

# Schlussbericht zum Teilvorhaben

„Analyse und Umsetzung von Innenraumkomponenten in belastungsge-  
rechten Verbundbauweisen“

im Rahmen des Verbundprojekts „Umsetzung eines neuartigen Ein-  
personen-Elektroleichtfahrzeugs im Sinne eines  
Gesamtsystemansatzes (1PeFZ)“

**Förderkennzeichen:** 13N11605

**Laufzeit:** 01.09.2011 - 31.08.2013

**Durchführende Institution:** Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung,  
Institut für Strukturleichtbau,  
Technische Universität Chemnitz

**Fördernde Institution:** Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Projekträger:** VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Themenfeld „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“ (Förderkennzeichen 13N11605) gefördert.



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I: Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung.....	2
2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	6
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	7

## Teil II: Eingehende Darstellung

1. Wissenschaftlich-Technische Ergebnisse.....	8
1.1. Sitzstruktur .....	8
1.2. Pedalerie mit elektronischem Fahrpedal .....	23
1.3. Kofferraumstruktur .....	30
1.4. Exterieur und Interieur der Flügeltür .....	40
1.5. Innenraumverkleidung .....	47
2. Voraussichtlicher Nutzen.....	53
3. Veröffentlichungen und Präsentationen .....	55

# Teil I: Kurze Darstellung

## 1. Aufgabenstellung

Das Ziel des Verbundprojektes bestand in der Umsetzung eines neuartigen Konzepts für ein Einpersonen-Elektroleichtfahrzeug im Sinne eines Gesamtsystemansatzes, der neben technischer Funktionalität, Material- und Fertigungstechnologien auch die Aspekte Sicherheit, Ergonomie und Design beinhaltet. Zur Validierung des Konzeptes war ein fahrbereiter Demonstrator unter Berücksichtigung aller Komponenten und Teilsysteme aufzubauen.

Das Teilprojekt „Analyse und Umsetzung von Innenraumkomponenten in belastungsgerechten Verbundbauweisen“ der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung (SLK) der Technischen Universität Chemnitz (TUC) befasst sich mit der anforderungsgerechten Gestaltung und Herstellung der Innenraumkomponenten des Einpersonen-Elektroleichtfahrzeugs und im Besonderen mit der Anwendung bzw. Verbesserung von neuartigen Material- und Fertigungskonzepten. Die Aufgabenstellung umfasst die nachfolgend genannten Schwerpunktthemen sowie die Integration der Komponenten in das Gesamtfahrzeug:

- **Sitzstruktur:**
  - Umsetzung der im Fahrzeugkonzept festgelegten hochschwenkbaren Sitzstruktur
  - Konzeption, Auslegung, Konstruktion und Herstellung von Sitzstruktur, Sitzpolster, stufenlosem Verstellmechanismus und Innenraumbodenstruktur
  - Evaluieren von Fertigungsverfahren für die FKV-Bauteile
- **Pedalerie:**
  - Konzeption, Auslegung, Konstruktion und Aufbau der im Fahrzeugkonzept festgelegten verschiebbaren Pedalerie
  - Integration eines elektronischen Gaspedalsystems mit Faserverbundfederelementen
- **Kofferraumstruktur:**
  - Konzeption, Konstruktion und Herstellung der Kofferraumstruktur in Faserverbundbauweise
  - Herstellung des Kofferraumbodens als FKV-Sandwichbauteil im Pressverfahren und Validieren des Verfahrens
- **Interieur/Verkleidungselemente:**
  - Konzeption von funktionalen belastungs- und montagegerechten Innenraumverkleidungsteilen für das Fahrzeugkonzept
  - Konstruktive Umsetzung und prototypische Herstellung der Bauteile
- **Exterieur/Tür:**
  - Herstellung einer Fahrzeugtür im RTM-Verfahren

## 2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundprojekt wurde vom Jenaer Startup-Unternehmen Innovative Mobility Automotive GmbH initiiert. Die Unternehmer verfolgten dabei das Ziel, ihr zukunftssträchtiges Konzept für ein Einpersonen-Elektroleichtfahrzeug anhand eines Musterfahrzeugs zu validieren und für die angestrebte Serienentwicklung zu qualifizieren.

Das Konzept sieht ein nach derzeitigen Standards vollwertiges Einpersonenfahrzeug für den innerstädtischen Individualverkehr sowie für Flottenanwendungen vor. Besonderheiten sind u.a. der Magnesiumskelettraumen mit Kunststoffverkleidungsteilen für Exterieur und Interieur, das Sitz- und Einstiegskonzept mit hochgezogenen Seitenschwellern für erhöhte Crashesicherheit, Flügeltüren, das Antriebskonzept über kompakte Hochleistungsmotoren sowie die Zulassungsfähigkeit für die Fahrzeugklasse L7E.

Ausgangspunkt für die technische Umsetzung des Fahrzeugs sind Ideenskizzen zu Rahmen, Sitzposition sowie Exterieur- und Interieurdesign, d.h. zum Beginn des Projektes sind alle Freiheitsgrade der technischen Entwicklung offen. Die auf zwei Jahre angelegte Projektarbeit reicht demnach von der Festlegung von grundlegenden Randbedingungen und Lastenheften bis zur Herstellung des Demonstrators.

Die Gesamtheit der aus dem Konzept hervorgehenden Anforderungen bedingt eine komplette Neuentwicklung aller Baugruppen und Komponenten des Fahrzeugs. Eine Adaption vorhandener Lösungen ist nur in Ausnahmefällen möglich, sofern eine entsprechende Vorlage existiert und anwendbar ist.

Die Förderbekanntmachung des BMBF zum Themenfeld "Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)" eröffnete die Möglichkeit, das Vorhaben im Rahmen eines Förderprojekts mit verminderten wirtschaftlichen Risiken für die beteiligten Unternehmen umzusetzen. Neben den nachfolgend genannten sieben Konsortialpartnern wirkten weitere Unternehmen im Rahmen von Unteraufträgen an den Arbeitsthemen der Partner mit.

Partner	Schwerpunktt Themen, u.a.
<b>Innovative Mobility Automotive GmbH (IM)</b>	Technische Projektleitung, Fahrwerk, Akku
<b>B&amp;W Fahrzeugentwicklung GmbH (B&amp;W)</b>	Strak, Konstruktion Rahmen und Exterieur, Fahrzeugelektrik, Musterbau
<b>Lätzsch GmbH (Lätzsch)</b>	Fertigung Exterieur, PUR-Sprühverfahren
<b>Stolfig GmbH (Stolfig)</b>	Fertigung Magnesiumrahmen
<b>Altair Engineering GmbH (Altair)</b>	Crashsimulation, FEM
<b>CPM Compact Power Motors GmbH (CPM)</b>	Antrieb
<b>TU Chemnitz, Professur SLK (TUC)</b>	Konstruktion und Herstellung Sitz, Interieur

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde über eine Laufzeit von 2 Jahren vom September 2011 bis August 2013 durchgeführt. In Tabelle 1 sind die einzelnen Phasen des Projektes aufgeführt, die jeweils mit einem Meilenstein abgeschlossen werden. Es ist zu beachten, dass diese Aufstellung nur eine grobe Einteilung der komplexen Arbeitsabläufe widerspiegeln kann. Tatsächlich überschneiden sich die einzelnen Phasen z.T. deutlich, um die begrenzten Konstruktions- und Fertigungskapazitäten der Projektpartner und deren Unterauftragnehmer besser zu nutzen. Dies wurde notwendig, um das Gesamtziel termingerecht zu erreichen.

**Tabelle 1:** Meilensteinplan

Phase	Meilenstein	Geplanter Zeitraum	Realisierter Zeitraum
Konzept	Lastenheftfreigabe	Sep./11-Nov./11	Sep./11-Nov./11
	Konzeptfreigabe	Nov./11-Apr./12	Nov./11-Nov/12
Konstruktion	Konstruktionsfreigabe	Mrz./12-Juli/12	Apr./12-Dez./12
Fertigung	Fahrzeug fertiggestellt	Jul./12-Dez./12	Okt./12-Feb./13
Zusammenbau		Okt./12-Mrz./13	Okt./12-Jun./13
Erprobung	Erprobung abgeschlossen	Apr./13-Aug./13	Mai/13-Aug./13

Die Planung der jeweils anstehenden Arbeitsschritte erfolgte von Beginn an in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Dies umfasste:

- Wöchentlicher Abgleich des Arbeitsstandes (Anforderungen/Konzepte/CAD)
- Regelmäßige Teilnahme (z.T. Telefonkonferenz) an der wöchentlichen technischen Besprechung im Hause B&W Fahrzeugentwicklung GmbH
- Vorstellung des Arbeitsstands in Konsortialmeetings mit allen Projektpartnern
- Individuelle detailbezogene Absprachen mit B&W Fahrzeugentwicklung GmbH, Axxelion GmbH, IAMT mbH, Altair, IM, sowie den Unterauftragnehmern der TUC

Diese sehr intensive Kommunikation war maßgeblich für die erfolgreiche Bearbeitung der einzelnen Schwerpunkte. Änderungen an Konzepten, Bauteilen oder Baugruppen betrafen in der Regel auch die Bauräume anderer Projektpartner und mussten mit entsprechendem Mehraufwand regelmäßig abgestimmt werden. Dabei ist hervorzuheben, dass die Kompromissfindung bei der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern trotz wiederholter Entwicklungsschleifen, Verzögerungen und Konflikte stets auf einvernehmlich akzeptierte Lösungen gelenkt werden konnte.

Als deutlicher Hemmschuh erwiesen sich ungeklärte Kompetenzen und Aufgaben, insbesondere Arbeitsinhalte, die in der Projektplanung noch nicht bedacht werden konnten oder deren Inhalte unterschiedlich interpretiert wurden. In der Folge mussten Teile des ursprünglichen Zeitplans modifiziert werden.

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, beanspruchte insbesondere die Konzeptphase wesentlich mehr Zeit als veranschlagt. Zusammen mit der Konstruktionsphase ergab sich für die nachfolgenden Projektphasen ein Verzug von etwa drei bis vier Monaten.

Darüber hinaus sind die Grenzen zwischen Konzept- und Konstruktionsphase nicht klar bzw. verallgemeinert abgrenzbar, da zahlreiche Komponenten und Baugruppen voneinander abhängen bzw. aufeinander aufbauen. Beispielsweise ist die konzeptionelle Gestaltung der Interieurbauteile zeitintensiv und in hohem Maße vom Design, fertiggestellten angrenzenden Komponenten und Montagelösungen abhängig, wohingegen die finale konstruktive Detaillierung einen in Relation geringeren Aufwand erfordert. Entgegengesetzt verhält es sich beispielsweise bei der Pedalerie. Während der konzeptionelle Aufbau früh festgelegt werden konnte, erforderte die Detailkonstruktion erheblichen Aufwand um die komplexe Baugruppe in sich sowie mit der Bauraumumgebung abzustimmen.

Rückblickend können Faktoren ausgemacht werden, die Verschiebungen in der Konzept- und Konstruktionsphase, technische und menschliche Konflikte sowie eine in Summe erhöhte Stressbelastung aller Beteiligten zur Folge hatten. Das sind u.a.:

- Konzeptionell unzureichende Gewichtung bzw. Priorisierung von Komponenten
- Idealisieren technischer Grenzen
- Simultanes Arbeiten an verschiedenen Orten
- Parallele und wechselnde Arbeitsthemen
- Personalkapazitäts- und Budgetgrenzen

Im Oktober 2012, Projektmonat 14, konnte seitens der TU Chemnitz mit der Fertigung der ersten Bauteile und Formwerkzeuge begonnen werden. Bauteilentwicklung, Werkzeugkonstruktion, Werkzeug- sowie Bauteilfertigung als auch Einbau der gefertigten Komponenten liefen von diesem Zeitpunkt an parallel.

Trotz der beschriebenen Arbeitsbelastung konnte der Colibri im März 2013 auf dem Genfer Autosalon, wenn auch nicht fahrbereit, fertig montiert ausgestellt werden. Dies ist nicht zuletzt der guten Zusammenarbeit mit den Unterauftragnehmern der TU Chemnitz zu verdanken.

Nach dem Genfer Autosalon folgte im April 2013 die Ausstellung des Fahrzeugs auf der Hannover Messe. In der nur kurzen Zwischenzeit wurden vornehmlich weitere elektrische Baugruppen in Betrieb genommen, sowie kleinere Änderungen und Anpassung am Interieur vorgenommen. Nach diesem Termin wurde das Elektrofahrzeug abschließend, durch die Projektpartner B&W, IM, Axxellon und CPM, bis zum fahrbereiten, voll funktionsfähigen Zustand aller Komponenten komplettiert.

#### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das verfolgte Konzept eines neuartigen Einpersonen-Elektroleichtfahrzeugs stellt besondere Anforderungen, die in ihrer Gesamtheit eine grundlegende Neuentwicklung nahezu aller Komponenten und Baugruppen erfordern. In der Folge sind insgesamt nur wenige Anknüpfungspunkte zu bestehenden Lösungen gegeben.

*Sitzstrukturen* aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) sind aus dem Motorrennsport bekannt und finden bisher nur in wenigen Fällen Anwendung im PKW-Bereich. Bei der Gestaltung derartiger Rennsitze wird maßgeblich das Ziel verfolgt, Leichtbaupotentiale voll auszuschöpfen, während Komfortaspekte in den Hintergrund treten.

Desweiteren impliziert das Sitz- und Einstiegskonzept, als wesentlicher Aspekt des verfolgten Gesamtsystemkonzeptansatzes, eine andere Kinematik und erfordert damit eine von herkömmlichen Lösungen abweichende Sitzstruktur. Die Notwendigkeit, den Sitz unter den gegebenen Rahmenbedingungen an die Bauraumumgebung anzupassen, versperrt auch die Möglichkeit, verfügbare Schalensitze in modifizierter Form zu verwenden.

Der Aufbau der Sitzpolsterung mittels neuartigem Abstandstextil und textiler Unterfederung ermöglicht hohen Komfort bei gleichzeitig geringem Gewicht und Bauraum. Die Anwendung dieser Sitzpolsterung ist Stand aktueller Entwicklungen.

Im Bereich *Kofferraumstruktur* existieren aufgrund des Skelettrahmens und der Bauraumanforderungen keine bekannten Lösungen, an die konzeptionell und konstruktiv angeknüpft werden konnte. Das zur Herstellung des Kofferraumbodens angewandte 2-stufige Pressverfahren, bei dem im ersten Schritt ein Hybridfaservlies geformt und konsolidiert und im zweiten Schritt mit einer Decklage aus Organoblech verpresst wird, ist Stand gegenwärtiger Entwicklungen zur Verarbeitung von Organoblechen und GMT-Materialien.

Im Bereich *Interieur* wurde versucht bekannte Lösungen aus dem Fahrzeugbau aufzugreifen, allerdings bestehen konzeptbedingt vollkommen abweichende Ausgangsbedingungen in Bezug auf Bauteilformen und -größen, Montagereihenfolge und Befestigungsbedingungen, Toleranzausgleichskonzepte, sowie hinsichtlich der herzustellenden Losgrößen und der damit korrespondierenden Fertigungsverfahren.

Die Anforderung einer um 200 mm verschiebbaren *Pedalerie* ist einzigartig. Demzufolge wurde eine der ECE-Regelung R35 konforme Musterlösung erarbeitet. Bei der Integration des elektronischen Gaspedalsystems konnte auf Erfahrungen der Professur und des SLB e.V. aus vergleichbaren Anwendungen, von mit Draht-DMS ausgestatteten Faserverbundfederelementen, aufgebaut werden.

Das für den Aufbau der *Flügeltür* sowie für andere prototypische Bauteile verwendete RTM-Verfahren gehört prinzipiell zum Stand der Technik, wobei für die Infusion der z.T. großflächigen Bauteile auf die gesammelten Erfahrungen an der Professur zurückgegriffen wurde.

Die überwiegend konzeptionell-konstruktiven bzw. experimentellen Arbeiten können nur sehr eingeschränkt mit Fachliteratur gestützt werden. Als Informationsquellen dienten Internetrecherchen zu Werkstoffen und Halbzeugen, Maschinenelementen und Fahrzeugkomponenten, bestehenden Lösungen sowie die verfügbaren Kataloge, Herstellerdatenblätter und Auslegungsrichtlinien zu Materialien und Fertigungskomponenten. Weiterhin fanden Inhalte der ECE-Richtlinien zur Gestaltung von Fahrzeugen in den Arbeiten Anwendung.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Kooperation mit den Verbundpartnern wurde im Rahmen von eigenen Unteraufträgen bzw. denen der Projektpartner mit folgenden Firmen zusammengearbeitet:

- Fa. Anchor Lamina GmbH / Fibertech GmbH (Formwerkzeuge und Bauteilherstellung)
- Fa. Krumbholz GmbH (Presswerkzeug)
- Fa. LSE GmbH (Formwerkzeuge)
- SLB e.V. (elektronisches Gaspedal)
- Fa. Axxellon GmbH (Akkupositionierung)
- Fa. IAMT mbH (Fahrwerk, Bremssystem)

## Teil II: Eingehende Darstellung

### 1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die folgende Beschreibung der Projektergebnisse ist nach den Schwerpunktthemen des Teilprojekts gegliedert und gibt darüber hinaus die gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf das Gesamtfahrzeug an.

#### 1.1. Sitzstruktur

##### 1.1.1. Zielstellung

Die Aufgabe bestand darin, eine Leichtbaulösung für den im Fahrzeugkonzept geforderten schwenkbaren Sitz zu erarbeiten und umzusetzen. Die Hubfunktion dient dabei der Einstellung verschiedener Fahrpositionen sowie als Ein- und Ausstiegshilfe.

Die Zielstellung umfasst damit:

- Ermittlung ergonomischer Anforderungen
- Konzeption und Konstruktion des Sitzes
- Variantenuntersuchung für den Hubmechanismus
- Integration in die Struktur des Fahrzeugs
- Auslegung und iterative Detailkonstruktion
- Fertigung und Aufbau des Sitzes

##### 1.1.2. Ergonomiemodell

Zu Beginn des Projektes wurde gemeinsam mit IM ein Ergonomiemodell bzw. die „Sitzkiste“ (Abbildung 1) aufgebaut, um die geometrischen Grundverhältnisse als Basis für die nachfolgende Konzeptentwicklung und Konstruktion zu ermitteln.

Dazu wurde ausgehend von der vorliegenden Ideenskizze des Fahrzeugs ein 1:1-Modell aus Holz aufgebaut, in dem die wesentlichen Merkmale wie u.a. der hochschwenkbare Sitz, die Kopfstütze, die klappbare Lenksäule sowie die hochgezogenen Seitenschweller umgesetzt sind. Des Weiteren wurden die Scheiben, Türen und Dachbalken aufgebaut, um die Sichtverhältnisse beurteilen zu können und die Abläufe beim Ein- und Aussteigen zu ermitteln.

Ausgehend von einer bezogen auf die Mitte der Vorderachse (Koordinatenursprung) festgelegten Position des Sitzes und den Außenmaßen wurden die übrigen Komponenten bzw. Dimensionen angepasst oder einstellbar aufgebaut.



**Abbildung 1:** IM-Geschäftsführer Thomas delos Santos demonstriert das Ergonomiemodell

Am Ergonomiemodell wurden beim Aufbau und in einer nachfolgend von IM durchgeführten Ergonomiestudie Geometriedaten für weitere Entwicklungsschritte ermittelt, u.a.:

- Sitzlänge und -breite, Lehnenhöhe, Lehnenwinkel, Winkelpositionen, Verfahrzeit Hubmechanismus, Position Schwenkachse
- Position/Einstellbereich Lenkrad, Kopfstütze, Fersenaufstellpunkt/Pedalerie
- Position Sicherheitsgurt, Türgriff, Höhe Seitenschweller

Darüber hinaus konnten weitere Vorgaben und Gestaltungsrichtlinien für die Konzeptentwicklung erprobt und festgelegt werden, u.a.:

- Polsterkonzept des Sitzes mit Abstandsgewirke
- Erforderliche Bein- und Fußfreiheit
- Gestaltung der Kopfstütze
- Seitenfreiheit und Armauflage

Prinzipiell konnten nahezu alle Vorschläge aus der Ideenskizze validiert und für die Konzeptphase übernommen werden. Einzig die vorgeschlagenen seitlichen Absorber zur Abstützung des Rumpfes im Crashfall wurden obsolet, da sie bei ergonomisch sinnvoller Anordnung wirkungslos wären.

Als nachteilig erwies sich im Projektverlauf, dass bereits am Ergonomiemodell im Sinne der Kompaktheit mit geringem Bauraumaufmaß für die Strukturen gearbeitet wurde, was in der Folge zu vermeidbarem Mehraufwand bei der Konstruktion und stark eingeschränkten Möglichkeiten zum Toleranzausgleich führte.

### 1.1.3. Hubmechanismus

Das Fahrzeugkonzept gibt eine zurückgelehnte Sitzposition mit tiefem Schwerpunkt sowie hochgezogenem Seitenschweller für erhöhte Sicherheit im Crashfall vor. Damit ist es erforderlich, den Sitz von einer höheren Ein- bzw. Ausstiegsposition in die tiefere Fahrposition zu schwenken. Es wurde eine Lösung konzipiert, die folgende Anforderungen erfüllt, u.a.:

- Hochschwenken der Sitzstruktur um einen festen Drehpunkt ohne Muskelkraft
- Maximale Gewichtsreduzierung der Baugruppe Hubmechanismus
- Stufenloses bzw. mehrstufiges Einstellen verschiedener Positionen
- Verfahrzeit von ca. 3 Sekunden für alle anthropometrischen Fahrertypen
- Betrieb mit 12 V Hilfsspannung

Als Grundkonzept wird ein Linearaktuator verfolgt, der mittig im oberen Drittel der Sitzlehne angreift und gegen den Rahmen am Fahrzeugboden abgestützt ist. Auswahlkriterien hierfür sind der Vorschlag aus dem Fahrzeugkonzept, der eng bemessene Bauraum zwischen Akku und Rückwand/Motorraum, die große Entfernung zu möglichen seitlichen Anbindungspunkten am Rahmen sowie das geforderte niedrige Gewicht der Baugruppe. Nachteilig ist, dass der Aktuator nur Axialkräfte aufnehmen kann und damit alle übrigen Kräfte von dem Schwenklager des entsprechend verwindungssteif ausgelegten Sitzes aufgenommen werden müssen. Eine Zweipunktstützung über einen Scherenhub oder eine vergleichbare Konstruktion war nicht mit dem verfügbaren Bauraum und den Gewichtsanforderungen vereinbar.

Die Anforderung an den Antrieb besteht darin, den Sitz innerhalb von drei Sekunden von der tiefsten Sitzposition in die Ausstiegsposition zu verfahren. Damit ergibt sich bei einem 100 kg schweren Fahrer als Auslegungsrichtwert eine mechanische Antriebsleistung von bis zu 60 W, abhängig von den geometrischen Einbaubedingungen und eine elektrische Leistungsaufnahme von 100 bis 200 W, abhängig vom Wirkungsgrad des Antriebs.

Eine Federkraftunterstützung des Antriebs wurde nicht weiter berücksichtigt, da der Aufwand und das Gewicht zusätzlicher Komponenten den möglichen Vorteil einer Gewichtseinsparung durch Reduzierung der Antriebsleistung übertreffen.

Für den Fahrzeugdemonstrator wurde ein Spindelhubaktuator der Firma SKF (Tabelle 2) verwendet, der die geforderten Kennwerte bei kompakter, robuster und wirtschaftlicher Bauweise gewährleistet. Alternativ können gezielt auf die Anforderungen abgestimmte Systeme anderer Hersteller verwendet werden, die allerdings nicht als Standardkomponenten verfügbar sind.

Im Sinne der Weiterentwicklung, mit Beibehaltung des vorliegenden Konzeptes, ist es erforderlich das Aktuatorsystem gezielt auf die Anforderungen auszulegen. Dabei kann beispielsweise eine Motorbremse zur Verstärkung der Selbsthemmung des Getriebes integriert werden oder



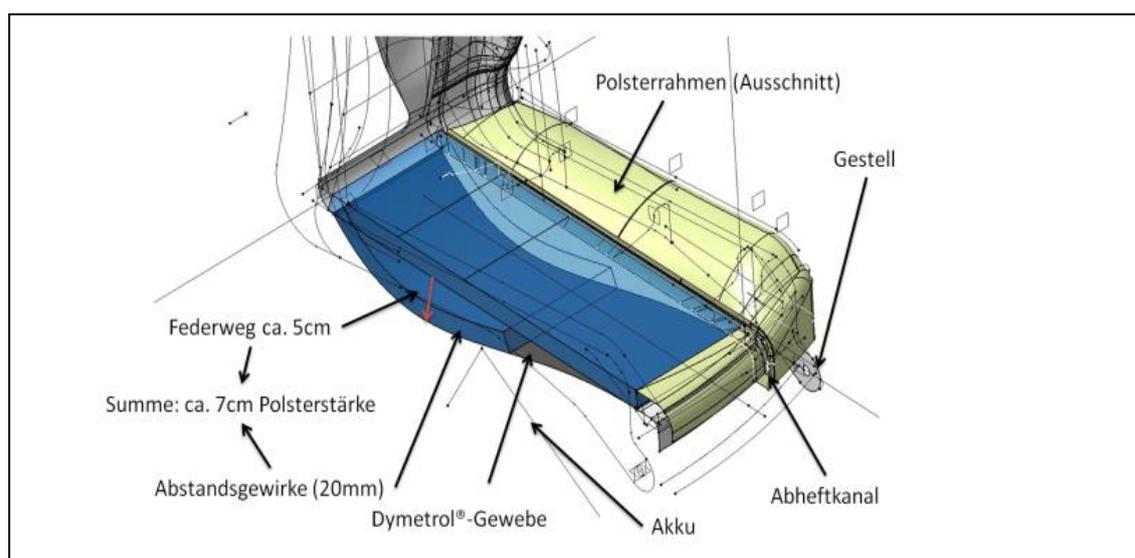
Hinsichtlich der Sitztopologie bestanden weder konkrete Vorgaben noch Erfahrungswerte bei der Anwendung einer kombinierten Polsterung aus Abstandsgewebe und Schaumstoff. Daher wurden beispielsweise für die Gestaltung der Seitenpolster im Lendenbereich Profildimensionen von konventionellen Fahrzeugsitzen herangezogen. Weitere Merkmale, wie das Profil der Lordosenstütze, die Ausprägung der seitlichen Oberschenkelpolster oder das Einsinkverhalten bei Abstandsgewirken, wurden empirisch am Ergonomiemodell ermittelt.

### **Sitzgestell und Polsterung**

Ausgehend von der Sitzoberfläche wurden die einzelnen Komponenten der Baugruppe, bestehend aus dem tragenden Sitzgestell, der Unterfederung und Polsterung, erarbeitet und weiter konkretisiert. Eine Besonderheit des Einpersonen-Elektroleichtfahrzeuges besteht in der sehr tiefen, zurückgelehnten Sitzposition. Der Fahrer nimmt eine vergleichsweise fixierte Position ein, wobei Oberschenkel, Gesäß und Rücken vollflächig am Sitzpolster anliegen. Dies beeinträchtigt signifikant den Klimakomfort bei längerem Sitzen.

Um dem entgegenzuwirken, wurde die Polsterung zum Teil aus Abstandsgewirken aufgebaut, welche durch ihre offene Struktur einen Luft- und Feuchtigkeitsausgleich ermöglichen. Für die Unterspannung der Abstandsgewirke im Lehnen- und Sitzbereich wurde elastisches Dymetrol®-Gewebe verwendet. Dieses Gewebe ist mit elastischen Fasern in Kettrichtung ausgestattet, wodurch die Unterspannung zusätzlich zum Abstandsgewirke Stöße ausgleicht und eine flexible Anpassung des Sitzes an die Körperkontur ermöglicht.

Diese Kombination bildet einen sehr leichten und dünnen Polsteraufbau, der einen mit gewöhnlichen Schaumstoffpolstern vergleichbaren Sitzkomfort bei optimalen Klimabedingungen bietet. Aufgrund der eingeschränkten Formgebung des Abstandsgewirkes besteht der Polsterahmen aus konventionellem PUR-Schaumstoff (Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau der Sitzpolsterung

Das Sitzgestell wurde in Schalenbauweise bzw. als Rahmenkonstruktion mit einem offenen Profil konzipiert. Diese Bauweise ermöglicht die prinzipielle Herstellbarkeit der Struktur mit verschiedenen Fertigungsverfahren aus duroplastischen (RTM, Pressen/Prepreg, Handlaminat) oder thermoplastischen (Organoblech, GMT-Fließpressen, Spritzgießen) Kunststoffcompounds.

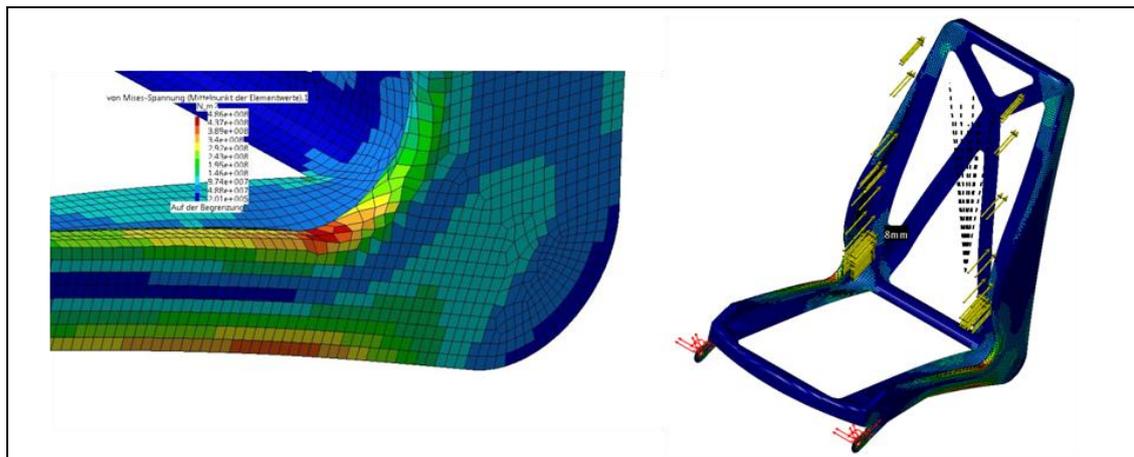
Die Rahmenbauweise ist vorteilhaft, da hier der notwendige Freigang der elastischen textilen Unterspannung gegeben ist. Ein Aufsitzen der Polsterung auf der Sitzschale bei stoßartigen Belastungen im Fahrbetrieb wird so vermieden.

Bei vollständiger Aussparung der Sitzschale im Bereich der Sitz- und Lehnenfläche wird jedoch die Schubsteifigkeit der Struktur stark vermindert. Aus diesem Grund wurde jeweils eine gekreuzte, um den Freigang der Unterspannung zurückgesetzte, Diagonalversteifung vorgesehen. An der Diagonalversteifung im Lehnenbereich befindet sich gleichzeitig der obere Anbindungspunkt des Hubmechanismus.

Diese Sitzstruktur ist in drei Punkten gelagert. Zwei Lagerpunkte befinden sich außen am vorderen Rand der Struktur, unterhalb der Sitzfläche. Die beiden Gleitlager bilden das Festlager, mit der Schwenkbewegung als verbleibenden Freiheitsgrad des Sitzes. Die Hubmechanik wirkt als Stütze gegen die Schwenkbewegung und nimmt, vergleichbar einer Gasdruckfeder, ausschließlich axiale Kräfte auf. Somit wird vorausgesetzt, dass die Rahmenstruktur eine ausreichende Steifigkeit besitzt, um sämtliche im Betrieb auftretenden Verwindungskräfte über die Schwenklager aufzunehmen. Unter den genannten Voraussetzungen wurde eine erste Grobkonstruktion der Sitzstruktur erstellt, die in weiteren Schritten eine Modifizierung nach Bauanforderungen sowie eine Optimierung mittels FEM-Simulation erfuhr.

Die Untersuchungen am FEM-Modell konzentrierten sich auf die wirkenden Belastungen im Crashfall. Maßgeblich ist dabei der Heckaufprall, da hierbei der Insasse, relativ zum Sitz, entgegen der Fahrtrichtung beschleunigt wird. Dies führt aufgrund der Lagerung des Sitzes zu einer überlagerten Biege- und Zugbeanspruchung der Sitzstruktur. Das Crashverhalten bei Frontaufprall ist weniger kritisch anzusehen, da der Insasse hier vornehmlich vom Sicherheitsgurt gehalten wird und die Belastung der Sitzstruktur somit weitaus geringer ausfällt. Ebenfalls simuliert wurde die Querverformung des Sitzes bei Kurvenfahrt.

Die Berechnungen ergaben, dass der Bereich zwischen Lehne und Sitz unzulässig starken Biegebelastungen ausgesetzt ist (Abbildung 4). Dabei verformt sich der Sitz bei der Crashbelastung so stark nach hinten, dass er mit der Rückwand zum Kofferraum kollidiert. Um die unzulässige Aufbiegung zu reduzieren, musste im nächsten Schritt das Widerstandsmoment des Rahmenprofils in diesem Bereich erhöht werden. Lokales Erhöhen der Wandstärke sollte dabei aufgrund von fertigungstechnischen Nachteilen ausgeschlossen werden. Deshalb wurde angestrebt, die Aussteifung über die Anpassung von Profilhöhe und -querschnitt unter Ausnutzung des verfügbaren Bauraumes zu realisieren.

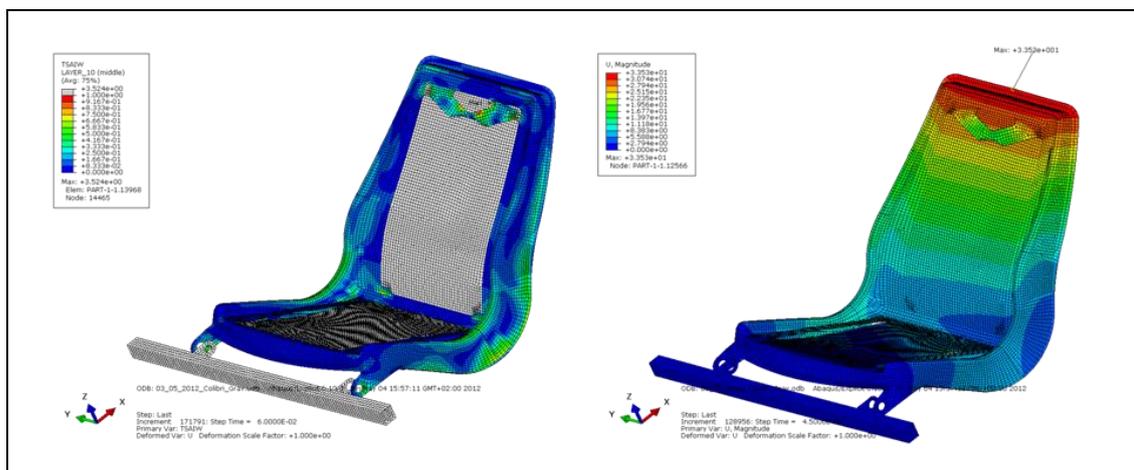


**Abbildung 4:** FEM-Berechnung Iterationsschritt I und Spannungsverteilung an hochbelasteter Stelle

In Abstimmung mit der Firma Axxelon GmbH, in deren Verantwortung die die Konstruktion des Akkupakets liegt, wurde der Bauraum für Sitzstruktur und Akku aufgeteilt. Darüber hinaus erfolgte eine Erhöhung der seitlichen Polsterung, um mehr Raum für die Struktur zu schaffen.

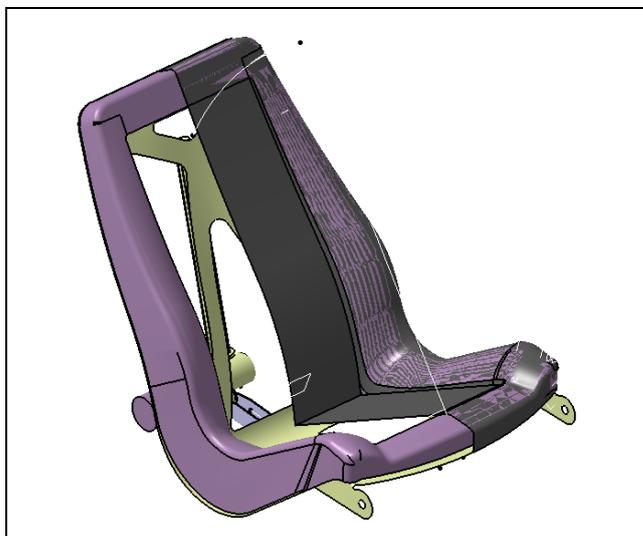
Der nun geringe Abstand zwischen Sitzfläche und Akku macht es aus sicherheitstechnischer Sicht erforderlich, eine redundante Diagonalverstrebung im Sitzbereich einzufügen. Dadurch wird, bei extremen Belastungen im Frontcrash, das Durchschlagen der Polsterung auf den Akku unterbunden.

Nach mehreren Iterationsschleifen und Detailarbeiten konnte eine Lösung gefunden werden, die die Anforderungen aus mechanischer und fertigungstechnischer Sicht erfüllt. Abbildung 5 zeigt, dass im Vergleich zum Ausgangsmodell eine wesentlich homogenere Spannungsverteilung im hoch belasteten Bereich erzielt werden konnte. Dies wurde zum einen durch eine optimierte Geometrie, als auch durch einen belastungsgerechten Lagenaufbau realisiert. So kamen bspw. im kritischen Knickbereich des Sitzes unidirektionale Glasfasergelege zum Einsatz.



**Abbildung 5:** FEM-Berechnung der finalen Sitzstruktur; Versagenskennwert nach Tsai-Wu (links) mit Werten zwischen 0 und 0,8; Durchbiegung (rechts) mit einer maximalen Verformung von 33mm

Das errechnete Gewicht des Sitzgestells beträgt 3,1 kg. Für den Polsterrahmen ergab sich ein Nettovolumen von 7 l. Ausgehend von einer mittleren Dichte von 600 g/l beträgt die Masse des



**Abbildung 6:** Sitz mit Sitzgestell, Polsterrahmen, Bezug (Halbschnitt) und Hubmechanik

Schaumpolsters somit 4,2 kg. Für Abstandsgewirke, Dymetrol®-Gewebe und Sitzbezug wurden nochmals 1,5 kg sowie für mechanische Bauteile, wie etwa das Sitzgelenk, 0,3 kg veranschlagt. Das zu erwartende Gesamtgewicht des Sitzes (Abbildung 6) beträgt 9,1 kg. Im Vergleich wiegt ein konventioneller Fahrzeugsitz zwischen 15 kg und 20 kg, wobei hier wiederum der zusätzliche Lehnverstellmechanismus berücksichtigt werden muss. Aus der Gewichtsverteilung der einzelnen Sitzkomponenten wird außerdem deutlich, dass ein wesentlicher Gewichtsanteil von dem für den Sitz-

komfort zwangsläufig erforderlichen Formschaumrahmen eingebracht wird. Demzufolge bildet der aufgebaute Sitz eine gewichtsoptimierte Kompromisslösung zwischen einem komfortablen verstellbaren Sitz und einem starren, harten Schalsitz.

### ***Kopfstütze und Integration Rückwand***

Durch den großen Schwenkwinkel des Sitzes, zwischen Aus- und Einstiegsposition, ist es nicht möglich, die Kopfstütze im Sitz zu integrieren, da diese sonst mit dem Fahrzeugdach kollidieren würde. Die Kopfstütze musste demnach separat am Fahrzeugrahmen befestigt werden. Dabei ist sicherzustellen, dass in jeder Kopfstützenposition der Fahrzeugsitz nach oben schwenkbar ist. Der Verstellbereich der Kopfstütze wurde im Ergonomiemodell festgelegt. Für die Kopfstütze musste nun ein geeigneter Verstellmechanismus konstruiert werden, der die vorher genannten Bedingungen, auch hinsichtlich des Bauraumes, erfüllt.

In Abbildung 7 ist die Sitzbaugruppe inklusive Kopfstütze abgebildet. Die Kopfstützenmechanik besteht aus 2 Gelenken, wobei das untere Gelenk über Rastpunkte verfügt und durch einen federgelagerten Knopf entsperrt werden kann. Das obere Gelenk dient der Neigungseinstellung des Kopfstützenpolsters. Dieses ist vorgespannt und wird aufgrund der Reibkraft im Gelenk fixiert. Ein Einstellen der Neigung ist durch entsprechenden Kraftaufwand möglich.

Das Profil der Rückwand wurde exakt an die Sitzbaugruppe angepasst, um den vorhandenen Bauraum bestmöglich auszunutzen. Damit kann nach hinten ausreichend Bauraum für den Kofferraum freigegeben werden, dass dieser, trotz der kleinen Abmessungen des Gesamtfahrzeuges, wie im Lastenheft gefordert, zwei Getränkeboxen aufnehmen kann.

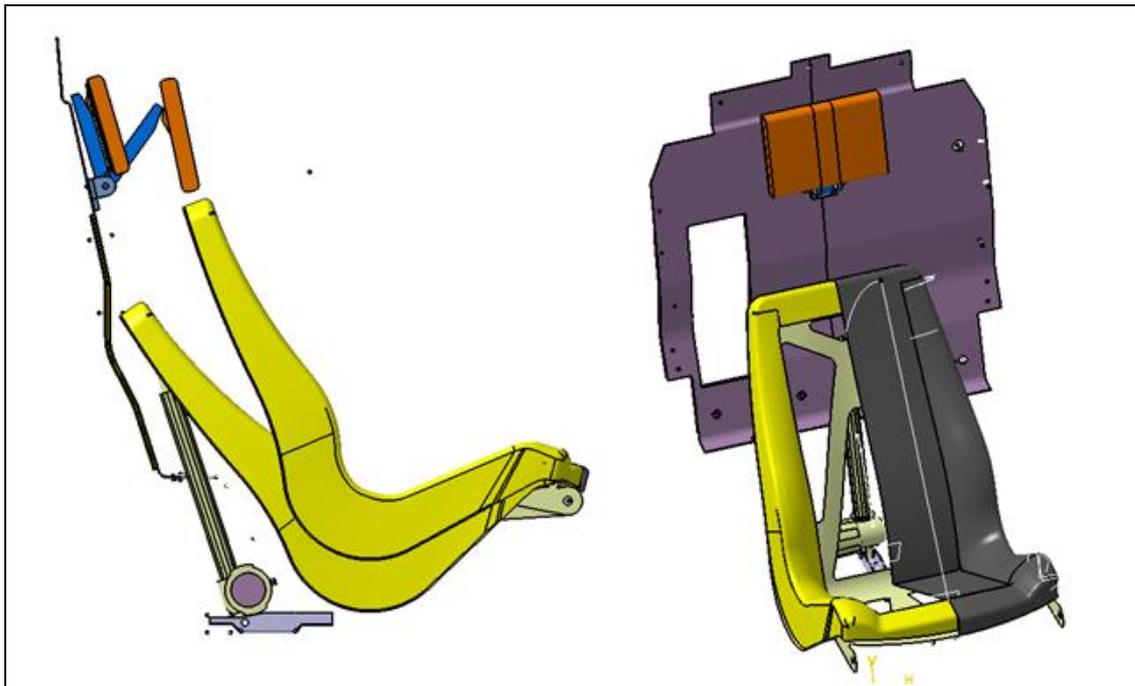


Abbildung 7: Sitzbaugruppe mit Rückwand

### 1.1.5. Herstellung des Sitzes

Der Sitz wurde an der TU Chemnitz und das dazugehörige Werkzeug (Abbildung 8) von der LSE GmbH im Unterauftrag hergestellt. Die Sitzschale wurde im VARTM-Verfahren gefertigt. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass nur eine Formwerkzeughälfte benötigt wird. Dadurch kann der Lagenaufbau und die Bauteildicke völlig frei gestaltet werden. Die zweite Werkzeughälfte wird durch eine Vakuumfolie gebildet. Da die Form nur allseitigem Druck von 1bar standhalten und keine weiteren Kräfte aufnehmen muss, kann die Form aus verhältnismäßig günstigen Materialien, wie Kunststoff oder gar Formschaum, bestehen. Nachteilig ist, dass man dadurch nur eine Gut-Seite erhält. Das ist in diesem Fall jedoch unproblematisch, da die Innenseite des Sitzgestells gepolstert und bezogen wird, und damit nicht sichtbar ist.

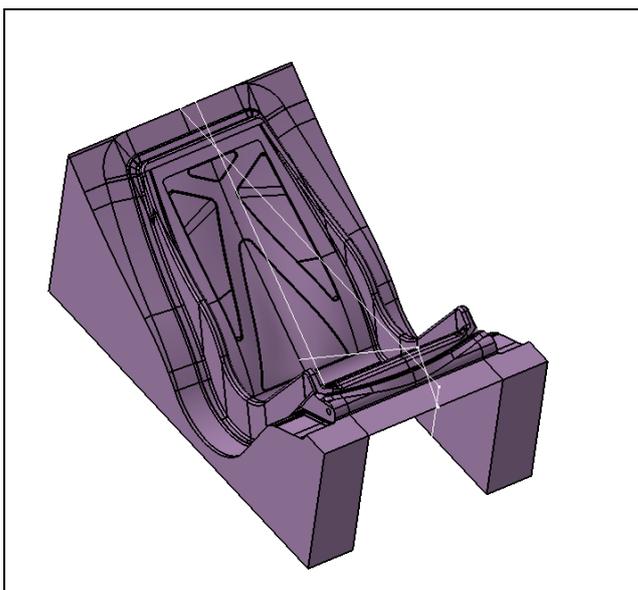


Abbildung 8: Werkzeug Sitzgestell

Von der Außenseite des Sitzgestells wurde die Negativwerkzeugform abgeleitet. Es wurden entsprechende Schnittkanten und Formränder hinzugefügt. Das Werkzeug wurde in 4 Einzelteile geteilt. Damit konnte der Ma-

terialaufwand enorm reduziert werden. Durch das zweckmäßige Zerteilen des Werkzeugs konnte außerdem der Zerspanungsaufwand gesenkt werden, da weniger Volumen zerspannt werden musste und die Werkzeuge auf einer 3-Achs-Fräsmaschine, im Gegensatz zu einer anderenfalls erforderlichen 5-Achs-Fräsmaschine, bearbeitet werden konnten. Die Einzelteile wurden anschließend verklebt und verschraubt, die Fügstellen verspachtelt und geschliffen. Besonderes Augenmerk verlangte dabei die vollflächige Verklebung, da die Formwerkzeugoberfläche für den Vakuuminfusionsprozess vakuumdicht sein muss.

### **Lagenaufbau, Materialien**

Das Sitzgestell wurde komplett aus glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Damit wurde der Forderung Rechnung getragen, keine besonders teuren Materialien wie bspw. Carbonfasern zu verwenden. Ziel des Demonstrators war es, einen Sitz zu fertigen, welcher von den Eigenschaften einem späteren Seriensitz möglichst nahe kommt. Dies betrifft in erster Linie Steifigkeit, Gewicht und Wandstärke. Zusätzlich wurde angestrebt, das Sitzkonzept ohne grundlegende konstruktive Änderungen in eine Serienfertigung übernehmen zu können.

Für ein leistungsfähiges Serienbauteil kommen Organobleche in Frage. Diese weisen in der Regel Faservolumenanteile von ca. 50% auf und werden in beheizten Pressen verarbeitet. Dieses Verfahren ist für die prototypische Herstellung jedoch nicht geeignet. Vergleichbare Bauteilqualitäten, mit geringeren Werkzeug- und Anlagenkosten, erreicht man mit durch Vakuuminfusion hergestellten GFK-Bauteilen. Als Matrixwerkstoff kommt dabei ein besonders niedrigviskoses Epoxidharz mit langer Verarbeitungszeit zur Anwendung.

Die Wandstärke der Sitzschale misst global 3 mm. Der im Crashfall stark auf Zug beanspruchte Bereich der Schwenklager wurde auf 4mm verstärkt. Im Übergang zwischen Sitz und Lehne, wo die größte Biegebelastung auftritt, wurden zusätzliche Lagen unidirektionalen Gelege verwendet. Die hauptsächliche Belastung der Struktur lässt vermuten, dass vornehmlich Verstärkungslagen in Längsrichtung, bezogen auf die Fahrzeugachse, Verwendung finden. Es wurde aber ein symmetrischer, quasiisotroper, mit abwechselnden  $0^{\circ}/90^{\circ}$ - und  $\pm 45^{\circ}$ -Lagen ausgelegten Laminataufbau festgelegt. Dieser Aufbau soll die Verwindungssteifigkeit erhöhen, da diese konstruktiv, aufgrund des offenen Profils, nur unzureichend umgesetzt werden kann.

### **Herstellung RTM und Nacharbeiten**

In Abbildung 9 ist der Infusionsprozess dargestellt. Die Infusion des kompletten Sitzgestells benötigt 18 min sowie eine anschließende Härtezeit von mindestens 24 h. Nach dem Aushärten wurde das Sitzgestell entformt, die Ränder beschnitten und Anbauteile, wie Sitzlagerung und Unterfederung, montiert. Als Polsterung wurde das Abstandsgewirke verwendet.



**Abbildung 9:** Infusionsprozess, links: Beginn der Infusion, rechts: Infusion abgeschlossen

### ***Zusammenbau und Test***

In diesem Zustand wurde der Sitz das erste Mal auf den Fahrzeugrahmen, zu diesem Zeitpunkt noch ein Behelfsrahmen, gemeinsam mit der Pedalerie montiert (Abbildung 10). Es sollte überprüft werden, ob die getroffenen Annahmen und Festlegungen hinsichtlich Ergonomie und Komfort richtig waren und eingehalten wurden. Auch wurde die Hubmechanik auf Funktion überprüft. Das Ergebnis war durchweg positiv und der Sitzkomfort erstaunlich gut. Auch machte der Sitz einen stabilen, vertrauenserweckenden Eindruck und gab kaum nach, wenn man sich hinein lehnte. Gerade dieser subjektive erste Eindruck ist für potentielle Kunden extrem wichtig. Negativ fiel jedoch die Verwindungssteifigkeit auf. Rutschte man im Sitz seitlich hin und her, bzw. lehnte sich zur Seite, gab der Sitz deutlich nach (ca. 3cm). Die Verformung war deutlich größer, als berechnet. In der Praxis zeigte sich, dass die Lagerung der Hubmechanik keinerlei Querkräfte und Biegemomente aufnimmt und somit der obere Lagerpunkt zwei zusätzliche Freiheitsgrade besaß. Diese Freiheitsgrade mussten nun durch eine noch steifere Sitzschale unterbunden werden.

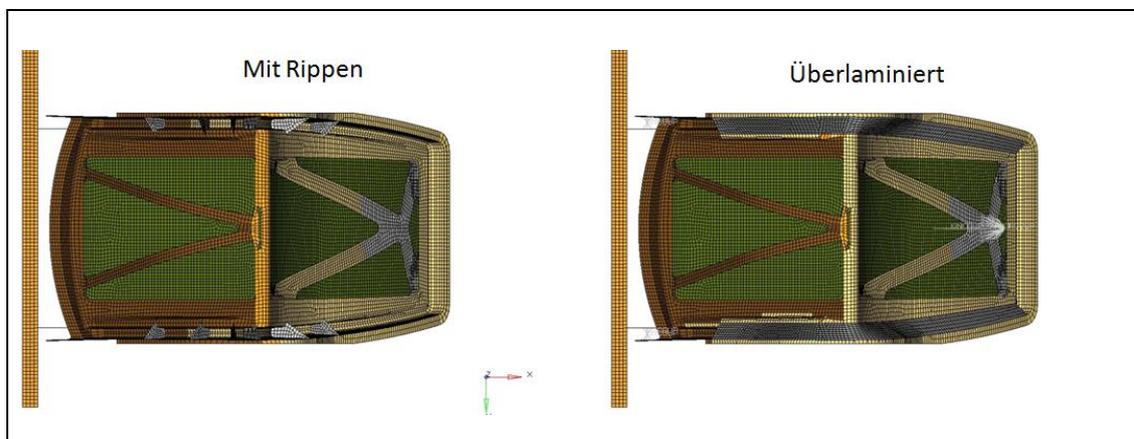


**Abbildung 10:** Sitz in Behelfsrahmen montiert (links), Sitzprobe (rechts)

Es wurden verschiedene Versteifungsvarianten berechnet und hinsichtlich Effektivität und Realisierbarkeit betrachtet. Verglichen wurde (Abbildung 11):

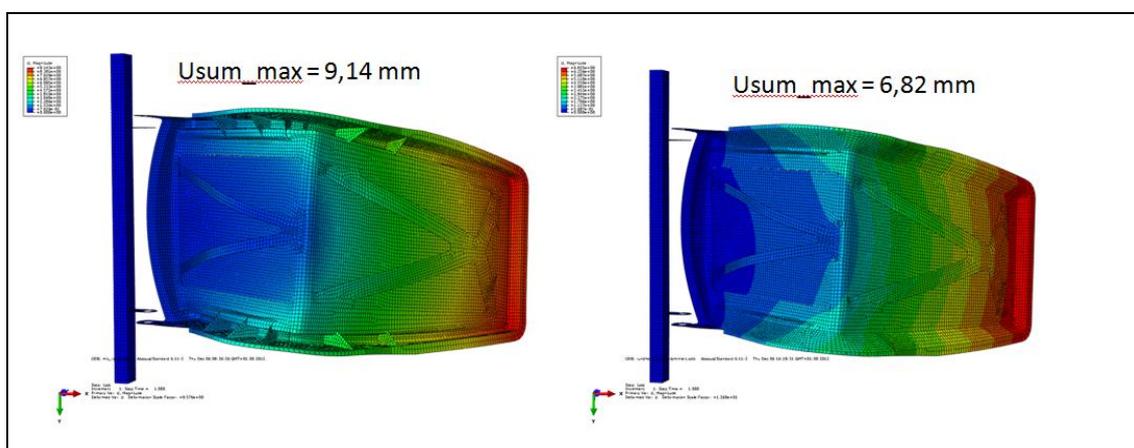
- unverstärkte Variante
- Variante mit Verstärkungsrippen
- Variante mit geschlossenem Profil
- Variante mit Verstärkungskreuz als Schubfeld

Dabei wurde eine Kraft von 500 N im Masseschwerpunkt des Fahrers in Y-Richtung aufgebracht, was einer Kurvenfahrt mit Querbearschleunigung von 0,5 g eines 100 kg Menschen entspricht.



**Abbildung 11:** Auswahl Sitzversteifungsvarianten

Das beste Resultat liefert die Variante mit geschlossenem, überlaminiertem Verstärkungsprofil, da hier die Torsionssteifigkeit am größten ist (Abbildung 12). Hierfür wurde das offene Verstärkungsprofil des Sitzgestells mit Polyurethanschaum ausgeschäumt, vier Lagen Glasfaserfilamentgewebe aufgelegt und anschließend infundiert (Abbildung 13).



**Abbildung 12:** seitliche Verschiebung während Kurvenfahrt



**Abbildung 13:** links: Herstellung geschlossenes Sitzprofil, rechts: Detail, Herausbildung des Profils

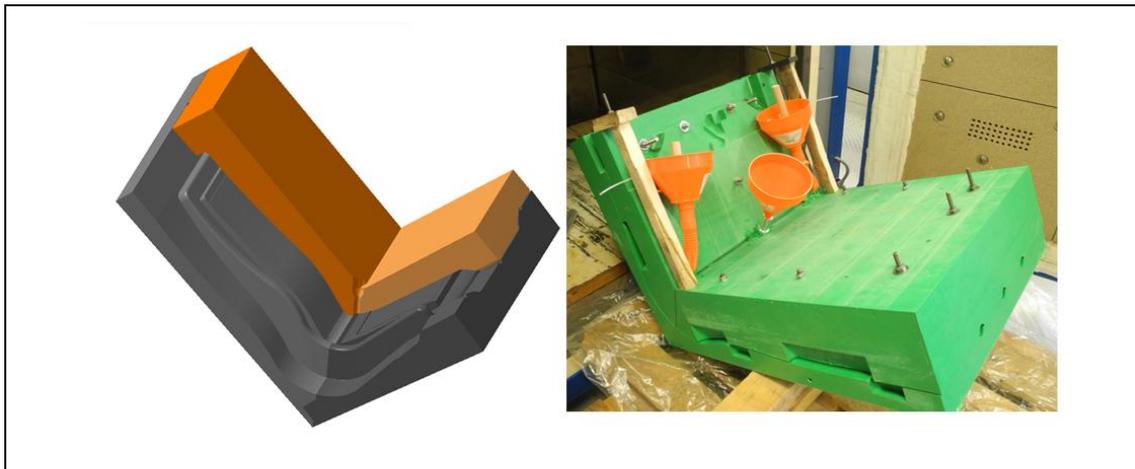
Durch diese Maßnahme konnte die Verwindungssteifigkeit maßgeblich erhöht werden. Ein negatives Verwinden des Sitzes konnte nachher nicht mehr festgestellt werden, weshalb davon auszugehen ist, dass die Verstärkungswirkung des geschlossenen Profils stärker ausfällt, als berechnet. Das Sitzgestell wurde durch diese Maßnahme ca. 800g schwerer.

### **Formschaumpolster**

Mit Fertigstellung der Konstruktionsunterlagen des Sitzes wurde auch mit dem Bau des Formwerkzeuges begonnen. Das Formschaumpolster sollte aus weichelastischem PU-Schaum hergestellt werden. Aufgrund der zum Teil dünnen Polsterung sollte der Schaum eine etwas schwerere Qualität aufweisen. Ausgewählt wurde ein PU-Schaum mit der Rohdichte von  $0,6\text{g/cm}^3$ , der von Hand vergossen werden kann. Die Verarbeitungszeit beträgt laut Hersteller Bayer bei Raumtemperatur ca. 20 s. Danach beginnt der Schaum zu expandieren.

Das Werkzeug besitzt drei zentrale Angusspunkte, die sich an der tiefsten Stelle des Werkzeuges befinden. Hier wird das Polyol/Isocyanat-Gemisch eingefüllt. Bevor das Gemisch ausschäumt, werden die Angusspunkte verschlossen. Durch den expandierenden Schaum soll die komplette Kavität ausgefüllt werden.

Trotz mehrfacher Versuche mit verschiedenen Parametern ist es nicht gelungen, ein funktionsfähiges Schaumstoffpolster herzustellen. Entweder begann das Gemisch schon während des Mischens und Gießens mit Schäumen, wodurch es nicht mehr in die Kavität hineinfließt, oder die Durchmischung war ungenügend, sodass der Schaumstoff nur wenig expandierte und unvollständig ausreagierte. Weitere Versuche mit einer bedingt geeigneten RTM-Anlage verliefen erfolglos, da Durchmischung und Pumpleistung für das hochviskose Fluid nicht ausreichten. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die prototypische Herstellung des Formschaumrahmens auf Basis verfügbarer hochreaktiver PU-Schaumsysteme nicht umsetzbar ist.



**Abbildung 14:** links: Formschaumpolsterwerkzeug, CAD, rechts: Werkzeug mit Angüssen

Das Schaumpolster wurde letztendlich von einem Sattler, welcher auch den Bezug für den Sitz anfertigt, manuell aus einzelnen Schaumstoffstücken zusammengesetzt und verklebt. Das Resultat war zufriedenstellend.

#### **Finaler Einbau**

Der vormontierte Sitz, mit Sitzlagerung, textiler Unterfederung sowie Abstandsgewirke, wurde dem Sattler übergeben, welcher das Schaumpolster und den Lederbezug anfertigte. Anschließend wurde der Sitz in das Elektrofahrzeug eingebaut (Abbildung 15).



**Abbildung 15:** Eingebauter Sitz

### 1.1.6. Beurteilung der Lösung

Der Sitz bietet guten Komfort und Seitenhalt, besonders im Vergleich zu anderen Elektrofahrzeugen dieser Klasse. Auch größere Personen finden bequem Platz. Der Hubmechanismus ist in der Lage, den Insassen zügig nach oben bzw. unten zu befördern. Die geforderte Verfahrgeschwindigkeit von 100 mm/s wurde erreicht, jedoch nicht für sämtliche Gewichtsklassen. Außerdem ist von Vorteil, dass der Hubmechanismus kaum nachläuft und somit ein exaktes Einstellen der Sitzposition möglich ist. Dies wurde erreicht, indem der Sitz in der Abwärtsbewegung mit einer geringeren Spannung angetrieben wird, und der Nachlauf damit signifikant verringert wurde.

Die Seitenwangen des Sitzes sollten im Bereich der Knie flacher ausfallen, da für ein entspanntes Sitzen die Beine gern etwas angewinkelt werden. Die textile Unterfederung benötigt mehr Vorspannung, sowohl im Sitz als auch im Lehnenbereich. Besonders die Lordosenstütze würde davon profitieren, die aktuell kaum merklich ist. Ungewohnt ist auch die Trennung von Sitz und Kopfstütze.

Das Sitzkonzept erlaubt ein komfortables Sitzen und ein bequemes Einstellen der Ergonomie. Ungewohnt ist aber nach wie vor das Ein- und Aussteigen, das etwas Übung benötigt. Ob sich diese Lösung beim Nutzer durchsetzt, bleibt abzuwarten. Als verbesserungswürdig hat sich auch die Türkantur im Bereich der A-Säule erwiesen, die im Beinbereich ein besseres Ein- und Aussteigen verhindert. Auch Rockträgerinnen werden hierbei vor Herausforderungen gestellt. Das Sitzgestell hat sich, in Kombination mit der 3-Punkt-Lagerung im ursprünglich geplanten Zustand, als nicht verwindungssteif genug herausgestellt. Dem konnte entgegengewirkt werden, indem die offenen Profile des Sitzes zu Geschlossenen umgewandelt wurden. Geschlossene Profile sind jedoch wesentlich aufwändiger herzustellen. Das gewählte Fertigungsverfahren ist ein klassisches prototypisches Verfahren mit geringem Werkzeug- und hohem Fertigungsaufwand und ist, wie bereits erläutert, nicht für die Serienproduktion geeignet. Hierfür bieten sich sogenannte Organobleche an. Diese können erwärmt und anschließend umgeformt werden. Taktzeiten von wenigen Minuten sind damit realisierbar. Um eine Sitzschale mit geschlossenem Profil zu erhalten, müssen zwei Halbschalen gefertigt und anschließend gefügt werden. Nachteilig ist der erhöhte Werkzeug- und Fertigungsaufwand, gegenüber einer Einzelschale.

Der Nachteil der geringen Verwindungssteifigkeit offener Profile könnte umgangen werden, indem eine alternative Lagerung des Sitzes die unerwünschten Freiheitsgrade einschränkt. Im konkreten Fall müsste die Verwindung um die vertikale Achse und/oder die Fahrzeuglängsachse gesperrt werden. Dies kann realisiert werden, indem eine geführte Kinematik verwendet wird, die die schwenkbare Sitzschale beidseitig, d.h. links und rechts abstützt. Das zusätzliche Gewicht kann jedoch nicht durch den Gewichtsvorteil einer einschalig aufgebauten Sitzstruktur kompensiert werden. Darüber hinaus benötigt diese Lösung mehr Bauraum, so dass sich insgesamt keine wesentlichen Vorteile dieser Lösung ergeben.

## 1.2. Pedalerie mit elektronischem Fahrpedal

### 1.2.1. Zielstellung

Das zugrundeliegende Fahrzeugkonzept fordert eine verschiebbare Pedalerie, um in Verbindung mit dem schwenkbaren Sitz die Fahrposition für eine große anthropometrische Nutzergruppe einstellen zu können.

Die Zielstellung umfasst damit:

- Ermitteln ergonomischer Anforderungen der Pedalerie
- Konzeption der Pedalerie
- Integration der verschiebbaren Pedalerie in die Struktur des Fahrzeugs
- Anwendung und Integration eines elektronischen Fahrpedalsystems
- Auslegung und iterative Detailkonstruktion
- Umsetzung einer Stirnwand/Vorderraumabdichtung
- Fertigung, prototypischer Aufbau, Einbau und Funktionsnachweis

### 1.2.2. Konzeption

Basis für die Konzeption der Pedalerie sind die aus dem Ergonomiemodell abgenommenen Maße, die die Positionen der Fersenaufstellpunkte im Fahrzeug abhängig von der Sitzposition verschieden großer Fahrer beinhalten.

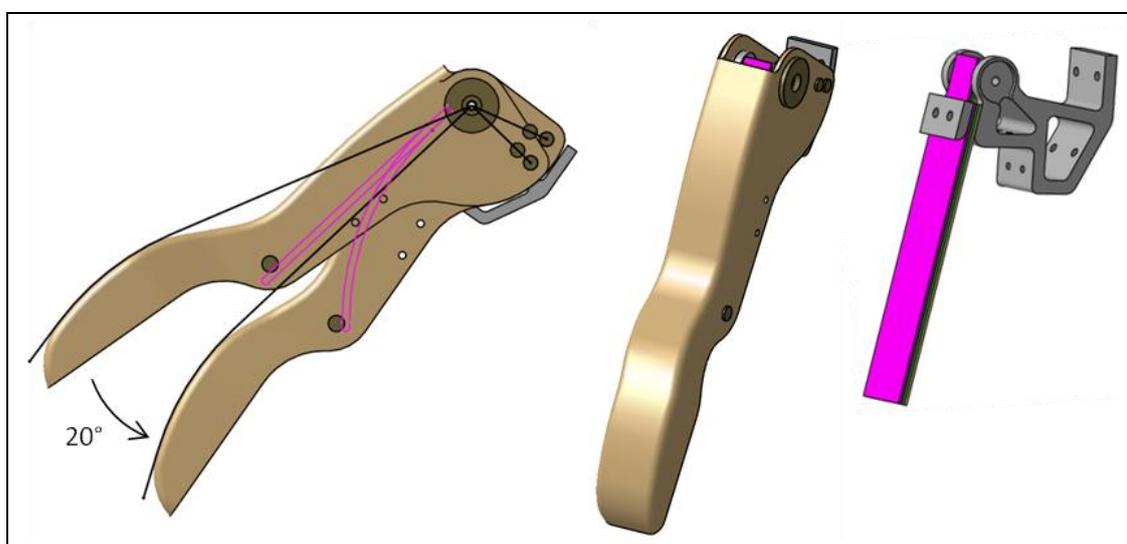
Ausgehend von diesen Maßen, sowie von Vorgaben nach ECE R35, wurde ein Grundmodell für die Pedalerie erarbeitet und in zahlreichen Iterationen bis zur endgültigen Konstruktionslösung entwickelt. Der reduzierte Bauraum im Vorderwagen des kompakten 1-Personen-Elektroleichtfahrzeugs verursacht dabei vermehrten Abstimmungsbedarf durch widerkehrende Konflikte zwischen den angrenzenden Komponenten Rahmen, Fahrwerk, Pedalerie, Lenkgestänge, Akku, Lenksäule und Lüftung. Das verfolgte Konzept berücksichtigt folgende Merkmale:

- Anbindung der Pedalerie an den Magnesiumrahmen über eine Stahlkonstruktion
- Verschiebeeinheit, bestehend aus Schlitten (Al) und Fußschale (GFK)
- Linearführung: Linearkugellager + Laufrollenlager, aus Standardkomponenten
- Federkraftunterstützte Verschiebung um  $s = 210$  mm, zugbetätigter Einrastmechanismus
- Hängendes Fahrpedal mit Sensorfedern aus GFK, Pedalweg  $20^\circ$  ( $\approx 70$  mm), redundantes Signal
- Hängendes, kugelgelagertes Bremspedal mit Waagebalken und zwei Einfachbremszylindern
- Auslegung der Pedalerie auf maximale Betätigungskraft  $F = 2$  kN am Bremspedal
- Feuchtraumabdichtung durch umgebende Stirnwand

### 1.2.3. Fahrpedal

Für das Fahrpedal des Fahrzeugs wurde ein Konzept aufgegriffen, bei dem das Wegsignal über GFK-Biegefedern mit einlamierten, gestickten Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen wird. Das Pedal (Abbildung 16) besteht aus 3 Komponenten - dem Montagekörper aus Aluminium, dem Federnpaket, sowie dem Pedalhebel aus GFK. Der Pedalhebel biegt das im Montagekörper fest eingespannte Federnpaket. Das Federnpaket ist mit leichter Vorspannung eingebaut, um ein definiertes Signal in der Ausgangstellung des Pedals zu generieren.

Das Gaspedal wird an der Fußschale verschraubt. Die Position ist einerseits montagegerecht und wird andererseits durch die ergonomische Anordnung des Pedaldrehpunkts relativ zum Fersenaufstellpunkt bestimmt.



**Abbildung 16:** Aufbau des elektronischen Fahrpedals; Seitenansicht mit Min./Max.-Position des Pedalhebels (links), Pedalhebel (Mitte), Montagekörper mit Federnpaket (rechts)

Bei der umgesetzten Variante wird ein Federnpaket aus drei jeweils 1,5 mm starken und 30 mm breiten GFK-Biegefedern mit einer Federlänge von ca. 120 mm verwendet. In die beiden äußeren Federn sind Draht-DMS einlamiert. Die mittlere Feder dient als Abstandshalter zwischen den Kontakten der Sensorfedern sowie zur Erhöhung des Biegeverbandes des Federnpakets. Die optimale Betätigungskraft des Fahrpedals wurde empirisch ermittelt.

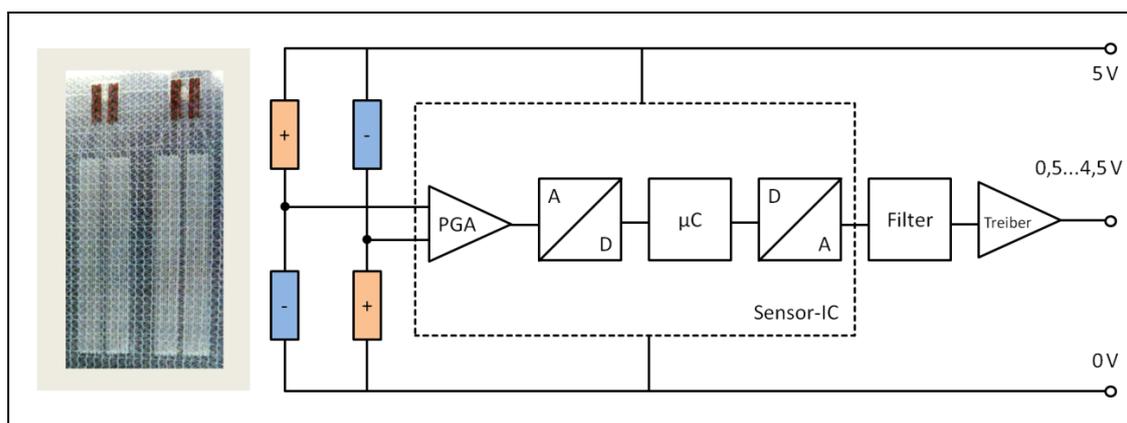
Bei der Fertigung der Draht-DMS wird ein Konstantendraht ( $d=50\ \mu\text{m}$ ) im Stickverfahren mäanderförmig auf einem Polyestervlies verlegt und mit den Stickfäden fixiert. Diese Messwiderstände sind jeweils paarweise symmetrisch, mit einem an die Geometrie des Federelements angepasstem Layout, angeordnet.

Die Sensorfedern werden als Laminat aus Glasfasergewebe mit Epoxidharzmatrix im Pressverfahren hergestellt, wobei in beiden Randschichten ein mit einem Messwiderstandspaar besticktes Vlies einlamiert wird. Bei beiden Sensorfedern werden die jeweils 4 Messwiderstände zu einer Wheatstoneschen-Vollbrücke verschaltet.

Für die Auswertung der Messsignale wurde ein Messverstärker aufgebaut, der als externes Modul an der Pedalerie nahe dem Gaspedal angebracht wird, um den Einfluss von elektromagnetischen Störeinflüssen durch kurze Leitungslängen zu reduzieren.

Der Messverstärker (Abbildung 17) wird an eine der vier im Fahrzeug vorhandenen Motorsteuereinheiten angeschlossen. Dabei werden die Verstärkerschaltung und die Messbrücke von der Motorsteuereinheit mit einer Gleichspannung von  $U = 5\text{ V}$  gespeist.

Das Signal durchläuft einen programmierbaren Verstärker und einen Digitalwandler, wird vom Mikrocontroller ausgewertet und wird wieder zu einem analogen Signal gewandelt. Nachgeschaltet sind ein Filter sowie eine Treiberstufe. Die Schaltung liefert ein dem Pedalwinkel bzw. –Weg-proportionales analoges Signal im Bereich von  $0,5 \dots 4,5\text{ V}$  an die Motorsteuerung. Die Verstärkerschaltung besteht aus zwei identischen Zweigen und stellt somit ein zweites redundantes Signal zur Verfügung. Die Auswertesoftware des Mikrocontrollers wird im eingebauten Zustand der Sensorfedern justiert.



**Abbildung 17:** Laminatplatte mit zwei Sensorfedern (links), Blockschaltbild Messverstärker (rechts)

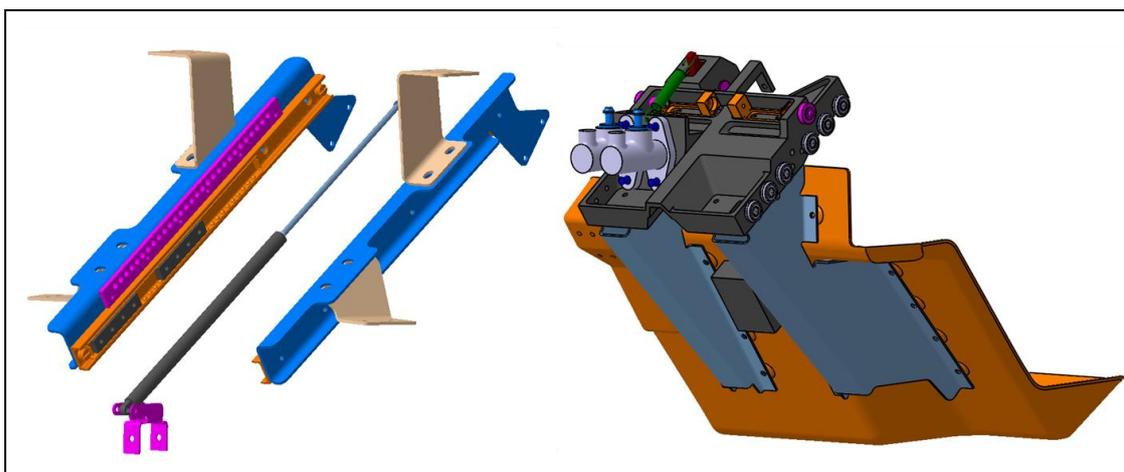
#### 1.2.4. Konstruktion, Fertigung und Aufbau der Pedalerie

Basis der Pedalerie (Abbildung 18) bildet ein verschieb- und arretierbarer Schlitten/Montagekörper aus Aluminium, an dem alle zu verschiebenden Komponenten (Fußschale, Pedale, Bremszylinder, Arretiermechanismus) befestigt sind. Der Schlitten wird beidseitig durch Linearlager auf einer um  $35^\circ$  zur Horizontalen geneigten Ebene geführt. Als Festlager wird rechts ein Linearkugellager Rollon „Easy Rail“ Baugröße 28 mm mit zwei synchronisierten Läufern verwendet. Auf der linken Seite kommt ein Loslager Rollon „Compact Rail“ Baugröße 28 mm mit sechs versetzt angeordneten Exzenter-Laufrollen zur Anwendung.

Die Führungsschienen der Linearführungen sind mit der Pedalerieaufhängung verschraubt. Für beide Seiten besteht die Aufhängung jeweils aus einem U-Profil, das mit je zwei Winkeln an den Magnesiumstreben des Fahrzeugrahmens befestigt wird. Die Teile der Aufhängung sind

aus 3 mm starkem Stahlblech gefertigt, damit auch der vereinfachte, prototypische, sickenlose Aufbau eine hohe Steifigkeit gewährleistet.

An den Profilen der Pedalerieaufhängung ist auf beiden Seiten oberhalb der Führungsschiene eine Lochschiene zur Aufnahme der im Schlitten befestigten gefederten Arretierbolzen angebracht. Beim Lösen der Arretierung über einen manuell bedienten Bowdenzug kann der Schlitten in 10 mm-Schritten über den Verstellbereich von 210 mm verschoben werden. Dabei erfolgt die Verschiebung zum Fahrer hin durch die Kraft einer Gasdruckfeder (100 N) und in die entgegengesetzte Richtung durch Fußkraft.



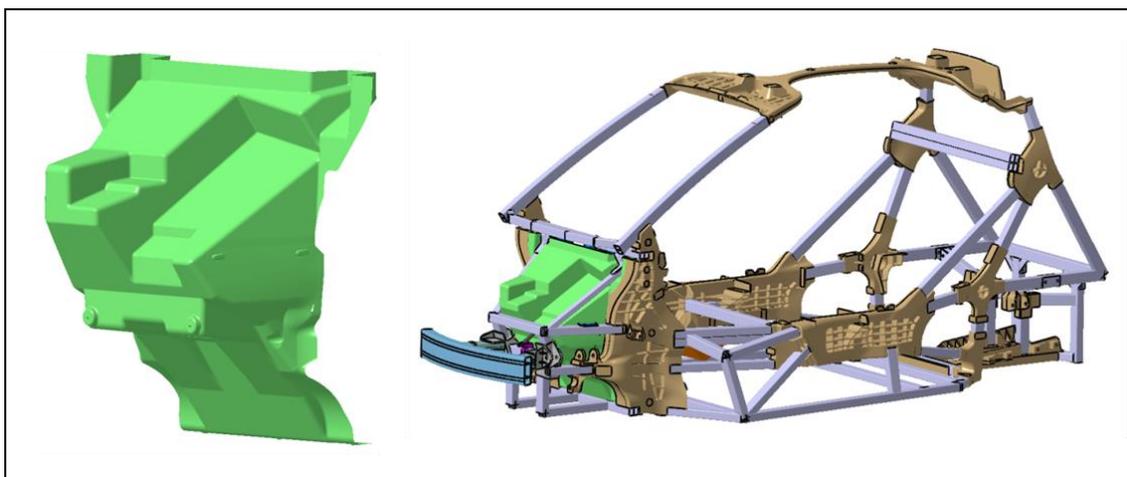
**Abbildung 18:** Konstruktionsansicht der Pedalerie; links: Pedalerieaufhängung mit Führungsschienen und Gasdruckfeder; rechts: Schiebeschlitten mit Bremszylinder, Pedalen und Fußschale

Die Aktorik des Bremssystems besteht aus zwei einfachwirkenden Druckzylindern CP2623 der Firma AP Racing, die über ein kugelgelagertes Bremspedal mit Waagebalken betätigt werden. Die umgesetzte Lösungsvariante resultiert aus den beengten Bauraumverhältnissen sowie der eingeschränkten Verfügbarkeit von direkt wirkenden (Tandem-) Bremszylindern ohne Bremskraftverstärker.

Die mechanische Auslegung der Pedalerie erfolgte unter der Annahme einer maximalen Betätigungskraft auf das Bremspedal im Panikfall von  $F = 2000 \text{ N}$ . Der Pedalhebel wird dabei auf den Sicherheitsfaktor von  $S \geq 2$  dimensioniert. Die übrigen Komponenten werden zur Gewährleistung der Steifigkeit der Linearführungen überdimensioniert.

Der Fußraum bzw. die Fersenaufstellfläche wird in Form einer verschiebbaren Fußschale mit Winkeln an dem Schlitten befestigt. Die Fußschale wird im RTM-Verfahren aus 3 mm starken GFK hergestellt.

Die gesamte Pedalerie wird von einer Stirnwand bzw. Vorderraumabdichtung (Abbildung 19) umgeben, die den Innenraum über eine Dichtfuge bündig am Fahrzeugrahmen abdichtet. Durchführungen für Lenksäule, Brems- und Lüftungsschläuche können über flexible Manschetten verschlossen werden. Die Geometrie des Bauteils richtet sich nach den angrenzenden Komponenten im Vorderwagen. Das Bauteil wurde aus 2 mm GFK-Laminat aufgebaut.



**Abbildung 19:** Vorderraumabdichtung und Einbausituation der Baugruppe im Fahrzeugrahmen

### 1.2.5. Beurteilung der Lösung

Die umgesetzte Lösung stellt ein prototypisch aufgebautes Muster für eine Pedalerie mit der konzeptionell geforderten Verschiebbarkeit dar. Als Anknüpfungspunkte für die Weiterentwicklung der Variante zu einer serienfähigen Lösung sind folgende Erkenntnisse bzw. Entwicklungspotentiale zu nennen.

#### ***Aufbau und Rahmenanbindung***

Die Pedalerie wurde prinzipiell als selbstständige Baugruppe konzipiert, die vormontiert in den Fahrzeugrahmen eingesetzt werden kann. Aufgrund der komplexen Bauraumsituation im Vorderwagen konnte dieses Konzept mit pragmatischen Lösungsansätzen nicht vollständig umgesetzt werden. Der prototypisch umsetzbare Aufbau führt zu einer Mischkonstruktion aus Aluminiumkomponenten, Blechbiegeteilen und Standardkomponenten, die in dieser Form nicht wirtschaftlich in größeren Stückzahlen hergestellt werden kann.

Die Linearführung der Pedalerie, bestehend aus einem Fest- und einem Loslager, wurde mit Standardkomponenten aufgebaut, wobei rechts und links jeweils eine Führungs- und eine Lochschiene für die Arretierung über einen Stahlblechhalter mit Winkeln an den Rahmen angebunden werden. Dieser Aufbau kann serienfähig, ähnlich einer konventionellen Kfz-Sitzlängsverstellung, in einer einzigen Stahlbaugruppe integriert werden. Damit entfällt erheblicher Montage- und Justieraufwand, die Mehrkosten für die Präzisionslager sowie zusätzliches Gewicht durch Materialdopplung.

Die Pedalaufhängung aus Stahl wird an 4 Punkten flach mit den Magnesiumprofilen der Rahmenstruktur verschraubt, mit dem Nachteil, dass die Profile verformt werden und somit keine dauerhaft feste Schraubverbindung hergestellt werden kann. Alternativ könnte die Verschraubung an massiv ausgeführten Befestigungslaschen an den vorderen Rahmenknoten sowie formschlüssig an dem vorderen Querbalken erfolgen.

Für die Weiterentwicklung wird die Neugestaltung der tragenden Komponenten der Pedalerie als Schweiß- bzw. Biegekonstruktion mit integrierter Linearkugellagerung und Bolzenarretierung vorgesehen. Dabei ist eine fertigungsgerechte Lösung zu entwickeln, die in weiteren Iterationsschritten, unter Beachtung der erforderlichen Steifigkeit, im Gewicht reduziert werden kann. Allerdings ist das Leichtbaupotential dieser Konstruktion aufgrund langer Hebelwege zwischen Kraftangriff am Bremspedal und dem Fahrzeugrahmen stark eingeschränkt.

### ***Vorderraumabdichtung***

Am Demonstratorfahrzeug wurde versucht, eine einteilige Vorderraumabdichtung zwischen den A-Säulen aufzubauen, welche die verschiebbare Pedalerie umschließt. Dabei ergaben sich Probleme hinsichtlich einer aufwändigen Montagereihenfolge und aufgrund von Engstellen durch die hohe Packungsdichte im Vorderwagen.

Prinzipiell kann das Konzept einer einteiligen Stirnwand mit flexibel abgedichteten Wartungsöffnungen und Kabel- bzw. Schlauchdurchführungen angewendet werden. Dafür ist eine Überarbeitung des Bereichs Vorderwagen hinsichtlich der Bauraumoptimierung sowie der Toleranz- und Montageabstände von einzelnen Komponenten, Routing von Kabeln und Schläuchen sowie der Verlegung von variablen Komponenten erforderlich.

### ***Fahrpedal***

Das elektronische Gaspedalsystem kann zur Ansteuerung der Motoren verwendet werden. Für eine Serienanwendung ist die Umgestaltung bzw. Anpassung der Pedalbauteile für die Fertigung im Spritzgussverfahren zielführend.

Darüber hinaus muss die Serientauglichkeit des Sensorsystems geprüft werden. Die Herstellung der Faserverbundfedern mit einlamierten gestickten Draht-DMS erfolgt derzeit unter Laborbedingungen. Verschiedene Ansätze für einen automatisierten bzw. wirtschaftlichen Fertigungsprozess der Sensorelemente wurden bisher nicht untersucht. Insbesondere die Positionierung, Kontaktierung und Konfektionierung der bestickten Vliese erfordern weitere Entwicklungsarbeiten.

Bei der Konzeption der Signalauswertung des Gaspedals wurden Kompromisse eingegangen, die bei einer Weiterentwicklung zugunsten der Robustheit des Systems ausgeräumt werden können. Zum einen sollte dem Messverstärker eine höhere Versorgungsspannung zur Verfügung gestellt werden, um die benötigte rausch- und störfreie Brücken- bzw. Versorgungsspannung von  $U = 5\text{V}$  über einen zusätzlichen Spannungsregler in der Verstärkerschaltung zu erzeugen. Des Weiteren sollte der Messverstärker modifiziert werden, um ein differentielles Signal an die Motorsteuerung ausgeben zu können.

### ***Bremsaktorik***

Die Umsetzung der beiden getrennten Bremskreise erfolgte über zwei separate Bremszylinder anstatt eines einzelnen Tandembremszylinders. Ausschlaggebend für diese Festlegung war die

eingeschränkte Verfügbarkeit von anforderungsgerechten Tandembremszylindern ohne Bremskraftverstärker, sowie die für den Crashfall augenscheinlich ungünstige Einbauposition.

Im Zuge einer Überarbeitung sollte das tatsächliche Crashverhalten der Pedaleriekomponenten erneut evaluiert werden, da der gesamte Aufbau durch die Entwicklung und Anwendung eines angepassten Tandembremszylinders optimiert werden kann. Der kugelgelagerte, baubedingt geschwungene Aluminiumpedalhebel kann durch ein einfaches, gerades Stahlblechpedal mit Gleitlagerung und ohne Waagbalken ersetzt werden.

Die verwendeten Bremsflüssigkeitsbehälter sollten durch einen bauraumangepassten Behälter ersetzt werden. Neben einer Optimierung der Verlegung der flexiblen Bremsschläuche sollte die Zugänglichkeit aller Komponenten der Bremsanlage für Wartungsarbeiten verbessert werden.

### **Ergonomie**

Die mit den Pedalen verschiebbare Fußschale als Fußablage, Fersenaufstellpunkt und Abgrenzung des verschiebbaren Bereichs zum feststehenden Interieur erweist sich als praktikable Lösung für die gestellten Anforderungen.

Auf der Grundlage des im Vorderwagen verfügbaren Bauraumes konnte die Fußschale in Dimensionen umgesetzt werden, die hinsichtlich der Pedalabstände und -position Mindestvorgaben der ECE R35 Richtlinie erfüllen und damit die Bedienbarkeit sicherstellen. Allerdings ist die sichere Bedienung von Fahr- und Bremspedal mit grobem Schuhwerk eingeschränkt und durch die schmale Fersenaufstandsfläche werden beide Beine in einer Zwangsposition gehalten.

Zur Erhöhung der Fahrsicherheit durch größeren Abstand zwischen Brems- und Fahrpedal und zur Verbesserung der Bedienergonomie ist eine Verbreiterung des Fußraums um mindestens 50 mm bis etwa 100 mm erforderlich. Der dafür notwendige Bauraum kann nur durch eine Änderung des Rahmens und einer entsprechenden Anpassung aller abhängigen Komponenten bereitgestellt werden.

Weiterhin sollten die Daten der Sitzkiste in einer neuen Ergonomieuntersuchung auf Basis des Ist-Standes überarbeitet und gegebenenfalls erforderliche Änderungen herausgearbeitet werden.

## 1.3. Kofferraumstruktur

### 1.3.1. Zielstellung

Die Zielstellung in der Thematik „Kofferraumstruktur“ beinhaltet die Konzeption und Auslegung des Kofferraumbodens als thermoplastisches Faserverbundbauteil, sowie dessen Herstellung im Pressverfahren. Darüber hinaus ist die Kofferraumstruktur als Gesamtkonzept zu erarbeiten und prototypisch umzusetzen. Es wurden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- *Funktionen der Struktur:* Kofferraumladeboden, Trennung Kofferraum/Fahrgastraum, Feuchtraumabdichtung
- Integration in den Magnesiumrahmen und optimale Bauraumausnutzung
- Dimensionierung zur Aufnahme der Gepäcklasten
- Gepäckabstützung beim Bremsen / im Crashfall
- Integration Zwangsentlüftung und Leitungsdurchführung zum Motorraum/Fahrwerk
- Fertigungs- und montagegerechter Aufbau, Möglichkeit zur prototypischen Herstellung

### 1.3.2. Ausführung und Bewertung der Kofferraumstruktur

Die erarbeitete Vorzugsvariante ist das Ergebnis mehrerer Iterationsschritte, bei denen die Entwurfsvarianten von Kofferraumstruktur, Fahrzeugrahmen und Exterieur konzeptionell angenähert und konstruktiv abgestimmt wurden. Die Baugruppe besteht aus den drei Bauteilen Motorraumabdichtung, Kofferraumboden und Rückwand (Abbildung 20).

#### ***Motorraumabdichtung***

Die Motorraumabdichtung schließt über eine Dichtfuge bündig mit der umgebenden Rahmenstruktur ab und ermöglicht damit die Abtrennung zwischen dem Feuchtbereich des hinteren Fahrwerks bzw. Motorraums und dem Fahrerraum. Das Bauteil liegt auf den seitlichen Knoten auf und bildet die vordere Auflage- und Dichtfläche des Kofferraumbodens. Integriert sind Kabeldurchführung in den Hinterwagen, sowie Ventilöffnungen zur Zwangsentlüftung des Innenraums.

Das Bauteil wurde prototypisch im RTM-Verfahren aus 3 mm starkem GFK/Epoxid hergestellt. Die Funktionalität wurde beim Einbau bestätigt, wobei beim Aufbau des Demonstrators aus Gründen der Montage/Demontage auf die eigentliche Abdichtung mittels Kabeldurchführungen bzw. Dichtband verzichtet wurde.

Für die Weiterentwicklung eignet sich das Bauteil bei entsprechender konstruktiver Anpassung zur Herstellung im Spritzguss- bzw. Pressverfahren. Dabei können Funktionselemente, wie Aufnahmen von Dichtungen und Kabeldurchführungen, sowie Retainerelemente und Rippen, für die Auflage des Kofferraumbodens integriert und mit geringem Werkzeugaufwand (einfache Geometrie, außerhalb Sichtbereich) in einem Schritt hergestellt werden.

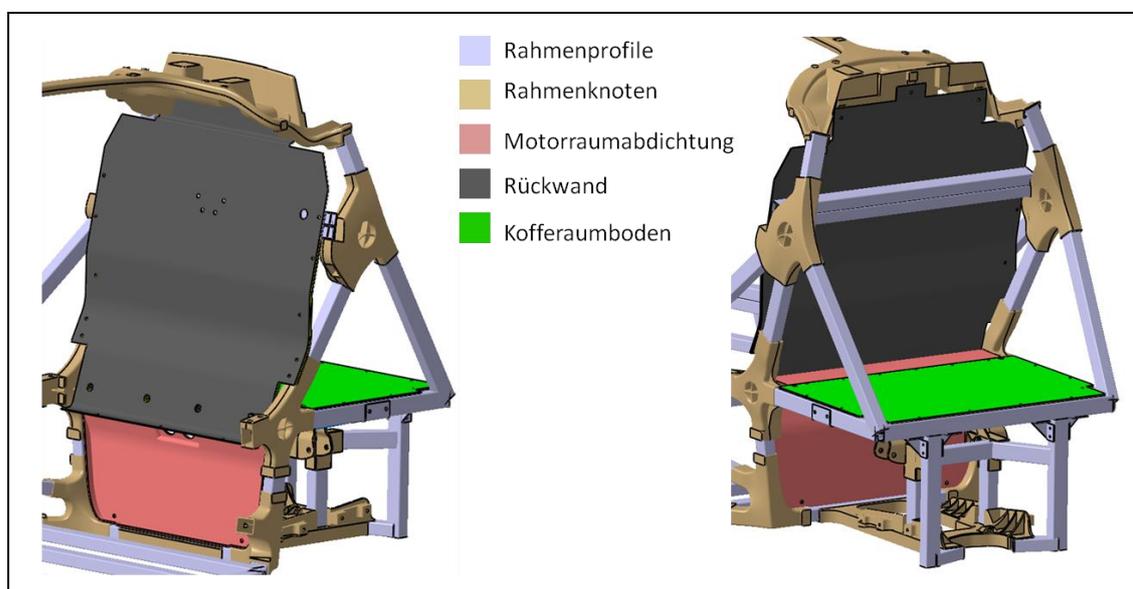
### **Rückwand**

Die Rückwand befindet sich hinter dem Sitz und trennt den Fahrgastraum vom Kofferraum. Sie ist als dünnwandiges Kunststoffbauteil, partiell in Sandwichbauweise zur Aussteifung und Aufnahme von Gepäcklasten im Kollisionsfall ausgeführt. Das Bauteil wird mit Schrauben an Dach- und Seitenknoten, Kopfstützenstrebe sowie der Motorraumabdichtung befestigt. Für den Demonstrator wurde die Rückwand prototypisch im RTM-Verfahren hergestellt.

Für die Weiterentwicklung ist eine Vereinfachung des flächigen Bauteils ohne Sandwich zielführend. Der gegebenenfalls mit Sicken ausgesteifte Aufbau als einschaliges Verkleidungsbauteil ermöglicht die einfache Herstellung aus vorkaschierten faserverstärkten Thermoplasthalbzeugen im Tiefziehverfahren. Die Gepäcklasten müssen in diesem Fall durch eine zusätzliche Querstrebe im Magnesiumrahmen oder eine adäquate Lösung aufgenommen werden. Damit kann das Gesamtgewicht, sowie der Fertigungs- und Montageaufwand, deutlich reduziert werden.

### **Kofferraumboden**

Der Kofferraumboden liegt auf den Profilen des Magnesiumrahmens und der Motorraumabdichtung. Er bildet die Trennung und Abdichtung von Kofferraum und hinterem Fahrwerk/Motorraum. Das Bauteil wurde als zweischaliger Verbund für die Herstellung im Pressverfahren konstruiert und wird nachfolgend näher erläutert. Die Funktion wurde beim Einbau nachgewiesen. Das untersuchte Pressverfahren ist für eine Serienfertigung anwendbar.

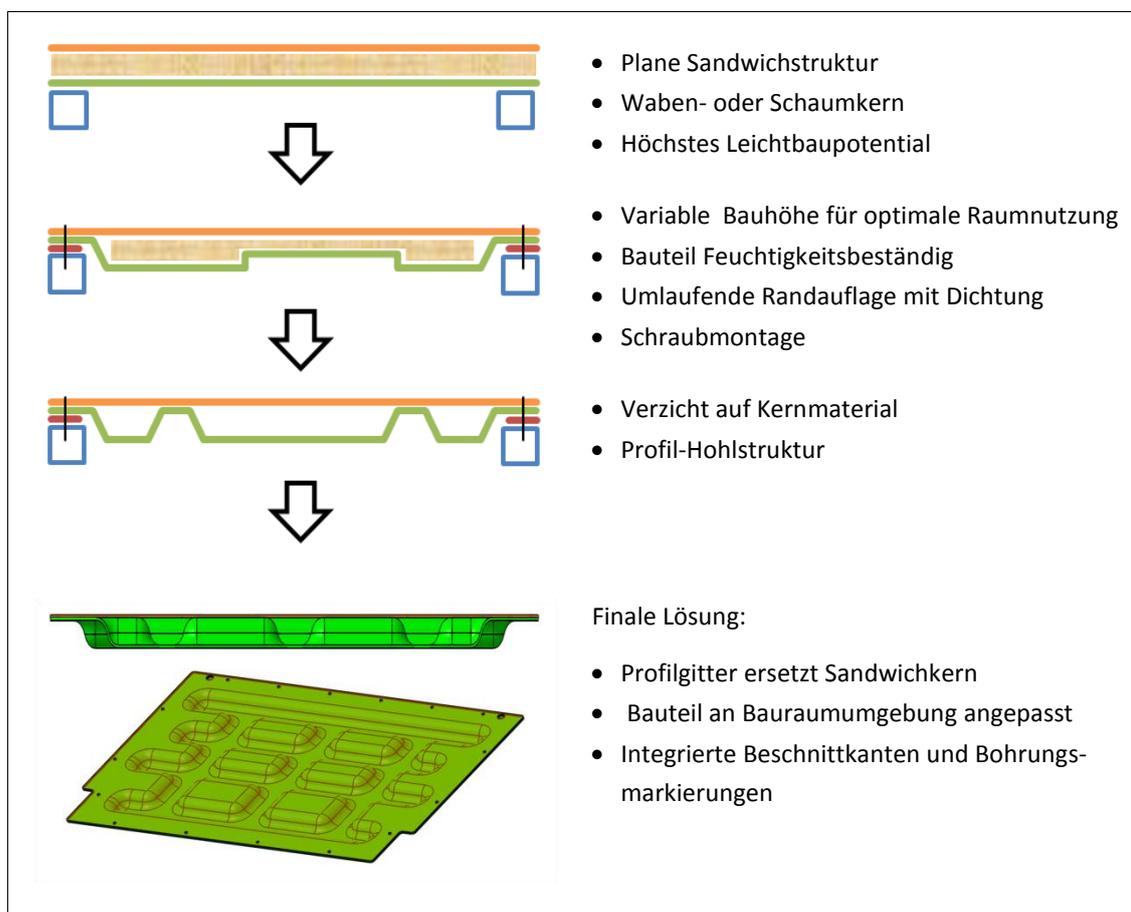


**Abbildung 20:** Komponenten der Kofferraumstruktur im Fahrzeugrahmen (Heckansicht rechts)

### 1.3.3. Kofferraumboden

Die Konzeption des Bauteils sowie der Bauraumumgebung entstand unter der Zielsetzung, den Kofferraumboden als flächiges biegesteifes Sandwich- bzw. Verbundbauteil in einem zweistufigen Pressverfahren unter Verwendung thermoplastischer Platten- bzw. Mattenhalbzeuge mit Glas- oder Naturfaserverstärkung herzustellen.

Ausgehend von einer planen Sandwichstruktur mit Waben- bzw. Schaumkern wurden, wie nachfolgend in Abbildung 21 illustriert, weitere Anforderungen hinsichtlich der Einbausituation, Materialeigenschaften und Herstellbarkeit bis zur endgültigen Lösung eingearbeitet.



**Abbildung 21:** Evolution der Kofferraumbodenstruktur

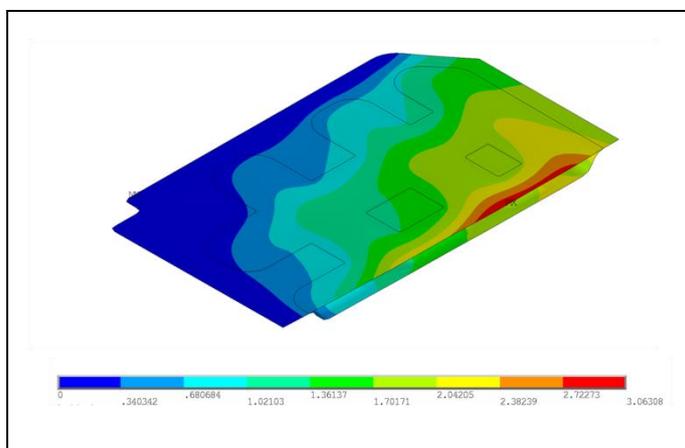
Die endgültige Konstruktionsvariante besteht aus der unteren profilierten Verstärkungslage, die am Rand und an den hochstehenden Bereichen in der Mitte mit der oberen, planen Decklage verklebt bzw. verschmolzen wird. Das Bauteil ist 600 mm breit und 450 mm lang. Die Maße wurden mit den angrenzenden Komponenten abgestimmt, sodass der Boden einerseits umlaufend 25 mm breit auf den Rahmenstreben bzw. der Motorraumabdichtung aufliegt und andererseits nachträglich durch die Kofferraumöffnung montiert werden kann.

Mit Rücksicht auf den begrenzten Bauraum und die Herstellbarkeit im Tiefzieh- bzw. Pressverfahren beträgt die Tiefe des Verstärkungsprofils 20 mm mit Radien von 15 mm.

Die Abgrenzung des darunter gelegenen Motorraums (Feuchtraum) erfolgt durch das geschlossene Bauteil selbst, sowie durch eine am Auflagerand umlaufende Dichtung. Befestigt wird der Kofferraumboden mit Flachkopfschrauben und Kunststoffeinsätzen bzw. Blindnietmuttern in den Rahmenprofilen.

Der Kofferraumboden wird konstruktiv auf eine Gesamtmaterialstärke von 4 mm festgelegt. Innerhalb dieser kann die Dicke der beiden Lagen abhängig vom jeweils verwendeten Halbzeug variiert werden.

Zur Absicherung der Konstruktion erfolgte eine überschlägige Simulation des Bauteils für die Verwendung von jeweils 2 mm dicken wirrglasfaserverstärktem PP in beiden Lagen. Berechnet



**Abbildung 22:** FEM-Simulation des Kofferraumbodens

wurde die maximale Durchbiegung des Verbundes (Abbildung 22) bei Auflage auf den drei umlaufenden Rahmenstreben und bei mittig wirkender flächiger Krafteinleitung. Im Ergebnis wurden für den genannten Aufbau unkritische Werte hinsichtlich Festigkeit und Durchbiegung ermittelt.

Darüber hinaus kann eine Berechnung im Versuchsstadium nur als Anhaltspunkt für die tatsächliche Steifigkeit des Verbunds herangezogen werden, da die Verbundeigenschaften durch Variation der Halbzeuge (Kunststoffmatrix, Verstärkungsart- und Fasern, Faservolumengehalt, Dicke) und Prozessparameter (Verdichtung, Verbindung der Lagen) in weiten Grenzen beeinflusst werden können. Zudem ist es nur bedingt möglich, von einer berechneten Bauteilsteifigkeit bzw. zulässigen Durchbiegung, auf die haptische Steifigkeit in der Einbausituation zu schließen, insofern keine Erfahrungswerte vorliegen.

Für den Einbau im Demonstratorfahrzeug wurde ein Kofferraumboden hergestellt, der die geforderte Funktion erfüllt. Die strukturierte Lage besteht aus 3 mm starkem GMT (PP-Glasfaser, Hybridfaservlies, 25 % FVG) und einer Decklage aus 1 mm starkem Organoblech (PP-Glasfaser, Körper 50:50, 45% FVG). Das Bauteil hat eine Masse von 2,5 kg, die durch eine weniger massive Ausführung der strukturierten Lage weiter reduziert werden kann. Dazu wurden in den nachfolgend beschriebenen weiteren Fertigungsversuchen verschiedenen Materialaufbauten und Schichtdicken untersucht.

### 1.3.4. Pressverfahren

#### *Presse und Presswerkzeug*

Zur Herstellung des Kofferraumbodens wurde ein Umformwerkzeug für Platten- und Mattenhalbzeuge entworfen und im Unterauftrag bei der Firma Krumpholz GmbH konstruiert und



**Abbildung 23:** Presswerkzeug

gefertigt. Das Werkzeug (Abbildung 23) besteht aus temperierbaren Aufspannplatten mit insgesamt drei wechselbaren, separat temperierbaren Formeinsätzen (plane Fläche sowie Positiv- und Negativform der Strukturierung).

Für die Pressversuche wurde das Werkzeug auf einer hydraulischen Presse WKP 3000S (Fa. Wickert) mit 800x800 mm Aufspannfläche und maximal 3500kN Schließkraft eingebaut.

#### *Versuchsdurchführung*

Im ersten Fertigungsschritt wird die strukturierte Lage des Kofferraumbodens vorgefertigt. Dazu wird das jeweilige Halbzeuge bis über die Schmelztemperatur der Matrix vorgewärmt, anschließend manuell in die Presse eingelegt und verpresst. Im Presswerkzeug sind die Negativform unten und die Positivform oben eingebaut und auf 110°C temperiert.

Für den zweiten Fertigungsschritt wird der plane Werkzeugeinsatz unten, die Negativform der Strukturierung oben im Presswerkzeug montiert. Die vorgefertigte strukturierte Lage wird eingelegt (fixiert) und im geschlossenen Werkzeug auf 110°C vorgewärmt. Das Vorwärmen der Halbzeuge für die ebene Decklage erfolgt auf einem 2 mm dicken Stahlblech als Träger, der anschließend manuell mit dem Halbzeug in das Werkzeug eingelegt und nach dem Verpressen des Bauteils wieder abgelöst wird.

Zum Vorwärmen der Halbzeuge steht eine Infrarotheizstation zur Verfügung. Bei dieser Versuchseinrichtung liegt das Material auf einem Gittereinschub zwischen beidseitig angeordneten NIR-Halogen-Rundrohrstrahlern. Die bestrahlte Fläche beträgt etwa 700x800 mm mit einer Gesamtleistung von bis zu 30 KW/m<sup>2</sup>.

Weiterhin wird eine Kontaktheizstation verwendet, bei der die Halbzeuge zwischen zwei beheizten Platten unter Druck aufgewärmt werden. Die nutzbare Fläche beträgt 500x700 mm mit einer pneumatisch aufgebrachten Presskraft von maximal ca. 5 kN. Zur Vermeidung von Anhaftungen der aufgeschmolzenen Halbzeuge an den Pressflächen und Einlegeblechen sind diese

mit gewebeverstärkten PTFE-Trennfolien überzogen. Die Temperatur der Pressflächen kann auf bis zu 350°C geregelt eingestellt werden, ist allerdings durch die Temperaturbeständigkeit der Trennfolien auf ca. 250°C beschränkt.

Für die Versuche wurden Halbzeuge auf Basis von PP und PA6 untersucht (Tabelle 3), wobei für die strukturierte Bauteilseite wirrfaserverstärkte Halbzeuge und für die plane Decklage gewebeverstärkte Plattenhalbzeuge (Nr. 5 und 7) verwendet wurden.

**Tabelle 3:** Übersicht Halbzeuge

Nr.	Matrix	Faser	FVG	Halbzeug	Stärke
1	PP	Glas	25 Vol.-%	Hybridvliesmatte	3 mm
2	PP	Flachs	50 Vol.-%	Hybridvliesmatte	2 mm
3	PP	Glas	18 Vol.-%	Platte, Wirrfaser < 30 mm	4 mm
4	PP	Glas	18 Vol.-%	Platte, Gewebe 50:50	3 mm
5	PP	Glas	45 Vol.-%	Platte, Gewebe 50:50	1 mm
6	PA6	Glas	45 Vol.-%	Platte, Wirrfaser 30...50 mm	2 mm
7	PA6	Glas	45 Vol.-%	Platte, Gewebe 50:50	1 mm

### ***Vorwärmen der Halbzeuge***

Das Vorwärmen mittels Infrarotstrahlung ist für die untersuchten Platten- und Mattenhalbzeuge mit Glasfaserverstärkung prinzipiell geeignet, aber nicht ideal. Bauartbedingt fällt die Bestrahlungsstärke der Vorheizstation in den Randbereichen der Proben ab, sodass diese mittig überhitzt werden müssen, um oberflächlich eine Minstdifferenz von ca. 40...60 K zur Schmelztemperatur der Matrix zu erreichen. Prinzipbedingt ergeben sich weitere, z.T. technisch lösbare Nachteile einer Infrarotheizung:

- Ohne exakt ausgelegte Anordnung von Strahlern und Reflektoren ist die Bestrahlungsstärke über die Fläche nicht homogen. Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Halbzeuge kann diesen Umstand nicht ausgleichen.
- Die Halbzeuge quellen beim Aufschmelzen abhängig von der Art der Herstellung bzw. der Verstärkungsmaterialien auf. Vorkonsolidierte Hybridfasermatten (Material 1) quellen beispielsweise bis zur ursprünglichen Dicke des Vliesausgangsmaterials. Dadurch wird die Wärmeleitfähigkeit weiter reduziert.
- Die Dickenrandbereiche sind notwendigerweise stets höheren Temperaturen bis zur beginnenden Materialdegradation ausgesetzt, da das Durchwärmen der Halbzeuge nur durch Wärmeleitung bei geringer Wärmeleitfähigkeit abläuft und einen entsprechenden Temperaturgradienten erfordert.
- Eine Leistungsregelung des Strahlerfelds ist erforderlich, um die Überhitzung des Materials an der Oberfläche zu vermeiden, dazu muss die mittlere Oberflächentemperatur als Regelgröße auf beiden Materialseiten bestimmt werden.

- Der energetische Wirkungsgrad einer Infrarotvorheizstation ist aufgrund erheblicher Energieverluste (u.a. durch Konvektion und Wärmestrahlung, lange Zykluszeiten bei temperaturgeregeltem Durchwärmen, überstrahlter Rand für homogene Flächenbestrahlung) gering.
- Für naturfaserverstärkte Materialien ist die Infrarotheizung aufgrund der hohen Isolierwirkung sowie der Temperaturempfindlichkeit und Brandgefahr der Platten/Vliese nicht geeignet.

Das Aufwärmen von Halbzeugen in der Vorheizpresse ist vorzugsweise für Mattenhalbzeuge geeignet bzw. auch für Plattenhalbzeuge anwendbar. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Wärmeleitung von den geregelt homogen temperierten Pressplatten in die Oberfläche der Proben. Die aufgebrachte Presskraft konsolidiert die Matten und erhöht damit die Wärmeleitfähigkeit. Dennoch ergeben sich Nachteile zur Gestaltung eines reproduzierbaren Aufheizprozesses:

- Die bauartbedingt begrenzte Anpresskraft reicht bezogen auf die Fläche nicht aus, um naturfaserverstärkte Hybridfasermatten (Material 2) mit geringer Wärmeleitfähigkeit ausreichend zu verdichten und homogen durchzuwärmen.
- Die Presskraft sollte regelbar sein und Pressdrücke von bis zu 20 bar ermöglichen.
- Der Betrieb mit mindestens zwei Trennfolien sowie zusätzlichen PTFE-beschichteten Einlegeblechen schafft zahlreiche Grenzflächen für die Wärmeleitung zur Probe. Zusammen mit dem geringen Pressdruck kann ein homogener Wärmeübergang in Plattenhalbzeuge nicht gewährleistet werden.
- Die Verwendung von PTFE Trennfolien begrenzt die mögliche Presstemperatur auf ca. 250°C und zeichnet sich durch einen starken Verschleiß der Trennfolien aus.

### **Herstellung der Bauteile**

Die strukturierte Lage wird vorgeheizt und in dem auf 110°C temperierten Werkzeug für 1...3 min gepresst. Es wird mit der maximalen Presskraft von 3500 kN (entspricht etwa 100 bar Pressdruck bezogen auf die Zuschnittsfläche) gearbeitet. Für alle untersuchten Materialien ist eine Umformung möglich (Tabelle 4).

Zum Verpressen der ebenen Decklage mit der strukturierten Lage wurden die PP/GF-Organobleche (Material Nr. 5) mit einer zusätzlichen Auflage von 0,4 mm starker PP-Folie auf der Klebeseite jeweils in der IR-Heizstation bzw. in der Kontaktheizpresse vorgewärmt. In der IR-Heizstation quillt das Material beim Aufschmelzen geringfügig auf. Durch die Hohlstruktur können die entsprechenden Bereiche nicht wieder verdichtet werden und verbleiben als poröse/grobe Struktur in der Oberfläche. In der Kontaktheizung erwärmte Platten behalten ihre konsolidierte Form auch nach dem Pressen. In beiden Fällen zeichnet sich die Kontur der Hohlstruktur auf der glatten Bauteilseite ab. Die ebene Lage ist in den hohlen Bereichen minimal nach innen gewölbt (Abbildung 24 und 25).

**Tabelle 4:** Vorwärmparameter und Umformergebnis der strukturierten Lage

Material	Vorwärmen	Umformergebnis
1	Presse, 240°C, 300s, ca. 1,5 bar	Nahezu vollständige Verdichtung. Die Struktur wird aus der Bauteildicke gezogen.
2	Presse, 240°C, 300s, ca. 1,5 bar	Das Bauteil wird bleibend in Form gepresst aber nicht vollständig konsolidiert. Die Vorwärmparameter reichen nicht aus, um das Material homogen durchzuwärmen. Die Struktur wird aus der Bauteildicke gezogen.
3	Infrarot, 240...280°C (Oberfläche)	Die Struktur wird aus der Bauteildicke gezogen.
4	Infrarot, 240...280°C (Oberfläche)	Der Gewebeanteil wird aus der Fläche gezogen und reißt in Bereichen starker Umformung, die Matrix fließt zwischen den Gewebelagen aus dem Bauteil.
6	Infrarot, 250...300°C (Oberfläche)	Die Struktur wird aus der Fläche gezogen. Die Faserstruktur zeichnet sich auf den Bauteiloberflächen ab.

Bei den untersuchten Materialien mit PA6-Matrix konnte keine haltbare Verbindung beider Komponenten hergestellt werden. Die Decklage kann vom Rand abgelöst werden. In der Mitte des Bauteils haftet die Decklage nur oberflächlich an erhabenen Fasersträngen der strukturierten Lage. Dem können mehrere Ursachen zugeschrieben werden:

- Zu geringe Temperatur in den Randbereichen (IR) bzw. insgesamt zu niedrige Temperatur (Vorheizpresse) des Halbzeugs
- Zu lange Abkühlzeit während des manuellen Einlegens
- Hoher FVG beider Komponenten, kaum überschüssige (fließfähige) Matrix
- Grobe Oberfläche der strukturierten Lage, ungenügender Kontakt Schmelze-Matrix



**Abbildung 24:** PP/Flachs-Hybridfaservlies (Nr. 2) mit PP/GF-Organoblech (Nr. 5) verpresst; links: Organoblech in IR-Heizstation erwärmt; rechts: Organoblech in Vorheizpresse erwärmt



**Abbildung 25:** links: PP/GF-Wirrfaserplatte (Nr. 3) mit PP/GF-Organoblech (Nr. 5) verpresst; rechts: PA6/GF-Wirrfaserplatte (Nr. 6) mit PA6/GF-Organoblech (Nr. 7) mit warmhärtendem Klebstoff gefügt

### **Ergebnisse**

Die hergestellten Kofferraumböden mit Versteifungsstrukturen aus konsolidierten naturfaserverstärkten PP-Hybridfasermatten weisen aufgrund der geringen Dichte der Halbzeuge ein niedriges Gewicht bei einer für die Anwendung ausreichenden Bauteilsteifigkeit auf. Das erhitze Material folgt den hohen Umformgraden im Bauteil ohne erkennbare Risse oder Fehlstellen. Zum Aufschmelzen der Halbzeuge ist eine Vorheizpresse erforderlich, die das Material mit Pressdrücken von bis zu 20 bar konsolidieren und damit dessen Wärmeleitfähigkeit erhöhen. In der Folge werden die Halbzeuge durch Wärmeleitung schnell und ohne Degradation der Naturfasern erhitzt. Für die Anwendung kann es zielführend sein, den Fasergehalt der Halbzeuge zumindest in den Dickenrandbereichen zu reduzieren, um die Oberflächenqualität der Bauteile zu erhöhen.

Die untersuchten GMT-Halbzeuge mit PP-Matrix sind ebenfalls zur Herstellung der Versteifungsstruktur mit hohen Umformgraden geeignet. Ein Vorteil besteht darin, dass die unempfindlichen Glasfasermaterialien mit Infrarotstrahlung vorgewärmt werden können. Dadurch wird, bei höherem Energiebedarf, die Handhabung der Matten wesentlich vereinfacht. Trotz niedriger Faservolumenanteile von etwa 20 % können die aufgeheizten Zuschnitte manuell gegriffen und transportiert werden. Andererseits hängt die Reproduzierbarkeit der Bauteile stärker von einer (homogenen) Vorwärmtemperatur und vom Pressdruck ab, indem die überschüssige Kunststoffmatrix bzw. kurze Faseranteile ausfließen können.

Für mit Glasfasergewebe verstärkte Halbzeuge ist die Kontur des Bauteils zu tief, sodass diese nicht nachfließen können und lokal aufreißen. Demnach wäre eine Anpassung der Bauteilgeometrie zur Verwendung von gewebeverstärkten Halbzeugen erforderlich bzw. müsste geprüft werden, inwiefern wirrfaserverstärkte Halbzeuge mit höherem Faservolumenanteil die angestrebten Kennwerte erbringen.

Durch Aufpressen der vorgefertigten Verstärkungsstruktur auf ein vorgewärmtes dünnes PP/GF-Organoblech, mit zusätzlich eingelegter PP-Folie, konnte eine haltbare Verklebung zu einer kernlosen Hohlstruktur hergestellt werden. Die Oberfläche ist, bis auf minimale Einwölbungen, in hohlen Bereichen nahezu fehlerfrei.

Das untersuchte GMT-Halbzeug mit PA6-Matrix und hohem Faservolumengehalt ist zur Herstellung der Verstärkungsstruktur geeignet. Aufgrund des hohen Fasergehalts fließt das Material ausschließlich aus der Fläche nach. Die Wirrfaserstruktur zeichnet sich auf der Oberfläche ab, was ebenfalls durch den hohen Fasergehalt, sowie ggf. auch durch die im Versuch nicht ideal homogene Vorwärmung, Abkühlung beim Transport und damit unvollständige Pressung erklärt werden kann. Des Weiteren konnte unter den gegebenen Bedingungen keine haltbare Klebeverbindung zu der Decklage hergestellt werden. Alternativ wurde eine Klebeverbindung mittels temperaturhärtenden Schmelzklebers aufgezeigt.

Die wesentliche Herausforderung bei der Konsolidierung und Umformung thermoplastischer Matten- und Plattenhalbzeuge besteht in der Konzeption und Umsetzung prozessintegrierter Vorheizsysteme in Verbindung mit geeigneten Handhabelösungen für großformatige Bauteile. Das betrifft das geregelte, flächig homogene Durchwärmen unterschiedlicher Halbzeuge unter Berücksichtigung von Zykluszeiten, Vermeidung von Materialdegradation und Gewährleistung einer vertretbaren Energiebilanz. Das Handhabesystem muss den Transfer der heißen, klebrigen und formschlaffen Zuschnitte prozesssicher und schnellstmöglich bewältigen.

Das Versuchswerkzeug wurde modular aufgebaut, um beide Prozessschritte in einem Werkzeug abzubilden und eine weiterführende Nutzung zu ermöglichen. Bei der Versuchsdurchführung erwies sich die Temperierung des gesamten Werkzeugs über die Pressplatten als zielführend. Demgegenüber ist für einen kontinuierlichen Fertigungsbetrieb die Temperierung der Formeinsätze zur Abführung der eingebrachten Wärme erforderlich. Weiterhin ist für den Prozess zu beachten, dass die verwendete Presse unter Berücksichtigung der Maschinen- und Werkzeugdimensionen einen kontinuierlichen Übergang zwischen Schließhub, Umformhub und Presshub bei minimalen Schließzeiten ermöglicht.

Auf Basis detaillierter Berechnungen auf Grundlage von gegebenen bzw. gemessenen Kennwerten kann das Leichtbaupotential des Kofferraumbodens bzw. vergleichbarer Bauteile voll ausgenutzt werden. Allerdings ist die Prozessgestaltung neben den mechanischen Kennwerten ein wesentliches Kriterium der Bauteiloptimierung, zumal die derzeit standardmäßig verfügbare Bandbreite an wirrfaserverstärkten thermoplastischen Halbzeugen begrenzt ist.

## 1.4. Exterieur und Interieur der Flügeltür

### 1.4.1. Zielstellung

Die beiden Flügeltüren des Fahrzeugs stellen aus technischer Sicht, bedingt durch die Kombination aus Formfaktor, Kunststoffbauweise, Bauraumverfügbarkeit und Leichtbauanforderungen, eine enorme Herausforderung dar.

Nach der konzeptionellen Aufbereitung der Türen auf Basis des Fahrzeugkonzepts und von Designvorgaben wurde im 2. Konsortialmeeting vereinbart, die Türen mit zwei unterschiedlichen Fertigungsverfahren herzustellen, um den jeweiligen Einfluss der materialbedingten Steifigkeit auf die Funktionsfähigkeit der Türen zu ermitteln. Zudem wurde der Einbau eines Verkleidungsspiegels für beide Türen als notwendig erachtet. Der zusätzliche Aufwand konnte durch die TU Chemnitz erbracht werden, indem ein anderer geplanter Arbeitspunkt in der Konzeptphase obsolet wurde.

Die Zielstellung umfasst damit:

- Herstellung der zweischaligen rechten Fahrzeugtür aus GFK (EP) im RTM-Verfahren auf Basis von vorgegebenen CAD-Daten
- Qualitative Beurteilung der Steifigkeit und Funktionsfähigkeit der Tür im Vergleich zur linken Tür, bestehend aus GFK (PUR)-Außenhaut und GFK (UP)-Innenteil
- Evaluieren von Fertigungsverfahren zum Herstellen der Türen
- Konzeption und Umsetzung des Verkleidungsspiegels für beide Türen

### 1.4.2. Technische Umsetzung der rechten Flügeltür

Die CAD-Daten der Flügeltür wurden vom Projektpartner B&W zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Daten wurden für das Türinnen- und Türaußenteil je ein Formwerkzeug mit Beschnittkanten und Montagehilfen konstruiert.

Die Werkzeuge sind in mehrere separat herstellbare Platten geteilt, um die großformatigen Formen von jeweils ca. 2x1x1m materialsparend durch Verschrauben und Verkleben aufbauen zu können. Zum Teil wurden zusätzliche Aluminiumprofile zur Verstärkung der Konstruktion eingesetzt, damit hohe Maßhaltigkeit und geringer Verzug trotz der ausladenden Bauteilgeometrie gewährleistet werden kann. Da zur Herstellung der Bauteile nur wenige Abformungen erforderlich sind und um Handhabung und Transport der Formwerkzeuge zu vereinfachen, wurden Formschaumplatten mittlerer Dichte verwendet.

Sowohl das Türinnenteil als auch das Türaußenteil wurden mittels Vakuuminfusionsverfahren in einem Durchgang hergestellt (Abbildung 26). Mit diesem Verfahren können Bauteile im Vergleich zum PUR-Sprühverfahren oder Handlaminieren mit homogener Schichtdicke, hohem Konsolidierungsgrad und hohem Faservolumengehalt hergestellt werden. Die Bauteile können

dabei bereits in der Form vorlackiert werden, ohne dass nachträgliches Schleifen und Grundieren der Oberfläche notwendig wird. Damit bleiben wichtige Details des Oberflächendesigns, wie beispielsweise Randkonturen oder Lichtkanten, bestmöglich erhalten.

Um beide Flügeltüren miteinander vergleichen zu können, wurde Wandstärke und Laminat so gewählt, dass beide Türen ein ähnliches Gewicht und ähnliche anisotrope Eigenschaften aufweisen. Das Türaußenteil wurde demnach mit 2 mm und das Türinnenteil mit 3 mm Wandstärke gefertigt. Das Laminat ist symmetrisch und quasiisotrop aus  $0^{\circ}/90^{\circ}$  und  $\pm 45^{\circ}$ -Gewebebelagen aufgebaut.



**Abbildung 26:** links: Türinnenteil bei der Vakuuminfusion, rechts: entformtes Türaußenteil

Nach der Entformung wurden die Bauteilränder beschnitten und verschliffen. Die gegebene Konstruktion sah jeweils einen separaten Klebeflansch vor, dieser wurde mittels glasfasergefüllter Polyesterspachtelmasse aufmodelliert und entsprechend auf Maß geschliffen. In diesem Zustand konnte die beiden Türeinteile inklusive Formwerkzeug an B&W übergeben werden, welche die Tür inklusive Fenster verklebten. Die Formwerkzeuge dienten dabei als passgenaue Aufspannung.

### 1.4.3. Bewertung der rechten Flügeltür

Die beiden Türschalen der rechten Tür wurden nach den vorgegebenen CAD-Daten erfolgreich im RTM-Verfahren hergestellt und anschließend für den Zusammenbau nachgearbeitet. Nachfolgend wurden beide Türschalen, Seitenscheiben, Scharniere und Schlossbügel vom Projektpartner B&W Fahrzeugentwicklung verklebt und die komplette Tür am Fahrzeug montiert.

Beide Flügeltüren weisen im eingebauten geschlossenen Zustand ein variables Spaltmaß, bzw. einen variablen Formübergang, zu angrenzenden Exterieurbauteilen auf. Problematisch ist dabei, dass die konstruktiv gering festgelegten Spaltmaße die Toleranzen der Tür und der Einbauumgebung nicht ausgleichen können. Durch aneinander anliegende Bauteilbereiche und die geringe Steifigkeit des Türsystems wird das Öffnen und besonders das Schließen der Tür beeinträchtigt (Abbildung 27 und 28). Diese Auswirkung lässt sich den nachfolgend erläuterten Ursachen zuordnen.

Die Tür- und Rahmenkonstruktion, als Ergebnis von Vorgaben aus Fahrzeugkonzept, Ergonomie, Design, sowie von Innovative Mobility Automotive, ist eine wesentliche Ursache für auftretende Toleranzen durch Biegung und Verwindung der Tür und des Fahrzeugrahmens im geöffneten Zustand sowie beim Schließen.

Stark biegebelastete Bereiche der Tür, wie Scharniere, Dachholm, A- und B-Säule, verfügen über einen sehr geringen Querschnitt mit entsprechend verminderter Steifigkeit. Daraus resultiert eine deutliche Verformung der Tür durch ihr Eigengewicht, durch Stützkkräfte der Gasdruckfedern, sowie durch Betätigungskräfte. Die Verwindung resultiert aus der asymmetrischen Form sowie der außermittigen Abstützung der Tür. Zusätzlich werden Verformungen durch die geringe Verwindungssteifigkeit des Fahrzeugrahmens am Dachbalken begünstigt.



**Abbildung 27:** Konturabweichung zwischen GFK-Tür und Seitenteil durch Fertigungstoleranzen, Verwindung und fehlende Montagereferenzen



**Abbildung 28:** Maßhaltigkeit der Türen im Vergleich, deutliche Maßabweichungen der linken PUR-Tür (rechts im Bild)

Eine weitere Ursache liegt in der Befestigung und Ausrichtung der Exterieurbauteile. Beim Aufbau des Demonstratorfahrzeugs werden die Türen zuletzt in den zuvor zueinander ausgerichteten und fixierten Exterieuraufbau eingesetzt. Da keine Referenzpositionen für einzelne Bauteile vorgesehen wurden, werden vorhandene Toleranzen des Rahmens, Kunststoffaußenhaut und letztlich der Türen kombiniert.

Weiterhin sind die unterschiedlichen Fertigungsverfahren und Materialien für die Passgenauigkeit der Türen heranzuziehen. Beide Varianten unterscheiden sich erheblich hinsichtlich Maßhaltigkeit, wobei die rechte GFK(EP)-Tür aufgrund der höheren Steifigkeit ein besseres Ergebnis als die PUR/GFK(UP) liefert (Abbildung 27).

Beim PUR-Sprühen kann prozessimmanent nur ein geringerer Faservolumengehalt sowie eine ungleichmäßige Faserverteilung über die Bauteildicke eingestellt werden. Zunächst wird eine dickere Gelcoatschicht aufgetragen und anschließend die eigentliche faserverstärkte Lage aufgespritzt, wobei es nicht möglich ist, absolut gleichmäßige Wandstärken zu reproduzieren. Der inhomogene Schichtaufbau führt, in Verbindung mit der Reaktionswärme, dem lokalen Reakti-

onsfortschritt, sowie dem grundlegend höherem Schrumpf der Matrix, zu einem verfahrensbedingten Bauteilverzug während der Fertigung, zusätzlich zur Verwindung des Bauteils durch die geringe Steifigkeit des Werkstoffs.

Bei der von der TU Chemnitz gefertigten Tür treten diese Probleme weniger stark auf, da zum einen durch die Vakuuminfusionstechnik nahezu konstante Wandstärken mit Abweichungen im Bereich von wenigen Zehntel Millimetern realisiert werden können und zum anderen, weil die Faserverteilung über den gesamten Querschnitt konstant ist. Außerdem kann die aufgebrauchte Gelcoatschicht wesentlich dünner gestaltet werden, da diese vor dem Einlegen der Verstärkungsfasern rasch aushärtet, und damit ein Durchdrücken der Fasern an die Oberfläche zuverlässig unterbunden wird. Zuletzt weist das verwendete Epoxidharz einen wesentlich geringeren Schrumpf auf, weshalb in Summe davon auszugehen ist, dass die damit produzierten Bauteile praktisch maßgetreu sind. Gegebenenfalls kann die Maßhaltigkeit des Formwerkzeuges aufgrund der Größe beeinträchtigt sein.

Betrachtet man beide Verfahren unter wirtschaftlichen Aspekten, so hat das Faserspritzverfahren deutliche Vorteile. Mit diesem Verfahren können in einer offenen Form Taktzeiten von unter 10 min erreicht werden. Das VARTM-Verfahren ist dagegen mit einem Teil pro Tag und Form kaum für eine Mittelserienfertigung geeignet. Zeitaufwendig sind hier vor allem das Einlegen der Gewebelagen, das Anbringen des Vakuumaufbaus, sowie die Aushärtungszeit nach der Infusion.

Durch den Einsatz beheizter Werkzeuge, arbeitsteilige oder automatisierte Herstellung der textilen Preforms, sowie eines zweiteiligen Werkzeugs und Einspritzen des Harzes unter hohem Druck, kann die Zykluszeit deutlich reduziert werden. Unter diesen Umständen wäre die Fertigung mittels RTM dennoch weniger wirtschaftlich als das Faserspritzverfahren mit dem Vorteil einer optimalen Qualität der Bauteile.

Bei der Verklebung der Innen- und Außenschale ist es maßgeblich beide Türschalen zueinander exakt zu positionieren und wenigstens eine Schale soweit abzustützen, dass sie durch Schwerkrafteinfluss oder Haltekräfte während des Klebvorgangs nicht verzogen wird. Dazu wurden die Türen im jeweiligen Formwerkzeug der Außenschale verklebt.

Darüber hinaus wäre es notwendig gewesen für die Verklebung in beiden Türschalen Positionierungshilfen vorzusehen. Bei den verwendeten Fertigungstechnologien PUR-Sprühen und VARTM ist dies jedoch nicht möglich, da man eine definierte Geometrie nur auf der Gut-Seite abbilden kann. Andere Hilfsmittel konnten im gegebenen Rahmen nicht eingesetzt werden. Demzufolge ist nicht auszuschließen, dass trotz sorgfältiger Arbeit durch eine unzureichende Positionierung der Schalen zueinander Maßabweichungen entstanden sind.

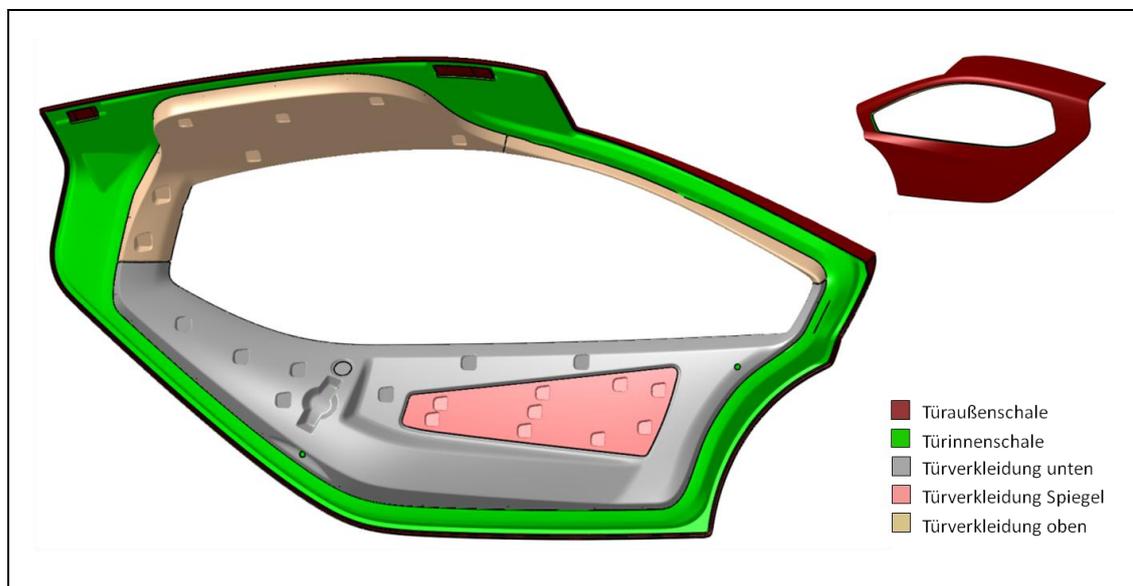
Darüber hinaus weist die Flügeltürkonstruktion im aktuellen Zustand weitere Schwachstellen auf. Es bestehen Steifigkeitssprünge an den Krafteinleitungsbereichen, d.h. zwischen eingeklebten Scharnier und Tür und an der Abstützung der Gasfedern, die in Verbindung mit den hohen Biegebelastungen und Verformungen zu frühem Versagen des Verbundes führen werden. Die Spaltmaße der Tür zum Exterieur sind zu gering, um die Toleranzen, Verzug und Verformungen ausgleichen zu können. In Verbindung mit den unzureichend dimensionierten

Scharnieren ist ein sicheres einrasten des Schließbügels in die Schlossfalle stark erschwert. Weiterhin sind die Türschalen nicht fertigungs- und montagegerecht konstruiert, u.a. durch Bereiche mit Hinterschneidungen, durch Materialaufdickungen am Klebeflansch und durch fehlende geometrische Referenzen für ein exaktes Positionieren. Ebenfalls ungünstig sind die zwischen Außen- und Innenteil eingeklebten Seitenscheiben. Dies bedeutet höhere Toleranzen durch die doppelte Anzahl an Klebeflächen, erhöhter Montageaufwand, sowie eine strukturelle Schwächung der Tür, gegenüber einer direkten Verklebung der beiden Türeinteile mittels dünnem Klebespalt.

#### 1.4.4. Konzeption und technische Umsetzung der Türinnenverkleidung

Bei dem zweischaligen Aufbau der Flügeltüren, mit umlaufend verklebter Seitenscheibe, bildet die äußere Schale als Sichtseite den Exterieurstrak ab. In der Folge bildet die Innenschale die Bauteiltiefe mit entsprechenden Entformungsschrägen aus und übernimmt alle Funktionsflächen für u.a. Klebeflansche, Scharnieranbindung, Türverriegelung.

Im Sinne des Gesamtsystemansatzes ist es erforderlich, die Umsetzbarkeit einer zusätzlichen Innerverkleidung zu untersuchen, die die B-Kontur der Tür mit einer wertigen, am Fahrzeugdesign orientierten, Dekorfläche verdeckt. Der umlaufende Klebeflansch der Seitenscheibe, der Überhang der Tür im Kopfbereich und die Vorgaben des Designers bedingen dabei eine vollständige Verkleidung (Abbildung 29).



**Abbildung 29:** CAD-Ansicht der linken Flügeltür mit Verkleidungsbauteilen

Die Verkleidung wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner B&W Fahrzeugentwicklung GmbH konzipiert, der die Designvorgaben zur Türverkleidung in Form von Konzeptflächen aufarbeitete. An der TUC wurden darauf aufbauend Konzepte zur Bauteiltrennung, -gestaltung und -befestigung, sowie zur prototypischen Herstellung, als FKV entwickelt, die wiederum bei B&W in finale Strakflächen bzw. Offsetflächen der Türverkleidungsteile umgesetzt wurden.

Der gemeinsam erarbeitete Aufbau besteht aus jeweils vier Bauteilen, die optional über Verschraubungen in der Grauzone der Tür oder über verdeckte Retainer an der Türinnenschale befestigt werden. Das schmale Bauteil im Bereich der A-Säule wird verklebt.

Von den Datensätzen der Türverkleidungsteile wurden Oberflächen abgeleitet und zu fertigungs- und entformungsgerechten Werkzeugflächen erweitert. Die Fertigung der Formwerkzeuge nach den aufbereiteten Daten und das Laminieren der Bauteile erfolgten im Unterauftrag. Die Bauteile wurden für den Einbau nachgearbeitet, angepasst und schließlich im belebten Zustand an die Tür montiert. Dabei wurden Neodymmagnete paarweise als Retainer verwendet, wodurch die Möglichkeit einer einfachen Demontage beim Einbau der Tür gegeben war.



**Abbildung 30:** Türinnenseite mit Retainerflächen der (demontierten) Verkleidung

#### 1.4.5. Bewertung der Türinnenverkleidung

Die aufgebaute Variante einer Türverkleidung bildet das Interieurdesign ab, das die Anforderungen des neuartigen Fahrzeugkonzepts mit zeitgemäßen Standards hinsichtlich des Wertigkeitseindrucks vereint. Die Baugruppe Flügeltür ist durch die Verkleidung komplett umgesetzt. Von diesem Ausgangspunkt ist es möglich den Aufbau der Tür ganzheitlich zu beurteilen und Entwicklungspotentiale aufzuzeigen. Die Verkleidung wurde als nichttragende Vorsatzschale konzipiert, welche ausschließlich optischen Zwecken dient. Beispielsweise werden damit der umlaufende Klebeflansch der Seitenscheibe, sowie die Befestigungsschrauben der Tür-Zuziehschlaufe vollständig verdeckt.

Die prototypischen Bauteile aus  $\geq 2$  mm starkem GFK-Laminat mit zusätzlicher Echtleder- bzw. Stoffkaschierung bringen eine zusätzliche Masse von ca. 7 kg in die Tür ein. Damit wird die Durchbiegung und Verwindung der Tür durch material- und formbedingt geringe Steifigkeit verstärkt.

#### 1.4.6. Ausblick

Bei konstruktiver Überarbeitung der genannten Schwachstellen ist GFK (Epoxid/RTM) zur Herstellung der Türen prinzipiell einsetzbar, dabei muss die Problematik des Verzugs wie eingangs erwähnt durch entsprechende konsequente Gegenmaßnahmen minimiert werden. Das Gewicht der Baugruppe kann durch variable Wandstärken sowie durch Rationalisierung der Türinnenverkleidung um bis zu 50% auf ca. 8kg reduziert werden. Damit werden die wirkenden Belastungen bei verbessertem Kraftfluss minimiert.

Das gesprühte faserverstärkte Polyurethan wird nicht als geeignetes Material für die Herstellung der Tür angesehen. Zum einen reicht die Steifigkeit und Festigkeit nicht aus, um eine hinreichend verwindungssteife Tür aufzubauen, zum Anderen kann bedingt durch das Sprühverfahren keine konstante Wandstärke in allen Bauteilbereichen aufgebaut oder nur durch aufwändige Nacharbeit hergestellt werden. Außerdem eignet sich das Material nicht, um enge Toleranzen und damit geringe Spaltmaße einzuhalten. Das Leichtbaupotential ist durch die technologisch erforderliche Mindestwandstärke reduziert.

Es wurde festgestellt, dass die Herstellung der Fahrzeugtüren aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (PUR, Epoxid, Polyester) im Rahmen der anvisierten Mittelserienfertigung wirtschaftlich sowie zum Teil auch technisch nicht realisierbar ist. Selbst unter Berücksichtigung von Presstechnologien mit beheizten Werkzeugen und damit geringeren Taktzeiten sind allein die Materialkosten höher als die wirtschaftlich vertretbaren Gesamtkosten.

Die verbleibende Möglichkeit besteht darin, die Tür analog zum Gesamtfahrzeug als Verbund aus einem tragenden Metallrahmen mit nichttragender Kunststoffbeplankung zu gestalten, beispielsweise in Form eines Stahlrahmens mit einer Verkleidung aus tiefgezogenen thermoplastischen Exterieur und Interieur. Mit dieser Variante kann zunächst die Wirtschaftlichkeit hinsichtlich der Materialkosten erreicht werden.

Die Serienentwicklung des Fahrzeuges erfordert damit eine ganzheitliche Überarbeitung des Türkonzepts, maßgeblich unter Berücksichtigung einer wirtschaftlich umsetzbaren Bauweise, der dazugehörigen Fertigungsverfahren, sowie mit Beachtung der genannten konstruktiven Schwachstellen der bestehenden Konstruktion.

Besonders im Hinblick auf die anvisierten Gesamtkosten und erforderlichen niedrigen Gesamtgewichts des Fahrzeuges sollten die Anforderungen an Komfort und Wertigkeit besonders der Türinnenverkleidung nochmals überdacht werden. Zielführend in beiden Punkten wäre ein überwiegender Verzicht auf zusätzliche vollflächige Verkleidungselemente. Darüber hinaus wäre eine Reduzierung der Anzahl der Türen von zwei auf eine sowohl unter technischen als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine zielführende Lösung.

## 1.5. Innenraumverkleidung

### 1.4.7. Zielstellung

Das Ziel im Schwerpunkt Innenraumverkleidung besteht darin, einen Lösungsansatz zur Gestaltung und technischen Umsetzung des Fahrzeuginterieurs zu entwickeln und prototypisch aufzubauen.

Damit weicht die Zielstellung von der ursprünglich geplanten Untersuchung eines Fertigungsverfahrens zum kombinierten Umformen, Hinterspritzen und Dekorieren eines Musterbauteils ab. Zum einen wäre das Verfahren für das Fahrzeug nicht wirtschaftlich, zum anderen weist die Frage nach der grundlegenden Gestaltung der Verkleidung die höhere Priorität für den Gesamtsystemansatz auf.

Der Themenschwerpunkt beinhaltet u.a. folgende Aufgabenstellungen:

- Konzept zur Bauteilgestaltung, -trennung und Montagereihenfolge
- Befestigungs- und Montagekonzept
- Konstruktive Umsetzung
- Werkzeugentwicklung und prototypische Herstellung der Bauteile
- Bewertung der Lösung und Erörtern von möglichen Fertigungsverfahren

### 1.4.8. Konzeption und Konstruktion

Ausgehend von dem vorgegebenen Interieurdesign, wurde beim Projektpartner B&W ein grundlegendes Oberflächenmodell der Innenverkleidung aufgebaut und der TUC als Arbeitsgrundlage zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Ausgangsflächen wurden einzelne Bauteile bzw. Baugruppen der Verkleidung konzeptionell erarbeitet. Die Konzeptentwicklung beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Festlegen der Bauteiltrennung und der Gestaltung von Trennfugen, Integration der vorgesehenen Oberflächenkaschierung
- Erarbeiten der Montagereihenfolge und Prüfen der Montierbarkeit
- Ermitteln von erforderlichen Freigängen für angrenzende Komponenten wie beispielsweise Sitz, Pedalerie, Rückwand, Gurtschloss
- Erstellen einer prototypisch umsetzbaren, toleranzausgleichenden, verdeckten Befestigungslösung für alle Bauteile
- Konzeption von Hinterbauten und Hilfskonstruktionen für die Bauteile

Bei der Erstellung der Konzeptlösung wurde das Oberflächenmodell entsprechend geteilt und mit neuen Funktionsflächen modifiziert bzw. erweitert oder es wurden beispielsweise Bauteil-

übergänge mit Hilfe von Schnitten dargestellt. Hilfskonstruktionen, wie der Unterbau und Befestigungselemente wurden nach Gegebenheit endkonturnah konstruiert.

Aufgrund zahlreicher Einflussfaktoren, wie der sich ändernden Bauraumumgebung, konkretisierter Designanforderungen, sowie der insgesamt hohen Komplexität, verliefen die Arbeiten iterativ in mehreren Änderungsschleifen.

Auf Basis der fertigen, mit den Projektpartnern abgestimmten, Konzeptbauteile erstellte B&W die finalen Strak-Oberflächen der Innenverkleidung zur Konstruktion der Bauteile und Formwerkzeuge. Daran schließen sich folgende Arbeitsschritte an:

- Erstellung eines Offsets der Strakoberfläche zur Berücksichtigung des Kaschiermaterials für das jeweilige Bauteil
- Erstellung der Bauteile als Volumen mit Materialstärke
- Konstruktion von Sichtblenden und Einsätzen
- Anpassung bzw. Neugestaltung der Hilfskonstruktionen zur Befestigung der Bauteile
- Ableiten und Erweitern von entformungsgerechten Oberflächen
- Konstruktion von fertigungsgerechten Formwerkzeugen

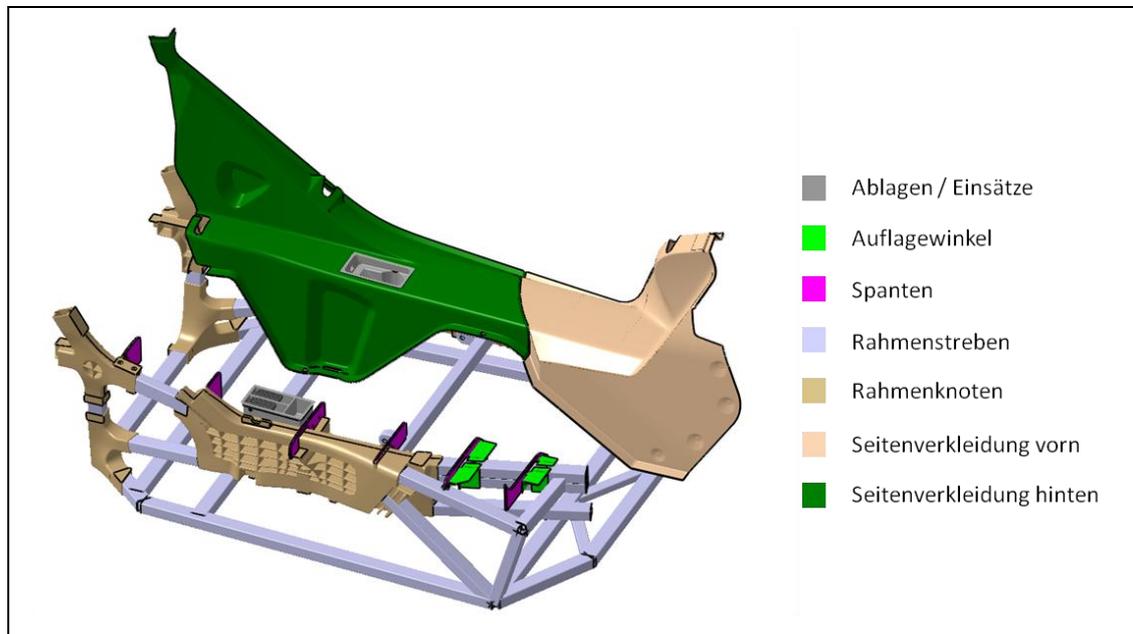
### **Seitenverkleidung**

Der besondere Aufbau des Fahrzeugs mit einem Skelettrahmen aus Vierkantprofilen stellt erweiterte Anforderungen an die Verkleidungsbauteile im Vergleich zu konventionellen Kleinstfahrzeugen. Die Seitenverkleidung erstreckt sich von der Pedalerie bis zur Rückwand und überspannt die breite seitliche Rahmenkonstruktion zwischen Türflansch und Sitz bzw. Fußraum. Es ergeben sich unter anderem die Besonderheiten:

- Großer Abstand zwischen Bauteil und Rahmenstruktur
- Großflächige, formgebende Verkleidung ohne konturnahe Gegenstruktur der Karosserie für Befestigungen
- Erhöhte Stabilitätsanforderungen an die Bauteile, die beim Ein- und Aussteigen mit dem Körpergewicht belastet werden
- Dick aufbauende Stoßverbindung von Kunststoffinterieur und -exterieur am Türflansch/Dichtprofil
- Erhöhte Toleranzen von Rahmen, Interieur und Exterieur
- Integration und Abdeckung der Türschlossfallen

Es wurde eine zweiteilige Lösung (Abbildung 31) erarbeitet, mit der Bauteiltrennung auf Höhe der Vorderkante des Sitzes. Beide Bauteile sind rückseitig mit Spanten versehen, die auf dem entsprechend ausgeformten Seitenknoten bzw. den über Winkel erweiterten Rahmenstreben aufliegen. Die Befestigung erfolgt mit Schrauben an den Spanten sowie an weiteren Stellen außerhalb des Sichtbereichs.

Die Seitenverkleidungsteile wurden als Handlaminat aus 2-3 mm starkem GFK hergestellt, für den Einbau nachgearbeitet und von IM mit Echtleder kaschiert.



**Abbildung 31:** Aufbau und Befestigung der Seitenverkleidung

### **Verkleidung Front und Lenksäule**

Eine komplexe Problemstellung ist durch die Frontverkleidung inklusive Verkleidung der klappbaren Lenksäule gegeben (Abbildung 32). Die Herausforderung liegt hier bei dem eng bemessenen Bauraum mit stark eingeschränkter Zugänglichkeit sowie der (prototypischen) Herstellbarkeit der Bauteilformen.

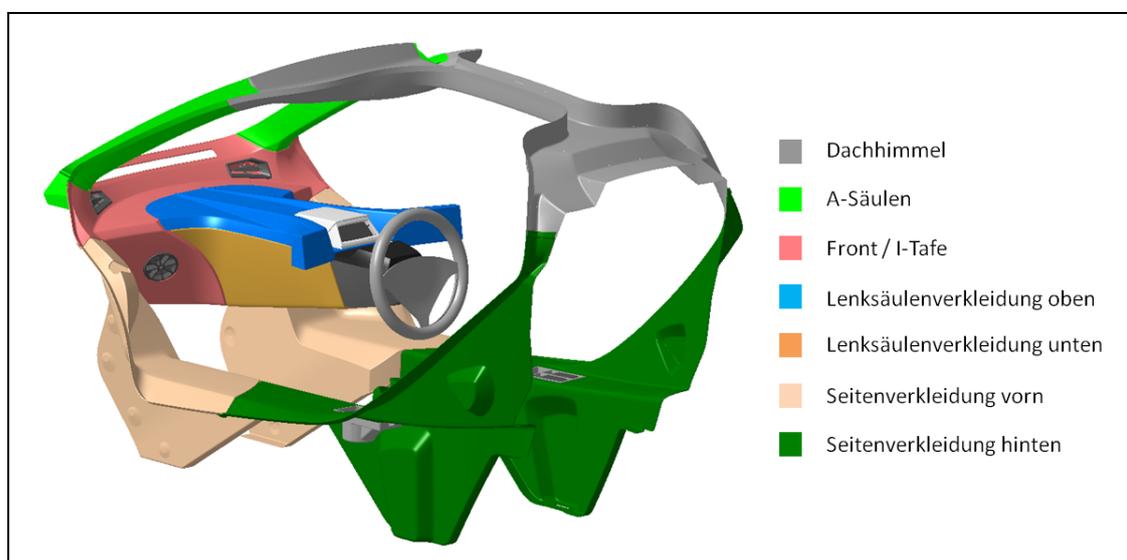
Zur Verkleidung der Front wurde das Bauteil „I-Tafel“ konstruiert, das sich analog zum Armaturenbrett über die ganze Breite des Fahrzeugs und zwischen Fußraum und Frontscheibe erstreckt. Integriert sind die Tieftonlautsprecher sowie Blenden für die Hochtonlautsprecher des Fahrzeugs. Die Befestigung erfolgt wiederum über Spanten, die über die wenigen zugänglichen Bereiche sowie hinter den Lautsprecherblenden verschraubt werden. Das Bauteil wurde aus 3 mm GFK-Handlaminat aufgebaut und nachträglich mit Echtleder bezogen.

Die Verkleidung der Lenksäule ist zweiteilig aus Ober- und Unterschale ausgeführt, wobei die Bauteile mit konturangepassten Spanten zur Lenksäule positioniert werden. Die Befestigung erfolgt mittels Verschraubungen. Beide Bauteile wurden aus 3 mm starkem GFK-Laminat aufgebaut und mit Echtleder bezogen. In die Oberschale werden nachträglich Bedienelemente, Display und die Lenkstockverkleidung montiert.

### **Verkleidung A-Säulen und Dachbalken**

Die obere Verkleidung im Bereich der A-Säulen und des Dachhimmels ist ähnlich aufgebaut, wie bekannte Lösungen aus konventionellen Fahrzeugen. Die A-Säulenverkleidung schließt bündig mit dem Türflansch und der Frontscheibe ab und wird am unteren Ende verdeckt verschraubt. Die Dachhimmelverkleidung folgt ebenfalls der Kontur des Türflanschs und hält die A-Säulenverkleidung am oberen Ende. Die Befestigung erfolgt prototypisch durch eine Verklammerung unter dem Türdichtgummi.

Die A-Säulenverkleidung besteht aus 2 mm GFK Handlaminat, der Dachhimmel wurde als 1 mm starkes Laminat im RTM-Verfahren hergestellt. Beide Bauteile wurden von IM mit einem Veloursleder bezogen.



**Abbildung 32:** Übersicht der Interieurbauteile

#### **1.4.9. Bewertung der Lösung**

##### **Prototypischer Aufbau**

Die Bauteile des Interieurs konnten erfolgreich prototypisch hergestellt und wie geplant in das Demonstratorfahrzeug eingebaut werden (Abbildung 33). Der für Verkleidungsbauteile vergleichsweise stabile Aufbau aus GFK-Laminat erwies sich im Hinblick auf den Verzug durch die Echtlederkaschierung als günstig. Nacharbeiten bei der Montage ergaben sich im Wesentlichen durch die zum Teil stark aufbauenden Einschlagsränder und Nähte des Bezugsmaterials, sowie dem vorgesehenen geringen Toleranzabstand zwischen der Verkleidung und angrenzenden Komponenten.

Weiterhin konnten Erfahrungen gesammelt werden, die im Sinne der Weiterentwicklung des Fahrzeugkonzepts oder ähnlicher Vorhaben Beachtung finden sollten.

### **Herstellbarkeit der Bauteile**

Für den prototypischen Aufbau wurden die Verkleidungsbaueteile als Lamine im RTM bzw. Handlaminierverfahren hergestellt. Dadurch war es möglich, die verkleideten Flächen nur soweit zu trennen, wie es für den Einbau bzw. die Kaschierung erforderlich war. Ebenso konnten Entformungsschrägen bis zur Grenze der Herstellbarkeit ausgenutzt werden. Für die angestrebte industrielle Herstellung des Interieurs gilt es, die anwendbaren Fertigungsverfahren für einzelne Bauteile zu bewerten, um schließlich das Design und Erscheinungsbild des Interieurs an die technisch realisierbaren Formen anzupassen.

Das für zahlreiche Kunststoffbauteile in konventionellen Fahrzeugen verwendete Spritzgießverfahren ist technisch gesehen eine universelle Lösung zur Herstellung der Verkleidung. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist es allerdings nur für kleine bzw. einfache Bauteile wie Sichtblenden oder Einsätze geeignet. Bei den anderen großflächigen Bauteilen entstehen immense Kosten für den Aufbau entsprechend großer (Mehrkomponenten-)Werkzeuge, die inklusive Entwicklung, Konstruktion, Maschinenzeiten, Musterung und Materialien in ungünstigem Verhältnis zur anvisierten Losgröße des Elektrofahrzeugs stehen.



**Abbildung 33:** Fahrzeuginterieur im Demonstratorfahrzeug

Alternativ zum Spritzgießen ist die Fertigung der Bauteile aus thermoplastischen Halbzeugen anwendbar. Das betrifft das Heißpressen von Matten- oder Plattenhalbzeugen in Form von Organoblechen, GMTs oder thermoplastisch gebundenen Naturfasern, beziehungsweise das Vakuumentziehen von verstärkten oder unverstärkten thermoplastischen Plattenhalbzeugen. Dabei kann die sichtbare Bauteiloberfläche mit Hilfe von Dekorfolien oder Kaschierstoffen direkt im Umformprozess aufgebracht werden. Ein limitierender Faktor bei den Umformver-

fahren ist die eingeschränkte Gestaltungsfreiheit, da u.a. maximal zulässige Umformgrade und minimale Presswinkel eingehalten werden müssen. Unter diesem Gesichtspunkt müsste beispielsweise die Form der Seitenverkleidung vereinfacht und in weitere Bauteile untergliedert werden, bis die technologischen Anforderungen und die Herstellbarkeit gewährleistet sind.

Weiterhin besteht die Problematik der Gestaltung des Hinterbaus der Verkleidungsteile. Zum einen sind Verrippungen zur Erhöhung der Steifigkeit und Minderung des Verzugs, zum anderen sind Retainer zur Befestigung am Rahmen vorzusehen. Dies kann über partielles Hinterspritzen oder über die Klebmontage von vorgefertigten Elementen umgesetzt werden. In beiden Fällen entsteht ein hoher Zusatzaufwand bezüglich der Werkzeugtechnik oder durch manuelle Arbeitsschritte.

Zur Ermittlung einer technisch realisierbaren, wirtschaftlichen Fertigungslösung für die Verkleidungsbauteile sind weitere Entwicklungsschritte erforderlich:

- Bewerten von Umformverfahren mit integrierter Oberflächenkaschierung
- Neuausrichtung der optisch-haptischen Ansprüche an die Verkleidung
- Fertigungsgerechte Vereinfachung der Verkleidungsflächen
- Variantenentwicklung Design - Bauteiltrennung - Fertigungsverfahren
- Weitere Aufgliederung der Bauteile in herstellbare Formen

### ***Toleranzausgleichskonzept***

Bei der Konstruktion des Fahrzeugs wurden die Komponenten unter der Maßgabe, dass sich benachbarte Bauteile in ihrer Form „finden“, passend erstellt und toleranzausgleichende Befestigungen am Rahmen vorgesehen.

Demgegenüber stehen erhöhte Formabweichungen, die einerseits aus der prototypischen Herstellung, in großem Maße aber aus der Verwendung von großflächigen Kunststoffteilen resultieren. Das betrifft Fertigungstoleranzen der Formwerkzeuge und Bauteile, Verzug bei der Herstellung durch Wärmeeinwirkung und inhomogenen Materialaufbau sowie Verwindung beim Montieren oder aufgrund der Kaschierung. Ebenso toleranzbehaftet sind die Schweisskonstruktion des Fahrzeugrahmens, sowie die Ermittlung der Einbauposition für die zuerst zu montierenden Bauteile.

Unter den vorliegenden Umständen war es bei der Montage möglich, alle Komponenten soweit nachzuarbeiten und auszurichten, dass eine für das Demonstratorfahrzeug ausreichende Passgenauigkeit benachbarter Bauteile hergestellt werden konnte. Wobei festzustellen ist, dass sich die stark aufbauende dekorative Naturlederkaschierung erschwerend auswirkte.

Bei der Weiterentwicklung des Fahrzeugs ist es erforderlich den Nachbearbeitungs- und Montageaufwand drastisch zu reduzieren. Dazu werden folgende Ansätze als zielführend erachtet:

- Festlegen von Referenzpunkten bzw. -flächen an Rahmen, Kunststoffbauteilen und Montagelehren, die eine Positionsbestimmung der Bauteile beim Einbau ermöglichen
- Vermeiden von Positionsabhängigkeit mehrerer benachbarter Bauteile
- Toleranzausgleichende Bauteilübergänge, Erhöhung von Spaltmaßen

## 2. Voraussichtlicher Nutzen

Das Gesamtziel, ein fahrbereites und zulassungsfähiges Demonstratorfahrzeug aufzubauen, wurde erreicht. Während der Konstruktion und insbesondere während dem Aufbau und der Erprobung konnten alle beteiligten Projektpartner umfangreiche Erfahrungen sammeln. Es wurde deutlich, welche der umgesetzten Konstruktions- und Technologiekonzept weiterverfolgt werden sollten und welche Aspekte einer Überarbeitung bedürfen.

Aus externer Sicht ergibt sich ein stimmiges Bild im Hinblick auf das Gesamtkonzept des Elektrofahrzeugs. Dies zeigt sich in der durchweg positiven Resonanz seitens der Medien sowie durch die zahlreichen Fachbesucher und Interessenten bei den Messepräsentationen.

Im nächsten Schritt gilt es, das Fahrzeug hinsichtlich einer Serienfertigung zu überarbeiten und den Fertigungsaufwand aus technologischer und wirtschaftlicher Perspektive zu optimieren. Die Basis dafür ist mit Abschluss dieses Projektes geschaffen, indem wichtige Vorentwicklungen und Untersuchungen geleistet wurden und nun als Vorlage im Realmaßstab zur Verfügung stehen. Nachfolgend sollen einzelne Entwicklungen, losgelöst vom Gesamtkonzept, betrachtet werden.

### ***Ergonomiekonzept/ Sitzbaugruppe***

Das umgesetzte Ergonomiekonzept mit verschiebbarer Pedalerie und schwenkbarem Sitz hat sich als praktikabel erwiesen. Durch den Verzicht auf umfangreiche Sitzeinstellmöglichkeiten und die spezielle Lagerung des Sitzes wird im Bodenbereich der erforderliche Bauraum für den Akku geschaffen, der notwendigerweise an dieser Stelle verbaut werden muss, um die Fahrstabilität durch einen niedrigen Schwerpunkt des Fahrzeugs zu gewährleisten. Im Vorderwagen wird dafür zusätzlicher Bauraum für die Pedalerverstellung verbraucht, der durch den nicht vorhandenen Verbrennungsmotor prinzipiell zur Verfügung steht.

Gleichwohl ist die Lösung speziell auf dieses Fahrzeug abgestimmt und bleibt damit sehr kleinen und kompakten 1- bis 2-Sitzer-Elektrofahrzeugen vorbehalten. Für die Entwicklung zukünftiger kompakter Leichtkraftfahrzeuge mit Elektro- oder Hybridantrieb wird somit eine Option zur Gestaltung der Sitz- und Einstiegs ergonomie unter Berücksichtigung der kompakten Abmessungen vorgegeben.

Ungeachtet dessen sind die erforderlichen Bewegungsabläufe beim Ein- und Aussteigen in das Fahrzeug anders als bei konventionellen Fahrzeugen und damit ungewohnt. Es bleibt zur ermitteln, ob mit dieser Lösung bereits eine breite Akzeptanz erreicht werden kann oder ob weitere Anpassungen und Optimierung notwendig wären.

### ***Fahrzeugsitz***

Der aufgebaute Sitz bietet viel Komfort bei vergleichsweise geringem Gewicht. Obgleich die aufgebaute Variante auf die speziellen Anforderungen des Fahrzeugs abgestimmt ist, wird eine anschauliche Vorlage für die Kombination einer tragenden FKV-Schalenstruktur mit einem Formschaumrahmen sowie einer Polsterung mittels Abstandsgewirk gegeben.

Durch den Einsatz einer textilen Unterfederung in Verbindung mit dem Abstandsgewirk wird ein dünner Polsteraufbau ermöglicht. Die formschlüssige Einbindung des Gewirks in den Schaumstoffpolsterrahmen kann Effekt des seitlichen Abgleitens bei Belastung deutlich reduzieren.

Eine Hemmnis für einen verbreiteten Einsatz derartiger Sitzkonzepte ist der erhöhte Fertigungs- bzw. Kostenaufwand gegenüber konventionellen Lösungen. Dem gegenüber stehen eine nennenswerte Gewichtsreduzierung, erheblicher Platz bzw. Bauraumgewinn sowie ein optimaler Klimakomfort des Sitzes. Aufgrund der dieser Vorteile ist davon auszugehen, dass zumindest Teile des vorgestellten Konzepts in zukünftigen Serienfahrzeugen angewendet werden.

### ***Elektronisches Fahrpedal***

Für die Pedalerie des Fahrzeugs wurde eine anwendungsspezifisch modifizierte Variante eines vom Strukturleichtbau (SLB) e.V. entwickelten elektronischen Fahrpedals verwendet. Damit konnte die Leistungsfähigkeit von Sensorfedern aus FKV mit einlamierten Draht-DMS nachgewiesen werden. Das Konzept ermöglicht maximale Funktionsintegration in wenige Bauteile und ist auf Serienanwendungen übertragbar.

### ***Kofferraumstruktur***

Der Kofferraumboden wurde in einem zweistufigen Pressverfahren hergestellt, das für eine Überführung in einen Serienprozess geeignet ist. Es können 2-schalige Bauteile hergestellt werden, die ein besonders günstiges Gewichts-/Steifigkeitsverhältnis aufweisen und dabei einseitig oder gegebenenfalls auch beidseitig Sichtflächen besitzen können.

Wesentlicher Bestandteil des Verfahrens ist, dass eine vorgepresste Schalenstruktur mit einem aufgeschmolzenen Organoblech als Decklage verklebt wird. Als Modifikation wäre es denkbar, zwei vorgeformte Bauteilschalen mit einem dünnen GMT-Organoblech als Schmelzkleber zu verpressen.

Der Vorteil besteht in der Kombination aus Tiefziehprozess und Verklebung, womit anforderungsgerechte großflächige Verbundbauteile aus glas- und/oder naturfaserverstärkten thermoplastischen Halbzeugen gefertigt werden können. Darüber hinaus ist es möglich, vorkaschierte Halbzeuge zu verarbeiten oder die Oberflächenkaschierung in den Pressprozess zu integrieren.

In Summe bietet dieses Verfahren deutliches Potenzial für ein weites Anwendungsspektrum, nicht nur für die Automobilindustrie, da hiermit auch kleinere Losgrößen wirtschaftlich herstellbar sind. Außerdem ist eine breite Palette an thermoplastischen Faserkunststoffverbunden verarbeitbar. Im Zuge des Projektes konnten hier wertvolle Erfahrung und Knowhow seitens der TU Chemnitz gewonnen werden, welche wiederum in nachfolgende Projekte mit Industriepartnern einfließen, um dieses Verfahren für die Serienfertigung weiter zu optimieren und durch Wissenstransfer wirtschaftlich nutzbar zu machen.

### 3. Veröffentlichungen und Präsentationen

Die Öffentlichkeitsarbeit im Projekt wurde zentral von Innovative Mobility betrieben. Dies geschah immer in Vorabsprache mit den Projektpartnern. Es wurden regelmäßig Pressemitteilungen veröffentlicht. Neben Artikeln in Print- und Onlinemagazinen gab es mehrere Fernsehberichte, auch internationale, die sich mit dem Elektrofahrzeug Colibri befassten.

Von größter Bedeutung waren die Messeauftritte beim Genfer Autosalon im März, auf der Hannover Messe im April sowie auch auf der Kompozyt Expo Krakow im November 2013, um das Projekt und das Fahrzeug einer breiten internationalen Öffentlichkeit zu präsentieren.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht zum Teilvorhaben „Analyse und Umsetzung von Innenraumkomponenten in belastungsgerechten Verbundbauweisen“ im Rahmen des Verbundprojekts „Umsetzung eines neuartigen Einpersonen-Elektroleichtfahrzeugs im Sinne eines Gesamtsystemansatzes (1PeFZ)“	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Kroll, Lothar Hartenstein, Marcus Stelzer, Robert	5. Abschlussdatum des Vorhabens August 2013
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation -
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Chemnitz Fakultät für Maschinenbau Institut Strukturleichtbau Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung Reichenhainer Straße 70 09126 Chemnitz	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 13N11605
	11. Seitenzahl 55
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben -
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 32
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Internationaler Autosalon Genf, 07.-17.03.2013; Hannover Messe, 08.-12.04.2013; Kompozyt Expo Krakow, 21.-22.11.2013	
18. Kurzfassung Die bis 2013 vorgestellten, marktverfügbaren oder als Studie ausgeführten Elektroleichtfahrzeuge weisen Einschränkungen des Standards konventioneller Fahrzeuge auf, u.a. hinsichtlich Ergonomie, Design, Fahrkomfort, Reichweite und passive Sicherheit. Demnach besteht ein Bedarf zur Ausarbeitung und Validierung neuer Fahrzeugkonzepte, die die genannten Schwachstellen aufgreifen und verbessern. In diesem Verbundprojekt wurde das Ziel verfolgt, ein neuartiges Einpersonen-Elektroleichtfahrzeug von der Konzeptidee bis zum fahrbereiten Demonstrator als Gesamtsystem umzusetzen. Das Teilprojekt der TU Chemnitz umfasst dabei die Konzeption, Konstruktion und den prototypischen Aufbau des Fahrzeuginterieurs. Kernthemen sind die Sitzstruktur mit Hubmechanismus, die verstellbare Pedalerie mit elektronischem Gaspedal, die Kofferraumstruktur und die Innenverkleidung des Fahrzeugs. Die Ausarbeitung sämtlicher Komponenten erfolgte in mehreren Iterationsschleifen und in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern über einen Zeitraum von etwa 15 Monaten. Anschließend wurden Fertigungsversuche durchgeführt bzw. Formwerkzeuge, Bauteile und Baugruppen hergestellt, angepasst, eingebaut und nachgearbeitet. Im Ergebnis konnte das von Projektinitiator und -koordinator Innovative Mobility Automotive GmbH angestrebte Fahrzeugkonzept als komplette Neukonstruktion, unter Berücksichtigung zahlreicher Sonderlösungen und Details, prototypisch umgesetzt werden. Das Demonstratorfahrzeug dient als Plattform zur umfassenden Evaluation des zugrundeliegenden Konzepts bzw. der einzelnen Komponenten. Insbesondere Konstruktion, Dimensionierung, Material, Herstellungsverfahren, Montage, Bauraumausnutzung können aus technischer und wirtschaftlicher Sicht betrachtet und im Hinblick auf eine Entwicklung zur Serienreife beurteilt werden.	
19. Schlagwörter Elektroauto, Elektrofahrzeug, Einsitzer, L7E, Leichtbau, Faserverbund, Schalensitz, elektronisches Gaspedal, VARTM	
20. Verlag -	21. Preis -

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title Schlussbericht zum Teilvorhaben „Analyse und Umsetzung von Innenraumkomponenten in belastungsgerechten Verbundbauweisen“ im Rahmen des Verbundprojekts „Umsetzung eines neuartigen Einpersonen-Elektroleichtfahrzeugs im Sinne eines Gesamtsystemansatzes (1PeFZ)  Final Report on the sub-project “Analysis and implementation of interior components with composite construction methods” within the framework of the project “Implementation of a novel single seated lightweight electric car approaching the overall system”	
4. author(s) (family name, first name(s)) Kroll, Lothar Hartenstein, Marcus Stelzer, Robert	5. end of project August 2013
	6. publication date -
	7. form of publication -
8. performing organization(s) (name, address)  Chemnitz University of Technology Faculty of Mechanical Engineering Department of Lightweight Structures and Polymer Technology Reichenhainer Straße 70 09126 Chemnitz	9. originator's report no. -
	10. reference no. 13N11605
	11. no. of pages 55
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references -
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 32
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) International Geneva Motor Show, 07.-17.03.2013; Hannover Messe, 08.-12.04.2013; Kompozyt Expo Krakow, 21.-22.11.2013	
18. abstract  Lightweight electric cars introduced till 2013, available from series production or built as a prototype, exhibit obvious limitations regarding ergonomics, design, comfort, range and passive safety compared to conventional cars. To seize and improve those weak points, there is the need for development and validation of new car concepts. The objective of this project was to implement a novel single seated lightweight electric car, starting from the first sketch and ending up with a complete prototype. The sub-project from Chemnitz University of Technology comprises concept, design and prototyping of interior components. Main topics were the lightweight seat structure with a lifting device, the adjustable pedal box including an electronic accelerator pedal, the structure of the boot and the interior trim of the car. The design of all components was realized over period of 15 months in close cooperation with the other partners, followed by the manufacture of moulds, parts and components and also the assembly of the car itself. The result is a complete prototype of the lightweight electric car concept, as intended by the initiator and coordinator of the project Innovative Mobility Automotive GmbH. The prototype allows a profound evaluation of the underlying concept and also the in use performance of individual components. Further, mechanical design, dimensioning, materials selection, manufacturing and assembly can be considered from a technical and economical perspective and assessed with regard to the intended development for series production.	
19. keywords electric car, single seated car, L7e, lightweight construction, composite, bucket seat, electronic accelerator pedal, VARTM	
20. publisher -	21. price -