



**Martin Bickel BSc.**

**Entwicklung und Integration eines  
Hochvoltspeichergehäuses für einen  
Zweiradhybridkonzepterprober unter Berücksichtigung  
von Übernahmeteilen**

**Masterarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technische Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan<sup>1</sup>

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Sinz<sup>1</sup>

Dipl.-Ing. (FH) Elmar Jäger<sup>2</sup>

Graz, 07.11.2014

---

<sup>1</sup> Technische Universität Graz, Institut für Fahrzeugsicherheit

<sup>2</sup> BMW Motorrad, Vorentwicklung

# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

## *AFFIDAVIT*

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

---

Datum/ Date

---

Unterschrift/ Signature

# SPERRVERMERK

Diese Masterarbeit, die in Übereinstimmung mit der Prüfungs- und Studienordnung der Technischen Universität Graz erstellt wurde, ist gemäß den beigefügten Hinweisen zur Geheimhaltung vertraulich zu behandeln. Während des Zeitraums der Sperrung werden der Bericht und alle anderen Arbeitsergebnisse dieser Diplomarbeit nur den Prüfern und berechtigten Personen zugänglich gemacht.

Die vorliegende Masterarbeit beinhaltet vertrauliche Informationen der BMW AG. Die Weitergabe des Inhaltes der Arbeit und beiliegender Zeichnungen und Daten im Gesamten oder in Teilen ist grundsätzlich untersagt. Es darf ohne schriftliche Genehmigung der BMW AG München keine Kopie oder Abschrift gefertigt werden. Veröffentlichung oder Vervielfältigungen der Masterarbeit, auch nur auszugsweise, sind ohne ausdrückliche Genehmigung der Firma BMW nicht gestattet. Diese Masterarbeit ist nur Korrektoren, sowie Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich zu machen.

---

Unterschrift/ Datum Martin Bickel

---

Unterschrift/ Datum Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan, Technische Universität Graz

---

Unterschrift/ Datum Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Sinz, Technische Universität Graz

---

Unterschrift/ Datum Dipl.-Ing. (FH) Elmar Jäger, BMW AG

# Inhaltsverzeichnis

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG.....	II
SPERRVERMERK .....	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	VII
TABELLENVERZEICHNIS .....	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	X
KURZFASSUNG .....	XI
ABSTRACT .....	XII
1 Einleitung .....	1
2 Aufbau des BMW C-Evolution .....	3
2.1 Fahrwerk und Rahmenstruktur .....	3
2.2 Hochvoltspeicher.....	5
3 Aufgabenstellung .....	7
3.1 Rahmenkonzept.....	7
3.2 HVS-Gehäuse.....	8
4 Vorgaben für die Arbeit .....	9
4.1 Packaging .....	9
4.2 Übernahmeteile.....	11
4.3 Montagegerechte Auslegung.....	11
5 Methoden .....	13
6 Recherche in Bezug auf bestehende Konzeptlösungen .....	15
6.1 Benchmark Motorrad.....	15
6.2 Stand der Technik bei BMW PKW.....	16
7 Auslegung der Rahmenstruktur.....	19
7.1 Konstruktive Randbedingungen für die Rahmenstruktur.....	19
7.1.1 Anbindung der Fahrwerkskomponenten.....	19
7.1.2 Integration der Zusatzkomponenten.....	20
7.1.3 Belastungsanforderungen .....	21

7.2	Bewertungskriterien des Rahmenkonzepts .....	21
7.3	Rahmenkonzepte .....	22
7.3.1	Ableitung der Rahmengrundstruktur basierend auf dem Kraftfluss .....	22
7.3.2	Rahmen aus Faserkunststoffverbund .....	24
7.3.3	Gitterrohrrahmen .....	26
7.4	Konzeptentscheidung Rahmen .....	29
7.5	Konstruktion des finalen Rahmenkonzepts .....	31
7.5.1	Werkstoffwahl .....	31
7.5.2	Wahl des Profilquerschnitts .....	32
7.5.3	Anpassung der Knotenpunkte .....	35
7.5.4	Entkoppelung des Hochvoltspeichergehäuses .....	36
7.5.5	Befestigungspunkte HVS-Gehäuse .....	38
7.5.6	Anbindung Range-Extender .....	40
7.6	Überprüfung der Rahmenstruktur .....	40
7.6.1	Überprüfung der Auslegung des Hauptrahmens durch den Lastfall I - Bodenwelle .....	41
7.6.2	Überprüfung der Biegesteifigkeit durch den Lastfall II .....	44
7.6.3	Überprüfung der Torsionssteifigkeit durch den Lastfall III .....	48
7.7	Bewertung des Rahmenkonzepts .....	52
8	Konzeptfindung Hochvoltspeichergehäuse .....	54
8.1	Funktionelle und konstruktive Randbedingungen für das HVS-Gehäuse .....	54
8.1.1	Konstruktive Randbedingungen .....	55
8.1.2	Funktionelle Randbedingungen .....	56
8.2	Auslegung des Hochvoltspeichergehäuses .....	58
8.2.1	Geometrische Auslegung des Hochvoltspeichergehäuses .....	58
8.2.1.1	Wärmemanagement .....	61
8.2.1.2	Wahl des Gehäusematerials .....	64
8.2.2	Absicherung der Hochvoltsicherheit im Normalbetrieb .....	79
8.2.2.1	Berührschutz .....	80

8.2.2.2	Elektrische Isolierung .....	80
8.2.2.3	Elektromagnetische Verträglichkeit .....	81
8.2.2.4	Dichtungskonzept der Gehäuseanbindung mit dem Kühlluftschacht.....	83
8.2.2.5	Potenzialausgleich .....	85
8.2.3	Absicherung der Hochvoltsicherheit gegenüber Sonderereignisse .....	86
8.2.3.1	Thermische Sonderereignisse.....	87
8.2.3.2	Tankschutzprüfung.....	87
8.3	Bewertung des HVS-Gehäusekonzepts .....	88
9	Darstellung des Gesamtkonzepts des Hybriderprobers .....	91
10	Zusammenfassung und Ausblick .....	94
	LITERATURVERZEICHNIS .....	96
	ANHANG A .....	99
	ANHANG B .....	101
	ANHANG C .....	103
	ANHANG D .....	104

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 BMW C-Evolution [5].....	3
Abbildung 2 Fahrwerkskomponenten des BMW C-Evolution (BMW CAD Daten Juni 2014).....	4
Abbildung 3 Hochvoltsspeichergehäuse des C-Evolution (BMW CAD Daten Juni 2014).....	5
Abbildung 4 VKM im Package mit Hochvoltsspeicher (BMW CAD Daten Juli 2014).....	10
Abbildung 5 Montage C-Evolution (BMW CAD Daten Juli 2014).....	11
Abbildung 6 Vorgehensweise bei der Konzeptwahl und -ausarbeitung.....	14
Abbildung 7 Piaggio MP3 300 LT Hybrid Hochvoltsspeicher und -elektronik [11].....	15
Abbildung 8 Anbauteile aus dem C-Evolution (BMW CAD Daten Juli 2014).....	19
Abbildung 9 Package VKM und Hochvoltskomponenten mit den bestehenden Anschraubpunkten (BMW CAD Daten Juli 2014).....	20
Abbildung 10 Darstellung des Kraftflusses der Rahmenstruktur des Hybridkonzeptes als Schalenmodell .....	23
Abbildung 11 Rahmenkonzept aus Faserkunststoffverbunden .....	25
Abbildung 12 Ausrichtung der Gitterrohre anhand der Berechnung des Kraftflusses .....	27
Abbildung 13 Grundgeometrie des Gitterrohrrahmens .....	28
Abbildung 14 Relative Widerstandsmomente gegen Biegung für unterschiedliche Querschnittsformen mit gleicher Fläche und Biegeachse (gestrichelt durch Profilquerschnitte dargestellt)[17] .....	32
Abbildung 15 Relative Widerstandsmomente gegen Torsion für unterschiedliche Querschnittsformen mit gleicher Fläche [17] .....	33
Abbildung 16 Alternative Knotenpunkte Rahmenkonstruktion.....	35
Abbildung 17 Darstellung der Randbedingung durch die Anbindung des Heckrahmens mittels des Servicedeckels des HVS-Gehäuses .....	36
Abbildung 18 Ersatzkonstruktion für den Servicedeckel zur Anbindung des Heckrahmens .....	37
Abbildung 19 Anbindung des Heckrahmens.....	38
Abbildung 20 Verschraubung des HVS-Gehäuses mit dem Kühlluftschacht und der Rahmenstruktur .....	39
Abbildung 21 Anbindung des Range-Extenders an die Rahmenstruktur .....	40
Abbildung 22 Kraftangriffspunkte Lastfall I Bodenwelle.....	42
Abbildung 23 Berechnungsergebnis Lastfall I Bodenwelle.....	43
Abbildung 24 Kraftangriffspunkte Lastfall II Biegesteifigkeit .....	45
Abbildung 25 Darstellung der Verschiebung des C-Evolution durch eine Vergleichskraft .....	46
Abbildung 26 Darstellung der Verschiebung des Hybridkonzeptes durch eine Vergleichskraft ...	46
Abbildung 27 Optimierungspotential der Biegesteifigkeit des Hybridkonzeptes.....	48
Abbildung 28 Kraftangriffspunkte Lastfall III Torsionssteifigkeit .....	49
Abbildung 29 Berechnungsergebnis der Torsionssteifigkeit des C-Evolution .....	50
Abbildung 30 Berechnungsergebnis der Torsionssteifigkeit des Hybridkonzeptes .....	50
Abbildung 31 Optimierungspotential der Torsionssteifigkeit des Hybridkonzeptes .....	51

<i>Abbildung 32 Darstellung des finalen Rahmenkonzepts .....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 33 Aufbau eines Hochvoltspeichers mit Batteriemanagementsystem [8].....</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 34 Hauptkomponenten des Hochvoltspeichers .....</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 35 Grundgeometrie des Hochvoltspeichergehäuses .....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 36 Integration der Gehäuseanschlüsse .....</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 37 Verlauf des Kühlluftstromes beim C-Evolution .....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 38 Luftstromverlauf des Kühlkonzeptes beim Hybriderprober.....</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 39 Anpassung des Kühlluftschachts abhängig vom Kühlluftkonzept des Hybriderprobers .....</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 40 Kühlung der Ladeelektronik .....</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 41 FEM-Berechnung der Belastung des HVS-Gehäuses.....</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 42 Schematischer Prüfungsaufbau des Pendelschlagversuches nach SAE J 1241. 74</i>	
<i>Abbildung 43 Randbedingungen für die Berechnung der Spannungsverteilung im Lagenaufbau bei vorgegebener maximaler Durchbiegung im Zentrum .....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 44 Lagenaufbau im Simulationsmodell .....</i>	<i>76</i>
<i>Abbildung 45 Darstellung der Verformung der Prüfplatte bei festgelegter maximaler Durchbiegung der Prüfplatte .....</i>	<i>77</i>
<i>Abbildung 46 Spannungsverteilung der untersten Lage in Faserrichtung bei einer Durchbiegung von 35mm .....</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 47 Anbindungskonzept des Hochvoltspeichergehäuses mit dem Kühlluftschacht....</i>	<i>83</i>
<i>Abbildung 48 Anbindung des Hochvoltspeichergehäuses mit dem Kühlluftschacht .....</i>	<i>84</i>
<i>Abbildung 49 Potenzialausgleich der HV-Komponenten mit der Fahrzeugkarosserie[7].....</i>	<i>86</i>
<i>Abbildung 50 Gesamtkonzept des Hochvoltspeichergehäuses.....</i>	<i>88</i>
<i>Abbildung 51 Virtuelle Darstellung des Hybridkonzepterprobers ohne Karosseriebauteile .....</i>	<i>91</i>
<i>Abbildung 52 Darstellung der Montage des finalen Hybridkonzeptes gleich wie beim C-Evolution .....</i>	<i>93</i>



# TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1 Stand der Technik: HVS-Gehäuse bei BMW PKW [7].....</i>	<i>17</i>
<i>Tabelle 2 Bewertung der Rahmenarten für einen Konzepterprober .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 3 Bewertung des Kreis- und Rechteckhohlprofilquerschnittes.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 4 Schnittkräfte an den Anbindungspunkten der Anbauteile und der Feder für den Lastfall - Bodenwelle .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabelle 5 Materialwerte 42CrMo4 Präzisionshohlprofil [20].....</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 6 Vergleich der Biegesteifigkeit des Rahmenkonzepts mit dem C-Evolution .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabelle 7 Vergleich der Torsionssteifigkeit des Rahmenkonzepts mit dem C-Evolution.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabelle 8 Bewertungsmatrix zur Faserwahl.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabelle 9 Stückzahlen und Matrices abhängig vom Herstellungsverfahren[24].....</i>	<i>72</i>
<i>Tabelle 10 Glasübergangstemperatur von Harzsystemen für Prepregs mit einer ausreichenden Temperaturbeständigkeit gegenüber dem Normalbetrieb [25] .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabelle 11 Gewichtsabschätzung Hochvoltsspeichergehäusekonzept.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabelle 12 Gewichtsvergleich des Hybridkonzepts mit dem C-Evolution.....</i>	<i>92</i>

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

FEM	Finite-Elemente-Methode
HVS	Hochvoltspeicher
HV	Hochvolt
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
VKM	Verbrennungskraftmaschine
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
RTM	Resin Transfer Moulding
REX	Range-Extender

# KURZFASSUNG

Gegenwärtig wird von politischer Seite eine Reduzierung des Flottenverbrauchs im PKW-Bereich gefordert. Mit dem C-Evolution wurde dabei der erste Schritt in diese Richtung in der Motorradsparte bei BMW gemacht. Um weitere Potentiale heben zu können, sollen weitere Konzepte auf Basis des Elektroantriebes bewertet werden. In dieser Arbeit soll dabei ein sicheres Hochvoltspeichergehäuse für einen seriellen Zweiradhybridkonzepterprober auf Basis des Elektroscooters entwickelt und in die Fahrzeugarchitektur integriert werden. Für eine kostengünstige Umsetzung wird die Verwendung möglichst vieler Übernahmeteile vom C-Evolution angestrebt. Die Batteriemodule sollen auf ein Drittel reduziert und durch eine Range-Extender-Einheit ersetzt werden. Um die Verbrennungskraftmaschine zu integrieren, wird der Hochvoltspeicher von den strukturellen Aufgaben entkoppelt und durch eine alternative Tragstruktur ersetzt. Als Substitution für das tragende Gehäuse wird eine Rahmenstruktur entwickelt, welche die Aufgaben des Packaging und der Anbindung der Komponenten übernimmt. Im Folgenden werden zwei geeignete Rahmenkonzepte im Detail verglichen, bewertet und das finale Konzept wird für einen Konzepterprober weiter ausgearbeitet. Es wird mit Hilfe von numerischen Berechnungen bezüglich der Auslegung auf die Betriebssicherheit und den Fahreigenschaften abgesichert. Das Hochvoltspeichergehäuse soll aus Faserkunststoffverbunden gefertigt werden. Primär wird dabei auf eine sichere Auslegung des Gehäuses entsprechend den vorgeschrieben Standards der BMW Group und auf die Integration aller notwendigen Hochvoltkomponenten geachtet.

Das Ergebnis liefert mit einem Gitterrohrrahmen aus Stahl, in dem die Verbrennungskraftmaschine und das Hochvoltspeichergehäuse aus einem Glas-Faser-Kunststoff-Verbund integriert ist, eine kostengünstige Adaption des C-Evolution. Aufgrund der Bauraumprobleme muss jedoch eine Abnahme der Steifigkeiten akzeptiert werden. Zwar erlaubt die Verwendung des vorgegebenen Batteriemoduls und -konfiguration einerseits die Übernahme des kompletten Antriebsstranges, lässt aber die Verwendung der ursprünglichen Karosserie des C-Evolution nicht mehr zu. Ein Hochvoltspeichergehäuses mit Glasfaser als Rand- und Innegra als Kernmaterial mit einer duroplastischen Matrix erfüllt die Anforderungen der Betriebs- und Hochvoltsicherheit. Das Gesamtergebnis liefert ein gutes Konzept für einen Erprober, auf dem weiterführende Untersuchungen aufbauen können.

# ABSTRACT

New legislation demands the reduction of the fleet gasoline consumption. BMW Motorcycle's first step in this direction was made with the C-Evolution. In order to evaluate further cost-effective alternatives to reduce the fleet consumption this thesis mainly aims at developing and integrating a safe high-voltage battery housing for a serial hybrid prototype based on the electric scooter. To be cost effective, as many parts as possible should be taken over from the C-Evolution.

Hence, the number of battery modules shall be reduced down to one in order to create space for the range extender unit. The high-voltage battery housing will be disconnected from the structural tasks. A frame structure must be developed to replace the carrying housing, which takes over the tasks of packaging and connecting the components including the range extender unit. In the following, two suitable frameworks are compared and evaluated in more detail. After the final concept is selected, its design is evaluated by way of numerical calculations regarding the operational safety and the driving characteristics. The high-voltage battery casing shall be made of fiber-reinforced plastic composites. The primary task is to design a safe housing according to the prescribed standards of the BMW Group and the integration of all necessary high-voltage components. In addition to the choice of the material and the geometric design, adjustments have to be made to compensate the missing properties to fulfill the high-voltage safety.

The result shows that an inexpensive modification of the C-Evolution to a serial hybrid vehicle is possible but entails compromises. The concept integrates the combustion engine and the other components into a tubular steel frame. The high-voltage parts are protected by a housing made of fiber-reinforced plastic compound. However, due to space problems a decrease in the stiffness must be accepted. The use of a new battery module allows on one hand the takeover of the entire drive train, on the other hand it prohibits re-use of the C-Evolution's bodywork because of the changing dimension. A decoupling of the high-voltage battery housing from the frame structure is almost completely possible, which allows a design of the housing purely to safety. The use of glass as a border and Innegra as an inner ply with a thermosetting resin as matrix, satisfies the requirements. The end result provides a good concept for a prototype as basis for further research.

# 1 Einleitung

Für den PKW-Bereich wurden auf politischer Ebene in den letzten Jahren weitreichende Maßnahmen zur Senkung des CO<sub>2</sub>-Auststoßes zur Schonung der Umwelt durchgeführt. Im November 2013 wurde in diesem Zusammenhang der CO<sub>2</sub>-Grenzwert der Fahrzeugflotte für Hersteller für das Jahr 2020 auf 95 Gramm pro 100 Kilometer festgelegt. Um den Innovationsfortschritt zu unterstützen und nicht zu schwächen, werden dabei Elektrofahrzeuge mehrfach angerechnet [1]. Die Reduzierung des Flottenverbrauchs stellt die Fahrzeughersteller dabei vor große Herausforderungen. Für die Motorradsparte liegen noch keine gesetzlichen Zielwerte vor. Es ist jedoch aus den gleichen Überlegungen sinnvoll, auch für das Zweiradsegment im Vorgriff möglicher politischer Vorgaben, Konzepte für elektrifizierte, beziehungsweise teilelektrifizierte Fahrzeuge zu entwickeln. Eine Möglichkeit der Senkung des Flottenverbrauchs ist die Entwicklung und der Verkauf von Elektromotorrädern. BMW hat dabei mit dem C-Evolution den ersten Schritt in diese Richtung gemacht. Wird der benötigte Strom umweltfreundlich hergestellt, kann eine deutliche CO<sub>2</sub>-Minderung im Gesamtzyklus erreicht werden [2]. Unabhängig von der Stromerzeugung bietet ein Elektrokonzept weitere Vorteile. In mittlerweile 60 deutschen Städten wurden Umweltzonen eingeführt, die durch Zufahrtsbeschränkungen umgesetzt werden, da die EU-Luftqualitätsgrenzen regelmäßig überschritten wurden [3]. Elektrische Antriebe bieten demgegenüber lokale Emissionsfreiheit und führen zu einer niedrigeren Lärmbelastung. Sowohl auf der Seite der Hersteller, als auch auf der Seite der Konsumenten weist das Konzept einige Vorteile gegenüber dem Verbrennungsmotor auf. Eine ausreichende Reichweite muss dabei für den Kunden aber noch gegeben sein. Eine Studie, bei der über mehrere Jahre das Verhalten der PKW- und Motorradnutzer ermittelt wurde, hat gezeigt, dass in 95% der Fälle die Fahrleistung unter 85 km liegt [4]. Der C-Evolution deckt somit mit seiner maximalen Reichweite von 100 km mehr als 95% aller täglichen Fahrdistanzen ab.

Um die mögliche Modellpalette alternativer Antriebskonzepte zu erweitern und den Anteil an Elektromotorrädern in der Fahrzeugflotte zu erhöhen, wird die Entwicklung eines seriellen Hybridkonzeptes geprüft. Neben dem elektrischen Antriebssystem steht dabei eine Verbrennungskraftmaschine zur Verfügung, die der Erhöhung der Reichweite dient. Kurze Fahrten können somit rein elektrisch

## 1 Einleitung

---

durchgeführt werden, während längere Distanzen durch das Zuschalten eines Range-Extenders unterstützt werden.

Dabei besteht Interesse an einer günstigen Modellerweiterung durch die Verwendung möglichst vieler Gleichteile des Elektroscooters.

In dieser Arbeit wird dabei besonders auf die notwendigen Anpassungen der Rahmenstruktur und das Hochvoltsspeichergehäuse eingegangen.

## 2 Aufbau des BMW C-Evolution



**Abbildung 1 BMW C-Evolution [5]**

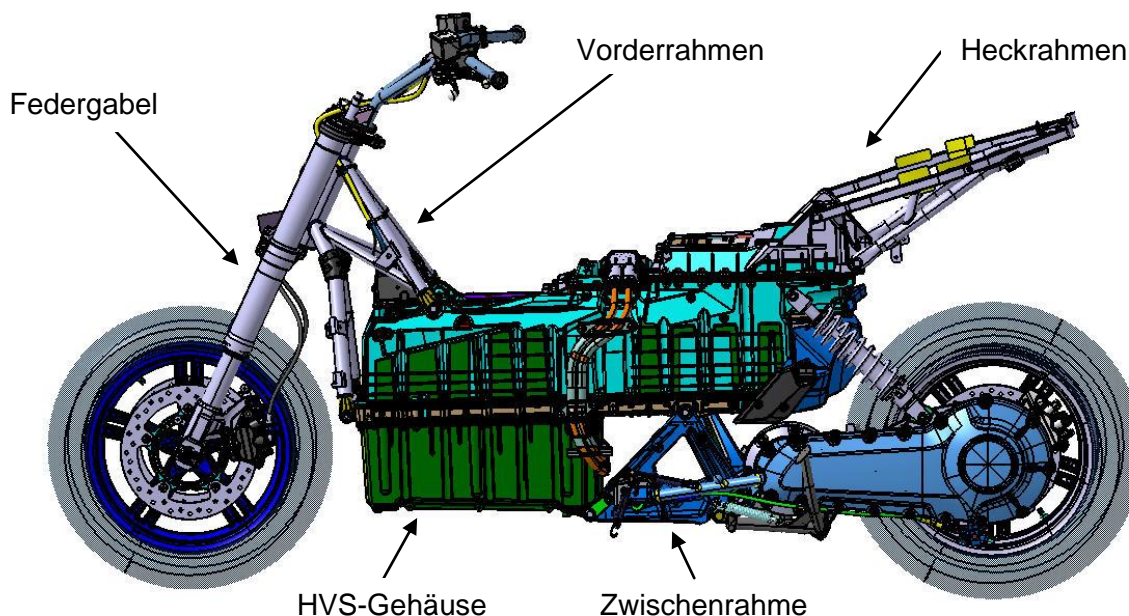
Neben den Maxi-Scootern C600 und C650GT mit Verbrennungsmotor steht den Kunden nun auch ein rein elektrisches Konzept zur Verfügung. Der C-Evolution ist für den Verkehr in der Stadt und im nahen Umland angedacht. Als festes Ziel wurde bei Konzeptbeginn vorgegeben, ein elektrisches Fahrzeug zu produzieren, das gegenüber einem konventionellen Scooter mit Verbrennungskraftmaschine keine fahrdynamischen Nachteile hat. Gleichzeitig soll die Reichweite den Nutzer im Tagesgeschäft nicht einschränken. [6].

Nachfolgend sollen die Hauptbaugruppen des C-Evolution dargestellt werden, da diese die Basis für die Arbeit bilden.

### 2.1 Fahrwerk und Rahmenstruktur

Der Aufbau des Fahrwerks und der Rahmenstruktur ist beim C-Evolution stark funktionsbedingt und wurde in mehrere Bereiche aufgeteilt. Der große Vorteil dieser Bauart besteht in der Möglichkeit der separaten Vormontage des

Hochvoltspeichergehäuses, wodurch es als ein vollständiges Bauteil in die Produktionsstraße in Berlin eingegliedert werden kann. Dies ermöglicht zeitsparende Montageprozesse.



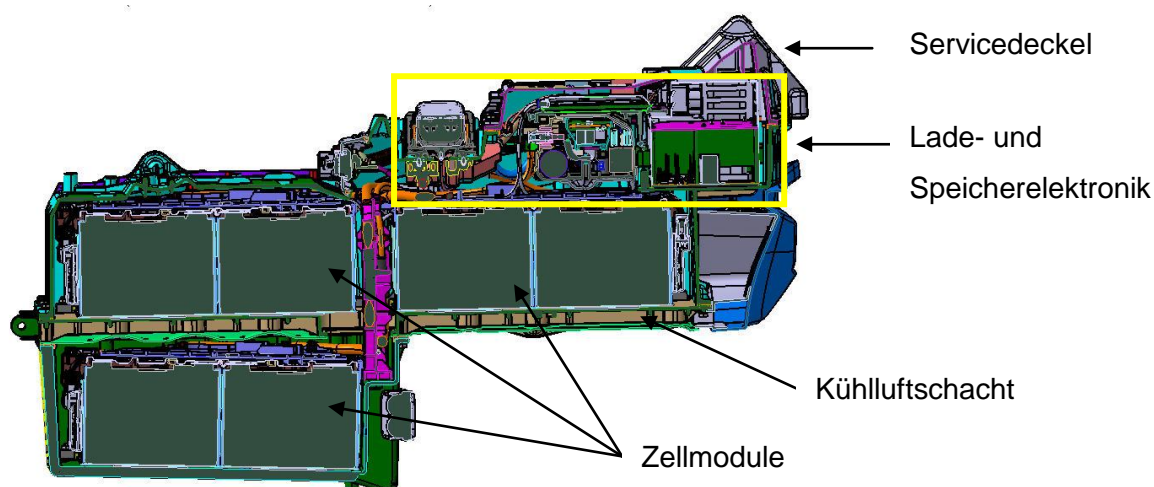
**Abbildung 2 Fahrwerkskomponenten des BMW C-Evolution (BMW CAD Daten Juni 2014)**

Beim Zwischenrahmen kommt neben der Anbindung der Schwinge die Aufgabe der Integration der Regelelektronik der E-Maschine hinzu, weshalb dieser auch bei alternativen Konzepten möglichst als separates Bauteil montiert werden muss. Der Vorderrahmen hat in diesem Fall die strukturelle Aufgabe, die Kraft von der Federgabel auf das HVS-Gehäuse zu übertragen. Struktur und Funktion werden nicht getrennt, wodurch es als tragendes Element zusätzlich die eigentlichen Anforderungen eines Batteriegehäuses miterfüllen muss. Zusätzlich liefert es die Anbindungspunkte für die Karosserie. Der Heckrahmen für den Sozius und die Gepäckbefestigung wird am Batteriegehäusedeckel montiert.

Auf ein Rahmenkonzept entsprechend des Kraftflusses von der Lenkgabel bis zur Schwinge in einem Bauteil wurde verzichtet, was grundsätzlich einen Nachteil bei der Steifigkeit bringt. Dieser wird jedoch durch die starre Auslegung des Gehäuses kompensiert und liefert somit gute Fahreigenschaften für das Gesamtfahrzeug.



## 2.2 Hochvoltpeicher



**Abbildung 3 Hochvoltspeichergehäuse des C-Evolution (BMW CAD Daten Juni 2014)**

Das Hochvoltspeichergehäuse ist das Kernstück des C-Evolution. Es beinhaltet drei Zellmodule, die jeweils aus zwölf Einzelzellen bestehen, welche in einer separaten Aluminiumhalterung integriert sind. Um eine Übernahme der Antriebselektronik beim Hybridkonzept zu ermöglichen, muss die gleiche Spannung der Batteriezellen gewährleistet werden. Oberhalb der Module befindet sich die Lade- und Speicherelektronik. Den Schutz dieser elektronischen Komponenten übernimmt das Gehäuse, das aus vier separaten Bauteilen aufgebaut ist. Es handelt sich hierbei um einen Aluminium-Druckguss. Im unteren Bereich befindet sich die Gehäusewanne, die mit dem Kühlluftschacht verbunden ist. Oberhalb des Schachtes schließt sich die Gehäusehaube an. Um eventuelle Reparaturen zu ermöglichen, wurde auf der Oberseite über der Lade- und Speicherelektronik ein Servicedeckel realisiert.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Kühlung der Zellmodule, wurde der Kühlluftschacht als zentrales Element integriert, der im direkten Kontakt mit den oberen Zellmodulen steht. Auf der Gehäusewanne wurde für den Wärmeübergang durch den Fahrtwind zusätzlich für eine Oberflächenvergrößerung durch Kühlrippen gesorgt. Diese wurde auch unterhalb der Lade- und Speicherelektronik umgesetzt, die durch das darunter liegende Gebläse angeströmt wird, um auch im Stand beim Ladevorgang eine ausreichende Kühlung zu garantieren.

Die elektromagnetische Verträglichkeit ist durch den Werkstoff Aluminium ausreichend gegeben und verlangt somit keine zusätzlichen Sondermaßnahmen. Um die Dichtheit

## 2 Aufbau des BMW C-Evolution

---

auch am Übergang zwischen den Bauteilen zu gewährleisten, wurde der Abstand zwischen den Anschraubpunkten entsprechend ausgelegt.

# 3 Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit ist die Modifikation des C-Evolution Fahrzeugkonzeptes mit dem Ziel eine Range-Extender-Einheit auf Basis eines Einzylinder-Verbrennungsmotors mit direkt angebundenem Generator unterbringen zu können. Hierzu muss der mögliche Platz für den Energiespeicher auf ein Drittel reduziert werden und die ursprüngliche tragende Struktur des Batteriegehäuses durch eine Neukonstruktion ersetzt werden. Dadurch muss die komplette Struktur um das Hochvoltspeichergehäuse neu konzeptioniert werden. Daraus ergibt sich folgendes Anforderungsprofil:

- Die Entwicklung eines günstigen Alternativmodells mit Rangeextender erfordert einen hohen Grad an Übernahmeteilern zur Stückzahlgenerierung.
- Neben dem Vorder-, Heck- und Zwischenrahmen des C-Evolution, soll auch die komplette Antriebselektronik inklusive des Motors der E-Maschine übernommen werden.
  - Zur Umsetzung muss ein Batteriemodul gewählt werden, das die gleiche Spannung aufweist wie zuvor bei gleichzeitig um ca. 70 % verringerter Kapazität.
- Beim Fahrzeug handelt es sich um einen Konzepterprober mit dem Ziel die technische Umsetzbarkeit nachzuweisen. Dieser soll mit einem ähnlichen Gewicht die gleichen Fahreigenschaften wie der Elektroscooter aufweisen. Eine detaillierte Betrachtung findet dabei die Rahmenkonstruktion und das Hochvoltspeichergehäuse, die in dieser Arbeit strukturell von einander entkoppelt werden sollen.
  - Daraus ergeben sich für die Rahmenstruktur und das HVS-Gehäuse unterschiedliche Anforderungsprofile.
- Zu Beginn soll der C-Evolution, der Stand der Technik bei BMW PKW und bei konkurrierenden Herstellern untersucht werden.

Durch die strukturelle Trennung der Rahmenstruktur vom HVS-Gehäuse entstehen unabhängige Zielforderungen, die im folgenden Kapitel diskutiert werden.

## 3.1 Rahmenkonzept

Aus der Problemstellung in Kapitel 3 ergeben sich folgende Unteraufgabenstellungen für die Entwicklung eines Rahmenkonzeptes:

- Unterbringung des VKM-Packages und des Hochvoltspeichersystems mit der dazu gehörigen Elektronik.
- Wahl eines Entwurfs mit gutem Preis/Gewichts-Verhältnis.  
→ Um dies zu vereinbaren, ist eine günstige Fertigungsmethode zu erwägen, die keine hohen Einzelteil- und Werkzeugkosten nach sich zieht.
- Gleiche Fahrdynamik wie beim C-Evolution.  
→ Die Rahmenkonstruktion muss ähnliche Steifigkeitswerte und ein vergleichendes Gesamtgewicht darstellen.
- Das Rahmenkonzept mit dem Hochvoltspeichergehäuse soll entsprechend dem Elektroscooter in große Teile der bestehenden Produktionsstraße in Berlin eingeschleust werden können.  
→ Das Grundabmaß bildet somit eine weitere Randbedingung.
- Eine mögliche Übernahme der Karosseriebauteile ist wünschenswert.

## 3.2 HVS-Gehäuse

Das Anforderungsprofil an das neue Speichergehäuse wird wie folgt definiert:

- Eine kostengünstige Variante, die gleichzeitig eine Gewichtsersparnis vorweist.
- Strukturelle Entkopplung vom Rahmen
- Unterbringung der Hochvoltkomponenten
- Gewährleistung des erforderlichen Schutzes, definiert durch den BMW Group Standard GS 97090 und GS 95023. [7] [8]
- Absicherungen gegen vorgegebene Crashbelastungen sowie die Gewährleistung der Dichtheit gegenüber Umwelteinflüssen.
- Elektromagnetische Verträglichkeit
- Anpassung des Kühlkonzepts für das Batteriemodul, die Lade- und Speicherelektronik
- Geometrisch muss auf eine fertigungsgerechte Auslegung geachtet werden, die gleichzeitig im Gesamtpackage eine einfache Montage ermöglicht.
- Die Speicherelektronik muss über einen Servicedeckel unterhalb der Sitzfläche erreichbar sein.

## 4 Vorgaben für die Arbeit

Beim Maxiscooter in dieser Arbeit handelt es sich um einen seriellen Hybriden. Dabei wird die mechanische Energie der Verbrennungskraftmaschine durch einen Generator in elektrische Energie umgewandelt und danach indirekt über einen elektrochemischen Energiespeicher oder direkt in die Traktions-E-Maschine eingeführt. Dabei dienen der Kraftstofftank und die Batterie als Energiespeicher. Abhängig von der Betriebsstrategie kann neben anderen Vorteilen, wie gewünschter lokaler Emissionsfreiheit im urbanen Raum, das Zuschalten des Verbrennungsmotors an das Fahrerprofil angepasst werden. Aufgrund des entkoppelten Betriebs der Verbrennungskraftmaschine kann der Ladevorgang stationär im Bereich des optimalen Lastpunkts des Motors durchgeführt werden. Dem gegenüber stehen allerdings Verluste durch die Umwandlung der chemischen in elektrische und nachträglich in mechanische Energie. Um das Ziel der Schadstoffminderung zu erreichen, sollte der Betriebspunkt gleichzeitig geringe Abgasemissionen aufweisen. Beim Bremsen kann zusätzlich Energie rekuperiert und ins System zurückgespeist werden. [9]

Trotz der Verluste durch die Speicherung und Umwandlung der Energie von der Verbrennungsmaschine bis zum Elektromotor können deutliche Verbrauchs- und somit auch CO<sub>2</sub>-Minderungen erreicht werden. Abhängig vom Fahrverhalten und der Auslegung der Betriebsstrategie ist eine Reduzierung von bis zu 35% möglich. [10]

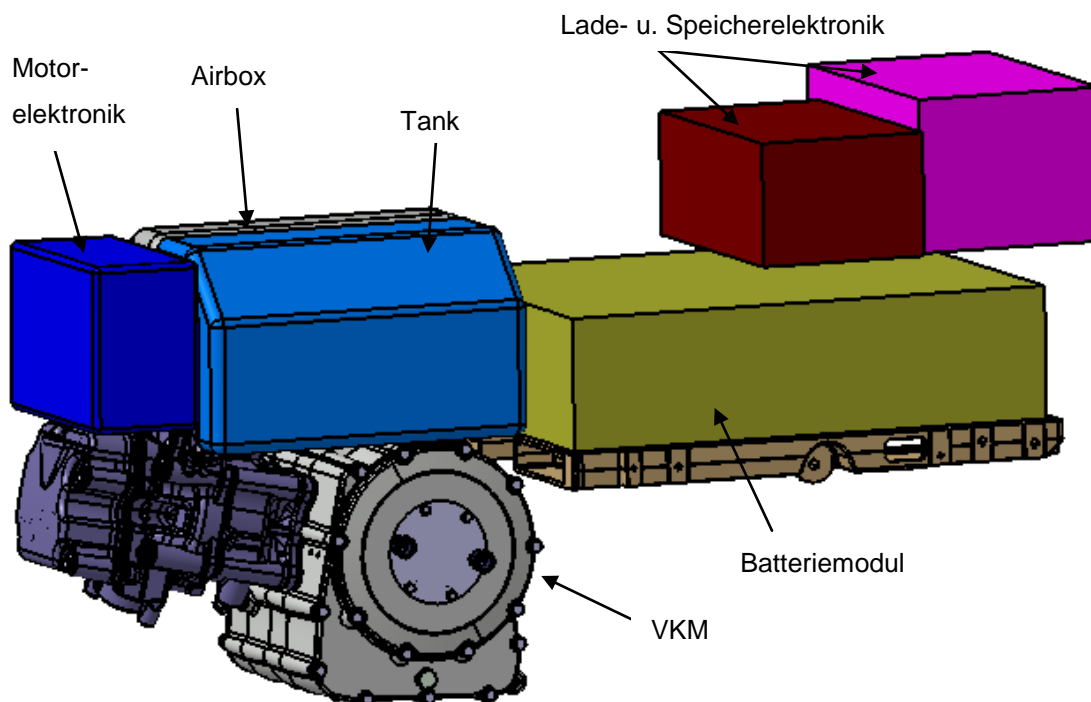
Um einen Konzeptentwurf für Rahmen und Batteriegehäuse gestalten zu können, müssen einige Vorgaben definiert werden. Dabei wird genauer auf das Packaging, die Übernahmeteile vom C-Evolution und die Integration im Montagewerk in Berlin eingegangen.

### 4.1 Packaging

Im Folgenden soll auf die Fahrzeugkomponenten und deren Anordnung im Fahrzeug eingegangen werden, die der Rahmen beziehungsweise das Batteriegehäuse aufnehmen muss.

Im Zentrum des Fahrzeuges befinden sich die Verbrennungskraftmaschine und der Energiespeicher. Beim Motor handelt es sich um einen 300 ccm Einzylinder-Viertaktmotor von KYMCO mit einem Gesamtgewicht von ca. 25,5 kg (Kurbelgehäuse,

Zylinder, Kurbeltrieb, Elektromaschine, Bauteile Ölkreislauf und Kühlkreislauf). Zylinder und Zylinderkopf der VKM werden bereits in Serie gefertigt und können somit kostengünstig für die Range-Extender-Einheit eingesetzt werden. Im Kurbelgehäuse befindet sich in einer Nebenkammer der Generator zur Erzeugung des elektrischen Stroms. Zusätzlich enthält das Package des VKM noch die Airbox, den Benzintank und die Motorsteuerung, die in der Abbildung 4 als Platzhalter dargestellt werden. Der erzeugte Strom wird im Zellmodul gespeichert, welches gegenüber dem C-Evolution einer Speicherkapazität von etwa einem Drittel hat. Trotz der Absenkung der Gesamtkapazität werden 36 Einzelzellen verwendet, um die gleiche Spannung zu erreichen um dadurch eine Übernahme der restlichen elektrischen Antriebskomponenten zu gewährleisten. Die ursprünglichen im C-Evolution verwendeten Zellen sollten durch Zellen kleinerer Kapazität aus dem BMW PKW Baukasten ersetzt werden. Deren geometrische Abmessungen fallen im Verhältnis zu Kapazität größer aus, so dass im Verhältnis zum C-Evolution mehr Bauraum zur Verfügung gestellt werden muss. Oberhalb des Speichers liegt wie beim reinen Elektroscooter die Lade- und Speicherelektronik.



**Abbildung 4 VKM im Package mit Hochvoltpeicher (BMW CAD Daten Juli 2014)**

Da es sich um ein Konzept für ein Erprobungsfahrzeug handelt, sollen möglichst viele Teile verwendet werden, die einfach zur Verfügung gestellt werden können. Deshalb

wurde für die erste Auslegung der Kühlluftschacht des C-Evolution verwendet, der in seiner Länge an das Konzept angepasst wurde.

### 4.2 Übernahmeteile

Das Produktionsvolumen ist im Vergleich zu den produzierten Stückzahlen eines PKWs relativ gering. Um trotzdem die Einmalkosten gering halten zu können, ist es von Interesse, bestimmte Bauteile entsprechend des Baukastenprinzips in andere Fahrzeuge zu übernehmen. In Anbetracht der Ähnlichkeit des Konzepts des seriellen Hybriden zu dem des rein elektrischen Scooters, bietet sich dies hier an den Antriebsstrang, das Fahrwerk, die Speicher- und die Regelelektronik zu übernehmen. Nachdem das HVS-Gehäuse mit dem VKM-Package das gleiche Abmaß und Anbindungspunkte wie der C-Evolution aufweisen soll, ist eine günstige Eingliederung in die Produktionsstraße im Werk Berlin gewährleistet. Neben den Elementen außerhalb des HVS-Gehäuses können weitere aus dem Innenleben, wie zum Beispiel Batteriezellen aus dem BMW Baukasten, die Lade- und Speicherelektronik aus dem Elektroscooter C-Evolution verwendet werden.

### 4.3 Montagegerechte Auslegung

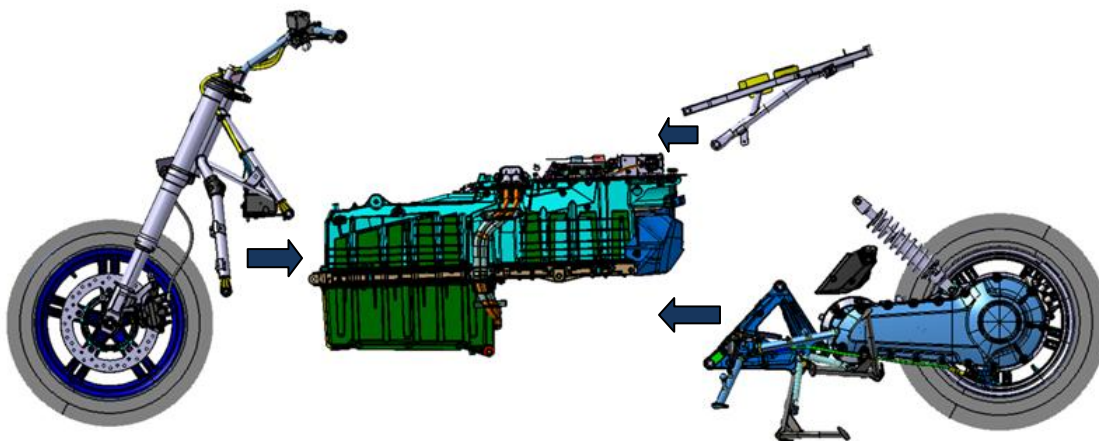


Abbildung 5 Montage C-Evolution (BMW CAD Daten Juli 2014)

Die Hochvolteinheit des C-Evolution wird als ein komplettes Bauteil in die Montagestraße in Berlin eingeführt. Diese fungiert dann als Kernstück, an welchem die zusätzlichen Bauteile verschraubt werden. In der Abbildung 5 ist zu sehen, dass eine

#### 4 Vorgaben für die Arbeit

---

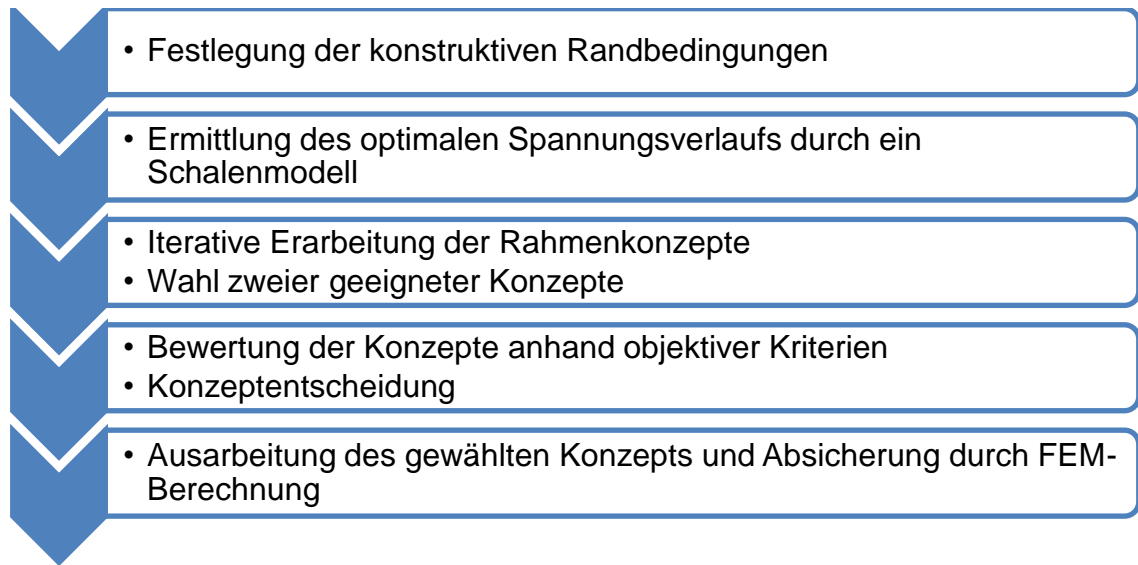
einfache Montage der Anbauteile, wie in diesem Fall der Vorder-, Zwischen- und Heckrahmen, möglich ist. Zur Senkung der Produktionskosten soll beim Hybrid der Hochvoltspeicher einschließlich des VKM-Packages in ähnlicher Weise als zentrales Element aufgebaut sein. So kann auf wesentliche Teile der Montagelinie zurückgegriffen werden. Aus den vorstehenden Anforderungen entstehen genaue Anforderungen an die Rahmenstruktur, welche eine Anbindung der Übernahmeteile gewährleisten muss. Es muss besondere Aufmerksamkeit auf das Packaging gelegt werden, da neben dem größer ausfallenden Zellmodul eine Verbrennungskraftmaschine mit Nebenaggregaten untergebracht werden muss. Da es sich beim Gegenstand dieser Arbeit um einen Konzepterprober handelt, müssen die Lösungen der Anbindung im ersten Ansatz zwar Serientauglichkeit aber keine Serienreife aufweisen.



## 5 Methoden

In dieser Arbeit wird zunächst ein Vergleich bestehender Konzepte und Recherchen zum allgemeinen Stand der Technik und innerhalb der BMW Group vorgenommen. Basierend auf dem Stand der Technik soll ein Konzept umgesetzt werden, dass die Anforderungen der Betriebs- (GS 97090) [8] und der Hochvoltsicherheit (GS 95023) [7] erfüllt. Anders als beim C-Evolution sollen die Rahmenkonstruktion und das HVS-Gehäuse in ihrer Struktur und Funktion voneinander getrennt werden. Um dies umzusetzen, werden die beiden Bereiche in der Arbeit getrennt voneinander betrachtet.

Zunächst werden beim Entstehungsprozess des Rahmens die strukturellen und funktionellen Anbindungspunkte betrachtet. Dabei handelt es sich um die Fahrwerkskomponenten, die von außen und die Zusatzkomponenten, wie Range-Extender, Hochvoltspeicher und Regelelektronik, die innerhalb des Rahmens angebunden werden (siehe Abbildung 4 und 5). Über eine Analyse des Kraftflusses der über das Fahrwerk eingetragenen Belastungen wird ein geometrisches Grundgerüst erstellt, welches als Basis für die weitere Konzeptbildung dient. Um eine gewisse Variation zu schaffen, werden unterschiedliche metallische Materialien als auch Faser-Kunststoff-Verbunde betrachtet und eine grobe Rahmenstruktur konstruiert, die sich an die jeweiligen Vorteile anpasst und orientiert. Abhängig von den Kriterien der Aufgabenstellung aus Kapitel 3 sollen die Entwürfe bewertet und auf dieser Basis eine Entscheidung getroffen werden. Der daraus entstehende Entwurf soll dann genauer ausgearbeitet werden und mit Hilfe eines FEM-Tools die Betriebsbelastungen analysiert werden. Dabei soll der Rahmen einer Extrembelastung ausgesetzt und auf die Festigkeit überprüft werden. Zusätzlich soll dieser mit dem tragenden Hochvoltspeichergehäuses des C-Evolution bezüglich Torsions- und Biegesteifigkeit verglichen werden. Die durchgeführten Konstruktionen werden mit CATIA V5 angefertigt und mit Hilfe des Tools Generative Structural Analysis (GSA) berechnet und verglichen.



**Abbildung 6 Vorgehensweise bei der Konzeptwahl und -ausarbeitung**

Beim Hochvoltsspeichergehäuse werden wie beim Rahmenkonzept zunächst die geometrischen Randbedingungen betrachtet. Priorität hat dabei die Unterbringung der Batteriemodule/-zellen und die dazugehörige Lade- und Speicherelektronik. Des Weiteren ist ein Anschluss der äußeren Schnittstellen, wie zur E-Maschine und dem Ladestecker zu gewährleisten. Basierend auf den geometrischen Randbedingungen wird ein Flächenmodell aufgebaut, das gleichzeitig die montagerelevanten Kriterien erfüllt. Da es sich hierbei um ein Hochvoltkonzept handelt, müssen gewisse Sicherheitskriterien erfüllt werden. Neben Betriebsfestigkeitsprüfungen unter unterschiedlichen Lastfällen muss das HVS-Gehäuse folgende Anforderungen erfüllen:

- Die elektrische Funktionalität des Speichers muss im Normalbetrieb immer gegeben sein.
- Isolation und Berührungsschutz müssen zu jedem Zeitpunkt bestehen.
- Es dürfen keine Risse, Verformungen oder Brüche in Bauteilen auftreten.
- Es muss eine permanente Dichtheit vorhanden sein.  
→ Ein Austreten von gefährlichen Medien oder Gasen ist zu keinem Zeitpunkt erlaubt.
- Es darf zu keinem Brand oder einer Explosion kommen.

Eine Festlegung der verwendeten Materialien wird unter Kosten- und Gewichtsaspekten bewertet und ein Vorschlag durch BMW abgegeben. Abschließend ist zu empfehlen, das Material durch einen Pendelschlagversuch nach SAE J1241 zu prüfen und freizugeben. [8]

## 6 Recherche in Bezug auf bestehende Konzeptlösungen

Die Recherche wurde in einem ersten Schritt im Hinblick auf Elektromotorräder durchgeführt. Weiters wurde speziell der PKW-Bereich in Bezug auf Elektromobilität innerhalb der BMW Gruppe recherchiert, um mögliche für dieses Konzept relevante Synergien zu erkennen. In der PKW-Branche spielen serielle Hybridfahrzeuge bereits seit längerer Zeit eine Rolle. Auf dem Motorradmarkt sind nur sehr wenige Hybridfahrzeuge zu finden, weshalb sich das Benchmark auf den Piaggio MP3 300 LT beschränkt, auch wenn dieser ein Parallelhybrid ist.

### 6.1 Benchmark Motorrad

Beim Piaggio MP3 300 LT Hybrid handelt es sich um einen Parallelhybriden. Diese Form wird auch als sogenannter Mischhybrid bezeichnet. Der Verbrennungsmotor und die E-Maschine können für dieses Zweirad vollständig voneinander entkoppelt werden. Dies ermöglicht es, rein elektrisch oder in Kombination mit der Verbrennungskraftmaschine zu fahren.

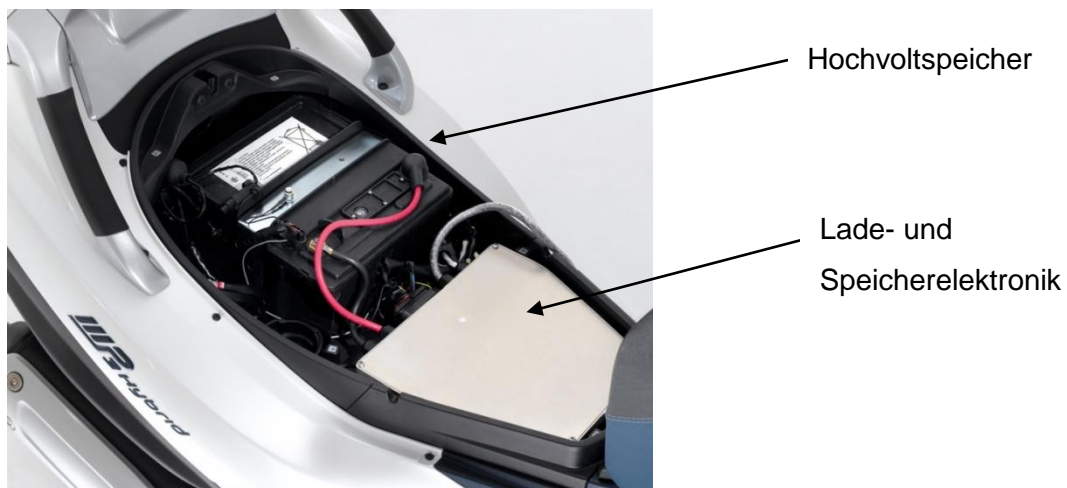


Abbildung 7 Piaggio MP3 300 LT Hybrid Hochvoltspeicher und -elektronik [11]

Die Speicherzellen einschließlich der Elektronik für den elektrischen Antrieb sind im Helmstiefen verstaut. Im Gegensatz zum C-Evolution wurden dabei die Gehäuse für die Batterie und die Elektronik separat verbaut. Das Batteriemodul aus Lithium-Ionenakkus entspricht mit einer Gesamtspannung von 37 V einem Niedervoltkonzept und hat eine

Speicherkapazität von 1,2 kWh. Das Gehäuse besteht aus einem Glasfaserspritzguss mit einem Faseranteil von 30 Prozent. Der Behälter für die Lade- und Speicherelektronik ist dagegen aus Aluminium gefertigt und besitzt zusätzlich Kühlrippen an der Unterseite, da die Ladeelektronik durch die Umwandlung von Wechsel- zu Gleichstrom während des Ladevorgangs die meiste Wärme abgibt. Aluminium eignet sich bei entsprechender konstruktiver Auslegung als Gehäuse für die Elektronik sehr gut, da es die elektromagnetische Strahlung komplett abschirmt. Der Gehäusedeckel ist an vier Punkten verschraubt, was eine geringe Dichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten zur Folge hat. Des Weiteren sich Lücken bilden, die ein Aus- oder Eintreten von elektromagnetischer Strahlung ermöglichen.

### **6.2 Stand der Technik bei BMW PKW**

Eine Verwendung von Hochvoltspeichern ist im Automobilbereich bereits deutlich verbreitet. Neben den Hybridfahrzeugen setzt die BMW Group mit dem Projekt i durch den i3 und i8 deutlich auf die Elektrifizierung des Antriebsstranges. Dabei liegt neben den Antriebskomponenten ein Hauptaugenmerk auf die Reduzierung des Gesamtfahrzeuggewichts zur Kompensation der zusätzlichen Masse der Batterien.

Um möglichst viel Gewicht zu sparen, wird im PKW Bereich dabei die Funktion und Struktur nicht getrennt und das HVS-Gehäuse als tragendes Element integriert. Als Leitmaterial wird gegenwärtig auf Aluminium im Druckgussverfahren gesetzt. Aluminiumgehäuse erfüllen die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit, da es sich um ein elektrisch leitendes Material handelt. Zusätzlich ist eine Wärmeabfuhr leicht zu realisieren.

**Tabelle 1 Stand der Technik: HVS-Gehäuse bei BMW PKW [7]**

Modell	I3	I8	Mini, 1er, 2er	3er, 5er,7er
<b>Serie</b>				
<b>Material</b>	Alu	Alu + PP DLFT	Alu	Alu
<b>Fertigung</b>	Druckguss	Druckguss	Druckguss	Druckguss
<b>Vorentwicklung</b>				
<b>Material</b>	-	-	Hybrid: <ul style="list-style-type: none"> <li>• GFK + TP</li> <li>• Aluprofil + TP</li> <li>• Stahlblech + TP</li> </ul>	Vollkunststoff TP PA UD- Verstärkung
<b>Fertigung</b>	-	-	-	Spritzguss

Trotz der positiven Eigenschaften von Aluminium in der Serie ist es von Interesse, die Bauteile in den Folgemodellen durch Faserkunststoffverbunde zu ersetzen. Durch eine deutlich niedrigere Dichte ist das Leichtbaupotential dieses Werkstoffs sehr hoch. Das Diagramm zeigt, dass für den Einstieg dabei in der Vorentwicklung Fahrzeugmodelle verwendet werden, bei denen das Bauteil von der tragenden Struktur entkoppelt ist. In den Modellreihen 3er, 5er und 7er ist der HVS-Behälter unter der hinteren Sitzbank positioniert und wird als Glasfaserspritzguss mit UD-Tapes als Verstärkung angedacht. Damit lässt sich ein günstiges Fertigungsverfahren mit einer gezielten Verstärkung der Bauteile realisieren. Die Untersuchung der Bauteile aus dem PKW Bereich ergibt, dass sich die Produktionsverfahren im Gegensatz zur Motorradsparte deutlich unterscheiden müssen, da sich viele Fertigungsmöglichkeiten durch die hohen Werkzeugkosten erst bei hohen Stückzahlen eignen. [12]

Als Alternative wird bei Mini, 1er und 2er an Hybridkonzepten gearbeitet bei denen Bereiche mit hohen Festigkeitsanforderungen mit Alu- oder Stahlprofilen ausgeführt, die dann mit Faserkunststoffverbunden umspritzt werden. [12]

Ein ähnliches Prinzip wird am Fraunhofer Institut für chemische Technologie ICT angewendet. Dabei werden Anbindungspunkte und hoch beanspruchte Teile durch metallische Werkstoffe ersetzt. Das Bauteil besteht aus Glasfaserstrukturen, die dann

## 6 Recherche in Bezug auf bestehende Konzeptlösungen

---

mit vorgefertigten metallischen Einlegern aus Kostengründen in einem Prozessschritt zusammengefügt und gepresst werden. Bei dem Prototyp handelt es sich um einen Artega GT Fahrzeug, der zu einem Elektrofahrzeug umgebaut wurde. Das Gehäuse wiegt dabei nur 35 kg bei einer Masse der Batterien von 340 kg. Herkömmliche Stahllösungen wiegen dabei bis zu 25 % mehr. [13]

Neben der praktischen Lösung durch Aluminiumkonstruktionen ist somit eine klare Entscheidung für FKV in der Entwicklung von nichttragenden Hochvoltspeicherkonzepten im PKW-Bereich zu erkennen.

## 7 Auslegung der Rahmenstruktur

Bei der Auslegung der Rahmenstruktur wird die in Kapitel 5 beschriebene Methodik verwendet. Die Durchführung der Vorgehensweise soll nun detailliert ausgearbeitet werden.

### 7.1 Konstruktive Randbedingungen für die Rahmenstruktur

Der Rahmen bildet das Skelett des Fahrzeuges ab und muss sich somit an die Übernahmeteile und daraus folgend den Anbindungspunkten vom Fahrwerk, Antrieb und der Karosserie anpassen (siehe Abbildung 8). Dabei müssen häufig Kompromisse gemacht werden, die von der idealen Kraftübertragung abweichen. Im Folgenden sollen die Anforderungen durch die Verwendung der in Kapitel 4.2 dargestellten Übernahmeteile und der Komponenten innerhalb des Rahmens erörtert werden.

#### 7.1.1 Anbindung der Fahrwerkskomponenten

Das Konzept des seriellen Hybriden soll auf dem in Kapitel 2 erwähnten rein elektrischen Scooter aufbauen.

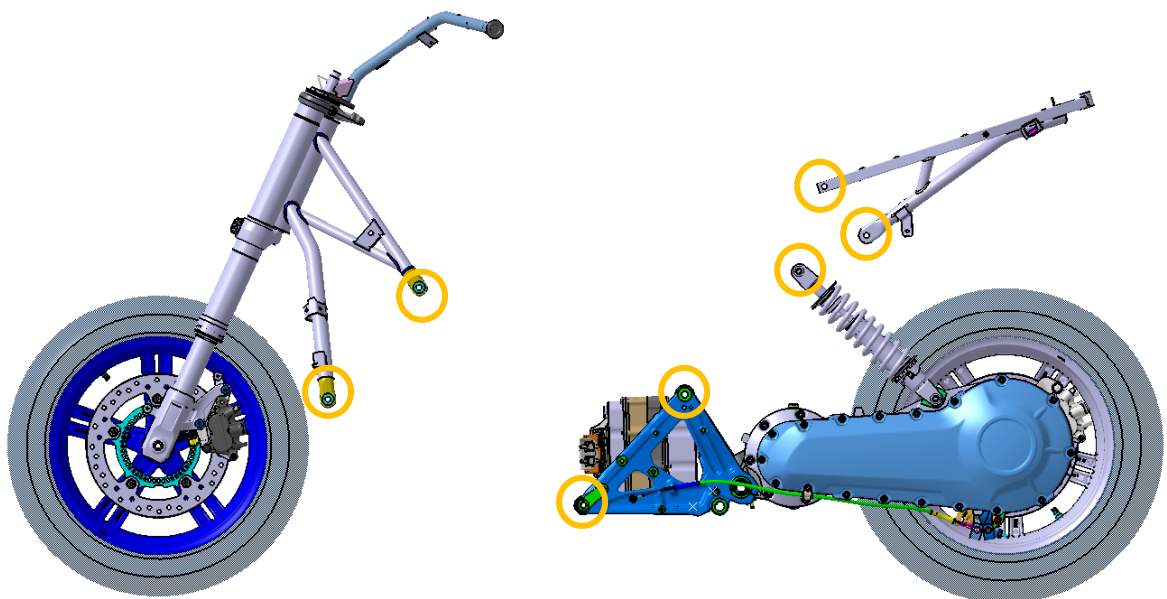
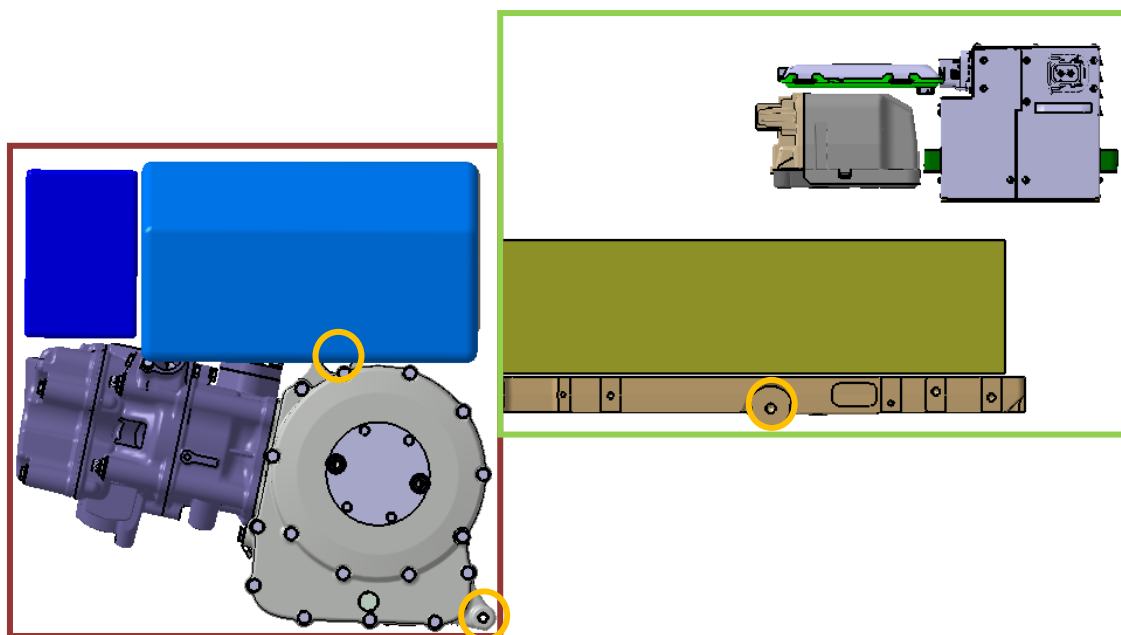


Abbildung 8 Anbauteile aus dem C-Evolution (BMW CAD Daten Juli 2014)

Daraus entstehen Fixpunkte am Federbein, Vorder-, Zwischen- und Heckrahmen, die als feste Randbedingung in die Konstruktion einfließen. Der Zwischenrahmen bleibt aus Montagegründen gleich. Er umschließt die Regelelektronik, die für den dahinterliegenden Elektromotor zuständig ist. Gleichzeitig verknüpft er den Rahmen mit der Schwinge, welche zusätzlich über das Federbein die Radkräfte überträgt.

### 7.1.2 Integration der Zusatzkomponenten

Bei der Integration der Antriebs- und Speicherkomponenten wird zwischen zwei Bereichen unterschieden. Die Aggregate und Zusatzkomponenten der VKM sind durch den roten Bereich markiert. Innerhalb des grünen Bereichs befinden sich die grundlegenden Bauteile des HochvoltSpeichers. Für die Integration des Verbrennungsmotors ist eine simple Anbindung an den Rahmen ausreichend. Er muss nicht gegenüber Umwelteinflüssen abgedichtet sein. Somit kann der Fokus auf den Bauraum gelegt werden.



**Abbildung 9 Package VKM und Hochvoltkomponenten mit den bestehenden Anschraubpunkten (BMW CAD Daten Juli 2014)**

Die Anbindung des Motors kann über die in der Abbildung 9 orangefarben gekennzeichneten Anschraubpunkte erfolgen. Für die Airbox und den Tank gibt es noch kein 3D-Modell, weshalb diese als Platzhalter dargestellt sind und noch geometrische Anpassungen möglich sind. Das zu entwickelnde Speichermodul besteht aus den Zellen aus dem PKW Baukasten, welche auch im i8 wiederzufinden sind. Da diese einen anderen Formfaktor aufweisen als beim C-Evolution, muss der Bauraum



dafür um ca. 30 mm breiter ausgelegt werden. Die restlichen Antriebs- und Fahrwerkskomponenten sind Gleichteile aus dem Elektroscooter.

### 7.1.3 Belastungsanforderungen

Bei der mechanischen Auslegung des Rahmens sind einige Anforderungen zu beachten. Der Rahmen muss die Radaufhängung verbinden, die eingeleiteten Betriebskräfte übertragen, das erforderliche Crashverhalten gewährleisten und die Aufnahme vom Motor, Antriebsstrang und die restlichen Komponenten ermöglichen. Im gleichen Zuge muss er Belastungen aus den Radkräften (Umfangskräfte, Querkräfte, dynamische Radlasten), inneren Kräften, Momenten, und Trägheitskräften ertragen können. Primär soll bei der Materialwahl und der Dimensionierung der Rahmenelemente auf die maximalen Belastungen geachtet und die Komponenten auf eine ausreichende Sicherheit ausgelegt werden. Die Torsions- und Biegesteifigkeit haben einen direkten Einfluss auf die Fahrdynamik. Ein Vergleich mit und eine Anpassung an die Werte des C-Evolution sind dabei anzustreben. [14]

## 7.2 Bewertungskriterien des Rahmenkonzepts

Um im weiteren Verlauf eine objektive Entscheidung für das geeignete Konzept treffen zu können, müssen die Bewertungskriterien festgelegt werden. Diese teilen sich in drei Gruppen auf. Bei der Betrachtung der Kosten werden neben der Fertigung auch die Einmalkosten bewertet. Fixbeträge sollten möglichst gering gehalten werden, da es sich bei der Herstellung des Prototypens nur um eine geringe Anzahl an Fahrzeugen handelt. Primär ist eine Auslegung auf Dauerfestigkeit des Rahmens anzustreben. Die Fahreigenschaften sollten dabei jedoch nicht außer Acht gelassen werden. Ziel bei der Gestaltung einer Rahmenstruktur ist dabei in der Motorradentwicklung eine hohe Steifigkeit bei möglichst geringem Gewicht darzustellen. Diese wirkt sich bedeutend auf die Fahrdynamik aus, da gewünscht wird, dass die ausgelegte Radstellung eingehalten wird. [14] Das Wichtigste und dadurch am höchsten gewichtete Kriterium der Bewertung ist die Integration der Komponenten und die Anbindung der Fahrwerkskomponenten. Die Integration gilt als Pflichtkriterium, wodurch die Komplexität der Einbindung bewertet wird.

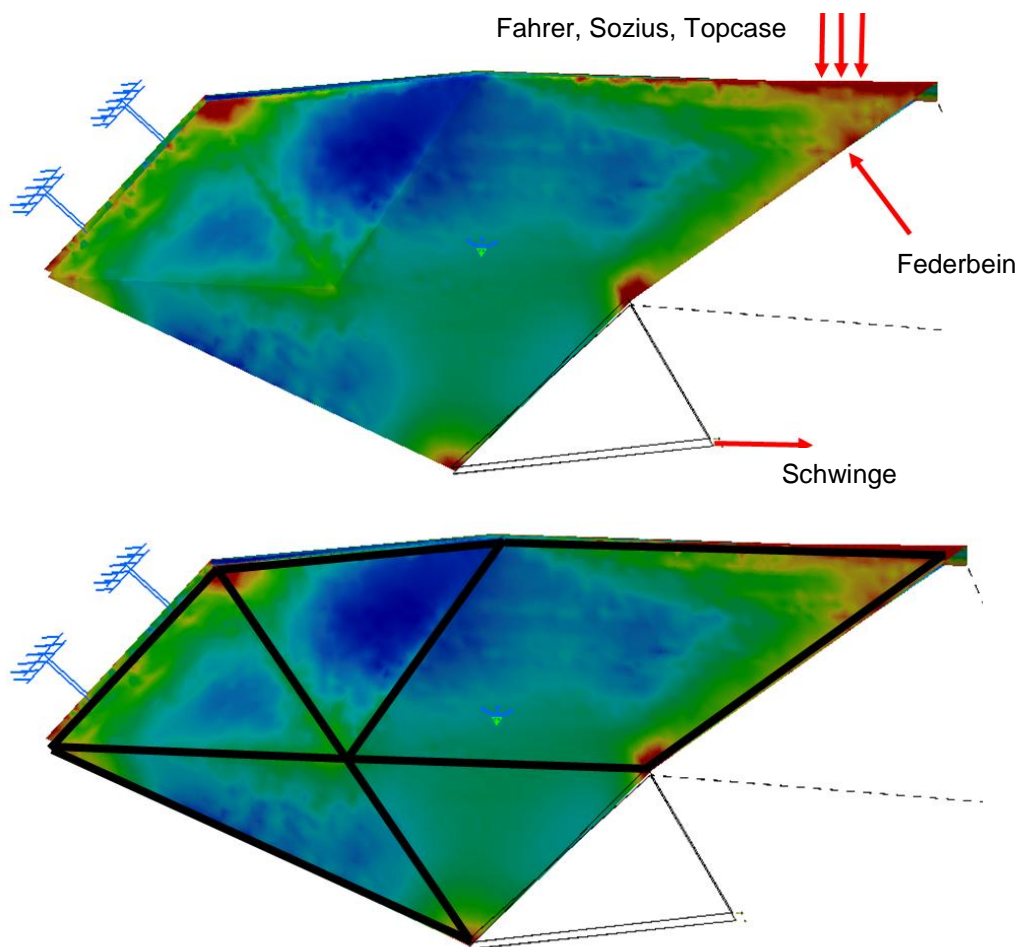
Da es sich in dieser Arbeit um ein virtuelles Fahrzeugkonzept handelt, werden manche Anforderungen wie Crashverhalten nicht überprüft.

## **7.3 Rahmenkonzepte**

Im folgenden Kapitel sollen unterschiedliche Rahmenkonzepte untersucht werden, die für einen Konzepterprober in Frage kommen. Dafür soll zuerst eine Grundform des Rahmens basierend auf dem Kraftfluss erstellt werden. Im Weiteren werden Rahmenarten auf der Grundgeometrie erstellt und verglichen.

### **7.3.1 Ableitung der Rahmengrundstruktur basierend auf dem Kraftfluss**

Um einen grundsätzlichen Rahmenverlauf zu erhalten, soll der Kraftfluss anhand eines Lastfalls analysiert werden. Dabei wird der Hauptrahmen an den Anbindungspunkten für den Vorderrahmen fest eingespannt. Das Hinterrad erfährt eine Bewegung in z-Richtung durch eine Bodenwelle. Die einzuleitende Federbeinkraft stellt dabei das Erreichen des maximalen Federwegs dar. Die resultierende Kraft wird mit 6623 N dargestellt. Die Kräfte auf die Sitzfläche entstehen durch die Trägheit der Massen des Fahrers, des Sozius und des Topcase. Diese werden in Summe mit einer Belastung von 7100 N angenommen. Der Zwischenrahmen wird als starr angenommen und überträgt die Kraft der Motorradschwinge. Das Ersatzmodell für den Rahmen selber wird als Schale dargestellt. Darin sollen die Hauptkraftpfade durch eine Auswertung der Spannungen sichtbar gemacht werden, um so Hinweise für die optimale Rahmenkonstruktion zu erlangen. Die Berechnung wird mit dem FEM Tool „Generative Structural Analysis“ mit CATIA V5 durchgeführt.



**Abbildung 10 Darstellung des Kraftflusses der Rahmenstruktur des Hybridkonzeptes als Schalenmodell**

Im oberen Bild wird die Spannungsverteilung des Berechnungsergebnisses dargestellt. Die Pfeile symbolisieren die einwirkenden Kräfte durch das Federbein, die Schwinge und die Sitzfläche. Die hohen Spannungen an den Kraftangriffspunkten und der Einspannung sollen dabei keine Beachtung finden. Betrachtet man den Verlauf der Spannung, kann auf eine Grundgeometrie der Rahmenstruktur geschlossen werden. Diese wird im unteren Teil des Bildes durch die schwarz hinterlegten Linien dargestellt. Aus dieser Darstellung kristallisieren sich zwei potentielle Rahmenkonzepte heraus.

- A) Faserkunststoffverbunde bieten die Möglichkeit einen Rahmen ähnlich zum Schalenmodell in Form eines Monocoques aufzubauen. Die Hauptpfade können dabei individuell verstärkt werden.
- B) Alternativ dazu ist die Konstruktion eines Gitterrohrrahmens eine gängigere Lösung für Motorräder. Der Rohrverlauf soll dabei an die Hauptkraftpfade des Berechnungsergebnisses des Schalenmodells angepasst werden.

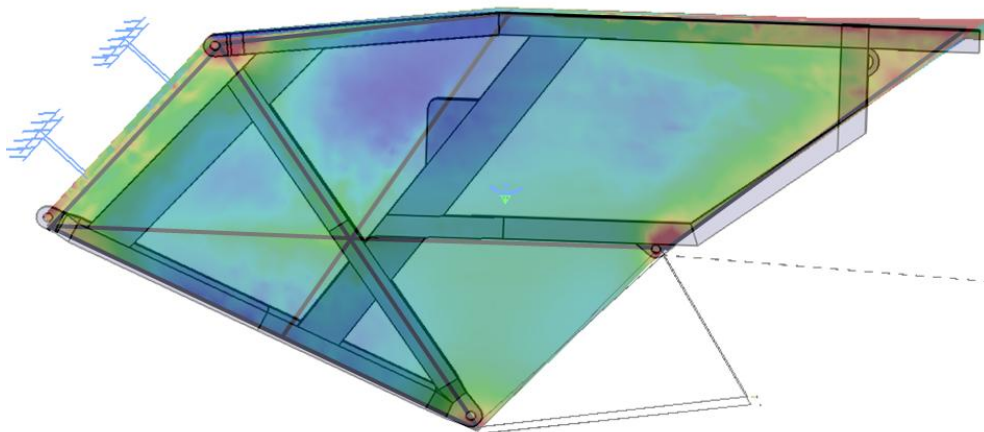
Die beiden Konzepte sollen im Weiteren untersucht und bewertet werden.

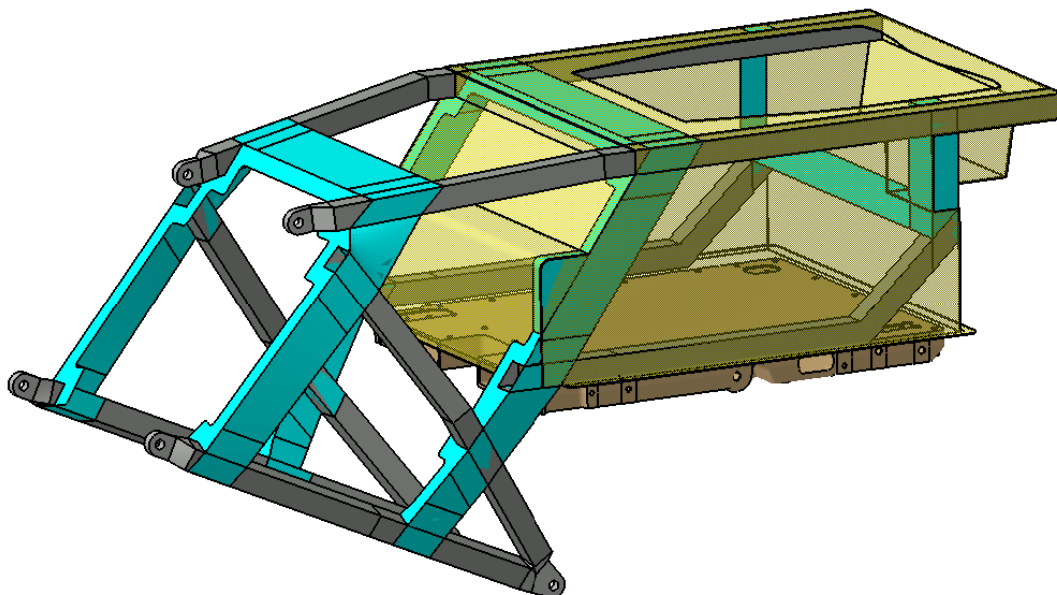
### 7.3.2 Rahmen aus Faserkunststoffverbund

Es wurden verschiedene Entwürfe für CFK-Rahmen abgeleitet und speziell im Hinblick auf die Fertigung und Konstruktionsrandbedingungen angepasst. Nachfolgend wird nur das am besten geeignete Konzept aus diesem Prozess dargestellt und beschrieben.

Bei der Konzeptionierung einer Rahmenstruktur kommen unterschiedliche Formen und Materialien in Frage. Eine dieser Möglichkeiten ist die Konstruktion und Fertigung einer Tragstruktur aus Faserkunststoffverbunden nach dem Prinzip eines Monocoques. Diese Bauweise hat ein hohes Gewichtseinsparungspotential bei gleichzeitig hohem Grad an Integrationsmöglichkeiten von Komponenten und Anbindungspunkten. Dabei können Materialdicken und –arten über das Bauteil variieren und eine topologisch optimale Struktur erstellt werden. Die Rahmenstruktur kann somit teils offen, aber auch geschlossen dargestellt werden. Schematisch besteht das Konzept aus einer Schale, die durch unterschiedliche Versteifungen verstärkt werden kann. Diese bieten sich an Kräfteinleitungspunkten an, die hohen Belastungen ausgesetzt werden.

Neben den vielen Vorteilen bringt die Bauart auch einige Nachteile mit sich. Angesichts der Komplexität kommen nur wenige Fertigungsverfahren in Frage, die sich deutlich in ihren möglichen Stückzahlen und den einsetzbaren Materialien unterscheiden. Des Weiteren sind Schäden in der Struktur nur schwer zu erkennen und lassen sich nur aufwändig reparieren. Das Konzept muss sorgfältig geplant werden, da sich Anschraubpunkte im späteren Status nur noch schwer umsetzen lassen. [14]





**Abbildung 11 Rahmenkonzept aus Faserkunststoffverbunden**

Der obere Teil der Abbildung zeigt das Seitenprofil des Rahmenkonzeptes. Das dargestellte Konzept zeigt eine Rahmenkonstruktion entsprechend dem Kraftverlauf aus dem Schalenmodell. Die Kraftverläufe wurden dabei durch Hohlprofile verstärkt. Sie bestehen aufgrund der Steifigkeitsanforderungen aus CFK-Flechtlingen und sind in einer industriellen Fertigung erzeugbar. Durch die Verwendung von Kernen können Preforms mit starken Krümmungen und Profiländerungen realisiert werden. In Bezug auf die Kosten zeichnet sich dieses Verfahren durch einen sehr geringen Materialverschnitt aus. Werden keine Kerne zur Formgebung verwendet, müssen diese durch die Verwendung von Luftschläuchen beim Herstellungsprozess des Bauteiles nachgestellt werden. In Frage kommt dabei das Schlauchblas-RTM Verfahren.[15]

Die blau eingefärbten Flächen im unteren Teil der Abbildung stellen Bulkheads dar. Sie ermöglichen eine Verbindung der geflochtenen Streben. Gleichzeitig wird die Konstruktion dadurch steifer bei Torsionsbeanspruchung. Im dargestellten Konzept liefern sie eine Verstärkung gegenüber den Anbindungspunkten des Vorder- und Zwischenrahmens und dem im hinteren Bereich liegenden Federbeins. Mittels einer leichten Schräglage die Torsionssteifigkeit verbessert werden, deren Achse im Berechnungsmodell im Kapitel 7.6.3 leicht schräg vom Vorderrahmen hinunter zum Zwischenrahmen verläuft. Kommt es zur Torsion, werden die CFK-Streben nach außen gedrückt, was durch die Verwendung von Bulkheads vermindert wird.

Die Verbindungsstreben, in diesem Fall durch CFK-Flechtlinge und Bulkheads dargestellt, lassen sich abhängig von den Karosserieanbindungspunkten und der

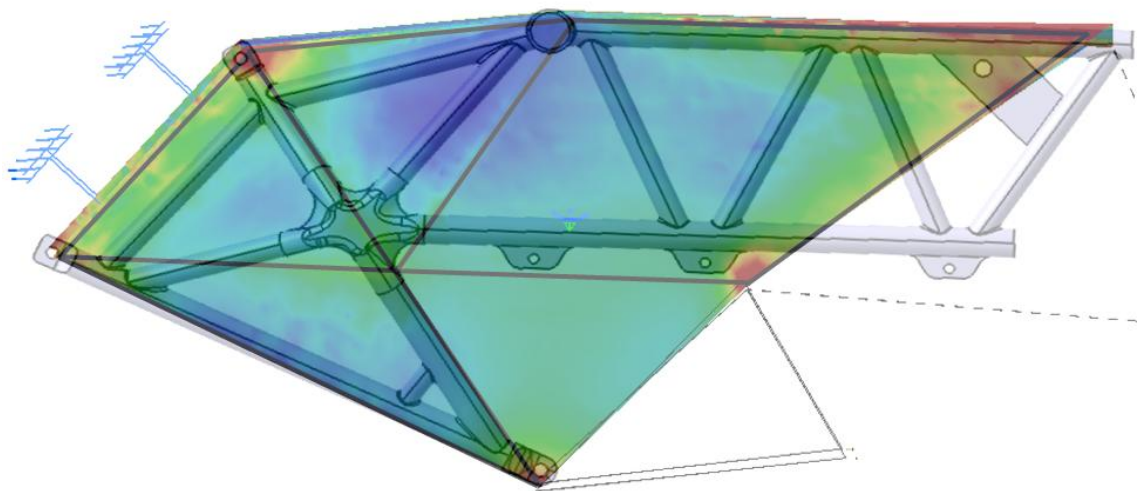
geforderten Steifigkeit geöffnet oder geschlossen realisieren. Eine Schließung der Flächen bietet einige Vorteile. Führen mehrere Verstärkungen zu einem spitzen Winkel zusammen, entstehen hohe Spannungen. Diese können durch eine flächige Verbindung der Streben entlastet werden. Gleichzeitig können Anbindungspunkte für Karosserieteile innerhalb der Bereiche frei gewählt und unkompliziert positioniert werden. Da bei diesem Konzept die angrenzenden Bauteile noch nicht betrachtet werden, finden diese keine Beachtung. Im hinteren Bereich des Rahmens befindet sich der Hochvoltspeicher. Werden die Bulkheads geometrisch angepasst, kann das HVS-Gehäuse (in der Abbildung 11 gelb dargestellt) in die Rahmenstruktur integriert werden. Die Gehäusewände werden in Form von Lagen über die Struktur gewickelt und im gleichen Produktionsschritt gefertigt. Aufgrund der Gestaltungsfreiheit bei Monocoquebauweisen, kann sich das Material bedingt vom Rest der Struktur unterscheiden und angepasst an die Anforderungen eines HVS-Gehäuses separat ausgelegt werden.

Beim CFK besteht die verstärkende Faser aus Kohlenstoff, die durch eine Matrix umhüllt wird. Idealerweise liegt dadurch keine Faser an der Außenfläche. In der Realität sieht es jedoch anders aus, weshalb der Kohlenstoff als leitender Werkstoff korrosionsgefährdet ist. Die Kontaktkorrosion tritt dabei am häufigsten auf. Um korrosionsbedingte Schäden zu vermeiden, muss dies bei der Konstruktion und Auslegung der Anbindungen beachtet werden. In diesem Konzept betrifft dies den Vorder- und Zwischenrahmen aus Stahl, das Federbein und die Kühlplatte aus Aluminium. Im Allgemeinen sollte bei der Konstruktion darauf geachtet werden, dass keine offenen Faserenden im Kontakt mit metallischen Bauteilen stehen. Bei der Integration von Inserts sollten die Elemente aus Edelstahl ausgeführt und vollständig vom Harz umschlossen werden. [16]

### 7.3.3 Gitterrohrrahmen

Der Gitterrohrrahmen besteht grundsätzlich aus Rohrprofilen, die zu einem Fachwerk angeordnet sind. Durch eine Anordnung der Stabelemente entsprechend des Kraftflusses kann eine deutliche Reduzierung des Gewichts ermöglicht werden und stellt gleichzeitig eine kostengünstigere Alternative zum CFK-Rahmen dar. Da es sich bei dieser Arbeit um einen Konzepterprober handelt, gilt es, die Werkzeugkosten so gering zu halten und auf aufwendige Gieß- oder Pressformen zu verzichten. Durch Gitterrohre können die Fixkosten minimiert werden. Im Gegensatz zur Serienentwicklung spielen die variablen Kosten der Fertigung bei der geringen

Stückzahl eine untergeordnete Rolle. Idealerweise werden in den Rohren gleich wie beim CFK-Rahmen nur Zug- oder Druckkräfte übertragen. Da die Rohre nicht gelenkig, sondern starr über Schweißverbindungen gekoppelt sind, lassen sich auch Momente und Querkräfte übertragen. Um trotzdem eine Annäherung an den Idealzustand zu erreichen, müssen folgende Faktoren beachtet werden. Kräfte sollten möglichst immer an Knotenpunkten eingeleitet werden, welche immer aus mindestens drei Stäben bestehen. Somit sollte darauf geachtet werden, dass die Rohre in Dreiecksanordnung dargestellt werden. Die Form eines Parallelogramms sollte aufgrund der statischen Unbestimmtheit vermieden und durch Diagonalstreben verändert werden. [14]

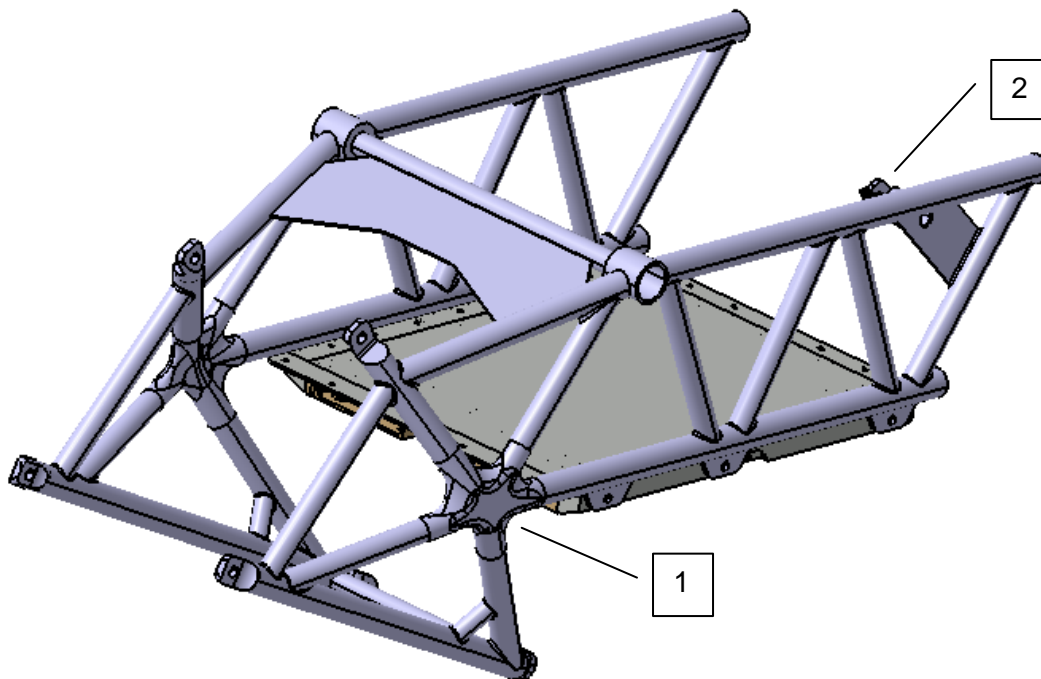


**Abbildung 12 Ausrichtung der Gitterrohre anhand der Berechnung des Kraftflusses**

Die Ausgangsbasis für die Konstruktion liefert ein Grundgerüst aus Dreiecken, entsprechend des zuvor berechneten Kraftflusses. Dieses wurde durch die Anbindungspunkte am Vorder-, Zwischenrahmen und dem Federbein gegeben. Eine Abweichung des Rahmenverlaufs von dem des Kraftflusses liegt in den nötigen Anbindungspunkten des Kühlluftschachtes und des Motors begründet.

Wie beim CFK-Rahmen wurden zu Konzeptbeginn verschiedene Entwürfe für Gitterrohrrahmen abgeleitet und speziell im Hinblick auf die Fertigung und Konstruktionsrandbedingungen bewertet. Nachfolgend wird auch hier nur das am besten geeignete Konzept aus diesem Prozess dargestellt und beschrieben.





**Abbildung 13 Grundgeometrie des Gitterrohrrahmens**

Die Anordnung der Streben in Dreiecken erfordert, dass die Rohre direkt aufeinander treffen. Dies erschwert jedoch den Schweißprozess. Um trotzdem eine geeignete Lösung zu finden, wurden die aufeinander treffenden Rohre um einen kleinen Abstand versetzt, damit sich die Schweißnähte nicht überschneiden. Sollte eine deutlich größere Anzahl an Streben aufeinander treffen, lässt sich das Problem nicht mehr so einfach lösen. In diesem Fall kommen Frästeile in Frage, auf die die Rohre aufgesteckt werden (Abbildung 13, Punkt 1). Das Federbein wird beim C-Evolution am Hochvoltspeichergehäuse angebunden und liegt somit relativ weit vom Rand des Rahmens entfernt. Eine Änderung der Position des Federbeins kommt für den Konzepterprober nicht in Frage, wodurch der Rahmen angepasst werden muss. Eine Lösung für dieses Problem ist eine Stahlplatte, die zwischen den beiden Gitterrohren verschweißt wird (Abbildung 13, Punkt 2). Die Federbeinaufnahme kann nun in y-Richtung angeschraubt werden. Der hintere Teil des Rahmens neben dem HVS-Gehäuse spannt eine große Fläche auf. In diesem Bereich muss die Dreiecksfläche verkleinert werden, um die Verformung zu reduzieren. Dabei wird eine große Diagonalstrebe durch mehrere kürzere Rohre ersetzt, die nach einem leiterähnlichen Prinzip nach hinten verlaufen. Die Anbindungspunkte des Vorder- und Zwischenrahmens werden durch Frästeile realisiert, die auf die Rohrenden aufgesteckt und verschweißt werden. Fallen zwei Rohre in einem sehr spitzen Winkel zusammen, können in der Schweißnaht sehr hohe Spannungen auftreten. Um dies zu vermeiden,



können kleine Rohrstücke oder Bleche vor der Kerbe angebracht werden. Gleichzeitig ermöglicht dies eine Erhöhung der Steifigkeit.

### 7.4 Konzeptentscheidung Rahmen

Um eine Entscheidung für die Rahmenart zu treffen, müssen die Konzepte anhand der zuvor in Kapitel 7.2 definierten Kriterien bewertet werden.

Allgemein können die Bewertungskriterien in drei Untergruppen untergliedert werden. Dabei bilden die Kosten, Fahreigenschaften und die Systemintegration die grundlegenden Randbedingungen.

#### **Kosten:**

Da es sich bei dem Konzept nur um vereinzelte Prototypen in einer geringen Stückzahl handelt, muss auf aufwändige Herstellverfahren, wie Gussteile oder Pressteile aufgrund hoher Werkzeugkosten verzichtet werden. Diese können durch Frästeile oder durch Verfahren wie Rapid Prototyping ersetzt und mit ähnlichen Eigenschaften dargestellt werden. Dadurch können die Einmalkosten beim Gitterrohrrahmen niedrig gehalten werden. Die variablen Kosten werden dabei geringer gewertet. Die Werkzeugkosten für den CFK-Rahmen sind aufgrund aufwändiger Fräsformen sehr kostenintensiv. Auch die weiteren Fertigungsschritte können nur in einem geringen Grad automatisiert verlaufen. Dadurch stellt der Gitterrohrrahmen für einen Konzepterprober eine deutlich günstigere Alternative zum CFK-Rahmen dar.

#### **Fahreigenschaften:**

Die Fahreigenschaften hängen stark vom Gesamtfahrzeuggewicht, der Torsions- und Biegesteifigkeit ab. Die Rahmenkonstruktion nimmt dabei in beiden Bereichen einen deutlichen Einfluss. Bei der Gegenüberstellung der beiden Konzepte zeigt der CFK-Rahmen deutliche Vorteile gegenüber dem Gitterrohrrahmen. Durch die guten Materialeigenschaften des CFK lässt sich eine leichte Tragstruktur umsetzen. Die flächige Außenhaut der Struktur verspricht aus Erfahrung dabei gute Werte bezüglich der Steifigkeit. Dies hat besondere Vorteile, da die Komponenten innerhalb der Struktur durch den kompakten Bauraum nur schwer versteift werden können. Beim Gitterrohrrahmen sind deshalb durch die fehlenden Diagonalstreben zwischen den Rahmenseiten geringere Biege- und Torsionssteifigkeiten zu erwarten. Bei der

Erprobung des Prototypens liegt das Hauptaugenmerk auf der Funktionsbewertung des Antriebskonzeptes, wodurch die Gewichtung der Fahreigenschaften geringer eingestuft wird.

**Systemintegration:**

Die Integration der Komponenten der Verbrennungskraftmaschine und des Hochvoltspeichergehäuse ist eine Vorgabe, die eingehalten werden muss. Die Gewichtung der Komplexität der Umsetzung wird somit als hoch eingestuft. Dabei bieten beide Konzepte Vor- und Nachteile. Beim Gitterrohrrahmen sollen die Streben möglichst gerade verlaufen. Dies kann Probleme bei der Anpassung an das Package geben. Demgegenüber steht jedoch die einfache Anbindung der Komponenten. Diese können durch angeschweißte Laschen gut umgesetzt werden. Der CFK-Rahmen punktet im Gegenzug durch die hohe Formfreiheit. Anders als beim Gitterrohrrahmen kann ein gekrümmter Verlauf bei Flechtlingen einfacher umgesetzt werden. Die Struktur kann somit sehr gut an die Geometrie der innenliegenden Komponenten angepasst werden. Die flächige Verbindung der Streben stützt dabei den Rahmen gegenüber Belastungen. Die Problematik entsteht jedoch bei der Anbindung mit metallischen Anbauteilen, da es durch die hohe Potentialdifferenz des Kohlenstoffs in den Fasern mit Aluminium oder Stahl zu Kontaktkorrosion kommt. Bei der Verarbeitung von CFK-Bauteilen muss dies eine besondere Beachtung finden. [16]

**Tabelle 2 Bewertung der Rahmenarten für einen Konzepterprober**

		Gewichtung	Gitterrohrrahmen		CFK-Monocoque	
			Bewertung	Ergebnis	Bewertung	Ergebnis
<b>Kosten</b>	Werkzeugkosten	4	5	20	2	8
	Fertigungskosten	1	4	4	1	1
<b>Fahreigenschaften</b>	Gewicht	2	3	6	5	10
	Steifigkeit	2	3	6	5	10
<b>Systemintegration</b>	Anbindung Übernahmeteile	3	4	12	3	9
	Integration Package	5	4	20	4	20
<b>Gesamtbewertung</b>				68		58

In der Tabelle 2 wurden die Kriterien vorerst mit einer Skala von 1 für unwichtig bis 5 für wichtig gewichtet. Der Gitterrohr- und der CFK-Rahmen wurden dann abhängig von den einzelnen Unterpunkten bemessen und mit einer Note von 1 für negativ bis 5 für positiv bewertet.

### **7.5 Konstruktion des finalen Rahmenkonzepts**

Die Bewertungsmatrix hat den Gitterrohrrahmen als zu favorisierendes Konzept für den betrachteten Konzepterprober ergeben. Der Entwurf soll nun genauer ausgearbeitet werden. Dafür werden unterschiedliche Gesichtspunkte, wie die Werkstoffwahl und die Entscheidung bezüglich der Rohrprofilform getroffen. Das Material hat einen erheblichen Einfluss auf die mögliche Formgebung und wird somit an erste Stelle gestellt. Die Bewertung der Rohrprofile soll abhängig von den auftretenden Lasten durchgeführt werden.

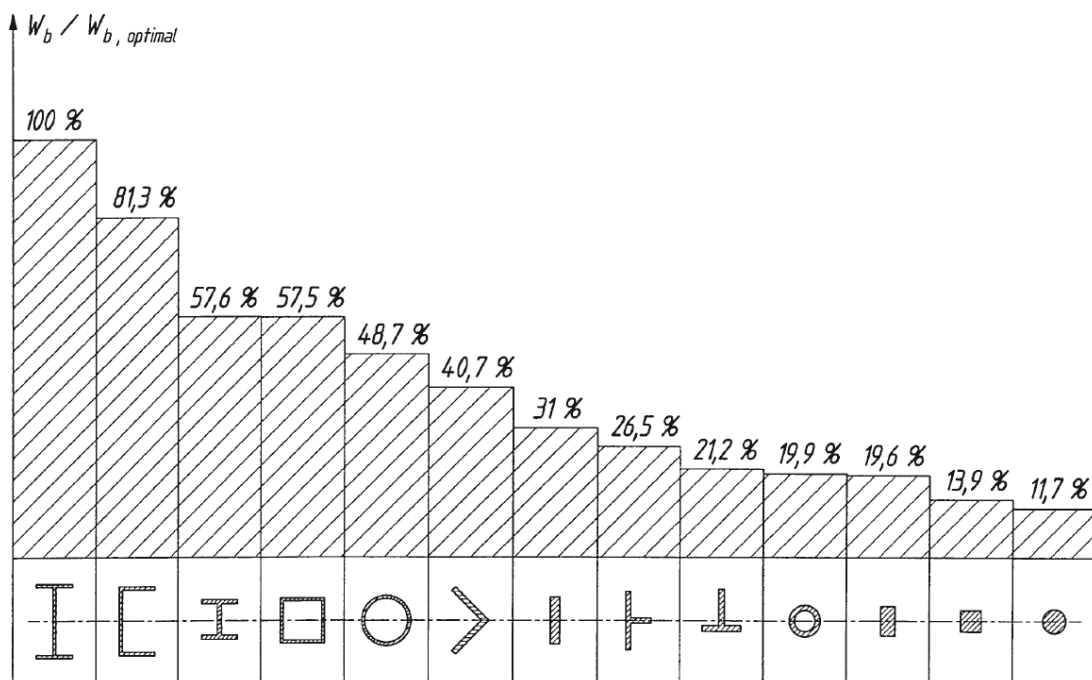
#### **7.5.1 Werkstoffwahl**

Heutzutage finden für die Gitterrohrrahmen im Motorradbereich hauptsächlich Stahl und Aluminium Anwendung. Stahlkonstruktionen haben meist gerade Rohrverbindungen, wobei beim Aluminium wegen der leichten Verformbarkeit auf komplexere Profile zurückgegriffen werden kann. Dabei gilt es bei der Materialwahl einige Aspekte zu beachten. Im Fall des Hybridkonzepterprobers handelt es sich um ein Fahrzeug mit einem großen Package mit einer geringen Flexibilität gegenüber dem Bauraum. Es muss auf eine Konstruktion zurückgegriffen werden, die keine teuren Werkzeugkosten mit sich zieht, da es sich um einen Konzepterprober handelt. Der Rahmen wird so ausgelegt, dass sich die Spannungen immer unter der Streckgrenze befinden. Die Steifigkeit hängt somit direkt mit dem Elastizitätsmodul des Materials zusammen. Stahl weist mit einem höheren Elastizitätsmodul von  $210 \text{ kN/mm}^2$  gegenüber Aluminium mit  $70 \text{ kN/mm}^2$  eine höhere Steifigkeit auf, wodurch die Rohrprofile kleiner dimensioniert werden können [14]. Beim Gewichtspotential müssen somit gegenüber formgepressten Konstruktionen Abstriche gemacht werden, da eine kostensparende Fertigung gerade für Konzepterprober große Vorteile bringt. Stahl hat gegenüber Aluminium neben dem höheren E-Modul eine deutlich bessere Schweißbarkeit. Bei einem Erprober ermöglicht dies, kurzfristig Änderungen am Fahrzeug durchführen zu können. Für spätere Berechnungen wird 42CrMo4 als

gängiger Stahl für Motorradrahmen verwendet. Dieser besitzt eine Streckgrenze von  $750 \text{ N/mm}^2$ . [17]

## 7.5.2 Wahl des Profilquerschnitts

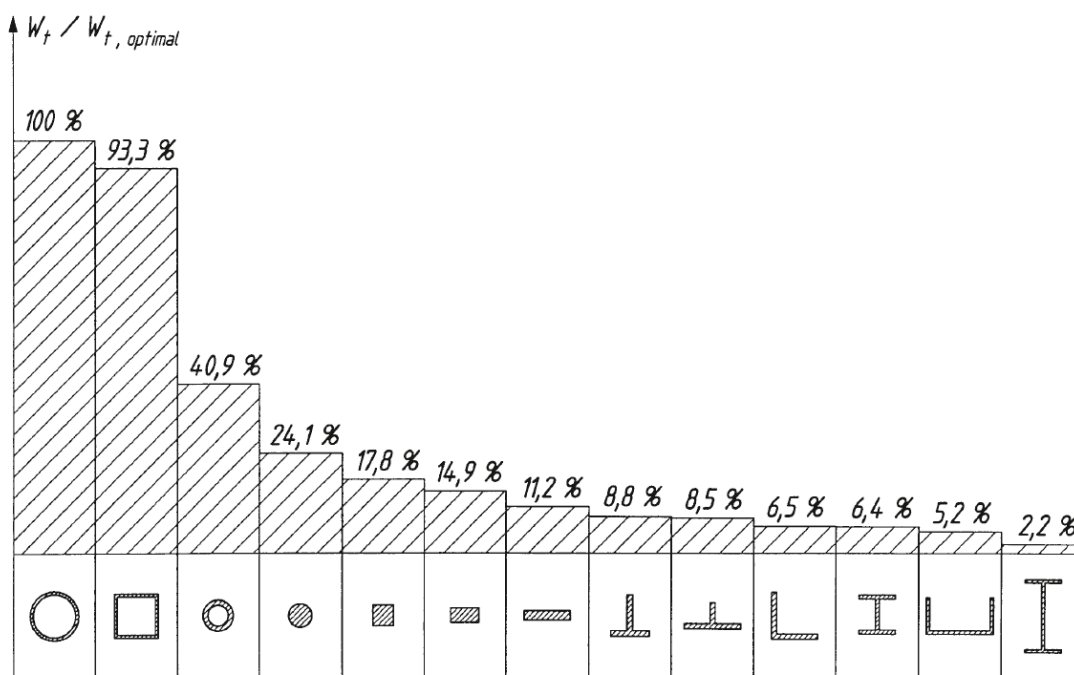
Primär handelt es sich beim idealen Gitterrohrrahmen um ein Fachwerk an dem in Stabrichtung nur Zug- und innerhalb der Beulgrenze Druckkräfte übertragen werden. Hierfür wäre ein Stab mit einem Vollquerschnitt die beste Lösung. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die Belastung im Grenzbereich zum Knicken führen könnte. Tatsächlich werden die Gitterrohre jedoch auch durch Biege- und Torsionsmomente belastet. Eine Abweichung vom reinen Stab ist somit sinnvoll. Je weiter sich die Flächenteile des Rohrquerschnitts von der Biegeachse entfernt befinden, desto steifer wird die Konstruktion. Es ergibt sich dadurch ein Kompromiss aus Gewicht, Außenmaß und Gesamtsteifigkeit. [14]



**Abbildung 14 Relative Widerstandsmomente gegen Biegung für unterschiedliche Querschnittsformen mit gleicher Fläche und Biegeachse (gestrichelt durch Profilquerschnitte dargestellt)[17]**

Im Spannungsverlauf über den Profilquerschnitt sind die Biegespannungen am äußersten Punkt am Höchsten. Insofern eignen sich für diesen Lastfall Profile, die symmetrisch zur Biegeachse an der Randfaser am meisten Material aufweisen. Die Abbildung zeigt unterschiedliche Rohquerschnitte mit gleichen Flächen und deren

relativen Widerstandsmomente abhängig vom I-Träger. Der I-Träger hat dabei den höchsten Wert und wird somit mit 100% bewertet. Der Kreisquerschnitt kommt nur auf ein Widerstandsmoment von 11,7% des I-Trägers. Die Querschnittsform des I-Trägers kommt jedoch für einen Motorradrahmen wegen der komplexen Belastungsrichtung nicht in Frage und wird hauptsächlich in großen Bauwerken mit einer Belastungshaupttrichtung verwendet. Ein quadratisches Hohlprofil hat gegenüber dem Kreishohlprofil nur geringe Vorteile. Eine Änderung des Höhen- und Breitenverhältnisses des Rechtecks kann sich positiv auf die Biegesteifigkeit auswirken. Gleichzeitig nimmt dabei aber die Torsionssteifigkeit ab und muss somit mit dem Anforderungsprofil abgewägt werden. Die größere Problematik bei rechteckigen Hohlprofilen ist jedoch die geringe Varianz und Verfügbarkeit. Für einen Konzepterprober kommen Sonderanfertigungen von Rohrquerschnitten nicht in Frage. Es müssen Profile verwendet werden, die in mehreren Größen für eine belastungsgerechte Auslegung verfügbar sind [17]. Kreishohlprofile sind in unterschiedlichsten Radien und Wandstärken erhältlich. Neben der Auslegung auf die Biegesteifigkeit, muss auch der Einfluss auf Torsionsbelastungen beachtet werden.



**Abbildung 15 Relative Widerstandsmomente gegen Torsion für unterschiedliche Querschnittsformen mit gleicher Fläche [17]**

Betrachtet man unterschiedliche Profile unter Torsionsbelastung, zeigt das Rohr mit Kreisprofil die besten Eigenschaften. Eine Erhöhung des Radius bei gleichbleibender Querschnittsfläche äußert sich positiv, wird jedoch von den Schweißrichtlinien und der

somit geforderten Mindestwandstärke begrenzt. Beim Kreisquerschnitt ist ferner von Vorteil, dass er keine Vorzugsrichtung aufweist. Ein weiteres Argument, das für das Kreishohlprofil spricht, ist die Verfügbarkeit. Das Material ist einfach zu beschaffen und kann somit in einer hohen Vielfalt an Größen für einen Konzepterprober einfach und schnell besorgt werden. Der Festigkeitsnachweis ist von der äußeren Belastung (Kräfte und Momente), der Gestalt (Form, Abmessung) und dem Werkstoff abhängig. Über die Werkstoffkennwerte und den aus Berechnungen stammenden wirksamen Spannungen, kann vereinfacht auf die Bauteilsicherheit geschlossen werden. In dieser Arbeit ist das Package sehr kompakt aufgebaut, wodurch sich wenige Querstreben innerhalb des Bauraums über das Fahrzeug hinweg realisieren lassen. Eine Auslegung auf Torsionssteifigkeit mittels Rundrohren ist somit anzustreben [17].

Anhand der genannten Kriterien und Belastungen lassen sich nun die beiden favorisierten Rohrprofile bewerten. Dabei werden die Kriterien der Belastung, Fertigung und der Anbindung mit 1 bis 5 gewichtet. Fünf ist dabei das wichtigste Kriterium, wobei eins als unwichtiger eingestuft wird. Das Ergebnis berechnet sich aus dem Produkt der Gewichtung und der Bewertung.

**Tabelle 3 Bewertung des Kreis- und Rechteckhohlprofilquerschnittes**

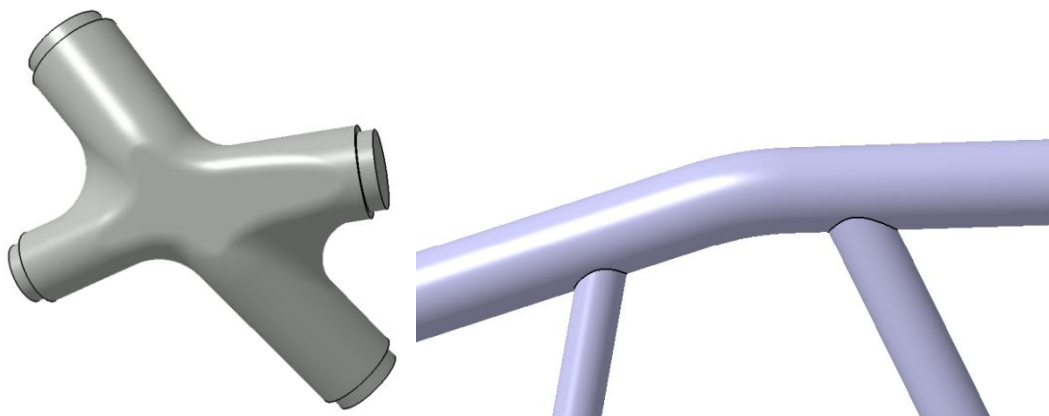
		Gewichtung	Kreis		Rechteck	
			Bewertung	Ergebnis	Bewertung	Ergebnis
<b>Belastung</b>	Längskraft	5	5	25	1	5
	Biegung	3	2	6	4	12
	Torsion	4	5	20	4	16
<b>Fertigung</b>	Kosten	3	4	12	3	9
	Aufwand	1	3	3	3	3
<b>Anbindungen</b>		2	3	6	4	8
<b>Gesamtbewertung</b>				72		53

Die Gewichtung der Bewertungsmatrix lässt sich folgendermaßen erläutern. Aufgrund der Geometrie des VKM-Packages kommt es im vorderen Bereich durch fehlende Querstreben zu einer geringen Steifigkeit bei Torsion. Folglich muss diese besondere Beachtung finden. Gleichzeitig sollten die Elemente des Rahmens hauptsächlich auf Druck- und Zugkräfte belastet werden. Die Verfügbarkeit unterschiedlicher

Profildurchmesser bei Stahl ist bei Rundprofilen deutlich höher, wodurch eine bessere Anpassung an die Spannungszustände möglich ist. Die Bewertung der Belastungen fällt mit 51 Punkten für das Kreishohlprofil deutlich besser aus. Der Aufwand beim Zuschnitt der Rohrenden ist fast gleich, allerdings lassen sich Kreisprofile im nächsten Prozessschritt einfacher und verzugsfreier verschweißen. Gerade bei der Anbindung des Hochvoltspeichergehäuses wäre eine Anbindung an die rechteckigen Rahmenprofile ohne große Modifikationen möglich, wobei an Rundrohren Laschen angeschweißt werden müssen. Die Gewichtung der Kriterien zeigt somit, dass sich das Kreisrundprofil besser für den Entwurf des Konzepterprobers eignet. Sowohl die Verfügbarkeit der Rohrprofile, als auch die positiven Eigenschaften in Bezug auf die Belastung sprechen dafür.

### 7.5.3 Anpassung der Knotenpunkte

Um die Rahmenkonstruktion für den Konzepterprober einfacher fertigen zu können, dürfen die Knotenpunkte nicht zu kompliziert ausgeführt sein.



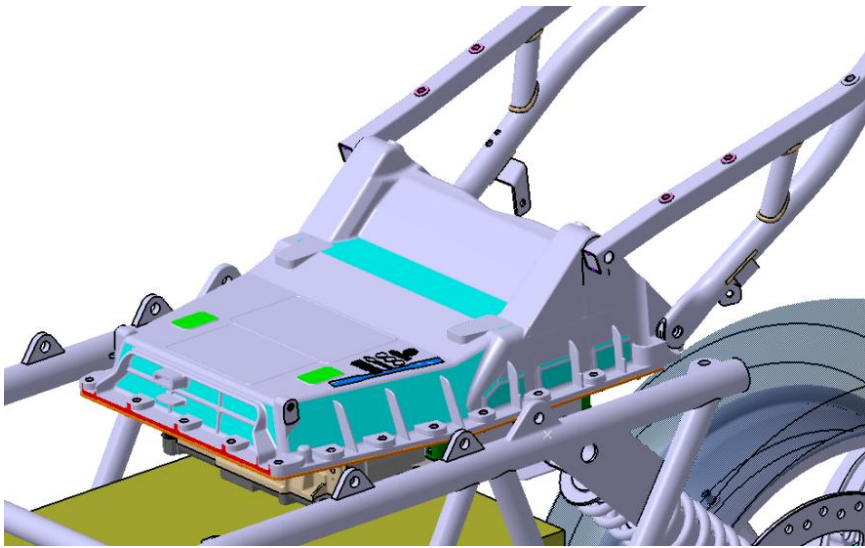
**Abbildung 16 Alternative Knotenpunkte Rahmenkonstruktion**

Das linke Bild zeigt ein Frästeil, in dem vier Rohre zusammengeführt werden. Müssen zu viele Streben an einem Punkt verschweißt werden, führt dies zu komplizierten Rohrzuschnitten und Toleranzabweichungen, da es beim Schweißen zu hohen Verzügen kommen kann. Wird dieser Knotenpunkt durch ein Frästeil ersetzt, können die Rohrflächen ohne aufwendige Vorbearbeitung verbunden werden. Gleichzeitig entstehen durch die gute Positionierbarkeit geringere Abweichungen vom Idealmaß. Eine Alternative, die sich im oberen Bereich der Rahmenstruktur anbietet, ist das Ersetzen zweier durch ein durchgehendes gebogenes Rohr. Dabei ist jedoch auf den zulässigen Radius zu achten. Dieser ist abhängig vom Durchmesser, dem Material und

der Wandstärke. Bei Stahlrohren im Bereich von 20-40 mm und einer 1mm dicken Wandstärke, liegt der Mindestradius beim knapp dreifachen Rohrdurchmesser. Die weiteren zulaufenden Rohre werden knapp außerhalb der Krümmung befestigt.

### 7.5.4 Entkoppelung des Hochvoltsspeichergehäuses

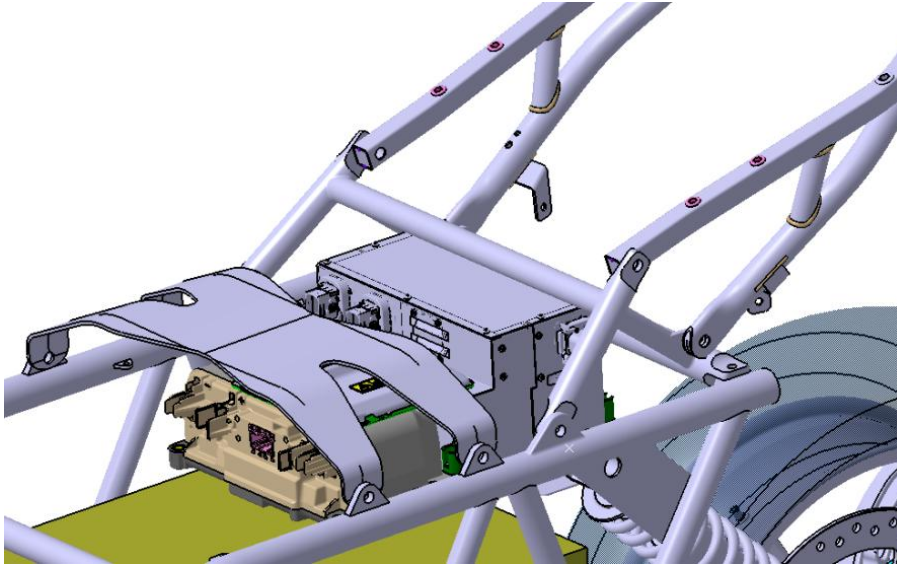
Die Übernahme des Servicedeckels des Hochvoltsspeichergehäuses bei gleichzeitiger in Kapitel 3 gewünschter Entkoppelung der strukturellen und funktionalen Aufgabe scheitert an der Anbindung des Heckrahmens und der Sitzfläche.



**Abbildung 17 Darstellung der Randbedingung durch die Anbindung des Heckrahmens mittels des Servicedeckels des HVS-Gehäuses**

Die entstehende Belastung durch das Fahrer- und Soziusgewicht wird beim C-Evolution auf den Deckel und den Heckrahmen verteilt, welche wiederum miteinander verbunden sind. Um zu erreichen, dass das Hochvoltsspeichergehäuse von den äußeren Kräften entlastet wird, muss in diesem Fall eine Neukonstruktion durchgeführt werden. Die Möglichkeit die Abdeckung zu übernehmen, fällt somit weg.

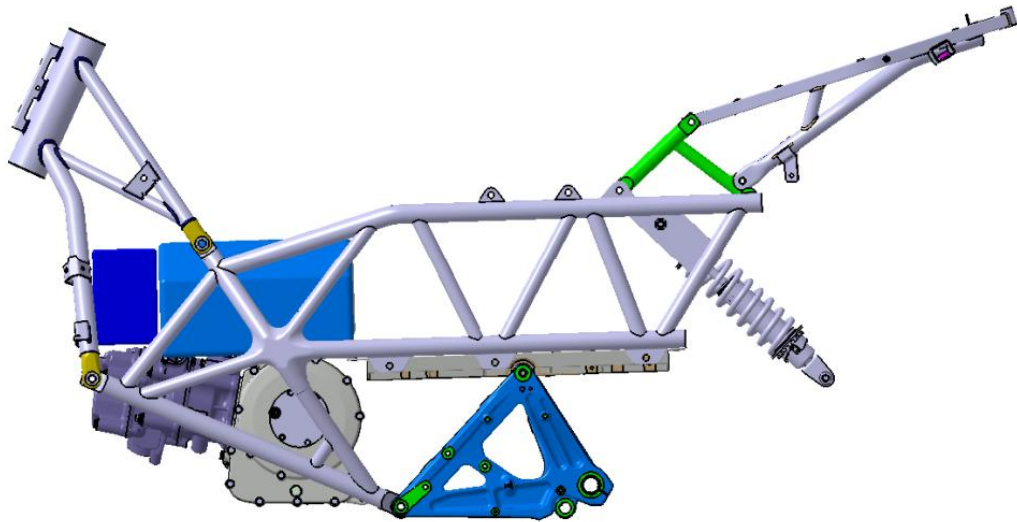




**Abbildung 18 Ersatzkonstruktion für den Servicedeckel zur Anbindung des Heckrahmens**

Die Sitzflächenbasis lässt sich am unkompliziertesten durch ein umgebogenes Blech realisieren, das an den oberen Streben des Rahmens angeschraubt wird. Ein Verschweißen mit der Struktur kommt in diesem Fall nicht in Frage, da der Zugang zur Elektronik über den Gehäusedeckel aus Servicegründen weiterhin bestehen muss. Um eine einwandfreie Montage des Gehäusepackage zu gewährleisten, muss die Rahmenstruktur auf der Rückseite und zwischen den beiden oben verlaufenden Gitterrohren frei bleiben. Somit liefert die Adaption einer Sitzfläche Vorteile bei der späteren Rahmenversteifung.

Die Konstruktion des Hilfsrahmens erweist sich als problematischer. Wie bei der Sitzfläche gilt, dass die Montage des HVS-Gehäuses nicht eingeschränkt werden darf. Zusätzlich müssen die Anbindungspunkte des Heckrahmens eingehalten werden, wobei die Fertigung des Hilfsrahmens sehr simpel sein soll. Um eine Biegung der Rohre zu minimieren und somit die Kosten für den Konzepterprober niedrig zu halten, muss die Anbindung der oberen zwei Schraubpunkte auf die Außenseite gelegt werden.

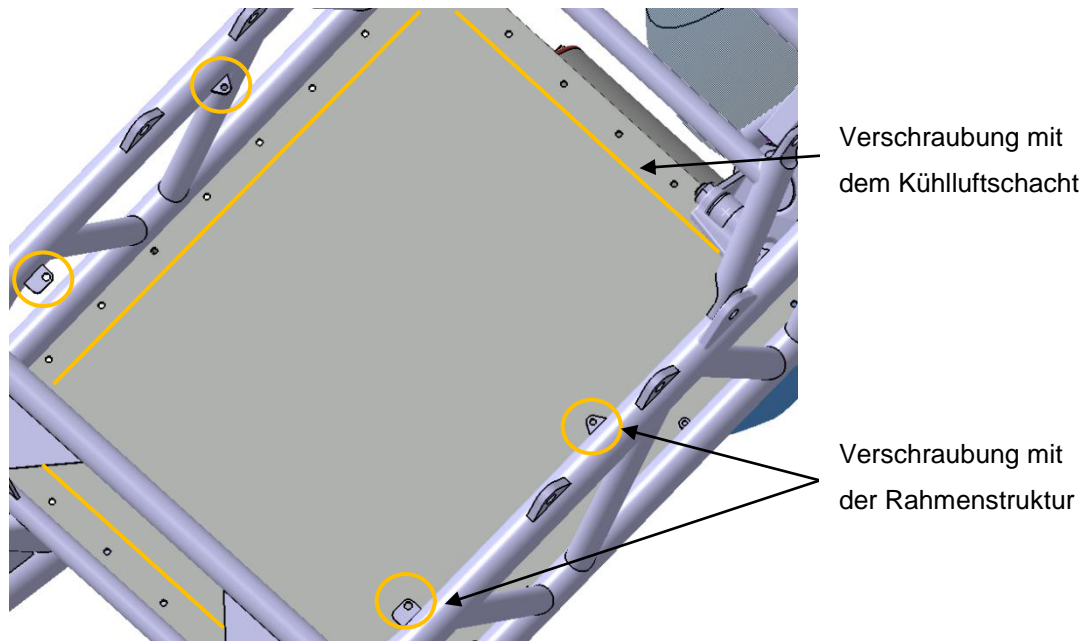


**Abbildung 19 Anbindung des Heckrahmens**

Generell sollte darauf geachtet werden, dass ein Bauteil mehrere Aufgaben bewältigt und somit eine Gewichtsersparnis erreicht wird. Der Hilfsrahmen jedoch dient in dieser Betrachtung nur der Kraftübertragung. Da es sich um einen Konzepterprober handelt und somit der Heckrahmen des C-Evolution nicht teuer gefertigt werden muss, bietet dieses Konzept eine adäquate Lösung für das Problem. Bei einem potentiellen Folgemodell in der Serienproduktion, sollte der Heckrahmen ersetzt und neu entwickelt werden. Dies würde nicht nur aus mechanischer Sicht, sondern auch aus Kostengründen Sinn machen.

### **7.5.5 Befestigungspunkte HVS-Gehäuse**

Grundsätzlich sind Verschraubungen innerhalb der Produktionsstraße im Werk in Berlin nur in horizontaler Richtung erwünscht. Dadurch können Schraubvorrichtungen genutzt werden, welche die Arbeitssicherheit erhöhen und den Montageprozess beschleunigen. Das Package des Hochvolt-speichergehäuses läuft jedoch als separates vormontiertes Bauteil in die Produktionsstraße ein. Eine Verschraubung des Gehäuses mit dem Rahmen und dem Kühlluftschacht in eine von der Horizontalen abweichende Richtung ist somit möglich.

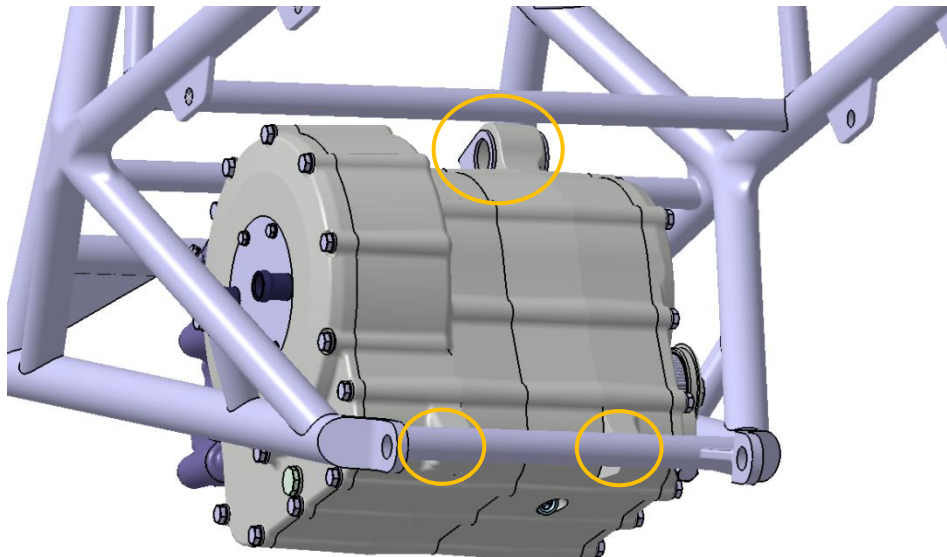


**Abbildung 20 Verschraubung des HVS-Gehäuses mit dem Kühlluftschacht und der Rahmenstruktur**

Das HVS-Gehäuse wird mit der Kühlplatte ausschließlich über eine Flanschverbindung verschraubt. Eine Verschraubung des HVS-Gehäuses nur mit dem Kühlluftschacht ist wegen der Bauteilhöhe nicht ausreichend. Deshalb muss dieser noch mit dem Rahmen verschraubt werden. Dies wird durch kleine Laschen erreicht, die an den Rahmen angeschweißt werden. Durch die Verbindung des HVS-Gehäuses mit der Rahmenstruktur, werden Spannungen auch auf das Gehäuse übertragen. Eine vollständige Trennung von Struktur und Funktion ist somit nicht mehr gegeben. Wie groß der Einfluss ist, muss jedoch durch numerische Berechnungen erfasst werden.

### 7.5.6 Anbindung Range-Extender

Da es sich in diesem Konzept beim Motor um einen Range-Extender handelt, der allein der Stromerzeugung und nicht direkt dem Antrieb dient, soll dieser relativ frei im Package positioniert werden. Im Konzept liegt der Motor unten im vorderen Bereich und wird über drei Punkte befestigt. Die Achse, um die sich die Rahmenstruktur bei der in Kapitel 7.6.3 untersuchten Torsionssteifigkeit verdreht, läuft direkt durch den Motor, weshalb eine tragende Funktion des Motorblocks vorteilhaft wäre. Dem gegenüber steht die mögliche Positionsänderung über der Konzeptreihe und dem kleinen Abmaß des Motors. Deshalb wurde im Entwurf des Range-Extenders entschieden, diesen von den äußeren Lasten zu entkoppeln, obwohl das Motorgehäuse im Motorradbau in der Regel zur Versteifung der Rahmenstruktur herangezogen wird.



**Abbildung 21 Anbindung des Range-Extenders an die Rahmenstruktur**

Zur Befestigung werden Querstreben zwischen den Seiten der Rahmenstruktur gezogen werden, an denen die Laschen angebracht werden. Bei der Verschraubung muss darauf geachtet werden, dass zwei der drei Anbindungspunkte als Loslager fungieren und nur die eigenen Kräfte und Momente abstützen.

## 7.6 Überprüfung der Rahmenstruktur

Numerische Berechnungsmethoden sind eine Möglichkeit, die Rahmenkonstruktion bezüglich der Festigkeit und Steifigkeit zu bewerten. In dieser Arbeit wird dabei das Berechnungstool „Generative Structural Analysis“ von CATIA V5 benutzt. Es handelt

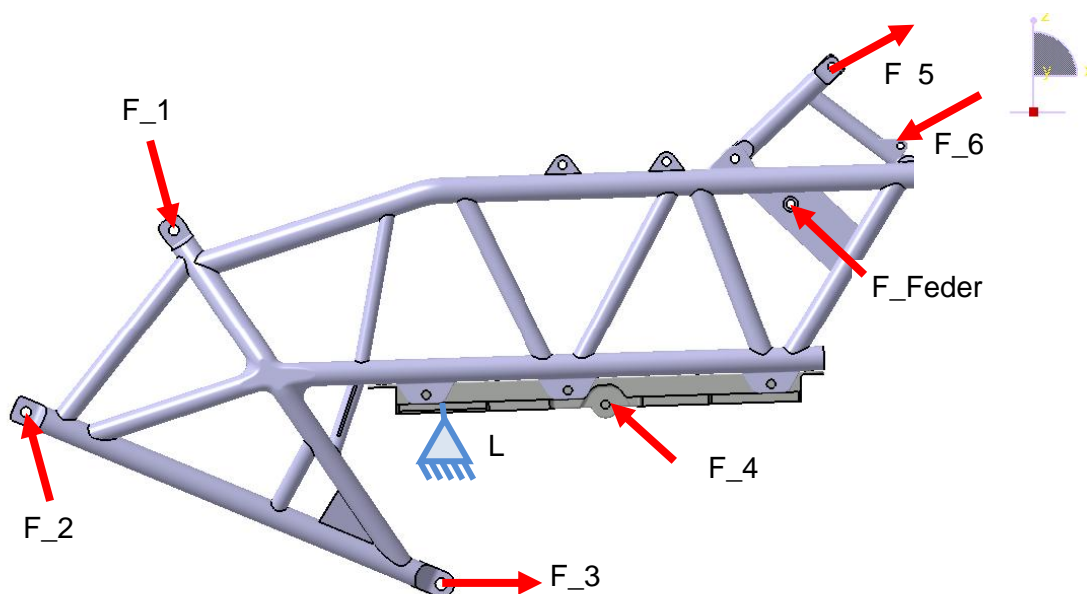
sich dabei um eine numerische Berechnungsmethode, die für lineares elastisches Werkstoffverhalten, also bis zur Proportionalitätsgrenze geeignet ist [18]. Im Folgenden werden statische Berechnungen durchgeführt. Dabei werden der E-Modul und die Querkontraktionszahl als Materialkennwerte benötigt. Zur Gewichtsabschätzung und Auslegung werden zusätzlich noch die Dichte und die Streckgrenze angegeben. Für die Rahmenkonzeption wurden drei Lastfälle berechnet. Der erste Lastfall bezieht sich dabei auf die Überfahrt einer Bodenwelle. Dieser liefert maximale Kräfteinflüsse, die eine Extrembelastung darstellen sollen, um zu überprüfen, dass die Spannungen die Streckgrenze des Materials nicht überschreiten.

Beim zweiten und dritten Lastfall wird sowohl auf das neue Rahmenkonzept als auch auf die tragende Batteriewanne des C-Evolution die gleiche Kraft appliziert, mit dem Ziel eine vergleichende Bewertung der Biege- und Torsionssteifigkeit abhängig von der Richtung der Kräfteinleitung zu ermöglichen.

Für jeden Lastfall wurde ein eigenes Berechnungsmodell erstellt, welches auf dem finalen Rahmenkonzept basiert.

### **7.6.1 Überprüfung der Auslegung des Hauptrahmens durch den Lastfall I - Bodenwelle**

Bei diesem Lastfall wird das Überfahren einer Bodenwelle nachgestellt. Ziel der Berechnung ist dabei die Überprüfung der Grobauslegung und Dimensionierung des Gitterrohrrahmens. Die maximale Federbeinkraft stellt dabei ein Einfedern bis zum Anschlag dar. Eine weitere Erhöhung würde zu direkter Kraftübertragung ohne Entkoppelung durch die Feder führen. Auf dem Prüfstand wird das Fahrzeug bei BMW um den Schwerpunkt des Aufbaus eingespannt und an den Radaufstandspunkten angeregt. Diese Prüfstandskonfiguration ist auch die Basis für die aufgebrachten Randbedingungen am Simulationsmodell, wie in Abbildung 22 dargestellt.



**Abbildung 22 Kraftangriffspunkte Lastfall I Bodenwelle**

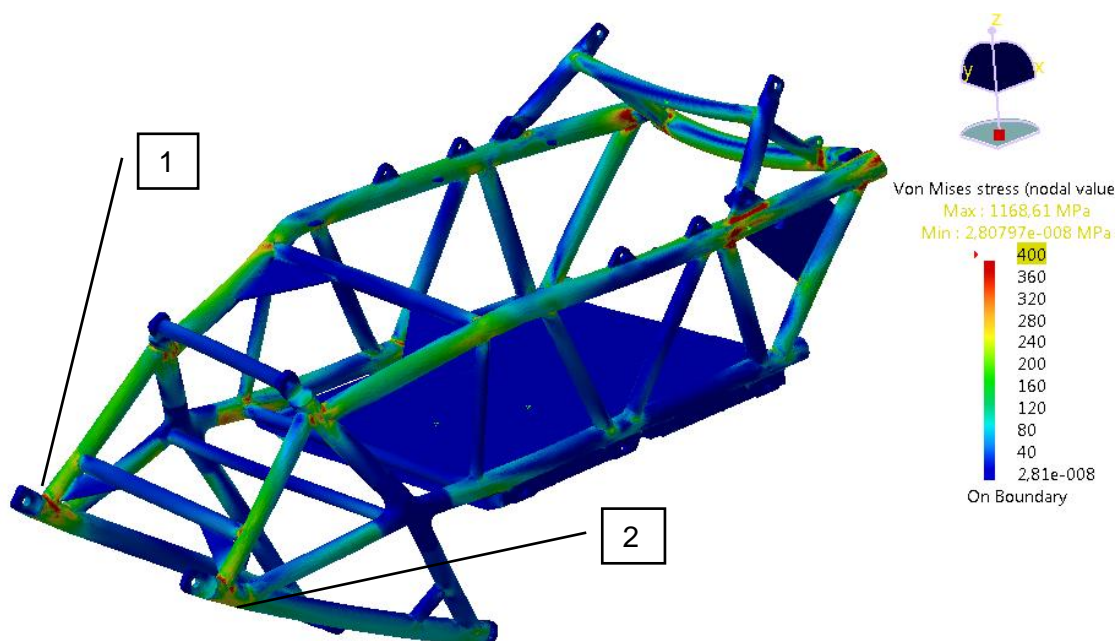
Die Einspannung des Modells erfolgt im vorderen Bereich des Kühlluftschachtes durch das Festlager L. Um das Berechnungsmodell zu vereinfachen, werden die Kräfte nicht an den Radaufstandspunkten, sondern direkt am Hauptrahmen des Konzepts angebracht. Als Werte dienen dabei Schnittkräfte, die aus dem Abaqus-Modell zur Auslegung des C-Evolution ausgelesen wurden. Dies ist möglich, da es sich bei den Kraftangriffspunkten um die identische Position und um die gleichen Anbauteile handelt.

**Tabelle 4 Schnittkräfte an den Anbindungspunkten der Anbauteile und der Feder für den Lastfall - Bodenwelle**

Kraft	Kraft links in Fahrtrichtung [N]			Kraft rechts in Fahrtrichtung [N]		
	x	y	z	x	y	z
<b>F_1</b>	1031	-921	-3312	1102	971	-3366
<b>F_2</b>	-1060	1367	5791	-1072	-1416	5886
<b>F_3</b>	2886	-131	300	-1695	-286	5
<b>F_4</b>	1665	92	-2418	-1362	325	2560
<b>F_5</b>	7679	-167	2795	7685	168	2798
<b>F_6</b>	-7678	61	-5305	-7685	-62	-5308
<b>F_Feder</b>	-4830	0	4531			



Das Modell wird in Form einer Baugruppe dargestellt. Dadurch besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Materialien in die Berechnung einfließen zu lassen. Der Rahmen besteht aus Stahl, wobei der Kühlluftschacht aus Aluminium gefertigt wird. Die Bauteile werden dabei über die Analyseverbindung „Kontaktverbindung“ miteinander gekoppelt. Zur Wahl der geeigneten Netzgröße, wird das Modell vorab mit einer ersten Voreinstellung gerechnet. Mit dem ersten Ergebnis erhält das Programm erste Werte für einen groben Spannungsverlauf innerhalb der Bauteile. In der darauf folgenden Berechnung wird das Netz automatisch an Orten mit höherer Spannung lokal verfeinert. Dadurch werden diese Bereiche in der folgenden Berechnung genauer aufgelöst und der numerische Fehler verringert. Es ist jedoch zu beachten, dass sich diese voraussichtlich an den Anbindungspunkten und den Schweißnähten befinden. Da die Begutachtung dieser Bereiche nicht Ziel der Betrachtung ist, kann die Netzgröße auf einen minimalen Wert von 2 mm beschränkt werden. Um die Rechenzeit zu beschränken, wird eine Simulation mit zwei bis drei Verfeinerungsstufen vorgeschlagen. Darüber hinaus wird die Qualität des Ergebnisses nicht mehr stark beeinflusst, wobei die Anzahl der Knotenpunkte und Elemente deutlich ansteigt. [19]



**Abbildung 23 Berechnungsergebnis Lastfall I Bodenwelle**

Das Ergebnis der Berechnung zeigt wie erwartet sehr hohe Spannungen über der Streckgrenze von 750 N/mm<sup>2</sup> in den Kerben und Anbindungspunkten an den Verbindungslaschen. Diese, in der Abbildung 23 in rot dargestellt, finden hier jedoch keine Beachtung, da die Berechnung der Schweißnähte extra durchgeführt werden

muss. Im Bereich des Hochvoltspeichergehäuses im hinteren Teil des Fahrzeuges ist die Belastung sehr gering. Dies folgt aus dem hohen Grad an Verstreben und der Stützung durch den Kühlluftschacht. Nur im vorderen Teil des Bereichs werden höhere Spannungen von ca. 200 N/mm<sup>2</sup> nachgewiesen. Sie liegen direkt am Rand der Einspannung im Punkt 1 in der Abbildung 23 und werden somit stark belastet. Im vorderen Bereich beim Punkt 2 in Abbildung 23 zeigt sich eine höhere Spannung. Durch die Aufnahme des Vorder- und Zwischenrahmens kommt es zu einer hohen Belastung aller Gitterrohre von bis zu 200 N/mm<sup>2</sup>. Am Knotenpunkt an der unteren Anbindung des Vorderrahmens ist die Belastung abgesehen von den Schweißnähten mit ca. 300 N/mm<sup>2</sup> am höchsten. Die beiden Seiten sind wegen des Bauraums für das VKM-Package nicht miteinander verbunden, was zu einer größeren Deformation führt. Dies hat einen deutlichen Einfluss auf die spätere Betrachtung der Torsionssteifigkeit. Im Bereich der Heckanbindung und des Federbeins werden hohe Kräfte eingeleitet, die sich in starken Spannungen äußern. Eine Versteifung wird dort durch das Zwischenstück zum Heckrahmen erreicht.

**Tabelle 5 Materialwerte 42CrMo4 Präzisionshohlprofil [20]**

Material	Norm	Werkstoffnummer	Streckgrenze N/mm <sup>2</sup>	Verwendung
42CrMo4V	DIN EN 10305-1	1.7225	750	höherfeste Teile

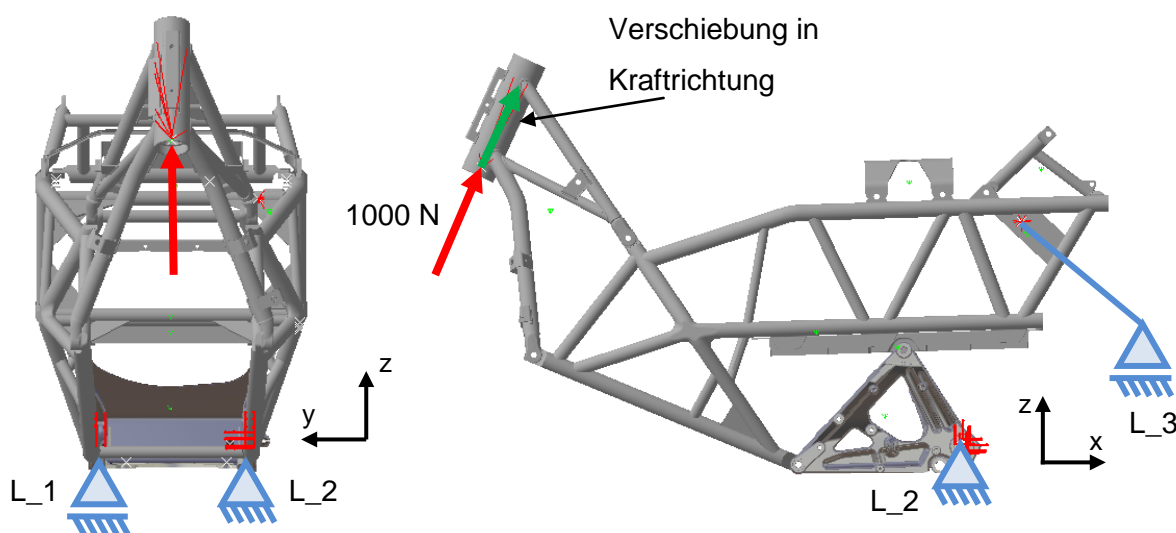
Ungeachtet der lokalen Spannungen im Bereich der Kerben und Schweißverbindungen liegt die Belastung der Rohrverbindungen deutlich unter der Streckgrenze von 750N/mm<sup>2</sup>. Im kritischen Bereich an der unteren Anbindung des Vorderrahmens liegt die Sicherheit bei ca. 2,5. Mit einer Wandstärke von 1mm wurde der Rahmen eher großzügig ausgelegt und somit eine hohe Sicherheit erreicht. Im weiteren Entwicklungsprozess kann dieser Wert topologisch optimiert werden. Da es sich in dieser Arbeit um einen Konzepterprober handelt, steht die Betriebssicherheit im Vordergrund. Die Sicherheit von 2,5 ist somit in Ordnung.

### 7.6.2 Überprüfung der Biegesteifigkeit durch den Lastfall II

Der Lastfall II verifiziert die Biegesteifigkeit des Rahmenkonzeptes. Das Ergebnis soll dann mit dem C-Evolution verglichen werden. Beim Elektroscooter handelt es sich um eine sehr steife Konstruktion, die ihre Wurzeln unter anderem in den Fertigungsrichtlinien und somit der Mindestwandstärke des HVS-Gehäuses durch den



Druckguss hat. Da die Position der Federbeinabindung, der Zwischen- und der Vorderrahmen des Hybridkonzepts denen des C-Evolution entsprechen, kann bei gleicher Einspannung und Kraft ein Vergleich der Steifigkeit des neuen Gesamtrahmens mit dem Batteriekasten des Elektroscooter erstellt werden. Durch die Vergleichskraft lässt sich über die Verschiebung des Angriffspunktes ein qualitativer Vergleich der beiden Fahrzeuge vornehmen.



**Abbildung 24 Kraftangriffspunkte Lastfall II Biegesteifigkeit**

Die Fahrzeuge werden dabei im hinteren Bereich am Zwischenrahmen und der Federbeinannahme eingespannt. Bei L\_2 handelt es sich dabei um ein Festlager, das in alle translatorischen Richtungen gesperrt wird. Die in Fahrtrichtung rechte Seite des Zwischenrahmens wird in L\_1 in z- und x-Richtung gesperrt, wodurch ein Loslager entsteht. Die Lagerung des Federbeins L\_3 lässt sich bis auf die Richtung des Einfedervorganges frei bewegen. Die äußere Vergleichskraft von 1000N wird über das Lenkkopflager eingeleitet. Die Größe der Kraft ist dabei frei gewählt. Sie soll dabei jedoch einen realitätsnahen Wert widerspiegeln, der eine bewertbare Verschiebung hervorruft. Dabei wurde die Innenfläche des Lenkkopflagers mit Hilfe eines Virtual Rigid Parts mit einem so genannten Handlerpoint verbunden. Dies ermöglicht eine punktuelle Definition der Kraft, die dann vom Lenkkopflager aufgenommen wird. Die Richtung der Kraft ist parallel zur Richtung des Radaufstandspunktes zum Lenkkopflager. Über die Verschiebung des Kraftangriffspunktes in Wirkrichtung, kann auf die Steifigkeit der Konstruktion geschlossen werden.

Die Verschiebung wird am Kraftangriffspunkt auf der unteren Seite des Lenkkopflagers abgenommen. Die Werte in x- und z-Richtung werden dabei über den Winkel der Krafrichtung in eine Ebene transformiert und aufsummiert. Die angesetzte

Vergleichskraft dividiert durch die berechnete Summe der Verschiebung ergibt dann die Biegesteifigkeit, die für den Vergleich verwendet wird. Bei den numerischen Ergebnissen handelt es sich in der Regel um qualitative Resultate, die einen Vergleich unterschiedlicher Konzepte ermöglichen. Absolute Größen sind ohne Kalibrierung nur bedingt zu verwenden.

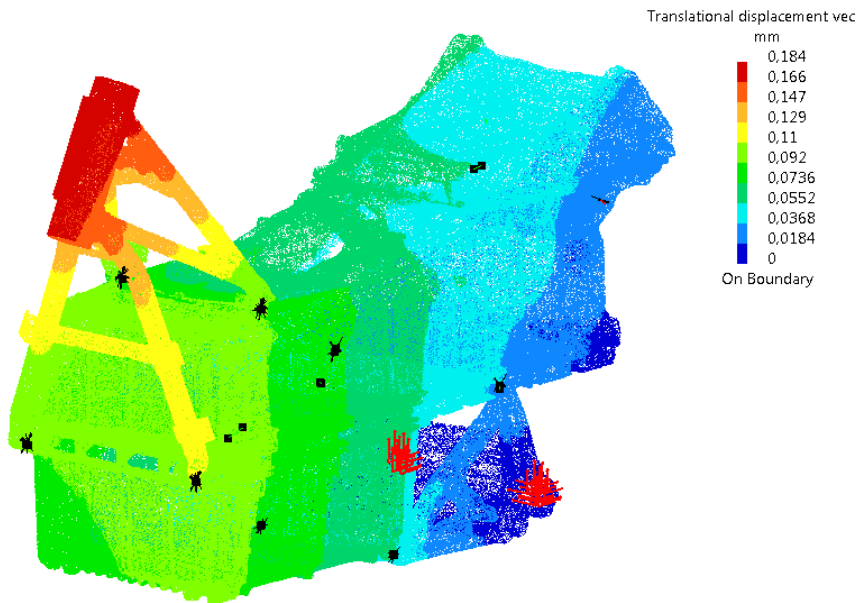


Abbildung 25 Darstellung der Verschiebung des C-Evolution durch eine Vergleichskraft

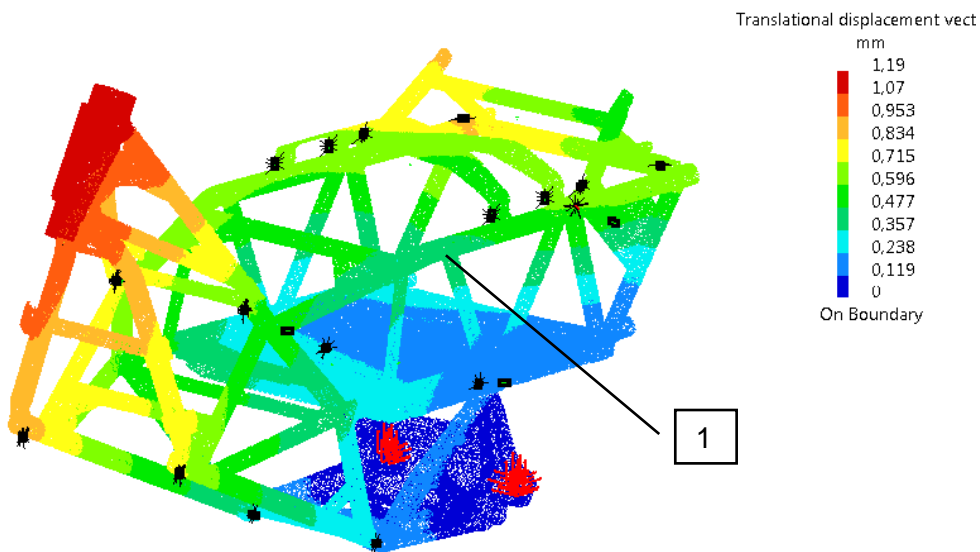


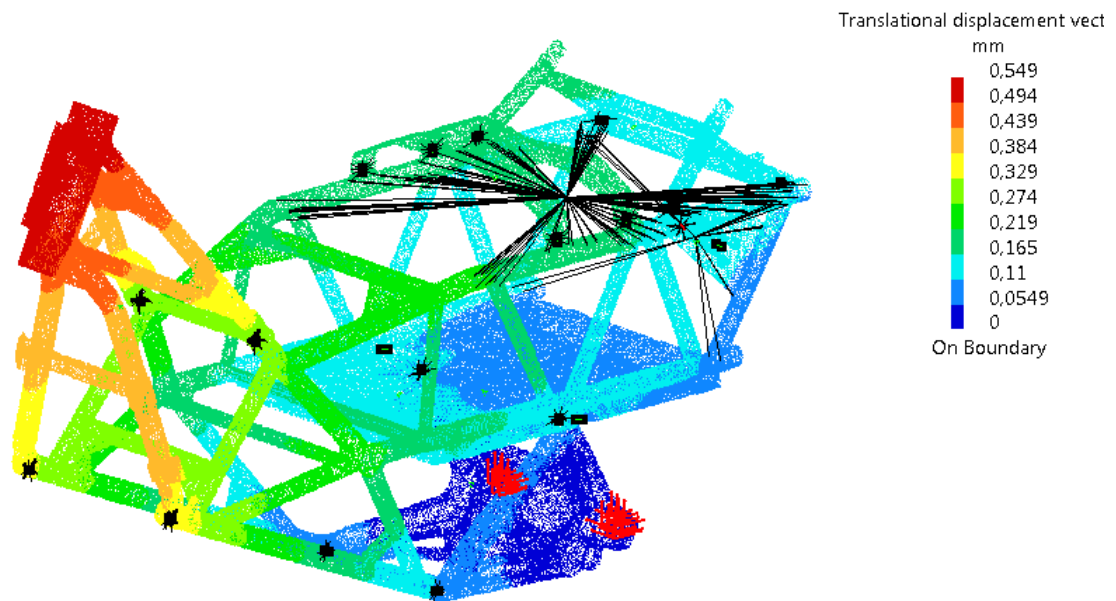
Abbildung 26 Darstellung der Verschiebung des Hybridkonzepts durch eine Vergleichskraft

Bereits bei der Skalendarstellung der Verschiebung in den Abbildungen 25 und 26 ist deutlich zu erkennen, dass die Biegesteifigkeit beim Rahmen des Hybridkonzeptes niedriger ausfällt. Im Folgenden muss geklärt werden, ob die Steifigkeit ausreichend für den Fahrbetrieb ist. Werden hier die Werte am Lenkkopflager ausgemessen, kann ein qualitativer Vergleich der beiden Konstruktionen getroffen werden.

**Tabelle 6 Vergleich der Biegesteifigkeit des Rahmenkonzepts mit dem C-Evolution**

	Netzgröße	Verschiebung	Biegesteifigkeit
<b>C-Evolution</b>	5 mm	0,328 mm	3050 N/mm
<b>Rahmenkonzept</b>	5 mm	2,358 mm	425 N/mm

Der höhere Wert des C-Evolution lässt sich durch die Grundgeometrie erklären. Als Ersatzmodell ließe sich das Gehäuse dabei als ein großer Würfel darstellen, der ein sehr hohes Widerstandsmoment und somit einen optimalen Querschnitt bezüglich der Biegesteifigkeit aufweist. Beim Hybridkonzept wird durch die asymmetrische Federbeinaufnahme sehr viel Last durch die obere Rahmenstrebe (in Abbildung 26 Punkt 1) geführt. Dadurch kommt es zu sehr hohen Belastungen, die zu einer entsprechenden Verformung führen. Des Weiteren ist der Rahmen im oberen und hinteren Bereich beim Hochvoltspeichergehäuse nicht gut abgeschlossen. Es wird somit eine einseitige Verformung zugelassen. Eine Verbesserung der Schwachstellen ist jedoch in diesem Konzept aus Bauraumgründen nicht möglich. Um einen weiteren Vergleich mit einzubeziehen, werden die Steifigkeiten des C-Evolution mit denen des C 600 Sports verglichen. Dabei handelt es sich um einen Scooter mit Verbrennungsmotor, der ebenfalls von BMW hergestellt wird. Dieser hat gegenüber dem reinen Elektrokonzept eine Steifigkeit von einem Fünftel. Dies zeigt, dass die hohe Biegesteifigkeit beim C-Evolution produktionsbedingt durch die nötige Mindestwandstärke beim Gußgehäuse angefallen ist. Die Steifigkeit des Hybridrollerkonzepts liegt mit dem Faktor 7 somit nur knapp unter der des C 600 Sport und erscheint folglich ausreichend. Trotzdem soll kurz eine mögliche Optimierung aufgezeigt werden.

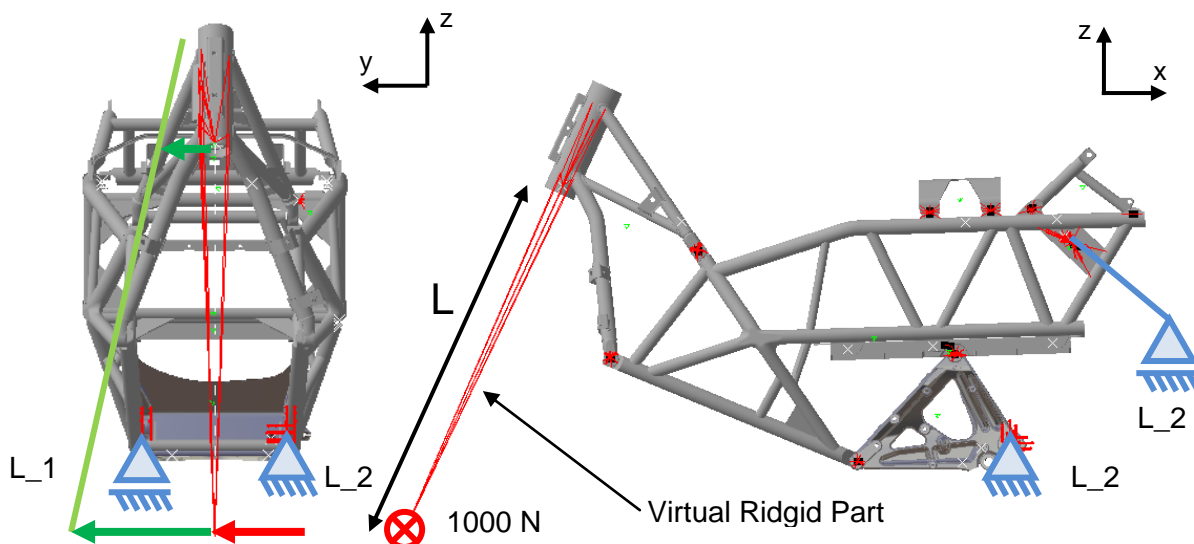


**Abbildung 27 Optimierungspotential der Biegesteifigkeit des Hybridkonzepts**

Die Abbildung zeigt die gleiche Berechnung wie zuvor, nur dass hier die oberen und hinteren Rohre im Bereich des HochvoltSpeichers durch „Virtual Ridgid Connections“ zueinander gesperrt wurden. Das bedeutet, dass diese vollkommen starr miteinander verbunden sind. Diese Rechnung soll das Potential der Konstruktion zeigen. Bei einem Konzepterprober hat die sichere Auslegung des Fahrzeuges Priorität. Die Biegesteifigkeit erhöht sich durch diese Maßnahme von 425 N/mm auf 1010 N/mm. Sollte eine höhere Steifigkeit im weiteren Konzeptverlauf erwünscht sein, so wäre eine Verstärkung durch Rohrstreben oder Winkelbleche in diesem Bereich anzustreben. Diese kann jedoch nur im Rahmen erfolgen, da der HochvoltSpeicher in diesem Bereich keine strukturellen Aufgaben übernehmen soll.

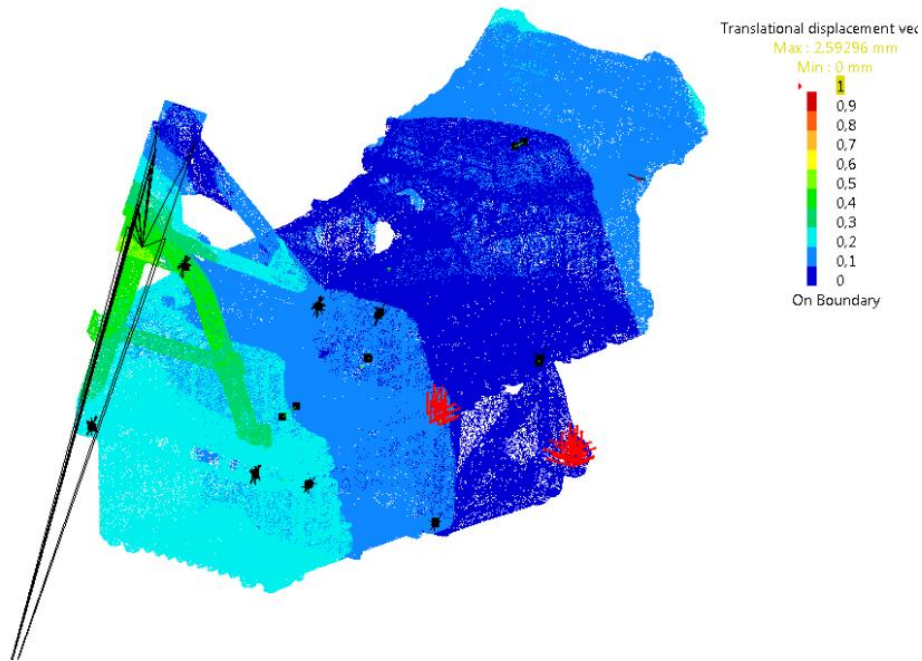
### 7.6.3 Überprüfung der Torsionssteifigkeit durch den Lastfall III

Wie beim Lastfall II soll auch die Torsionssteifigkeit des Rahmenkonzeptes mit der des C-Evolution verglichen werden. Neben der Einspannung bleiben auch hier die Netzgröße und der Modellaufbau gleich.

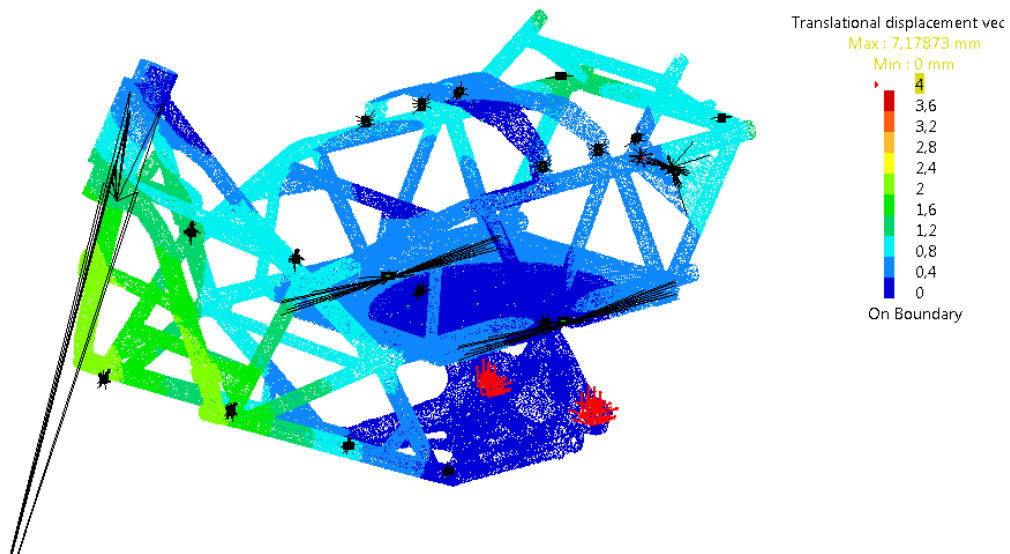


**Abbildung 28 Kraftangriffspunkte Lastfall III Torsionssteifigkeit**

Anders als bei der Biegesteifigkeit wird hier die Kraft über den Radaufstandspunkt in  $y$ -Richtung aufgetragen. Der Steifigkeitsverlust durch die Vorderradaufhängung und die Telegabel soll dabei allerdings vernachlässigt werden. Diese wird somit durch ein virtuelles Bauteil ersetzt. Wie beim Fall II wird dabei ein Virtual Ridgid Part erstellt, dass mit dem Lenkkopflager vernetzt wird. Der Handlerpoint ist in diesem Fall ein Punkt auf der Verlängerung der Achse durch das Lenkkopflager. Die beaufschlagte Vergleichskraft von 1000 N initiiert somit ein Moment in der Struktur, das zu einer gut darstellbaren Verdrehung führt. Die Verschiebungen zweier Punkte können am Handlerpoint und am unteren Teil des Lenkkopflagers ausgelesen werden. Sie werden in der Abbildung 28 durch die grünen Pfeile dargestellt. Über die Differenz der Verschiebungen und der Länge  $L$  kann nun der Verdrehungswinkel bestimmt werden. Das wirkende Moment ist das Produkt der Länge  $L$  und der wirkenden Kraft. Die Steifigkeit wird nun durch das Moment abhängig von der Verdrehung beschrieben. Um einen Vergleich mit dem C-Evolution treffen zu können, müssen die beiden FEM-Modelle und Berechnungsrandbedingungen auch in diesem Fall wieder gleich aufgebaut sein. Die Lagerstellen  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$  werden dabei wie beim Lastfall II ausgelegt.



**Abbildung 29** Berechnungsergebnis der Torsionssteifigkeit des C-Evolution



**Abbildung 30** Berechnungsergebnis der Torsionssteifigkeit des Hybridkonzepts

Betrachtet man die Verschiebung durch die Torsionsbeanspruchung des C-Evolution, kann man gut erkennen, dass das Hochvoltspeichergehäuse sehr steif ausgelegt ist. Über das Gehäuse findet nur sehr geringe Verformung statt. Der Großteil der Verschiebung wird durch die Verdrehung des Vorderrahmens eingeleitet. Dieser ist an den Anbindungspunkten zum Gehäuse nur gering versteift, da diese durch den Hochvoltpeicher verstärkt werden.

Beim Rahmen des Hybridkonzepts ist, wie beim C-Evolution in Abbildung 29 ist ein kontinuierlicher Anstieg der Verdrehung vom Zwischenrahmen zum Lenkkopflager zu

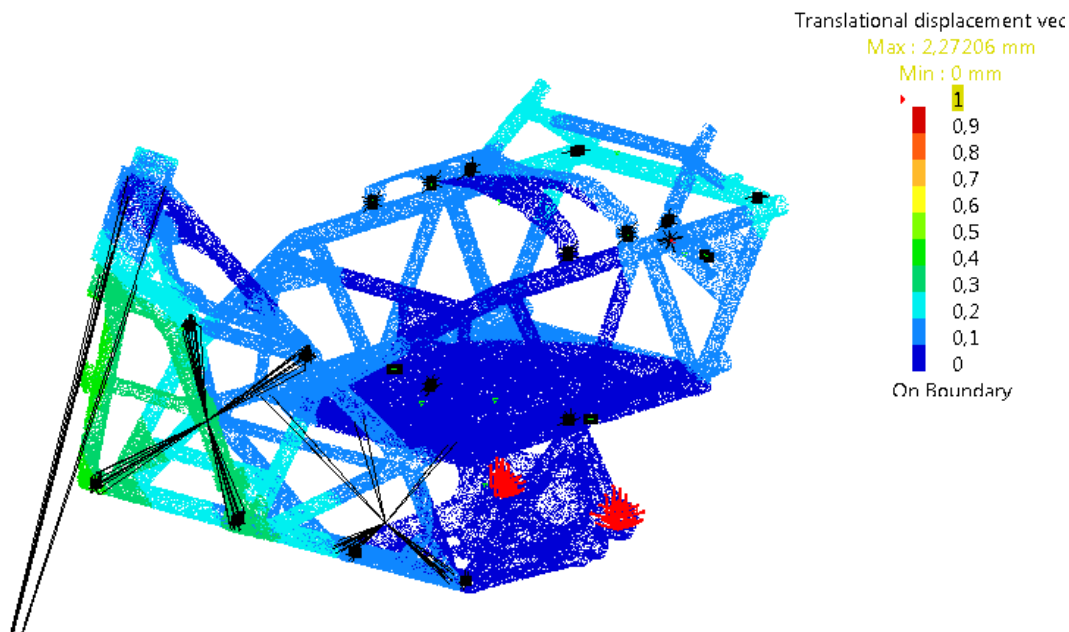


erkennen. Die Verdrehung nimmt dabei im Vergleich zum C-Evolution allerdings Werte mit einem Größenfaktor von ca. vier an. Ursache ist die weiche Auslegung der Anbindungspunkte des Vorderrahmens. Es kommt zu einer starken Verdrehung an diesen Punkten. Im Gegensatz zum Hochvoltspeichergehäuse des C-Evolution, kann der Rahmen des Hybridkonzeptes wegen Bauraumproblemen keine steife Anbindung des Vorderrahmens gewährleisten. Ein tragendes VKM-Gehäuse sollte dabei in Betracht gezogen werden.

**Tabelle 7 Vergleich der Torsionssteifigkeit des Rahmenkonzepts mit dem C-Evolution**

	Netzgröße	Verschiebung am Radaufstandspunkt (am Lenkkopflager)	Torsionssteifigkeit
<b>C-Evolution</b>	5 mm	2,59mm(0,475mm)	4641,1 Nm/°
<b>Rahmenkonzept</b>	5 mm	7,16mm(1,45mm)	1719,4 Nm/°

Ein Vergleich der Steifigkeiten zeigt, dass der Rahmen des Hybridkonzeptes um den Faktor 2,7 weicher ist. Im Verlauf der Konzeptentwicklung muss jedoch geprüft werden, ob eine Erhöhung gewünscht ist, oder ob die Struktur ausreichend ist. Auch hier soll eine Optimierungsmöglichkeit angegeben werden.



**Abbildung 31 Optimierungspotential der Torsionssteifigkeit des Hybridkonzeptes**

Werden die Anbindungspunkte des Vorderrahmens und der Bereich beim Zwischenrahmen, durch starre Verbindungen gesperrt, ist eine deutliche Erhöhung der

Steifigkeit von 1719,4 Nm/° auf 5078,9 Nm/° zu erkennen. Eine starre Verbindung und somit eine Versteifung durch den Motorblock könnten sich positiv auswirken. Die Schwachstellen der Konstruktion werden somit relativ gut wiedergegeben. Sollte eine Erhöhung der Steifigkeit aus Sicherheitsgründen erwünscht sein, müssen diese Bereiche bewusst versteift werden.

In diesem Fall können zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen werden. Zum einen eine Neukonstruktion des Vorderrahmens, da im Bereich des Hauptrahmens aus Packagegründen sehr wenig Platz ist. Sollte dies aufgrund der erforderlichen Übernahmeteile allerdings nicht möglich sein, kann zum anderen eine Verstärkung der Rahmenstruktur in den dargestellten Bereichen durch Rohrstreben oder Winkelbleche erfolgen.

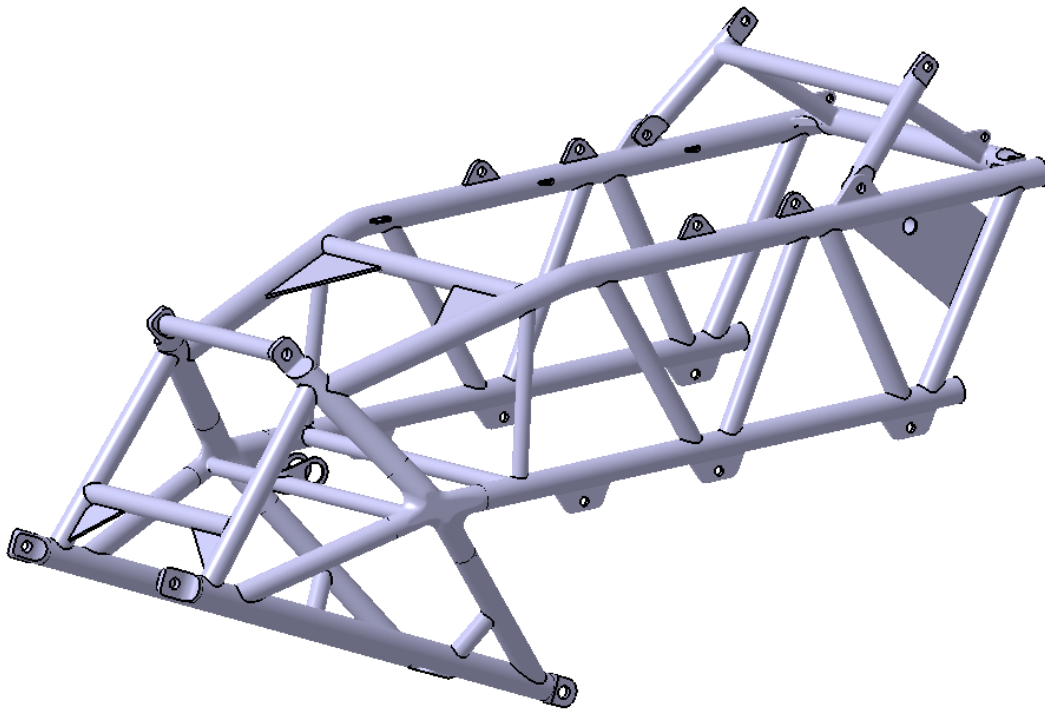
### **7.7 Bewertung des Rahmenkonzepts**

Die grundlegenden Anforderungen an den Rahmen wurden durch die Anbindungspunkte des Fahrwerks und der Zusatzkomponenten, wie Motor und Hochvolt-Speichergehäuse, festgelegt. Diese lassen sich im Falle des Erprobers am besten durch eine Gitterrohrrahmenkonstruktion umsetzen. Damit es hauptsächlich zu Zug- und Druckbelastungen kommt, wurde darauf geachtet, dass die Rohrstreben möglichst gerade entlang der Hauptkraftflüsse verlaufen. Abhängig vom Kraftfluss des Lastfalls I wurden die Anbindungspunkte verbunden. Die maximalen Spannungen hervorgerufen durch den Lastfall liegen bei der Konstruktion mit dem Faktor 2,5 in einem ausreichend großen Sicherheitsbereich. Das VKM-Package bietet sehr beschränkte Möglichkeiten zur Integration von Streben zwischen der linken und rechten Rahmenseite. Besonders kritisch zeigt sich dabei die Anbindung des Vorder- und Zwischenrahmens. Hier kommt es zu hohen Steifigkeitsverlusten, so dass im Bereich des Vorderrahmens eine Versteifung sehr zu empfehlen ist, da die Anbindung an den Hauptrahmen nur schwach ausgelegt ist. Dabei ist eine Übernahme nicht mehr möglich. Durch das aufwendige Packaging zeigt die Betrachtung der Biege- und Torsionssteifigkeit deutlich geringere Werte im Vergleich zum Referenzmodell des C-Evolution. Die Verschiebung aufgrund der Biegebeanspruchung liegt dabei relativ nahe an der des C 600 Sport und kann somit als ausreichend bewertet werden. Bei der Torsion liegen die Werte allerdings deutlich darunter und es muss im weiteren Entwicklungsprozess abgewogen werden, ob sie im zulässigen Bereich liegen. Unabhängig davon, weisen die Schwachstellen im Bereich des Vorder- und



Zwischenrahmens deutliches Potential für eine Verbesserung auf. Eine Verstärkung muss allerdings unter Umstrukturierung des Gesamtpackages erfolgen.

Mittels eines Zwischenstücks zur Anbindung des Heckrahmens lässt sich eine fast vollständige Entkoppelung des Hochvoltspeichergehäuses gegenüber den strukturellen Funktionen durchführen. Die weiteren Komponenten, wie der Motor, das HVS-Gehäuse, der Tank und die Airbox können über angeschweißte Laschen befestigt werden. Diese simple Befestigung ermöglicht spätere Änderungswünsche beim Aufbau eines Konzepterprobers. Das Gewicht der Rahmenkonstruktion beträgt ohne Anbauteile ca. 9,9 kg. Mit dem Hilfsrahmen kommt die Konstruktion somit auf ein Gesamtgewicht von 11,55 kg.



**Abbildung 32 Darstellung des finalen Rahmenkonzepts**

## **8 Konzeptfindung Hochvoltsspeichergehäuse**

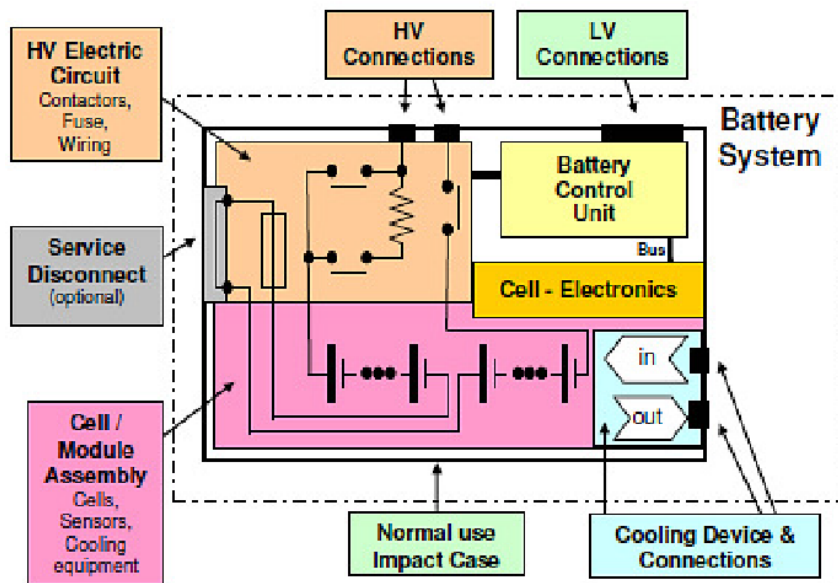
Ein zentrales Bauteil des elektrischen oder teilelektrischen Antriebs ist der elektrische Energiespeicher. Das Verhältnis der gespeicherten Energie zum Volumen und dem Gewicht bei Batterien ist im Vergleich zu normalen Treibstoff bei konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen sehr gering. Um trotzdem eine angemessene Reichweite zu erreichen, muss zur Unterbringung größerer Energiespeicher viel Bauraum geschaffen werden. Dabei kommt es auch zu einer Zunahme der Gesamtfahrzeugmasse. Zur Kompensation dieses Zuwachses soll das Potential einer Gewichtsreduktion des Hochvoltsspeichergehäuses durch die Verwendung von Faserverbundkunststoffen untersucht werden. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass die Schutzmaßnahmen der Betriebs- und Hochvoltsicherheit gewährleistet sind.

Im Folgenden soll dabei nach der in Kapitel 5 beschriebenen Methodik vorgegangen werden.

### **8.1 Funktionelle und konstruktive Randbedingungen für das HVS-Gehäuse**

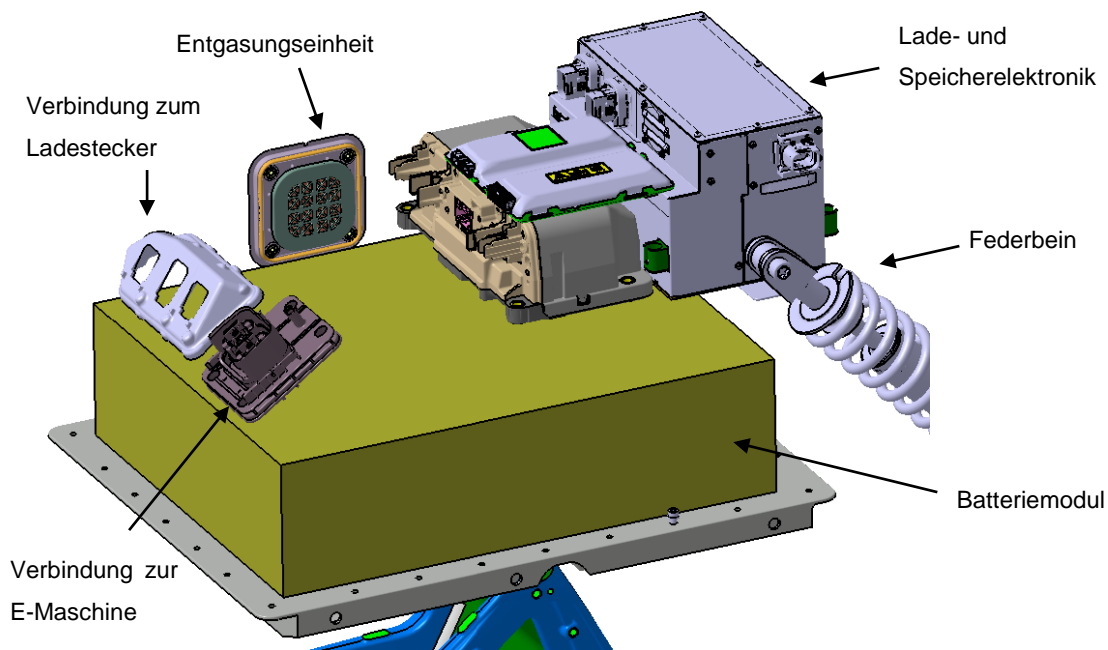
Die beiden Hauptfunktionen des HVS-Gehäuses sind zum einen die Integration und zum anderen der Schutz der elektrischen Komponenten wie des Batteriemoduls und der Lade- und Speicherelektronik. Die Anforderungen werden im folgenden Kapitel genauer erläutert.

### 8.1.1 Konstruktive Randbedingungen



**Abbildung 33 Aufbau eines Hochvoltspeichers mit Batteriemanagementsystem [8]**

Die Abbildung zeigt den grundsätzlichen Aufbau und die funktionellen Anschlüsse eines Hochvoltspeichers. In diesem Fall ist die Steuerelektronik im Gehäuse integriert. Neben den Ein- und Ausgängen für den Stromfluss, ist die Zu- und Abfuhr von Kühlmitteln dargestellt. Diese entfällt beim Konzepterprober, da es sich wie beim C-Evolution um eine Luftkühlung handelt. Die Lade- und Speicherelektronik regelt den Stromfluss zur und von den Batteriezellen.



**Abbildung 34** Hauptkomponenten des Hochvolt-speichers

Nach außen müssen die benötigten Anschlussmöglichkeiten zur Verbindung der Regelelektronik des Motors und dem Ladestecker am Roller mit dem Gehäuse vorliegen. Neben den Rahmenstreben des Hauptrahmens wird die mögliche Geometrie des Batteriegehäuses durch das Federbein grundlegend beeinflusst. Dieses wird über ein Zusatzelement mit dem Seitenprofil des Rahmens verbunden und soll somit keine strukturellen Aufgaben an den Hochvolt-speicher abgeben.

Auf eine Zu- und Abfuhr von Kühlmedien kann verzichtet werden, da die entstehende Wärme der Zellen und der Ladeelektronik über einen Luftkanal an der Gehäusewand abtransportiert werden soll.

### 8.1.2 Funktionelle Randbedingungen

Neben der Integration der Komponenten und der Sicherstellung der Anschlüsse muss das Hochvolt-speichergehäuse einige Anforderungen erfüllen. Die wichtigsten werden wie folgt näher beschrieben:

- **Dichtheit am Gehäuse und Kühler**

Da es sich in diesem Konzept um ein luftgekühltes System handelt, beschränkt sich die Dichtheit auf die Gehäusewand. Diese muss auch im Falle eines Sonderereignisses eingehalten werden. Dabei dürfen keine gefährlichen Medien oder Gase unkontrolliert ein- oder austreten. [8]

- **Hochvoltsicherheit**

Isolierende Gehäuse müssen zu jedem Zeitpunkt einen Isolationswiderstand von 5 MOhm einhalten. Des Weiteren ist ein Berührschutz gefordert. Dieser wird jedoch durch die Forderung der Dichtheit gegenüber Medien und Gasen abgedeckt. [7]

- **Beschädigung mechanischer Komponenten**

Neben der Betriebsfestigkeit müssen Sonderereignisse geprüft werden, die zu einer Beschädigung der inneren Bauteile führen könnten. In diesem Zusammenhang darf es zu keiner Verformung, Rissbildung oder zu einem Bruch des Bauteils kommen. Eine Beschädigung des Gehäuses im Zusammenhang mit den genannten Szenarien stellt die Gefahr des Aus- und Eintritts von Medien und Gasen dar und sollte unter allen Umständen vermieden werden. [8]

- **Elektromagnetische Verträglichkeit**

Um eine fehlerfreie Funktion der Elektronik innerhalb des Gehäuses gewährleisten zu können, muss dieses gegenüber elektromagnetischer Strahlung abgeschirmt werden. Dies bezieht sich auf Strahlung durch Störquellen außerhalb und durch die Elektronik innerhalb des Hochvoltsspeichers. Es darf somit weder Strahlung ungedämpft nach innen, noch von innen nach außen gelangen. [7]

- **Wärmemanagement**

Beim Auf- und Entladen der Batteriezellen entsteht viel Wärme, die abgeführt werden muss. Diese kann beispielsweise über den Fahrtwind abgeführt werden. Dabei ist jedoch auf die Anpassung des Kühlkanals durch die Integration des VKM-Packages zu achten. Ein großes Problem stellt jedoch die Kühlung der Ladeelektronik dar. Diese wird hauptsächlich im Ladeprozess und somit im Fahrzeugstillstand benötigt. Beim C-Evolution liefert ein Ventilator den benötigten Luftstrom.

- **Kein Brand oder Explosion**

Die Entstehung eines Feuers oder einer Explosion unterliegen den Sonderereignissen. Dem Druckanstieg und der darauf folgenden Explosion wird

durch die Entgasungsanlage entgegengewirkt. Eine ausreichende Temperaturbeständigkeit muss durch den „Fuel Fire Test“ abgesichert werden.[8]

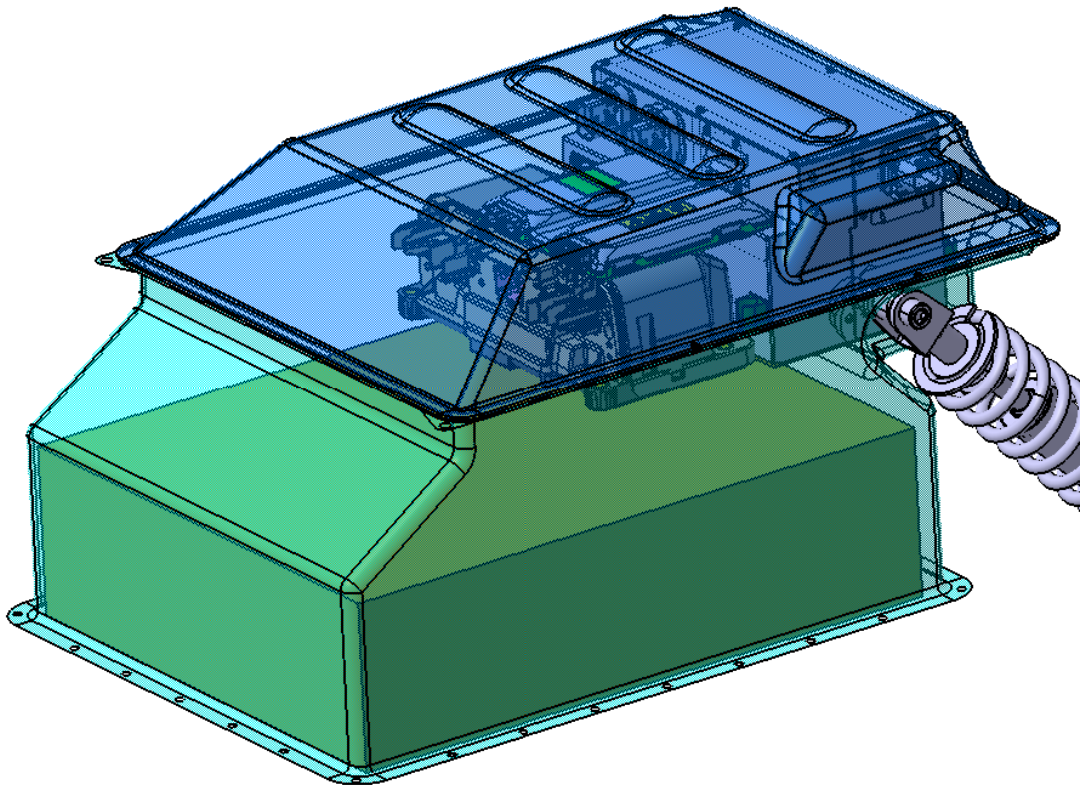
## **8.2 Auslegung des Hochvoltsspeichergehäuses**

Das folgende Kapitel wird in drei grobe Abschnitte, der Grundfunktion, der Hochvoltssicherheit im Normalbetrieb und der Absicherung der HV-Sicherheit durch Sonderereignisse unterteilt. Die Grundfunktionen beinhalten dabei den Entwurf einer Gehäusegeometrie abhängig von den integrierten Komponenten, des Wärmemanagements und der Wahl des Materials.

### **8.2.1 Geometrische Auslegung des Hochvoltsspeichergehäuses**

Abhängig von dem Inhalt des Hochvoltsspeichers und den erforderlichen Anschlüssen soll nun die Grundgeometrie erarbeitet werden. Gegenüber dem C-Evolution muss durch den Austausch zweier Batteriemodule die Kühlung angepasst werden. Ausgehend von den Wärmequellen soll dafür die nötige Wärmeabfuhr an die Umwelt analysiert werden. Abschließend muss abhängig von der Grundgeometrie und der Temperaturbelastung das passende Material gewählt werden.

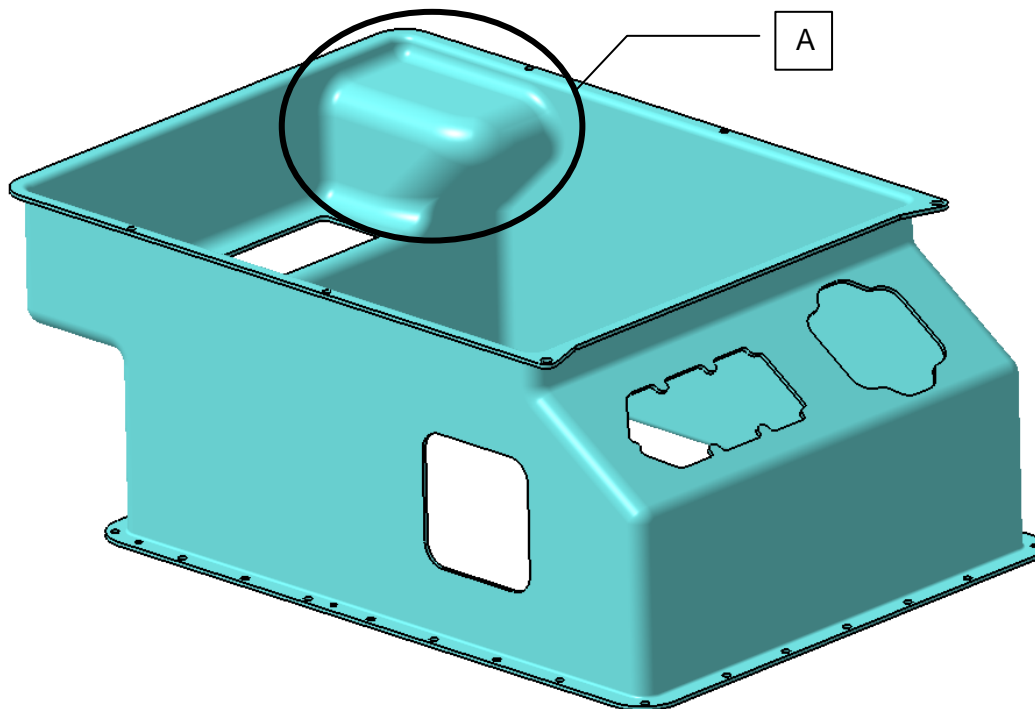
Um einen Zugang zur Regelelektronik des Gehäuses zu schaffen, muss es zweiteilig ausgeführt werden. Das Federbein liegt dezentral im linken Bereich des Behälters, weshalb eine Aussparung vorgesehen werden muss. Aufgrund des Anschlusses der Verkabelung mit der Ladeelektronik muss der Bereich darüber wieder abgeschlossen werden. Dadurch lässt sich ein Hinterschnitt in der Konstruktion nicht vermeiden (Abbildung 36), durch den die Fertigungsverfahren des Faser-Kunststoff-Verbundes und somit auch die Wahl des Matrixsystems deutlich eingeschränkt werden.



**Abbildung 35 Grundgeometrie des Hochvoltsspeichergehäuses**

Die Verwendung von Faserkunststoff-Verbunden verlangt große Radien an Bauteilkanten, damit sich das Material richtig an die Werkzeugform anpassen kann. Sollte dies nicht der Fall sein, kann dies zu einem Verzug der Faser, zu unerwünschten Harzstellen oder zu Bläschenbildung führen. Des Weiteren müssen abhängig von der Auszugsrichtung des Werkzeuges Auszugsschrägen integriert werden, die für eine problemlose Entformung sorgen sollen.

Aufgrund der Formfreiheit, welche die Verarbeitung von Faserverbundkunststoffe liefert, können an großen Flächen, wie z.B. der Deckeloberseite Versteifungen angebracht werden [16].



**Abbildung 36 Integration der Gehäuseanschlüsse**

Eine Anbindung der Anschlüsse und Zusatzkomponenten kann über die Freiflächen einfach durchgeführt werden. Die Konturen und Dichtflächen müssen nach dem Entformen nachbearbeitet werden, da sich die Genauigkeit maßgeblich auf die Montierbarkeit und Dichtheit auswirkt. Die Verbindung mit dem Kühlluftschacht wird, wie später in Abbildung 38 dargestellt, dabei durch einen Flansch umgesetzt. Da das Federbein in der Konstruktion einen Hinterschnitt bewirkt, welcher in Abbildung 36 im Bereich A markiert ist, wird die Entformungsrichtung nicht senkrecht zur Deckelebene sein. Dies hat den Vorteil, dass eine Verschraubung mit einer Mutter auf der Gegenseite erfolgen kann. Eine aufwendige Integration von Inserts lässt sich somit umgehen. Diese müssen im Lagenaufbau mit eingesetzt werden und erhöhen somit die Komplexität der Herstellung.

Sollte es zu einem späteren Entwicklungszeitpunkt zu einer Umpositionierung der Federbeinanbindung kommen, kann die Geometrie des unteren Gehäusebereiches deutlich vereinfacht werden. In diesem Fall wäre die Auslegung des Flansches zur Anbindung an den Kühlluftschacht auf der Unterseite in Richtung Innenseite zu erwägen. Somit ließe sich eine Auszugsrichtung in z-Richtung darstellen. Abhängig von der Stückzahl kommen dann weitere Herstellungsverfahren in Frage, die auch den Einsatz weiterer Materialarten ermöglichen.

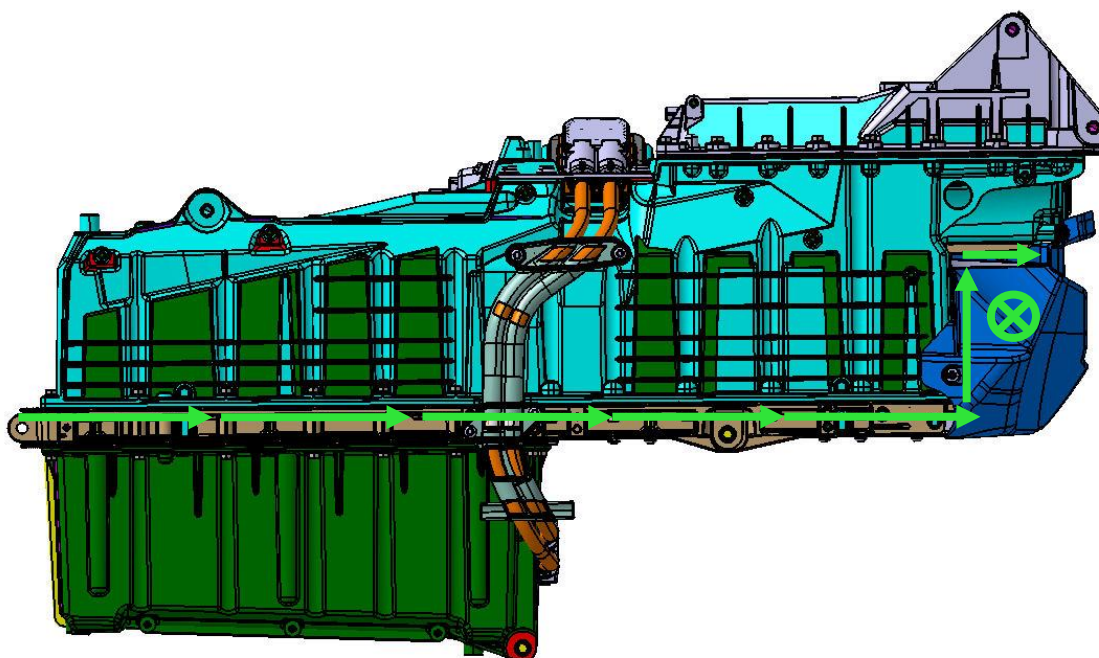


### 8.2.1.1 Wärmemanagement

Der Batteriespeicher des C-Evolution wird luftgekühlt. Dabei wird der Fahrtwind durch den Kühlluftschacht vom vorderen Teil nach hinten befördert um Abwärme aufzunehmen. In der folgenden Abbildung ist dabei der Kühlvorgang dargestellt. Die Hauptwärmequellen sind die Batteriemodule und die Ladeelektronik.

Die Batteriezellen heizen sich während des Fahrbetriebes auf, wobei die Temperatur mit bis zu 50°C nur 30°C über der durchschnittlichen Umgebungstemperatur liegt. Konstruktiv sind die Batteriezellen mit dem Kühlluftschacht in direktem Kontakt, so dass der größte Teil der Verlustwärme über den Kühlluftschacht abgegeben wird. Der Einsatz von Faserkunststoffverbunden für das Batteriegehäuseoberteil schränkt den Kühlvorgang demzufolge nicht ein.

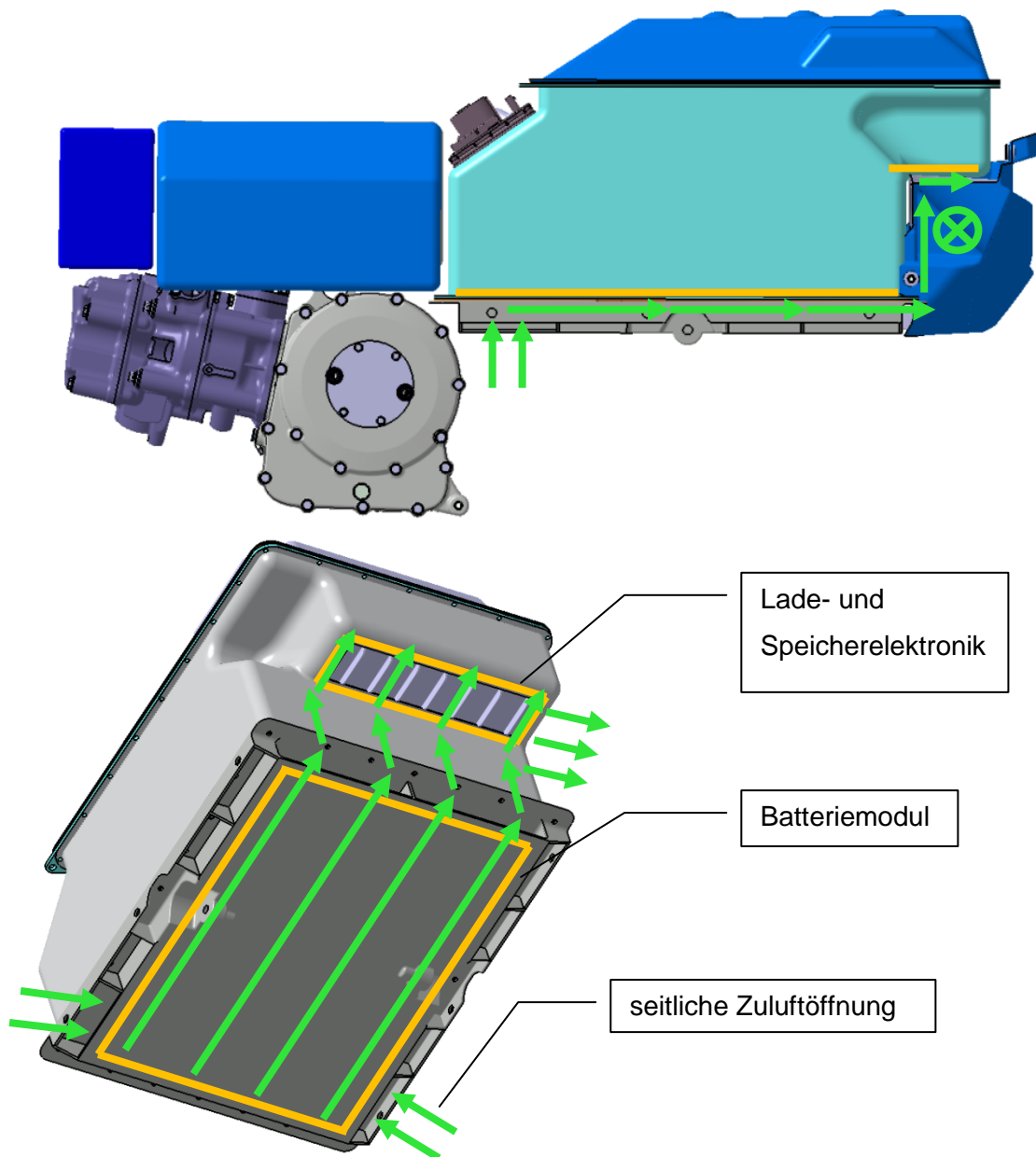
Problematischer ist die Kühlung der Ladeelektronik. Diese ist bei der Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom laut Erfahrungswerten von BMW mit einem Verlust von bis zu 5% behaftet, der in Wärme umgesetzt wird. Die Kontaktstellen erreichen dabei eine Temperatur von ca. 100°C. Hinzu kommt, dass der Fahrtwind beim Ladevorgang nicht genutzt werden kann. Um diesen zu ersetzen, befindet sich im hinteren Teil des Fahrzeuges ein Ventilator, der für die nötige Fördermenge sorgt. [21]



**Abbildung 37 Verlauf des Kühlluftstromes beim C-Evolution**

Dieses Kühlkonzept lässt sich nicht ohne Anpassungen auf das Hybridkonzept übertragen. Im vorderen Bereich des Fahrzeuges liegt die Range-Extender-Einheit, die

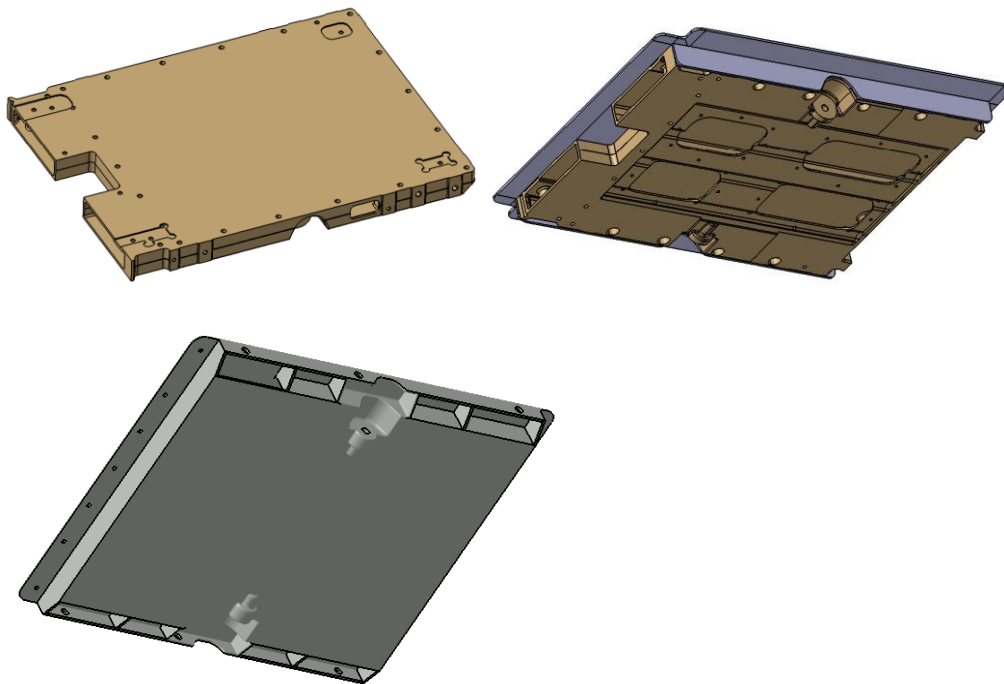
selbst als Wärmequelle fungiert. Um eine möglichst große Temperaturdifferenz zwischen Luftstrom und Kühlplatte zu generieren, muss die Kühlluftführung überarbeitet werden.



**Abbildung 38 Luftstromverlauf des Kühlkonzeptes beim Hybriderprober**

Dabei wird die Kühlluft über seitliche Öffnungen im Gehäuseboden zugeführt (Abbildung 38). Will man eine aufwändige Rohrführung vermeiden, muss die Karosserie an diesem Punkt angepasst werden. Eine einfache Modifikation des Kühlluftschachts des C-Evolution lässt sich somit aus mehreren Gründen nicht mehr umsetzen. Beim Elektroscooter verläuft die Kabelverbindung der oberen und der

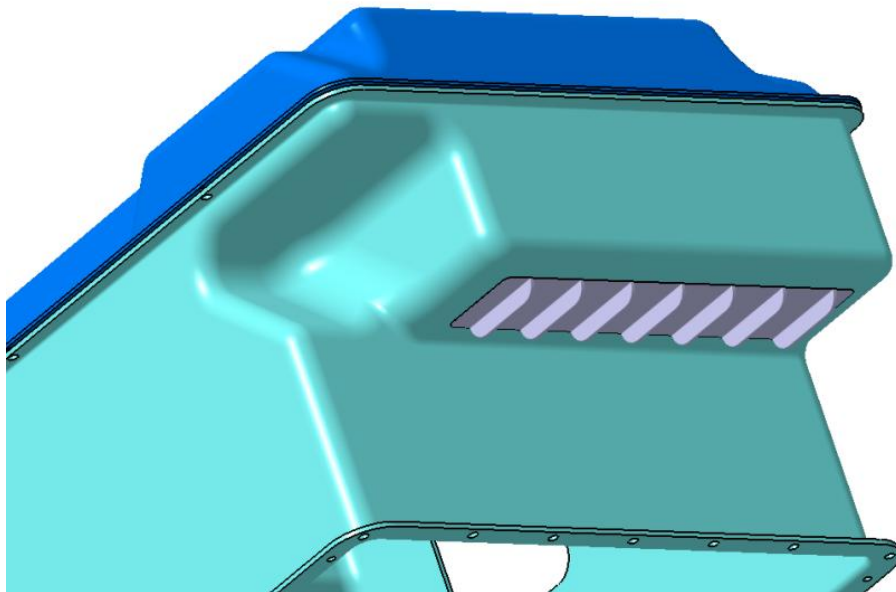
unteren Zelle durch den Kühlluftschacht. Eine Übernahme des Bauteiles setzt eine zusätzliche Abdichtung der Öffnung und der alten Bohrungen voraus.



**Abbildung 39 Anpassung des Kühlluftschachts abhängig vom Kühlluftkonzept des Hybriderprobers**

Eine zusätzliche Platte, die wie rechts in der Abbildung 39 angeschraubt wird, dichtet die alte Kühlplatte zwar ab, ermöglicht aber keine seitliche Luftzuführung.

Für das neu umzusetzende Bauteil bietet sich neben einer Schweißkonstruktion die Herstellung mittels Rapid Prototyping an. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit komplexe Bauteile, ohne hohe Werkzeugkosten herstellen zu lassen. Dies kommt aus Kosten und Zeitgründen jedoch nur für geringe Stückzahlen, wie für den Prototypenbau in Frage. In Anbetracht der potentiellen Serienproduktion würde sich gleich wie beim C-Evolution ein Gießverfahren anbieten.



**Abbildung 40 Kühlung der Ladeelektronik**

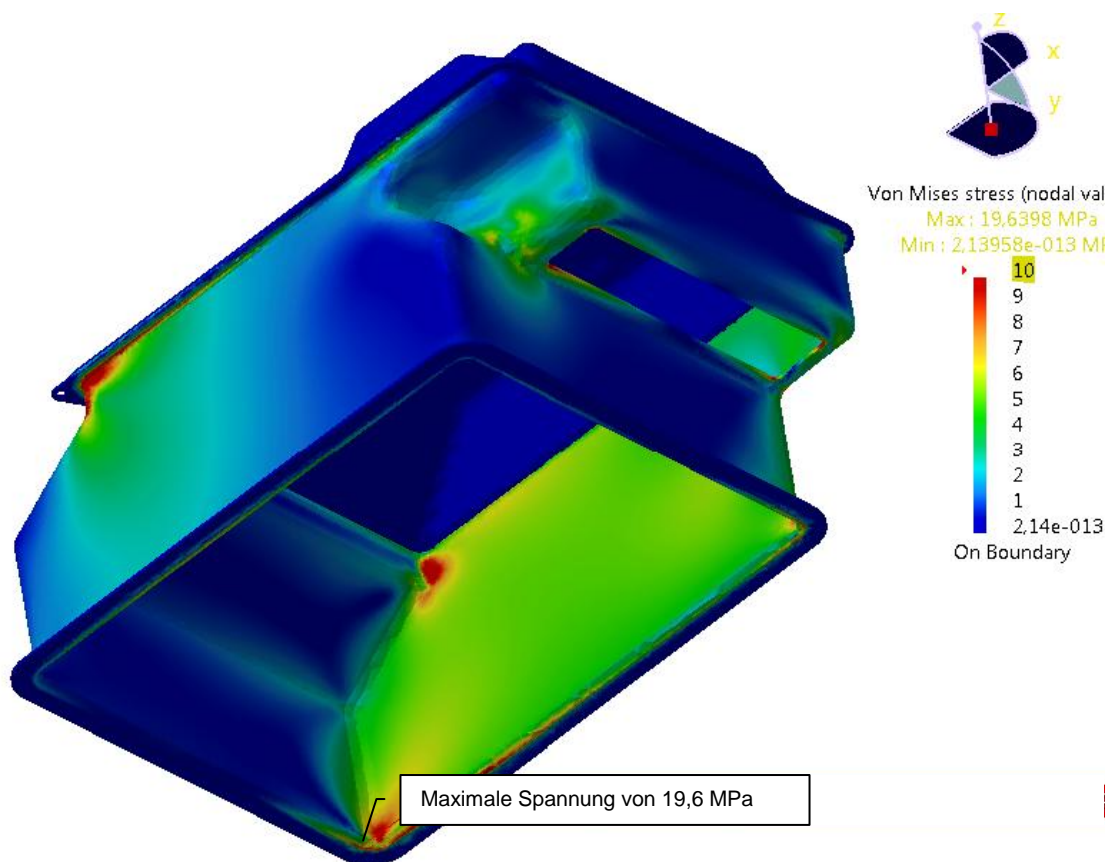
Wie bereits angemerkt, übernimmt die Ladeelektronik einen Großteil der Wärmeproduktion. Anders als beim Aluminium ist der Wärmeübergang bei Faserkunststoffverbunden ohne Additive nur sehr gering. Deshalb muss eine Aluminiumplatte mit Kühlrippen in die Gehäusewand integriert werden.

Wie bei den anderen Anschlüssen muss dabei die Dichtheit gewährleistet werden. Eine gute Möglichkeit ist die frühzeitige Integration in den Herstellungsprozess des Gehäuses. Im Fall eines Spritzgusses, kann die Kühlplatte vom Material ummantelt werden. Handelt es sich um ein Gewebematerial, muss das Bauteil durch mehrere Lagen mit einem geringen Versatz umschlossen werden [22]. Dieses Verfahren gestaltet sich als sehr aufwendig und findet deshalb hauptsächlich im Motorsport Anwendung. Um die Fertigungskosten des Gehäuses gering zu halten, empfiehlt sich eine Verschraubung der Kühlplatte.

### **8.2.1.2 Wahl des Gehäusematerials**

Mit Hilfe des zuvor definierten Lastfalls I Bodenwelle kann die strukturelle Entkoppelung des Hochvoltsspeichergehäuses vom Hauptrahmen überprüft werden. Der Behälter ist auf der Unterseite über den Flansch mit dem Kühlluftschacht verbunden. Zusätzlich befinden sich am Flansch zum Deckel auf jeder Seite drei Anschraubpunkte mit dem Rahmen. Als Materialwerte wurden die eines Glasfaser-

Kunststoff-Verbundes verwendet. Die Randbedingungen und Annahmen entsprechen denen in Kapitel 7.6.1.



**Abbildung 41 FEM-Berechnung der Belastung des HVS-Gehäuses**

Betrachtet man die Spannungsverteilung, ist zu erkennen, dass diese im Vergleich zu den Spannungen am Rahmen im Kapitel 7.6.1 sehr gering ausfällt. Insofern kann von einer quasi vollständigen strukturellen Entkoppelung der Bauteile ausgegangen werden.

Die Größe der Spannungen ist abhängig von den verwendeten Materialdaten und den Querschnitten. Die Berechnung liefert eine gute Abschätzung der auftretenden Spannungen und der kritischen Stellen durch die maximale Belastung.

Daher wird die Gehäusekonstruktion im Wesentlichen durch die äußeren Sonderereignisse bestimmt. Der entscheidende Faktor ist die Absicherung gegen den äußeren Impact. Die Betrachtung der thermischen Sonderereignisse, wie den „fuel fire test“ und dem „thermal runaway“, werden im Anschluss separat im Detail betrachtet.

Im Folgenden soll nun das geeignete Material ausgewählt werden. In dieser Arbeit wird dabei die Verwendung von Faserkunststoff-Verbunden angestrebt und untersucht.

Hierbei werden die Eigenschaften unterschiedlicher Matrix-Faser-Verbunde untereinander verglichen. Abhängig vom geeigneten Fertigungsverfahren und den Randbedingungen, wie der Verarbeitbarkeit und den thermischen Eigenschaften wird eine Entscheidungsmatrix aufgebaut.

Die Betrachtung des geeigneten Fasertyps beschränkt sich im folgenden Kapitel auf organische und anorganische Materialien. Dabei werden vorerst die Eigenschaften der meist verbreiteten Werkstoffe, wie Kohlenstoff, Aramid, Innegra und Glas erläutert.

### **Kohlenstofffasern**

Kohlenstofffaser weisen gegenüber Glas, Aramid oder Innegra sehr gute Eigenschaften auf.

- + Mit einer geringen Dichte von ca.  $1,8 \text{ g/cm}^3$  liegt die Faser deutlich unter der von Glas. Einen niedrigeren Wert erreicht dabei nur Aramid.
- + Eine sehr hohe Festigkeit und ein hoher Elastizitätsmodul erhöhen das Leichtbaupotential maßgeblich. Damit lassen sich hohe Steifigkeitswerte bei geringem Materialeinsatz erzielen. Die Abstufung der Festigkeitsklassen ermöglicht dem Konstrukteur eine optimale Auslegung der Konstruktion.
- + Neben den Festigkeitswerten weist das Material ein sehr niedriges Ermüdungsverhalten auf und gewinnt einen bedeuten Vorteil gegenüber metallischen Werkstoffen wie Aluminium.
- + Beim Verlauf im Spannungs-Dehnungs-Diagramm, bewegt sich der Werkstoff im elastischen Bereich linear und hat zur Bruchdehnung hin progressive Eigenschaften.
- + Unterdessen bietet das Material eine hohe Resistenz gegenüber Säuren und Alkalien.
- Bei der Konstruktion ist zu beachten, dass Eckradien deutlich größer als bei Glasfasern auszulegen sind.
- Die Kosten für die Faser sind sehr hoch. Folglich muss geprüft werden, ob die Festigkeitswerte benötigt werden.
- Bei der Anbindung mit metallischen Bauteilen muss sehr auf die Kontaktkorrosion geachtet werden.
- Der ausschlaggebende Nachteil im Zusammenhang mit dem Hochvoltsspeichergehäuse ist die geringe Bruchdehnung des Materials. Für den Impact ist ein später Bruch mit vorhergehender plastischer Verformung erwünscht. Zusätzlich ist das Bruchverhalten sehr spröde. Ferner sind

Beschädigungen oft nicht zu erkennen und müssen durch aufwendige Verfahren ermittelt werden. So kann es z.B. nach einem Schlag zur Delamination kommen, die optisch nach außen keine Spuren hinterlässt. [22]

### **Aramidfasern**

Aramidfasern finden heutzutage häufig Anwendung im Bereich gewichtssparend ausgelegter Bauteile, die eine hohe Bruchdehnung benötigen. Oft werden diese aufgrund des guten Crashverhaltens in den Lagenaufbau integriert. Begründet der frühen Markteinführung liegen viele Untersuchungen und Ergebnisse vor. Das Material wird dabei häufig als Alternative zu GFK/CFK diskutiert. Die Eigenschaften der Faser sollen nachfolgend dargestellt werden.

- + Mit einer Dichte von  $1,45 \text{ g/cm}^3$  zählt das Material zu den leichtesten Faserwerkstoffen. Dies ermöglicht einen hohen Grad an Leichtbau. Somit ist besonders gegenüber der Konstruktion mit GFK eine deutliche Gewichtsreduktion möglich. Die Aramidfaser ist dabei ca. 40% leichter als die aus Glas.
  - + Bei einem fast doppelt so großen Elastizitätsmodul, lässt sich eine größere Zugfestigkeit gegenüber GFK realisieren. Dies gilt nur in Faserrichtung, da sich das Material wie die Kohlenstofffaser stark anisotrop verhält.
  - + Der größte Vorteil gegenüber den anderen Fasertypen für die Konstruktion eines Hochvoltsspeichergehäuses zeigt sich in der hohen Zähigkeit. Diese wirkt sich sehr positiv bei Impacts aus. Des Weiteren kann sie in den Lagenaufbau integriert werden, um eine Rissausbreitung zu vermeiden oder zu beschränken. Aufgrund dieser Eigenschaften findet das Material viele Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Schutzkleidung oder zur Verbesserung des Crashverhaltens der gefährdeten Bauteile im Motorsport.
  - Aufgrund der zu vermeidenden hohen Wasseraufnahme muss besonders auf die Auslegung des Matrixsystems geachtet werden.
  - Die hohe Zähigkeit erschwert das Preprocessing. Zuschnitte können oft mit nur niedriger Qualität erfolgen.
  - Ein großer Nachteil der Aramidfaser ist der hohe Preis. Insbesondere als Alternative zu GFK kann es zu deutlich höheren Herstellungskosten kommen.
- [22]

### **Glasfaser**

Eine günstige Variante der Faserwerkstoffe, stellt Glas dar. Glasfaser liegt preislich deutlich unter der Carbon- und der Aramid-Faser. Neben der Konstruktion für Strukturbauteile findet das Material aufgrund seiner guten Isolationseigenschaften häufig Anwendung in der Elektroindustrie. Im Folgenden sollen die Gesichtspunkte, die für den Einsatz als Gehäusematerial sprechen, dargestellt werden.

- + Sehr gute thermische und elektrische Isolationsfähigkeit. Es ist besonders in Bezug auf die Anforderung der Hochvoltsicherheit zu empfehlen.
- + Glas ist vollkommen feuerfest. Geschwächt wird das Argument jedoch durch die geringe thermische Belastbarkeit der meisten Harzsysteme.
- + Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm verläuft die Kurve bis zum Bruch linear, dadurch entsteht ein ideal elastisches Verhalten. In der Nähe der Verformungsgrenze brechen die einzelnen Filamente. Mit Zerstörung der ersten Fasern ist ein Versagen zu erwarten. Durch die Transparenz der meisten GFK-Lamine, lassen sich Beschädigungen gut erkennen.
- + Ähnlich wie beim Aramid weist die Glasfaser eine sehr gute Bruchzähigkeit auf und ist somit bei einer Auslegung auf eine Belastung durch einen Impact zu befürworten, wenn man die Energieabsorption durch das Material anheben will.
- Negativ ist dabei allerdings der niedrige Elastizitätsmodul. In Kombination mit der Matrix wird dieser weiter reduziert. [22]

### **Innegra S**

Seit 2009 wird die Faser Innegra S auf Olefinbasis hergestellt und findet in vielen Bereichen, in denen ein Schutz gegenüber Impacts durch eine hohe Energieaufnahme gefordert ist, Anwendung. Das Material ist derzeit noch gering verbreitet und nur eingeschränkt verfügbar. Da es jedoch für weitere Entwicklungsschritte in Frage kommen kann, sollen trotzdem die Vor- und Nachteile gegenüber anderen Werkstoffen aufgezeigt werden.

- + Innegra S zeichnet sich durch eine sehr hohe Schlagzähigkeit aus und kann bei Zugabe zu anderen Materialien das Potential der Energieaufnahme erhöhen.
- + Aufgrund der hohen Duktilität, kommt es zu einer plastischen Verformung. Ein bevorstehender Bruch kann somit vorhergesagt werden und es besitzt keine Spröbrucheigenschaften.
- + Die Aufnahme von Flüssigkeiten ist sehr gering.



- + Mit einer Dichte von  $0,84 \text{ g/cm}^3$  kann eine deutliche Gewichtseinsparung gegenüber GFK erreicht werden.
- + Im Spannungsdehnungsverlauf ist der Anstieg der Kurve ähnlich dem der Glasfaser. Die maximale Dehnung liegt jedoch deutlich über der des Glases, weshalb die Lagen nach der Vorauslegung mit GFK durch Innegra ausgetauscht werden können.
- + Ein weiterer Vorteil des Materials ist, dass es bei ähnlicher Charakteristik gegenüber der Aramidfaser deutlich kostengünstiger ist.
- Problematisch ist dabei die deutlich höhere Dehnung durch thermische Belastung gegenüber Glas und Aramid-
- Gleichzeitig werden die mechanischen Eigenschaften deutlich durch die Temperatur beeinflusst und eignen sich somit nicht als Randlagen beim Hochvoltsspeichergehäuse-
- Der Elastizitätsmodul ist sehr gering. Die benötigte Steifigkeit muss somit durch Zusatzmaterialien gewährleistet werden. [23]

Basierend auf den genannten Eigenschaften der Materialien und der Beschränkung auf Faser-Kunststoffe soll nun durch eine Bewertungsmatrix die geeignete Faser für den Verbund bestimmt werden. Die Kriterien werden dabei abhängig von den Kosten, Gewicht, den Eigenschaften gegenüber der konstruktiven Auslegung und der Erfüllung der Anforderungen gegenüber der Hochvoltssicherheit getroffen. Sowohl die Gewichtung  $g$  als auch die Bewertung  $b$  werden mit 1 bis 5 bewertet. In der Skala aufsteigende werden dabei als wichtiger, beziehungsweise vorteilhafter dargestellt. Als Ergebnis wird die Gewichtung  $g$  mit der Bewertung  $b$  multipliziert. Das höchste Produkt stellt dabei die beste Bewertung dar.

**Tabelle 8 Bewertungsmatrix zur Faserwahl**

		Kohlenstoff		Aramid		Glas		Innegra S	
	g	b	e	b	e	b	e	b	e
<b>Kosten</b>	5	1	5	2	10	5	25	3	15
<b>Gewicht</b>	4	4	16	5	20	3	12	5	20
<b>Schlag- zähigkeit</b>	5	1	5	5	25	4	20	5	25
<b>Temperatur- beständigkeit</b>	2	5	10	1	2	3	6	1	2
<b>Elektrische Isolierung</b>	3	1	3	4	12	4	12	4	12
<b>Konstruktion</b>	1	1	1	2	2	5	5	1	1
<b>Gesamtergebnis</b>			40		71		80		75

Bei der Bewertung wurden die Kriterien Kosten und Schlagzähigkeit priorisiert.

Die Verwendung von CFK wird ausgeschlossen, da durch die geforderte Trennung von Funktion und Struktur eine steife Konstruktion des Batteriebehälters die Spannungen im Behälter erhöhen würde und somit kann das Potential des Materials nicht gut ausgenutzt werden. Gleichzeitig erweist sich das spröde Bruchverhalten als ungünstig und wird somit im Kriterium Schlagzähigkeit mit der Note eins als schlecht bewertet. Bei der Anbindung mit Stahl und Aluminium, wie es in der Konstruktion der Fall ist, kann es zu Korrosionsproblemen kommen. Dies führt zu einer aufwendigeren Gestaltung der Konstruktion und wird dadurch auch hier mit der Note eins schlechter bewertet. Einerseits ist die elektrische Leitfähigkeit des Kohlenstoffs für die elektromagnetische Schirmung gewünscht, allerdings wird gleichzeitig eine elektrische Isolierung durch die nicht leitende Kunststoffmatrix verlangt. Dementsprechend ist es einfacher, einen isolierenden Werkstoff zu verwenden, der über eine Anpassung die Schirmung aufrechterhält.

Aramid ist hinsichtlich der bevorzugten Eigenschaften für ein Hochvoltsspeichergehäuse sehr geeignet. Es besitzt die höchste Schlagzähigkeit und gleichzeitig die geringste Dichte. Die Bewertung der beiden Kriterien fällt somit mit der höchst möglichen Punktzahl von fünf aus. Die Verarbeitung und die frühe Abnahme der mechanischen Eigenschaften unter Temperatureinfluss sprechen jedoch gegen das Material. Einen

großen Nachteil gegenüber dem oft verglichenen Glas stellen die Kosten dar, die um einiges höher sind.

Eine günstigere Alternative mit ähnlichen Eigenschaften ist Innegra S. Die schlechte Verfügbarkeit spricht jedoch gegen eine Verwendung für einen Prototypen. Sollte die Verwendung des Materials jedoch erwünscht sein, kann beim Erprobungsfahrzeug mit Aramid gearbeitet werden und in der weiteren Konzeptphase substituierend Innegra S in Betracht gezogen werden.

Beim Glas überschneiden sich die Stärken mit den Anforderungen an ein Hochvoltsspeichergehäuse am besten. Zusätzlich bietet es ein sehr gutes Verhältnis zwischen Preis und Gewicht. Die Dichte liegt zwar deutlich über dem der C- und Aramidfaser, allerdings erfordern die vorhandene elektrische Isolierung und die Temperaturbeständigkeit geringere Zusatzmaßnahmen. In der Bewertungsmatrix liefert Glas als Faser den besten Kompromiss zwischen Eigenschaften und Kosten.

Die Wahl des Matrixsystems ist deutlich aufwändiger. Die Systeme variieren in einer Vielzahl von Merkmalen. Bei der Wahl der Matrix sollte man grundsätzlich folgendermaßen vorgehen. Prinzipiell sollte darauf geachtet werden, Kunststoffe zu verwenden, die im Unternehmen vorhanden sind, oder bereits verwendet werden. Diese sind bereits preislich akzeptiert und von der Qualitätssicherung freigegeben. Es steht auch ein größeres Know How zur Verarbeitung und den genauen Eigenschaften des Materials zur Verfügung. Wird das System bereits in vielen Bauteilen innerhalb und außerhalb des Unternehmens verarbeitet, sind viele konstruktive Erfahrungswerte vorhanden. Diese geben der Konstruktion Sicherheit und somit ergibt sich eine qualitativ hochwertigere Lösung. Ist dies jedoch nicht möglich, muss man sich bei der Auswahl an mehreren Kriterien orientieren. Eine Eingrenzung erfolgt anhand des Preises, der Werkstoffeigenschaften (Mechanische Eigenschaften, Temperaturgrenzen, elektrischen Eigenschaften, Feuerfestigkeit) und besonders des Fertigungsverfahrens (Viskosität, Taktzeit, Härtungstemperatur). [22] Oft verwendete Matrixsysteme sind Duroplasten, Thermoplasten und Elastomere. Die folgende Tabelle zeigt unterschiedliche Herstellungsverfahren, wirtschaftlich sinnvolle jährliche Stückzahlen und dabei in Frage kommenden Matrices.

**Tabelle 9 Stückzahlen und Matrices abhängig vom Herstellungsverfahren[24]**

Herstellungsverfahren	Matrixsysteme	Stückzahlen pro Jahr
Handlaminieren	Duroplaste	ca. 1 - 100
Vakuuminjektion	Duroplaste/ (Thermoplaste)	ca. 10 - 10.000
RTM	Duroplaste/ Elastomere	ca. 100 - 20.000
SMC-Pressen	Duroplaste	ca. 5.000 - 500.000
GMT/ LFT-Pressen	Thermoplaste	ca. 8.000 - 1.000.000
LFT-Spritzguss	Thermoplaste	ca. 8.000 - 1.000.000

Im Motorradbau hat man es im Vergleich zum PKW in der Regel mit kleinen Serienstückzahlen zu tun. Dadurch wird die Auswahl des Matrixsystems deutlich einschränkt, da sich hohe Investitionen nicht rechnen.

Zudem werden vom Konzepterprober nur wenige Fahrzeuge produziert, wodurch sich die Fertigung durch das Handlaminieren und der Aushärtung im Autoklaven durchsetzt.

Bauteile die durch das Resin Transfer Moulding Verfahren oder durch die Vakuuminjektion hergestellt werden haben ähnliche Eigenschaften zu Bauteilen die handlaminiert wurden. Dadurch lassen sich die Eigenschaften des möglichen Serienprodukts beim Konzepterprober gut widerspiegeln.

Angesichts der wirtschaftlich möglichen Stückzahl ist die Verwendung von Duroplasten als Matrixsystem für den Konzepterprober zu favorisieren. Grundsätzlich ist bei der Vakuuminjektion ein Thermoplast als System möglich, jedoch muss die Viskosität durch Additive zuvor heraufgesetzt werden.

Die mechanischen Eigenschaften der Faser-Kunststoff-Verbunde sind stark temperaturabhängig. Bei der Wahl der Matrix muss somit darauf geachtet werden, dass die Betriebstemperatur innerhalb der Einsatzgrenzen liegt. Kunststoffe besitzen prinzipiell zwei Zustandsbereiche. Der Wechsel vom energieelastischen zum entropieelastischen Bereich wird durch die Glasübergangstemperatur (Tg) definiert. Dabei ist ein deutlicher Sprung der thermodynamischen und mechanischen Eigenschaften zu beobachten. Diese Grenztemperatur ist bei amorphen Thermoplasten und Duroplasten zu beobachten. Weist die thermoplastische Matrix eine teilkristalline Struktur auf, kann diese eine Belastung bis unter die Schmelztemperatur unabhängig von der Glasübergangstemperatur ertragen. Somit ist

bei einer Auslegung bei Duroplasten und amorphen Thermoplasten auf die Glasübergangs- und bei teilkristallinen Strukturen auf die Schmelztemperatur zu achten. Beim Handlaminierten kommen duroplastische Matrices in Frage. Im Folgenden soll eine Auswahl von Systemen dargestellt werden, die aktuell in Glasfaserprepregs verarbeitet werden. Dies ermöglicht eine kostengünstige und einfache Beschaffung der Materialien. Zusätzlich bietet dies den Vorteil, dass ausreichend Materialdaten zur konstruktiven Auslegung vorhanden sind. Die Gewebestruktur eignet sich besser als ein Gelege für den Impact, da die Gefahr der Lagentrennung geringer ausfällt.

**Tabelle 10 Glasübergangstemperatur von Harzsystemen für Prepregs mit einer ausreichenden Temperaturbeständigkeit gegenüber dem Normalbetrieb [25]**

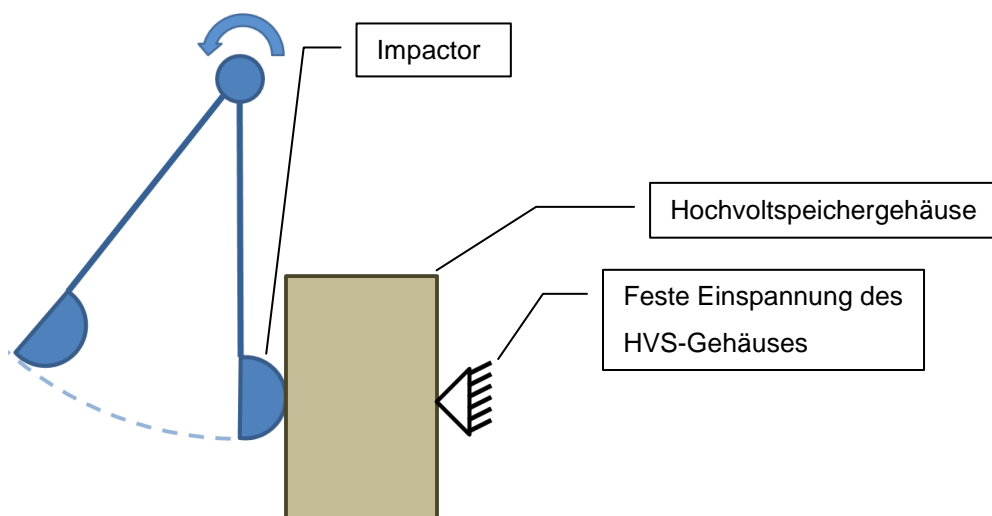
Prepreg	Harzsystem	Tg	Kommentar
HexPly	M35-4	200 °C	Hohe Klebrigkeit
	M81	210 °C	Thermisch und dynamisch belastete Bauteile
TEXIPREG	EC551(CE)	300 °C	Sehr hohe Temperaturfestigkeit
	FF562(PH)	>180 °C	selbstverlöschend
	EF451(EP)	160°	selbstverlöschend

Die Hauptwärmequellen innerhalb des Hochvoltsspeichers liegen beim Batteriemodul und der Ladeelektronik. Die Batterien werden über Kontaktstellen mit dem Kühlluftschacht befestigt und sind mit Temperaturen von bis zu 40°C eher gering. Innerhalb der Ladeelektronik kommt es zu 120°C, wobei sich die Kontaktstellen mit dem Gehäuse laut Messungen auf ca. 100°C erhitzen. [21] Somit weisen alle der genannten Matrices in Kombination mit einem Glasfasergewebe eine ausreichende Temperaturbeständigkeit im Normalbetrieb auf. Das System M35-4<sup>3</sup> hat jedoch einen weiteren Vorteil. Die hohe Klebrigkeit vermindert die Gefahr einer Lagentrennung. Diese kann durch die Belastung infolge eines Impacts hervorgerufen werden.

Der Lagenaufbau des Hochvoltsspeichers wird aufgrund der strukturellen Entkoppelung abhängig vom Impacttest ausgelegt. Er dient der Absicherung der Crashesicherheit. Hierbei handelt es sich um eine Pendelschlagprüfung, die für Zwei- oder Dreiräder von der „Society of Automotive Engineers“ durch die Norm SAE J 1241 zur Tankschutzprüfung festgelegt wurde. Dieser Test ist grundsätzlich auf Flüssigkeitstanks für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren ausgelegt, wird jedoch bei

<sup>3</sup> Siehe Anhang B

BMW Motorrad auch auf Hochvoltspeichersysteme übertragen. Im Test wird das Kippen des Motorrades bei langsamer Fahrt nachgestellt. Dabei liegt das Knie des Fahrers zwischen dem Boden und dem Tank. Dadurch kommt es zu einer annähernd punktuellen Kraft, die durch einen Impactor in Form einer Halbkugel mit einem Durchmesser von 8,9 cm substituiert wird. Das Gewicht des Pendels beträgt 36 kg. Die Auslenkung wird so eingestellt, dass der Impactor dann mit einer Energie von 450 Joule in lateraler Richtung auf den Tank auftrifft. Dabei kommt es zu einer Geschwindigkeit von 5 m/s am Kontaktpunkt. [26]



**Abbildung 42 Schematischer Prüfungsaufbau des Pendelschlagversuches nach SAE J 1241**

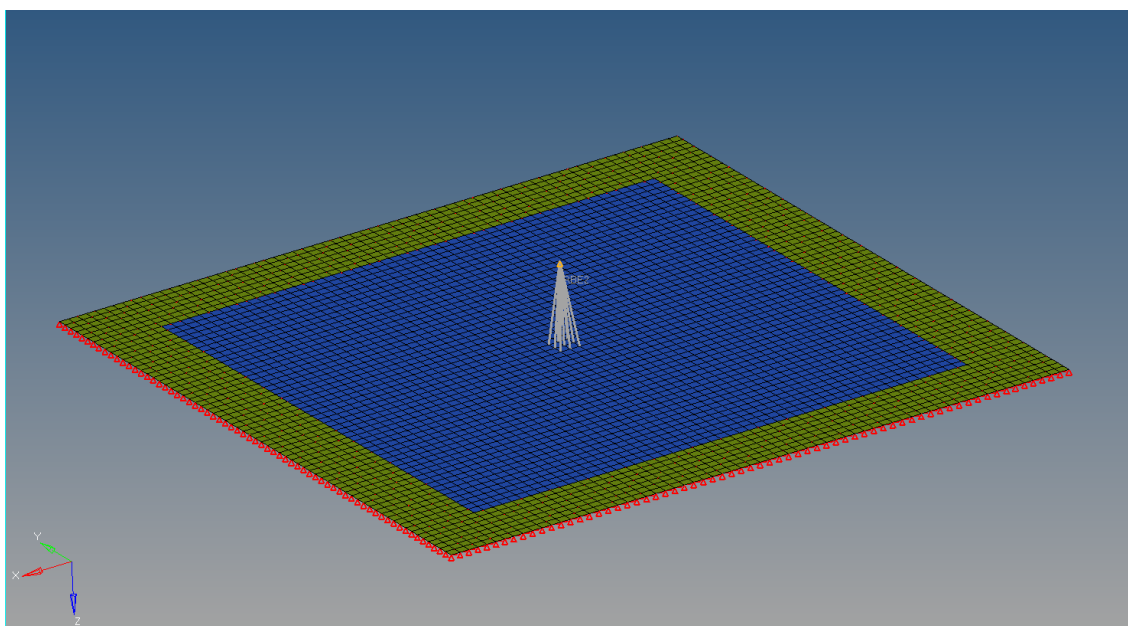
Um den nötigen Lagenaufbau bestimmen zu können, wird eine numerische Berechnung durchgeführt. Da sich die endgültige geometrische Form im Lauf der Entwicklung noch ändern kann, soll eine möglichst Geometrie-unabhängige Berechnung/Bewertung durchgeführt werden. Dafür wird die Seitenfläche des Hochvoltspeichergehäuses durch eine ebene quadratische Platte dargestellt. Diese soll Ergebniswerte über den Lagenaufbau und somit eine spätere Abschätzungsmöglichkeit für neue Gehäusegeometrien liefern. Eingespannt wird die Prüfplatte analog dem Prüfaufbau für den Pendelschlag. Die Materialdaten wurden an das beim potentiellen Hersteller lagernde Prepreg HexPly M49/32%/600S8/GE-300<sup>4</sup> angepasst. Dieses Prepreg hat ähnliche Materialwerte wie das gewählte Material und ermöglicht aufgrund der schnellen Verfügbarkeit eine Validierung der Berechnung durch den Pendelschlagtest. Die Ergebnisse können durch die fast gleichen Kennwerte auf das gewählte Material übertragen werden.

---

<sup>4</sup> Siehe Anhang A

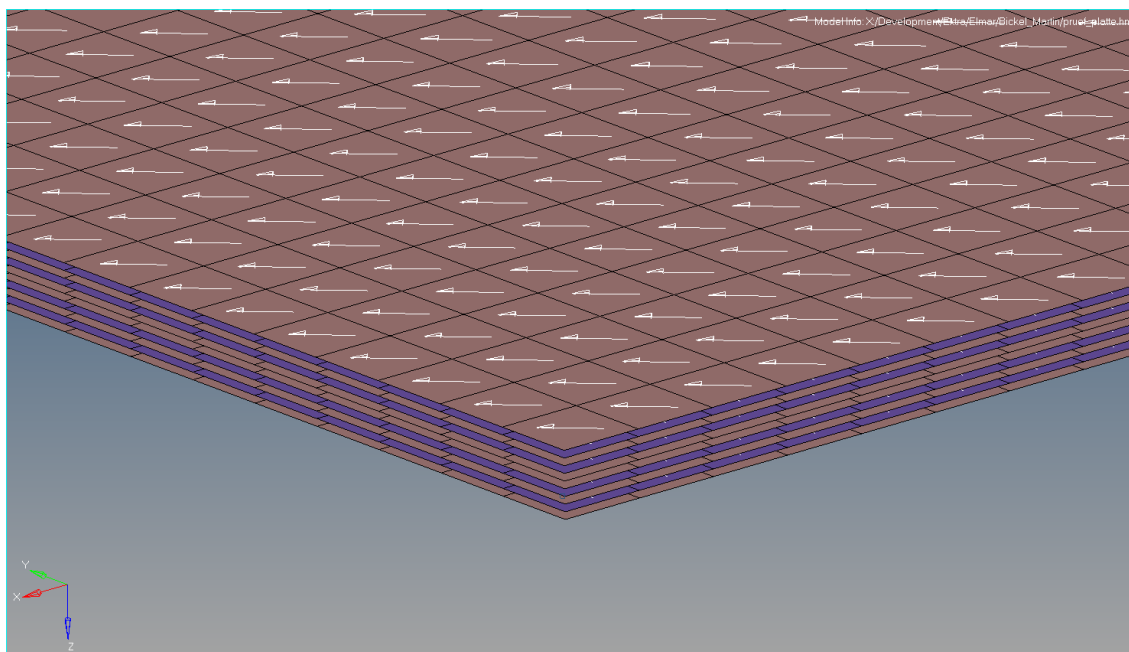
Die Simulation wird mit dem Programm HyperWorks V12.0 und dem Solver Opti Struct durchgeführt. Die Berechnung wird dabei vereinfacht und auf ein quasistatisches Modell reduziert. Mittels Aufbringen einer Kraft soll eine Abschätzung für die nötige Materialdicke berechnet werden. Beim Pendelschlagtest ist dabei die kinetische Energie festgelegt, während für die statische Berechnung jedoch eine Kraft benötigt wird, die über die Verzögerung und der Masse des Impactors berechnet werden kann. Zur Umrechnung soll eine lineare Verzögerung des Impactors angenommen werden. Dabei wird die kinetische Energie von 450J der Absorbtionsenergie gleichgesetzt. Wird diese Energie durch den Bremsweg des Impactors geteilt, erhält man die wirkende Kraft für eine lineare Verzögerung. Für die Berechnung der Beschleunigung muss deshalb eine maximale Durchbiegung festgelegt werden. Im Berechnungsmodell wird somit der Verformungsweg als Belastungsgrundlage gewählt. Die Spannungsverteilung in den Lagen kann dann ausgelesen werden.

Aufgrund der iterativen Erhöhung der Durchbiegung steigt die benötigte Kraft im Simulationsmodell an und die berechnete Kraft der linear angenommenen Verzögerung sinkt durch den erhöhten Bremsweg ab. Sobald sich die Kraft der zuvor berechneten linearen Verzögerung und der aus dem Simulationsmodell ausgelesenen wirkenden Kraft überschneiden, lässt sich eine Aussage über die auftretenden Spannungen treffen. Die Fehler für die Erstausslegung sind zu vernachlässigen und dienen nur einer Grobabschätzung des Lagenaufbaus.



**Abbildung 43** Randbedingungen für die Berechnung der Spannungsverteilung im Lagenaufbau bei vorgegebener maximaler Durchbiegung im Zentrum

In der Abbildung 43 ist ein Schalenmodell der Prüfplatte zu erkennen. Die Aufschlagsfläche der Kugel wird durch einen kleinen Bereich ersetzt, dessen Einzelflächen durch „Rigid Connections“ miteinander verbunden sind. Auch diese Annahme ist eine Vereinfachung. Die Kontaktfläche der Kugel mit der Prüfplatte ist jedoch durch den kurzen Verzögerungsweg relativ gering. Am Verbindungspunkt der „Rigid Connection“ kann die benötigte Kraft für die Durchbiegung ausgelesen werden. Über die gelbe Fläche kann das Bauteil in alle translatorischen Richtungen eingespannt werden.



**Abbildung 44 Lagenaufbau im Simulationsmodell**

Im nächsten Schritt wird auf dem Simulationsmodell der Lagenaufbau appliziert. Die Ausrichtung der Lagen verhält sich abwechselnd mit einer Winkelzuordnung von  $45^\circ$  und  $90^\circ$ . Diese werden dann im Folgenden zum Flächenmodell gespiegelt, damit eine Symmetrie zur neutralen Faser entsteht. Bei einer Dicke von 0,48 mm pro Lage muss darauf geachtet werden, dass die Wandstärke nicht zu hoch ausfällt. Als limitierende Größe wird deshalb eine Stärke von 5mm festgelegt. Wird dieser Wert stark überschritten, kann es zu Bauraumproblemen kommen. Somit werden für das Grundmodell zehn Lagen festgelegt, die zusammen eine Dicke von 4,8 mm ergeben.

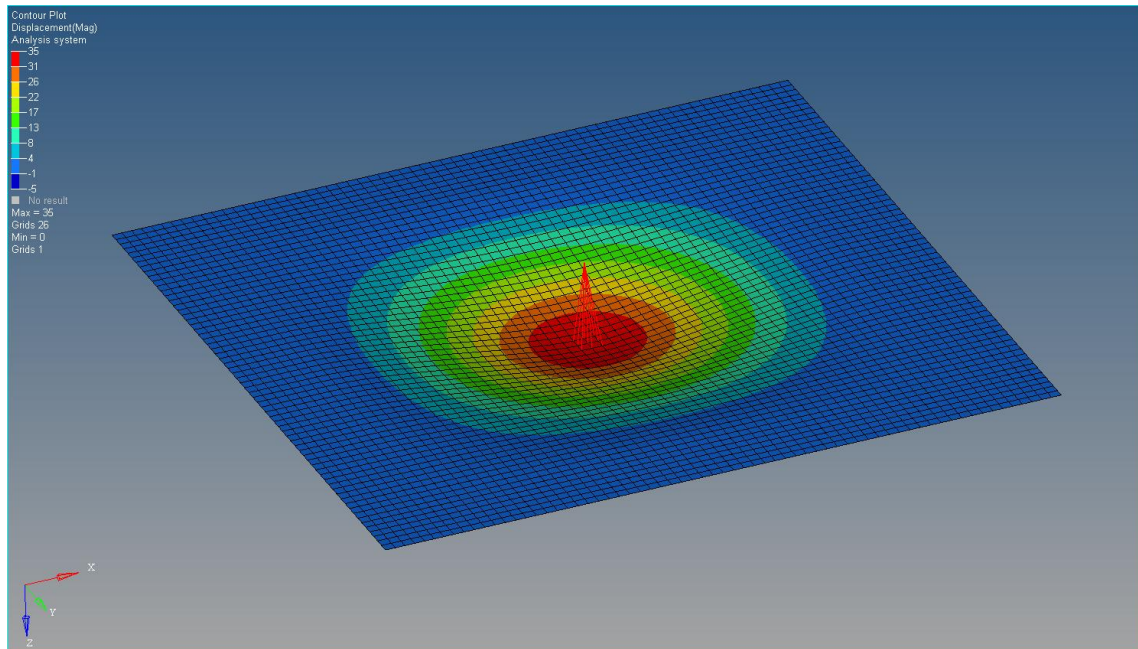
Erste Ergebnisse zeigen, dass auf den Impactor bei einem möglichen Verzögerungsweg von 10 mm bei einer Platte mit 10 Lagen GFK bloß eine Kraft von ca. 2500 N im Simulationsmodell wirkt. Im Falle einer linearen Verzögerung am Prüfstand bei einem erlaubten Bremsweg von 10mm müssten auf diesen jedoch knapp



## 8 Konzeptfindung Hochvoltsspeichergehäuse

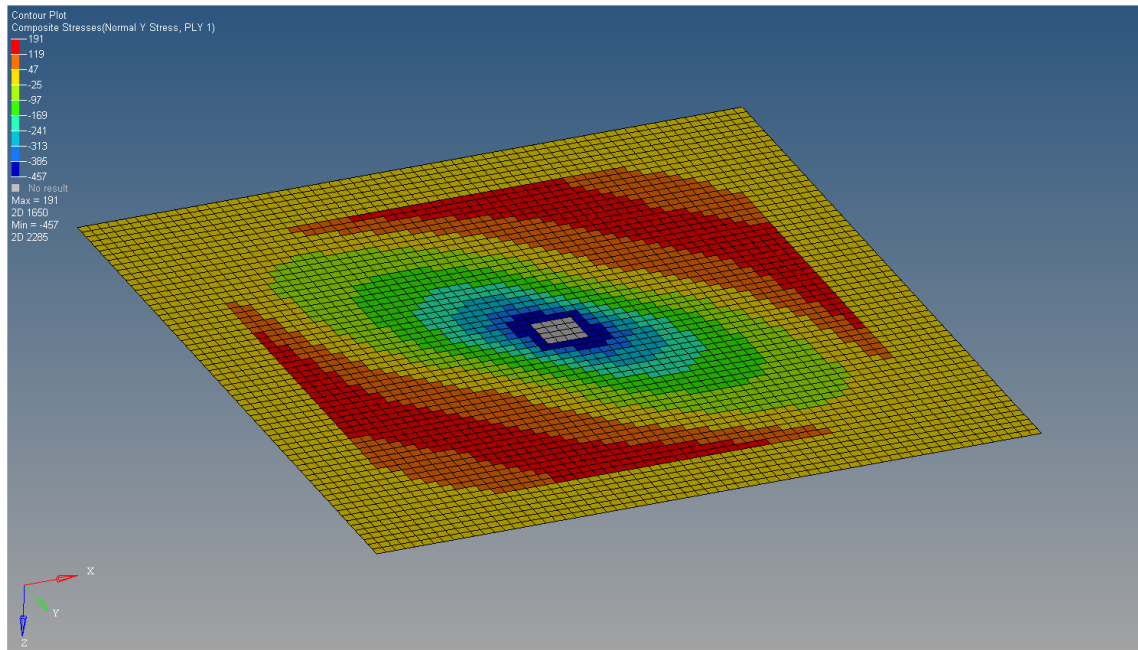
---

45000 N wirken. Die Anzahl der Lagen darf nicht weiter erhöht werden. Folglich muss eine höhere maximale Durchbiegung sowohl im Simulationsmodell, als auch in der Berechnung der linearen Verzögerung zugelassen werden.



**Abbildung 45 Darstellung der Verformung der Prüfplatte bei festgelegter maximaler Durchbiegung der Prüfplatte**

In der Abbildung ist die Verformung der Prüfplatte bei einer Durchbiegung des Kraftangriffspunktes von 35 mm dargestellt. Der Ausschlag ist im Vergleich zur Bauteilgröße sehr hoch. Wird dieser zu groß, kann es infolge zu starker Verformungsunterschiede im Laminat zu einem Abschälen einzelner Schichten kommen (Delamination).



**Abbildung 46 Spannungsverteilung der untersten Lage in Faserrichtung bei einer Durchbiegung von 35mm**

Die Abbildung zeigt die Spannungsverteilung der untersten Lage in Faserrichtung bei einer Durchbiegung von maximal 35 mm. Es wird die unterste Lage betrachtet, da diese die kritischsten Spannungen aufweist. Laut Herstellerangaben sollte eine maximale Beanspruchung von 460 N/mm<sup>2</sup> nicht überschritten werden. Dabei entsteht allerdings folgende Problematik. Um eine Durchbiegung von 35 mm zu erreichen, ist im Simulationsmodell eine Kraft von 9929 N nötig. Bei einer linearen Verzögerung mit einem Bremsweg von 35 mm ergibt sich jedoch aus der Überschlagsrechnung eine auf den Impactor wirkende Kraft von ca. 12860 N. Somit muss geprüft werden, ob eine weitere Verdickung des Materials eine Delamination fördert, Bauraumeinschränkungen erzeugt und die gewünschte Gewichtsreduktion deutlich beeinflusst.

**Tabelle 11 Gewichtsabschätzung Hochvoltsspeichergehäusekonzept**

Komponente (Wandstärke)	Aluminium (3 mm)	10 ply GFK (4,8 mm) <sup>5</sup>	2ply GFK/8ply AFK (3,04 mm) <sup>6</sup>	4ply GFK/6ply Innegra (2,35 mm) <sup>7</sup>
<b>EMV</b>	-	0,9 kg	0,9 kg	0,9 kg
<b>Kühlplatte</b>	3,1 kg	3,1 kg	3,1 kg	3,1 kg
<b>Servicedeckel</b>	2,0 kg	2,2 kg	1,1 kg	0,8 kg
<b>Hauptgehäuse</b>	3,7 kg	3,9 kg	2,0 kg	1,4 kg
<b>Gesamtgewicht</b>	8,8 kg	10,1 kg	7,1 kg	6,2 kg

Die durch die statische Simulation abgeschätzte Wandstärke für das GFK-Gehäuse beträgt 4,8 mm. Dadurch ergibt sich ein sehr hohes Gesamtgewicht. Eine weitere Erhöhung der Lagenzahl wäre somit nicht zielführend. Verglichen mit einem 3 mm starkem Alugehäuse liefert diese Variante keinen großen Vorteil.

Die inneren Lagen können durch die höhere Zugfestigkeit vom Aramid mit ca. 640 N/mm<sup>2</sup> im Vergleich zu dem verwendeten GFK mit ca. 550 N/mm<sup>2</sup> ausgetauscht werden. Dadurch kann eine deutliche Reduzierung der Wandstärke und des Gewichts erreicht werden. Der genaue Lagenaufbau muss jedoch mittels genaueren Berechnungen erfolgen. Die dargestellten Lagenkonfigurationen unterliegen dabei nur groben Abschätzungen und sollen mögliche Potentiale darstellen. Eine kostengünstigere Alternative zum Aramid bildet dabei das Innegra S. Es hat ähnliche Eigenschaften und liefert eine weitere Reduzierung des Gewichts. Bei der Verwendung von Aramid ergibt sich eine Gewichtersparnis von 1,7 und bei Innegra S von 2,6 kg.

### 8.2.2 Absicherung der Hochvoltsicherheit im Normalbetrieb

Im folgenden Kapitel wird genauer auf die Hochvoltsicherheit der HV-Komponenten im Fahrzeug eingegangen. Diese werden durch den BMW Group Standard 95023 definiert. Abhängig von den Anforderungen an die elektrische Sicherheit soll überprüft werden, ob das bestehende Konzept die Anforderungen erfüllt, oder ob möglicherweise Anpassungen durchgeführt werden müssen. In dieser Arbeit ist die Gehäusekonstruktion betroffen, da sie einen Teil des gesamten Hochvoltssystems

<sup>5</sup> Siehe ANHANG A

<sup>6</sup> Siehe ANHANG C

<sup>7</sup> Siehe ANHANG D

bildet. Grundsätzlich müssen die Anforderungen laut Definition in jedem Betriebszustand erfüllt werden. Abweichungen müssen mit BMW abgestimmt und genehmigt werden. [7]

### **8.2.2.1 Berührungsschutz**

Diese Anforderung beschreibt die Vorgabe, dass weder der Fahrer, noch andere Personen in Kontakt mit den HV-Komponenten innerhalb des Gehäuses kommen dürfen. Dies bezieht sich auf alle Fahrzeugzustände und muss somit auch nach einer Crashsituation gewährleistet werden können. Dies setzt allerdings kein Verbot gegenüber Bauteilschäden voraus. Der Schutz ist gegeben, solange keine Öffnungen entstehen. Folglich ist ein Brechen einzelner Faserstrukturen in der Gehäusewand erlaubt, solange eine ausreichende Deckschicht vorhanden bleibt. Diese Anforderung wird unterdessen durch Prämissen des Dichtungskonzeptes unterstützt, welche ein Austreten von Medien und Gasen zu jedem Zeitpunkt verbieten. Geprüft wird der Berührungsschutz durch die Produktsicherung mit Hilfe von Sichtprüfungen und Messungen [7]. Grundsätzlich ist in diesem Konzept aufgrund des vollkommen geschlossenen Gehäuses im Normalbetrieb keine Möglichkeit der Berührung gegeben. Die Entstehung von Rissen oder Öffnungen durch Fremdeinwirkung, müssen in der späteren Konzeptphase validiert werden.

### **8.2.2.2 Elektrische Isolierung**

Die Komponenten des Hochvoltsspeichergehäuses unterliegen einigen elektrischen Prüfungen. Zum Schutz des Fahrers und anderen Personen müssen die Komponenten innerhalb eines nichtleitenden Gehäuses nach außen isoliert werden. Dabei gibt es zwei Prüfverfahren, die einerseits den Isolationswiderstand und andererseits die geforderte Durchschlagsspannung überprüfen. Beide werden dabei immer im Worst-Case betrachtet. Einfluss darauf haben die Betriebstemperatur, klimatische Umgebungsbedingungen und der Kontakt mit Chemikalien, wie zum Beispiel Salzwasser. [7]

Materialwerte bezüglich des Isolierungswiderstandes des verwendeten Werkstoffes sind nicht im Datenblatt verfügbar. Deshalb wird auf eine ähnlich Faser-Matrix-Konfiguration zurückgegriffen. Die Forderung durch den BMW Group Standard 95023 erfordert einen Isolationswiderstand von 5 MOhm und wird mit einem Nennwert von  $10^8$  MOhm einfach erfüllt. Der hohe Wert belegt den weiteren Vorteil, dass das Risiko

für Bauteile selbst bei einer Beschädigung durch einen Impact dahingehend mit der verringerten verbleibenden Wandstärke, reduziert werden kann. [27] [7]

Beim Durchschlagsspannungswert wird beim Prüfverfahren zwischen Gleich- und Wechselspannung unterschieden. Dabei gilt ein Wert von 4150 V für die Wechsel- und von 5900 V für eine Gleichstrombelastung. Der Materialwert des Glasfaserprepregs liegt bei 18 kV/mm. Dabei wird die Durchschlagsspannung abhängig von der Wandstärke des Gehäuses beschrieben. Bei der Verwendung eines Lagenaufbaus mit GFK als Randlagen erhält das Gehäuse allein durch die Glasfaserschicht mit einer Wandstärke von 0,96 mm einen Schutz gegenüber einer Durchschlagsspannung von ca. 17300 V und liegt somit deutlich über den Grenzwerten. [27] [7]

### **8.2.2.3 Elektromagnetische Verträglichkeit**

Die Komponenten innerhalb des Hochvoltsspeichergehäuses müssen von äußeren elektromagnetischen Einflüssen geschützt werden, um ungewollte Reaktionen wie den Kurzschluss oder Spannungsschwankungen zu vermeiden. Eine alleinige Absicherung gegenüber mechanischer Einwirkung wie dem Impact reicht dabei nicht aus. Elektromagnetische Strahlung kann die Elektronik beträchtlich stören. Gleichzeitig kann die HV-Elektronik selbst eine Störquelle für andere elektrische Geräte sein. Damit ein Schutz nach innen und außen entsteht, muss deshalb die Gehäusewand abgeschirmt werden. Grundsätzlich kann die elektromagnetische Strahlung durch geschlossene leitfähige Hüllen abgeschirmt werden. Abhängig von der Leitfähigkeit und damit von dem Material werden die Wellen dann absorbiert und/oder reflektiert. Laut dem Impedanzkonzept wird die Strahlung von der Störquelle emittiert. Beim Auftreffen auf die Schirmung wird ein Teil davon reflektiert und der andere Teil absorbiert. Abhängig von der Wanddicke und der Frequenz kann dann ein gewisser Teil durchdringen. Die Differenz der ein- und ausdringenden Strahlung wird unter Einbindung eines Korrekturfaktors dann als Schirmdämpfung bezeichnet. Der Skineneffekt beschreibt die Abhängigkeit von der Eindringtiefe von der Frequenz der Strahlung. Je höher die Frequenz, desto geringer ist die nötige Wandstärke zu Dämpfung. [28] Beim Hochvoltsspeichergehäuse des C-Evolution dient das Alugehäuse als Schirmung. Die Anforderung verlangt eine Schirmung vom niedrigen Frequenzbereich bis zum höheren Bereich von 1 GHz.

Das für das Gehäuse des Hybridkonzepterprobers gewählte Glasfasermaterial besitzt keine natürliche Schirmung, wodurch zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind. Dafür stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung.

Die Beimischung von Additiven, in Form von Kohlenstoffmodifikationen (Ruß, Graphit, Anthrazit), Metallen (Fasern, Flakes, Pulver) oder Halbleitern (Pulver) können die Gehäusewand leitfähig machen. Dabei kommt es jedoch zu mehreren Problemen. Die Modifikation führt zu einer Veränderung der Materialeigenschaften. Des Weiteren nimmt die Leitfähigkeit bei steigender Konzentration anfangs nur sehr schwach zu, bis sie an einem bestimmten Punkt schlagartig ansteigt. Folglich muss die Konzentration sehr weit über diesen Punkt hinaus gewählt werden, damit eine gewisse Qualität und Reproduzierbarkeit garantiert werden kann. Dies gestaltet sich als sehr aufwendig unter Beeinflussung der Eigenschaften. [29] Ein weiterer ausschlaggebender Punkt ist die Anforderung an die Hochvoltsicherheit und somit dem Isolationswiderstand. Wird die Kunststoffmatrix durch Additive leitend gemacht, muss eine zusätzliche Maßnahme in Bezug auf die Forderung erfolgen.

Eine weitere Möglichkeit ist das Beaufschlagen der Oberfläche mit einem leitfähigen Lack. Diese Alternative hat den Vorteil, dass nach einem Impact Schäden sehr leicht überprüfbar sind. Kommt es nach einem Impact zu einer sichtbaren Zerstörung der Beschichtung, zeigt diese meist Risse oder Fehlstellen im Lack. Problematisch und somit ein deutlicher Nachteil sind die Kosten des Verfahrens. Die Preise für den Lack sind sehr hoch und er bietet in seiner Funktionalität gegenüber den anderen Konzepten keine Vorteile.

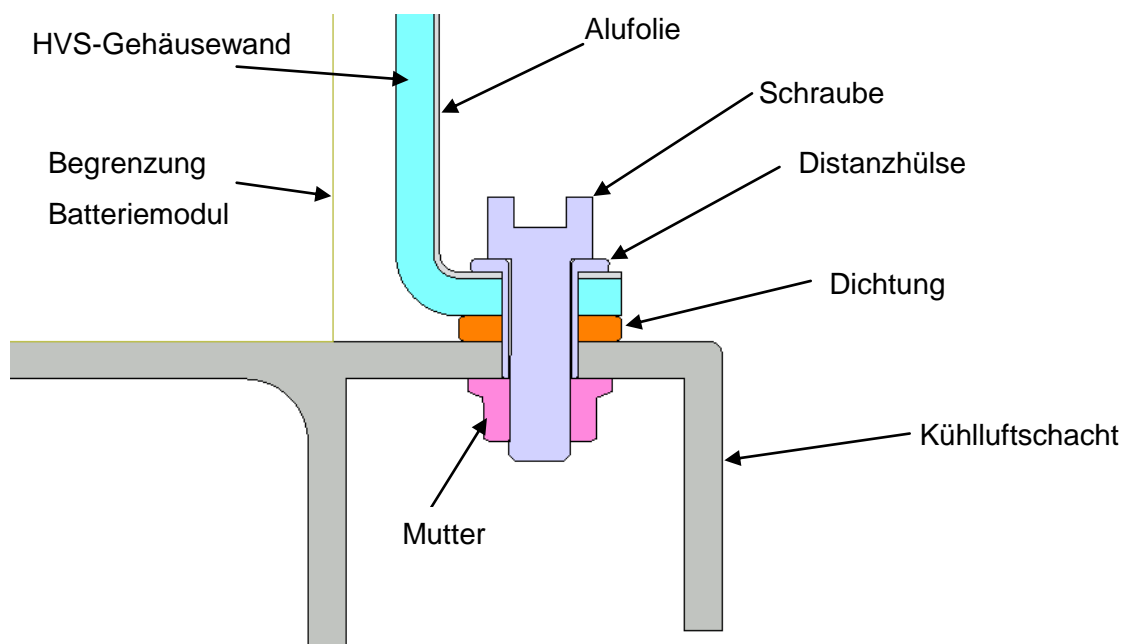
Kupfer bietet eine sehr gute Leitfähigkeit und ist in Form von Geflechtern verfügbar. Im Gegensatz zu Spritzgussverfahren, lassen sie sich beim Handlaminieren in einem Prozessschritt in das Bauteil integrieren. Dies wirkt sich zeitweise auch in Form von einer Steifigkeitserhöhung auf die Konstruktion aus. Kommt es bei der Konstruktion des Bauteils jedoch zu komplizierteren Geometrien können fertigungstechnische Probleme auftreten. Die schlechte Drapierbarkeit schränkt die Verwendung geringer Radien deutlich ein. Da der Kühlluftschacht aus Aluminium besteht, würde es zu einer Schirmung aus zwei verschiedenen Materialien kommen. Aufgrund der unterschiedlichen Reflektions- und Absorptionsschirmungskoeffizienten kann es in den Verbindungsstellen zu Störungen kommen. Dies gilt es somit zu vermeiden. [30]

Eine sehr simple Lösung bietet die Verwendung einer Alufolie. Diese Technik findet bereits in der Entwicklung in der PKW-Sparte von BMW Anwendung. Auf der Rückseite

der Folie befindet sich eine Schicht aus Polypropylen. Um das Bauteil abzuschirmen, muss die Folie zurecht geschnitten werden und kann mit Hilfe eines Heißluftföns aufgeklebt werden. Mittels der Verwendung von Preforms kann diese Schirmungsmethode auch in einem eventuellen Serienprozess integriert werden. Die unkomplizierte und kostengünstige Applikation am Gehäuse des Konzepterprobers, bei vollständiger Funktionserfüllung spricht für die Aluminiumfolie und wird deshalb für das Konzept ausgewählt.

### 8.2.2.4 Dichtungskonzept der Gehäuseanbindung mit dem Kühlluftschacht

In der Abbildung ist ein Schnitt durch die Schrauben-Mutter-Verbindung des Gehäuses mit dem Kühlluftschacht dargestellt. Bei Verwendung eines Flansches lässt sich die Dichtung gegenüber Medien und Gasen einfach umsetzen. Die Schraube wird dabei mit einer Mutter auf der Unterseite verbunden. Da es sich beim Kühlluftschacht um ein Rapid-Prototyping Bauteil handelt, besteht auch die Möglichkeit, die Mutter durch einen Gewindeschnitt im Bauteil zu ersetzen.

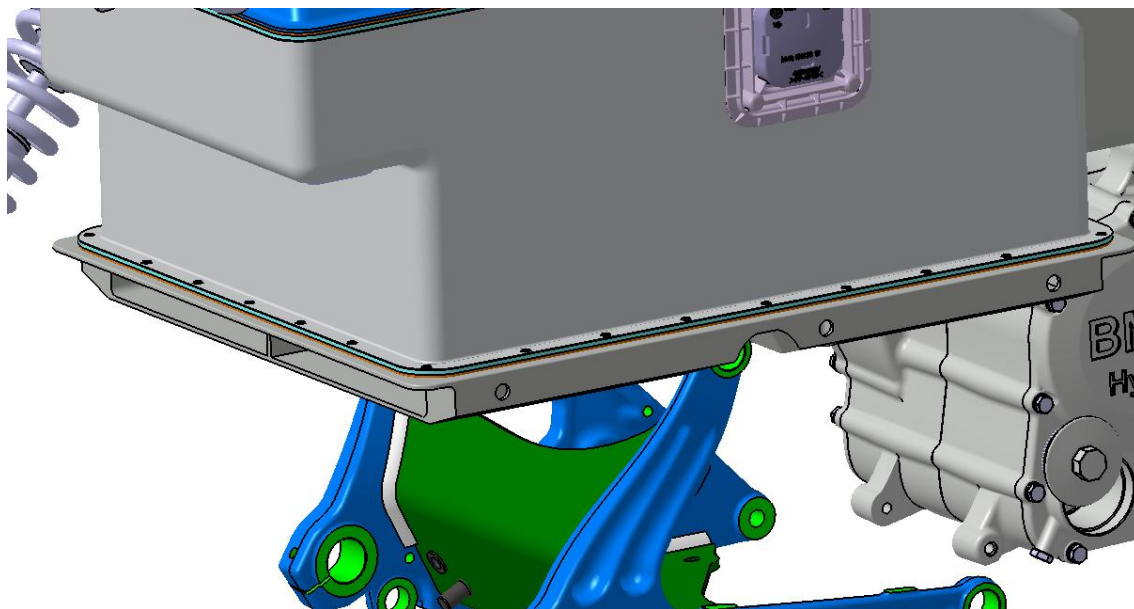


**Abbildung 47 Anbindungskonzept des Hochvoltsspeichergehäuses mit dem Kühlluftschacht**

Bei der Auslegung der Schraubengröße und Vorspannkraft muss die geforderte Dichtwirkung eingehalten werden. Zur Vermeidung von Dichtigkeitsproblemen durch Rauigkeiten oder Unebenheiten muss die Alufolie auf der Außenhaut verklebt werden.

Problematisch ist bei Verschraubungen von Faserkunststoffverbunden die Gefahr der Beschädigung des Materials. Wird das Material zu stark quer zur Schraubfläche belastet, kann es zu Schädigungen der Matrix und der Faser kommen (Delamination). Dies liegt an den schlechten mechanischen Eigenschaften von Geweben normal zum Faserverlauf. Kommt es zu hohen Belastungen durch Verbindungen, muss das Material lokal verstärkt werden, da es sonst zu einem Ausreißen der Schraube kommen kann. Dabei werden die Laminatschichten, die weniger Einfluss auf die Kraftübertragung haben durch Metallfolien ersetzt. Dadurch wird eine Steigerung der Lochfestigkeit bei gleichzeitiger Vermeidung von Zusatzspannungen durch eine Materialaufdickung umgesetzt. [22]

Um einen Schaden zusätzlich präventiv zu verhindern, muss die Verbindung über eine Distanzhülse erfolgen. Wird die Gummidichtung durch die Schraubverbindung belastet, verformt sich diese und baut die nötige Dichtwirkung auf. Der Abstand der Verformung ist die Auslegungsgrundlage für die Länge der Distanzhülse. Der Kraftfluss läuft somit direkt über die Schraubkopffläche durch die Hülse und wird dann über den Kontaktpunkt auf die Mutter weitergeleitet. Aufgrund der fast vollständigen Entkoppelung des Hochvoltsspeichergehäuses von den Rahmenbelastungen muss die Verbindung mit einer nur geringen Sicherheit gegenüber Zug- und Druckbelastungen beaufschlagt werden.



**Abbildung 48 Anbindung des Hochvoltsspeichergehäuses mit dem Kühlluftschacht**

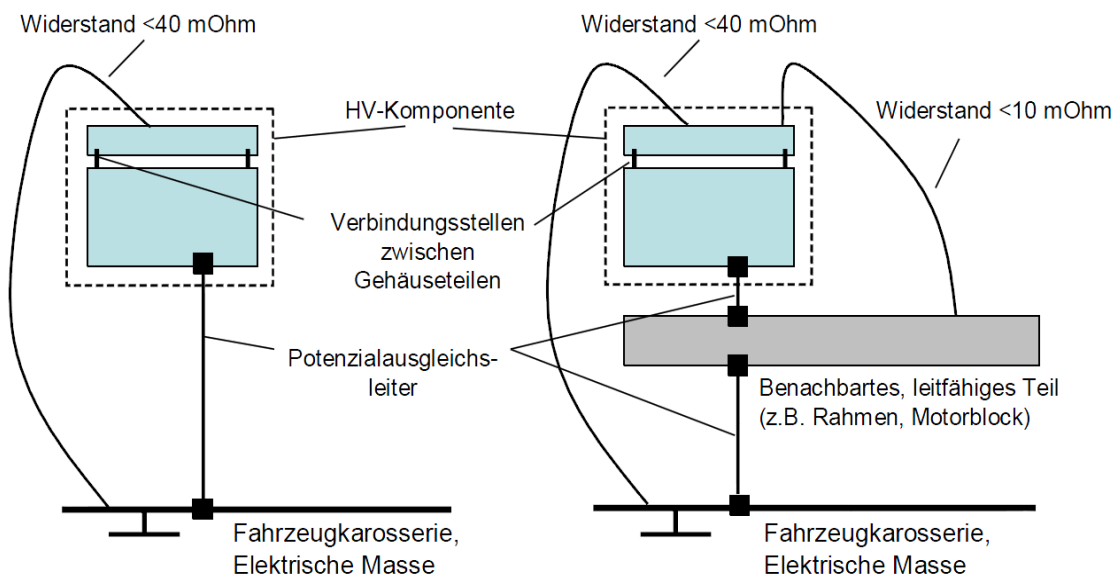
Die ideale Schirmung gegenüber elektromagnetischer Strahlung durch einen geschlossenen Behälter ist aufgrund des mehrteiligen Gehäuses und der Zugänge wie



dem Servicedeckel nicht möglich. Deshalb muss an den Verbindungsstellen zusätzlich zu den Medien und Gasen auch auf die EMV geachtet werden. Bei dem Gehäusekonzept liefert die Verschraubung eine metallische Verbindung zwischen der Aluminiumhülle und dem Kühlluftschacht. Oft können dabei sehr kleine Öffnungen oder schirmungsfreie Stellen zu einer deutlichen Minderung der Dämpfung der elektromagnetischen Strahlung führen. Die akzeptierte Größe der ungeschirmten Öffnungen wird dabei durch die maximal auftretende Frequenz bestimmt. Die Lücke in der Schirmung darf höchstens die Größe der halben Wellenlänge der einfallenden Strahlung betragen. In dieser Arbeit wurde die maximale Grenzfrequenz auf 1 GHz beschränkt. Daraus folgt eine Wellenlänge von ca. 300 mm, weshalb der Spalt zwischen zwei Verschraubungspunkten maximal 150 mm betragen darf. Beim C-Evolution wurden die Schraubpunkte in einem Abstand von 60 mm gewählt. Dies soll auch beim Hybridkonzept die Grundlage der Auslegung sein. Somit kann eine Freigabe gegenüber der Serienentwicklung durch Technologieübernahme argumentiert werden. [28]

### **8.2.2.5 Potenzialausgleich**

Beim Potenzialausgleich verlangt der BMW Group Standard 95023, dass alle freiliegenden und leitfähigen Hochvoltkomponenten mit der Fahrzeugmasse galvanisch verbunden sind. Aufgrund der Aluminiumfolie für die EMV-Schirmung gilt das auch für das Hochvoltsspeichergehäuse. Zwischen der elektrischen Fahrzeugmasse und der HV-Komponente darf der elektrische Widerstand nicht größer als 100 mOhm sein. Handelt es sich bei der Fahrzeugkarosserie auch um die elektrische Fahrzeugmasse, wird die geforderte Grenze auf unter 40 mOhm gesetzt.



**Abbildung 49 Potenzialausgleich der HV-Komponenten mit der Fahrzeugkarosserie[7]**

Ist das Gehäuse wie im Hybridkonzept aus mehreren Komponenten aufgebaut wird gefordert, dass der Potenzialausgleich an jeder Stelle auf der Oberfläche eingehalten wird. In der Abbildung ist dabei eine schematische Darstellung für die Umsetzung gegeben. Da das Gehäuse vom Rahmen strukturell, aber auch elektrisch entkoppelt ist, muss eine elektrische Verbindung mit dem leitenden Nachbarbauteil, in diesem Fall dem Kühlluftschacht, hergestellt werden. Die Forderung wird durch die metallische Verschraubung ausreichend gewährleistet. Auf die gleiche Art und Weise muss dies auch bei der Verbindung mit dem Deckel durchgeführt werden. Somit entsteht eine leitende Verbindung der Alufolie auf dem Deckel und dem Hauptgehäuse mit dem Kühlluftschacht und folglich auch mit der elektrischen Fahrzeugmasse durch den Rahmen. Diese Forderungen müssen dabei über die komplette Fahrzeuglebensdauer eingehalten werden können. Somit muss auf Korrosion und ähnliche Beeinflussungen an den Verbindungsstellen geachtet werden. [7]

### 8.2.3 Absicherung der Hochvoltsicherheit gegenüber Sonderereignisse

Der Hochvolt-speicher bringt einige Gefahrenpotentiale. Aufgrund dessen muss er für Sonderereignisse, wie z.B. einem Crash oder „thermal runaway“ außerhalb des Normalbetriebs ausgelegt werden. Diese können durch Fehlfunktionen innerhalb und durch Umwelteinflüsse außerhalb des Gehäuses entstehen. Thermische und mechanische Einflüsse lassen sich differenziert betrachten. Die folgenden

Absicherungen lassen sich in der Konzeptphase nicht durchführen, sollen aber trotzdem nachfolgend kurz erläutert werden und als Maßnahmenempfehlung gelten.

### **8.2.3.1 Thermische Sonderereignisse**

Zu den thermischen Sonderereignissen gehören hohe Temperatureinwirkungen durch Brand oder Explosionen. Dabei müssen die Hochvoltkomponenten gegen Einflüsse von außen geschützt werden. Gleichzeitig kann es in einer Crashesituation auch zu Defekten innerhalb des Zellmoduls kommen. Somit kommt es zu hohen Temperaturen und Drücken innerhalb des Gehäuses.

Eine Beeinflussung durch Feuer von außerhalb wird durch die Aluminiumfolie abgewehrt. Von innen gestaltet sich dies deutlich komplizierter. Kommt es zu einem Feuer innerhalb des Gehäuses, muss der Druck über das Entlüftungsmodul abgesenkt werden. Dabei dürfen jedoch keine zusätzlichen brandfördernden Gase oder Medien in das Gehäuse eintreten. Das Glasfaserprepreg hält nur Temperaturen bis zu 200°C aus. Darüber hinaus beginnt sich der Duroplast zu zersetzen. Kommt es zu einem Brand innerhalb des Gehäuses, muss die Fahrtüchtigkeit nach der Löschung des Feuers nicht fortbestehen. Durch die Temperaturerhöhung kommt es im Faserkunststoffverbund zu einem raschen Abfall der mechanischen Eigenschaften. Da das Gehäuse jedoch durch die Rahmenstruktur geschützt wird, kann die Aluminiumschicht die nötige Feuerfestigkeit übernehmen. Sollte diese nicht ausreichen, muss eine weitere Wärmedämmung innerhalb des Gehäuses umgesetzt werden. Eine Absicherung in der späteren Entwicklungsphase durch Messungen und Tests ist somit unabdingbar.

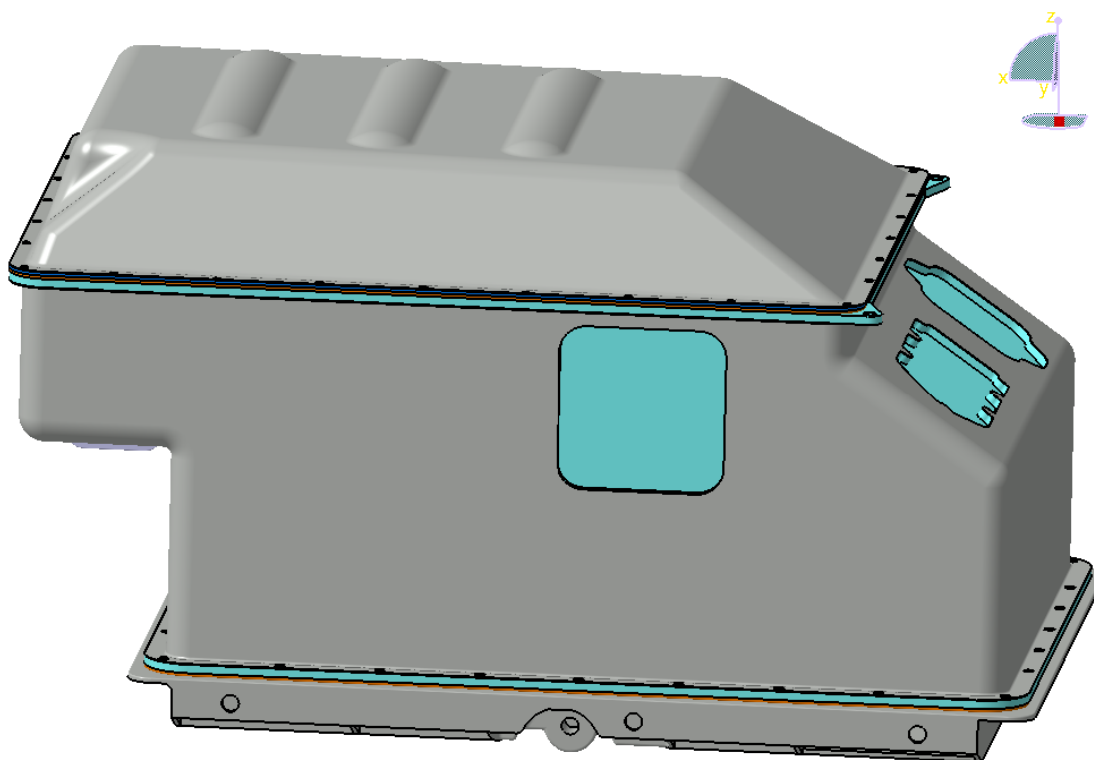
### **8.2.3.2 Tankschutzprüfung**

Jeder Flüssigkeitstank muss gegen mechanische Einwirkung abgesichert werden. Zum Vergleich unterschiedlicher Konzepte und Fahrzeuge zu erstellen, wurde der Pendelschlagtest durch die Norm SAE J 1241 „Fuel and Lubricant Tanks for Motorcycles“ festgelegt. Dieser wurde als Auslegungskriterium für die Materialwahl und Bauteildimensionierung in Kapitel 8.2.1.3 verwendet und beschrieben. Da momentan keine vergleichbare Testvorschrift für Hochvoltsspeichergehäuse vorhanden ist, wird die gleiche Absicherung innerhalb der BMW Group auch für Hochvoltsspeicher von Motorrädern angewendet. [26] Im Fall des Hybridkonzepterprobers befindet sich der Hochvoltsspeicher unterhalb der Sitzfläche. Die Auslegung des HVS-Gehäuses muss im

weiteren Entwicklungsprozess entsprechend der Prüfvorschrift experimentell validiert werden.

### 8.3 Bewertung des HVS-Gehäusekonzepts

Die Abbildung zeigt das Hochvolt Speichergehäuse, bestehend aus dem Kühlluftschacht, dem Hauptgehäuse und dem Servicedeckel. Abschließend soll die Gesamtkonstruktion bezüglich der an sie gestellten Forderungen zusammengefasst und bewertet werden.



**Abbildung 50 Gesamtkonzept des Hochvolt Speichergehäuses**

Durch die Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbunde können die geometrischen Randbedingungen, wie die Integration der Hochvoltkomponenten und Anbindung der Steckerverbindungen, einfach umgesetzt werden. Das Hauptgehäuse und der Servicedeckel werden durch Handlaminieren und einer Aushärtung im Autoklaven gefertigt. Diese Fertigungsmethode aufgrund der geringen Stückzahl bei einem Konzepterprober und der komplizierten Geometrie mit Hinterschnitten empfohlen. Sollte es bei dem Konzept zu einer Weiterentwicklung für die Serienproduktion kommen, ist eine Umpositionierung des Federbeins zu empfehlen. Dadurch kann die

Geometrie deutlich vereinfacht werden und es kommen günstigere Fertigungsverfahren wie RTM oder Pressen in Frage.

Als Material wurde Glasfaser mit einer temperaturbeständigen Duroplastmatrix gewählt. Es erweist sich als sehr kostengünstig und liefert trotzdem eine ausreichende Schlagzähigkeit. Die Verwendung von Aramid oder Innegra als innere Lagen im Verbund ermöglicht eine deutliche Gewichtsreduktion und Minderung der Wandstärke des Gehäuses. Eine grobe Gewichtseinschätzung hat dabei eine mögliche Reduzierung des Gewichts von 10,1 kg auf 6,2 kg durch die Verwendung von Innegra ergeben. Diese Werte müssen jedoch durch genauere Berechnungen und eine spätere Validierung in der weiteren Konzeptphase überprüft werden.

Die Anforderung gegenüber der elektromagnetischen Verträglichkeit wird durch die Verwendung einer Aluminiumfolie mit einer Polypropylen-Klebeschicht auf der Außenhülle umgesetzt. Die Dämpfung der elektromagnetischen Strahlung ist somit im hohen Frequenzbereich ausreichend abgedeckt. Im niederen Frequenzbereich ist die Strahlungsenergie sehr niedrig. An den Verbindungsstellen zwischen den Gehäusebauteilen und dem Kühlluftschacht wurde darauf geachtet werden, dass die ungeschirmten Lücken nicht zu groß ausfallen. Ein Abstand der Verschraubungspunkte von maximal 60 mm erlaubt eine Schirmung bis zu einer Wellenlänge von 120 mm. Gleichzeitig werden das Gehäuseinnere und die Umwelt durch eine Gummidichtung durch die Flanschverschraubung gegenüber Medien und Gasen geschützt. Durch eine Distanzhülse lassen sich Materialschäden bei zu hohem Anzugsmoment/Flächenpressung verhindern.

Die Anforderung gegenüber der Hochvoltsicherheit wird durch die Verwendung eines Glasfaserkunststoffes als Randschicht mit einer Dicke von 0,96 mm ausreichend umgesetzt. Der elektrische Widerstand von  $10^8$  MOhm und die Durchschlagsspannung von 17300 V liegen deutlich über den geforderten Werten. Somit kann auch im Falle einer Beschädigung des Gehäuses, der Schutz durch eine geringe unbeschädigte Schicht aufrechterhalten werden. Durch den Einsatz einer Alufolie auf der Außenhülle zur elektromagnetischen Schirmung muss ein Potenzialausgleich durchgeführt werden. Dabei liefert die metallische Verschraubung eine ausreichende Verbindung zur Fahrzeugmasse.

Die thermische Auslegung des Gehäusekonzepts ist problematisch. Das Wärmemanagement im Normalbetrieb kann ähnlich wie beim C-Evolution mittels eines Gebläses auf der Rückseite des Gehäuses umgesetzt werden. Die Integration einer

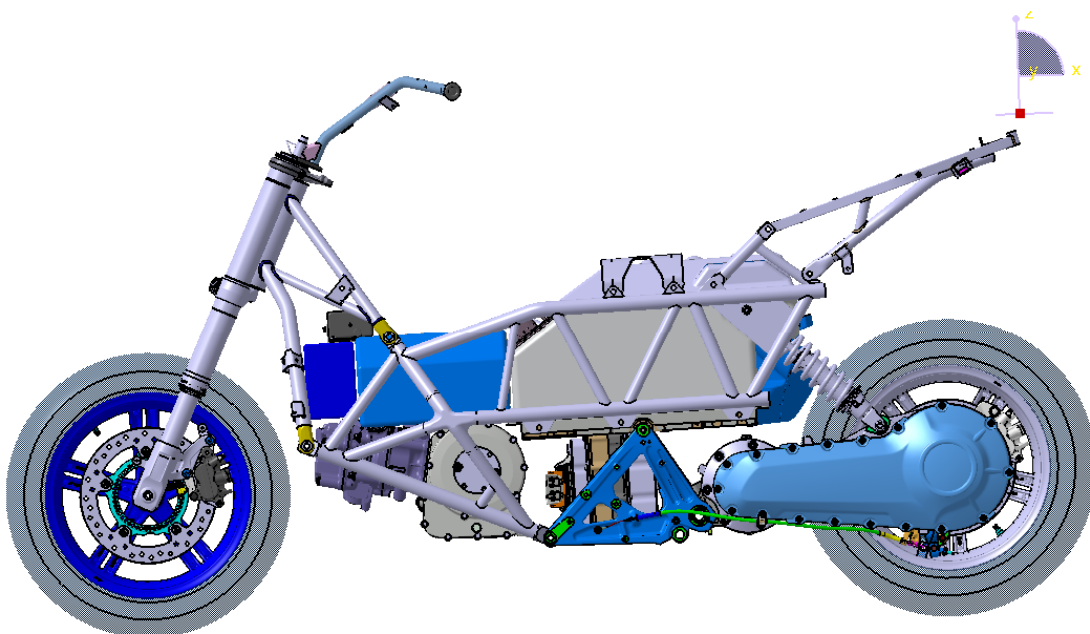
## 8 Konzeptfindung Hochvoltsspeichergehäuse

---

Kühlplatte unterhalb der Lade- und Speicherelektronik erlaubt eine ausreichende Wärmeabfuhr. Die Temperaturen an den HV-Komponenten liegen bei maximal 120°C im Betriebszustand. Mit einer Glasübergangstemperatur von 200°C ist der verwendete Duroplast somit ausreichend ausgelegt. Für eine Freigabe des Konzepts muss geprüft werden, ob die Glasfaser in Verbindung mit der stützenden Aluminiumfolie im Brandfall ausreichenden Schutz bietet.

## 9 Darstellung des Gesamtkonzepts des Hybriderprobers

Das Kernstück des Hybridkonzepts ist der Hauptrahmen. Dieser liefert die Anbindungen für die Fahrwerkskomponenten, den Verbrennungsmotor, und das Hochvoltspeichergehäuse. Im vorderen Bereich befindet sich der Range-Extender mit der Motorelektronik, dem Tank und der Airbox. Direkt dahinter grenzt das Hochvoltspeichergehäuse an. Darin befindet sich das Batteriemodul mit der integrierten Lade- und Speicherelektronik. Die Regelung für den Elektromotor, welcher auf der Schwingenlagerung angebracht ist, befindet sich im Zwischenrahmen unterhalb des Speichergehäuses.



**Abbildung 51 Virtuelle Darstellung des Hybridkonzepterprobers ohne Karosseriebauteile**

Durch die Anpassung des Batteriemoduls konnte eine vollständige Übernahme der Elektronik des Hochvoltspeichers und des Elektroantriebes gewährleistet werden. Die zwingende Verwendung von Energiespeichern aus dem BMW Baukasten haben allerdings dazu geführt, dass sich das Abmaß des Energiespeichers geändert hat. Aufgrund der größeren Breite des Zellmoduls musste der Rahmen weiter nach außen gelegt werden, wodurch eine Weiterverwendung der Karosseriebauteile ausscheidet. Sollten alternative Batterien in den Baukasten eingeführt werden, kann eine Neudimensionierung in Erwägung gezogen werden. Vorder-, Zwischen- und Heckrahmen wurden durch Anpassungen am Hauptrahmen in die Struktur integriert,

wobei auch hier einige Kompromisse gemacht werden mussten. Der Vorderrahmen reduziert die Steifigkeit aufgrund von Bauraumproblemen im Bereich der Anbindung mit dem Hauptrahmen deutlich. Des Weiteren musste für die strukturelle Entkoppelung des HVS-Gehäuses von der Rahmenstruktur ein Zwischenrahmen zur Anbindung des Heckrahmens eingeführt werden. Die Kombination des Hilfs- und Heckrahmens in einem Bauteil wird für die weitere Entwicklungsphase empfohlen. Für einen Konzepterprober erfüllt die Hilfskonstruktion jedoch die Anforderungen.

Aufgrund ähnlicher Steifigkeit und Gewicht des Hybridkonzeptes wie beim C-Evolution sollten die Fahreigenschaften annähernd gleich sein. Diese Anforderungen konnten nur bedingt umgesetzt werden. Aufgrund des relativ kompakten und komplexen Package ist sehr wenig Bauraum für Versteifungen vorhanden. Außerdem lässt sich keine starre Hülle wie beim Hochvoltspeichergehäuse des Elektroscooters umsetzen. Es kommt somit zu starken Einbußen in der Biege- und Torsionssteifigkeit. Da diese beim C-Evolution produktionsbedingt durch die Mindestwandstärke beim Druckguss des Hochvoltgehäuses entstanden sind, muss die Fahrdynamik später überprüft und falls nötig entsprechende Änderungen vorgenommen werden.

In der folgenden Tabelle soll das Gewicht des Hybridkonzepts mit dem des C-Evolution verglichen werden. In die Betrachtung fallen dabei nur Bauteile, die sich in beiden Fahrzeugen unterscheiden. Folglich wurden keine Übernahmeteile in die Betrachtung mit einbezogen.

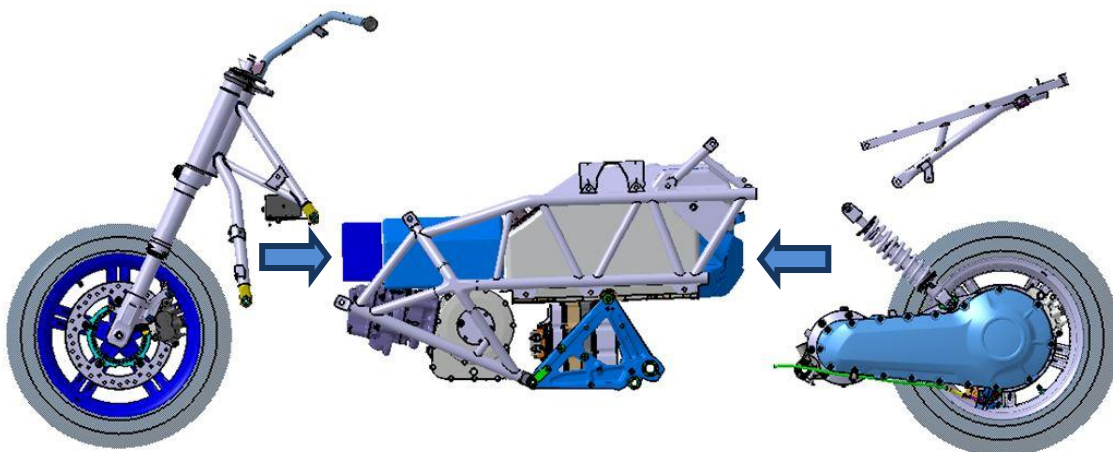
**Tabelle 12 Gewichtvergleich des Hybridkonzepts mit dem C-Evolution**

C-Evolution		Hybridkonzept	
Komponente	Gewicht	Komponente	Gewicht
Batterie	ca. 3x30 kg	Batterie	ca. 33,75 kg
Gehäusewanne	4,7 kg	HVS-Gehäuse	6,2 kg
HVS-oben	9,2 kg	Motor	25,5 kg
Kühlluftschacht	7,3 kg	Tank	7 kg
Servicedeckel	2,9 kg	Airbox	2 kg
		Abgasanlage	5 kg
		Rahmen	11,55 kg
		Umrichter REX	10 kg
<b>Gesamtgewicht</b>	<b>114,1 kg</b>	<b>Gesamtgewicht</b>	<b>100,0 kg</b>



Werden zwei Batteriemodule durch den Rangeextender ausgetauscht lässt sich in diesem Konzept ein Gewicht von ca. 14,1 kg einsparen. Das Gewicht der Airbox und der Abgasanlage wurden dabei geschätzt, da noch keine Bauteildaten verfügbar sind. Die Masse des Tanks wurde mit einem maximalen Füllinhalt von ca. 5 Litern mit 7 kg angenommen. Mit diesem Benzinvolumen soll eine ähnliche Reichweite wie beim C-Evolution erreicht werden. Das Gewicht des Hochvoltspeichers und der Rahmenkonstruktion beläuft sich auf 17,75 kg und ergibt somit eine Ersparnis von 6,35 kg gegenüber dem Gehäuse des C-Evolution.

Eine weitere Alternative zur Senkung der Herstellungskosten ist, abgesehen von der Verwendung der Gleichteile, eine günstige Integration des Fahrzeuges in die Fertigungsstraße im Produktionswerk.



**Abbildung 52 Darstellung der Montage des finalen Hybridkonzeptes gleich wie beim C-Evolution**

Im Produktionswerk in Berlin wird das Hochvoltspeichergehäuse des C-Evolution vormontiert und dann als vollständige Komponente in die Produktionsstraße eingeführt werden. Sowohl die Übernahme des Fahrwerks als auch der Anbindungspunkte ermöglichen einen ähnlichen Montageplan. Dabei kann das Kernstück mit dem Hochvoltspeicher und dem Verbrennungsmotor abhängig von der Nachfrage des Modells in die Produktionskette eingegliedert werden. Dadurch können die Einmalkosten für das Modell trotz geringer Stückzahl niedrig gehalten werden.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Konzept vorgestellt, bei dem der reine Elektroscooter C-Evolution durch die Integration einer Verbrennungskraftmaschine als Range-Extender in einen seriellen Hybriderprober umgewandelt werden kann. Dabei wurde besonders auf die Integration der Komponenten in eine Rahmenstruktur und auf den Entwurf eines sicheren Hochvoltsspeichergehäuses geachtet.

Um die Integration aller nötigen Komponenten der Verbrennungskraftmaschine durchführen zu können, wurde die Anzahl der Batteriemodule und somit auch die Kapazität auf knapp ein Drittel reduziert. Die Verbindung der Komponenten wurde über eine kraftflussgerechte Rahmenstruktur durchgeführt. Die Steifigkeit der tragenden Struktur ließe sich vergleichbar zum C-Evolution aufgrund der niedrigeren Torsions- und Biegesteifigkeit nicht komplett umsetzen. Dies liegt einerseits am geringen Bauraum und an der Übernahme des Vorder-, Zwischen- und Heckrahmens. Die Verwendung von Batterien aus dem Baukasten von BMW PKW hat eine Gesamtverbreiterung der Rahmenstruktur bewirkt, wodurch die Karosserieteile des C-Evolution nicht weiterverwendet werden können. In diesem Konzept wurde eine Variante mit einem Hochvoltsspeichergehäuse aus GFK und Innegra gewählt. Die Verwendung eines Gitterrohrrahmens ermöglicht eine günstige Fertigung und Anpassung der Funktionen für den Konzepterprober. Das Gesamtgewicht konnte somit gegenüber dem C-Evolution um ca. 14 kg reduziert werden, wobei der Großteil der Minderung durch das leichtere VKM-Package im Vergleich zu den zusätzlichen Batteriezellen kommt. Mit der eingesparten Masse kann im weiteren Entwicklungsprozess der Rahmen versteift werden, um die Fahreigenschaften zu verbessern. Das Hochvoltsspeichergehäuse weist sehr gute Voraussetzungen in Bezug auf die Hochvoltsicherheit auf. Für die Schirmung elektromagnetischer Strahlung müssen zusätzliche Maßnahmen durch eine Aluminiumfolie getroffen werden. Die größte Problematik besteht in der Temperaturbeständigkeit der verwendeten Kunststoffe. Die Wärmeentwicklung durch die HV-Komponenten kann gut kompensiert werden.

Als weitere Maßnahmen wird zur Validierung der Crashesicherheit empfohlen, das Hochvoltsspeichergehäuse durch die Tankschutzprüfung SAE J 1241 zu prüfen. Des Weiteren muss die Rahmenkonstruktion durch genauere Berechnungen optimiert und am Prüfstand validiert werden.

Zum heutigen Zeitpunkt gibt es auf dem Markt sehr viele Elektroroller in unterschiedlichsten Preissegmenten. Hybridkonzepte sind aufgrund der Bauraumproblematik seltener. Bei Piaggio wurde das Konzept des leistungsverzweigten Hybriden in der Form eines Dreirades umgesetzt, der deutlich mehr Bauraum liefert.

Die Arbeit zeigt, dass die Umsetzung eines seriellen Hybriden in einem Zweiradkonzept möglich, allerdings immer mit Kompromissen verbunden ist. Die Synergieeffekte mit dem C-Evolution können im Antriebsstrang gut genutzt werden, wobei sich die Übernahme der Karosserie und dem Fahrwerk durch die mangelnde Steifigkeit komplexer gestalten. Prinzipiell ist die Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden als Gehäusematerial für Hochvoltpeicher geeignet. Zur Absicherung der elektromagnetischen Verträglichkeit und der thermischen Auslegung müssen dabei jedoch Anpassungen getroffen werden. Die Reduktion des Gewichts ist dabei abhängig von der Auslegung des Lagenaufbaus.

# LITERATURVERZEICHNIS


- [1] Verkehrsclub-Deutschland, „www.vcd.org - CO2 Grenzwerte für PKW,“ [Online]. Available: <http://www.vcd.org/co2-grenzwert.html>. [Zugriff am 23 Oktober 2014].
- [2] M. Lienkamp, Elektromobilität, Hype oder Revolution?, Springer-Verlag, 2012.
- [3] Verkehrsclub-Deutschland, „www.vcd.org - Plaketten, Umweltzonen und Fahrverbote,“ [Online]. Available: <http://www.vcd.org/umweltzone.html>. [Zugriff am 23 Oktober 2014].
- [4] H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven und I. Olschewski, Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien, Märkte und Implikationen, Vieweg+ Teubner, 2010.
- [5] R. Mihnea, „www.autoevolution.com,“ 29 Juli 2012. [Online]. Available: [http://www.autoevolution.com/news/bmw-shows-c-evolution-scooter-at-olympics-photo-gallery-47742.html#agal\\_13](http://www.autoevolution.com/news/bmw-shows-c-evolution-scooter-at-olympics-photo-gallery-47742.html#agal_13). [Zugriff am 08 Oktober 2014].
- [6] BMW, „Pressclub BMW,“ Juli 2012. [Online]. Available: [https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=der-neue-bmw-c-evolution&outputChannelId=7&id=T0128539DE&left\\_menu\\_item=node\\_\\_6702](https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/pressDetail.html?title=der-neue-bmw-c-evolution&outputChannelId=7&id=T0128539DE&left_menu_item=node__6702). [Zugriff am Juni 2014].
- [7] BMW, „BMW Group Standard GS 95023,“ 2011.
- [8] BMW, „BMW Group Standard GS 97090,“ 2012.
- [9] K. Reif, K. E. Noreikat und K. Borgeest, Kraftfahrzeug-Hybridantriebe, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Vieweg+Teubner, 2012.
- [10] H. Wallentowitz und K. Reif, Handbuch Kraftfahrzeugelektronik, Vieweg+Teubner, 2010.
- [11] „www.cycleshop.de,“ [Online]. Available: <http://www.cycleshop.de/de/Roller/-/Scooter/Piaggio/MP3/Piaggio-MP3-125-Hybrid>. [Zugriff am 22 Juli 2014].

- [12] C. Klaus, Interviewee, *Fachgespräch, Stand der Technik PKW*. [Interview]. Mai 2014.
- [13] M. Reif, „www.Fraunhofer.de,“ September 2011. [Online]. Available: <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2011/september/batterieschutz.html>. [Zugriff am Mai 2014].
- [14] M. Trzesniowski, *Rennwagentechnik*, Vieweg + Teubner, 2010.
- [15] M. Siegrist, *Diplomarbeit, Wirtschaftliche RTM-Prozesstechnologien für die Herstellung von CFK-Motorradfelgen*, ETH Zürich, 2006.
- [16] BMW, *CFK Taschenbuch*, 2011.
- [17] H. Haberhauer und F. Bodenstein, *Maschinenelemente Gestaltung, Berechnung, Anwendung*, Springer, 2009.
- [18] W. Klepzig, „Aufbaukurs CATIA-FEM,“ WH Zwickau Maschinenbau/ Kfz-Technik, Zwickau, 2008.
- [19] H.-B. Woyand, *FEM mit CATIA V5*, Wilburgstetten: J. Schlembach Fachverlag, 2009.
- [20] M. GmbH, „<http://www.mbn-gmbh.de/>,“ [Online]. Available: <http://www.mbn-gmbh.de/de/dnl/standardmaterialkatalog.62.pdf>. [Zugriff am 15 09 2014].
- [21] F. Rink, „Fachgespräch: Thermische Auslegung von Hochvoltspeichern,“ UX-EE-4 BMW Motorrad, 22.09.2014.
- [22] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Darmstadt: Springer Verlag, 2007.
- [23] Innegra Technologies, „[www.innegrates.com](http://www.innegrates.com/),“ [Online]. Available: <http://www.innegrates.com/file/1805181448innegracorporate2014v4medialink.pdf>. [Zugriff am 23 September 2014].
- [24] P. D. H. Ferkel, D. H. Kurz und J.-W. Becke, „[carbon-composites.eu](http://www.carbon-composites.eu/),“ [Online]. Available: [http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02\\_v\\_af\\_15.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02_v_af_15.pdf). [Zugriff am 20

September 2014].

- [25] L. GmbH, „www.lange-ritter.de,“ [Online]. Available: [http://www.lange-ritter.de/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Download/L\\_R\\_Katalog\\_2013\\_Gesamt.pdf](http://www.lange-ritter.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Download/L_R_Katalog_2013_Gesamt.pdf). [Zugriff am 22 September 2014].
- [26] „Fuel and Lubricant Tanks for Motorcycles SAE J 1241,“ Society of Automotive Engineers, 1999.
- [27] V. R. H. AG, „www.vonroll.com,“ [Online]. Available: [http://www.vonroll.com/media/files/downloads/broschures/Composites\\_GE.pdf](http://www.vonroll.com/media/files/downloads/broschures/Composites_GE.pdf). [Zugriff am 23 September 2014].
- [28] A. J. Schwab und W. Kürner, Elektromagnetische Verträglichkeit, Springer-Verlag, 2007.
- [29] F. Gräbner, EMV-gerechte Schirmung, Wiesbaden: Springer Verlag, 2013.
- [30] H. Mineif, „Fachgespräch: EMV-Schirmung Hochvoltsspeichergehäuse,“ TA-E-22 BMW, 29.07.2014.
- [31] S. Kloth und H.-M. Dudenhausen, Elektromagnetische Verträglichkeit - Eine anwendungsorientierte Einführung zur Gestaltung störungsarmer elektronischer Systeme, Malmsheim: epert-Verlag, 1995.

# ANHANG A



**HexPly® M49/32%/600S8/GE-300**  
Epoxid Matrix

---

*Datenblatt*

## Beschreibung

HexPly® M49/32%/600S8/GE-300 ist ein Epoxid Prepreg aus einem Gewebe E-Glas. M49 ist die Harzbezeichnung, 32% der Harzgehalt in Gew.-%; 600S8/GE-300 ist die Bezeichnung des Verstärkungsmaterials und GE-300 gibt E-Glas an. Dieses Datenblatt ist mit dem M49 Harzsystemdatenblatt abgestimmt, welches für Zusatzinformationen angefordert werden kann.

## Verstärkungsmaterial

Flächengewicht	g/m <sup>2</sup>	600	0° 300	90° 300
Aufbau		8H Atlas		
Fasertyp		E-Glas		
Faserdichte	g/cm <sup>3</sup>	2.56		

## Matrizeigenschaften

Glasübergangstemperatur vom Laminat (Härtungszyklus: 90 min @ 120°C)	°C	110 (DMA onset, 5°C/min, 1Hz, 15µm)
Harzdichte	g/cm <sup>3</sup>	1.18

## Prepreg Daten

Flächengewicht	g/m <sup>2</sup>	882
Harzgehalt	Gew. %	32
Tack		stark klebrig

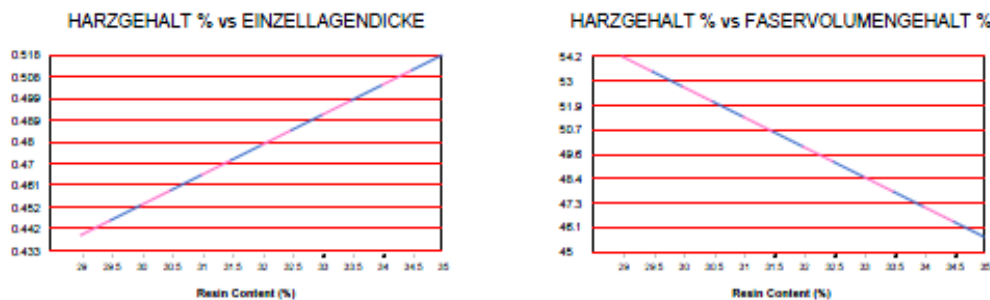
## Verarbeitung

Härtungszyklus	@ 90 °C	360 min
	oder @ 120 °C	90 min
	oder @ 140 °C	30 min
vorgeschlagene Aufheizrate	°C/min	3 - 5
Druck	bar	3 - 7

Der optimale Härnungszyklus, die Aufheizrate und die Verweilzeit hängen von der Größe des Bauteils, dem Laminataufbau, der Ofenkapazität und der Art der verwendeten Vorrichtung ab.

## Laminateneigenschaften

(Laminatdichte 1.86 g/cm<sup>3</sup>)



Die oben angeführten Grafiken ermöglichen die Bestimmung der Lagendicke und des Faservolumengehaltes in Abhängigkeit des Harzgehaltes. Die Berechnung setzt keinen Harzverlust voraus.



For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list please go to :  
<http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>



## HexPly® M49/32%/600S8/GE-300

### Mechanische Eigenschaften

(bezogen auf 50% Faservolumen, gilt nicht für ILSS)

Die mechanischen Eigenschaften basieren auf einer Aushärtung bei 120 °C für 90 Minuten, und einem Druck von 7 bar und -0.9 bar Vakuum.

Diese Werte sind Mittelwerte mehrerer Messungen und bewegen sich. Die Prüfplatten wurden im Autoklav - Verfahren hergestellt.

Kette (RT / Unkonditioniert)	Zugfestigkeit	Biegefestigkeit	ILSS	Compression
Festigkeit (MPa)	550	660	56	460
E-Modul (GPa)	20	21	-	-
Testmethode	EN 2747	EN 2746	EN 2377	EN 2850 B

NB: Biegewerte sind nicht normallisiert

### Lagerbeständigkeit des Prepregs

Lagerstabilität<sup>1</sup>: 12 Monate bei -18°C/0°F (ab Herstellungsdatum).

<sup>1</sup> Die Lagerstabilität ist die maximale Lebensdauer für HexPly® Prepreg, wenn dieses Material immer in der verschlossenen Verpackung bei -18°C/0°F oder 5°C/41°F gelagert wird. Die maximale Lagerstabilität bei Raumtemperatur bezieht sich auf die Zeit zwischen der Entnahme aus dem Kühlhaus und der Aushärtung.

Lagerstabilität<sup>2</sup>: 30 Tage bei Raumtemperatur.

<sup>2</sup> Lagerstabilität: ist die maximale Lagerdauer bei Raumtemperatur, von der Kühlagerentnahme bis zur Verarbeitung.

Das Prepreg soll an einem kühlen, trockenen Ort oder in einem Kühlraum gelagert werden. Nach Entnahme aus dem Kühlraum müssen Prepregs – um die Kondensation von Feuchtigkeit auf den Rollen zu verhindern – in der verschlossenen Verpackung auf Raumtemperatur konditioniert werden. Dies kann bis zu 48 Stunden dauern.

### Vorsichtsmaßnahmen

Die üblichen Vorsichtsmaßnahmen bei der Handhabung von ungehärtetem Harz- und Fasermaterial sollten beachtet werden. Der Gebrauch von Wegwerfhandschuhen bietet dem Anwender Schutz und vermeidet Verunreinigungen am Material und an den Komponenten. Bei Hautkontakt mit Seife und Wasser waschen. Keine Lösungsmittel verwenden. Ein Sicherheitsdatenblatt ist für dieses Produkt verfügbar.

### Wichtig

Alle Informationen sind vermutlich richtig, werden aber ohne jede Haftungsübernahme gegeben. Die Benutzer sollten selbst die Bewertung der Eignung eines Produktes für einen bestimmten Zweck vornehmen. Alle Verkäufe sind unseren allgemeinen Verkaufsbedingungen unterworfen, welche Haftungsbeschränkungen und andere wichtige Bestimmungen enthalten.

© Copyright Hexcel Corporation

HexPly® | M49/32%/600S8/GE-300 | 10/2012 | version : a



For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list please go to :  
<http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>



# ANHANG B

## Prepreg Prepreg Harzsysteme

NEU

### ► Prepregsysteme TEXIPREG® und HexPly®

TEXIPREG® und HexPly® sind mit Epoxid- oder Phenolharzen imprägnierte Gewebe und Gelege aus Glas-, Kohle- und Aramidfasern. Je nach Anforderungen an das fertige Bauteil und Wahl des geeigneten Verfahrens stehen unterschiedliche Harzsysteme zur Verfügung. Wichtige Parameter bei der Auswahl des passenden Harzsystems sind zum Beispiel thermische und mechanische Eigenschaften des ausgehärteten

Harzes, Fließfähigkeit, Härtungstemperatur und -zeit, Klebrigkeit (tack), Lagerfähigkeit, etc. Prepregs müssen gekühlt und immer im luftdicht verschlossenen Foliensack lagern. Vor dem Verarbeiten muss das Prepreg im geschlossenen Foliensack bei Raumtemperatur für 3–6 Stunden aufgetaut werden. Erst danach öffnen! Lagerfähigkeit bei -18 °C: 12 Monate. Verarbeitbar bei 20 °C: Je nach Harzsystem 7–60 Tage.

#### ① Kombinationsmöglichkeiten

Die im Folgenden aufgeführten Harzsysteme sind mit allen gängigen Geweben aus Glas-, Kohle-, Aramid- und Mischfasern kombinierbar. Ebenso lässt sich eine Reihe von unidirektionalen und multiaxialen Gelegen mit Matrixharzen imprägnieren. Sprechen Sie uns an, wir beraten Sie gerne.

Harzsysteme TEXIPREG®						Branchen ↗ ↘ ↻ ♥
Harz	Druck bar	Temperatur °C	Härtezeit	Nachttempn	TG °C	Eigenschaften und Anwendungen
ET 445 (EP)	1–7	125	30 min	nein	135	Sehr gute Oberflächen, für Automobil, Sport und Boote.
ET 222 (EP)	3–7	125 80 60	30 min 7 h 14 h	nein nein nein	120 90 70	Niedertemperaturprepreg, für allgemeine Anwendungen.
ER 450 (EP)	1–7	160 120 80	7 min 1 h 16 h	nein nein nein	165 135 95	Zähmodifiziertes EP-System mit hoher Wärmeformbeständigkeit für Strukturbauteile in Automotive und Industrie.
EF 451 (EP)	2–7	150	2 h	nein	160	Selbstverlöschend, für Innenauskleidung von Automobil- und Luftfahrzeugen.
ES 253 (EP)	6–7	60 40	8 h 23 h	ja ja	> 180	Niedertemperaturprepreg mit hoher Temperaturfestigkeit, für Formen- und Vorrichtungsbau.
EC 551 (CE)	1–3	140	1 h	ja	300	Prepreg mit sehr hoher Temperaturfestigkeit.
FF 562 (PH)	2–5	135	75 min	nein	> 180	Selbstverlöschend, für Innenauskleidung von Automobil- und Luftfahrzeugen.

TEXIPREG® sind Produkte der Firma SAATI

NEU

## Prepreg Prepreg Harzsysteme

Harzsysteme HexPly®						Branchen ↗ ⚡ ⚙️ ❤️
Harz	Tack	TG max °C	Härtungsverfahren			Eigenschaften und Anwendungen
			Vakuumsack	Autoklav	Presse	
M10	mittel	125	✓	✓	✓	Härtung zwischen 85 °C und 150 °C möglich. Lagerfähigkeit 60 Tage bei RT. Harz härtet transluzent mit guter Oberflächenqualität aus. Für allgemeine Anwendungen im Bereich Windenergie, Schienenfahrzeuge, Automobil, Marine, Sportartikel.
M49	hoch	125	✓	✓	–	Härtung zwischen 85 °C und 150 °C möglich. Lagerfähigkeit 30 Tage bei RT. Im Vergleich zu M10 höhere Festigkeit und sehr gute UV- und Witterungsbeständigkeit. Für Automobil, Motorrad, Sportartikel und Carbon-Optik geeignet.
M47	mittel	150	–	✓	o	Härtung zwischen 90 °C und 150 °C möglich. Lagerfähigkeit 30 Tage bei RT. Sehr gute Dauerfestigkeit in der Wärme. Für Struktur- und Designbauteile im Automobilbau.
M77	mittel	125	o	o	✓	Sehr schnelles EP-System für Pressanwendungen, bei denen kurze Zykluszeiten verlangt werden. Härtet bei 160 °C in 90 Sekunden! Zähmodifiziert, für hohe Beanspruchung geeignet. Lagerfähigkeit 45 Tage bei RT.
M35-4	hoch	200	–	✓	o	Härtung zwischen 80 °C und 180 °C möglich. Lagerfähigkeit 60 Tage bei RT. Für Anwendungen, in denen eine sehr hohe Dauerfestigkeit in der Wärme gefordert wird, z. B. Automobil, Maschinenbau, Werkzeugbau.
M34	hoch	100	✓	o	o	Härtung zwischen 65 °C und 120 °C möglich. Lagerfähigkeit 10 Tage bei RT. Selbstverlöschend nach DIN 5510 und NF F 16-101. Für den Einsatz in Schienenfahrzeugen zugelassen. Ideal für Niedertemperaturhärtung von großflächigen Sandwichstrukturen mit Schaumkernen geeignet.
M81	mittel	210	–	✓	o	Hochtemperaturprepreg für thermisch und dynamisch höchst beanspruchte Bauteile. Härtung bei 180 °C über 2 Std. Kontrollierter Fluss. Lagerfähigkeit 21 Tage bei RT.
M26T	niedrig	105	o	✓	o	Selbstverlöschendes EP-System mit sehr guter Haftung auf Honeycombs. Härtung zwischen 100 °C und 150 °C möglich. Lagerfähigkeit 30 Tage bei RT.

HexPly® sind Produkte der Firma Hexcel.

✓ = empfohlen    o = möglich    – = nicht empfohlen

## ANHANG C

MATERIALE		AA285-DT120-50		
Fibra		Twaron 2200 (style 285)		
Peso areale di fibra (g/m <sup>2</sup> )		170		
Stile di tessitura		Raso turco		
Matrice		DT120		
Contenuto di resina (% in peso)		50		
Ciclo di cura		120°C, 90 min, 6 bar		
TEST		Norma EN	Unità	
Trazione 0° (RT)	Resistenza	2597	MPa	636,8
	Modulo	2597	GPa	30,5
Trazione 90° (RT)	Resistenza	2597	MPa	558
	Modulo	2597	GPa	27,6
Trazione 45° (In plane shear)	Resistenza	6031	MPa	117,8
	Modulo	6031	GPa	1,63
Flessione 0° (RT)	Resistenza	2562	MPa	
	Modulo	2562	GPa	
Compressione 0° (RT)	Resistenza	2850	MPa	189,5
	Modulo	2850	GPa	25,7
Compress. 0° (90°C)	Resistenza	2850	MPa	
	Modulo	2850	GPa	
Compressione 90° (RT)	Resistenza	2850	MPa	184,6
	Modulo	2850	GPa	26,9
ILSS 0° (RT)		2563	MPa	
ILSS 0° (7gg in benz)		2563	MPa	
ILSS 0° (90°C)		2563	MPa	
<b>Note:</b>				

# ANHANG D

## COMPOSITE PANEL DATA SHEET



### INNEGRA™ S / 7781 FIBERGLASS PREPREG PANEL

#### PANEL CONSTRUCTION

##### MATERIALS

[I] Innegra™ S fabric – 940 Denier 3.6 oz/yd<sup>2</sup> (122gsm) plain weave / Axiom Ax-3201M Prepreg

[FGE] Fiberglass fabric – Style 7781 E-glass 8H satin 9.0 oz/yd<sup>2</sup> (303gsm) / Axiom Ax-3201M Prepreg

##### LAYUP

- Ply Schedule: [FGE] 2 ply / [I] 6 ply / [FGE] 2 ply
- Cure Cycle: Apply 10-50 psi (0.69-3.45 bar), Ramp RT to 250°F (121°C) at 2-4°F/ minute (1-2°C/minute). Hold 60 minutes at 250°F (121°C). Cool to 180°F (82°C) or below and remove pressure.
- Resin content: 38% ±3 by volume

#### MECHANICAL TEST DATA

PROPERTY	TEST METHOD	AVERAGE VALUES	
Panel Thickness		0.09 in.	2.35 mm
Panel Density			1.36 g/cm <sup>3</sup>
Tensile Strength	ASTM D3039	25.46 ksi	175.60 MPa
Tensile Modulus	ASTM D3039	2.03 Msi	14.02 GPa
Compressive Strength	ASTM D790	25.24 ksi	174.00 MPa
Compressive Modulus	ASTM D790	1.93 Msi	13.28 GPa
Flexural Strength	ASTM D6641	42.06 ksi	289.80 MPa
Flexural Modulus	ASTM D2344	2.96 Msi	20.44 GPa
In - Plane Ult Shear Stress	ASTM D2344	4261.00 psi	29.40 MPa
In – Plane 0.2% Shear Stress	ASTM D3518	2233.00 psi	15.40 MPa
In-Plane Shear Modulus	ASTM D3518	0.47 Msi	3.22 GPa
Short Beam Shear Strength	ASTM D3518	3.36 ksi	23.20 MPa
Poisson's Ratio	ASTM D7136		
Low Velocity Impact – Max Load	ASTM D7136	948.2 lb	4217.8 N
Low Velocity Impact – Energy Absorbed	ASTM D7136	15.6 ft lbF	21.1 J

All testing performed by a NADCAP accredited laboratory.