von Komponenten, unterschiedlichsten Schichtaufbauten zu realisieren.

3.1.1 Weiterentwicklung des Sprühmischkopfes

Die Ausgangsbasis der Neuentwicklung war der 2-Komponenten (2-K) Sprühmischkopf (nicht füllstofftauglich), wie in Abbildung 14 dargestellt. Während der Projektlaufzeit gelang es, einen neuen, füllstofftauglichen 4-Komponenten (4-K) Mischkopf zu konstruieren, berechnen, die Mischqualität zu simulieren und herzustellen. Abbildung 15 zeigt den neu entwickelten 4-Komponenten-Mischkopf.



Abbildung 14: 2-Komponenten-Sprühmischkopf

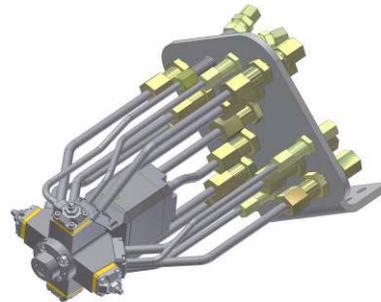


Abbildung 15: Neuentwickelter 4-K-Sprühmischkopf

Der neu entwickelte 4-Komponenten-Sprühmischkopf zeichnet sich dadurch aus, dass die Rezirkulation der gefüllten oder ungefüllten Komponenten über die Düsen und den Steuerkolben erfolgt. Auf diese Weise werden in den Sprühpausen alle Komponentendüsen durchströmt, das Absetzen von Füllstoffen verhindert und dadurch alle Leitungen freigehalten. Es treten somit keine Toträume (Bereiche in denen das Material verbleibt oder eingeschlossen wird) auf. Mittels Nadelverschlussdüsen werden die zum jeweiligen Sprühprozess nicht benötigten Komponenten verschlossen.

3.1.2 Untersuchung am Sprühmischkopf

Nach Fertigstellung des 4-Komponenten Sprühmischkopf-Mischkopf wurde die Glasfaserzuführung adaptiert (Abbildung 16) und Versuche mit einer Flachstrahldüse durchgeführt. Es wurde dabei festgestellt, dass die geschnittene, seitlich in den Sprühstrahl eindosiert Glasfaser nicht gleichmäßig mit dem Polyurethan benetzt und in der Kavität verteilt werden. Zudem wurden viele geschnittene Glasfasern überhaupt nicht von dem Sprühstrahl erfasst, was zu einem Faserflug und einer Verschmutzung der Umgebung führte.

Des Weiteren wurde festgestellt das beim Eintrag des Reaktionsgemisches mit den geschnittenen Glasfaser die „Umorientierung“ des robotergeführten Mischkopfs sehr lange dauert, verbunden mit einer Anhäufung von Polyurethan und Glasfasern an den Umkehrstellen. Diese Anhäufung führt unweigerlich zu Nesterbildung. Speziell bei stark dreidimensionalen Teilen führt das Sprühen mittels einer Flachstrahldüse zu großen Überlappungsbereichen und entsprechend zu stark schwankenden Materialverteilung. Ein weiteres Problem stellte die große Abmessung des Mischkopfs mit der Glasfaserzuführung dar (Abbildung 16). Der Aufbau ist sehr sperrig und somit nicht geeignet in komplexe Werkzeuggeometrien einzusprühen.

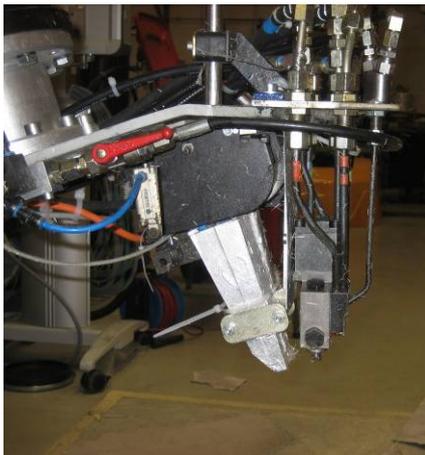


Abbildung 16: Mischkopf mit Glasfaserzuführung

Auch durch die Variation verschiedener Austragsdüsen konnte keine Verbesserung der Faserverteilung bzw. Faserbenetzung erzielt werden. Daher wurde ein völlig neues Konzept der Faserzudosierung erarbeitet, bei dem die Fasern axial in den Sprühstrahl eingebracht werden (Abbildung 17). Die Glasfaserrovings werden in einem Schneidwerk geschnitten, welches sich am hinteren Teil des Roboterarms befindet. Mittels Flugförderung werden die geschnittenen Fasern vom Schneidwerk zum Mischkopf gefördert und axial in den Sprühstrahl eingebracht.

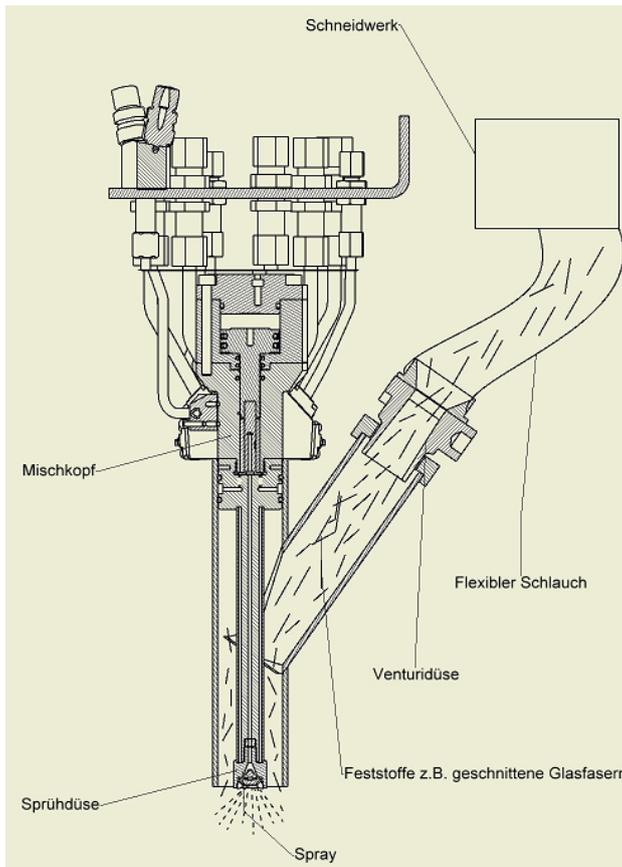


Abbildung 17: Neues Konzept des 4-K-Sprühmischkopf mit Glasfaserzuführung

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ICT wurde dieser neue Mischkopf validiert. Als Grundlage diente ein konstanter PUR-Austragsbereich von 20 g/s. Die Sprühversuche zeigten, dass Glasfasern von 6 und 12 mm bis ca. 30 Gew.-% problemlos gefördert wurden, jedoch bei einer Glaslänge von 24 mm der Querschnitt der ansaugenden Venturidüse (Abbildung 18) nicht ausreicht um über eine Menge von 5 Gew.-% Glasfasern bei einer Polyurethanaustragsmenge von 20 g/s zu kommen. Daher wurde eine größere Venturidüse mit Adapteraufbau konstruiert und gefertigt (Abbildung 18).

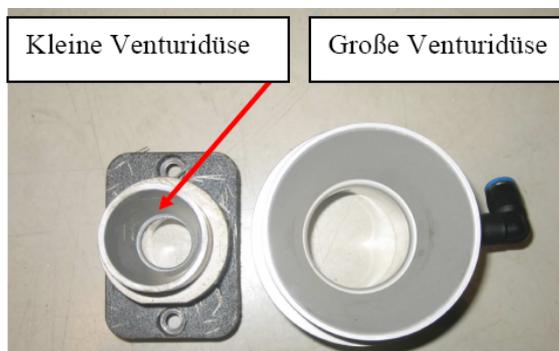


Abbildung 18: Venturiedüsen

Durch den Umbau auf die größere Venturidüse ist für einen Polyurethan Austragsbereich von 20 g/s gelungen, einen Dauerhaften Glasaustrag von 8,6 g/s (30 Gew.-%)

zu erzielen. Jedoch wird vermutet, dass ein höherer Austrag (z.B. 15 g/s) nicht störungssicher durch den Förderstrang (Spiraldrachtschlauch, Venturidüse, Glasrohr) gefördert werden kann, da bei Versuchen ein Verstopfen der Schlauchleitung zu beobachten war.

3.1.3 Luftunterstützung für eine bessere Glasfaserverteilung

Ein Nachteil der erprobten Ausführung (Abbildung 19) war zudem, dass das geschnittene und angesaugte Glas einseitig aus dem Glasrohr in den Sprühstrahl fiel bzw. durch den entstehenden Unterdruck am Sprühstrahl eingesogen wurde. Die Flugbahn des größten Teils der Glasfasern ist in Abbildung 20 dargestellt. Um eine noch gleichmäßigere Verteilung bei der Sprühablage zu erhalten, soll eine sog. Mischluft im Glasrohr beigefügt werden, um das Glas-Luft-Gemisch mit Luftturbulenz zu beaufschlagen.

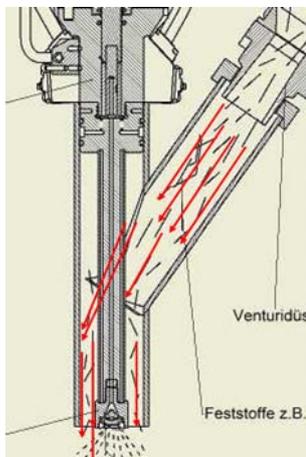


Abbildung 19: Herkömmliche Faserführung

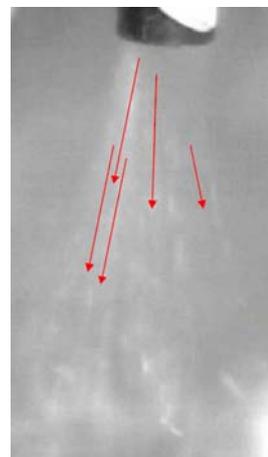


Abbildung 20: Flugbahn der Fasern

Um eine turbulente Strömung in dem Glasrohr zu erzeugen, wurden zwei Luftdüsen an das Glasführungsrohr angebracht (Abbildung 21). Die Venturidüse sorgt für den coaxialen Austrag der Fasern, zusätzlich sorgt die Mischluft für eine Verwirbelung des Glas-Luftgemischs. Dabei entsteht der gewünschte „Zylindermantel“ aus Glasfasern (Abbildung 22), welcher im Folgenden in den Sprühstrahl eingebunden wird.

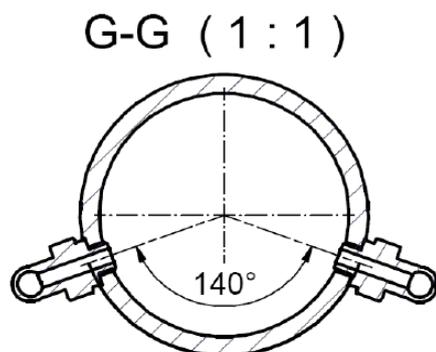


Abbildung 21: Einbindung der Luftdüsen

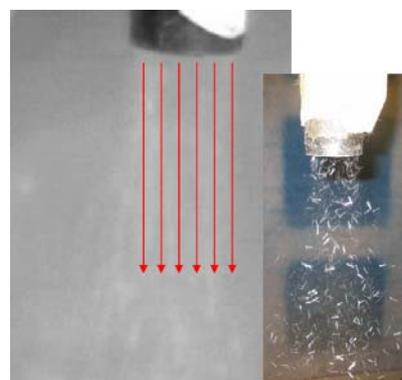


Abbildung 22: Zylindrischer Austrag der Glasfasern

Durch das Einbringen der Luftdüsen konnte ein wesentlich gleichmäßigerer Glasfaseraustrag und eine verbesserte Polyurethan- Glasfaserablage erzielt werden. Zusätzlich können durch Druckminderer oder Proportionalventiltechnik verschiedene Glasmengen mit variabler Mischluft beaufschlagt werden. Der daraus entstehender leicht größerer Aufbau am Glasauslaufrohr wird bewusst in Kauf genommen.

3.1.4 Glaszuführung über PTFE-Schlauch und Rohrkonstruktion

Die bisherigen Versuche zeigten, dass die geschnittenen Glasfasern am besten über einen Schlauch mit Teflonseele zum Glasrohr transportiert werden, um keine Störkanten im Transportsystem zu haben. Aufgrund der teilweise komplizierten Geometrien verschiedener Testwerkzeuge musste jedoch im Mischkopfbereich ein flexibler Spiralschlauch verwendet werden (Abbildung 23). Im unteren Austragsbereich und bei mittelschnellen Roboterbewegungen erwies sich der flexible Spiralschlauch als praktikabel und fand zunächst permanenten Einsatz. Bei höheren Glasmengen und sehr schwierigen Bauteilgeometrien wurde jedoch erkannt, dass sich bei dem flexiblen Spiralschlauch aufgrund der spiralförmigen Innengeometrie und der starken Beulung des Spiralschlauchs (Abbildung 24) zahlreiche Störkanten bilden. Diese wiederum beeinflussen den luftunterstützten Flug des geschnittenen Glases in negativer Weise.



Abbildung 23: Flexibler Spiralschlauch



Abbildung 24: Knicken des Spiralschlauchs

Dies führte zur Konstruktion und Fertigung einer neuen Rohrleitung und eines Linearsystems. Das aus Edelstahl gefertigte Rohr und das Schlittensystem bewirken, dass das Glas so reibungsfrei wie möglich transportiert und zusätzlich die Roboterbewegungen ausgeglichen werden. Abbildung 25 zeigt die Konstruktion, die Abbildung 26 bis Abbildung 28 stellen einige Roboter-Freiheitsgrade dar.

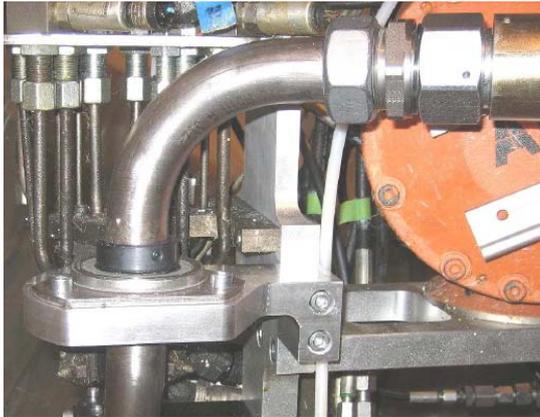


Abbildung 25: Konstruktion der Rohrleitung

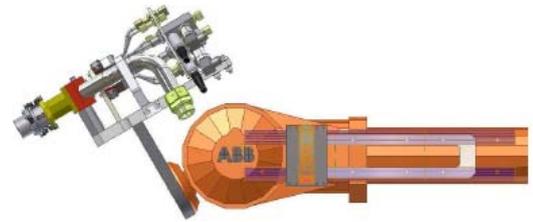


Abbildung 26: Freiheitsgrade Roboter

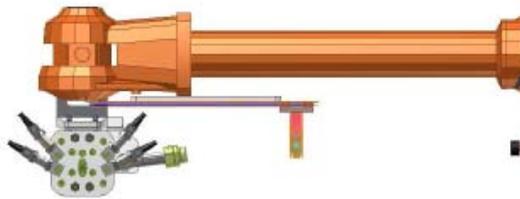


Abbildung 27: Freiheitsgrade Roboter

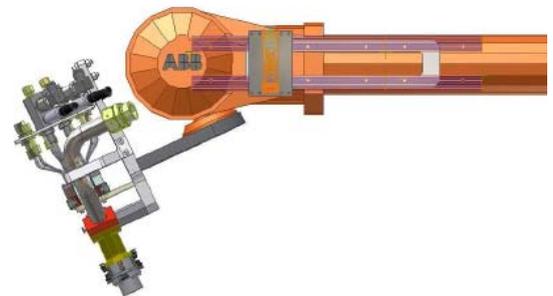


Abbildung 28: Freiheitsgrade Roboter

In Abbildung 29 ist das Linear-Schlitten-System, mit welchem die Freiheitsgrad ausgeglichen werden dargestellt. Der PTFE-Schlauch wird entlang der vierten Roboterachse mitgeführt. Die Glasfasern werden auf diese Weise möglichst störfrei vom Schneidwerk zum Glasrohr transportiert.



Abbildung 29: Linear-Schlitten-System an der vierten Roboterachse

3.1.5 Serientaugliche Gesamtkonstruktion

Um zukünftig die komplette Prozess-Teilbaugruppe, bestehend aus Mischkopf und Glasrohr serientauglich und reproduzierbar zu fertigen, wird eine neue Glasrohr-

konstruktion angefertigt. In Abbildung 30 ist zu erkennen, dass die bisherige Baugruppe, aus zwei verschweißten Rohren und seitlich angebrachten Bohrungen für die Mischluft (1) und die Zerstäuberluft (2) besteht. Abbildung 31 zeigt die neue Konstruktion, die aus einem Block (3) gefräst und mit einem Ring (4), der die Mischluft in den Glaskanal einleitet. Die Zerstäuberluft (5) wird separat eingespeist. Auf diese Weise ist die Herstellung der Baugruppe serientauglich und reproduzierbar.

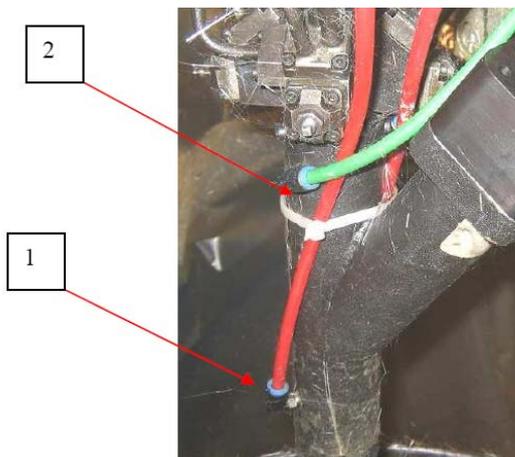


Abbildung 30: Baugruppe Mischkopf

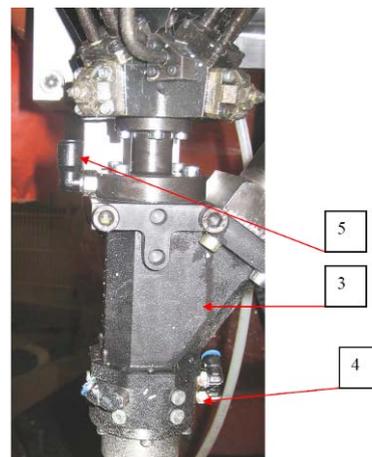


Abbildung 31: Neue Baugruppe Mischkopf

3.2 Versuchswerkzeug

(Jan Kuppinger)

In Abstimmung zwischen WFS Sontra GmbH (bis zur Insolvenz), KraussMaffei Technologies GmbH und dem Fraunhofer ICT wurde ein Werkzeugkonzept zur Herstellung generischer Sandwichstrukturen und Versuchsplatten erstellt. Diese Werkzeugkonstruktion ermöglicht es über Inlay und Rahmeneinsätze verschiedene Versuchseinstellungen abzubilden. So können damit in der Höhe variable Sandwichstrukturen und Probeplatten hergestellt werden.

Maßgebend für die Geometrie eines Formbauteils ist die Auslegung der Kavität. Bei dem in Abbildung 32 ersichtlichen Werkzeug trägt der Stempel die Positivform der Kavität, die Matrize enthält die Negativform.

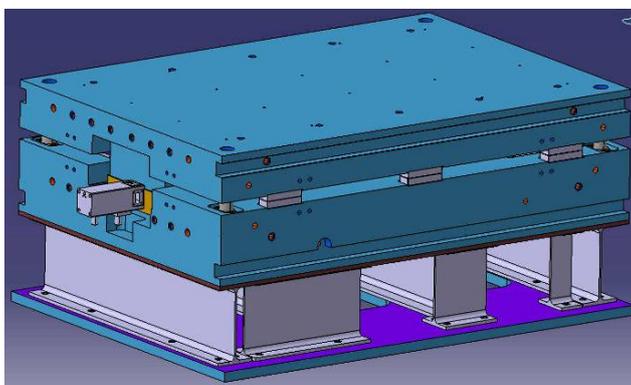


Abbildung 32: 3-D- Konstruktion des Werkzeugs

Abgestimmt auf deren Randbedingungen, wie z.B. der maximalen Presskraft, der Aufspannfläche und der maximalen Schließgeschwindigkeit wurde das, in Abbildung 32 dargestellte Sandwich-Presswerkzeug, mit einem Innenmaß von 1000 mm x 650 mm konstruiert. Zur Temperierung des Werkzeugs verfügen Stempel und Matrize über zwei getrennte Öltemperierkreisläufe.

Bei diesem Sandwich-Presswerkzeug, ergibt sich bei maximaler Betriebskraft der Presse von 600 kN und den Werkzeuginnenmaßen ein entsprechender Wert für den spezifischen Werkzeuginnendruck von $0,925 \text{ N/mm}^2$. Aufgrund der unterschiedlichen Viskosität sind spezifische Drücke für das Pressen erforderlich.

Obere Werkzeughälfte

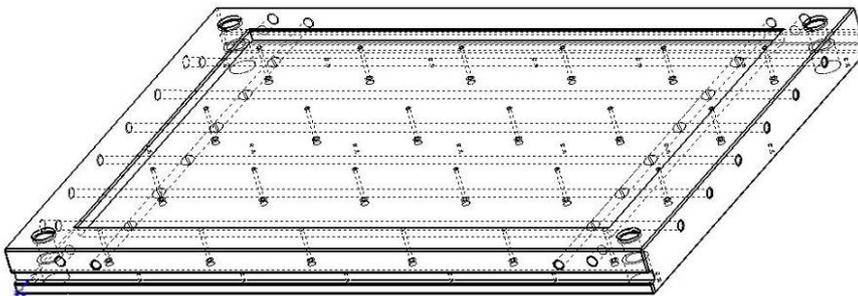


Abbildung 33: Obere Werkzeughälfte

Die obere Werkzeughälfte des Sandwich-Presswerkzeugs ist die positive Form (Abbildung 51). Darin vorgesehen sind Temperierungskanäle um den Stempel auf die gewünschter Temperatur zu erwärmen. Seitlich in Längsrichtung sind Befestigungsnuten angebracht. Diese dienen dazu, das Sandwich-Presswerkzeug mittels Spannpratzen am Formträger zu befestigen. Ebenfalls sind Bohrungen für die Führungssäulen eingeplant, die die genaue Führung des Werkzeugs gewährleisten sollen. Um die gewünschte Sandwichform zu erhalten, sind für die obere Werkzeughälfte verschiedene Stempel verfügbar.

Untere Werkzeughälfte

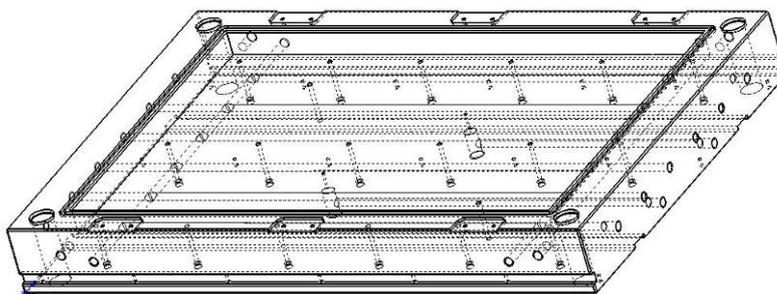


Abbildung 34: Untere Werkzeughälfte

Die untere Werkzeughälfte des Sandwich-Presswerkzeugs ist die negative Form (Abbildung 52). In ihr sind mehrere Kanäle vorgesehen. Diese dienen der Temperierung der Kavität, beziehungsweise zum Auswerfen des Bauteils mittels Druckluft. Des Weiteren sind ebenfalls Nuten für die Befestigung des Werkzeugs und

eine sichere Verlegung der Sensor-Kabelstränge vorgesehen. Für die Führungsbuchsen sind Bohrungen angebracht worden um die Parallelität des Stempels zu gewährleisten. Ebenfalls sind im unteren Werkzeug Befestigungsbohrungen für zwei Druck-Temperatur Sensoren integriert.

Rahmenvarianten

In dieser Konstruktion wurde berücksichtigt, dass durch das Montieren unterschiedlich ausgelegten Rahmen-Varianten, verschiedene Plattengrößen, Plattengeometrien und Plattenstärken hergestellt werden können (Abbildung 53). Alle Rahmen-Varianten sind so dimensioniert, dass sie mittels Innensechskantschrauben am unteren Inlay fixiert werden können.

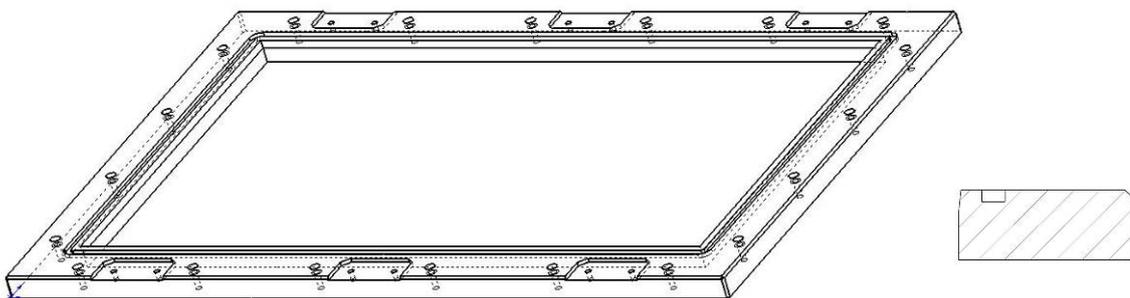


Abbildung 35: Beispiel einer Rahmenvariante

Inlay-Varianten

Der Einsatz der Inlay-Platten in die Kavität dient der Formgebung des Pressteils (Abbildung 54). Sie kann je nach Variation mit oder ohne Rahmen eingesetzt werden. In jedem Inlay sind Durchgangsbohrungen für die Sensoren und Luftauswerfer vorgesehen. Deren Anordnung ist so konstruiert, dass die Temperierung nicht beeinflusst wird. Die Inlays werden mittels Innensechskantschrauben rückseitig befestigt. Um den Ein- und Ausbau zu erleichtern sind die Inlayplatten mit einer Formschräge versehen.

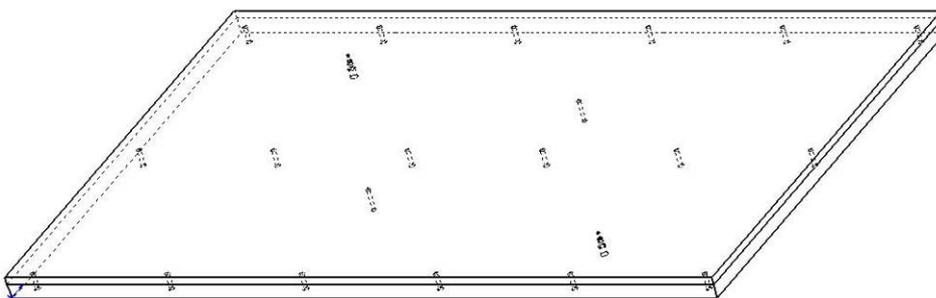


Abbildung 36: Beispiel eines Inlays

Stempel-Varianten

Entsprechend der Inlay- oder Rahmen-Variante, muss der Stempel angepasst werden. Um den Einlauf in die Kavität ohne Beschädigung zu gewährleisten, sind alle Stempel-Varianten mit einer Formschräge versehen. Ebenfalls sind alle Stempel-Varianten mit

Gewindebohrungen versehen, um die Stempel mittels Innensechskantschrauben an die obere Werkzeughälfte zu befestigen. Demnach wurde passend zum Inlay-beziehungsweise der Rahmen-Varianten ein zusätzlicher Stempel konstruiert.

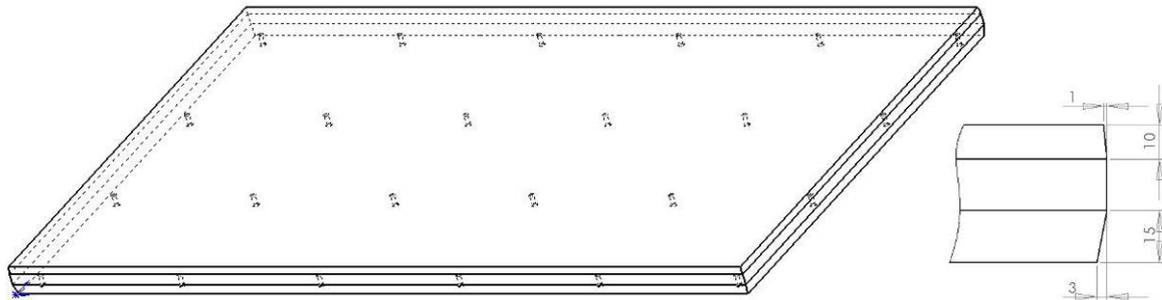


Abbildung 37: Stempel-Variante 1

An diesem Stempel ist zusätzlich noch eine Formschräge angebracht, um den Ein- und Ausbau zu erleichtern. Er besitzt eine Fläche von 1000 mm x 650 mm mit den Formschrägen von 3 mm x 15 mm Kavitätsseitig und 1 mm x 10 mm Werkzeugseitig (Abbildung 37). Die Fertigung des Werkzeugs erfolgte durch die Firma KraussMaffei und wurde dem Fraunhofer ICT zur Verfügung gestellt.

3.3 Ablegeeinheit für Endlosfaserstrukturen

(Jan Kuppinger, Alexander Ochs)

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Herstellung gewichts- und kostenoptimierter Leichtbauteile auf Polyurethanbasis, deren Materialaufbau den entsprechenden Bauteilbelastungen und den zu integrierenden Funktionen angepasst ist. Zu diesem Zweck ist eine Einheit zum gezielten Ablegen von Endlosfasern in Verbindung mit dem Polyurethan Fasersprühen entwickelt worden [Kup-12].

3.3.1 Vorgehensweise

Zur Problemeingrenzung, Lösungsfindung und um eine reproduzierbare Bauteilqualität zu erreichen, wurde in Workshops mit dem Fraunhofer ICT, dem -wbk- Institut für Produktionstechnik und der Firma KraussMaffei eine ausführliche Funktionsanalyse vorgenommen. Dabei wurden vier Funktionen mit dem größten wissenschaftlichen und technischen Potenzial identifiziert, welche in die Einheit integriert werden müssen (Abbildung 38).

Für die sichere Einbettung der Faser in die Bauteilstruktur muss zunächst eine gute Faserbenetzung mit Polyurethan sichergestellt werden. Zur Steigerung der Ablegeleistung sollen zukünftig zudem mehrere Einheiten miteinander gekoppelt werden, daher müssen variable Austragggeschwindigkeiten realisiert werden. Besonders beim Verlegen komplexer Geometrien, wie beispielsweise von Radien, hat diese Funktion eine zentrale Rolle. Am Ende einer gelegten Bahn muss die Faser definiert abgeschnitten werden. Um zu verhindern, dass am Ende eines Ablegevorgangs Polyurethanreste in der Einheit zurückbleiben und aushärten soll eine Reinigungsfunktion integriert werden

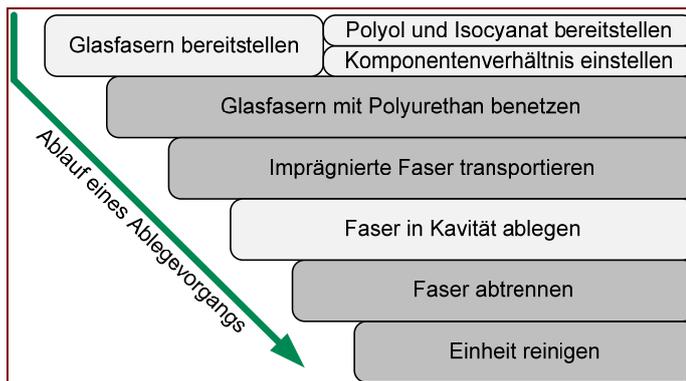


Abbildung 38: Schematische Darstellung eines Ablegeprozesses

Zu diesem Zweck wurden kleinere Versuchsstände konstruiert und prototypisch aufgebaut. Im Folgenden werden die durchgeführten Versuche und die Ergebnisse zum Fasertransport, zum Imprägnieren der Faser, zum Trennen der Faser sowie zum Reinigungskonzept der Einheit vorgestellt.

A - Versuchsaufbau: Glasfasern mit Polyurethan imprägnieren und Transport der Fasern mittels Impulsübertragung

Als erstes Verfahren für den Transport der Fasern wurde das Prinzip der Impulsübertragung ausgewählt. Für diesen Versuchsaufbau wurde ein Baukastenprinzip gewählt (siehe Abbildung 39). Durch dieses Prinzip konnten neben dem Einspritzwinkel α (Bauteil E) und dem Querschnitt der Durchgangsbohrung (Bauteil A, B und D) auch der Querschnitt der Düse (Bauteil F) sowie der Verdüsungsdruck des zugeführten Fluids variiert werden. Mit Hilfe des in Abbildung 39 dargestellten Versuchsaufbaus konnte nachgewiesen werden, dass eine Glasfaser mit Hilfe der Impulsübertragung transportiert werden kann.

Mit Wasser als Versuchsmedium und einem anliegenden Verdüsungsdruck von 8 bar konnte gezeigt werden, dass Kräfte von ca. 0,6 N auf die Faser wirken (siehe Abbildung 40). Anschließend wurden die Versuche mit höherviskosen Medien wie Speiseöl (Viskosität ca. 70 mPa*s) sowie mit Polyol als Versuchsmedien erweitert.

Aus Abbildung 40 ist ersichtlich, dass die übertragbaren Kräfte mit zunehmender Viskosität sinken. Diese Tendenz bestätigten die Versuche mit Polyol. Um diesen Effekt entgegenzuwirken wurden weitere Versuchsreihen mit einer deutlichen Erhöhung des Verdüsungsdrucks durchgeführt.

Um den geforderten Faser-Volumengehalt zu erhalten, wurde der Volumenstrom des Fluids der Austrittsgeschwindigkeit der Faser angepasst. Um die Faser mittels Impulsübertragung zu transportieren, mussten daher hohe Drücke bei gleichzeitig niedrigen Düsenquerschnitten realisiert werden. Aufgrund der Anhaftung der Faser an der Seitenwand der Einheit war jedoch eine konstante Austrittsgeschwindigkeit der Faser nur schwer zu realisieren. Des Weiteren war ein Rückfluss des Matrixmaterials entgegen die Bewegungsrichtung der Faser zu beobachten.

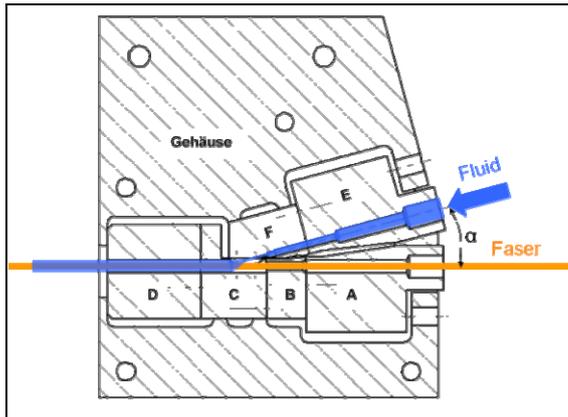


Abbildung 39: Versuchsaufbau zum Transportieren und Imprägnieren

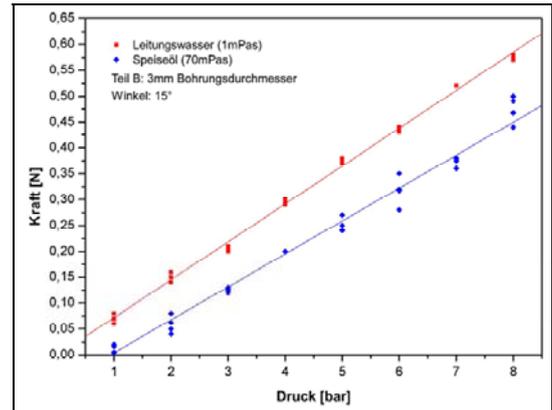


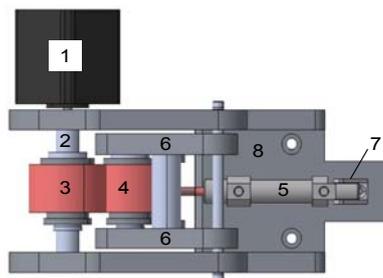
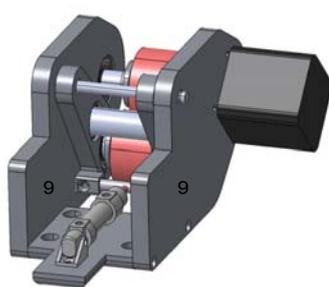
Abbildung 40: Mittels Impulsübertragung übertragbare Kräfte

Ergebnis zum Transport der Fasern mittels Impulsübertragung

Es wurde gezeigt, dass eine Glasfaserförderung durch Impulsübertragung prinzipiell realisiert werden kann. Die übertragbaren Kräfte sind jedoch sehr klein und eine Steuerung bzw. Regelung der Ablegegeschwindigkeit der Glasfaser ist nur bedingt bzw. mit sehr hohem Aufwand realisierbar. Daher wurde dieser Ansatz verworfen und die Funktionen „Imprägnierung“ und „Transport“ der Glasfaser voneinander getrennt.

B - Versuchsaufbau: Fasertransport durch Schieben

Der Fasertransport wird im betrachteten Ansatz durch gesteuertes Schieben einer Faser durch einen Führungskanal realisiert. Als Antrieb diente ein Schrittmotor, welcher variable Austragggeschwindigkeiten ermöglicht. Dazu wurde die in Abbildung 41 dargestellte Fasereinzugseinheit konstruiert, gefertigt und aufgebaut.



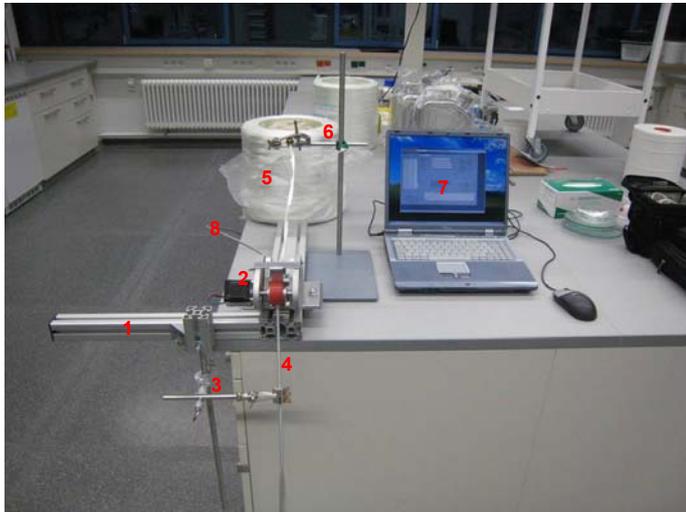
1. Schrittmotor
2. Antriebswalze
3. Angetriebene Walze
4. Anpresswalze
5. Pneumatikzylinder
6. Hebelarm
7. Lagerbock
8. Grundplatte
9. Seitenwand

Abbildung 41: Fasereinzugseinheit

Um die Wirkweise der Fasereinzugseinheit der Ablegeeinheit vorab zu untersuchen, wurde der in Abbildung 42 abgebildete Versuchstand konstruiert. Zusätzlich wurden die Auswirkungen eines Fasertransportkanals auf die Fasern betrachtet.

In verschiedenen Versuchsreihen wurde sowohl der Fasertransport durch Aluminiumrohre mit einem Innendurchmesser von 4 mm in den Längenabstufungen 10 cm, 20 cm, 30 cm und 40 cm als auch durch Messingrohre mit einem Innendurchmesser von 3 mm und denselben Längenabstufungen untersucht. Zudem

wurde bei den Versuchen der Einfluss weiterer Faktoren, wie z.B. die Transportgeschwindigkeit, die Anfahr- und Abschaltbedingungen sowie der unterschiedlichen Beschleunigung der Faser auf den Fasertransport untersucht. Die bei den Versuchen verwendeten Glasfasern hatten 4800 tex, was einem Gewicht von 4800 g pro Kilometer Faser entspricht.



1. Grundgerüst,
2. Fasereinzugseinheit
3. Laborstativ
4. verschiedene Rohrgeometrien
5. Glasfaser
6. Zweites Laborstativ
7. Steuerung

Abbildung 42: Versuchsaufbau Fasertransport

Für das Aluminiumrohr mit einem Innendurchmesser von 4 mm konnte für alle Rohrlängen der problemlose Fasertransport nachgewiesen werden. Des Weiteren konnte kein Einfluss der Transportgeschwindigkeit und keine Beeinträchtigung des Fasertransports durch unterschiedliche Faserbeschleunigungen als Folge der Anfahr- und Abschaltbedingungen festgestellt werden.

Der Fasertransport durch die Rohre mit einem Innendurchmesser von 3 mm war nicht erfolgreich. Die höhere Wandreibung bei reduziertem Innendurchmesser führte zu einem Ausknicken des Glasfaserrovings zwischen Transportrollen und Faserführungskanals (Abbildung 43).

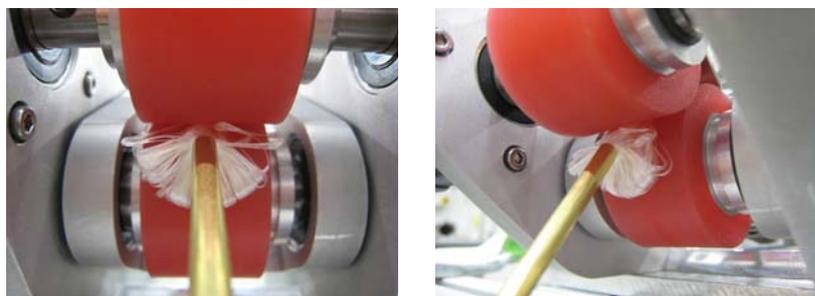


Abbildung 43: Probleme beim Fasertransport mit 3 mm-Rohr

Um dieser Problematik zu begegnen, wurde ein Adapter konstruiert, welcher den kritischen Bereich zwischen der Rohröffnung und den Transportwalzen der Fasereinzugseinheit überbrückt. Zudem soll durch den trichterförmigen Zulauf Abbildung 44 (1)

im Adapter ein Verhaken und Aufbauschen der Glasfaser am Rand des Rohres vermieden werden.

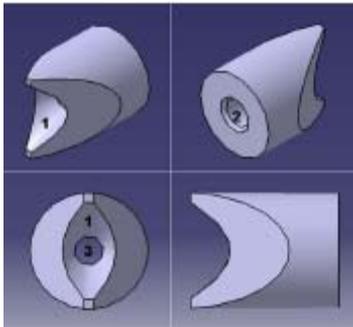


Abbildung 44: Adapter

Ergebnis: Fasertransport durch Schieben

Mit Hilfe des Adapters ist es gelungen einen erfolgreichen Fasertransport sowohl durch das Rohr mit 4 mm als auch durch das Rohr mit 3 mm Innendurchmesser zu realisieren. Ein Ausknicken der Faser könnte über die Stützwirkung des Rohres erfolgreich verhindert werden. Zudem konnte mit Hilfe dieser Maßnahme für beide Durchmesser ein reproduzierbarer Fasertransport sowie regel- und steuerbarer Transportgeschwindigkeiten von bis zu 12 m/min erreicht werden.

C - Imprägnierung der Faser

Die Umstellung des Konzepts und der damit verbundenen Trennung der Funktionen von Fasertransport und Faserimprägnierung führte zu einer größeren Flexibilität hinsichtlich der Düsengeometrie und der Düsenauswahl. In ersten Schritten wurden in Versuchsreihen der geeignete Düsendurchmesser und die optimale Verdünnungsgeometrie für eine störungsfreie Durchdringung der Glasfaser mittels eines hochviskosen Polyols untersucht.

Hierzu wurde ein Versuchsstand aufgebaut und mittels der ausgewählten Düsenkonfiguration der Einfluss unterschiedlicher Aufsprühwinkel auf das Transportverhalten und die Imprägniergüte der Faser untersucht (Abbildung 45).

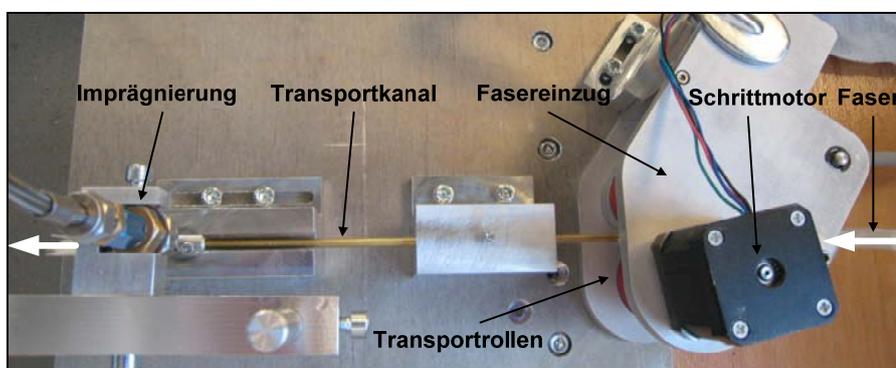


Abbildung 45: Versuchsaufbau zum Transport und Imprägnierung der Glasfaser

Ergebnis: Imprägnierung der Faser

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass der Fasertransport durch das Aufsprühen von Material nicht beeinflusst wird. Daher wurde von den Partnern KraussMaffei, dem Fraunhofer ICT und dem -wbk- Institut für Produktionstechnik beschlossen, dieses Konzept in die prototypische Ablegeeinheit zu integrieren.

D - Trennen der Faser

Eine weitere wichtige Funktion beim gezielten Ablegen von Endlosfasern ist ein sicheres Abtrennen der Glasfasern sowie die Vermeidung von Faserschädigungen. Um zu untersuchen, wie Glasfasern definiert abgetrennt werden können, wurde ein Versuchsstand, wie in Abbildung 46 dargestellt, aufgebaut. Mit diesem Versuchsaufbau konnten unterschiedliche Messertypen, Faserfixierungen sowie diverse Schnittunterlagen getestet werden.

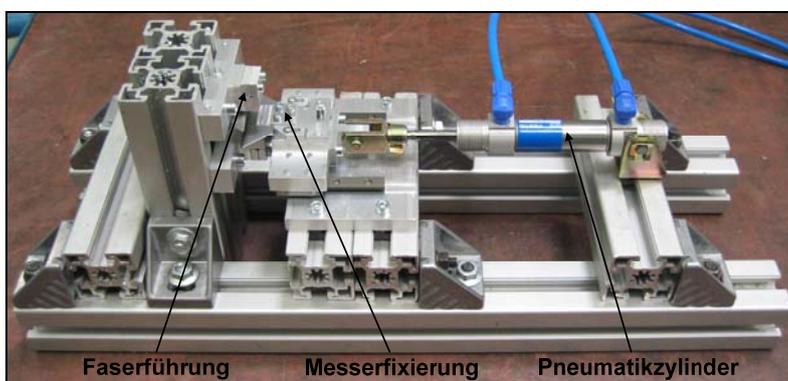


Abbildung 46: Versuchsaufbau zum Abtrennen von Glasfasern

Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen aufgelistet.

Ergebnisse Trennen der Faser

Faser abtrennen

- ***Schneiden ohne Fixierung der Faser***

Die Glasfasern konnten mit diesem Verfahren nicht getrennt werden. Durch die Vorschubbewegung des Messers wurde der Glasfaseroving aus der oberen und unteren Faserführung herausgezogen. Dies führte dazu, dass dieser vom Messer weggebogen wurde und dadurch nicht getrennt werden kann. Sowohl eine Änderung des Schnittwinkels des Messers als auch eine Verringerung des Schnittspalts führten zu keinem Trennergebnis.

- **Schneiden mit einseitiger Fixierung der Glasfasern**

Die Glasfasern konnte durch eine einseitige Fixierung nicht getrennt werden. Die Fasern wurden zwar an der oberen Faserführung fixiert, jedoch beim Trennversuch aus der unteren Faserführung herausgezogen, sobald das Messer den Roving berührte. Die Glasfaser bog sich um das Messer und wurde nicht getrennt. Eine Veränderung des Schnittspalts und eine Vergrößerung des Schnittwinkels führten ebenfalls nicht zum Trennen der Glasfasern.

- **Schneiden mit beidseitiger Fixierung der Glasfasern**

Eine beidseitige Fixierung der Glasfaser im Schnittbereich führte zu einem eingeschränkten Trennergebnis. Durch diese Anordnung konnten einzelne Filamente, jedoch nicht der gesamte Roving getrennt werden. Die Faser wurde beim Trennen aus dem Bereich der Einspannung herausgezogen. Eine Erhöhung der Einspannkräfte führte zu Faserschädigungen im Bereich der festen Einspannung (siehe Abbildung 48).

- **Abscheren der Glasfasern**

Bei dieser Versuchsanordnung wurden lediglich teilweise Trennergebnisse erzielt. Bei einem Schnittwinkel von 0° wurden die Glasfasern aus ihrer Fixierung herausgezogen und legt sich um das Messer. Durch eine Vergrößerung des Schnittwinkels auf 45° kam es zum Abtrennen einiger Filamente. Die gesamten Glasfasern wurden jedoch bei keinem Versuch vollständig getrennt (siehe Abbildung 48).

- **Knicken der Glasfasern**

Die besten Ergebnisse wurden mithilfe eines beweglichen Messers und einer festen Unterlage erzielt. Bei dieser Versuchsanordnung wurden die Glasfasern durch das Ausbilden eines Keilspalts in der Unterlage (siehe Abbildung 47) mit Hilfe des Messers abgknickt. Aufgrund der sehr guten Trennergebnisse wurde dieses Trennverfahren im Folgenden näher untersucht.

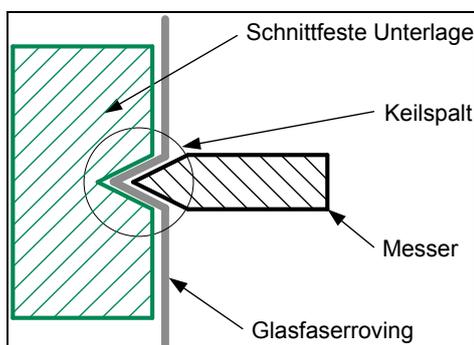


Abbildung 47: Abknicken der Glasfasern

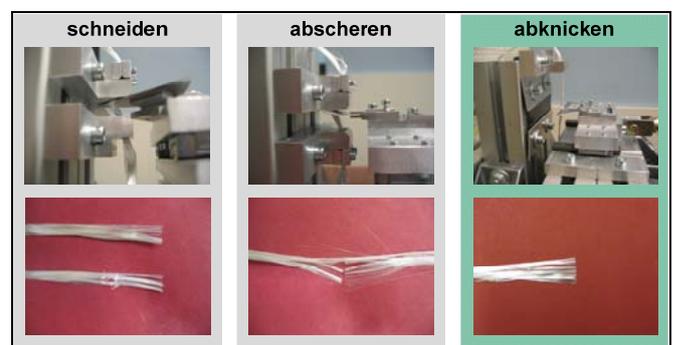


Abbildung 48: Trennergebnisse der Glasfasern

Ziel der weiterführenden Untersuchungen waren eine geeignete Paarung zwischen Messer und Unterlage zu finden, welche eine lange Standzeit erreicht. Insgesamt wurden sechs unterschiedliche Unterlagen und zwei Messer getestet. Vier dieser

Unterlagen bestanden aus Kunststoff, die sich jeweils in ihrer Härte unterschieden. Zum Einsatz kam zudem eine schnittfeste Kunststoffunterlage, die bereits im Bereich der LFI- Schneidwerke eingesetzt wird. Zusätzlich wurden Unterlagen aus Stahl und Aluminium getestet. Des Weiteren wurden Glasfasern mit und ohne Schlichte getestet. Um die zum Abtrennen einer Glasfaser erforderlichen Schnittkräfte zu ermitteln, wurde der Druck des Pneumatikzylinders variiert und somit auf die erforderlichen Kräfte zurückgerechnet. Die besten Ergebnisse wurden mit den weicheren Kunststoffunterlagen erzielt. Die Fasern wurden durch einen Hub der Pneumatikzylinder definiert abgetrennt. Mit diesem Verfahren konnte komplett auf eine feste Einspannung der Fasern verzichtet werden, so dass keine Faserschädigungen zu beobachten waren.

3.3.2 Konzeption der Sprüheinheit

Auf Basis der durchgeführten Voruntersuchungen und den daraus erarbeiteten Ergebnissen ist ein Konzept der Ablegeeinheit entwickelt worden. Das Gesamtkonzept ist in Abbildung 49 dargestellt. In die Einheit wurden alle zuvor aufgeführten Funktionen integriert. Neben dem Transport der Glasfasern, einer Schneideinheit zum Abtrennen der Faser sowie einem Bereich zur Imprägnierung, wurde beim Gesamtkonzept ein geeignetes mechanisches Reinigungskonzept vorgesehen. Der Transport der Faser erfolgt mit Hilfe von Transportrollen, welche die Faser durch den Transportkanal der Ablegeeinheit schiebt. Die Imprägnierung erfolgt am Ende der Ablegeeinheit, so dass das Abtrennen der Faser im trockenen Zustand erfolgen kann. Auf die Konzeption der einzelnen Funktionen wird im Folgenden genauer eingegangen.

- **Faser transportieren**

Der Transport der Glasfasern wird durch zwei angetriebene Rollen realisiert. Dabei wird die Faser durch einen Transportkanal geschoben.

- **Faser abtrennen**

Die Vorversuche haben gezeigt, dass Glasfasern geknickt werden müssen. Die erarbeiteten Erkenntnisse wurden im Konzept berücksichtigt. Die Schneideinheit besteht aus einem Messer und einer schnittfesten Unterlage, deren Kombination eine lange Standzeit garantiert. Die Faser wird im unbenetzten Zustand abgetrennt, wodurch eine Reinigungsfunktion für die Schneideinheit entfällt. Der zum Abknicken der Fasern benötigte Freiraum wird durch ein Aufschieben des Transportkanals realisiert (siehe Abbildung 50). Die dafür benötigte Aufschiebewegung des Kanals soll zusätzlich zur Reinigung des Imprägnierbereichs der Einheit verwendet.

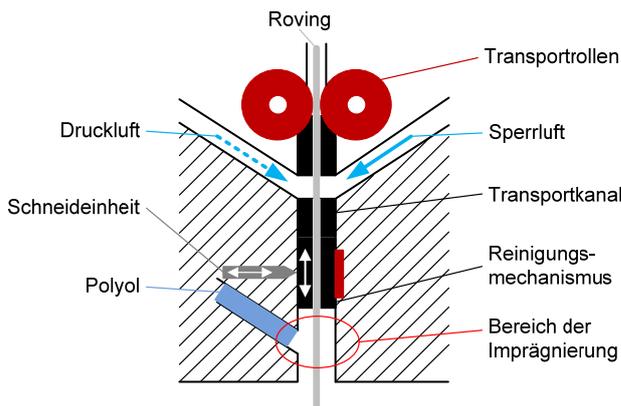


Abbildung 49: Gesamtkonzept der Ablegeeinheit

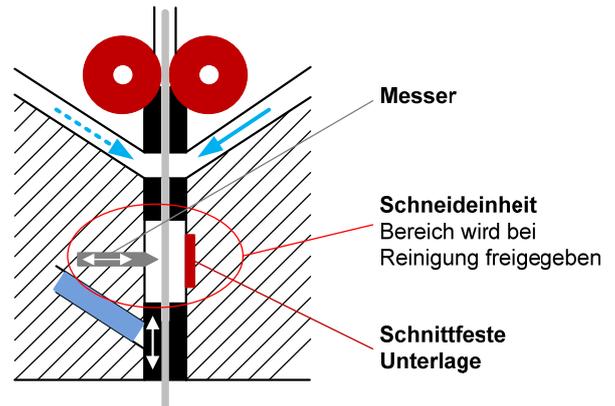


Abbildung 50: Integrierte Schneideinheit

• **Faser benetzen**

Die Benetzung der Faser findet am Ende der Einheit statt. Ziel war es, verschiedene Verdüsunggeometrien bzw. verschiedene Mischkopfbauarten zu integrieren um auf diese Weise die Imprägniergüte der Fasern beeinflussen zu können. In Abbildung 51 sind verschiedene Sprühdüsen bzw. Sprühgeometrien dargestellt.

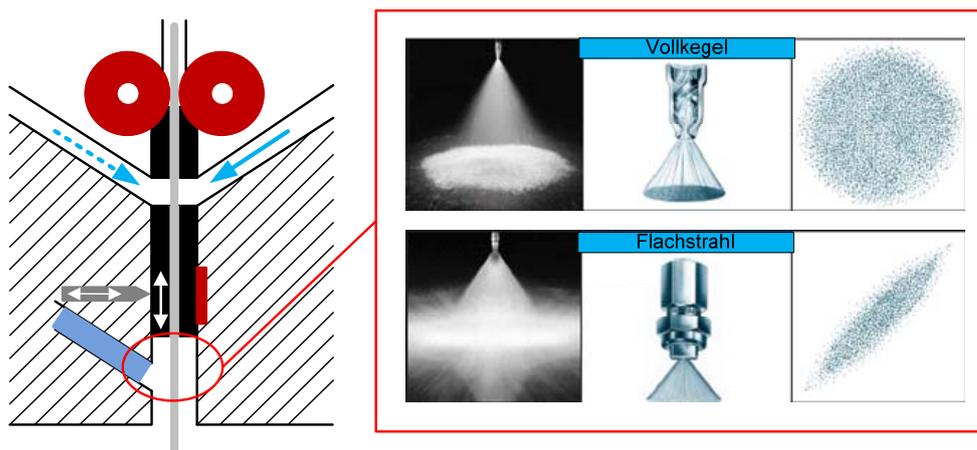


Abbildung 51: Verschiedene Verdüsunggeometrien

• **Einheit reinigen**

Um das Polyurethan-Restgemisch zu entfernen, ist ein mechanisches Reinigungskonzept (siehe Abbildung 52) in die Einheit integriert. Dabei wird das Restgemisch durch einen Kolben, welcher gleichzeitig als Transportkanal dient, ausgestoßen. Zum Abtrennen der Faser wird lediglich ein kleiner Bereich freigegeben. Diese Bewegung wird genutzt, um das Polyurethan aus der Kammer auszustoßen. Zusätzlich werden mit Hilfe von Druckluft Reste des Gemisches aus dem Faser-Transportkanal ausgeblasen. Am Ende einer gelegten Bahn bzw. jedes mal wenn eine Faser abgetrennt wird, wird daher automatisch ein Reinigungszyklus ausgeführt.

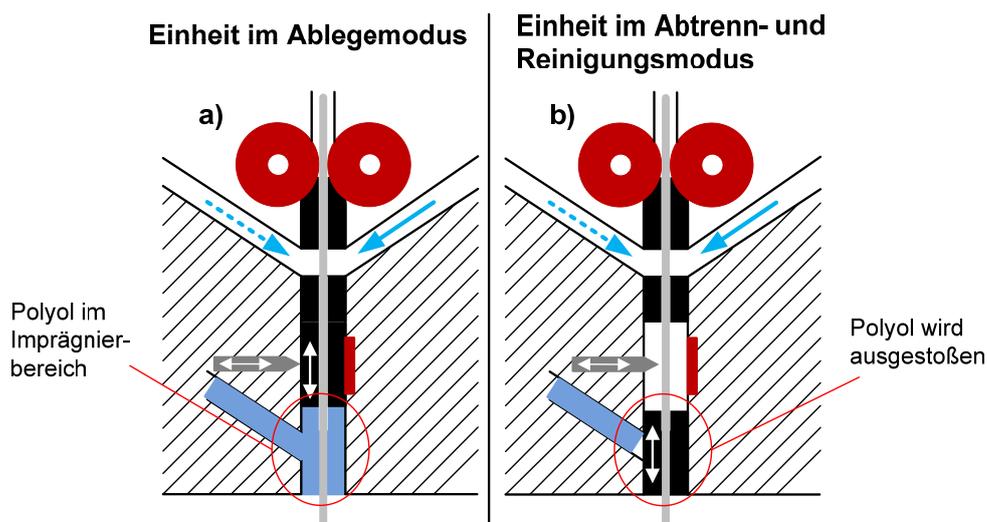


Abbildung 52: Einheit beim Ablegen der Endlosfaser.

a) Der Transportkanal bleibt beim Imprägnieren der Fasern geschlossen; die Faser wird durch die Einheit geschoben. Sperrluft verhindert einen Rückfluss des Polyurethans durch den Transportkanal.

b) Zum Abtrennen, bzw. zum Abknicken der Faser muss ein Bereich für das Messer freigegeben werden. Beim Aufschieben des Freiraumes soll der Kolben dazu genutzt werden, das Restgemisch aus der Einheit zu schieben. Eine zusätzliche Druckluftunterstützung soll die Reste des Gemisches entfernen, welche sich im Faser-Transportkanal befinden.

Auf Basis der erarbeiteten Konzepts wurde ein Ablegeeinheit konstruiert und als Prototyp umgesetzt. Da die Einheit auch für komplexere Ablegegeometrien zum Einsatz kommen sollte, wurde eine geringe Störkontur angestrebt. Somit ergaben sich die maximalen Abmessungen der Einheit inklusive der Ansteuertechnik von $[L \times B \times T] = 310 \times 250 \times 320 \text{ mm}^3$

3.3.3 Konstruktion der Sprüheinheit

In Abbildung 53 ist links das Konzept und rechts ein Schnitt der umgesetzten Ablegeeinheit ersichtlich. Wie bereits in der Konzeptionsphase erläutert, erfolgt der Transport der Fasern über zwei angetriebene Rollen. Der Vorschub ist mit einem Schrittmotor realisiert.

Die Fasern werden durch einen Transportkanal geschoben. Dieser verhindert ein Ausknicken der Fasern und ermöglicht somit den Transport durch Schieben. Der Transportkanal wurde zweiteilig aufgebaut. Durch ein automatisiertes Aufschieben des Kanals wird ein Freiraum freigegeben, welcher zum Abtrennen der Glasfasern im trockenen Zustand genutzt wird. Als Trennmethode wurde das erfolgreich getestete Konzept des „Knickens“ integriert.

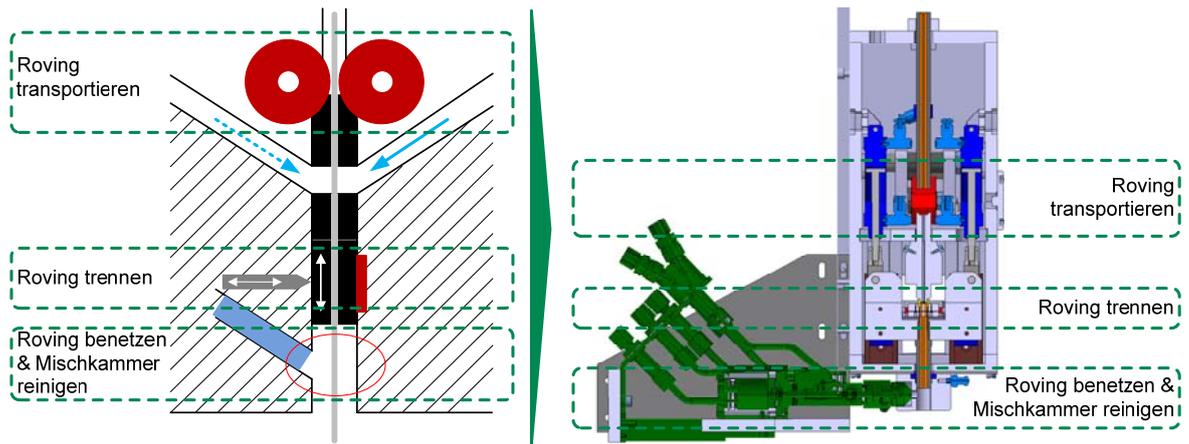


Abbildung 53: Konzept und CAD-Konstruktion

Eine erfolgreiche Integration von Endlosglasfasern in eine Bauteilstruktur wird entscheidend von der Imprägniergüte bestimmt. Ziel ist eine vollständige Infiltration der Glasfasern mit einem Polyurethan-Gemisch, d.h. die einzelnen Filamente einer Glasfaser müssen möglichst vollständig mit Matrixmaterial benetzt werden.

Die eingeleiteten Kräfte sollen im Bauteil über die verlegten Endlosglasfasern übertragen werden. Daher müssen die Fasern unter Vorspannung im Bauteil abgelegt werden. Dies führt jedoch dazu, dass sich die Filamente der Glasfaser zusammenziehen und somit eine Infiltration erschwert wird. Aus diesem Grund wurde eine direkte Imprägniermethode gewählt. Bei dieser Methode wird das Matrixmaterial mit Hochdruck vermischt. Dabei wird die Druckenergie in Mischenergie bzw. in kinetische Energie umgewandelt. Die hohe kinetische Energie soll dazu genutzt werden das Polyurethan in die Filamentstruktur zu „sprühen“.

Die Durchmischung von Isocyanat und Polyol im richtigen Verhältnis ist ein äußerst komplexer Vorgang. Das Mischungsverhältnis muss exakt eingehalten werden. Aus diesem Grund wurde auf ein vorhandenes und für diesen Zweck modifiziertes Mischkopfsystem der Firma KraussMaffei Technologies GmbH gesetzt. Dieser Mischkopf ist in grüner Farbe in Abbildung 53 dargestellt.

Die Funktionsfähigkeit der Einheit und deren Akzeptanz für industrielle Aufgaben wird wesentlich durch ein wirkungsvolles Reinigungskonzept bestimmt. Zu diesem Zweck wurde ein mechanisches Reinigungskonzept mit Druckluftunterstützung umgesetzt. Durch das Aufschieben eines Kanals, was das Abtrennen der Glasfasern ermöglicht, wird gleichzeitig das verbleibende Gemisch durch einen Reinigungsstößel aus der Mischkammer verdrängt. Mittels Druckluft können Reste des Gemisches aus dem Transportkanal und der Mischkammer entfernt werden. Gleichzeitig wird ein Rückfluss des Polyurethan-Gemisches in den Transportkanal und in Teile der Mischkammer durch Sperrluft verhindert. Zusammen mit einem chemischen Reinigungsgemisch zum Säubern des Mischkopfes, welches gleichzeitig die Mischkammer reinigt, wurde somit ein effektiver und redundanter Reinigungsmechanismus aufgebaut.

In Abbildung 54 ist die konstruierte Ablegeeinheit und die Integration des Mischkopfs sowie die Anbindung an einen Sechssachsroboter dargestellt.

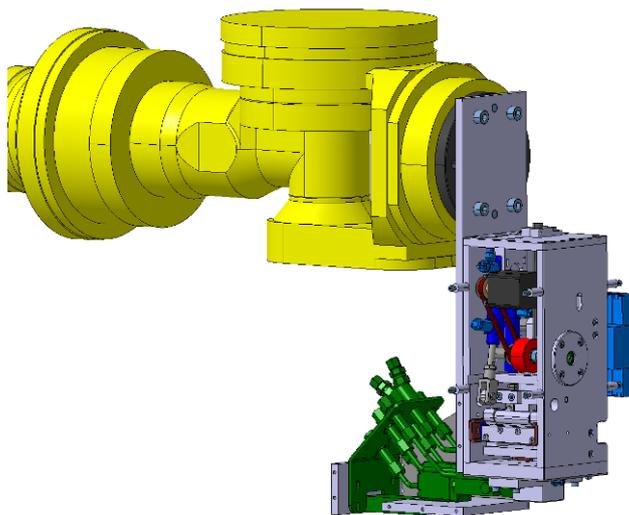


Abbildung 54: Konstruktion der Ablegeeinheit und Adaption an einen Sechssachsroboter [Kup-12]

3.3.4 Integration in die Anlagentechnik und Durchführung erster Ablegeversuche mit einem schnell reagierenden Polyurethansystem

In Abbildung 55 sind die einzelnen Entwicklungsstufen der Ablegeeinheit nochmals dargestellt. In ersten Versuchsreihen wurden die Funktionen „Faser transportieren“, „Faser trennen“ und „Einheit reinigen“ mit trockenen Fasern getestet. Nach erfolgreichem Funktionsnachweis dieser Teilfunktionen erfolgte die Kalibrierung der Einheit, d.h. die Anpassung der Austraggeschwindigkeit der Faser und der Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters. Dazu wurden die Abweichungen der abgelegten Bahn ermittelt und passende Korrekturwerte in der Schrittmotorsteuerung hinterlegt. Die Ansteuerung der Ablegeeinheit sowie der Schrittmotorsteuerung erfolgt über die Robotersteuerung. Dazu wurde ein passendes Programm geschrieben und in die Robotersteuerung integriert. Abschließend erfolgte die Adaption des Sprühmischkopfs. Dazu wurde der Mischkopf hardware- und steuerungstechnische in die Laboranlagentechnik integriert.

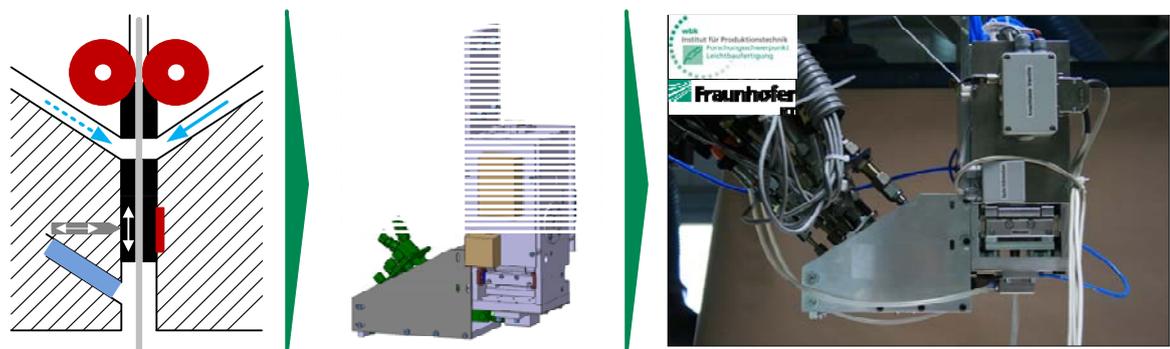


Abbildung 55: Entwicklungsstufen der Ablegeeinheit

Ergebnisse

Die Versuche wurden mit einem reaktiven Gemisch mit einer Topfzeit von 30 s gefahren. Als Matrixmaterial kam ein schnellreagierendes Polyurethansystem der Firma Bayer MaterialScience vom Typ Multitec® zum Einsatz.

Die verwendeten Glasfasern der Firma Vetrotex vom Typ 207 haben eine Garnstärke von 2400 tex, was einem Gewicht von 2400 g pro Kilometer entspricht. Abbildung 56 zeigt die Einheit beim Ablegen einer imprägnierten Faser auf einem Versuchsträger.

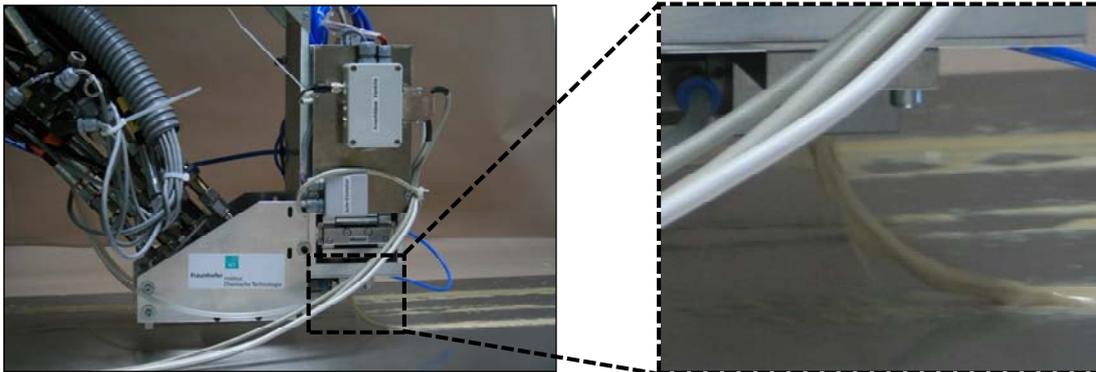


Abbildung 56: Ablegeeinheit beim Ablegen imprägnierter Endlosfasern

Die volle Funktionsfähigkeit der Einheit konnte bereits im ersten Versuch nachgewiesen werden. Das Ziel einer hohen Imprägniergüte bei gleichzeitig hohen Austragsgeschwindigkeiten konnte erreicht werden. Jedoch konnte die Austragsmenge des reaktiven Gemisches in den Versuchen aufgrund der Anlagenkonfiguration nicht unter 9 g/s dosiert werden. Dies hat dazu geführt, dass lediglich ein relativ niedriger Faser-Volumengehalt erreicht werden konnte. Das erste Ergebnis einer imprägnierten Glasfaser ist in Abbildung 57 dargestellt.



Abbildung 57: Imprägnierter 2400er TEX-Glasfaser (Vetrotex T207)

Die Imprägniergüte der abgelegten Glasfaser wurde mittels Schlibfbilder, wie in Abbildung 58 dargestellt, untersucht. In Abbildung 58 ist zu erkennen, dass die Einbettung der Fasern in die Matrix bereits sehr gut ist. Die Lufteinschlüsse im Matrixmaterial sind eine Nebenwirkung der Zerstäuberluft, wodurch Luft in die Matrix eingebracht wird. Diese Anteile können als relativ unkritisch angesehen werden. Entscheidend für die Imprägniergüte ist die Einbettung der einzelnen Filamente in die Matrixstruktur. Abbildung 58 zeigt den hohen Matrixanteil und die in der Matrix eingebettete Luft. Insgesamt kann die Imprägniergüte als sehr gut angesehen werden. Lediglich sollten die Lufteinschlüsse innerhalb der Filamentstruktur minimiert werden. Im Detailbild ist ein sehr gut imprägnierter Bereich dargestellt. In den ersten Versuchen

hat sich gezeigt, dass eine Zunahme der Zerstäuberluft kaum bzw. keinen Einfluss auf die Imprägniergüte hat.

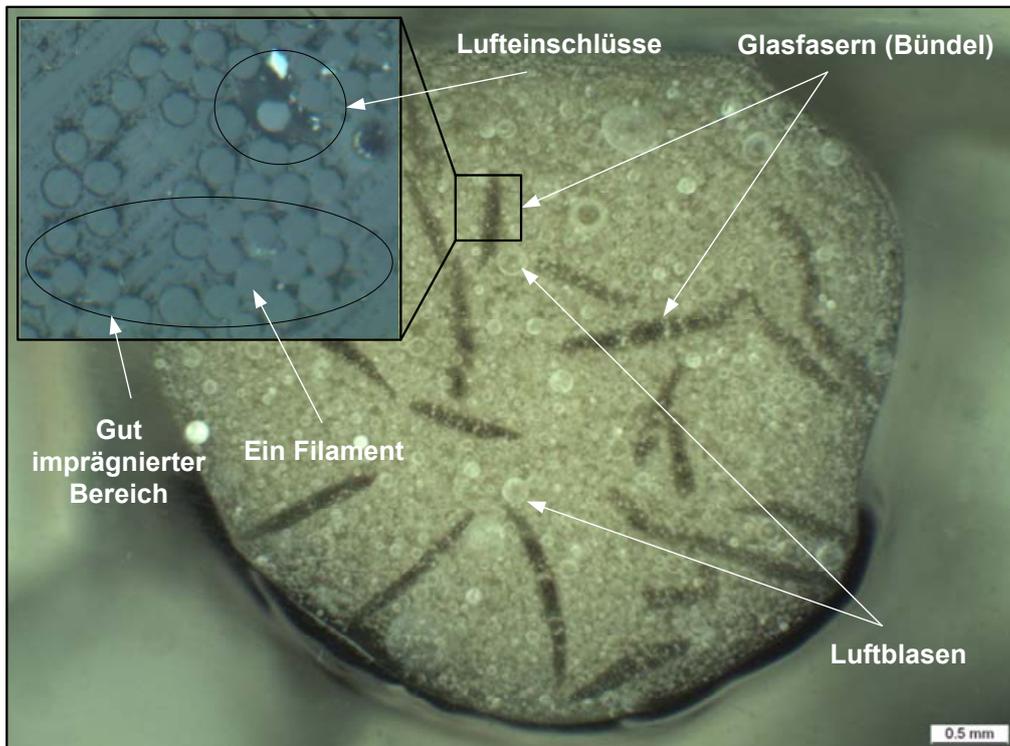


Abbildung 58: Schliffbild einer imprägnierten Glasfaser

3.3.5 Durchführung von Ablegeversuchen zur Integration in Polyurethan-Sandwichverbunde

Nach den ersten Ablegeversuchen wurde das Einbringen von Endlosfasern auf die angestrebte Sandwichbauweise untersucht. Dabei wurden prinzipiell zwei Konzepte verfolgt. Das erste Konzept sieht die Ablage von trockenen, nicht imprägnierten Glasfasern im Bauteil vor. Anschließend wird das Bauteil übersprüht und die Werkzeugform geschlossen. Die Imprägnierung der Glasfasern erfolgt dabei durch das Aufschäumen des Polyurethangemisches in die Filamentstruktur.

Das zweite Konzept verfolgt die Integration von bereits imprägnierten Fasern in das Sandwichbauteil. Die Imprägnierung erfolgt, wie bereits beschrieben, mit der aufgebauten Einheit.

Für beide Konzepte wurden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Die Validierung beider Konzepte erfolgte durch die Ermittlung der mechanischen Kennwerte der übersprühten und direkt imprägnierten Glasfasern als auch durch Untersuchungen bezüglich der Imprägniergüte mit Hilfe von Schliffbildern.

3.3.6 Herstellung der Proben

Zur Validierung der Konzepte wurden Proben mit direkter Imprägnierung als auch Proben durch Übersprühen hergestellt. Bei beiden Ablegevorgängen wurden auf einem Holzrahmen befestigte Umlenkungspunkte (Pins) umfahren und die Endlosfasern mit einer Geschwindigkeit von 220 mm/s abgelegt. Dabei ist zu Beginn des

Ablegevorgang die aus der Einheit herausragende Glasfasern am Startpunkt des Ablegevorgang manuell befestigt worden. Der Ablegevorgang der Fasern ist in Abbildung 59 schematisch dargestellt.

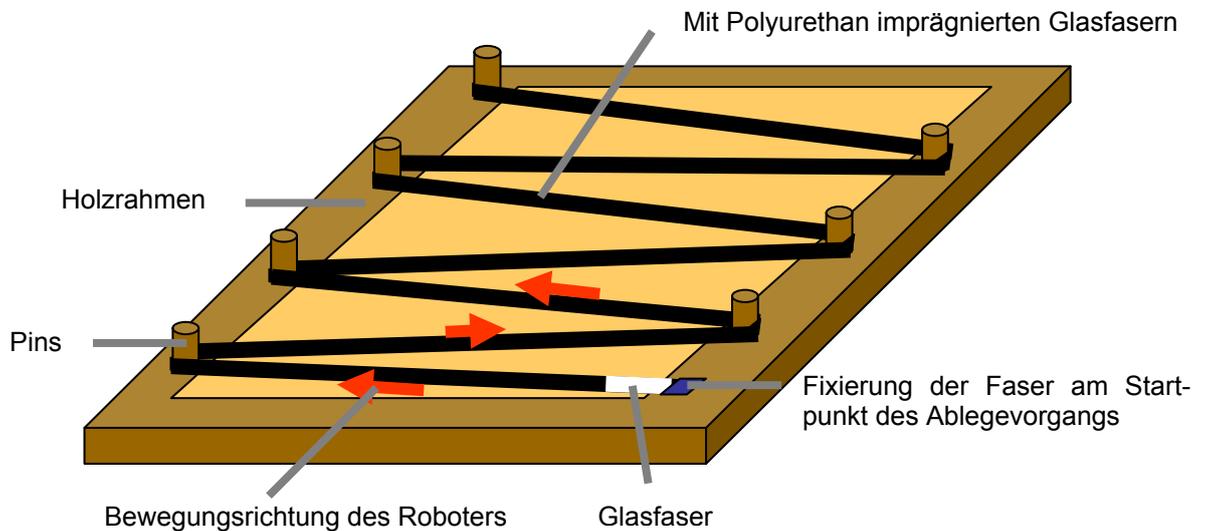


Abbildung 59: Schematische Darstellung des Ablegevorgangs [Kup-12]

Bei Proben mit direkter Imprägnierung wurde eine verarbeitungsbedingte minimale Austragsmenge zur Sprühimprägnierung von 3 g/s Polyol und 6,6 g/s Isocyanat gewählt. Nach dem Ablegen wurde der Holzrahmen inklusive der imprägnierten Glasfasern über die Werkzeugkavität gelegt, in welcher sich bereits ein Pappwabenkern befand. Anschließend erfolgte das Verpressen der Fasern. Abbildung 60 zeigt eine Aufnahme der abgelegten und verpressten Endlosfaser.



Abbildung 60: Imprägnierte Endlosfaserstränge nach dem Verpressen [Kup-12]

Bei der Herstellung der Proben durch Übersprühen wurde wie bereits beschrieben, die Fasern mit Hilfe der Ablegeeinheit um den Holzrahmen gelegt. Anschließend fuhr der Roboter die gleiche Bahn erneut ab und übersprühte die abgelegten Endlosfasern. Beim Übersprühen der Endlosfasern wurde ein Mischungsverhältnis von 7 g/s Polyol und 15,4 g/s Isocyanat verwendet.

3.3.7 Charakterisierung der abgelegten Endlosfaserstränge

Zur Charakterisierung der abgelegten direkt imprägnierten und übersprühten Endlosfaserstränge wurden Zuguntersuchungen durchgeführt sowie die Imprägnierung mittels morphologischen Untersuchungen charakterisiert. Dazu sind die Endlosfaserstränge vom Pappkernen entfernt und auf der Unterseite vorsichtig manuell mit einem Schleifpapier abgeschliffen worden. Das Abschleifen diente der Beseitigung von Unebenheiten durch das Verpressen mit dem Wabenkern.

Beispielhaft ist in Abbildung 61 links ist die Oberseite, in Abbildung 61 rechts ist die Unterseite des direkt imprägnierten Fasern dargestellt.

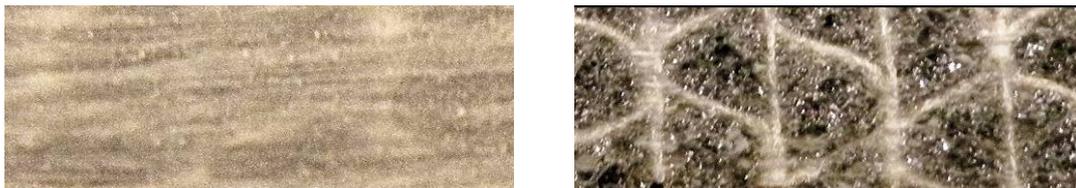


Abbildung 61: Oberseite (rechts) und Unterseite (links) der direkt imprägnierten Faser

3.3.7.1 Ermittlung des Zug-Elastizitätsmoduls der abgelegten Endlosfaserstränge

Die Bestimmung des Zug-Elastizitätsmoduls der abgelegten Endlosfasern erfolgte durch Zugversuche nach [DIN-527] an Probenkörper vom Typ A. Eine geringere Dicke der Probekörper wurde dabei akzeptiert. Zur Herstellung dieser Probenkörper wurden die glasfaserverstärkten Polyurethanstränge auf die benötigten geometrischen Abmessungen zugeschnitten. Die Ermittlung des Zug-Elastizitätsmoduls erfolgte an mindestens fünf direkt imprägnierten Proben sowie an mindestens fünf übersprühten Proben. Die Ergebnisse der Zugprüfung sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zug-Elastizitätsmoduls der abgelegten, direkt imprägnierten sowie übersprühten Faser [Kup-12]

	Faser mit direkter Imprägnierung	Faser, übersprüht mit Polyurethan
Anzahl der Proben	10	8
Zug-Elastizitätsmodul [GPa]	33,3	28,9
Standardabweichung σ [GPa]	1,70	1,89
Standardabweichung ν [%]	5,1	10,9

3.3.7.2 Ermittlung der Volumenanteile der abgelegten Endlosfaserstränge

Durch Schliffbilder und nachfolgender digitaler Bildauswertung wurden die Volumenanteile der Bestandteile Glasfasern, Polyurethanmatrix und Luftporen erfasst. Zur Auswertung wurden je Probencharge 15 Aufnahmen herangezogen. Teilweise war eine manuelle Nachbearbeitung der Proben zur Auswertung der Volumenanteile

erforderlich. In Abbildung 62 und Abbildung 63 ist die Aufnahme einer Probe vor und nach der manuellen Bearbeitung zu sehen.

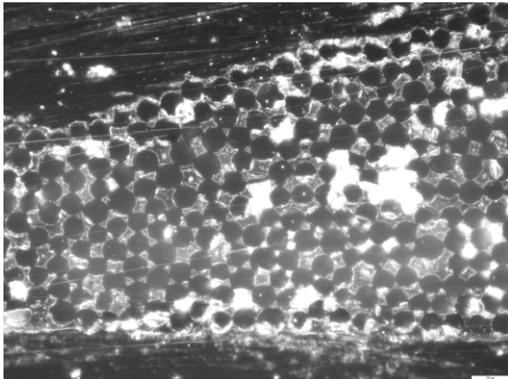


Abbildung 62: Schliffbild einer imprägnierten Faser ohne Nachbearbeitung [Kup-12]

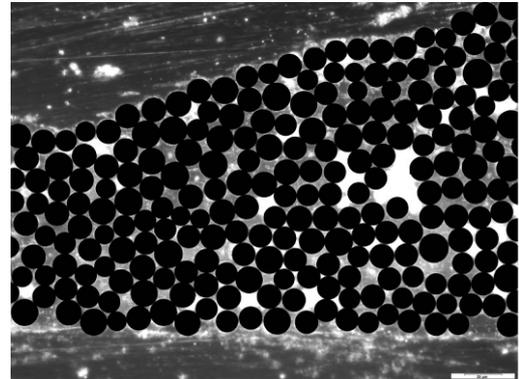


Abbildung 63: Schliffbild einer imprägnierten Faser mit Nachbearbeitung [Kup-12]

Die Mittelwerte \bar{x} der jeweiligen Gefügeanteile sowie die entsprechende Standardabweichung σ und die prozentuale Abweichung ν sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Ergebnisse der quantitativen Bildauswertung [Kup-12]

		Faser mit direkter Imprägnierung	Faser, übersprüht mit Polyurethan
Faser-anteil [%]	\bar{x}	59,91	60,53
	σ	13,08	5,62
	ν	21,83	9,28
Matrix-anteil [%]	\bar{x}	27,94	24,76
	σ	8,93	6,67
	ν	31,94	26,92
Poren-anteil [%]	\bar{x}	11,95	14,69
	σ	6,09	6,03
	ν	50,95	41,02

3.3.7.3 Bewertung der Zugversuche

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Zugsteifigkeiten der direkten imprägnierten Glasfaser um ungefähr 15% größer als die Ergebnisse der übersprühten Glasfaser. Zur Überprüfung dieser Ergebnisse und um eine Beurteilung bzw. Rückschluss auf die Auswirkungen des Imprägnierverfahrens abzuleiten, ist eine Fehlerfortpflanzungsanalyse durchgeführt worden um den Einfluss der Probenquerschnitts-

schwankungen auf die Zug-Elastizitätsmoduln zu ermitteln. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Fehlerrechnung aufgeführt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Fehlerrechnung [Kup-12]

		Faser mit direkter Imprägnierung	Faser, übersprüht mit Polyurethan
Breite h	Mittelwert \bar{x} [mm]	5,13	5,28
	Standardabweichung	0,26	0,12
	Varianz v [%]	5,05	2,34
Höhe h	Mittelwert \bar{x} [mm]	0,32	0,3
	Standardabweichung	0,03	0,33
	Varianz v [%]	8,88	8,80
Fehler-Rechnung	ΔE [MPa]	3401,08	2629,42
	ΔE [%]	10,22	9,09

In Tabelle 3 ist ersichtlich, dass der Einfluss der Probenquerschnittsschwankungen bereits sehr groß sind und die daraus resultierenden Zug- Elastizitätsergebnissen in der Größenordnung des Unterschiedes zwischen den in den Zugversuchen ermittelten Werten liegt. Daher beeinflussen die Probenquerschnittsschwankungen im hohen Maße die Schwankungen im Elastizitätsmodul. In Abbildung 64 sind die Ergebnisse der Schlifffbildauswertung aus Tabelle 2 sowie die ermittelten Zugmoduln zusammen dargestellt.

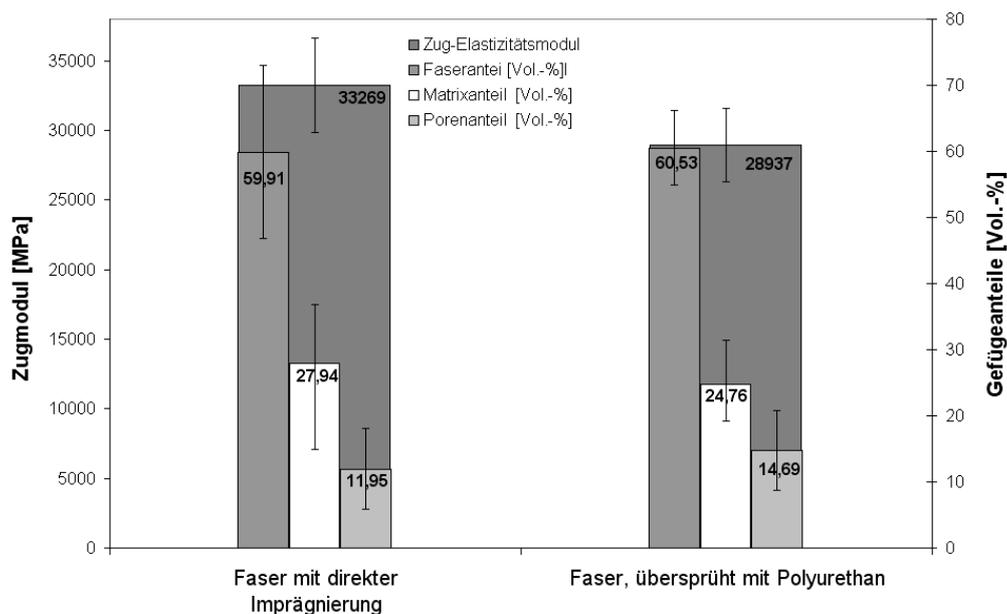


Abbildung 64: Ergebnisse der Schlifffbildauswertung und der ermittelten Zugmoduln [Kup-12]

Die Proben der Faser mit direkter Imprägnierung sowie die Proben der Imprägnierung durch Übersprühen der Faser zeigen nahezu identische Faser-, Matrix- und Porenanteile. Aufgrund der Abhängigkeit des Elastizitätsmodul von dem Faservolumengehalt, dass die in den Zugversuchen ermittelten unterschiedlichen Elastizitätsmodule maßgeblich auf Schwankungen in der Probengeometriebestimmung zurückzuführen sind. „Bei der Herstellung der Proben werden die Glasfasern demnach durch die direkte Imprägnierung genauso gut benetzt und infiltriert wie beim direkten Übersprühen der Endlosfaser“ [Kup-12].

3.3.8 Zusammenfassung

In diesem Teilarbeitspaket ist eine Konzeption sowie eine Konstruktion einer Ablegeeinheit erarbeitet worden, welche ein vollautomatisiertes Ablegen der Endlosfaser erlaubt. Die aufgebauten Ablegeeinheit ermöglicht das vollautomatisierte Ablegen von direkt imprägnierten sowie nicht imprägnierten Endlosfasern.

Bei der Validierung der beiden Ablegeverfahren „Direkte Imprägnierung“ sowie „Imprägnierung durch Übersprühen“ zeigen beide Verfahrensvarianten ähnliche Elastizitätsmoduln. Gerade in Bezug auf die in diesem Vorhaben angestrebte Sandwichbauweise der prototypischen Dieselmotoreinhausung kann eine direkte Imprägnierung der Endlosfaser Vorteile aufweisen. Durch die direkte Imprägnierung wird sichergestellt, dass die Endlosfasern ausreichend benetzt und infiltriert werden bei der gezielten Positionierung auf dem Kernmaterial. Anschließend können dann das Auflegen der Glasfasermatte sowie das Übersprühen der Glasfasermatte erfolgen.

4 Werkstoffe und Halbzeuge

4.1 Faserverstärkte Polyurethane

(Jan Kuppinger)

In diesem Kapitel sind die prozessbedingten Einflussfaktoren auf die Faserorientierung sowie die Werkstoffeigenschaften von unverpressten sowie verpressten langglasfaserverstärkten Polyurethan beschrieben [Kup-12]. Vor Beginn der Untersuchungen der Faserorientierung im Sprühverfahren und der Charakterisierung von unverpressten und verpressten Polyurethan wurde der reale und der an der Steuerung der Polyurethan-Fasersprühanlage eingestellten Glasfasergewichtsanteils untersucht. Dazu wurden aus jeder Versuchsreihe aus unterschiedlichen Platten drei Proben entnommen und der Glasfasergewichtsanteil bestimmt. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Gegenüberstellung der eingestellten und realen Glasfasergewichtsanteile.

Tabelle 4: Vergleich des eingestellten und des realen Glasfasergewichtsanteiles

Probennummer	Eingestellter Fasergewichtsanteil [Gew.-%]	Durchschnittlich gemessener Fasergewichtsanteil [Gew.-%]	Standardabweichung [Gew.-%]
V1-00-00	0	0	0
V2-05-06	5	5,9	0,27
V3-10-06	10	10,6	0,39
V4-15-06	15	14,6	0,35
V5-20-06	20	19,7	1,09
V6-25-06	25	24,5	0,66
V7-30-06	30	28,7	0,75
V8-05-12	5	5,7	0,47
V9-10-12	10	10,3	0,65
V10-15-12	15	14,6	0,32
V11-20-12	20	19,3	0,42
V12-25-12	25	25,0	0,55
V13-30-12	30	30,3	0,38

Es ist ersichtlich, dass der eingestellte und der experimentell ermittelte Fasergewichtsanteil sehr gut übereinstimmen.

4.1.1.1 Herstellung der Prüfkörper

Die Herstellung der Prüfkörper zur Untersuchung der Faserorientierung im Sprühverfahren und der mechanischen Kennwerte erfolgte im Technikum des Fraunhofer ICT. Zum Einsatz kam eine Vier-Komponenten Polyurethanfasersprühanlage der Firma KraussMaffei, wie in Abbildung 65 dargestellt sowie der neu entwickelte Sprühmischkopf.

Für die Bezeichnung sämtlicher Proben wurde folgende Nomenklatur verwendet: Die ersten beiden Ziffern stehen für die Versuchsreihe, Ziffer drei und vier beschreiben den Glasfasergewichtsanteil und Ziffer fünf und sechs stehen für die Faserlänge. Beispielhaft steht die Bezeichnung „V2-05-06“ für die Versuchsreihe 2, einen Fasergewichtsanteil von 5 Gew.-% und eine Faserlänge von 6 mm.



Abbildung 65: Vier-Komponenten-PUR-Fasersprühanlage im Technikum des Fraunhofer ICT

4.1.1.2 Herstellung unverpresster, langfaserverstärkter Polyurethan-Prüfplatten im Fasersprühprozess

Für die Untersuchungen der Faservorzugsorientierung wurden unverpressten langfaserverstärkten Polyurethanprüfplatten mit den Abmessungen von 1000 x 800 x 4 mm³ hergestellt.

Zum Einsatz kamen ein Zwei-Komponenten-Polyurethansystem zur Herstellung unverpresster, faserverstärkter Bauteile besteht zum einen aus der Polyolkomponente mit der Produktbezeichnung MULTITEC® VP PU 02IF02 [BMS-1]. Zum anderen aus der Isocyanatkomponente mit der Bezeichnung MULTITEC® VP PU 10MT03 [BMS-2].

Die Herstellung der Prüfplatten erfolgte in mehreren Schichten. Jede Schicht wurde mit einem Bahnabstand von $d_B = 165$ mm und einer robotergesteuerten Mischkopfbewegung von 300 mm/s eingetragen, siehe Abbildung 66. Um die unterschiedliche Materialmengenverteilung beim Sprühprozess auszugleichen, wurde die nachfolgende Schicht um den Abstand $d_B/2$ horizontal verschoben.

Die Entformung wurde unmittelbar nach der Fertigstellung des Sprühaustrags vorgenommen. In Abbildung 66 sind exemplarisch die Sprühbahnen der ersten beiden

Schichten (Bahn 1 – 5: Schicht 1; Bahn 6 – 9: Schicht 2) zur Herstellung der Prüfplatten dargestellt.

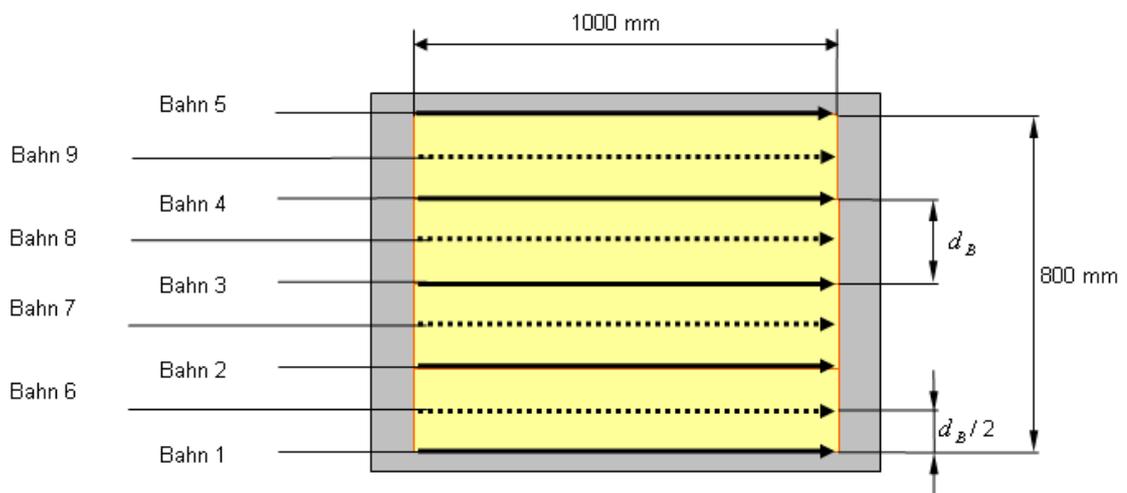


Abbildung 66: Herstellung der Polyurethan-Probenplatten

Für die Materialcharakterisierung wurden Polyurethanplatten mit unterschiedlichem Glasfasergehalt und Glasfaserlänge hergestellt. Der Glasfasergehalt wurde in 5 Gew.-% Schritten von 0 bis 30 Gew.-% variiert. Die untersuchten Glasfaserlängen betragen 6 und 12 mm. Für die Untersuchungen der Faserorientierung wurden zusätzlich noch die Mischkopfposition verändert. Die Mischkopfposition in Bezug auf die vertikale Referenzlinie der Werkzeugoberfläche war $+45^\circ$, 0° und -45° . In Abbildung 67 ist die Mischkopfposition dargestellt.

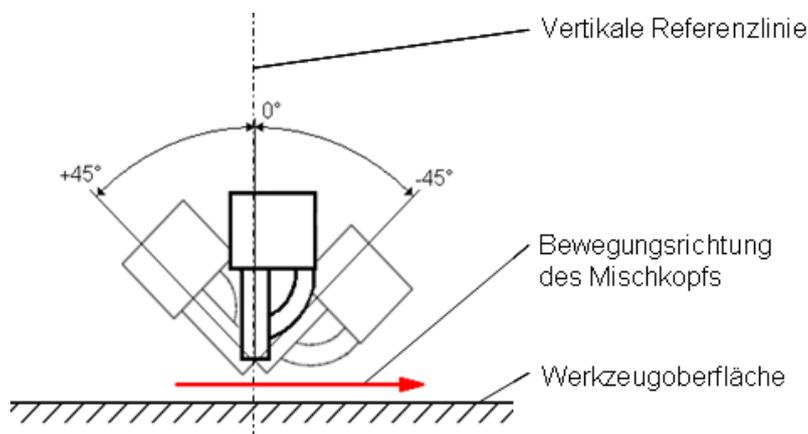


Abbildung 67: Mischkopfposition zur vertikalen Referenzlinie der Werkzeugoberfläche

4.1.1.3 Herstellung der verpressten langfaserverstärkten Polyurethanprüfplatten im Fasersprühprozess

Bei dem eingesetzten Polyurethansystem zur Herstellung verpresster faserverstärkter Bauteile handelt es sich um ein Zwei-Komponentensystem der Firma Bayer MaterialScience. Die Polyolkomponente hat die Handelsbezeichnung Baypreg® VP.PU 01IF15 [BMS-3], die Isocyanatkomponente die Handelsbezeichnung Desmodur® VP.PU 08IF03.

Mit diesen Materialien wurden verpresste langfaserverstärkte Polyurethanprüfplatten mit den Abmessungen von $800 \times 500 \times 2 \text{ mm}^3$ hergestellt. Der Sprüheintrag zur Herstellung der Prüfplatten erfolgte in zwei Schichten. Jede Schicht wurde mit einem Bahnabstand von $d_B = 165 \text{ mm}$ und eingetragen. Um die unterschiedlichen Materialmengenverteilung aufgrund des Sprühprozesses auszugleichen, wurde die nachfolgende Schicht um den Abstand $d_B/2$ verschoben. In Abbildung 68 ist die Herstellung der verpressten Prüfplatten dargestellt.

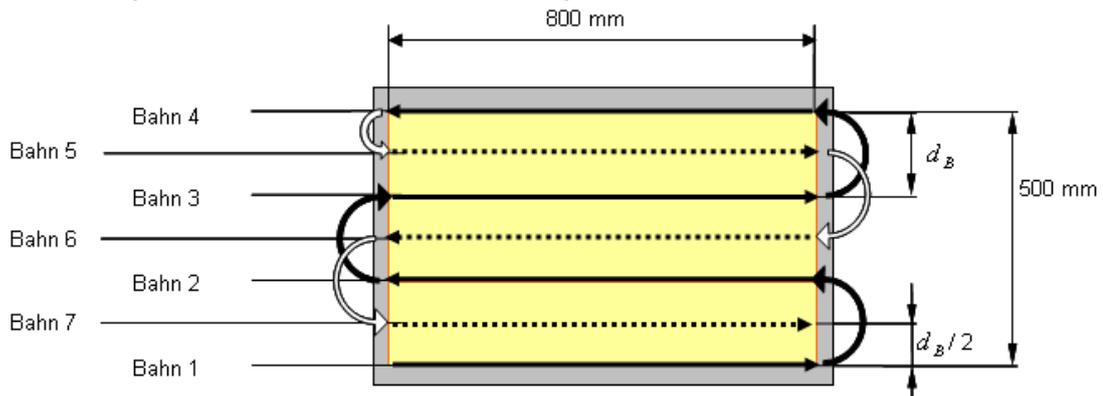


Abbildung 68: Sprüheintrag zur Herstellung von verpressten faserverstärkten Polyurethan-Prüfplatten und Polyurethan-Sandwichstrukturen

Der Glasfasergehalt wurde bei der Herstellung von 0 – 50 Gew.-% in Schritten von 5 Gew.-% variiert. Die untersuchten Glasfaserlängen betragen 6 und 12 mm.

4.1.2 Untersuchungen zur Faservorzugsorientierung im Fasersprühprozess

Glasfaserverstärkte Polyurethanplatten, welche im automatisierten Polyurethan-Fasersprühprozess hergestellt wurden, sind in Abhängigkeit der Sprühkopffosition, des Glasfasergehalts und der Glasfaserlänge hinsichtlich der Faserorientierung untersucht worden [Kup-12, Kup-11]. Die Sprühkopffosition wurde dabei um $+45^\circ$, 0° und -45° in Bezug auf die Senkrechte der Plattenoberfläche variiert. Betrachtete Fasergewichtsgelalte waren dabei 5, 10, 15 und 20 Gew.-%. Die Länge der verwendeten Glasfasern betrug 6 und 12 mm.

Die Charakterisierung der Faserorientierung erfolgte durch Auswertung der Steifigkeitskennwerte an Zugronden, welche aus den Prüfplatten herausgeschnittenen wurden. Diese wurden anschließend durch einen mathematischen Ansatz hinsichtlich der Faserorientierung charakterisiert.

4.1.2.1 Probenherstellung und –geometrie

Aus den hergestellten Prüfplatten wurden mittels Wasserstrahlschneiden kreisrunde Zugronden mit einem Durchmesser von 170 mm gefertigt. Die Probenplatten sind mit einem kartesischen Koordinatensystem beschriftet, wobei die x-Achse die Bewegung des Sprühkopfs in Plattenlängsrichtung abbildet. Die y-Achse beschreibt die Richtung in Plattenquerrichtung und die z-Achse die Richtung in Plattendicke. Auf diese Weise kann die Lage der einzelnen Faser in diesem Koordinatensystem mit dem Richtungskosinus erfasst werden. Durch die Tatsache, dass beim Fasersprühen die

Probendicke schichtweise aufgetragen wird, kann von einer ebenen Faserorientierung in der xy-Ebene ausgegangen werden.

4.1.2.2 Mechanische Charakterisierung

Die Beschriftung der Zugronden erfolgte in 10° Schritten, ausgehend von der Sprühhichtung, welche die 0°-Achse darstellt. In Abbildung 69 ist die Beschriftung einer Zugrunde dargestellt. Zur Charakterisierung wurde die Zugrunde entlang der eingezeichneten Winkellagen eingespannt und systematisch im elastischen Bereich vermessen, wie Abbildung 70 zeigt. Um eine Zugrunde vollständig zu vermessen, wurden die Zugversuche im Bereich vom 0°-170° durchgeführt [Trö-03].

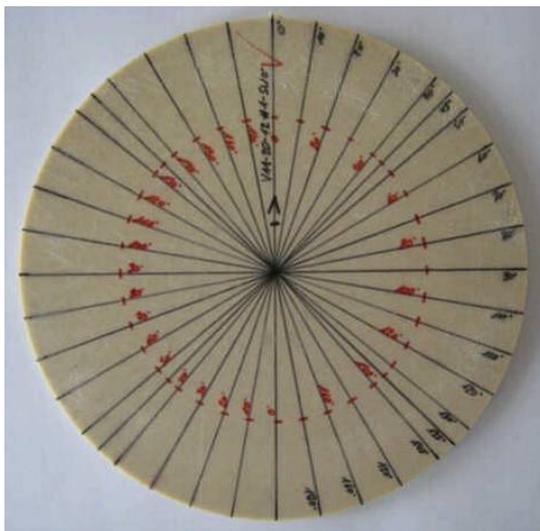


Abbildung 69: Beschriftete Zugrunde

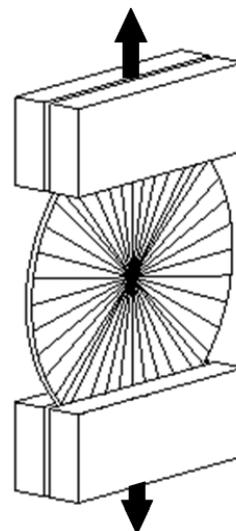


Abbildung 70: Schematische Darstellung der eingespannten Zugrunde

Auf diese Weise konnte die Sekanten-Steigung bestimmt und dem entsprechend die Steifigkeit S_{ro}^* über einen bestimmten Orientierungswinkel der Zugrunde ermittelt werden. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde jede S_{ro}^* -Steifigkeit mit dem höchsten ermittelten $S_{ro_max}^*$ -Wert jeder Zugrunde normiert.

Daher ist S_{S_ro} die normierte relative Steifigkeit jedes Orientierungswinkels (Formel 1):

Formel 1:

$$S_{S_ro} = \frac{S_{ro}^*}{S_{ro_max}^*}$$

S_{ro}^* = ermittelte S_{ro}^* -Steifigkeit bei einem bestimmten Orientierungswinkel

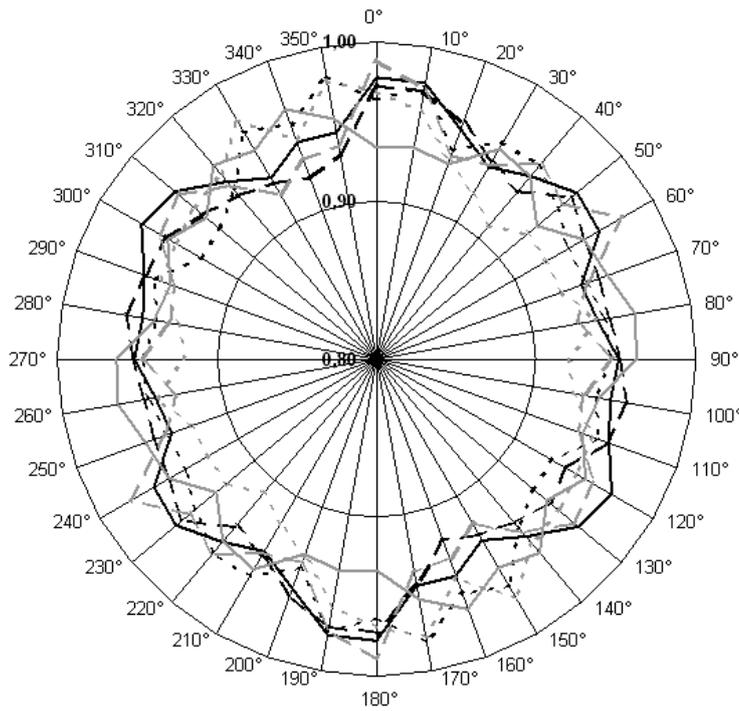
$S_{ro_max}^*$ = höchste ermittelter S_{ro}^* -Steifigkeit jeder Zugrunde

Tabelle 5 zeigt eine Übersicht aller untersuchten Zugronden. Aus jeder Versuchsreihe wurden vier Zugronden untersucht.

Tabelle 5: Übersicht der untersuchten Zugronden

Probenbezeichnung	Anzahl der getesteten Zugronden	Faserlänge [mm]	Fasergewichtsanteil [%]	Sprühwinkel [%]	
V1-05%-6mm-45°	4	6	5	-45°	Abbildung 71
V2-05%-6mm-0°	4	6	5	0°	
V3-05%-6mm+45°	4	6	5	+45°	
V4-05%-12mm-45°	4	12	5	-45°	
V5-05%-12mm-0°	4	12	5	0°	
V6-05%-12mm+45°	4	12	5	+45°	
V7-10%-6mm-45°	4	6	10	-45°	Abbildung 72
V8-10%-6mm-0°	4	6	10	0°	
V9-10%-6mm+45°	4	6	10	+45°	
V10-10%-12mm-45°	4	12	10	-45°	
V11-10%-12mm-0°	4	12	10	0°	
V12-10%-12mm+45°	4	12	10	+45°	
V13-15%-6mm-45°	4	6	15	-45°	Abbildung 73
V14-15%-6mm-0°	4	6	15	0°	
V15-15%-6mm+45°	4	6	15	+45°	
V16-15%-12mm-45°	4	12	15	-45°	
V17-15%-12mm-0°	4	12	15	0°	
V18-15%-12mm+45°	4	12	15	+45°	
V19-20%-6mm-45°	4	6	20	-45°	Abbildung 74
V20-20%-6mm-0°	4	6	20	0°	
V21-20%-6mm+45°	4	6	20	+45°	
V22-20%-12mm-45°	4	12	20	-45°	
V23-20%-12mm-0°	4	12	20	0°	
V24-20%-12mm+45°	4	12	20	+45°	

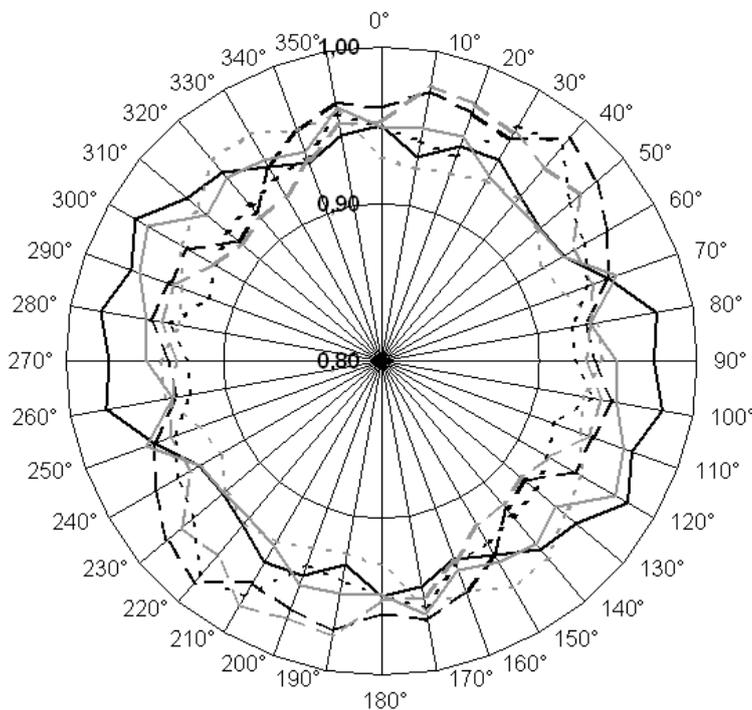
In Abbildung 71 bis Abbildung 74 sind die entsprechenden Netzdiagramme mit der normierten relativen Steifigkeit S_{S_ro} dargestellt.



Fasergehalt: 5 Gew.%

- 05 Gew.%, 6 mm, 0°
- - 05 Gew.%, 6 mm, +45°
- - - 05 Gew.%, 6 mm, -45°
- 05 Gew.%, 12 mm, 0°
- - 05 Gew.%, 12 mm, +45°
- - - 05 Gew.%, 12 mm, -45°

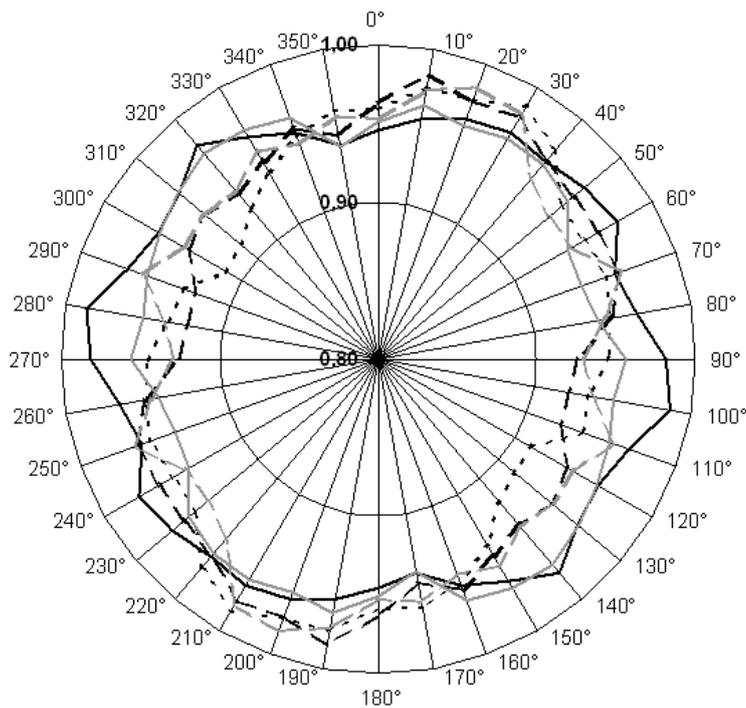
Abbildung 71: Netzdiagramm der relativen Steifigkeit $S_{S_{ro}}$; Untersuchungen mit 5 Gew.-% Faserteil



Fasergehalt: 10 Gew.%

- 10 Gew.%, 6 mm, 0°
- - 10 Gew.%, 6 mm, +45°
- - - 10 Gew.%, 6 mm, -45°
- 10 Gew.%, 12 mm, 0°
- - 10 Gew.%, 12 mm, +45°
- - - 10 Gew.%, 12 mm, -45°

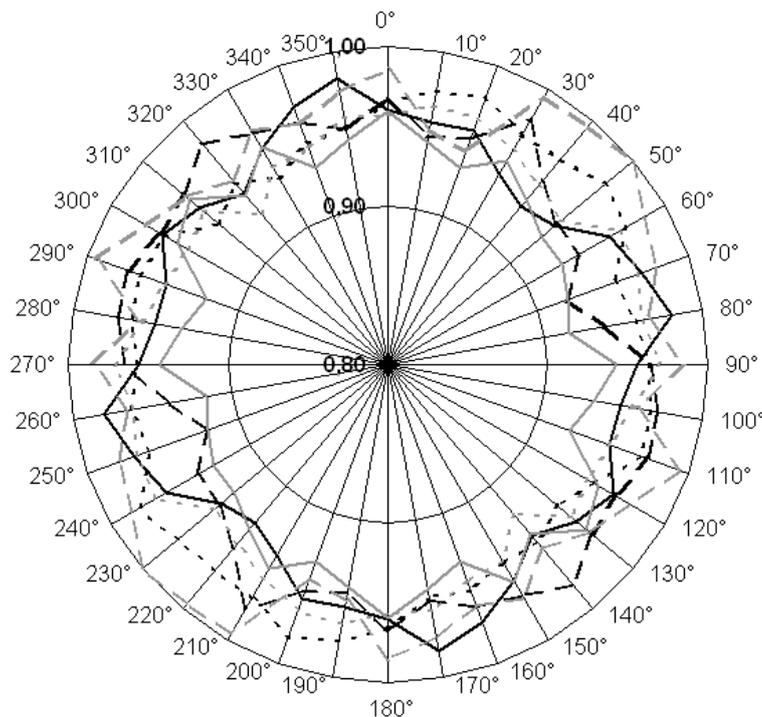
Abbildung 72: Netzdiagramm der relativen Steifigkeit $S_{S_{ro}}$; Untersuchungen mit 10 Gew.-% Faserteil



Fasergehalt: 15 Gew.-%

- 15 Gew.%, 6 mm, 0°
- - 15 Gew.%, 6 mm, +45°
- · - · 15 Gew.%, 6 mm, -45°
- 15 Gew.%, 12 mm, 0°
- - 15 Gew.%, 12 mm, +45°
- · - · 15 Gew.%, 12 mm, -45°

Abbildung 73: Netzdiagramm der relativen Steifigkeit $S_{S_{ro}}$; Untersuchungen mit 15 Gew.-% Faseranteil



Fasergehalt: 20 Gew.-%

- 20 Gew.%, 6 mm, 0°
- - 20 Gew.%, 6 mm, +45°
- · - · 20 Gew.%, 6 mm, -45°
- 20 Gew.%, 12 mm, 0°
- - 20 Gew.%, 12 mm, +45°
- · - · 20 Gew.%, 12 mm, -45°

Abbildung 74: Netzdiagramm der relativen Steifigkeit $S_{S_{ro}}$; Untersuchungen mit 20 Gew.-% Faseranteil

4.1.2.3 Beschreibung der Faserorientierung

Die ausführliche Beschreibung und Auswertung der Faserorientierung bei den untersuchten Zugronden ist in [Kup-12] ersichtlich. Aus [Kup-12] geht hervor, dass durch das Fasersprühen keine Faservorzugsorientierungen in der Ebene entstehen. Des Weiteren ist das quasi-isotropische Materialverhalten unabhängig von der Faserlänge und des Faseranteils. Zudem belegen die Untersuchungen, dass die Sprühwinkelposition keinerlei Einfluss auf die Faserorientierung besitzt.

Da das unverpresste Polyurethansystem bei der Herstellung des prototypischen Demonstratorbauteils keine Verwendung fand, wird in diesem Bericht nicht weiter darauf eingegangen. Die die mechanischen Eigenschaften von unverpresstem faserverstärktem Polyurethan sind in [Kup-11, Kup-12] ausführlich beschrieben.

4.1.3 Einfluss von Glasfaserlänge und Glasfasergehalt auf die Zugsteifigkeit und Zugfestigkeit von verpresstem, langglasfaserverstärktem Polyurethan

Die mechanischen Eigenschaften von verpressten, langglasfaserverstärkten Polyurethan-Platten wurden in Abhängigkeit der Glasfaserlänge und des Glasfasergehalts hinsichtlich der Zugsteifig- und Festigkeiten untersucht. Die zum Einsatz kommenden Materialien sowie die Plattenherstellung sind in Abschnitt 4.1.1.3 beschrieben. Aufgrund der Ergebnisse aus 4.1.2 wird auf eine Unterscheidung der Entnahmerichtung verzichtet.

4.1.3.1 Zugprüfung

In Abbildung 75 sind die Ergebnisse des Zug-Elastizitätsmoduls, in Abbildung 76 die Ergebnisse der Zugfestigkeit dargestellt.

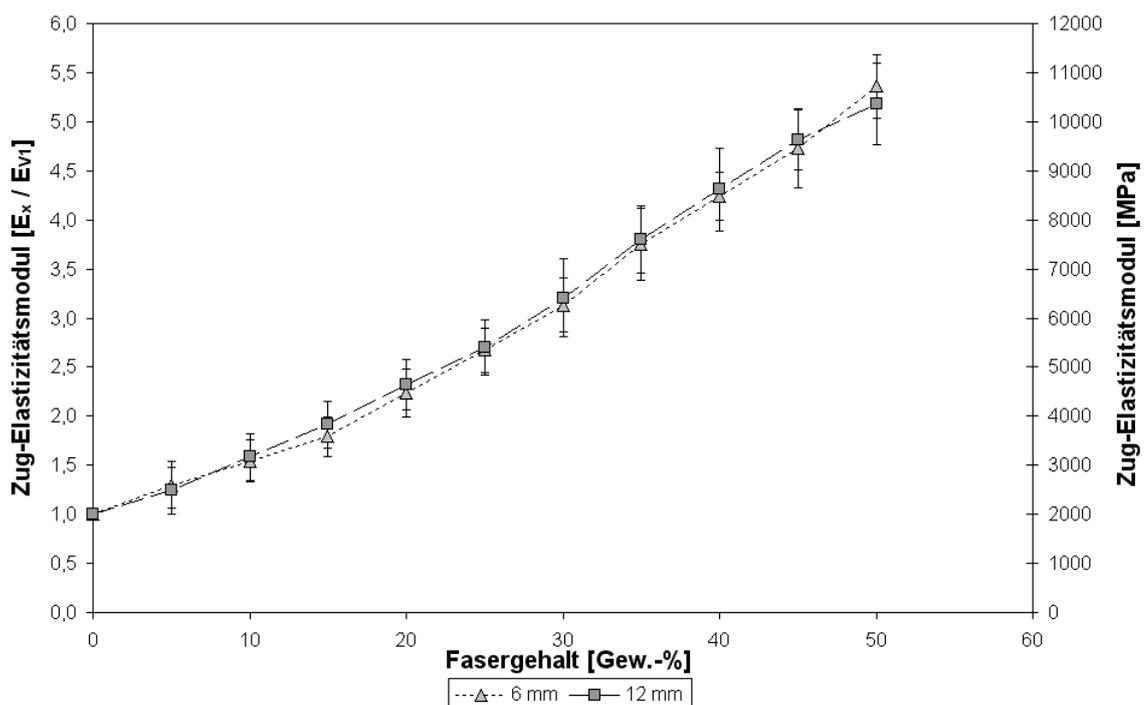


Abbildung 75: Zug-Elastizitätsmodul bei 6 mm und 12 mm Faserlänge (verpresst)

In Abbildung 75 ist eine stetige Zunahme des Zug-Elastizitätsmoduls mit steigendem Fasergehalt, unabhängig von der Faserlänge ersichtlich. Bei einem Faseranteil von 50 Gew.-% steigt der Zug-Elastizitätsmodul auf den fünffachen Wert gegenüber dem unverstärkten Werkstoff.

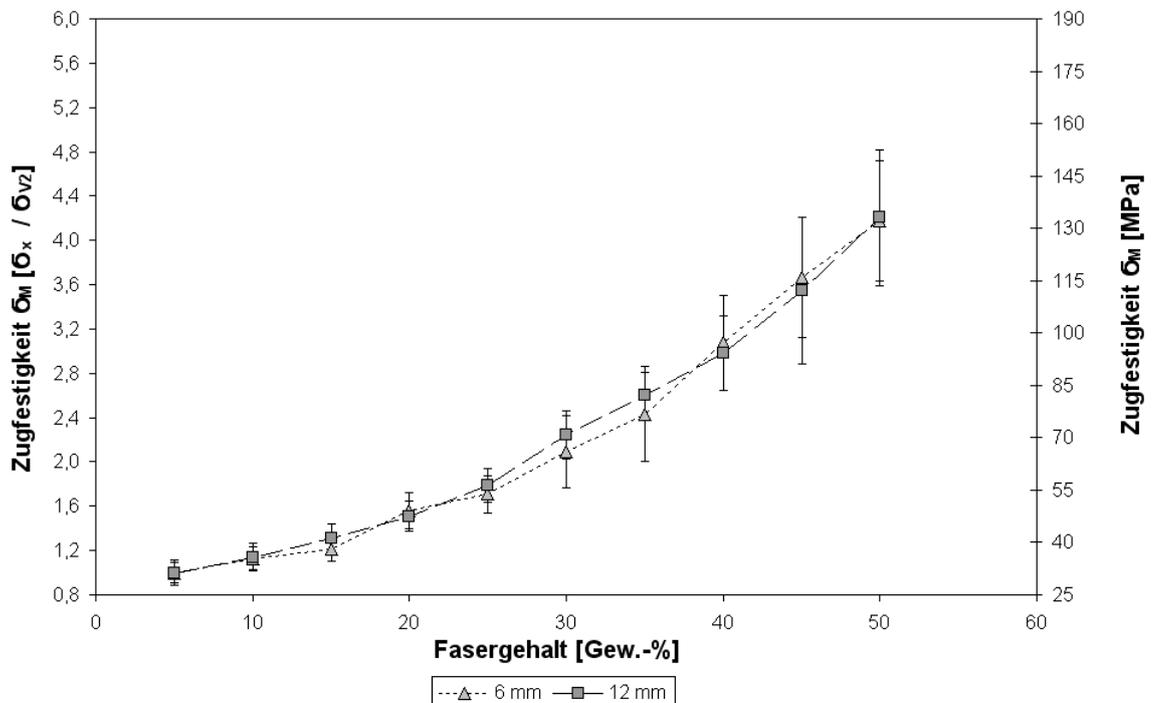


Abbildung 76: Zugfestigkeit bei 6 mm und 12 mm Faserlänge (verpresst)

Die Zugfestigkeiten der Proben mit 6 mm und 12 mm Faserlänge zeigt Abbildung 76. Unabhängig von der Faserlänge zeigen die Proben mit gleichen Fasergewichtsanteilen praktisch identische Zugfestigkeitswerte. Die Zugfestigkeit nimmt für steigende Fasergewichtsanteile stetig zu und erreicht bei 50 Gew.-% einen etwa vierfach höheren Zugfestigkeitswert als das unverstärkte Ausgangsmaterial.

4.2 Polyurethane Sandwichstrukturen

In diesem Kapitel ist die Charakterisierung der Polyurethan-Sandwichstrukturen beschrieben [Kup-12]. Dazu wurden Sandwichstrukturen mit einer Höhe von ca. 20 mm und den Abmaßen von 800 x 500 mm² hergestellt. Außerhalb des Werkzeugs wurde dazu mittels eines Holzrahmens die zugeschnittenen, textilen Deckschichtverstärkungsstrukturen mit dem dazwischen angeordneten Pappwabenkern mit einer Dicke von 20 mm verspannt. Der Polyurethan-Sprühastrag erfolgte zuerst auf die Oberseite. Anschließend wurde der Sandwichverbund gedreht und die Unterseite besprüht. Abschließend wurde der besprühte Sandwichaufbau in das Werkzeug eingelegt und verpresst. Der Prozessablauf ist in Abbildung 77 schematisch dargestellt.

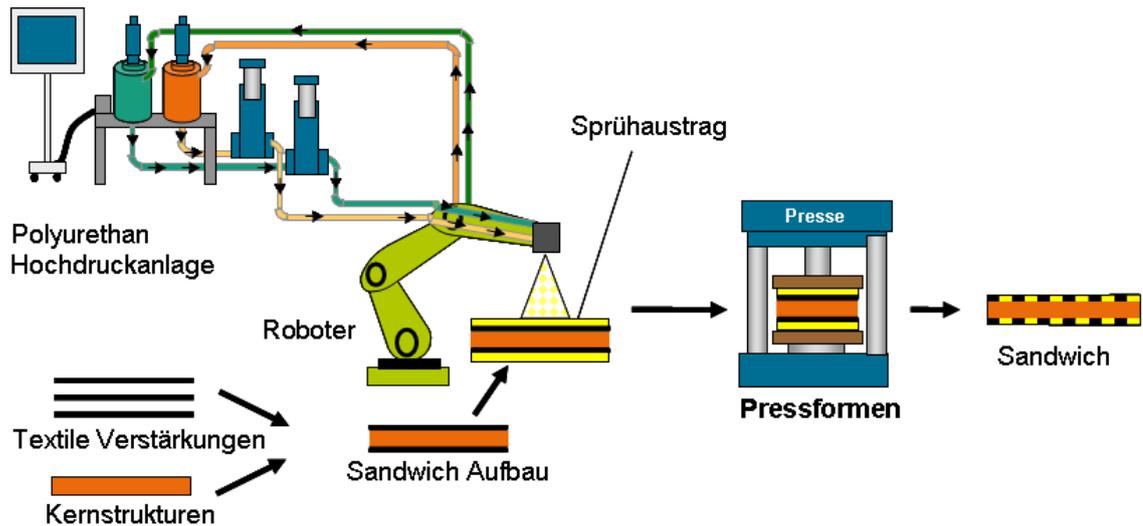


Abbildung 77: Schematische Darstellung einer Polyurethan-Sandwichherstellung [Cag-04]

Bei Herstellung der Sandwichs wurde die Polyurethan-Austragsmenge über die Robotergeschwindigkeit, bei gleichbleibendem robotergesteuertem Sprühbahnverfahrweg eingestellt. Die theoretische flächenbezogene Austragsmenge m_{th} wird über die Formel 2 berechnet.

Formel 2:

$$m_{th} = \frac{\text{Sprühbahnverfahrweg}}{\text{Robotergeschwindigkeit}} * \text{Austragsmenge}$$

Im Fokus der Untersuchungen standen Sandwichstrukturen mit 300 g/m², 450 g/m², 600 g/m² und 900 g/m² Glasfasermattenflächengewicht in den Deckschichten. Tabelle 6 gibt ein Überblick der hergestellten Sandwichstrukturen.

Tabelle 6: Übersicht der hergestellten Sandwichstrukturen bei konstantem Sprühaustrag, in Abhängigkeit der Robotergeschwindigkeit

Roboter- geschw. [mm/s]	Austragsmenge Polyurethan [g/m ²]	Glasfasermattenflächengewicht			
		300 [g/m ²]	450 [g/m ²]	600 [g/m ²]	900 [g/m ²]
210	1240	x	x	x	x
240	1085	x	x	x	x
270	964	x	x	x	x
300	898	x	x	x	x
320	814				x
370	704	x	x	x	
410	635	x	x	x	
435	599			x	
480	542	x	x	x	
510	510	x	x		
580	449	x	x		
640	406		x		
790	330	x			
870	300	x			
965	270	x			

Die Gewichte der Sandwichstrukturen können mittels des doppelten Glasfasermattenflächengewichts, der zweifachen Polyurethan-Austragsmenge bei entsprechender Robotergeschwindigkeit und dem einfachen Pappwabenflächengewicht abgeschätzt werden. In Abbildung 78 ist die theoretische und gemessene flächenbezogene Polyurethan-Austragsmenge über die Robotergeschwindigkeit dargestellt. Zusätzlich sind in Abbildung 78 die Flächengewichte der Glasfasermatten und der Pappwabenkernstruktur eingezeichnet.

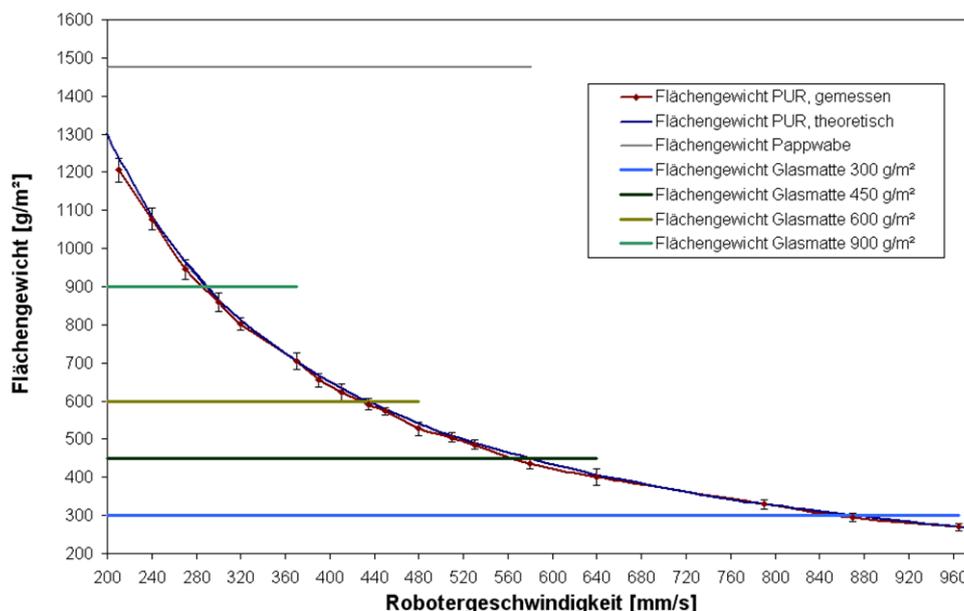


Abbildung 78: Gemessener und theoretischer flächenbezogener Materialaustrag in Abhängigkeit der Robotergeschwindigkeit

4.2.1 Bestimmung der Deckschichtdicken

Für die Bestimmung der Sandwicheigenschaften ist die Bestimmung der Deckschichteigenschaften von großer Bedeutung. Da eine einfache Bestimmung der Deckschichtdicke bei dem mittels des Polyurethan-Fasersprühen hergestellten Sandwichstrukturen nicht möglich ist, wurde mit Hilfe eines Computertomograph die Deckschichtdicke bestimmt. Die Beschreibung der Methode sowie die Charakterisierung der Deckschichtdicke ist ausführlich in [Kup-12] dargelegt. Daher werden hier nur die ermittelten Ergebnisse dargestellt.

Zur Bestimmung der Deckschichtdicke in Abhängigkeit von dem Glasfasermatten-gewicht und der Polyurethan-Austragsmenge wurden von jeder Sandwichkonfiguration sieben Proben mittels CT untersucht und die entsprechenden Deckschichtdicken bestimmt. Abbildung 79 zeigt die Übersicht der ermittelten Ergebnisse.

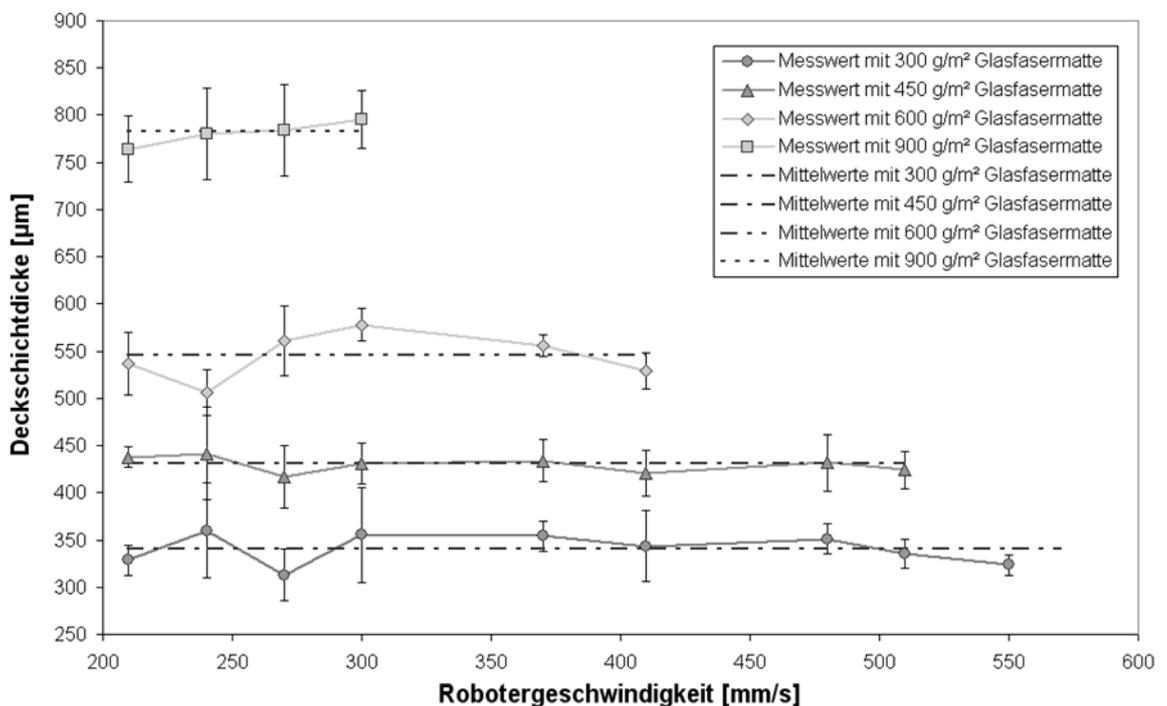


Abbildung 79: Deckschichtdicke in Abhängigkeit des Glasfasermattenflächengewichts und der Robotergeschwindigkeit

Aus Abbildung 79 ist ersichtlich, dass die Deckschichtdicken nur vom Flächengewicht der Glasfasermatte abhängen. Daher kann für jedes Glasfasermattenflächengewicht der Mittelwert der Deckschichtdicke bestimmt werden. Die Mittelwerte der Deckschichtdicken sowie deren Standardabweichung sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7: Mittelwerte der Deckschichtdicken in Abhängigkeit der Glasfasermattenflächengewichte

	Glasfasermattenflächengewicht			
	300 g/m²	450 g/m²	600 g/m²	900 g/m²
Mittelwert Deckschichtdicke t_D [µm]	340	430	545	781
Standardabweichung [µm]	31	26	32	38

4.2.2 Charakterisierung der Deckschichteigenschaften

Durch die Bestimmung der Deckschichtdicke in Abhängigkeit des entsprechenden Glasfasermattengewichtes konnten die mechanischen Deckschichteigenschaften ermittelt werden.

Für die Zugprüfung benötigten Proben wurden durch Zersägen der Sandwichplatten auf eine Breite von 40 mm und einer Länge von 250 mm, durch anschließendes Trennen der Deckschicht vom Kernmaterial ebenfalls durch Zersägen und anschließendem Abschleifen der verbleibenden Reste des Kernmaterials mittels eines Schleifpapiers (Körnung 200) hergestellt. Die Breite der Zugproben von 40 mm wurde gewählt, um einen repräsentativen Querschnitt der Deckschichten zu erhalten.

Von jeder Sandwichkonfiguration wurden mindestens 20 Probekörper geprüft. Jeweils fünf Probekörper in Längs- und Querrichtung aus der oberen Deckschicht und unteren Deckschicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei sämtlichen betrachteten Sandwichkonfigurationen die mechanischen Eigenschaften der Deckschichten unabhängig von der Entnahmerichtung sind. Dies zeigt, dass die zum Einsatz kommenden vernadelten Glasfasermatten für ein quasi-isotropes Materialverhalten in den Deckschichten verantwortlich sind. Zudem zeigen die Untersuchungsergebnisse keinen Unterschied zwischen oberer und unterer Deckschicht. Dies bedeutet, dass kein Einfluss bezüglich der längeren Verweilzeit des Polyurethans der zuerst besprühten Deckschicht erkennbar ist. Somit kann für die Geometrie der untersuchten Sandwichstrukturen von einem stabilen Prozess ausgegangen werden.

Bei allen untersuchten Sandwichkonfigurationen sind innerhalb einer Versuchsreihe mit gleichen Glasfasermattenflächengewichten ähnliche Kennwerte bezüglich der Zugsteifigkeit und Zugfestigkeit, innerhalb der für Faserverbundwerkstoffe akzeptablen Toleranzen, festgestellt worden. Somit hat die auf die Glasfasermatten aufgebrachte Polyurethanaustragsmenge keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Deckschichten. Folglich können die ermittelten Ergebnisse in Abhängigkeit des Glasfasermattengewichts zusammengefasst und die entsprechenden Mittelwerte gebildet werden. Die Übersicht der Mittelwerte der Zugsteifigkeit und der Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Glasfasermattenflächengewichts ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Mittelwerte der Zuguntersuchungen in Abhängigkeit des Glasfasermattenflächengewichts

Glasfasermattenflächengewicht [g/m ²]	Mittelwert Zug-Elastizitätsmodul [MPa]	Standardabweichung [MPa]	Mittelwert Zugfestigkeit [MPa]	Standardabweichung [MPa]
300	10300	510	152	8,9
450	12300	530	169	10,9
600	13200	560	212	6,3
900	13300	850	212	10,3

4.2.3 Charakterisierung des Schubmoduls der Kernstrukturen

Die Bestimmung der Kernschubeigenschaften in Längs- und Querrichtung ist unabhängig von dem gewählten Glasfaserflächengewicht in den Deckschichten. Daher wurden die Kernschubeigenschaften an Sandwichstrukturen mit 450 g/m² Glasfaserflächengewicht ermittelt. In Abbildung 80 ist die Pappwabenkernstruktur dargestellt. Zudem ist nochmals die Richtungsabhängigkeit der Schubmodulkennwerte visualisiert.

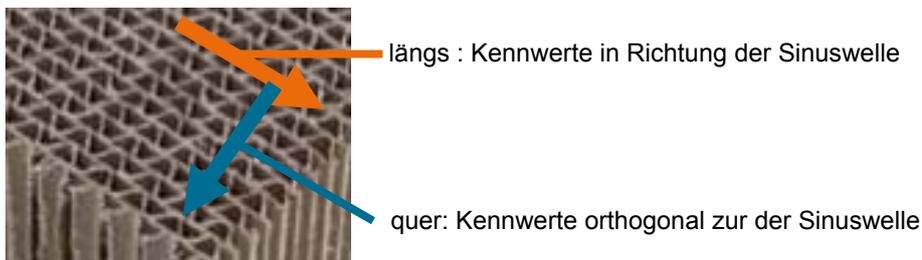


Abbildung 80: Pappwabenkernstruktur

Die Ergebnisse der Kernschubeigenschaften sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Ergebnisse der Ermittlung der Kernschubeigenschaften

	Längsrichtung		Querrichtung	
	G _k [N/mm ²]	Stab.	G _k [N/mm ²]	Stab.
Sinuswabe	85.6	9.7		
450_210	99.4	14.7	46.8	5.5
450_240	82.4	7.8	37.3	3.7
450_270	84.7	10.2	41.1	4.2
450_300	91.0	8.9	40.5	0.7
Mittelwert	88.6		39.6	

Die Ergebnisse zeigen Kernschubeigenschaften von 88,6 MPa in Längs- und Kernschubeigenschaften von 39,9 MPa in Querrichtung.

4.2.4 Charakterisierung der Sandwicheigenschaften

Mit den ermittelten Deckschichtdicken und den Schubeigenschaften der Kernstruktur konnten die verschiedensten Sandwichstrukturen im 4-Punkt-Biegeversuch getestet und entsprechend ausgewertet werden.

Die Messergebnisse der Sandwichcharakterisierung wurden vom DLR über Simulationsmethoden nachgebildet und auf die Demonstratorgeometrie übertragen. Anhand dieser Ergebnisse wurde für das Demonstratorbauteil ein Sandwichaufbau mit einem Glasfasermattenflächengewicht von 600 g / m² vorgeschlagen.

4.3 Brandschutz

(Bernd Rothe, Ulrich Fehrenbacher)

Ziel der Entwicklungen im Brandschutz ist es die Bahnnorm CEN/TS 45545 zu erfüllen.

4.3.1 Entwicklung eines halogenfreien Flammschutzmittels

Zur Synthese eines halogenfreien Flammschutzmittels für Polyurethane wurde die Ausgangssubstanz DOPO (9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthren-10-oxid) gewählt (Abbildung 81). DOPO findet als strukturelle Untereinheit bereits Verwendung in verschiedenen reaktiven Flammschutzmitteln für Epoxide und Polyester [Cha-04, Wu-01]. Dabei wird dessen Phosphorgehalt und hohe Aromatizität zur Flammschutzwirkung genutzt.

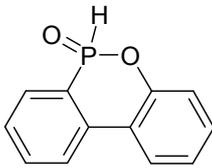


Abbildung 81: 9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthren-10-oxid (DOPO)

Da der direkte Einsatz von DOPO in PUR aufgrund seiner Acidität zu einer wesentlichen Verschiebung der PUR-Katalyse (Schaumkollaps) führen würde, wurde der Ansatz der Methylierung gewählt, wie in Abbildung 82 dargestellt.

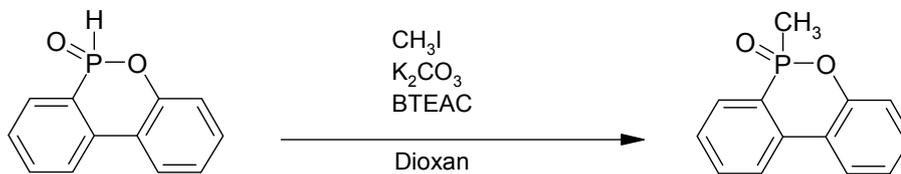


Abbildung 82: Methylierung mit Methyljodid

Diese Methode der Methylierung von DOPO mit Methyljodid wurde von [Bel-02] entwickelt. Dazu wird DOPO in dioxanischer Lösung mit Kaliumcarbonat deprotoniert und mit Methyljodid umgesetzt. Um das in Dioxan unlösliche Kaliumcarbonat als Base einsetzen zu können, wird Benzyltriethylammoniumchlorid (BTEAC) als Phasentransferkatalysator eingesetzt.

Durchführung

In einem 100-mL-Rundkolben mit Rührfisch wurde 1 g DOPO (1 eq., 4,6 mmol, 216,18 g·mol⁻¹) in 10 mL Dioxan gelöst. Nach Zugabe von 0,7 g Kaliumcarbonat (1,1 eq, 5,06 mmol, 138,2 g·mol⁻¹), 0,105 g BTEAC (0,1 eq., 4,6 mmol, 227,8 g·mol⁻¹) und 316 µL Methyljodid (1,1 eq., 5,06 mmol, 141,94 g·mol⁻¹, 2,27 g·mL⁻¹) mit einer Eppendorfpipette wurde der Kolben mit Argon gespült und mit einem Septum verschlossen. Die Reaktion verlief über 7 Tage unter Rühren bei Raumtemperatur.

Zur Kontrolle der Reaktionsvollständigkeit erfolgte eine Dünnschichtchromatographie (PE : EE : Methanol 1:1:1, $R_f[\text{Produkt}] = 0,8$, $R_f[\text{Edukt}] = 0,2$). Es wurden 30 mL Wasser und 150 mL Chloroform zugegeben und die organische Phase am Scheidetrichter abgetrennt. Die wässrige Phase wurde vier Mal mit je 30 mL Chloroform extrahiert und die organischen Phasen vereinigt. Anschließend wurden die gesammelten organischen Phasen weitere vier Male mit Wasser extrahiert und die wässrigen Phasen vereinigt. Die Kontrolle der Vollständigkeit der Trennung erfolgte per Dünnschichtchromatographie. Nach Trocknen der organischen Phase mit Natriumsulfat und Filtration wurden leichtflüchtige Komponenten am Rotationsverdampfer unter vermindertem Druck entfernt und der als Produkt erhaltene weisse Feststoff 24 h im Hochvakuum getrocknet. Die Charakterisierung erfolgte mittels „nuclear magnetic resonance“ (NMR) in CDCl_3 . Zur Charakterisierung der Nebenprodukte wurden die in der wässrigen Phase verbliebenen Fraktionen an einem automatischen Flashchromatograph des Typs "Companion" der Firma Teledyne ISCO® (Abbildung 83) einer Auftrennung unterzogen. Dieser ermöglicht eine chromatographische Trennung mit programmiertem Gradienten bei Echtzeit-UV-Kontrolle des Elutionsstromes.



Abbildung 83: Flashchromatograph Teledyne ISCO Companion

Mit dem Flashchromatographen konnte eine geeignete Trennmethode entwickelt werden (Säulenmaterial: Kieselgel 60, Laufmittel A: EE : Methanol 1:1, Laufmittel B: Heptan, Anfangskonzentration A: 20%, Gradient 100 % A in 2 h, Endkonzentration A: 100%). Die aufgetrennten Fraktionen wurden jeweils gesammelt, am Rotationsverdampfer unter vermindertem Druck von leichtflüchtigen Komponenten getrennt und mittels NMR in CDCl_3 charakterisiert (Abbildung 84).

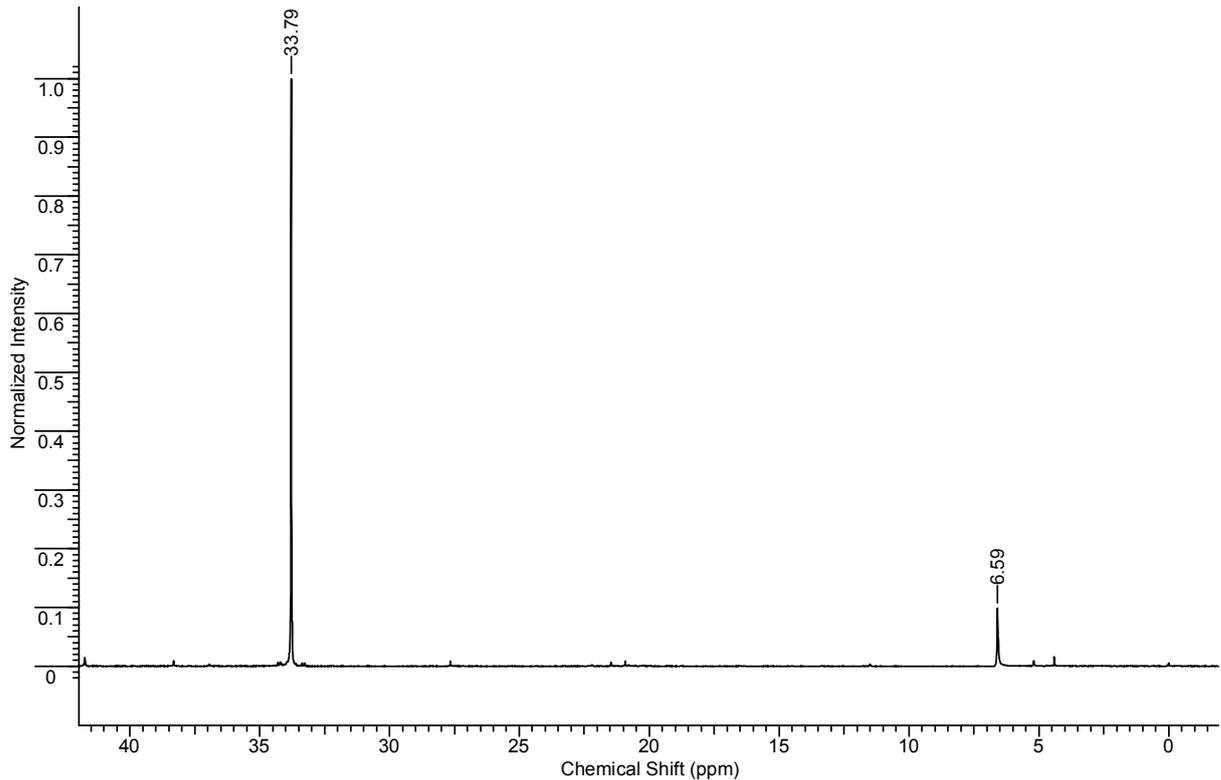


Abbildung 84: ^{31}P -NMR-Spektrum von Methyl-DOPO, 120 MHz, CDCl_3 mit einer chemischen Verschiebung von $\delta=33,8$ ppm und dem Edukt DOPO mit einer chemischen Verschiebung von $\delta=6,6$ ppm

Synthese von Methyl-DOPO / Verfahrensoptimierung

Bei einer Optimierung wurde die Gesamtausbeute auf ca. 97% der Theorie mittels 2-stufigem Verfahren nach [Art-06] verbessert. Es wurde die von Artner beschriebene Synthese leicht modifiziert und auf einen 10L Maßstab vergrößert. Hierbei wurde die Synthese nach der säurekatalysierten Methoxylierung von DOPO zu Methoxy-DOPO mittels Trimethoxymethan in Methanol gestoppt und das Rohprodukt nach der Lösungsmittelabtrennung in einer beheizten Vakuumdestillationskolonne das Methoxy-DOPO in einer Reinheit > 99,5 % (^{31}P -NMR) mittels Vakuumdestillation aufgereinigt. Anschließend wurde das Methoxy-DOPO zu Methyl-DOPO durch Erwärmen mit Dimethylsulfat als Katalysator zu Methyl-DOPO umgelagert. Insgesamt wurde 0,6 kg Methyl-DOPO mit einer Reinheit > 99,5 % hergestellt.

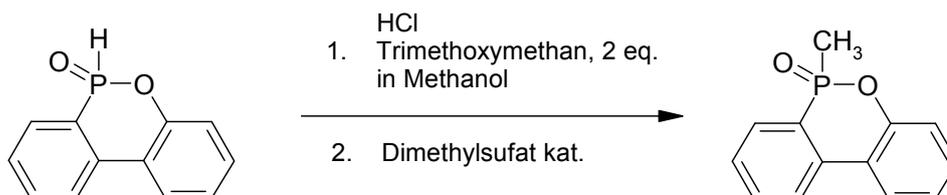


Abbildung 85: Zweistufige Methyl-DOPO-Synthese Methylierung mit Methyljodid

Löslichkeitsversuche im Polyol Multitec VP.PU 02 IF 02 und PUR 455/5 BL

Für die Verarbeitung in einer PUR-Hochdruckmaschine soll das Methyl-DOPO in dem Polyol gelöst werden. Hierzu wurde das Methyl-DOPO in zwei Polyetherpolyolen bei 60°C gelöst. Insgesamt konnten bis zu 40% Methyl-DOPO in Polyetherpolyolen gelöst und in PU-Formulierungen verarbeitet werden (Tabelle 10).

Tabelle 10: Die Löslichkeit von Methyl-DOPO in Multitec und PUR 455/5 BL

		Multitec VP.PU 02IF02		PUR 455/5 BL			
Massenanteil Methyl-DOPO im Polyol	Massenanteil in Formulierung (ω%)		Massenanteil in Formulierung (ω%)		Zugabe Methyl-DOPO	Gesamtmasse	
10%	4,13%	gut löslich, etwas langsamer als PUR 455	3,88%	sehr gut löslich	+1,00 g	10,0 g	
20%	8,26%	gut löslich, dauert doppelt solange wie bei PUR 455	7,75%	gut löslich	+1,25 g	11,25 g	
30%	12,40%	gut löslich, dauert doppelt solange wie bei PUR 455	11,63%	gut löslich, etwas langsamer als bei 20%	+1,61 g	12,86 g	
40%	16,53%	gut löslich, dauert doppelt solange wie bei PUR 455	15,50%	löslich, sichtbar langsamer als bei 20%	+2,14 g	15,00 g	
45%		nicht löslich		nicht löslich	+1,36 g	16,36 g	

4.3.2 Bahnnorm CEN/TS 45545

Die Bahnnorm CEN/TS 45545 unterteilt verschiedene Bauteilklassen und ihre Verwendung im Zugverkehr. Anhand der Norm wird die hergestellte Bauteilgruppe als Außenbauteil betrachtet.

➔ EX 3: Externalbodyshell, underframe (äußerer Fahrzeugumpf, Unterbau)

“External surfaces of underframe structure of the body shell (floor) including paint and coating systems (thermal, design and acoustic coating) and protective floor panelling”

Die relevante Gefahrenstufe ist HL2, woraus folgende zu erfüllende Richtwerte entstehen (Tabelle 11).

Tabelle 11: Richtwerte zur Erfüllung der CEN/TS 45545

Short name of requirement set (used for)	Test method Reference	Parameter Unit	Requirement Definition	HL1	HL2	HL3
R6 (IN6B;EX 1a EX3;EX4; EX5; EX6A;EX7; EX8; E2B; E4C)	T02 ISO 5658-2	CHF kWm ⁻²	Minimum	20 ₂₎	20 ₂₎	20 ₂₎
	T03.01 ISO 5660-1 : 50kWm ⁻²	MARHE kWm ⁻²	Maximum	2)	90	60
	T10.04 EN ISO 5659- 2: 50kWm ⁻²	D_s max dimensionless	Maximum	-	600	300
	T11.01 EN ISO 5659- 2: 50kWm ⁻²	CIT_G dimensionless	Maximum	-	1.8	1.5

Anhand von Tabelle 11 ist zu erkennen, dass 3 unterschiedliche Prüfungen durchgeführt werden müssen. Es handelt sich hierbei um die Untersuchungen nach den Normen ISO 5658-2, ISO 5659-2 und ISO 5660-1.

In der ISO 5658-2 wird die seitliche Flammausbreitung am Bauteil bewertet. Hierbei muss mindestens ein Critical Heat Fluxatextinguishment (CHF) von 20 kW/m² erreicht werden. Ein brennendes Abtropfen darf hierbei nicht erfolgen (gekennzeichnet durch die Markierung ²⁾ in der Tabelle 11).

Nach ISO 5659-2 wird die optische Rauchgasdichte und die Rauchgastoxizität ermittelt.

In der ISO 5660-1 wird die maximale Wärmefreisetzungsenergie (Maximum Average Rate of Heat Emission, MARHE) gemessen. Diese Messung erfolgt in einem Cone-Calorimeter. Eine Übersicht der Prüfungen ist in Abbildung 86 zu sehen.

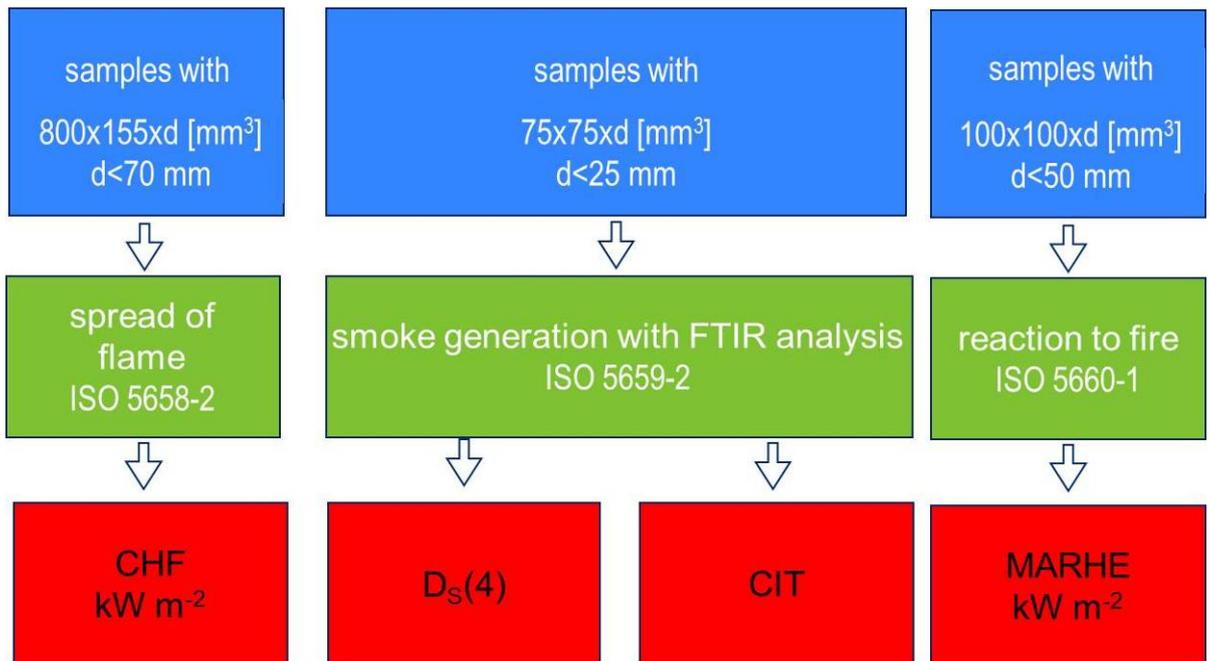


Abbildung 86: Prüfungen und Prüfkörper nach CEN/TS 45545

4.3.3 Brandschutzentwicklung

Als Voruntersuchung zur CEN/TS 45545, welche an den finalen Bauteilen erfolgt, wurden unterschiedliche Methoden untersucht. Zur Materialprüfung wurde die ASTM Norm E 162 durchgeführt.

Diese Prüfung ermöglicht eine Beurteilung der Flammausbreitung und berücksichtigt gleichzeitig die freigesetzte Wärmemenge. Diese Prüfung ist nicht als Ersatz der oben beschriebenen Bahnprüfnormen zu betrachten. Sie ist allerdings hinsichtlich Probengeometrie, Brandbelastung und Auswertung vergleichbar.

Die Norm ASTM E 162 wird in den USA zur Qualifikation von Werkstoffen für den Einsatz in Schienenfahrzeugen verwendet. Nach der Qualifizierungsnorm NFPA 130 (exteriorshell) muss ein Flammenausbreitungsindex von $Is < 35$ erreicht werden.

Für das entwickelte Polyurethan-System mit einem festen Anteil an Flammschutzmittel (12 Gew.-% im gesamt Polyurethan) wurden Platten mit unterschiedlichen Wabenkernen und Glasgehalten am Fraunhofer ICT hergestellt. Diese Proben wurden anschließend einer Brandprüfung nach ASTM E 162 unterzogen.

Material	Struktur	Entflammbarkeit
450/240/FS50	450 g/m ² Glas, Pappwabenkern	Is=50,26
600/210/FS50	2x300 g/m ² Glas, Pappwabenkern	Is=24,66
600/240/FS50/FW	2x300 g/m ² Glas, Faltwabenkern	Is=17,56
600/210/FS50/PH	2x300 g/m ² Glas, Phenolharz-Honeycomb	Is=23,63
450/240/FS50/PH	450 g/m ² Glas, Phenolharz-Honeycomb	Is=39,6

Abbildung 87: Ergebnisse der Brandprüfung nach ASTM E 162

Das Ergebnis dieser Untersuchungsreihe ist, dass das Brandverhalten bei gegebener Flammenschutzmittelmenge erwartungsgemäß vom Glasgehalt der Deckschicht bestimmt wird. Ein Einfluss der verwendeten Kernlage wird nicht eindeutig festgestellt. Bei allen Prüfungen erfolgt kein Durchschlagen der Flamme auf den Kern. Auf der Oberfläche bildet sich eine feste Kohleschicht, die wesentlich für die geringe Flammausbreitung ist. Ein brennendes Abtropfen wird ebenfalls nicht beobachtet. Strukturen mit 600 g/m² Glas (2x300 g/m²) in den Deckschichten genügen der US-Norm für Schienenfahrzeuge.

Neben unterschiedlichen festen Flammenschutzmitteln ist Methyl-DOPO als flüssiges Additiv untersucht worden. Das Methyl-DOPO wurde in das ausgewählte Polyurethansystem eingearbeitet, jedoch konnten die synthetisierten Systeme nicht erfolgreich in der Polyolkomponente gelöst werden. Ebenfalls wurden weitere kommerziell verfügbare flüssige Flammenschutzsysteme (auf Basis DOPO) verarbeitet und getestet. Diese Systeme konnten zwar gelöst werden, jedoch zeigten die Ergebnisse nur eine unbefriedigende Flammenschutzwirkung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die flammeschützende Wirkung von Methyl-DOPO oder den untersuchten flüssigen Flammenschutzmitteln gering ist. Bei vergleichsweise geringer Flammbeanspruchung zeigte Methyl-DOPO eine flammeschützende Wirkung, bei höherer Beanspruchung ist es als Flammenschutz nicht so wirkungsvoll, wie andere Flammenschutzadditive.

Anhand unterschiedlicher Verarbeitungserfahrungen wurde ein maximaler Füllstoffanteil von 12 Gew.-% im gesamten Polyurethan festgelegt. Als feste Flammenschutzmittel kommen hierbei halogen- und bromfreie Mittel zum Einsatz. Es werden zwei unterschiedliche anorganische Flammenschutzmittel mit unterschiedlichen flammhemmenden Mechanismen verwendet. Es handelt sich hierbei um ein für Polyurethan angepasstes Aluminiumhydroxid, welches durch Abspaltung von Wasser, kühlend und gasverdünnend wirkt, und ein Ammoniumpolyphosphat, welches eine intumeszente Wirkung hat (Bildung einer flammhemmenden Schicht durch Aufquellen, zur Verhinderung von Sauerstoffzufuhr).

4.3.4 Prüfung anhand der Bahnnorm vom Prototyp und Musterteil vom Fraunhofer ICT

Die ISO 5658-2 dient zur Bewertung der seitlichen Flammausbreitung am Bauteil. Im vorderen Teil der Probe steht ein Pilotbrenner zur Entzündung der Probe. Durch eine Wärmestrahlungsquelle mit einem Winkel von 15 ° und einem definierten Abstand wird ein Strahlungsprofil auf dem Probekörper erzeugt (rote Linie im Diagramm in Abbildung 88). Der Aufbau und oberflächliche Strahlungsverlauf sind in Abbildung 88 dargestellt.

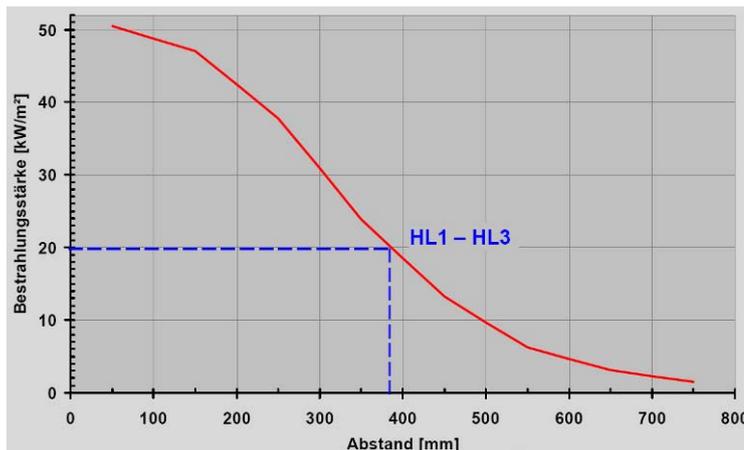


Abbildung 88: Grundlage und Aufbau zur Ermittlung der seitlichen Flammausbreitung nach ISO 5658-2

Soll ein CHF-Wert von 20 kW/m² erfüllt werden, so muss die seitliche Flammausbreitung unterhalb von 400 mm liegen. Beispielhaft würde so bei einem Abstand von 300 mm ein CHF-Wert von 30 kW/m² erreicht.

An der finalen Rezeptur erfolgten Messungen nach ISO 5658-2 an Bauteilen vom Fraunhofer ICT und an Bauteilen aus der Produktion der Firma DECS. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Ergebnisse der ISO 5658-2

Prüfnorm	Parameter und Einheit	Definition	HL2	ICT	Decs
ISO 5658-2	CHF kWm ⁻²	Minimum	20	22,5	21,23

Beide Ergebnisse mit jeweils drei ermittelten Werten liegen oberhalb des geforderten Wertes von 20 kW/m². Die geringfügige Veränderung in den Werten bei der Firma DECS in der Produktion liegt an der Anpassung der Parameter an die Produktionsbedingungen. Nur durch Anpassung der Flammschutzadditive ist die Erfüllung eines CHF-Wertes oberhalb von 20 möglich.

Die Ergebnisse der Messung der optischen Rauchgasdichte und der Rauchgastoxizität nach ISO 5659-2 erfolgen in einer Rauchdichtekammer. Die Untersuchungen zur qualitativen und quantitativen Zusammensetzung von Rauchgasen zur Beurteilung der Toxizität werden mit FTIR-Spektroskopie (Fourier Transformierte Infrarot Spektroskopie) durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen nach ISO 5659-2 sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Ergebnisse der ISO 5659-2

Prüfnorm	Parameter und Einheit	Definition	HL2	ICT	Decs
ISO 5659-2: 50kWm ⁻²	D_s max dimensionless (opt. Dichte)	Maximum	600	259	272
ISO 5659-2: 50kWm ⁻²	CIT_G dimensionless (Toxizität)	Maximum	1.8	0,10	0,16

Beide notwendigen Werte liegen unterhalb des geforderten Maximalwertes. Eine leichte Abweichung ist auch hier zwischen den Messwerten an Platten aus den Technikumsversuchen am Fraunhofer ICT und der Produktion bei der Firma DECS zu erkennen.

Die Messwerte für die optische Rauchgasdichte und -toxizität erfüllen alle drei Gefahrenstufen von HL1 bis HL3.

Die letzte notwendige Untersuchung zur Erfüllung der vorläufigen Bahnnorm CEN/TS 45545 ist die ISO 5660-1. Hierbei wird in einem Cone-Calorimeter bei einer Bestrahlung von 50 kW/m² die maximale Wärmefreisetzungsenergie (Maximum Average Rate of Heat Emission, MARHE) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Ergebnisse der Prüfung nach ISO 5660-1

Prüfnorm	Parameter und Einheit	Definition	HL2	ICT	Decs
ISO 5660-1	MARHE kWm ⁻²	Maximum	90	98,9	99,6

Trotz einer angepassten Rezeptur wird der Richtwert für die HL2 Gefahrenstufe von 90 kW/m² überschritten. Eine weitere Anpassung der Rezeptur könnte zur Erfüllung des MARHE-Wertes führen, aber die Erreichung der seitlichen Flammausbreitung könnte problematisch werden. Somit erreicht das Composite-Material für die ISO 5660-1 Norm eine Gefahrenstufe von HL1.

Zusammenfassend zeigt die Prüfung der neuartigen Compositestruktur, dass viele Anpassungen und Änderungen der Rezeptur notwendig sind, um die Norm zu erfüllen. Insgesamt konnte die erste Gefahrenstufe (HL1) erreicht werden. Weitere Anpassungen der Rezeptur könnten eine Absenkung des MARHE-Wertes ermöglichen und hierdurch das Erreichen der Gefahrenstufe HL2 und ggf. HL3. Diese Gefahrenstufen sind für Bauteile im Bereich des äußeren Fahrzeuggumpfes (EX3) Anforderung R6 ermittelt worden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass das Composite in den Anforderungen R7 und R9 die Gefahrenklasse HL2 und ggf. sogar die Klasse HL3 erreicht. Eine Verwendung als Bauteil im Bereich von Zugdächern (laut Norm EX2) ist dadurch genauso möglich, wie eine Verwendung im Fußbodenaufbau von Zügen (IN16).

4.4 Gefaltete Kernstrukturen

(Marc Grzeschik)

4.4.1 Alternative Halbzeuge

Für die Kernmaterialbereitstellung der Versuchsproben der Polyurethan-Sandwichstrukturen sowie für das angestrebte Demonstratorbauteil mussten am IFB sowohl neue Faltstrukturen ausgelegt, berechnet und getestet werden, als auch geeignete Materialien für die Faltkernherstellung und die im Projekt geforderten speziellen Anforderungen untersucht werden. In vorangegangenen Projekten am IFB wurden vor allem phenolharzimprägnierte Aramidpapiere zu Faltstrukturen verarbeitet. Diese Halbzeuge zeichnen sich besonders durch sehr gute gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften mit einhergehenden guten FST- (Fire, Smoke, Toxicity) Eigenschaften aus. Der Anwendungsbereich dieser Materialien liegt vor allem in der Luftfahrt. Da die reinen Materialkosten der Aramidpapiere sehr hoch sind, wurden alternative künftige Basismaterialien für die Faltkernherstellung untersucht.

Alle untersuchten Materialien wurden am IFB mittels der dort zur Verfügung stehenden Rapid-Prototyping-Anlage und zum Teil mit der kontinuierlich produzierenden Pilotanlage bearbeitet. Die Rapid-Prototyping-Anlage zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass sie optimal dazu geeignet ist, innerhalb von kürzester Zeit verschiedenste ebene Halbzeuge zu bearbeiten und unterschiedlichste Faltgeometrien auf die zu untersuchenden Materialien aufzubringen. Dabei ist es möglich die Werkzeugeinstellungen so auf die Materialien anzupassen, dass diese schonend gefaltet werden können und ein Optimum aus Faltbarkeit und den mechanischen Eigenschaften erzielt wird. Für jedes einzelne Halbzeug mussten Werkzeugparameter gefunden werden, die die materialspezifischen Eigenschaften berücksichtigten und somit eine Faltung ermöglichten.

Das Design der Faltgeometrie ergibt sich aus verschiedenen Randbedingungen, wie z.B. der Bauraumgeometrie, der Höhe des Faltkerns, der gewünschten Dichte und den gewünschten mechanischen Eigenschaften. Durch am IFB entwickelte Tools zum Entwerfen und Auslegen von Faltkerngeometrien, wurden die in diesem Projekt umgesetzten und gefalteten Geometrien entworfen und definiert (vgl. Abschnitt 4.4.2).

Untersucht wurden im Verlaufe des Projektes im Wesentlichen Folien aus thermoplastischen Kunststoffen und alternative Halbzeuge, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt bzw. ökologisch abbaubar sind. Neben der Hauptanforderung, dass der Faltprozess erfolgreich auf das Material adaptiert werden konnte, lag ein Fokus darauf, dass das Halbzeug ohne zusätzliche spezielle Anforderungen an den Arbeitsschutz am IFB verarbeitet werden konnte.

Am IFB lagen bereits zu Projektbeginn positive Erfahrungen mit Hochtemperaturthermoplastfolien aus PEEK (Polyetheretherketon), PSU (Polyphenylsulfon) sowie PEI (Polyetherimid) vor. Weil diese Folien sehr teuer sind und ein weiterer Fokus im PURtrain-Projekt auf kostengünstigen Halbzeugen lag, wurden diese Materialien nicht näher untersucht.

Tabelle 15: Untersuchte Thermoplastfolien zur Herstellung von Faltern

Material	Materialdicke
Polycarbonat (PC)	0,175 mm 0,300 mm
PC + ABS-Blend	0,200 mm
PET (Polyethylenterephthalat)	0,100 mm
PP (Polypropylen)	0,100 mm

Die Übersicht in der Tabelle 15 zeigt die verschiedenen im Verlaufe des Projektes untersuchten Thermoplastfolien. Der Faltprozess konnte erfolgreich auf alle aufgeführten Materialien adaptiert werden, so dass diese hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften untersucht werden konnten.

Die Folien aus PET und PP konnten ebenfalls mit den am IFB zur Verfügung stehenden Werkzeugen gefaltet werden. Da die Glastemperaturen (PET bei ca. 70°C) der beiden Folien unterhalb der geforderten Betriebstemperatur (80°C) des Bauteils lagen, wurden diese im Projekt nicht weiter verwendet.

Die verschiedenen Varianten der Polycarbonatfolien (Makrofol DE 6-2) sowie die Polycarbonatfolien + ABS Blend (Makrofol TP RD NIJ 0277 1-2) wurden innerhalb des Projektes dem IFB durch den Projektpartner Bayer MaterialScience zur Verfügung gestellt. Beispielhaft ist in Abbildung 89 ein Faltmuster aus einer Polycarbonatfolie abgebildet. Weil das reine Polycarbonat keine ausreichende Anbindung an das aufgesprühte glasfaserverstärkte Polyurethansystem aufzeigte, wurde im Verlaufe des Projektes auf einen Polycarbonatfilm mit Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS)-Blend umgestiegen. Dieser modifizierte Polycarbonatfilm hat bereits einen Flammenschutz integriert und sollte die Anbindung an das Deckschichtsystem verbessern.

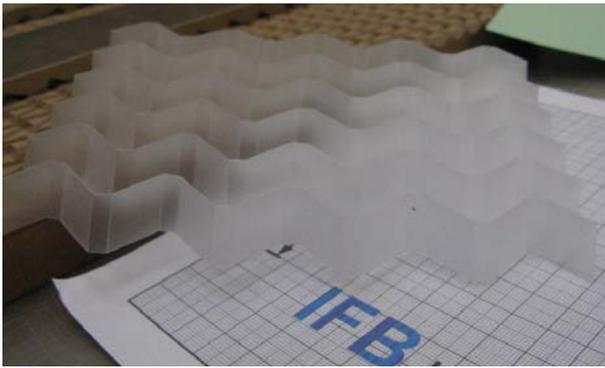


Abbildung 89: Faltkernmuster aus Polycarbonatfolie (Makrofol 6-2, 300 µm) Geometrie #266

Neben den Thermoplastfolien wurden auch mögliche alternative Materialien, die aus nachwachsenden Rohstoffen oder aus recycelbaren Rohstoffen bestehen, auf ihre prinzipielle Eignung zur Herstellung von Faltkernen hin untersucht. So wurden verschiedene Baumwollpapiere, Hanfpapier und das Flammenschutzpapier „Flamexx Industry“ in Kombination mit einem leinölbasiertem Epoxidharzsystem als Prepreg erfolgreich zu Faltkernen verarbeitet. Neben diesen Prepregvarianten wurden vorgefertigte Halbzeuge in Form biobasierter und bioabbaubaren Kunststofffolien untersucht. Die besten Resultate hinsichtlich der Verarbeitbarkeit wurden mit PLA-PU (PolyLacticAcid – PU), PA11/PA12 (Polyamid) und PHA (Polyhydroxydsäure) erzielt.

Da diese Materialien noch nicht in großen Mengen zur Verfügung standen, wurden Sie nicht hinsichtlich Ihrer Eignung zum Einsatz im Demonstratorbauteil untersucht. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass diese Materialien sich überhaupt zu Faltkernen verarbeiten lassen (Abbildung 90) und somit großes Potential haben, um ressourcenschonenden Leichtbau mit Faltkernen zu betreiben.

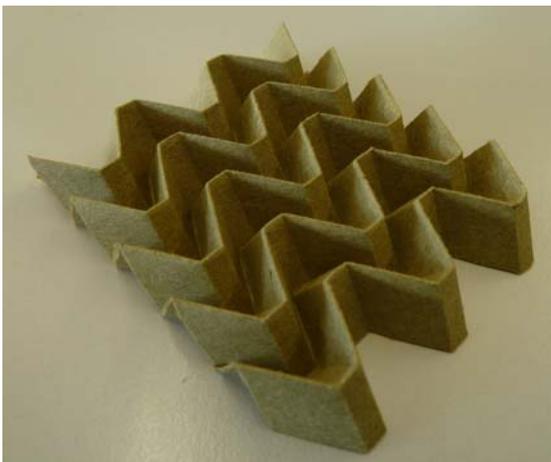


Abbildung 90: Faltkern aus cellulosebasiertem, flammhemmendem Papier (#266)

4.4.2 Geometrieauslegung

Faltkerne bieten gegenüber konventionellen Kernwerkstoffen den Vorteil, dass ihre Geometrie der späteren Endkontur ideal angepasst werden kann. Dies wurde am Anfang des Projektes auch für das zu realisierende Bauteil in Betracht gezogen.

Nach der ersten Festlegung auf die Motoreinhausung im Unterflurbereich als Demonstratorbauteil durch die Projektpartner war die Kernhöhe noch nicht festgelegt. Da das Originalbauteil aus Aluminiumblechen monolithisch aufgebaut ist und diese Struktur nicht als FEM-Modell vorlag, mussten erst durch Berechnungen des Projektpartners DLR-FK die tatsächlichen Lasten für die Auslegung der Sandwichstruktur ermittelt werden. Aus diesem Grund wurden die ersten Versuche mit den zu untersuchenden Materialien am IFB mit einer Geometrievariante (#266 – IFB-interne Geometriebezeichnung) mit einer Kernhöhe von 15 mm durchgeführt. Diese Geometrie ist an der kontinuierlich produzierenden Prototypenanlage installiert, so dass die Materialien zum Teil auch mittels dieser Anlage getestet werden konnten. Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Werkstoffe reicht es, sie anhand einer einzigen Geometrie zu vergleichen. Auf die mechanischen Prüfungen und deren Ergebnisse wird in Absatz 4.4.3 näher eingegangen.

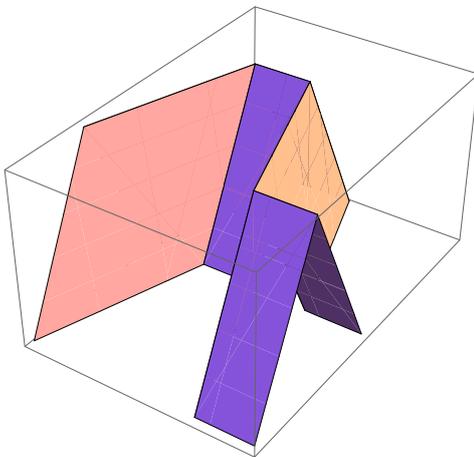


Abbildung 91: Einheitszelle der Geometrie #266 mit einer Kernhöhe von 15 mm

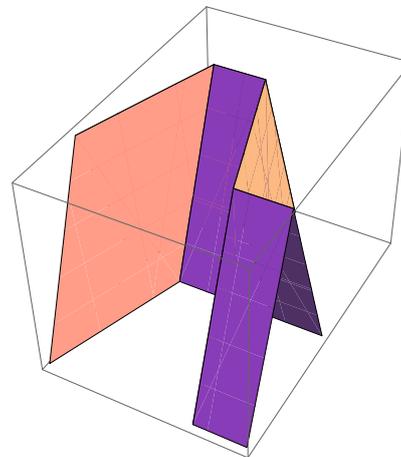


Abbildung 92: Einheitszelle Geometrie #174 mit 20 mm Kernhöhe

Die Geometrie 266 (Einheitszelle), wie in Abbildung 91 dargestellt, bietet durch ihre offenzellige Struktur die Möglichkeit der Drainagefähigkeit bzw. der Ventilierbarkeit. Dabei bleiben im späteren Verbund in der Faltern W-Richtung durchgängig Kanäle offen. Neben diesem funktionalen Aspekt weist die Geometrie #266 gute Druck- und ausgeglichene transversale Schubeigenschaften auf.

Eine weitere im Projekt realisierte Geometrie, wie in Abbildung 92 abgebildet, hat die IFB-interne Nummer 174 und eine Kernhöhe von 20 mm. Diese Geometrie ist ebenfalls ventilier- und drainierbar. Zur Untersuchung des Einflusses des Verpressens der Sandwichverbunde und der damit verbundenen Stauchung des Faltern auf die Druckeigenschaften des Kerns in Dickenrichtung wurde ein Derivat aus der Geometrie 174 entworfen, das im Vergleich zur originalen Geometrie ein um 1 mm niedrigere Kernhöhe aufweist. Die Dicke der aufgespritzten Deckschichten wurde durch das Fraunhofer ICT in einem neuen Verfahren auf ca. 0,5 mm bestimmt. Dies bedeutete, dass der Sandwich-verbund bestehend aus den Deckschichten und dem Faltern auf eine Höhe von ca. 21 mm kam, welche durch die Konsolidierung der Deckschichten in

einer beheizten Presse durch die Höhe des darin enthaltenen Werkzeugs auf eine fixe Höhe von 20 mm verpresst wurde. Durch die Höhe des Faltkerns von 19 mm konnte der Sandwichverbund mit den gleichen Parametern hergestellt werden mit dem Vorteil, dass der Kern unbeschädigt und stauchungsfrei bleiben konnte.

Bei den einzelnen vom IFB bereitgestellten Faltkernpaneelen mit den Geometrien 174 und 266 wurde seitens der die Kerne weiterverarbeitenden Projektpartnern Bedenken hinsichtlich des Handlings der einzelnen Faltkernpaneelle beim Sprühprozess geäußert. Um die Fläche der einzelnen Bauteile mit Faltkernen abzudecken, müssen diese in einer Richtung aneinander gereiht werden und beim späteren Herstellen müssen die abgelegten Kerne einmal komplett um 180° samt Form gedreht werden (vgl. Abbildung 101). Die offenzellige Geometrie hat den Nachteil, dass die Faltkerne ohne Deckschichten sehr biegeschlaff sind und somit bei langen Paneelen stark durchhängen können, wenn sie nicht gestützt werden. Im Gegensatz dazu sind die ebenfalls im Projekt verwendeten Pappwaben durch ihren Aufbau auch ohne Deckschichten sehr steif und ließen sich sehr gut beim Sprühprozess verarbeiten.

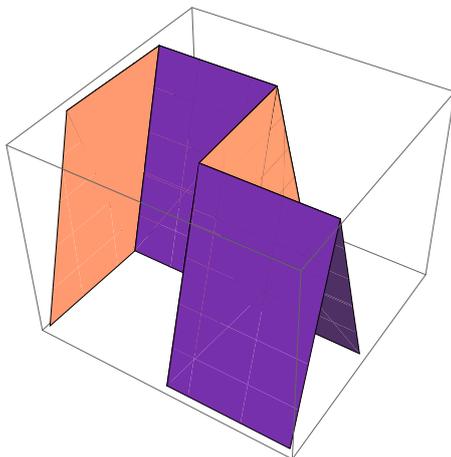


Abbildung 93: Einheitszelle Geometrie #571 mit 25 mm Kernhöhe

Um den Projektpartnern das Handling der Faltkerne zu erleichtern und da die Kernhöhe für den finalen Demonstrator auf 25 mm festgelegt wurde, wurde eine neue Geometrie #571 mit einer Kernhöhe von 25 mm (Abbildung 93) ausgelegt. Die Einheitszelle dieser Geometrie weist eine sogenannte Blockfaltung auf, bei der sich die parallel zur L-Richtung liegenden seitlichen Flächen der einzelnen Einheitszellen gegenseitig abstützen. Dies bewirkt eine starke Versteifung der Faltkernpaneelle, was dem Durchbiegen der einzelnen Faltkerne beim Handeln entgegenwirkt und es so ermöglicht die Faltkerne vergleichbar gut wie die Pappwaben in dem Sprühprozess zu verwenden, da ein Durchbiegen der Faltkerne und somit ein Auseinanderklappen der einzelnen Faltkernbögen verhindert wird. Ein weiterer Effekt dieser Geometrie ist die Steigerung der Steifigkeit und Festigkeit in Dickenrichtung des Kerns.

Tabelle 16: Ergebnisse der Simulation der Druck- und transversalen Schubeigenschaften der Faltkerngeometrie 571

	Festigkeit [MPa]	Steifigkeit [MPa]
Druck	1,7	100
Schub L	0,9	90
Schub W	0,7	70

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse aus der Simulation der Druck- und transversalen Schubeigenschaften der Faltkerngeometrie 571 aufgelistet. Die Ergebnisse der Simulation lagen weit über den für das Bauteil notwendigen Werten, so dass diese Geometrie für die Fertigung des Demonstrators genutzt wurde.

4.4.3 Mechanische Versuche

4.4.3.1 Druck- und transversale Schubversuche an Sandwichverbunden

Zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte der verschiedenen Kernmaterialien sowie der verschiedenen Faltkernvarianten wurden am IFB Druck- (DIN 53291) sowie transversale Schubversuche (DIN 53294) nach Norm durchgeführt. In Abbildung 94 ist der Prüfaufbau für diese Versuche dargestellt. Sämtliche Versuche wurden mit der am IFB zur Verfügung stehenden Universalprüfmaschine Schenck-Trebel Rm250 durchgeführt. Die Messdaten wurden mit einem Messverstärker der Firma HBM (Spider 8) und einem Rechner aufgezeichnet. Die Prüfgeschwindigkeit für den Druck- und den transversalen Schubversuch beträgt jeweils 0,5 mm/min. Die Stauchung bzw. die Verschiebung der Proben wurde mit einem Wegaufnehmer (Abbildung 94) direkt an der Probe gemessen.



Abbildung 94: Prüfaufbau für den Druckversuch (li) und den transversalen Schubversuch (re)

Alle Prüfkörper wurden auf die gleiche Art hergestellt. Die Faltkerne wurden aus den einzelnen Materialien gefaltet und anschließend mit GFK-Deckschichten verklebt. Dabei wurde ein Zweikomponenten Kleber (A10/B10) benutzt. Bei der Herstellung der transversalen Schubproben wurden die Sandwichproben in einem weiteren Schritt mit einem Filmkleber (Hexcel Redux 609) auf die Krafteinleitungselemente geklebt.

Tabelle 17: Spezifische dichtebezogene Kennwerte der untersuchten Materialien in MPa/(kg/m³); Faltkerngeometrie #266

Basismaterial	Druck		Schub L		Schub W	
	Festigkeit	Steifigkeit	Festigkeit	Steifigkeit	Festigkeit	Steifigkeit
Kevlarprepreg	0,016 - 0,023	0,86 - 3,27	0,006 - 0,02	0,67 - 2,62	0,009 - 0,015	0,63 - 2,72
PP 100 µm	0,004	0,22				
PET 100 µm	0,007	0,52	0,006	0,615	0,003	0,24
PC 175 µm	0,007	0,3				
PC 300 µm	0,012	0,5	0,01	0,41	0,005	0,18
PC abs blend	0,009	0,54	0,008	0,61	0,005	0,24
Pappwabe 1	0,024	2				
Pappwabe 2	0,016	2,72				

In Tabelle 17 sind die spezifischen (dichtebezogenen) Kennwerte aus den Druck- und transversalen Schubversuche der einzelnen Materialien aufgelistet. Die Wertebereiche, die für Kevlarprepreg angegeben sind, geben einen Überblick über verschiedene bereits am IFB realisierte Geometrien. Die beiden als Pappwabe 1 und Pappwabe 2 bezeichneten Materialien sind Pappwaben, die von der Firma KraussMaffei beigelegt wurden. Diese Materialien wurden für die zahlreichen und umfangreichen Vorversuche am Fraunhofer ICT genutzt, um die Parameter für den Sprühprozess anzupassen und zu optimieren. Die dafür erforderliche Menge an Material wäre mit Faltkernen innerhalb des Projekt-budgets nicht darstellbar gewesen.

4.4.3.2 Einfluss des Ausschäumens beim Sprühprozess auf die mechanischen Eigenschaften von Faltkernen

Beim Applizieren der glasfaserverstärkten PU-Deckschichten schäumt das PU-System die offenzelligen Kernstrukturen teilweise aus (Abbildung 97). Durch das Ausschäumen der offenen Zellen wird die Drainagefähigkeit des Kerns stark eingeschränkt und stellenweise komplett verhindert. Der Einbuße an Multifunktionalität steht eine Steigerung der mechanischen Kennwerte gegenüber. Um den Einfluss zu quantifizieren wurden Druckproben aus dem gleichen Kernmaterial (PC-ABS-Blend Folie) und gleicher Geometrie (#174) mit unterschiedlich angeordneten Deckschichten hergestellt.

Tabelle 18: Ergebnisse aus dem Druckversuch DIN 53291 für Faltkerne aus ABS-Blend mit aufgeklebter GFK-Deckschicht und mit aufgesprühter PUR-Deckschicht

	Festigkeit [MPa]	Steifigkeit [MPa]
#174 + Gfk	0,83	55
#174 + PU	1,95	110

Eine Probenreihe wurde mit einem Zweikomponentenkleber (A10/B10) mit zugekauften GFK-Deckschichten verklebt und im Druckversuch im Vergleich zu Faltkernen mit aufgesprühnten glasfaserverstärkten Deckschichten getestet. Die Ergebnisse in Tabelle 18 zeigen mindestens eine Verdopplung der mechanischen Eigenschaften sowohl bei der Steifigkeit als auch bei der Festigkeit. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Faltkerne stark ausgeschäumt wurden und bei dem Test das PU-System großen Einfluss auf die Kerneigenschaften ausübt.

4.4.3.3 Untersuchung des Schädigungsverhaltens von Faltkernen beim lokalen Verpressen

Die komplexen Werkzeuge zur Bauteilherstellung beinhalten bereits sämtliche Aussparungen, Bohrungslöcher, Vertiefungen und Sicken, die funktional notwendig sind. Zudem wird zum Schließen des Sandwichverbundes der Randbereich auslaufend gestaltet mit dabei abnehmender Kernhöhe. Diese Elemente werden dem Kernmaterial beim Verpressen aufgezwungen. Um den Einfluss eines lokalen Verpressens des Faltkerns auf die angrenzenden Zellen einschätzen zu können, wurden Pressversuche durchgeführt, bei denen ein Stempel mit 50 mm Durchmesser (Abbildung 95) benutzt wurde, um die Faltkerne lokal zu verpressen.



Abbildung 95: Stempel zum lokalen Verpressen von Faltkernen

Bei den Versuchen wurden sowohl stabilisierte (Abbildung 96) als auch unstabilisierte Faltkerne getestet. In Abbildung 96 ist deutlich zu erkennen, dass die Schädigungsfläche lokal sehr begrenzt ist und dass die angrenzenden Zellen nicht kollabieren bzw. stark verformt werden. Das Abbildung 96 zu erkennende Versagensmuster konnte bei allen Versuchen nachvollzogen werden. Dadurch wurde sichergestellt, dass Faltkerne beim Konsolidieren der Deckschichten in der Presse durch das Aufprägen z.B. von Sicken und Bohrungslochern nicht großflächig geschädigt werden.

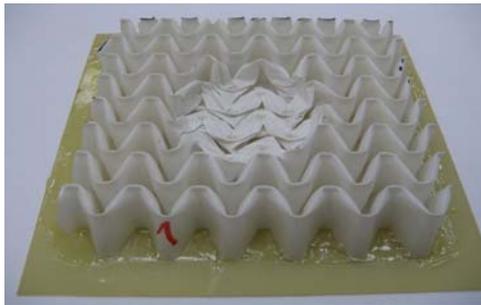


Abbildung 96: Faltkern aus PC-ABS Blend Folie nach lokaler Verpressung

4.4.3.4 Zugversuche zur Deckschichtcharakterisierung

Eine Herausforderung im Projekt war die exakte Bestimmung der mechanischen Kennwerte der aufgespritzten Deckschichten. Da es das Herstellungsverfahren nicht zulässt separate ebene Platten ohne Kernmaterial zu bauen, um daraus Materialproben zu gewinnen, deren mechanischen Eigenschaften man dann an Hand von Normversuchen bestimmen könnte, war es notwendig die Deckschichten von fertigen Sandwichverbunden zu lösen, um diese dann anschließend zu testen. Da das Demonstratorbauteil als reales Bauteil zu Demonstrations- und Testzwecken durch die Firma Bombardier an einem sich in Betrieb befindlichen Schienenfahrzeug angebaut werden soll und dabei die Deckschichten dauerhaft Temperaturen von bis zu 90°C ausgesetzt sein werden, war es notwendig die Deckschichten nicht nur bei Raumtemperatur zu charakterisieren. Durch Zugversuche bei 75°C und 90°C sollten das Materialverhalten der Deckschichten unter Temperatureinfluss ermittelt werden.

Tabelle 19:Steifigkeiten und Festigkeiten der PU-Deckschichten aus Zugversuchen bei Raumtemperatur (RT), bei 75°C und 90°C

Prüfbedingung	Materialbezeichnung	Festigkeit [MPa]	Steifigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
RT	600-270	181	13,3	1,85
	600-435	239	9,0	2,01
75°C	600-270	148	10,8	1,79
	600-270_Q	188	11,8	1,92
90°C	600_300#60Q_u	207	12,2	2,16
	600_370_o_Q	234	13,8	2,20
	600_370_FS_50	169	13,0	1,53

Zur Durchführung der Versuche wurde ebenfalls die Universalprüfmaschine Schenck-Trebel Rm 250 benutzt. Zur Dehnungsmessung wurden Dehnungsmessstreifen direkt mittig auf die Probenoberfläche geklebt. Die Versuche wurden in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 527-4 durchgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. In Tabelle 19 sind die Ergebnisse aus den Versuchen bei Raumtemperatur, 75°C und 90°C aufgelistet.

Die Ergebnisse zeigen zum einen eine recht große Streuung der Werte und zum anderen keinen nennenswerten Einbruch der mechanischen Eigenschaften unter

Temperatureinfluss. Damit konnten die mechanischen Eigenschaften der Deckschichten verifiziert werden und als Berechnungsgrundlage in die Auslegung der Gesamtstruktur mit eingehen.

4.4.4 Weiterentwicklung des kontinuierlichen Herstellungsprozesses

Die am IFB bestehende Prototypenanlage zur kontinuierlichen endlosen Herstellung von Faltkernen aus ebenen Halbzeugen wurde hinsichtlich einer Automatisierung weiterentwickelt. Im Projektzeitraum wurde in diese Anlage ein Materialpuffer integriert. Zwischen die Prägeeinheit der Versuchsanlage für die Faltkernherstellung und der eigentlichen Aufstelleinheit wurde ein Materialpuffer implementiert. In diesem Speicher kann bis zu drei Meter geprägtes Material zwischen gespeichert werden und somit die Prägung von der Aufstellung entkoppelt werden. Zudem bietet der entwickelte Speicher die Möglichkeit, eine definierte Spannung auf die Papierbahn vor der Aufstelleinheit aufzubringen.

Wie sich in den letzten Versuchsreihen gezeigt hat, ist eine vorgegebene Papierspannung für die Aufstellung wichtig, da es sonst zu einem variierenden Faltbild kommen kann. Ohne diesen Speicher war es jedoch nicht möglich alleine durch die noch manuell angetriebene Prägeeinheit diese Spannung sicher einzustellen. Des Weiteren konnte durch die Entkopplung auch eine deutlich einfachere Versuchsdurchführung erreicht werden. In einer späteren „industriellen“ Anlage wird ein derartiger Speicher fester Bestandteil werden, wobei die Erfahrungen an der Versuchsanlage mit in die Entwicklung im industriellen Maßstab eingehen werden.

4.4.5 Bemusterung

Der Firma KraussMaffei wurden zu Beginn des Projektes ca. 1,5 m² Faltkerne aus Aramidpapier zur Verfügung gestellt, damit im dortigen Technikum erste Erfahrungen mit dem glasfaserverstärkten PUR-Sprühprozess und dem Zusammenwirken mit den Faltkernen gesammelt werden konnten. Die Vorversuche zeigten, dass der Sprühprozess im Zusammenspiel mit Faltkernen funktioniert. In Abbildung 97 ist zu erkennen, dass die offenen Zellen der Faltkerne stark ausgeschäumt wurden, was sich positiv auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt, da der Schaum eine unterstützende Wirkung hat. Dabei werden die Ventilierbarkeit und die Drainagefähigkeit des Faltkerns jedoch stark eingeschränkt.



Abbildung 97: Vorversuch bestehend aus einem Faltkern aus Aramidpapier und glasfaserverstärkten aufgesprühten PU-Deckschichten mit stark ausgeschäumten Zellen

Das Fraunhofer ICT wurde mit mehreren Quadratmetern Faltkerne aus Polycarbonatfolie (Makrofol DE 6-2) bemustert, um die am Fraunhofer ICT neu aufgebaute Anlage zum Aufsprühen von glasfaserverstärkten Polyurethansystemen auf Kernmaterialien auch mit Faltkernen zu testen. Die Panelgröße betrug dabei 800 mm x 500 mm. Der Versuche dienten zum einen dazu, die Parameter der Anlage auf Faltkerne abzustimmen und zum anderen dazu, erste Sandwichverbunde mit Faltkernen als Kernmaterial und den aufgesprühten glasfaserverstärkten PU-Deckschichten herzustellen.

Bei den fertigen Sandwichplatten hat sich gezeigt, dass die Materialkombination aus Polycarbonat im Faltkern und dem PU-System in der Deckschicht bei dem verwendeten Herstellungsverfahren nur eine ungenügende Anbindung der Deckschicht an den Kern bietet. Die Deckschichten konnten ohne zusätzliches Werkzeug mit bloßen Händen vom Kern abgeschält werden, was inakzeptabel ist. Da es zum Zeitpunkt dieser Vorversuche noch keine definierte Anforderung an die Geometrie der Faltkerne gab, wurde eine einfache Zig-Zag-Geometrie zur Bemusterung ausgewählt (Abbildung 98).



Abbildung 98: Faltkernpaneele aus Polycarbonat für Anbindungsversuche am Fraunhofer ICT

Um dem Problem der schlechten Anbindung der aus reinem Polycarbonat hergestellten Faltkernen entgegenzutreten wurde das Fraunhofer ICT mit ca. 3,5 m² Faltkernen aus einer Polycarbonatfolie mit ABS-Blend (Materialdicke = 200 µm) bemustert. Diese Faltkerne wurden mit einer Höhe von 20 mm (Geometrie # 174) ebenfalls zu einer Panelgröße von ca. 500 mm x 800 mm gefertigt.

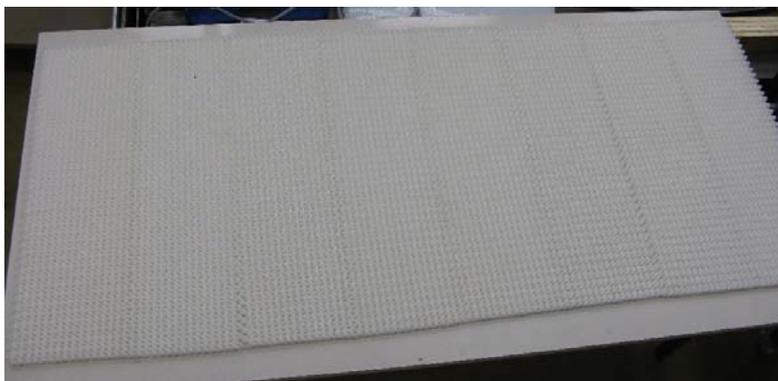


Abbildung 99: Faltkerne gefertigt aus PC-Folie mit ABS-Blend (Geometrie #174)

Weitere 3,5 m² Faltkerne aus der beschriebenen PC-Folie mit ABS-Blend wurden mit einem Derivat der getesteten Geometrie #174 mit einer auf 19 mm reduzierten Kernhöhe (Abbildung 99) hergestellt und dem Fraunhofer ICT für weitere Versuche zur Verfügung gestellt. Dickenmessungen der Deckschichten aus dem glasfaserverstärkten PUR-System des Fraunhofer ICT ergaben, dass die Deckschichten eine Dicke von durchschnittlich 0,48 mm aufweisen. Das zur Herstellung der Sandwichverbunde benutzte Presswerkzeug am Fraunhofer ICT produziert Platten mit einer Gesamthöhe von 20 mm. Die Geometrie #174 hat eine Höhe von 20 mm, weshalb die Faltkerne bereits bei der Herstellung um 1 mm gestaucht und somit vorgeschädigt werden. Um dies zu vermeiden und den Effekt der Stauchung im Zusammenspiel mit dem Herstellungsverfahren untersuchen zu können, wurden Versuche mit reduzierter Kernhöhe durchgeführt und mechanisch geprüft.



Abbildung 100: Faltkerne (#571) zum Demonstratorbau, ca. 12 m²

Die finalen Demonstratorbauteile wurden bei der Firma DECS auf einer dort vorhandenen Anlage hergestellt. Für die Herstellung eines Demonstratorbauteils mit Faltkernen als Kernmaterial wurden am IFB insgesamt 13 m² Faltkerne mit der Geometrie #571 (Abbildung 100) aus phenolharzimprägnierten Aramidpapier (N636) hergestellt. In Abbildung 101 sieht man die Fixierung der Faltkerne in einem Holzrahmen. Dieser Holzrahmen diente als Fertigungshilfsmittel. Er erleichterte das Einbringen des Kernmaterials in den Arbeitsraum des Roboters und machte das Drehen der Kerne in kurzer Zeit möglich. Nach dem Besprühen der Kerne wurde mit dem Holzrahmen der komplette Aufbau samt Kernen in das Presswerkzeug gebracht, wo dann das fertige Sandwichbauteil durch Aufbringen von Druck und Temperatur hergestellt wurde.



Abbildung 101: Faltkerne aus phenolharzimprägniertem Aramidpapier (Geometrie # 571) vorbereitet bei der Firma DECS zur Demonstratorbauteilherstellung

Das erfolgreich gefertigte Bauteil konnte danach der Presse entnommen werden (Abbildung 102). Durch den Pressvorgang wurde die finale Geometrie mit sämtlichen Vertiefungen und Bohrlocher für die Inserts und Anbauteile auf das Bauteil aufgebracht. Mit dem Bauteil konnte erfolgreich gezeigt werden, dass Faltkerne mit dem neu entwickelten Herstellungsverfahren zur Herstellung von Sandwichverbunden mit aufgesprühten faserverstärkten PU-Systemen sehr gut funktionieren.



Abbildung 102: Fertiges Demonstratorbauteil mit Faltkernen als Kernmaterial

5 Prototypenbau

5.1 Bauteilberechnung

(Gerhard Kopp)

Im Folgenden wird die statische Berechnung der Motoreinhausung beschrieben. Des Weiteren werden Strukturoptimierungen durchgeführt, um Möglichkeiten aufzuzeigen, wie die in Kapitel 3.3 beschriebene Endlosfaserstrukturen gegebenenfalls in das Bauteil integriert werden könnten.

5.1.1 Statische Dimensionierung

Für die erste Dimensionierung des Sandwichaufbaus (Kombination aus Deckschichteigenschaften und Kernstrukturen) wurden zuerst analytische Abschätzungen basierend auf der klassischen Sandwichtheorie herangezogen (vgl. [Kop-09, Kop-10, Zen-95, Zen-97]). Hier ist insbesondere auf Grund der Größe der Strukturen die erreichbare Biegesteifigkeit der Sandwichbauteile in Abhängigkeit der Bauteilhöhe relevant, um die gleichen mechanischen Eigenschaften wie die Referenzstruktur bei gleichzeitiger Einhaltung des Bauraums zu gewährleisten. Es zeigte sich beispielsweise bei den Bodenplatten, dass mit einem 25 mm hohen Sandwichaufbau mit PUR-Deckschichten eine Bauteilsteifigkeit erzielt werden kann, der bessere mechanische Steifigkeiten aufweist, als die bisherige Struktur und somit noch weitere Versteifungselemente integrieren kann.

Die Material- und Simulationsmodelle für die anschließende statischen Auslegungen sind mittels Werkstoff- und Komponententests an unterschiedlichsten Sandwichkonfigurationen validiert worden, da zu Projektbeginn für die untersuchten Material- und Sandwichaufbauten keine Materialkarten zur Verfügung standen. (vgl. Kapitel 4) Anschließend sind drei verschiedene Varianten von FEM-Modellen mittels des makro-mechanischen Ansatzes, des meso-mechanischen Ansatzes und des abstrahierten Plattenmodells abgeleitet worden, um die Genauigkeit der Berechnung anhand eines 4-Punkt-Biegeversuchs abzustimmen. Diese Varianten und deren Berechnungsgenauigkeit im Vergleich zum Versuch sind in Abbildung 103 am Beispiel eines Sandwichaufbaus mit 40 mm Papierwabenkern dargestellt.

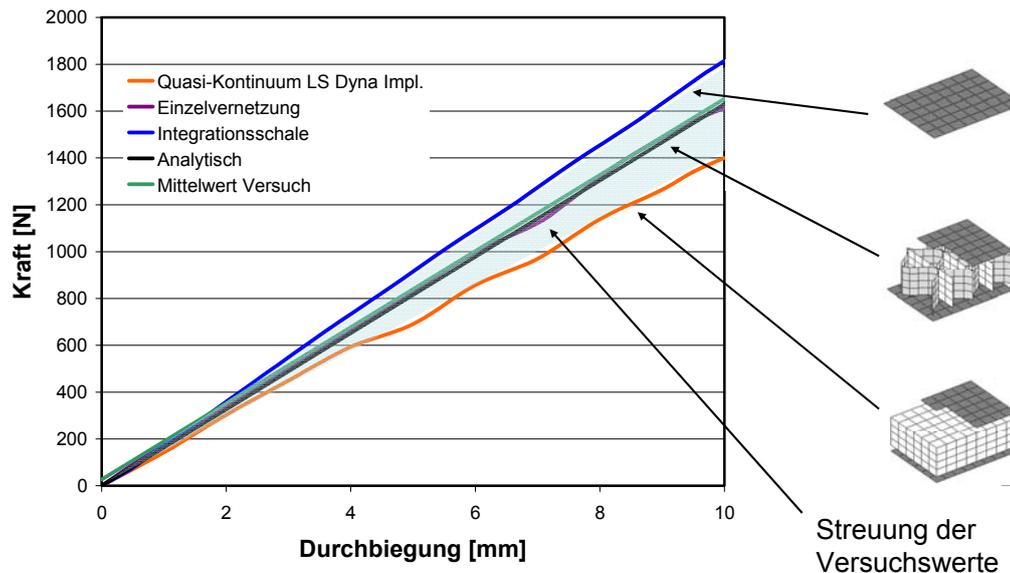


Abbildung 103: Darstellung der Modellierungsunterschiede an einer Sandwichprobe mit 40 mm Papierwabenkern [Kop-10]

Prinzipiell erlaubt die analytische Berechnung des Kraft-Durchsenkungs-Zusammenhangs eine schnelle Art der Berechnung für klar definierte Lastfälle wie dem 4-Punkt-Biegeversuch. Für kompliziertere Lastfälle, wie bei der Motoreinhausung vorgesehen, sind jedoch keine einfachen analytischen Berechnungen mehr möglich und eine Auslegung der Bauteile mittels Finiter-Elemente-Simulationen (FEM) unumgänglich. Im Rahmen der betrachteten Simulationsmodelle erweichte sich die Nachbildung des Kerns aus Solid-Elementen sowie der Deckschicht aus Schalenelementen in einer dreischichtigen „Black-Box“ (makro-mechanisch) als sehr gutes Abbild der realen Versuchsumstände, wobei die verwendeten Materialkennwerte aus den durchgeführten Versuch verwendet wurden. Eine Erhöhung der Detaillierung hin zur Nachbildung der Kernstruktur aus Schalenelementen unter Beibehaltung der Deckschichtschalen bildete das globale Verhalten des Sandwich-Verbundes nach wie vor sehr gut ab (meso-mechanisch) und kann auch für die Analyse von Kräfteinleitungspunkten und Inserts verwendet werden. Jedoch ist dieser Ansatz durch sehr große Vernetzungsarbeit und –modelle geprägt, so dass die Motoreinhausung damit nicht berechnet werden kann. Eine Erhöhung der Abstraktion des Modells hin zu einer Einzelschicht aus Schalenelementen (abstrahiertes Plattenmodell) lieferte eine zu steife Reaktion des Sandwich-Verbundes gegenüber dem realen Verhalten, weshalb eine derartige Vergrößerung insbesondere nur dann anzuraten ist, wenn die Modellgröße und die Rechenzeit für eine erste Analyse von Konzepten klein gehalten werden soll.

Für die Simulation der Motoreinhausung durch das Institut für Fahrzeugkonzepte erfolgte aufgrund dieser Ergebnisse die Auswahl des Berechnungsmodells, bei dem die Kernstruktur als „Blackbox“ modelliert wurde, um zum einen eine gute Genauigkeit zu erreichen und zum anderen die Modellgröße und die Berechnungszeit nicht zu groß werden zu lassen. Zudem wurden folgende Materialeigenschaften für die Berechnung zugrunde gelegt:

- Deckschicht (isotrop): Dicke von 0,545 mm, E-Modul von 12.000 N/mm², Festigkeit von 180 N/mm²
- Kern (orthotrop): Dicke von Bauteilgeometrie abhängig, Schubmodul von 35 N/mm², Festigkeit von ca. 1,2 N/mm²

Für die Auslegung sind neben anderen Versagensarten insbesondere das Deckschichtversagen und das Kernschubversagen der Sandwichstrukturen zu berücksichtigen.

Die Analyse und FEM-Berechnung Struktur erfolgte wie schon bei der Referenzstruktur mittels repräsentativen Lastfällen in Anlehnung an DIN EN 12663 [DIN-12663] und mit der Firma Bombardier Transportation abgestimmten Missbrauchs- bzw. Zusatzlastfällen. Für die Bewertung der Strukturen wurden dabei die Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen mittels folgender Lastfälle untersucht:

1. Eigenfrequenzanalyse mit geschlossenen Seitenklappen (Fall 1)
2. 5 g Belastung in x- bzw. Fahrtrichtung mit geschlossenen Seitenklappen (Fall 2)
3. 5 g Belastung in y- bzw. Querrichtung mit geschlossenen Seitenklappen (Fall 3)
4. 5 g Belastung in z- bzw. Vertikalrichtung mit geschlossenen Seitenklappen (Fall 4)

Kommentar: Die Beschleunigungen wurden insbesondere deshalb auf 5 g gesetzt und keine geringeren Beschleunigungen angenommen, um Zusatzgewichte z.B. auf Grund von notwendigen Dämm- und Isoliermatten zu berücksichtigen.

5. Zusatzlastfall: Flächenlast von 100 kg / m² auf die Bodenplatten (Fall 5)
6. Zusatzlastfall: Durchbiegung der Bodenplatten unter Eigengewicht in z-Richtung bei geöffneten Seitenklappen (Fall 6)
7. Zusatzlastfall: Belastung der vorderen Bodenplatten lokal an der linken Außenkanten durch 100 kg in z-Richtung bei geöffneten Seitenklappen (Fall 7)
8. Zusatzlastfall: Belastung der vorderen Bodenplatten lokal an der rechten Außenkanten durch 100 kg in z-Richtung bei geöffneten Seitenklappen (Fall 8)
9. Zusatzlastfall: Belastung der hinteren Bodenplatten lokal an der linken Außenkanten durch 100 kg in z-Richtung bei geöffneten Seitenklappen (Fall 9)
10. Zusatzlastfall: Belastung der hinteren Bodenplatten lokal an der rechten Außenkanten durch 100 kg in z-Richtung bei geöffneten Seitenklappen (Fall 10)

Bei diesen Berechnungen wurden sowohl die Verformungen als auch die maximalen Belastungen in den Deckschichten und den Kernstrukturen ausgewertet. Für die Festigkeitsanalyse wurde für die Sandwichdeckschichten das von-Mises-Vergleichspannungskriterium verwendet und für die Kernstrukturen die maximalen Schubspannungen ausgewertet. Die Verwendung des Kriteriums nach von-Mises für die Deckschichten hatte den Hintergrund, dass auf Grund der nahezu isotropen Materialeigenschaften hier eine gute Übereinstimmung zu erwarten war.

Aus Abbildung 104 werden die verwendeten Berechnungsmodelle ersichtlich und Abbildung 105 zeigt die Ergebnisse der zwei wesentlichen Lastfälle, die im Rahmen der festigkeitstechnischen Analyse berücksichtigt werden müssten.

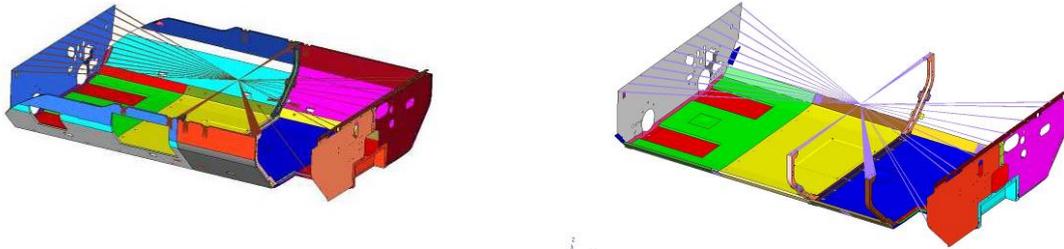


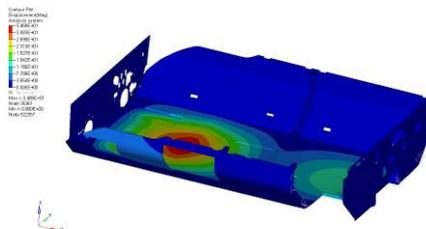
Abbildung 104: Darstellung der Berechnungsmodelle der neuartigen Motoreinhausung mit geschlossenen und „offenen“ Seitenklappen

Lastfall:

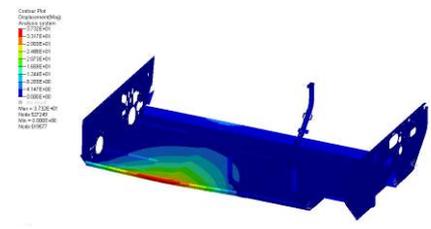
Flächenlast von 100 kg / m² auf die Bodenstruktur (Fall 5)

Lokale Belastungen der Bodenplatten durch 100 kg in z-Richtung (offene Klappen); Beispiel Belastung rechts hinten (Fall 10)

Verformung [mm]

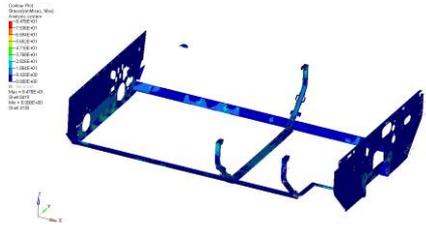


max. Verformung: 34,7 mm

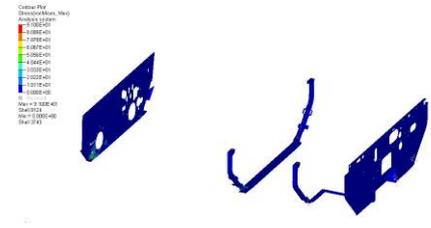


max. Verformung: 37,3 mm

Spannung in den Metallbauteilen [N/mm²]



max. Spannung: 84,8 N/mm²

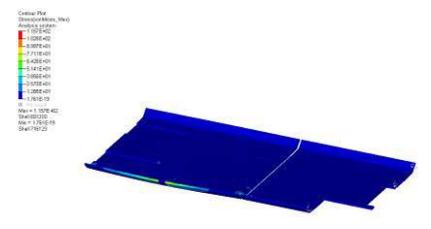


max. Spannung: 91,0 N/mm²

Von-Mises-Vergleichsspannung in den Deckschichten [N/mm²]



max. Spannung: 62,0 N/mm²

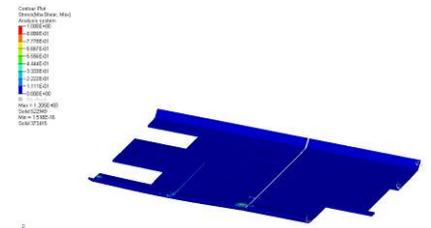


max. Spannung: 115,7 N/mm²

max. Schubspannungen in den Kernstrukturen [N/mm²]



max. Spannung: 1,2 N/mm² (an den Kräfteinleitungspunkten)



max. Spannung: 1,2 N/mm² (an den Kräfteinleitungspunkten)

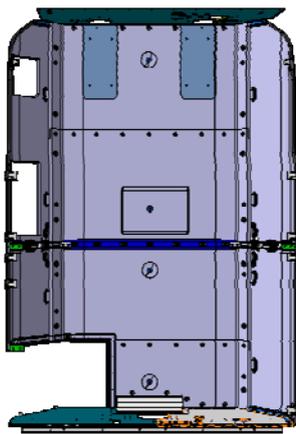
Abbildung 105: Beanspruchung der Sandwich-Motoreinhausung bei ausgewählten Lastfällen

Die Berechnungsergebnisse zeigten dabei, dass die Steifigkeiten für diese Lastfälle etwas geringer als bei der Referenzstruktur ausfällt, jedoch noch gewährleistet sind. Zudem wurden auch die maximal zulässigen Spannungen nicht überschritten.

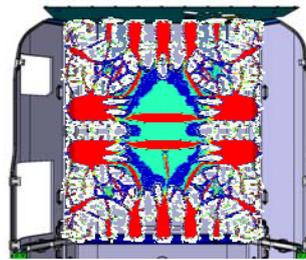
5.1.2 Strukturoptimierung zur Analyse von lokalen Lastpfaden und Verstärkungsstrukturen

Die gezielte Verstärkung der Lastpfade durch Lang- bzw. Endlosfasern ist ein neuartiger Ansatz (vgl. Kapitel 3.3). Um das gesamte Leichtbaupotential auszunützen, wurden diese Lastpfade mit Hilfe einer Strukturoptimierung, hier insbesondere einer Topologieoptimierung ermittelt. Für diese Berechnungen wurde der Solver Hyperworks Optistruct verwendet und die Ergebnisse dienten als Grundlage für die Platzierung lokaler Verstärkungen im Bauteil. Für die Analysen der Motoreinhausung wurden insbesondere Steifigkeit- und Festigkeitsoptimierungen verwendet. (vgl. dazu auch [Har-08]) In Kombination mit der auf Grund seiner Größe modularen bzw. in Segmenten aufgebauten Unterflurabdeckung ergaben sich hierbei besondere Herausforderungen.

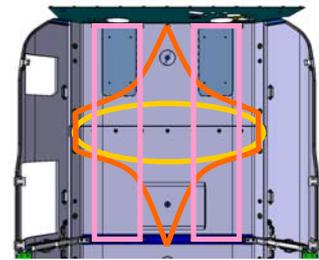
Als Beispiel für die Ermittlung der Lastpfade ist in Abbildung 106 die Berechnung und mögliche Ableitung einer lokalen Verstärkungsstruktur einer zweiteiligen Bodenstruktur und einer Seitenklappe dargestellt. Als statische Lastfälle wurde bei der Bodenstruktur einen Flächenlast von 100 kg/m^2 angenommen, die aus dem Zusatzlastfall der Gesamtstruktur abgeleitet ist. Für die Optimierung der Seitenklappe wurde hingegen eine Druckkraft von außen mit 1000 Pa angenommen, die mögliche Windlastfälle berücksichtigen sollte, in Kombination mit lokalen Zugkräften an den integrierten Haltegriffen, die die Kräfte beim Öffnen und Schließen der Klappe abbildeten.



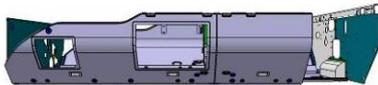
Draufsicht Motoreinhausung



Strukturoptimierung
Bodenplatten



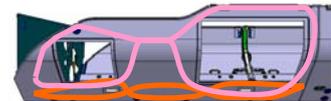
Ableitung einer
Möglichkeit zur
Einbringung lokaler
Verstärkungen



Seitenansicht Motoreinhausung



Strukturoptimierung
Seitenklappe



Ableitung einer
Möglichkeit zur
Einbringung lokaler
Verstärkungen

Abbildung 106: Ableitung von möglichen lokalen Verstärkungen der Motoreinhausung am Beispiel einer zweiteiligen Bodenplatte und einer Seitenklappe.

Diese möglichen lokalen Verstärkungen sind drei dimensionale Strukturen und sind somit insbesondere von der Fertigung und der Integration in die Bauteile noch genauer zu detaillieren. Mögliche Ansätze sind jedoch schon z.B. in DE 10 2006 035 576 B3 [DE-08] beschrieben.

5.2 Konstruktion des Demonstrator

(Martin Schön)

Die Konstruktion der selbsttragenden Verkleidungsstruktur erfolgte modular in Multi Material Design (Abbildung 107 - Abbildung 110) und ist funktions- und auch fertigungsgerecht ausgeführt. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, dass nur die schon bisher verfügbaren Schnittstellen für die Verbindung zum Wagenkasten Verwendung finden. Damit ist sichergestellt, dass ein späterer Anbau der Verkleidungsstruktur zu Testzwecken möglich ist.

Innerhalb der konstruktionsbegleitenden Reviews wurde darauf geachtet, dass eine wirtschaftliche Fertigung erreicht wird.

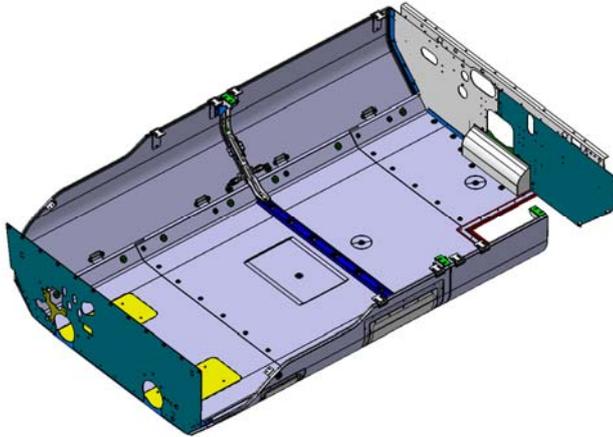


Abbildung 107: Neue Verkleidungsstruktur im zusammengebauten Zustand mit den beiden Schottwänden vorne und hinten - Ansicht in den Innenbereich

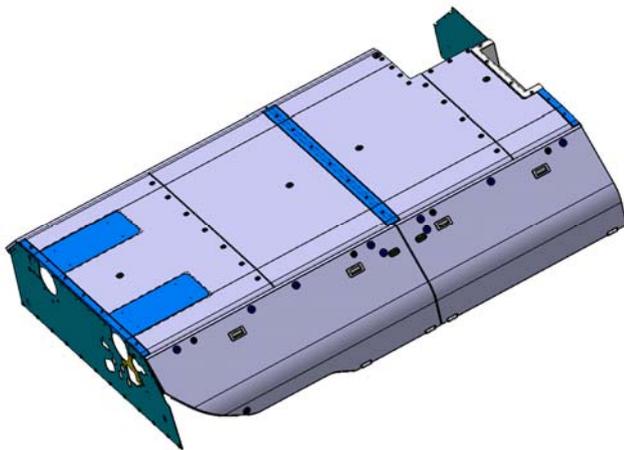


Abbildung 108: Neue Verkleidungsstruktur im zusammengebauten Zustand mit den beiden Schottwänden vorne und hinten - Ansicht von außen

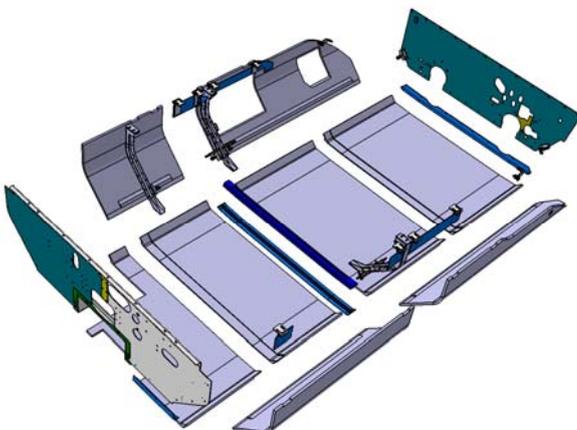


Abbildung 109: Explosionszeichnung (3D) mit den Einzelteile der modularen, selbsttragende Verkleidungsstruktur in Multi Material Design

Die entwickelten acht Sandwichbauteile sind nochmals in der Abbildung 110 dargestellt. Die Bodenplatten 1 und 2 sowie 3 und 4 können jeweils über eine Laschenverbindung zu einer vom Montagepersonal noch handhabbaren Bodenplattenbaugruppe vormontiert werden.

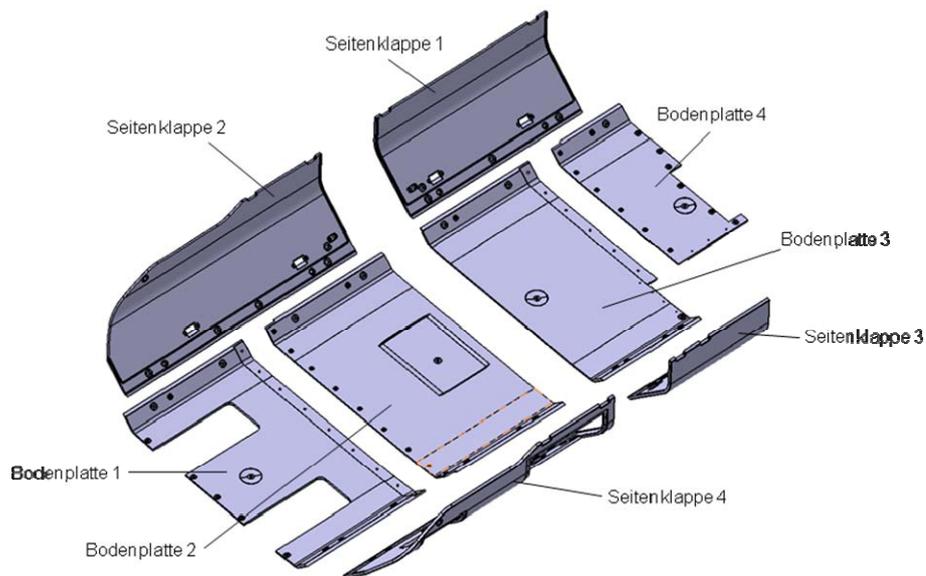


Abbildung 110: Darstellung der Sandwichplatten und Bezeichnung

Durch den Übergang von der bisher verwendeten Differentialbauweise zu einer Bauweise unter Verwendung von Sandwichstrukturen konnte die Anzahl der Bauteile erheblich reduziert werden. Dazu beigetragen hat auch die möglich gewordene Funktionsintegration. Beispiele sind die direkt integrierten Aufnahmen für die Griffmulden in den Seitenklappen, Inserts für Verschraubungen, die in den Bodenplatten integrierten Wasser-Ablauföffnungen (mit Schrauben verschließbar) und Einprägungen zu Sicherstellung der lokal notwendigen minimalen Wandabstände sowie für die Aufnahme von Dichtelementen. In der Bodenplatte 1 wurden links und rechts Aufnahmen für eine Isolierung gegenüber den in geringem Abstand darüber verlaufenden heißen Abgasleitungen integriert (Abbildung 110 bis Abbildung 113).

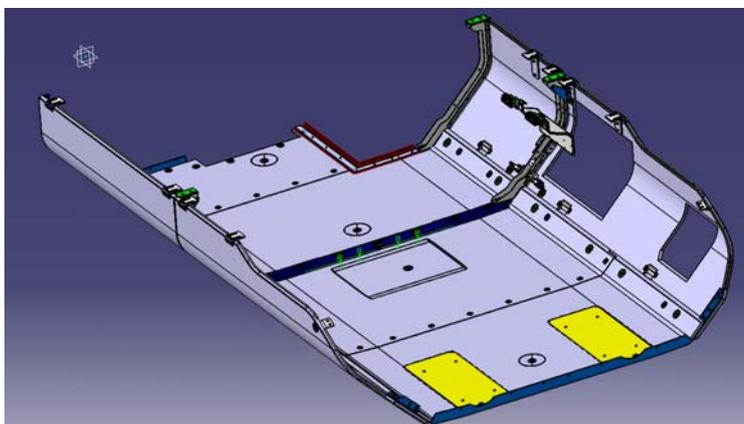


Abbildung 111: Bodenplatte mit integrierter Isolierung gegenüber den heißen Abgasleitungen

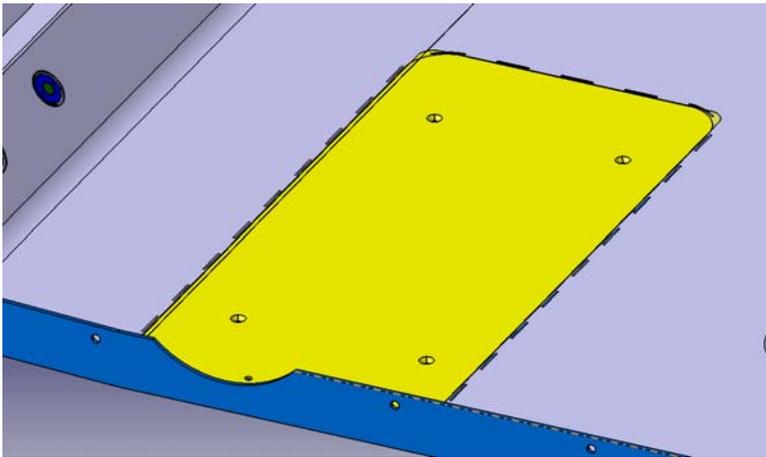


Abbildung 112: Bodenplatte unter Abgasanlage mit eingeschäumter GFK Platte für Aufnahme einer Isolierung

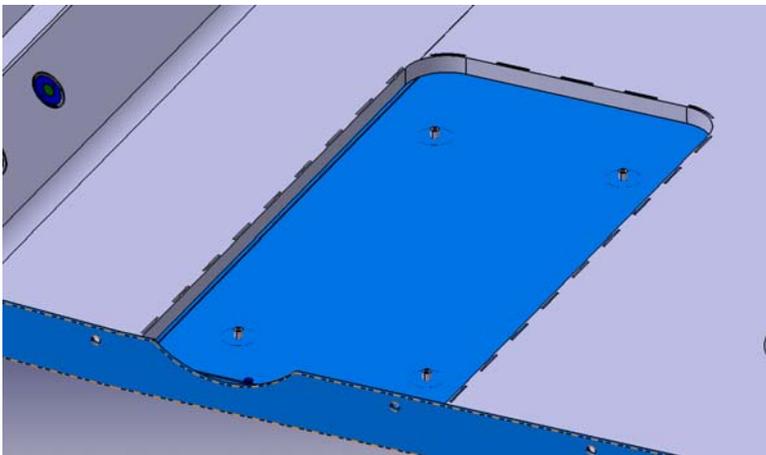


Abbildung 113: Darstellung ohne Isolierung

5.3 Werkzeugherstellung für den Demonstrator

(Josef Renkl)

Im Anschluss an die Designfreigabe des Demonstrators konnte mit der Werkzeugkonstruktion und Werkzeugfertigung begonnen werden. Es wurden verschiedene Werkzeugkonzepte erarbeitet und bewertet. Das Ziel die Bauteile in einem sequentiellen Werkzeugaufbau zu fertigen wurde nach technischer und wirtschaftlicher Prüfung als wenig sinnvoll erachtet und daher verworfen. Unter anderem würden die hohe Anzahl an Wechselteile (bis zu 100Stück) zu einem nicht mehr handhabbaren Werkzeug sowie in zu hohe Werkzeugkosten führen. Unter Abwägung dieser Punkte wurde im Konsortium beschlossen, auf die Wechseleinsätze verzichtet und für jedes Bauteil ein entsprechendes Aluminiumwerkzeug konstruieren und gefertigt. Die Konstruktionen der acht Werkzeuge sind in Abbildung 114 bis Abbildung 117 dargestellt.

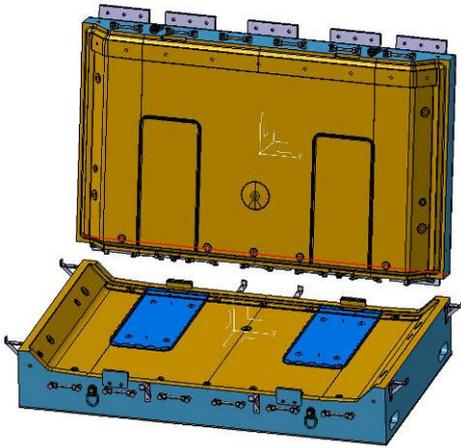


Abbildung 114: Werkzeug Bodenplatte 1 (CAD)

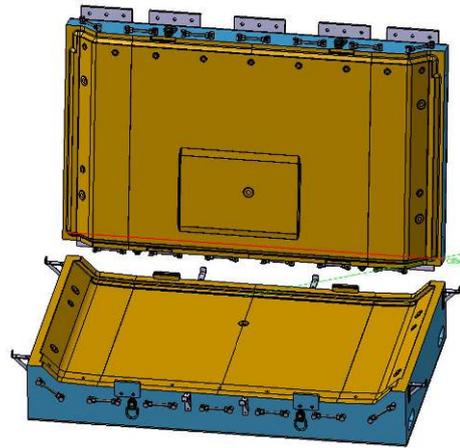


Abbildung 115: Werkzeug Bodenplatte 2 (CAD)

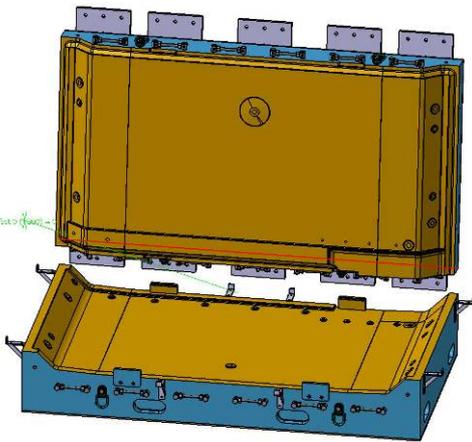


Abbildung 116: Werkzeug Bodenplatte 3 (CAD)

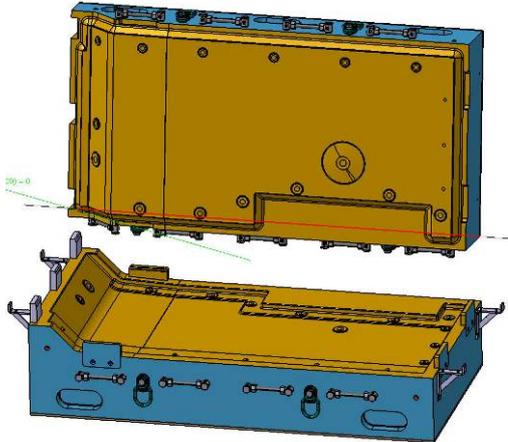


Abbildung 117: Werkzeug Bodenplatte 4 (CAD)

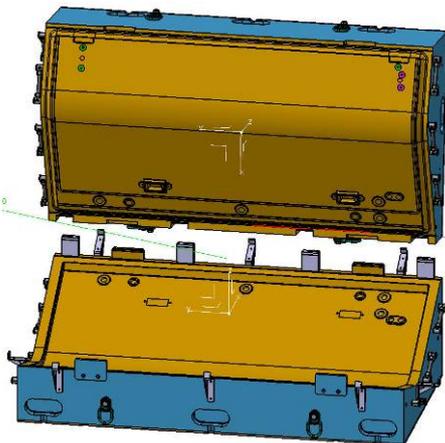


Abbildung 118: Werkzeug Seitenklappe 1 (CAD)

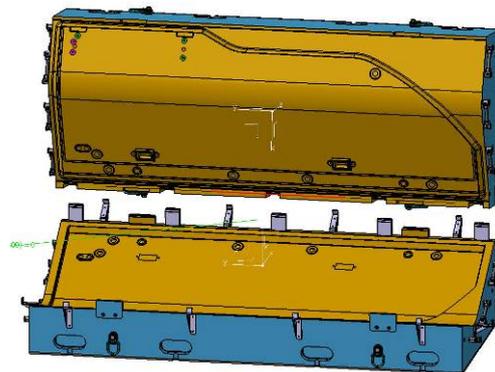


Abbildung 119: Werkzeug Seitenklappe 2 (CAD)

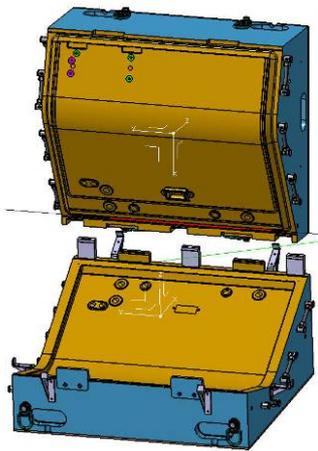


Abbildung 120: Werkzeug Seitenklappe 3 (CAD)

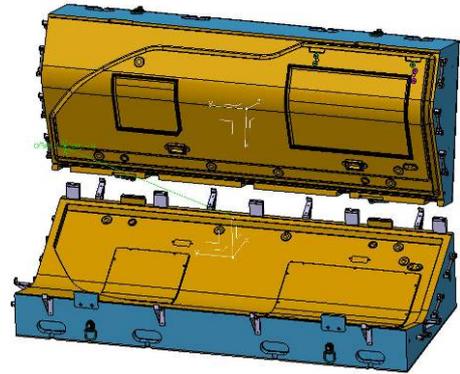


Abbildung 121: Seitenklappe 4 (CAD)

5.4 Fertigung des Demonstrators

(Conrad Brodhun)

Während der Projektlaufzeit fanden im Rahmen der jeweiligen Aufgabenpakete stets Praxisversuche parallel zu den theoretischen Betrachtungen statt. Insbesondere wurden Material- und Sprühversuche kontinuierlich intensiviert. Zielstellung war, eine optimale Vorbereitung auf die Fertigung großformatiger PUR-Faserverbundbauteile. Diese Versuche fanden basierend auf den Erkenntnissen der Firma DECS zur Verfügung stehenden Serienmaterialien statt und wurden später auf die Anwendungen mit dem Flammschutzpaket ausgestatteten Polyurethan übertragen. In Abstimmung mit der Firma KraussMaffei Werkzeugbau, wurden zuerst die Werkzeuge für die Bodenplatte eins, sowie Bodenplatte zwei gefertigt und angeliefert. Das Rüsten des ersten Werkzeuges (Bodenplatte 1) auf dem Werkzeugträger ermöglichte erstmals, die Umsetzung der theoretischen Werkzeugkonstruktion in das reale Werkzeug zu überprüfen.



Abbildung 122:Werkzeug „Bodenplatte I“ gerüstet auf Formenträger

Als kritische Punkte wurden im Vorfeld der äußere Kantenbereich der Abgasführung, sowie die Abprägung der seitlichen Bereiche der Bodenplatte angesehen. Zeitgleich wurde ein Rahmenkonzept entwickelt, welches das beidseitige Besprühen des vorbereiteten Sandwichtaufbaus, sowie die optimale Anpassung des Rahmens an die Werkzeugkavität der „Bodenplatte I“ ermöglicht. Entsprechend den Rahmendimensionen fand die umfangreiche Programmierung der Polyurethan-Fasersprühanlage für das Bauteil „Bodenplatte I“ statt. Grundlagen hierfür lieferten die Ergebnisse, der parallel vom Fraunhofer ICT durchgeführten Sprühversuche. Programmiert wurden u.a. der Verfahrenweg, die Verfahrensgeschwindigkeit, die PUR-Austragsmenge und die Schnittglasmenge entsprechend der Bauteildimension. Größte Aufmerksamkeit lag auf der Sicherstellung eines reibungslosen Handlings, sowie den erforderlichen Materialaustrag unter Zeitrestriktion der Startzeit, der Steigzeit, sowie der Abbindezeit. Der Sandwichtaufbau erfolgte basierend auf einer Papierwabe in A-Welle als Kernmaterial, welches beidseitig mit einer Doppellage Schnittglasmatte bespannt wurde. Als Ergebnis dieser ersten Bauteilexperimente konnten Musterbauteile generiert werden, welche sukzessive lokal optimiert wurden. Durchweg konnten alle Bauteile dieser Versuchsserie in ihrer Gesamtheit, sowohl technisch, als auch optisch als in Ordnung bewertet werden.

Der Kantenbereich der Aussparungen für die Abgasdurchführung siehe Pfeile in Abbildung 123, ließ sich nicht zur vollen Zufriedenheit der Firma DECS abbilden, d.h. die Kante wurde durch das PU-Material nicht vollständig ausgeschäumt, so genannter „Mäusefraß“ war das Ergebnis.

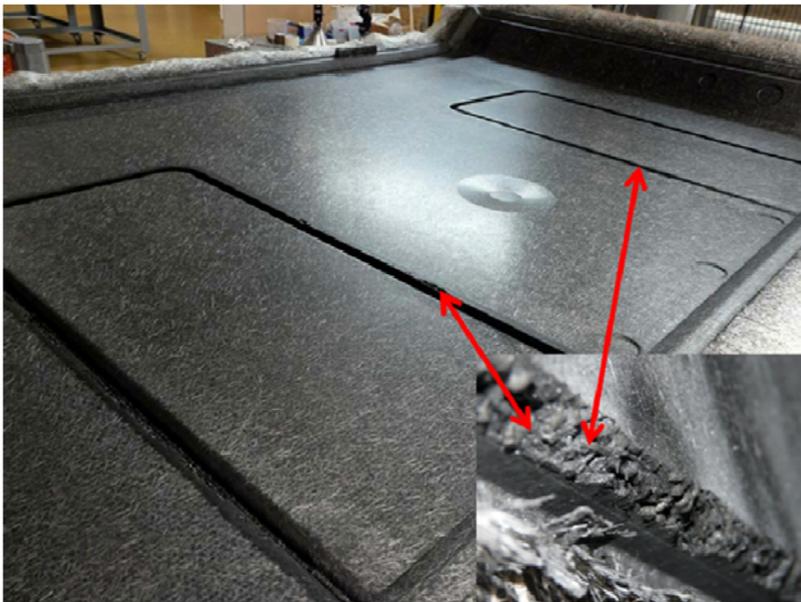


Abbildung 123: Mäusefraß im Bereich der BT-Prägekante

Dieses Phänomen hatte seine Ursache in der Werkzeugkonstruktion. Die Verprägung des Sandwichtaufbaues in diesem Bereich war zu hoch, weswegen das Werkzeugoberteil zur Änderung an die Firma KraussMaffei zurück gesendet wurde, und

entsprechend die Prägekante abgeändert wurde. Durch diese Maßnahme konnte die geschilderte Problematik behoben werden, wie in Abbildung 124 ersichtlich.



Abbildung 124: Erfolgreiche Reproduktion der BT-Prägekante nach Werkzeugänderung

Parallel zur Fertigung erfolgte die Erstellung der Fräsprogramme und der Fräsaufnahmen, um entsprechend den Konturbeschnitt, sowie die Integration der Verschraubungspunkte zu realisieren. Die vorhandene Motorenkonstruktion stellte über die bereits hohen Anforderungen an das Gesamtkonzept, insbesondere an die „Bodenplatte I“ spezielle Anforderungen. So wurde bei der Freigabe der CAD-Daten festgestellt, dass in diesem Bereich die Abgasleitungen sehr dicht am PUR-Bauteil verlaufen, was unweigerlich zu Beschädigungen durch eine zu hohe Dauertemperaturbelastung und somit frühzeitiges Bauteilversagen führt. Um sowohl für die thermischen, als auch Bauraumbedingten Anforderungen eine Lösung zu entwickeln, konnte die Firma DECS eine praktikable Lösung realisieren, indem der Bereich der Abgasdurchführung ausgefräst wurde, was zu einem vergrößerten Bauraum, jedoch zu einer lokalen Vorschwächung des Bauteils führte.



Abbildung 125: Gefräste Aussparung für Abgasführung „Bodenplatte I“

Die in Abbildung 4 ersichtliche verbleibende Bauteilstärke von lediglich 5-10mm begründet dies. Um dieser Schwächung entgegen zu wirken, wurde der Bereich mit zwei Lagen GFK laminiert und hinsichtlich Biegesteifigkeit und Festigkeit erfolgreich stabilisiert.



Abbildung 126: Laminieren und stabilisieren der Aussparungen für Abgasführung „Bodenplatte I“

Der erforderliche Bauraum konnte so geschaffen werden. Jedoch galt es im Folgenden, eine thermische Abschirmung des Bauteils vor dem Abgasstrang zu erzielen. Die Firma DECS konnte diese Problematik in zahlreichen Versuchsreihen mit keramischen Materialien erfolgreich lösen, indem die verbleibenden Aussparungen mit einer hochtemperaturbeständigen Keramik ausgegossen wurden. Somit konnte eine wesentliche Funktionsintegration erfolgreich realisiert werden.

Die aus Vorversuchen ermittelte Flammenschutzrezeptur der Firma Bayer MaterialScience AG und durch die am Fraunhofer ICT im Technikumsmaßstab validierten Verarbeitungsparameter wurden der Firma DECS übermittelt.

Diese Mischung wurde im Vakuum-Dissolver in einem neuartigen Verfahren der FIRMA DECS gemäß Vorgabe angesetzt und im Anschluss auf die Fasersprühanlage getankt. Entgegen den Erfahrungen einer problemlosen Verarbeitung des Materials seitens des Fraunhofer ICT, stellte die FIRMA DECS eine vergleichsweise grobe Körnung (maximale Partikelgröße 60 µm) und ein rasches Ausfallen der Zuschlagstoffe aus dem homogenisierten Material fest. Dem entsprechend war das Auftanken einer lediglich kleinen Materialmenge auf den Rührwerksbehälter der Fasersprühanlage möglich. Das Versprühen des gefüllten Materials im Hochdruckkreislauf der Anlage verlief nur kurzzeitig reibungslos, bis zahlreiche Fehlermeldungen die Anlage zum Stillstand zwangen. Die Fehleranalyse ergab, dass sämtliche Hoch- und Niederdruckleitungen des Sprühsystems, Spaltfilter und Rückschlagventile durch den ausgefallenen Füllstoff des Materialansatzes verstopft wurden. Das gesamte System wurde daraufhin aufwändig entleert, sämtliche Filter, Rohrleitungen und Ventile ausgebaut, gereinigt, wieder zusammen gebaut und die gesamte Anlage mit reinem Polyol gespült. Hierdurch wurde der Zeitplan der Prototypenfertigung mit gefülltem Material um über eine Woche verzögert. Parallel arbeitete die FIRMA DECS in bilateralen Abstimmungen mit dem Lieferant des Zuschlagstoffes an einem Alternativprodukt, dessen Körnung mit einer maximalen Partikelgröße von 16-24 µm deutlich feiner ausfällt, als die des vorherigen Materials mit 30-60µm. Dieses wurde unabhängig von Brandschutzergebnissen bestellt, kurzfristig geliefert und ein entsprechend der ursprünglichen Rezeptur neuer Materialansatz erstellt. Die in der ursprünglichen Rezeptur vorgegebenen Gewichtsanteile wurden beibehalten.

Entsprechend den Erwartungen in Bezug auf die Partikelgröße, wies dieses Material eine deutlich verbesserte Konsistenz und Homogenität auf. Ein unmittelbares Ausfallen der Flammenschutzpartikel verglichen mit dem ursprünglichen Material, wurde nicht beobachtet. Die neue Polyolrezeptur ließ sich problemlos auf die Fasersprühanlage auftanken und nach Austauschen der Düse am Mischkopf auch im Hochdruckkreislauf fahren. Gemäß der Viskosität wurden sämtliche Anlagenparameter wie Mischbehältertemperaturen, Drücke und Materialmengen bestimmt und programmiert. Trotz aller Vorbereitungen verzögerte sich erneut die Bauteilfertigung mit dem gefüllten Material, aufgrund der zu diesem Zeitpunkt in Insolvenz geratenen Wabenlieferanten. Ursprünglich sah das Konsortium die Verwendung wasserfester Faltschalen im Bauteil vor, um so den hohen Ansprüchen hinsichtlich des Impactverhaltens und resultierend der Bauteillebensdauer von 30 Jahren besser gerecht zu werden. Innerhalb der Projektlaufzeit, konnten jedoch keine entsprechende Menge an Faltschalen in ausreichendem Umfang bereitgestellt werden. Aus diesem Grund entschied sich die FIRMA DECS in Einvernehmen der Kooperationspartner die Fertigung der Demonstratorbauteile exemplarisch mit Papierwabe und phenolharzgetränkten Wabenstrukturen voranzutreiben. Parallel wurden vergeblich zahlreiche Anstrengungen unternommen, die ursprünglich angedachten Faltschalen zu beschaffen. Da bereits in Vorversuchen erste Bauteile ohne flammgeschütztes Material der „Bodenwanne I“ gefahren wurden, galt nun primär das Interesse der Fertigung der „Seitenklappen“. Ziel war es schnellstmöglich Erkenntnisse über das Materialverhalten von bombierten Flächen zu erhalten. Aus diesem Grund wurde mit der „Seitenklappe 2“ begonnen. Die übliche Vorgehensweise beschreibt die Adaption eines Spannrahmens an die Werkzeugdimension, die Entwicklung eines geeigneten Sandwichebaus entsprechend der Kavität, sowie der Festlegung eines geeigneten Robotersprühbildes individualisiert auf jedes einzelne Bauteil.



Abbildung 127: Eintrag von Trennmittel und IMC ins Werkzeug „Bodenplatte I“

Aufgrund der langjährigen Erfahrung auf dem Gebiet der PUR-Verarbeitung und der intensiven Entwicklungsarbeit im Vorfeld, konnten während der Projektlaufzeit alle acht Werkzeuge abgemustert und entsprechend Prototypenbauteile gefertigt werden.

Parallel zu den Demonstratorabmusterungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ICT und dem IFB verschiedenste Wabenkonfigurationen und Faltwaben in einzelnen Werkzeugen validiert. Dies ermöglichte zahlreiche Erkenntnisse in der Verarbeitung solcher Wabentypen, ihrem Verhalten während des Verprägens im Werkzeugträger und dem resultierenden Qualitätseindruck der Bauteiloberflächen nach dem Entformen. Somit konnte der Nachweis erbracht werden, dass die FIRMA DECS in der Lage ist, flammgeschützte, wasserfeste und anwendungsspezifische Bauteile aus Polyurethan herzustellen.

Zur Überprüfung der Brandschutzeigenschaften am Gesamtbauteil wurden von der Firma DECS Versuchkörper aus den Demonstratorbauteilen entnommen, der Firma Bayer MaterialScience AG zur Verfügung gestellt um auf diese Weise die Einhaltung der Brandschutzanforderungen mit dem neuen Füllstoff zu überprüfen.

Im Anschluss an die Herstellung der Prototypenbauteile, wurden für die restlichen Bauteile spezifische Fräsaufnahmen von der Firma DECS entwickelt und realisiert, welche den Konturbeschnitt und das Integrieren der Aussparungen für die Verschraubungspunkte vorsahen. Im Folgenden sind alle gefrästen Rohbauteile dargestellt.

Die „Bodenplatte I“ in Abbildung 128 besitzt mit Maßen von 2.119mm x 1.225mm die größten Abmessungen.

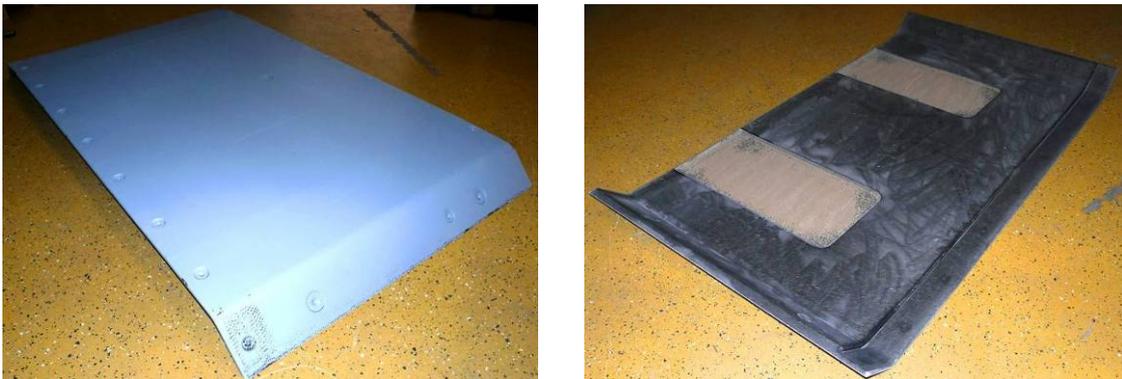


Abbildung 128: „Bodenplatte I“ gefräst, Ansicht Außen und Innen

Die „Bodenplatte II“ in Abbildung 129 besitzt Abmessungen von 2.120mm x 1.214mm, die „Bodenplatte III“ in Abbildung 130 besitzt Abmessungen von 2.125mm x 1.110mm.



Abbildung 129: „Bodenplatte II“ gefräst, Ansicht Außen und Innen



Abbildung 130: „Bodenplatte III“ gefräst, Ansicht Außen und Innen

Die „Bodenplatte IV“ in Abbildung 131 besitzt Abmessungen von 1.149mm x 725mm.



Abbildung 131: „Bodenplatte IV“ gefräst, Ansicht Außen und Innen

Die „Seitenklappe I“ in Abbildung 132 besitzt Abmessungen von 1.751mm x 905mm.

Die „Seitenklappe II“ in Abbildung 133 besitzt Abmessungen von 2.354mm x 906mm.

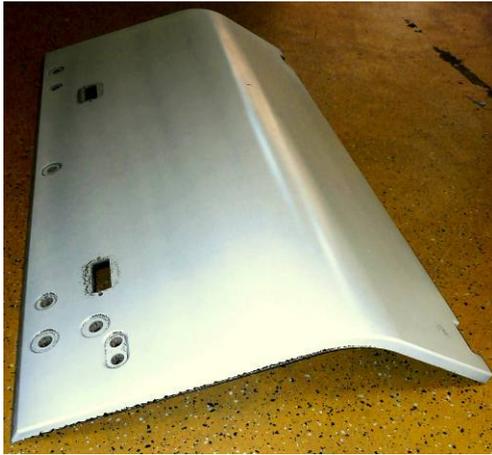


Abbildung 132: „Seitenklappe I“ gefräst, Ansicht Außen



Abbildung 133: „Seitenklappe II“ gefräst, Ansicht Innen und Außen

Die „Seitenklappe III“ in Abbildung 134 besitzt Abmessungen von 1.025mm x 910mm.
Die „Seitenklappe IV“ in Abbildung 135 besitzt Abmessungen von 2.360mm x 906mm.

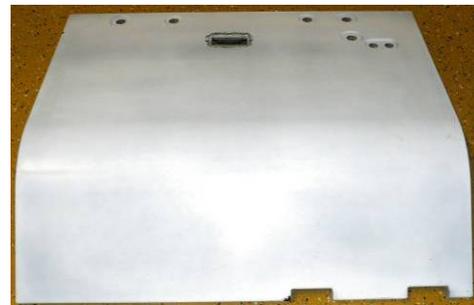


Abbildung 134: „Seitenklappe III“ gefräst, Ansicht Innen und Außen



Abbildung 135: „Seitenklappe IV“ gefräst, Ansicht Außen und Innen

Im Anschluss an das Fräsen der Bauteile erfolgte die Nacharbeit, durch entgraten und reinigen. Fehlstellen und Lunker wurden durch Spachtel egalisiert. Durch Schleifen wurden die Oberflächen vorbereitet zum Auftrag von Spritzspachtel. Dieser fungiert als Basis für eine hochwertige Endlackierung.



Abbildung 136: Auftrag von Spritzspachtel „Bodenplatte I“ (links) und Schleifen des Spritzspachtel „Seitenklappe II“(rechts)

Nach dem Schleifen des ausgehärteten Spritzspachtels wurden verbleibende Fehlstellen erneut gespachtelt und geschliffen. Im Anschluss erfolgte eine weitere Reinigung, sowie die Endkontrolle der Oberfläche als Vorbereitung zur Endlackierung. Für die Lackierung wählte die Firma DECS ein speziell flammgeschützten Lack, der den Zielvorgaben des Projektes entspricht. Die Lackierung erfolgte in zwei Stufen um eine hochwertige Oberfläche zu erhalten.



Abbildung 137: Trocknung des lackierten Bauteils „Seitenklappe II“ (links) und Integration der Verbindungselemente in die Bauteilbohrungen (rechts)

Nach der Endkontrolle erfolgte die Integration der speziell entwickelten Einleger und Verbindungselemente in den dafür vorgesehenen Bohrungen. In Abbildung 138 sind die montierten Bauteile ersichtlich.



Abbildung 138: Zusammenbau sämtlicher Einzelbauteile zur Gesamtkonstruktion Motoreinhausung

Im Rahmen der Bauteilfertigung wurden zudem Toleranzuntersuchungen durchgeführt. Mit der Verwendung einer für die Anwendung orientierte branschütz-optimierte Polyolfomulierung, konnten erstmals minimale Toleranzen realisiert werden, welche bei einer Längenausdehnung des Bauteils von ca. 2.200 mm bei etwa $\pm 1,0$ mm liegen. Ein weiterer Erkenntniszuwachs liegt auf der Fertigung von PUR - Sandwichbauteilen hinsichtlich der Anbindung phenolharzgetränkter Waben mit hoher Oberflächengüte ohne Delaminationserscheinungen. Die auf höchste Festigkeit ausgelegte Faltwabe konnte aufgrund starker Abzeichnungen keine überzeugende Oberflächengüte erzeugen, bieten jedoch großes Potetial für zukünftige Anwendungen. Die Verprägungen der Wabenränder im Kantenbereich sämtlicher Bauteile konnte mit sehr sauberen Abschlüssen unabhängig verschiedener Winkel umgesetzt werden. In Bezug auf die Werkzeugkonstruktion kann unter Berücksichtigung der sehr hohen Belastungen (Presskräfte) eine gute Standzeit der Alu-Werkzeuge bescheinigt werden.

6 Verifikation und Validierung

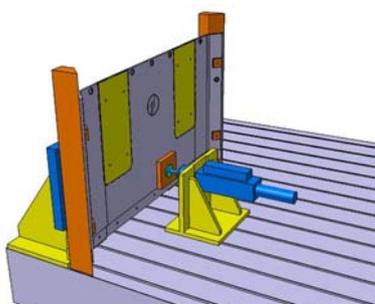
6.1 Verifikation der mechanischen Eigenschaften

(Gerhard Kopp)

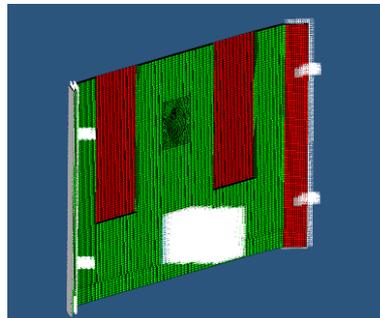
Zur Verifikation der Berechnungsmodelle wurde die prototypische Motoreinhausung in Sandwichbauweise aufgebaut und am Institut für Fahrzeugkonzepte getestet. Hierbei sollten die Berechnungsergebnisse auf Ihre Genauigkeit untersucht und eine Massenbilanz der realen Struktur aufgestellt werden. Die somit ermittelten Daten erlaubten die Validierung und Optimierung sowohl der Berechnungsmodelle und der Motoreinhausung als auch weiterer semistruktureller Bauteile wie z.B. Innenausstattungen für Straßen-, Nutz- und Schienenfahrzeugen.

6.1.1 Vorversuche an zwei Bodenplatten

Neben der Untersuchung an der Gesamtstruktur wurde eine Bodenplatte gesondert detailliert betrachtet worden. Die Untersuchung stellte dabei einen Biegeversuch nach, um die Biegesteifigkeit der Bodenwanne zu analysieren. Das hierfür notwendig Berechnungsmodell wurde aus dem FEM-Modell der kompletten Motoreinhausung abgeleitet und bildete den konzipierten Versuchsaufbau detailliert ab. Für die Versuchsdurchführung stand eine Bodenplatte mit und eine ohne Keramikinsert zur Verfügung. Die Lastaufbringung erfolgte mit hydraulischen Zylindern und die Messung der Verformung mit zusätzlich installierten Wegaufnehmern. Die Bodenstruktur wurde bis zum Versagen belastet (Abbildung 139).



Konzeption des Versuchs



FEM-Modell der Boden-platte



Versuchsaufbau

Abbildung 139: Biegeversuch an einer Bodenplatte

Den Vergleich aus den im Versuch ermittelten Verformungen und den Werten aus der FEM-Berechnung zeigt Abbildung 140. Beiden Bodenplatten zeigen dabei ein relativ lineares Verhalten bis zum Versagen der auf Druck belasteten Deckschichten. Die Abweichungen zur statischen Berechnung lag dabei um 5%. Des Weiteren wurden bei dem berechneten Lastfall von 3000 N in bei der statischen Auslegung von-Mises-Vergleichsspannungen von max. 170 N/mm² in den Deckschichten vorhergesagt. Diese Spannungen treten im Bereich auf, in dem die Bauteile im Versuch versagen und stimmten relativ gut mit den angenommenen Festigkeiten der Deckschichten von ca. 180 N/mm² überein.

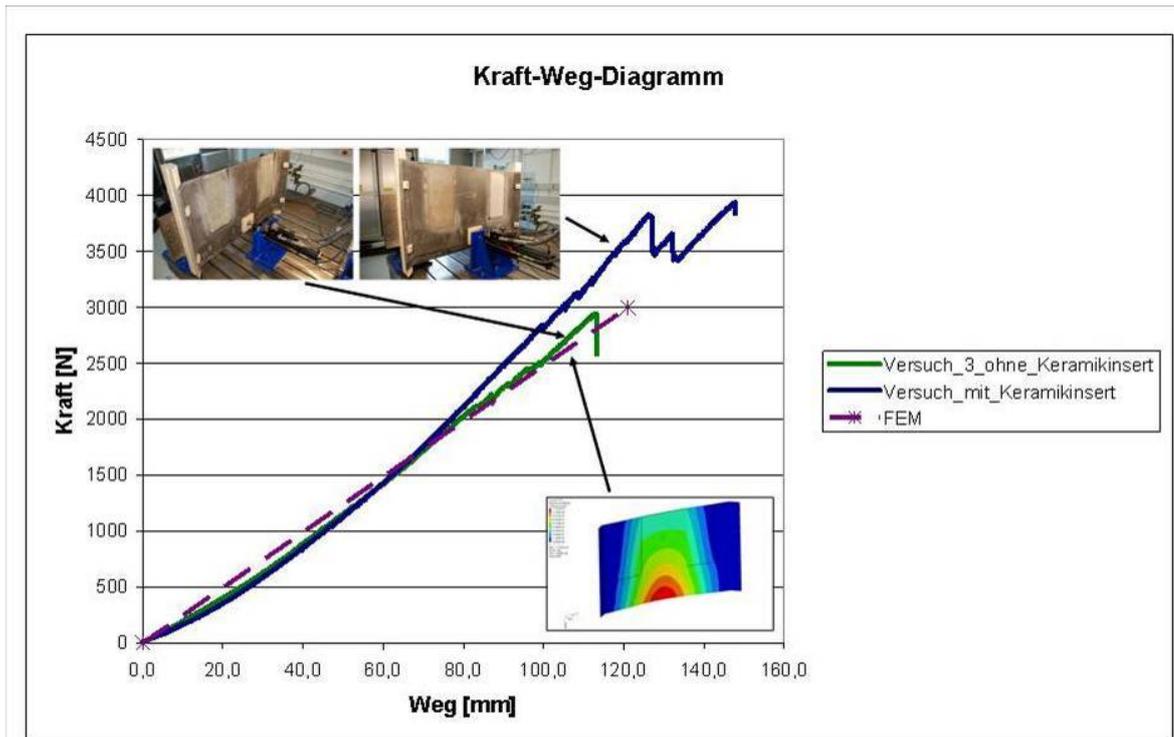


Abbildung 140: Vergleich der berechneten Durchbiegung mit den Versuchen an den zwei Bodenplatten

6.1.2 Abgleich der Versuche am Demonstrator mit den statischen Berechnungen

Zur Absicherung der statischen Auslegung und zur Verifikation der Berechnungsmodelle wurde der im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Demonstrator am Institut für Fahrzeugkonzepte verschiedenen Prüfungen unterzogen. Die Motor-einhausung wurde dabei auf einem Spannfeld aufgebaut, wobei die Lagerung annähernd gleich zur Montage am Wagenkasten erfolgte. Der genaue Aufbau ist in Abbildung 141 dargestellt.



Abbildung 141: Aufbau des Demonstrators auf dem Spannfeld

Es wurden zwei Lastfälle überprüft, die bei der Auslegung der Struktur die höchsten Belastungen zur Folge hatten:

- Zusatzlastfall: Flächenlast von 100 kg / m² auf die Bodenplatten (Fall 5)
- Lokale Belastungen der Bodenplatten durch 100 kg in z-Richtung (offene Klappen); Beispiel Belastung rechts hinten (Fall 10)

Die Flächenlast nach Fall 5 wird mit Gewichten auf die Bodenplatten aufgebracht, wobei hierbei zur besseren Gewichtsverteilung Multiplexplatten und Europaletten auf die Bodenplatten verteilt werden. Der Versuch wurde ohne Versagen im linear elastischen Bereich durchgeführt und die Verformung an zwei Punkten der Bodenplatten gemessen, bei denen die größte Verformung auftrat. Auf Grund der notwendigen Multiplexplatten reagierte die Motoreinhausung etwas steifer im Versuch als in der Simulation nach Fall 5 berechnet (Abbildung 142).

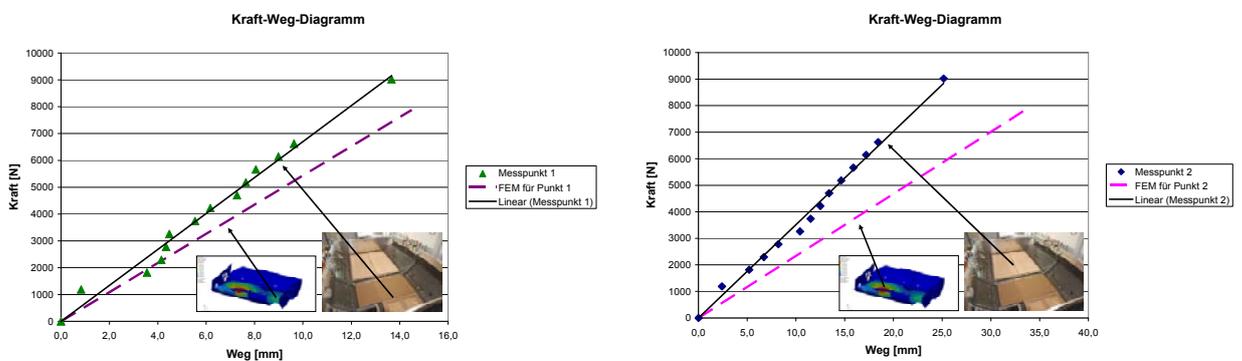


Abbildung 142: Vergleich der berechneten Durchbiegungen mit den Versuchen nach Fall 5 an zwei Messpunkten

Bei den Analysen bezüglich des Falls 10 wurde ein Gewicht auf die Bodenplatten bei geöffneten Seitenklappen aufgebracht. Damit dieses trotz der Abschrägung der Bodenplatten eine Belastung in z-Richtung aufgebracht, wurde hierfür eine Halterung angebracht. Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der statischen Simulation zeigte eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung im linear elastischen Bereich (Abbildung 143).

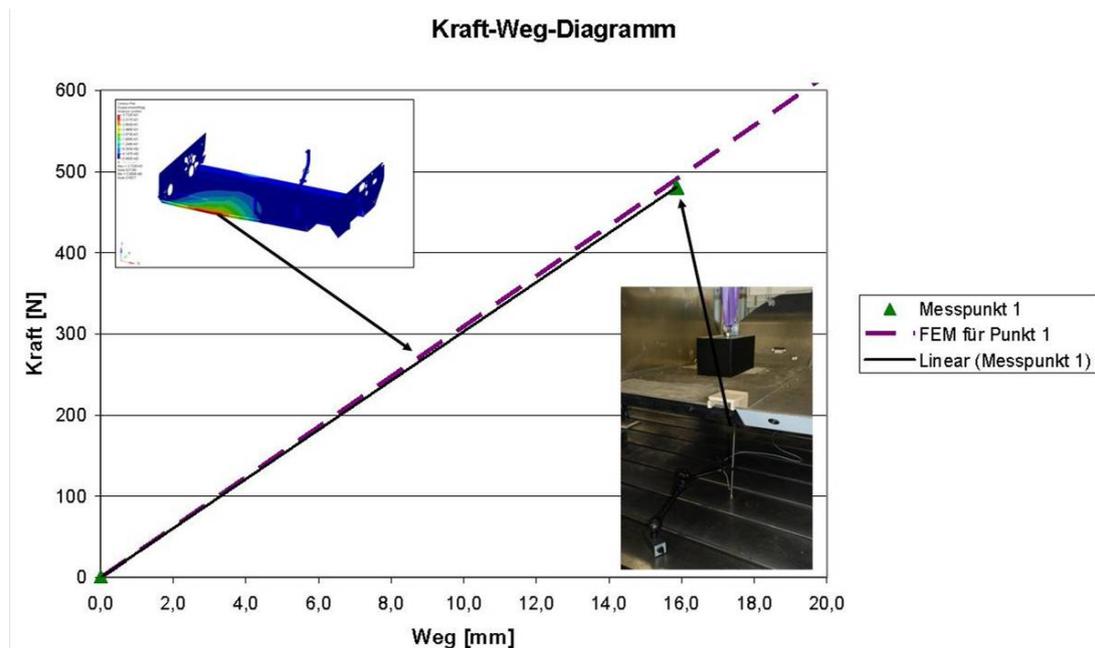


Abbildung 143: Vergleich der berechneten Durchbiegung mit dem Versuch nach Fall 10

6.2 Verifikation der akustischen Eigenschaften

(Martin Schön, Dr. Kirchner)

Die Kapselwandung ist die entscheidende Komponente der Kapselung. Sie ist das Bauteil mit der größten Fläche. Es ist schalltechnisch sinnvoll und kostengünstig die Kapselwandung in einem geeigneten Prüfstand zu vermessen. Hier können die Randbedingungen den Anforderungen im Fahrzeug entsprechend variiert, überprüft und modifiziert werden. Diese Art der Prüfstandsmessungen dient als Grundlage für die Bestimmung der Struktureigenschaften, zur Überprüfung der Baugleichheit – hinsichtlich der akustischen Eigenschaften der Kapselwandung oder zur Optimierung.

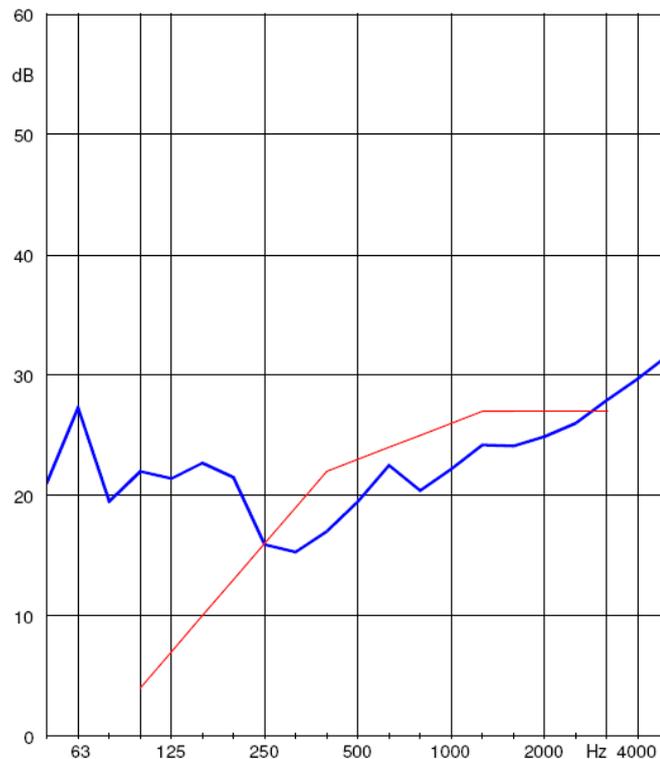
Im vorliegenden Fall wurden die Probeelemente in einen zertifizierten Fensterprüfstand für bauakustische Messungen zwischen einen Sende- und Empfangsraum eingebaut (siehe Abbildung 144) und schalltechnisch entsprechend akustischer Normen (z.B. ISO 140-3 und ISO 717-1) vermessen und bewertet. Die Schalldämmung der Kapselwände ohne Inserts beträgt für den gemessenen Frequenzbereich (50 Hz - 5 kHz, wobei die messtechnische Sicherheit für Frequenzen unterhalb von 100 Hz geringer ist) zwischen 20 und 23 dB (siehe Abbildung 145). Diese Werte liegen in der üblichen Größenordnung von Leichtbauteilen. Die Vermessung baugleicher Wandproben ergab die gleiche Bewertung.



Abbildung 144: Schalldämm-Messung im Fensterprüfstand und Einbausituation
(links: Empfangsraum- und Senderaumseite; rechts: Senderaumseite)

Prüffläche: 0.2208 m²
 Flächenbezogene Masse: 4.2 kg/m²
 Temperatur [°C]: 20
 Feuchtigkeit [%]: 36
 Senderaum Volumen: 74.8 m³
 Empfangsraum Volumen: 53.1 m³

Frequenz [Hz]	R Terz [dB]
50	21,1
63	27,3
80	19,5
100	22,0
125	21,4
160	22,7
200	21,5
250	15,9
315	15,3
400	17,0
500	19,5
630	22,5
800	20,4
1000	22,2
1250	24,2
1600	24,1
2000	24,9
2500	26,0
3150	27,9
4000	29,7
5000	31,7



Bewertung nach ISO 717-1					
$R_w(C, C_p) = 23 (-1; -2) \text{ dB}$					
$C_{20-3150}$	-1 dB	$C_{20-5000}$	0 dB	$C_{100-5000}$	0 dB
$C_{\frac{1}{2}20-3150}$	-2 dB	$C_{\frac{1}{2}20-5000}$	-2 dB	$C_{\frac{1}{2}100-5000}$	-2 dB
Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Messergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden.					

Abbildung 145: Ergebnis der Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand

Für ausgewählte Wandungsproben mit und ohne Inserts wurden zudem Modalanalysen im Fensterprüfstand und mit frei aufgehängten Laboraufbauten durchgeführt. Es wurden sowohl die Eigenfrequenzen als auch die Dämpfung bestimmt: der Verlustfaktor liegt für Stab- und Plattenproben in der Größenordnung von 0.02 - 0.04 (siehe Abbildung 146 und Tabelle 20).

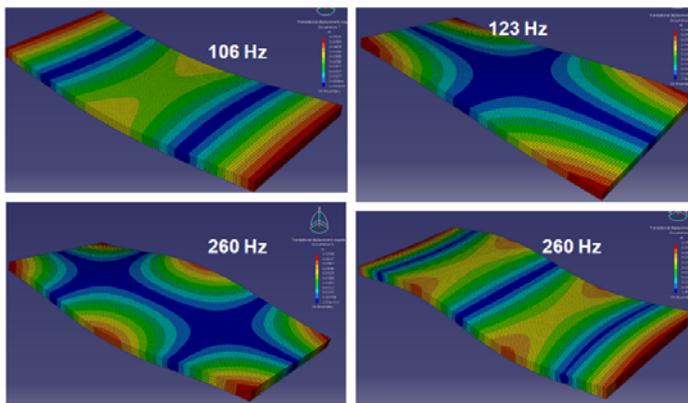


Abbildung 146: Berechnete Moden ausgewählter Wandungsproben

Tabelle 20: Gemessene, frequenzabhängige Verlustfaktoren ausgewählter Wandungsproben

Eingangsmobilität		Experimentelle Modalanalyse		Finite Elemente Methode	
f Hz	η	f Hz	η	f Hz	η
161	0.0086	161	0.0188	106.3	0.0188
-	-	185	0.0181	123.0	0.0181
-	-	394	0.0153	260.0	0.0153
-	-	432	0.0145	260.4	0.0145
551	0.018	594	0.01894	418.0	0.01894
-	-	660	0.0168	439.4	0.0168
-	-	679	0.264	501.5	0.264
-	-	813	0.0214	529.3	0.0214
871	0.028	883	0.0318	592.7	0.0318
-	-	1000	0.025	607.2	0.025
1443	0.046	-	-	637.7	-
1785	0.037	-	-	639.9	-
2146	0.0642	-	-	776.0	-
2652	0.0505	-	-	-	-

Auf die Verifikation weiterer Körperschall-Eigenschaften wurde verzichtet, weil alle Schnittstellen der Kapsel zum Schienenfahrzeug gleichgehalten wurden (z.B. auch die Bauteile zur Körperschall-Isolierung).

Die für den praktischen Einsatz, für Nutzer und Kapselhersteller wichtigste schalltechnische Charakterisierung ist die sogenannte Einfügungsdämmung, welche die Schallquelle in der tatsächlichen Einbausituation (d.h. im Schienenfahrzeug) in freier Umgebung (z.B. keine großen reflektierenden Flächen) für typische Betriebszustände mit und ohne Kapselung vermisst. Diese schalltechnische Quantifizierung mittels Schalleistungsmessungen berücksichtigt sowohl die Quelleneigenschaften des Dieselmotors, die konkrete Anordnung der Nebenaggregate als auch die Struktureigenschaften des Schienenfahrzeuges und reduziert damit die

Analyse auf die akustischen Kapsel­eigen­schaf­ten selbst, sie gilt jedoch nur für die konkrete Einbausituation. Da zum Zeitpunkt der Kapsel­fer­tig­stel­lung kein Schienen­fahr­zeug des notwendigen Typs zur Verfügung stand, konnte diese Messung nicht durch­ge­führt werden.

Der Aufwand für eine Kapsel­ver­mes­sung un­ab­hän­gig vom Schienen­fahr­zeug ist sehr hoch (z.B. alle Fahr­zeug­bauteile an der Kapsel müssen durch hoch­däm­mende Bauteile ersetzt und der Fahr­zeug­motor usw. durch geeig­nete Schall­quel­len simuliert werden). Da die Ori­ginalkapsel zudem nicht auf diese Weise ver­mes­sen ist, stehen Aufwand und Nutzen für diese Mes­san­ord­nung in keinem guten Ver­hält­nis.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schall­däm­mung der un­ter­suchten Sandwich­bauteile (ohne Inserts) prin­zi­piell dem Niveau von Leicht­bauteilen entspricht. Sie kann bei Bedarf flächig oder lokal durch eine zusätz­liche Massen­be­le­gung verbessert werden. Um den Ein­satz­bereich der getesteten PUR-Wandungen in Verbindung mit schall­tech­ni­schen Problem­stel­lungen zu er­wei­tern ist eine weitere systematische Verbesserung der Schall­däm­mung anzustreben. Dies kann z.B. durch Änderung der strukturellen Eigen­schaf­ten des Papier­kerns verbunden mit einer Erhöhung des Verlust­faktors geschehen.

6.3 Validierung des Demonstrators

(Martin Schön, Gerhard Kopp)

Das technische Gesamtziel dieses Projektes war die Entwicklung und der Nachweis der Eignung von hybriden Leichtbaustrukturen unter Verwendung von faserverstärkten Polyurethan-Sandwichsystemen für Schienenfahrzeuge. Dazu wurde wie geplant ein Demonstrator gebaut, welcher die Entwicklungsergebnisse in einem Bauteil darstellt. Parallel dazu wurde anhand des gewählten Demonstratorbauteils die Kostenstruktur für diese Bauweise ermittelt.

Die Validierung durch Anbau des Demonstrators an einen Itino Dieseltriebzug und einen anschließenden Testbetrieb konnte aufgrund des entstandenen Projektverzuges und der fehlenden Verfügbarkeit eines Fahrzeugs innerhalb des verbliebenen Projektzeitraums nicht durchgeführt werden. Dazu wären auch bereits zu einem relativ frühen Zeitpunkt Nachweise erforderlich gewesen, welche, auch wegen des entstandenen Projektverzuges, nicht verfügbar waren. Tests an einem Fahrzeug sind jedoch für die Zukunft nicht ausgeschlossen. Da die Firma Bombardier Transportation kein Fahrzeug unter eigener Verfügung hat, sind Gespräche mit einem Kunden geplant. Die Firma Bombardier Transportation hofft diese Gespräche erfolgreich zu führen und den Kunden von diesem Vorhaben überzeugen zu können.

Um trotzdem eine Verkleidungsstruktur vollständig zusammenbauen und ausstellen zu können wurde ein Haltegestell konstruiert und gebaut. Die Abbildung 147 bis Abbildung 150 zeigen die an das Haltegestell angebaute Verkleidungsstruktur aus unterschiedlichen Perspektiven.



Abbildung 147: Demonstrator an Haltegestell (Gesamtansicht)



Abbildung 148: Innenansicht des Demonstrators



Abbildung 149: Außenansicht des Demonstrators



Abbildung 150: Detailansicht von zwei Seitenklappen im mittleren Bereich des Demonstrators

7 Zusammenfassung

(Jan Kuppinger)

Dank der Förderung des BMBF konnte in diesem Vorhaben zahlreiche Ergebnisse in den Bereichen Material-, Prozess- und Methodenentwicklung generiert sowie Kenntnisse in der Fertigungstechnik erarbeitet werden.

In diesem Verbundprojekt wurde gezeigt, dass das Polyurethan-Fasersprühverfahren eine vielversprechende Fertigungsmethode für Leichtbauanwendungen ist und auch für die wirtschaftliche Herstellung kleiner Stückzahlen geeignet ist.

Im Bereich der Materialentwicklung wurde ein Polyurethansystem entwickelt, welches den gestiegenen Anforderungen an den Brandschutz im Schienenverkehr gerecht wird. Zudem wurde in diesem Projekt die Materialeigenschaften von langfaserverstärkten Polyurethanen bestimmt sowie Untersuchungen zu eventuell auftretenden prozessbedingten Faservorzugsorientierungen durchgeführt. Weiter wurde in diesem Vorhaben eine Methode entwickelt welche es erlaubt die Deckschichtdicke von polyurethanbasierenden Sandwichstrukturen zu ermitteln. Mit dieser Kenntnis konnten die Sandwichstrukturen charakterisiert und entsprechend berechnet sowie im Hinblick auf das mechanische und akustische Verhalten simuliert werden.

Im Bereich der Prozessentwicklung wurde ein neuer Mischkopf entwickelt, welcher erlaubt die geschnittenen Glasfasern axial in den Sprühastrag zu dosieren. Zudem wurde dieser Mischkopf in einer kompakten Bauweise ausgeführt und somit erlaubt selbst enge und schwer zugängliche Geometrien zu besprühen.

Des Weiteren wurde eine Ablegeeinheit für das Einbringen von Endlosfasern in Verbindung mit dem Polyurethan-Fasersprühen entwickelt und erfolgreich validiert.

Im Bereich der Methoden ist es gelungen das Verhalten unter statischer Lasteinwirkung von Polyurethan-Sandwichstrukturen zu simulieren. Auf Grundlage diese Know-how Aufbaus konnten Konzepte der neuen Demonstratorgeometrie berechnet und schließlich in ein reales Gesamtbauteil umgesetzt werden.

Bei der Werkzeugauslegung für das Versuchswerkzeug sowie für das Demonstratorbauteil und deren Konstruktion in Verbindung mit der Herstellung von Probenplatten und der Demonstratorbauteilen wurden zahlreiche Erkenntnisse generiert, welches die Herstellung passgenauer und maßhaltiger Polyurethan-Sandwichbauteile ermöglicht.

Die in diesem Vorhaben übergeordneten Projektziele waren die Erfüllung der definierten Anforderungen im Lastenheft sowie der Nachweise einer Gewichts- und Kostenreduzierung des Demonstratorbauteils. Angestrebt wurde dabei eine Gewichtsreduktion der Referenzstruktur um mindestens 20 % sowie eine Reduzierung des Preises um ca. 30 %. In Bezug auf die Kosten- und Gewichtsvorgaben wurden beide Ziele vollständig erfüllt. In Abhängigkeit des gewähltem Kernmaterial und des realisiertem Flächengewicht der Sandwichbauteile sind für diese Art von Strukturen auch Gewichtsreduktionen von 30% oder mehr möglich.

In Bezug auf die die Anforderungen des Lastenheftes wurden die definierten Anforderungen erfüllt oder mindesten deren Erfüllbarkeit aufgezeigt. Mit den vorliegenden Arbeitsergebnissen ist somit der verbleibende Aufwand für eine industrielle Nutzung abschätzbar.

8 Quellenverzeichnis

- [Art-06] Artner, J.; Ciesielski, M.; Ahlmann, M.; Walter, O.; Döring, M.: A novel and efficient synthesis of trivalent 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide derivatives, *ARKIVOC*, 2007, P.132-142
- [BMS-1] Business Unit Polyurethane; Vorläufiges Datenblatt Multitec VP.PU 02IF02; Bayer MaterialScience, Ausgabe 06.04.2008
- [BMS-2] Business Unit Polyurethane; Vorläufiges Datenblatt Multitec VP.PU 10MT03; Bayer MaterialScience, Ausgabe 10.08.2007
- [BMS-3] Business Unit Polyurethane; Vorläufiger Verarbeitungshinweis Baypreg VP.PU 01IF15; Bayer MaterialScience, Ausgabe 13.03.2008
- [Bel-04]] Beletskaya, I. P.; Neganova, E. G.; Veits, Y. A.: Arylation of 6H-dibenzo[c,e][1,2λ5]oxaphosphinine 6-oxide, *Russian Journal of Organic Chemistry* 12, 2004, P.1782 1782-1786
- [Bom-09] Homepage von der Firma Bombardier Transportation, http://www.bombardier.com/files/de/supporting_docs/image_and_media/products/BT-1972-ITINOHR.jpg, Download am 14.05.2009
- [Cag-04] Cageao, R.A.; Lorenzo, J.M.; Franken, K.: Studies of Composites made with Baypreg F: Component Selection of Optimal Mechanical Properties, *Polyurethanes*, 2004, P. 513 – 519
- [Cha-04] Y.-L. Chang, Y.-Z. Wang, D.-M. Ban, B. Yang, G.-M. Zhao, *Macromol. Mater. Eng.* 2004, 289, 703
- [DE-06] DE 10 2006 035 576 B3 (2006), Vorrichtung zur Herstellung einer Faserstruktur, 2006
- [DIN-12663] DIN EN 12663, Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen, Deutsche Fassung EN 12663:2000, Oktober 2000
- [DIN-527] DIN EN ISO 527: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften, 1996
- [Dub-05] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: *Dubbel*, Taschenbuch für Maschinenbau, 21. Auflage, Berlin, Springer Verlag, 2005
- [Ehr-07] Ehrlenspiel, K; Kiewert, A.; Lindemann, U.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*, 6., überarbeitete und korrigierte Auflage, Berlin, Springer Verlag, 2007
- [Har-08] Harzheim, L.: *Strukturoptimierung*, 1. Auflage, Frankfurt am Main, Verlag Harri Deutschland, 2008
- [Koe-11] König, J.; Nickel, J.; Kopp, Ge.; Wolff, J.: Lightweight structures, in: *NGT Next Generation Train*, RTR Rail Technology review Special, eurailpress, 2011, ISBN 978-3-7771-0435-5
- [Kop-09] Kopp, Ge.; Kuppinger, J.; Friedrich, H.; Henning, F.: Innovative Sandwichstrukturen für den funktionsintegrierten Leichtbau, in: *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ* 4/2009, Jahrgang 111, S. 298 - 305
- [Kop-10] Kopp, Ge.; Kuppinger, J.; Dietrich, S.; Friedrich, H.; Henning, F.: Auslegung von innovativen Sandwichstrukturen mit faserverstärkten Deckschichten, *Internationale AVK-Tagung 2010*, Essen, 13.-14.

September 2010

- [Kup-10] Kuppinger, J.; Weidenmann, K.; Kordick, M.; Wafzig, F.; Henning, F.; Elsner, P.; Influence of fibre length and concentration on the mechanical properties of long glass fibre reinforced polyurethane, Journal of Plastics Technology 5, 2010, P. 205-227
- [Kup-11] Kuppinger, J; Weidenmann K; Haspel, B.; Wafzig, F.; Henning F.; Elsner P; Influence of processing conditions, fiber contents and fiber lengths on fiber orientation in the polyurethane fiber spraying process, Journal of Plastics Technologies 6, 2011, P. 44-65
- [Kup-12] Genehmigte Disseratation am Karlsruher Institut für Technologie, Material- und Prozessvalidierung zur Herstellung faserverstärkter Polyurethane als Konstruktionswerkstoff im Fasersprühverfahren
- [Mih-09] Mihm, M.: Untersuchungen zur Kraffteinleitung von Sandwichbauteilen, Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2009
- [Pah-07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre, 2007, 7. Auflage, Berlin, Springer Verlag, 2007
- [Rot-00] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 1 Konstruktionslehre, 3. Auflage, Berlin, Springer Verlag, 2000
- [Rot-01] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band 2 Konstruktionskataloge, 3. Auflage, Berlin, Springer Verlag, 2001
- [Sch-11] Schneebauer, M.: Kombination von Spritzguss und Thermoformen - Multi-Material-Bauteile mit endlosfaserverstärkten Thermoplasten (KraussMaffei), Präsentation beim: 3. Forum Multi Material Design für Leichtbauanwendungen, 25. Oktober 2011, Hochschule Landshut
- [VDI-93] Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI Richtlinie 2221, 1993
- [VDI-97a] Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, VDI Richtlinie 2222 – Blatt 1, 1997
- [VDI-82] Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen, VDI Richtlinie 2222 – Blatt 2, 1982
- [VDI-04] Methodisches Entwerfen von technischen Produkten, VDI Richtlinie 2223, 2004
- [VDI-97b] Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, VDI Richtlinie 2225 - Blatt 1, 1997
- [VDI-98a] N.N.: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, VDI Richtlinie 2225 – Blatt 2, 1998
- [VDI-97c] Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, VDI Richtlinie 2225 – Blatt 4, 1997
- [VDI-98b] Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, VDI Richtlinie 2225 – Blatt 3, 1998
- [VDI-87] Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren, VDI Richtlinie 2235, 1987
- [Wu-01] C. S. Wu, Y. L. Liu, Y. S. Chiu, J. app. Polym. Sci. 2001, 85(10), 2254

- [Zen-95] Zenkert, D.:An Introduction to Sandwich Construction, Reprinted 1997, Engineering Materials Advisory Services LTD, Emas Publishing, 1995
- [Zen-97] Zenkert, D. (Hrsg.): The Handbook of Sandwich Construction, North European Engineering and Science Conference Series, Emas Publishing, 1997
- [Trö-03] Tröster, S.; Materialentwicklung und –charakterisierung für thermoplastische Faserverbundwerkstoffe im Direktverfahren, Dissertation, Stuttgart Band 39; Fraunhofer IRB-Verl., 2003

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bild des Dieseltriebzug Itino der Firma Bombardier [Bom-09].....	- 11 -
Abbildung 2:	Motorkapselung mit Anbindung an den Wagenkasten in konventioneller Bauweise	- 12 -
Abbildung 3:	Darstellung der selbsttragenden Verkleidungsstruktur (Einhausung) in konventioneller Bauweise	- 13 -
Abbildung 4:	Darstellung der Berechnungsmodelle mit geschlossenen und „offenen“ Seitenklappen	- 15 -
Abbildung 5:	Beanspruchung der Motoreinhausung bei den vorgegebenen Lastfällen	- 16 -
Abbildung 6:	Wirkprinzip von Sandwichstrukturen [Kop-10]	- 17 -
Abbildung 7:	Darstellung der Kosten- und Gewichtsvorteile bei der Kombination des Fasersprühprozesses mit einem Polyurethan-GFK-Sandwichaufbaus bei mittleren Stückzahlen [Sch-11, Kop-10].....	- 17 -
Abbildung 8:	Schematische Darstellung des möglichen Fertigungsablaufs	- 18 -
Abbildung 9:	Schematische Darstellung der Gesamt- bzw. Herstellkosten der neuartigen Motoreinhausung (Berechnung mit auslastungsbezogenen Kosten; Darstellung mit fiktiven Werten)	- 19 -
Abbildung 10:	Funktionsstruktur der Motorkapselung.....	- 21 -
Abbildung 11:	Übersicht über die Bewertung der erarbeiteten Konzepte.....	- 21 -
Abbildung 12:	Darstellung des ausgewählten Konzepts 1x	- 21 -
Abbildung 13:	Konstruktive Darstellung der Verbindungstechnik der Motoreinhausung	- 21 -
Abbildung 14:	2 -Komponenten-Sprühmischkopf	- 21 -
Abbildung 15:	Neuentwickelter 4-K- Sprühmischkopf.....	- 21 -
Abbildung 16:	Mischkopf mit Glasfaserzuführung.....	- 21 -
Abbildung 17:	Neues Konzept des 4-K-Sprühmischkopf mit Glasfaserzuführung.....	- 21 -
Abbildung 18:	Venturiedüsen	- 21 -
Abbildung 19:	Herkömmliche Faserführung.....	- 21 -
Abbildung 20:	Flugbahn der Fasern.....	- 21 -
Abbildung 21:	Einbindung der Luftdüsen	- 21 -
Abbildung 22:	Zylindrischer Austrag der Glasfasern.....	- 21 -
Abbildung 23:	Flexibler Spiralschlauch	- 21 -
Abbildung 24:	Knicken des Spiralschlauchs	- 21 -
Abbildung 25:	Konstruktion der Rohrleitung.....	- 21 -
Abbildung 26:	Freiheitsgrade Roboter	- 21 -
Abbildung 27:	Freiheitsgrade Roboter	- 21 -
Abbildung 28:	Freiheitsgrade Roboter	- 21 -
Abbildung 29:	Linear-Schlitten-System an der vierten Roboterachse	- 21 -
Abbildung 30:	Baugruppe Mischkopf	- 21 -
Abbildung 31:	Neue Baugruppe Mischkopf.....	- 21 -
Abbildung 32:	3-D- Konstruktion des Werkzeugs	- 21 -

Abbildung 33:	Obere Werkzeughälfte	- 21 -
Abbildung 34:	Untere Werkzeughälfte	- 21 -
Abbildung 35:	Beispiel einer Rahmenvariante	- 21 -
Abbildung 36:	Beispiel eines Inlays.....	- 21 -
Abbildung 37:	Stempel-Variante 1	- 21 -
Abbildung 38:	Schematische Darstellung eines Ablegeprozesses.....	- 21 -
Abbildung 39:	Versuchsaufbau zum Transportieren und Imprägnieren	- 21 -
Abbildung 40:	Mittels Impulsübertragung übertragbare Kräfte	- 21 -
Abbildung 41:	Fasereinzugseinheit.....	- 21 -
Abbildung 42:	Versuchsaufbau Fasertransport.....	- 21 -
Abbildung 43:	Probleme beim Fasertransport mit 3 mm-Rohr.....	- 21 -
Abbildung 44:	Adapter.....	- 21 -
Abbildung 45:	Versuchsaufbau zum Transport und Imprägnierung der Glasfaser.....	- 21 -
Abbildung 46:	Versuchsaufbau zum Abtrennen von Glasfasern	- 21 -
Abbildung 47:	Abknicken der Glasfasern	- 21 -
Abbildung 48:	Trennergebnisse der Glasfasern	- 21 -
Abbildung 49:	Gesamtkonzept der Ablegeeinheit.....	- 21 -
Abbildung 50:	Integrierte Schneideinheit	- 21 -
Abbildung 51:	Verschiedene Verdüsungsgeometrien.....	- 21 -
Abbildung 52:	Einheit beim Ablegen der Endlosfaser.....	- 21 -
Abbildung 53:	Konzept und CAD-Konstruktion	- 21 -
Abbildung 54:	Konstruktion der Ablegeeinheit und Adaption an einen Sechsstachsroboter [Kup-12].....	- 21 -
Abbildung 55:	Entwicklungsstufen der Ablegeeinheit	- 21 -
Abbildung 56:	Ablegeeinheit beim Ablegen imprägnierter Endlosfasern.....	- 21 -
Abbildung 57:	Imprägnierter 2400er TEX-Glasfaser (Vetrotex T207).....	- 21 -
Abbildung 58:	Schliffbild einer imprägnierten Glasfaser	- 21 -
Abbildung 59:	Schematische Darstellung des Ablegevorgangs [Kup-12].....	- 21 -
Abbildung 60:	Imprägnierte Endlosfaserstränge nach dem Verpressen [Kup-12].....	- 21 -
Abbildung 61:	Oberseite (rechts) und Unterseite (links) der direkt imprägnierten Faser.....	- 21 -
Abbildung 62:	Schliffbild einer imprägnierten Faser ohne Nachbearbeitung [Kup-12]	- 21 -
Abbildung 63:	Schliffbild einer imprägnierten Faser mit Nachbearbeitung [Kup-12]	- 21 -
Abbildung 64:	Ergebnisse der Schliffbildauswertung und der ermittelten Zugmoduln [Kup-12]-	21 -
Abbildung 65:	Vier-Komponenten-PUR-Fasersprühanlage im Technikum des Fraunhofer ICT	- 21 -
Abbildung 66:	Herstellung der Polyurethan-Probenplatten.....	- 21 -
Abbildung 67:	Mischkopfposition zur vertikalen Referenzlinie der Werkzeugoberfläche	- 21 -
Abbildung 68:	Sprüheintrag zur Herstellung von verpressten faserverstärkten Polyurethan- Prüfplatten und Polyurethan-Sandwichstrukturen	- 21 -
Abbildung 69:	Beschriftete Zugrönde.....	- 21 -

Abbildung 70: Schematische Darstellung der eingespannten Zugrunde..... - 21 -

Abbildung 71: Netzdiagramm der relativen Steifigkeit S_{S_ro} ; Untersuchungen mit 5 Gew- % Faseranteil..... - 21 -

Abbildung 72: Netzdiagramm der relativen Steifigkeit S_{S_ro} ; Untersuchungen mit 10 Gew.-% Faseranteil..... - 21 -

Abbildung 73: Netzdiagramm der relativen Steifigkeit S_{S_ro} ; Untersuchungen mit 15 Gew.-% Faseranteil..... - 21 -

Abbildung 74: Netzdiagramm der relativen Steifigkeit S_{S_ro} ; Untersuchungen mit 20 Gew.-% Faseranteil..... - 21 -

Abbildung 75: Zug-Elastizitätsmodul bei 6 mm und 12 mm Faserlänge (verpresst) - 21 -

Abbildung 76: Zugfestigkeit bei 6 mm und 12 mm Faserlänge (verpresst) - 21 -

Abbildung 77: Schematische Darstellung einer Polyurethan-Sandwichherstellung [Cag-04] .. - 21 -

Abbildung 78: Gemessener und theoretischer flächenbezogener Materialaustrag in Abhängigkeit der Robotergeschwindigkeit..... - 21 -

Abbildung 79: Deckschichtdicke in Abhängigkeit des Glasfasermattenflächengewichts und der Robotergeschwindigkeit..... - 21 -

Abbildung 80: Pappwabenkernstruktur - 21 -

Abbildung 81: 9,10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthren-10-oxid (DOPO)..... - 21 -

Abbildung 82: Methylierung mit Methyljodid..... - 21 -

Abbildung 83: Flashchromatograph Teledyne ISCO Companion - 21 -

Abbildung 84: ³¹P-NMR-Spektrum von Methyl-DOPO, 120 MHz, CDCl₃ mit einer chemischen Verschiebung von $\delta=33,8$ ppm und dem Eddukt DOPO mit einer chemischen Verschiebung von $\delta=6,6$ ppm - 21 -

Abbildung 85: Zweistufige Methyl-DOPO-Synthese Methylierung mit Methyljodid - 21 -

Abbildung 81: Prüfungen und Prüfkörper nach CEN/TS 45545 - 21 -

Abbildung 82: Ergebnisse der Brandprüfung nach ASTM E 162..... - 21 -

Abbildung 83: Grundlage und Aufbau zur Ermittlung der seitlichen Flammausbreitung nach ISO 5658-2 - 21 -

Abbildung 84: Faltkernmuster aus Polycarbonatfolie (Makrofol 6-2, 300 μ m) Geometrie #266 - 21 -

Abbildung 85: Faltkern aus cellulosebasiertem, flammhemmendem Papier (#266)..... - 21 -

Abbildung 86: Einheitszelle der Geometrie #266 mit einer Kernhöhe von 15 mm - 21 -

Abbildung 87: Einheitszelle Geometrie #174 mit 20 mm Kernhöhe - 21 -

Abbildung 88: Einheitszelle Geometrie #571 mit 25 mm Kernhöhe - 21 -

Abbildung 89: Prüfaufbau für den Druckversuch (li) und den transversalen Schubversuch (re)..... - 21 -

Abbildung 90: Stempel zum lokalen Verpressen von Faltkernen - 21 -

Abbildung 91: Faltkern aus PC-ABS Blend Folie nach lokaler Verpressung..... - 21 -

Abbildung 92: Vorversuch bestehend aus einem Faltkern aus Aramidpapier und glasfaserverstärkten aufgespritzten PU-Deckschichten mit stark ausgeschäumten Zellen - 21 -

Abbildung 93: Faltkernpanele aus Polycarbonat für Anbindungsversuche am ICT - 21 -

Abbildung 94: Faltkerne gefertigt aus PC-Folie mit ABS-Blend (Geometrie #174) - 21 -

Abbildung 95: Faltkerne (#571) zum Demonstratorbau, ca. 12 m²..... - 21 -

Abbildung 96: Faltkerne aus phenolharzimprägniertem Aramidpapier (Geometrie # 571) vorbereitet bei der Firma DECS zur Demonstratorbauteilherstellung - 21 -

Abbildung 97: Fertiges Demonstratorbauteil mit Faltkernen als Kernmaterial..... - 21 -

Abbildung 98: Darstellung der Modellierungsunterschiede an einer Sandwichprobe mit 40 mm Papierwabenkern [Kopp2010]..... - 21 -

Abbildung 99: Darstellung der Berechnungsmodelle der neuartigen Motoreinhausung mit geschlossenen und „offenen“ Seitenklappen..... - 21 -

Abbildung 100: Beanspruchung der Sandwich-Motoreinhausung bei ausgewählten Lastfällen - 21 -

Abbildung 101: Ableitung von möglichen lokalen Verstärkungen der Motoreinhausung am Beispiel einer zweiteiligen Bodenplatte und einer Seitenklappe..... - 21 -

Abbildung 102: Neue Verkleidungsstruktur im zusammengebauten Zustand mit den beiden Schottwänden vorne und hinten - Ansicht in den Innenbereich..... - 21 -

Abbildung 103: Neue Verkleidungsstruktur im zusammengebauten Zustand mit den beiden Schottwänden vorne und hinten - Ansicht von außen - 21 -

Abbildung 104: Explosionszeichnung (3D) mit den Einzelteile der modularen, selbsttragende Verkleidungsstruktur in Multi Material Design..... - 21 -

Abbildung 105: Darstellung der Sandwichplatten und Bezeichnung..... - 21 -

Abbildung 106: Bodenplatte mit integrierter Isolierung gegenüber den heißen Abgasleitungen - 21 -

Abbildung 107: Bodenplatte unter Abgasanlage mit eingeschäumter GFK Platte für Aufnahme einer Isolierung - 21 -

Abbildung 108: Darstellung ohne Isolierung..... - 21 -

Abbildung 109: Werkzeug Bodenplatte 1 (CAD) - 21 -

Abbildung 110: Werkzeug Bodenplatte 2 (CAD) - 21 -

Abbildung 111: Werkzeug Bodenplatte 3 (CAD) - 21 -

Abbildung 112: Werkzeug Bodenplatte 4 (CAD) - 21 -

Abbildung 113: Werkzeug Seitenklappe 1 (CAD)..... - 21 -

Abbildung 114: Werkzeug Seitenklappe 2 (CAD)..... - 21 -

Abbildung 115: Werkzeug Seitenklappe 3 (CAD)..... - 21 -

Abbildung 116: Seitenklappe 4 (CAD)..... - 21 -

Abbildung 117:Werkzeug „Bodenplatte I“ gerüstet auf Formenträger - 21 -

Abbildung 118: Mäusefraß im Bereich der BT-Prägekante - 21 -

Abbildung 119: Erfolgreiche Reproduktion der BT-Prägekante nach Werkzeugänderung - 21 -

Abbildung 120: Gefräste Aussparung für Abgasführung „Bodenplatte I“ - 21 -

Abbildung 121: Laminieren und stabilisieren der Aussparungen für Abgasführung „Bodenplatte I“ - 21 -

Abbildung 122:Eintrag von Trennmittel und IMC ins Werkzeug „Bodenplatte I“ - 21 -

Abbildung 123: „Bodenplatte I“ gefräst, Ansicht Außen und Innen - 21 -

Abbildung 124: „Bodenplatte II“ gefräst, Ansicht Außen und Innen - 21 -

Abbildung 125: „Bodenplatte III“ gefräst, Ansicht Außen und Innen - 21 -

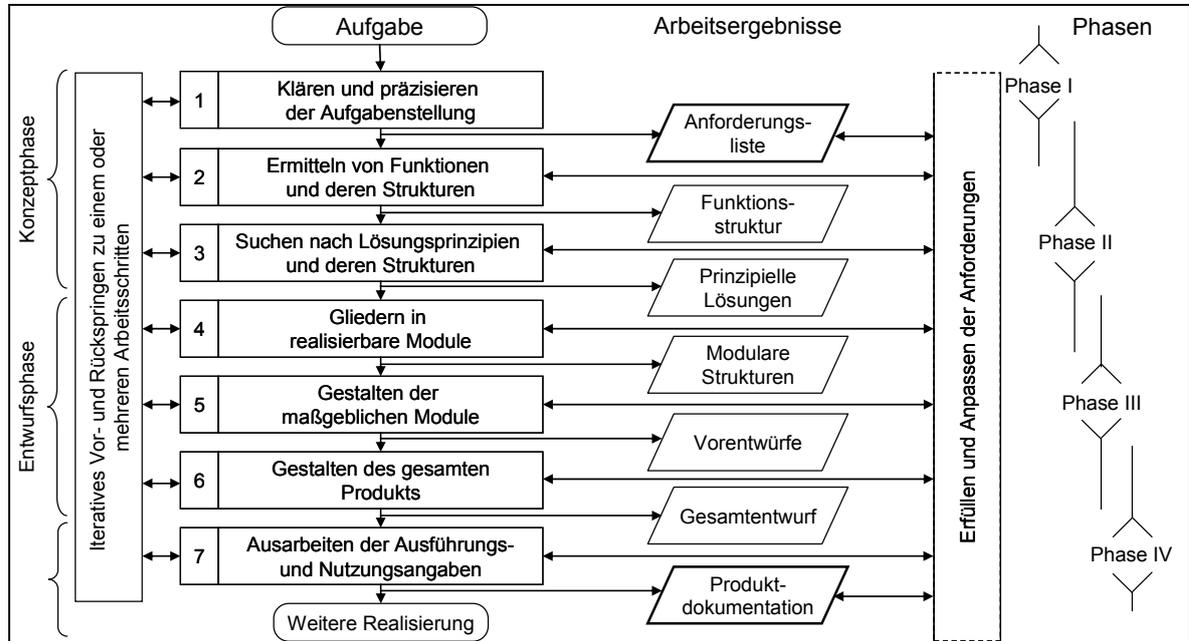
Abbildung 126: „Bodenplatte IV“ gefräst, Ansicht Außen und Innen	- 21 -
Abbildung 127: „Seitenklappe I“ gefräst, Ansicht Außen	- 21 -
Abbildung 128: „Seitenklappe II“ gefräst, Ansicht Innen und Außen.....	- 21 -
Abbildung 129: „Seitenklappe III“ gefräst, Ansicht Innen und Außen.....	- 21 -
Abbildung 130: „Seitenklappe IV“ gefräst, Ansicht Außen und Innen	- 21 -
Abbildung 131: Auftrag von Spritzspachtel „Bodenplatte I“ (links) und Schleifen des Spritzspachtel „Seitenklappe II“(rechts).....	- 21 -
Abbildung 132: Trocknung des lackierten Bauteils „Seitenklappe II“ (links) und Integration der Verbindungselemente in die Bauteilbohrungen (rechts).....	- 21 -
Abbildung 133: Zusammenbau sämtlicher Einzelbauteile zur Gesamtkonstruktion Motoreinhausung	- 21 -
Abbildung 134: Biegeversuch an einer Bodenplatte.....	- 21 -
Abbildung 135: Vergleich der berechneten Durchbiegung mit den Versuchen an den zwei Bodenplatten	- 21 -
Abbildung 136: Aufbau des Demonstrators auf dem Spannfeld	- 21 -
Abbildung 137: Vergleich der berechneten Durchbiegungen mit den Versuchen nach Fall 5 an zwei Messpunkten.....	- 21 -
Abbildung 138: Vergleich der berechneten Durchbiegung mit dem Versuch nach Fall 10.....	- 21 -
Abbildung 139: Schalldämm-Messung im Fensterprüfstand und Einbausituation	- 21 -
Abbildung 140: Ergebnis der Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen im Prüfstand.....	- 21 -
Abbildung 141: Berechnete Moden ausgewählter Wandungsproben	- 21 -
Abbildung 142: Demonstrator an Haltegestell (Gesamtansicht)	- 21 -
Abbildung 143: Innenansicht des Demonstrators.....	- 21 -
Abbildung 144: Außenansicht des Demonstrators	- 21 -
Abbildung 145: Detailansicht von zwei Seitenklappen im mittleren Bereich des Demonstrators	- 21 -

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zug-Elastizitätsmoduls der abgelegten, direkt imprägnierten sowie übersprühten Faser [Kup-12]	- 21 -
Tabelle 2: Ergebnisse der quantitativen Bildauswertung [Kup-12]	- 21 -
Tabelle 3: Ergebnisse der Fehlerrechnung [Kup-12]	- 21 -
Tabelle 4: Vergleich des eingestellten und des realen Glasfasergewichtsanteiles	- 21 -
Tabelle 5: Übersicht der untersuchten Zugronden	- 21 -
Tabelle 6: Übersicht der hergestellte Sandwichstrukturen bei konstantem Sprühastrag, in Abhängigkeit der Robotergeschwindigkeit	- 21 -
Tabelle 7: Mittelwerte der Deckschichtdicken in Abhängigkeit der Glasfasermattenflächengewichte	- 21 -
Tabelle 8: Mittelwerte der Zuguntersuchungen in Abhängigkeit des Glasfasermatten-flächengewichts	- 21 -
Tabelle 9: Ergebnisse der Ermittlung der Kernschubeigenschaften	- 21 -
Tabelle 10: Die Löslichkeit von Methyl-DOPO in Multitec und PUR 455/5 BL	- 21 -
Tabelle 10: Richtwerte zur Erfüllung der CEN/TS 45545	- 21 -
Tabelle 11: Ergebnisse der ISO 5658-2	- 21 -
Tabelle 12: Ergebnisse der ISO 5659-2	- 21 -
Tabelle 13: Ergebnisse der Prüfung nach ISO 5660-1	- 21 -
Tabelle 14: Untersuchte Thermoplastfolien zur Herstellung von Faltkernen	- 21 -
Tabelle 15: Ergebnisse der Simulation der Druck- und transversalen Schubeigenschaften der Faltkerengeometrie 571	- 21 -
Tabelle 16: Spezifische dichtebezogene Kennwerte der untersuchten Materialien in MPa/(kg/m ³); Faltkerengeometrie #266	- 21 -
Tabelle 17: Ergebnisse aus dem Druckversuch DIN 53291 für Faltkerne aus ABS-Blend mit aufgeklebter GFK-Deckschicht und mit aufgesprühter PUR-Deckschicht	- 21 -
Tabelle 18: Steifigkeiten und Festigkeiten der PU-Deckschichten aus Zugversuchen bei Raumtemperatur (RT), bei 75°C und 90°C	- 21 -
Tabelle 19: Gemessene, frequenzabhängige Verlustfaktoren ausgewählter Wandungsproben	- 21 -

11 Anhang

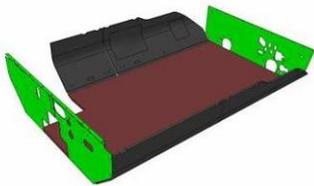
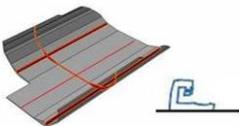
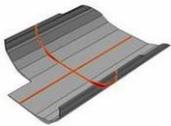
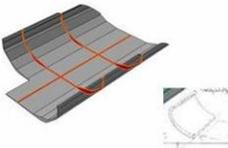
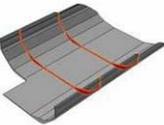
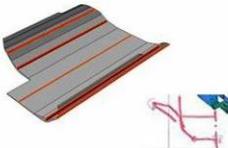
11.1 Systematische Vorgehensweise der Bauteilkonzeption in Anlehnung an [VDI-93]

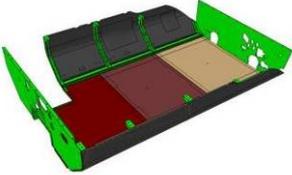
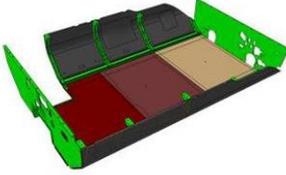
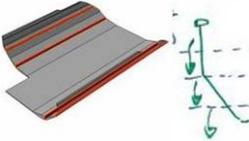
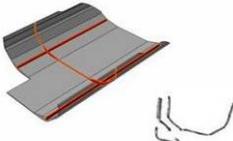
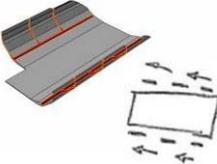
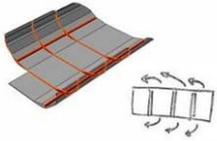


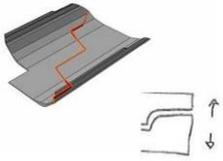
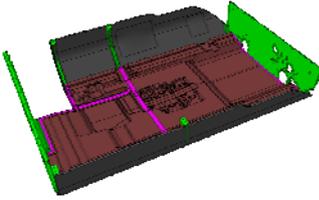
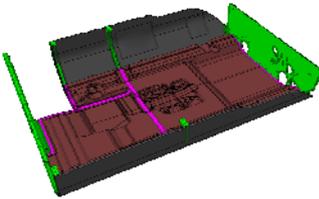
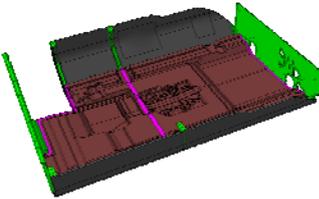
11.2 Baumumfang der konventionellen Bauweise

- Referenzstruktur
 - RMV2_T2_SEITENKLAPPEN_ANBAU
 - 4 Klappen mit Scharnier, Schloss, ...
 - RMV2_T3_BODENWANNE_ANBAU
 - Außengerippe mit 2 Querverstrebungen und
 - 3 Grundplatten
 - 5 Versteifungen
 - 1 Verschalung
 - RMV2_T4_GERUEST_ANBAU
 - 1 einteilige Abschlussplatte
 - 2 Abschlussplatten
 - 2 Strangpressprofile
 - 9 Versteifungen

11.3 Überblick über die erarbeiteten Bauweisenkonzepte

Bezeichnung	Bild	Erklärung
1. Integrierte Streben (ggf. mit Aufteilung der Bodenplatte)		Die Haltefunktion der 9 Streben wird in die Klappen integriert. Die Bodenwanne wird nur durch die Schottbleche und die Anbindungen an die 4 Seitenklappen gehalten. Die Bodenwanne kann z.B. auch mittels 4 Platten zusammen gebaut werden.
2. Schubladenkonzent (ggf. mit weiterer Aufteilung der Bodenplatte)		Die Klappen und die Bodenplatte werden getrennt gefertigt. Die Montage erfolgt durch die mittigen Stangen von außen.
3. Viertelung der Struktur		Die Schottbleche werden gleich gelassen. Die Bodenwanne und die Klappen werden zusammen gefasst und in 4 symmetrischen Bauteilen aufgebaut.
4a. Integration der Bodenplatte in die Klappen		Die Bodenplatte und die Klappen werden zusammen gefasst und in der Mitte aufgeteilt. Diese Segmente können dann in der Länge variiert werden (z.B. 4 oder 6 Segmente).
4b. „U-Konzept“		Die Klappen und die Bodenplatte werden als komplettes U ausgebildet / kombiniert. Diese Segmente können dann in der Länge variiert werden (z.B. 4 oder 6 Segmente).
5. Horizontale Klappenteilung		Die Klappen werden horizontal in ebene Platten geteilt und z.B. mittels Klavierscharnieren aufgeklappt. Die Bodenplatte wird dabei auch integriert.

<p>6a. Plattensubstitution</p>		<p>Das derzeitige Konzept wird beibehalten und nur die Platten bzw. Klappen werden substituiert.</p>
<p>6b. Substitution mit Profilen</p>		<p>Zusätzlich zur Plattensubstitution wird versucht die 9 Halterungen durch 3 Halbringe in Kunststoff (z.B. Flechtschlauch) zu ersetzen.</p>
<p>7. Horizontale Teilung (ggf. mit weiterer Unterteilung)</p>		<p>Die gesamte Motorkapselung wird horizontal in ebene Platten aufgeteilt, die durch ein Gerippe gehalten werden und ggf. nach unten aufgeklappt werden können.</p>
<p>8. Klappenmechanismus nach unten</p>		<p>Die Klappen werden nicht mehr nach oben geöffnet, sondern nach unten geklappt.</p>
<p>9. Klappenmechanismus Schiebetüren (ggf. mit weiterer Aufteilung der Bodenplatte)</p>		<p>Die Klappen werden nicht mehr nach oben geöffnet, sondern nach vorne wie Schiebetüren geschoben.</p>
<p>10. Klappenmechanismus Rollladen</p>		<p>Die Klappen werden nicht mehr nach oben geöffnet, sondern nach vorne wie ein Rollladen übereinander geschoben.</p>

<p>11. Zweiteilung</p>		<p>Die Struktur wird in zwei große symmetrische Teile aufgeteilt, die nach außen auseinander gefahren werden können. Die Schottbleche können, aber müssen nicht integriert werden.</p>
<p>12. Bodenschublade</p>		<p>Die Bodenplatten werden seitlich als „Schubladenkzept“ in Laufschielen ausgebildet. Die Klappen schließen seitlich diese Bodenplatten ab.</p>
<p>12a. geschraubte Bodenwanne</p>		<p>Die Bodenplatten werden von unten an Profile angeschraubt. Die Klappen schließen seitlich diese Bodenplatten ab.</p>
<p>1x. Streben bis auf Mittelabstützung integriert</p>		<p>Die Haltefunktion der 9 Streben wird in die Klappen und einer mittleren Strebe integriert. Die Bodenwanne wird nur durch die Schottbleche, die mittlere umlaufende Strebe und die Anbindungen an die 4 Seitenklappen gehalten. Die Bodenwanne wird mittels 2 oder 4 Platten zusammen gebaut.</p>