

## **Bachelorarbeit**

Julian Storch

# **Konzeption einer gewichtsoptimierten Fahrgestell- Batterie Kombination für batterieelektrische LKW**

**Julian Storch**  
**Konzeption einer gewichtsoptimierten Fahrgestell-  
Batterie Kombination für batterieelektrische LKW**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugbau Nutz- und Sonderfahrzeuge  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
EDAG Engineering GmbH  
Abteilung Nutzfahrzeuge  
Steinauer Straße 20  
36100 Petersberg

Erstprüfer: Prof. Peter Seyfried  
Zweitprüfer: Dip.-Ing. (FH) Stephan Bäumler

Abgabedatum: 11. Mai 2023

## **Zusammenfassung**

**Julian Storch**

### **Thema der Bachelorarbeit**

Konzeption einer gewichtsoptimierten Fahrgestell-Batterie Kombination für batterieelektrische LKW.

### **Stichworte**

Fahrgestellrahmen, Batterieelektrische LKW, Simens NX, NX-Nastran

### **Kurzzusammenfassung**

Batterieelektrische LKW bieten neue Herausforderungen im Hinblick auf die Unterbringung der Energiespeicher. In dieser Arbeit werden verschiedenen Konzepte zur Unterbringung der Energiespeicher in den Fahrgestellrahmen entwickelt. Dabei gilt es ausreichend Volumen für die Energiespeicher zu bieten, sowie Anbindungspunkte für Bauteile wie Achsen, Kabine und Aufbau vorzusehen. Aus den verschiedenen Konzepten wird ein Siegerkonzept gewählt und mit NX-Nastan berechnet und bewertet.

**Julian Storch**

### **Title of the paper**

Conception of a weight-optimized chassis-battery combination for battery-electric trucks

### **Keywords**

Chassis frame, battery electric trucks, Simens NX, NX-Nastran

### **Abstract**

Battery-electric trucks offer new challenges in terms of accommodating the energy storage. In this work, different concepts for accommodating the energy storage in the chassis frame are developed. It is important to provide sufficient volume for the energy storage and to provide connection points for components such as axles, cabin and the body builder. A winning concept is chosen from the various concepts and calculated and evaluated with NX-Nastan.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	VI
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
<b>Indizes</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung.....	1
1.2 Ausgangssituation.....	1
1.3 Vorgehen und Zielsetzung .....	2
<b>2 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen LKW Fahrgestell.....	3
2.1.1 Anforderungen (Torsion etc.).....	3
2.1.2 Belastungen.....	5
2.2 Grundlagen Elektrischer Antrieb .....	6
2.2.1 Antriebskonfiguration .....	6
2.2.2 Aufbau Energiespeicher.....	9
2.2.3 Zellformate.....	11
2.2.4 Zusätzliche Komponenten .....	13
<b>3 Stand der Technik .....</b>	<b>15</b>
3.1 Batterieanbindung/ Fahrgestell .....	15
3.1.1 Mercedes Urban eTruck .....	15
3.1.2 Mercedes eActros.....	16
<b>4 Konzeptfindung .....</b>	<b>17</b>
4.1 Definition Randbedingungen und Packegeraum .....	17
4.1.1 Fahrzeugabmessungen .....	17
4.1.2 Energiespeicher Abmessungen .....	18
4.2 Morphologischer Kasten .....	21
4.3 Konzepte.....	22
4.3.1 Konzept 1.....	22

---

4.3.2	Konzept 2.....	23
4.3.3	Konzept 3.....	23
4.3.4	Konzept 4.....	25
4.3.5	Konzept 5.....	26
4.3.6	Konzept 6.....	27
<b>5</b>	<b>Konzeptbeurteilung.....</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>Ausarbeitung und Berechnung der Siegervariante.....</b>	<b>31</b>
6.1	Konstruktion .....	31
6.2	Berechnung.....	34
6.3	Auswertung .....	36
<b>7</b>	<b>Fazit 38</b>	
7.1	Zusammenfassung.....	38
7.2	Ausblick.....	39
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>40</b>
<b>Anhang</b>	<b>IX</b>	
	Anhang A: Eigenständigkeitserklärung.....	IX

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Offenes und geschlossenes Profil im Vergleich [6].....	4
Tabelle 4.1: Morphologischer Kasten .....	21
Tabelle 5.1: Bewertungsmatrix .....	28

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Anteile Gesamtfederung Torsion .....	4
Abbildung 2.2: Verwölbung offener Profile unter Torsion [7] .....	4
Abbildung 2.3: Querträgeranschluss an Längsträger unter Torsion [6], S.345 .....	5
Abbildung 2.4: Busantrieb mit Radnabenmotoren [9] .....	6
Abbildung 2.5: Radantrieb des SLS AMG E-Cell [10] .....	7
Abbildung 2.6: Varianten Achsantrieb [8], S.61 .....	7
Abbildung 2.7: Elektrifizierte LKW-Achse, 420 kW [22] .....	8
Abbildung 2.8: Aufbau Zelle [11].....	9
Abbildung 2.9: Schaltung Batteriezellen .....	10
Abbildung 2.10: Aufbau Rundzelle [14] .....	11
Abbildung 2.11: Aufbau Pouchzelle [14].....	12
Abbildung 2.12: Aufbau prismatische Zelle [15].....	12
Abbildung 3.1 Mercedes Urban eTruck Aufbau [4] .....	15
Abbildung 3.2 Mercedes Urban eTruck Prototyp [4] .....	16
Abbildung 3.3 Mercedes eActros [5].....	16
Abbildung 4.1: Sattelkraftfahrzeug [16].....	17
Abbildung 4.2: Sattelkraftfahrzeug im BO-Kraftkreis .....	18
Abbildung 4.3: Tägliche Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge [18].....	18
Abbildung 4.4: Konzept 1 - isometrische Ansicht.....	22
Abbildung 4.5: Konzept 1 - Seitenansicht.....	22
Abbildung 4.6: Konzept 2 - isometrische Ansicht.....	23
Abbildung 4.7: Konzept 3 - isometrische Ansicht.....	23
Abbildung 4.8: Konzept 3 - Heckansicht.....	24
Abbildung 4.9: Konzept 4 - isometrische Ansicht.....	25
Abbildung 4.10: Konzept 5 - isometrische Ansicht.....	26
Abbildung 4.11: Konzept 6 - isometrische Ansicht.....	27

Abbildung 5.1: FEM-Modell Konzept 1 .....	29
Abbildung 5.2: FEM-Analyse Konzept 3 .....	29
Abbildung 5.3: FEM-Analyse Konzept 4 .....	29
Abbildung 5.4: FEM-Analyse Konzept 1 .....	29
Abbildung 6.1: Abmessungen Fahrgestell .....	31
Abbildung 6.2: Vergleich Zwillingsbereifung - Super-Single [23] .....	31
Abbildung 6.3: Geschweißtes Anhängerfahrgestell [24] .....	32
Abbildung 6.4: Grundgeometrie Fahrgestell .....	32
Abbildung 6.5: Konstruktion Bleche .....	33
Abbildung 6.6: Bodenblech Fahrgestell .....	33
Abbildung 6.7: Fahrgestell mit Verstärkungen .....	34
Abbildung 6.8: Vernetztes Berechnungsmodell .....	34
Abbildung 6.9: Berechnungsmodell in Simulationsumgebung .....	35
Abbildung 6.10: Simulation Verformung .....	36
Abbildung 6.11: Simulation Spannungen .....	36

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol/ Abkürzung	Bedeutung	Einheit
$c$	Steifigkeit	N/m
$F$	Kraft	N
$m$	Masse	kg
$f_0$	Eigenfrequenz	Hz
$s$	Verschiebung	m
$f_{\text{Abtast}}$	Abtastfrequenz	Hz
$v, \dot{x}$	Geschwindigkeit	m/s
$a, \ddot{x}$	Beschleunigung	m/s <sup>2</sup>
$W_{\text{Vert}}$	Dämpfungsarbeit	N*m
$E_{\text{pot}}$	Potentielle Energie	N*m
$\psi$	Dämpfungsfaktor	-
$\Delta s, x$	Verformung	m
$T_g$	Glasübergangstemperatur	°C
$t$	Zeit	s
$b$	Dämpfungskoeffizient	kg/s
$H$	Haftkraft	N

## Indizes

Indize	Bedeutung
$( )_{00}$	auf unteren Beschleunigungssensor bezogen
$( )_{01}$	auf oberen Beschleunigungssensor bezogen
$( )_i$	allgemein
$( )_{\text{max}}$	Maximalwert
$( )_M$	Messung
$( )_F$	Feder
$( )_D$	Dämpfer
$( )_R$	Reibung
$( )_0$	Zeitpunkt $t = 0$



# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung

Die Nachfrage nach emissionsarmen bzw. emissionslosen Fahrzeugen steigt aufgrund gesetzlicher Vorgaben immer weiter. Viele Menschen, wie auch Unternehmen, fordern ab 2035 nur noch emissionsfreie Nutzfahrzeuge neu zuzulassen. Dies sei nötig, um das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen, da ein LKW in Europa im Schnitt 18 Jahre genutzt wird (vgl. [1]). Derzeit sieht das EU-Recht vor, den CO<sub>2</sub> Ausstoß im Flottendurchschnitt bis 2030 um 30 % zu reduzieren (vgl. [1]).

## 1.2 Ausgangssituation

Aktuell werden konventionelle Nutzfahrzeuge primär mit Diesel-Verbrennungsmotoren betrieben. Diese Antriebstechnologie hat sich aufgrund seiner hohen Reichweiten, sowie dem hohen Drehmoment durchgesetzt. Im Rahmen der Dekarbonisierung des Mobilitätssektors müssen nun andere Antriebssysteme in den Vordergrund rücken. Eine Lösung bieten hierbei elektrische Antriebe, da diese beim Betrieb emissionsfrei arbeiten und einen hohen Wirkungsgrad bieten. Die größte Herausforderung bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist die Energiespeicherung. Hierfür gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Zum einen sind Wasserstoffspeicher in Kombination mit einer Brennstoffzelle im Gespräch, zum anderen die Speicherung in wiederaufladbaren Batterien. Einige Nutzfahrzeughersteller wie MAN und Scania setzen komplett auf die Batterielösung, während andere Hersteller wie Mercedes oder Volvo beide Varianten anbieten wollen (vgl. [2]). Die Herausforderung für batterieelektrische Nutzfahrzeuge ist dabei die niedrige Reichweite, verbunden mit einem hohen Gewicht der Energiespeicher. Allerdings gibt es auch einige Vorteile, die sich aus der Elektrifizierung des Antriebsstrangs ergeben. Der Aufbau des Elektroantriebs benötigt deutlich weniger Einzelteile und vor allem weniger bewegliche Teile. Dies senkt die Betriebs- sowie die Wartungskosten. Ein weiterer Vorteil ist die geringe Geräuschemission im Vergleich zum Verbrennungsmotor. Außerdem kann Energie durch Rekuperation beim Bremsen des Fahrzeugs zurückgewonnen werden, weswegen ein effizienteres Fahren möglich ist (vgl. [3]).

### **1.3 Vorgehen und Zielsetzung**

Ziel dieser Arbeit soll die Ausarbeitung verschiedener Fahrgestellkonzepte in Kombination mit der Batterieunterbringung für einen batterieelektrischen LKW sein. Hierbei soll nicht nur der klassische Leiterraum untersucht werden, sondern auch alternative Konzepte mit beispielsweise selbsttragenden Strukturen und Batterien. Zunächst sollen dem Leser die Grundlagen und Anforderungen eines LKW-Fahrgestell dargestellt werden. Hierbei soll besonders auf die unterschiedlichsten Anwendungsfälle, sowie Fahrzeugkonfigurationen eingegangen werden. Als nächstes werden die elektrischen Komponenten wie die Energiespeicher und der Antrieb beleuchtet. Außerdem werden verschiedene Konzepte zur Unterbringung der Komponenten aktueller batterieelektrischer LKW analysiert. Es sollen verschiedene Konzepte mit Hilfe eines Morphologischen Kastens erarbeitet und definiert werden. Diese Konzepte sind mit Hilfe einer Bewertungsmatrix zu bewerten. Das Siegerkonzept wird genauer realisiert und mit NX-Nastran numerisch berechnet. Die Ergebnisse sind zu analysieren.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Grundlagen LKW Fahrgestell

Ein Fahrgestell von Nutzfahrzeugen muss Anbindungspunkte für das Fahrwerk bieten, sowie die Gewichtskräfte des Eigengewichts und der Nutzlast aufnehmen und übertragen können. Es wird grundsätzlich zwischen drei unterschiedlichen Fahrgestelltypen unterschieden:

- **Volltragend:** Das Fahrgestell ist volltragend, der Aufbau bietet nur eine Hülle für die Nutzlast
- **Mittragend:** Bei dem mittragenden Fahrgestell teilen sich Aufbau und Fahrgestell die Lastaufnahme. Eine Schwierigkeit bei diesem System ist die Aufteilung der Biege- und Torsionssteifigkeiten auf die beiden Komponenten.
- **Selbsttragend:** Der vorhandene Aufbau ist volltragend und überträgt alle auftretenden Kräfte. Ein eigenes Fahrgestell ist dann nicht vorhanden. Dieser Aufbau kommt fast immer bei Personenkraftwagen sowie Omnibussen zur Anwendung.

Für Nutzfahrzeuge haben sich bis auf wenige Ausnahmen volltragende Fahrgestelle durchgesetzt. Sie bieten die Möglichkeit verschiedenste Aufbauten anzubinden und eine wirtschaftliche Serienfertigung unabhängig vom späteren Aufbau zu realisieren (vgl. [6], S. 342). Dieses Fahrgestell wird in den meisten Fällen über einen Leiterraum ausgeführt. Ein Leiterraum besteht aus zwei Längsträgern und mehreren Querträgern, welche von oben betrachtet die Form einer Leiter ergeben.

#### 2.1.1 Anforderungen (Torsion etc.)

Durch unterschiedliche Anordnungen der Elemente (Längs- und Querträger), sowie durch die Profilform lassen sich die Eigenschaften des Fahrgestells gezielt anpassen. Übliche Leiterraum sind biegesteif, aber je nach Anforderung entweder Torsionsweich oder Torsionssteif ausgeführt. Die Anforderung richtet sich dabei nach der Art des späteren Einsatzes (auf der Straße oder im Gelände) und der Nachgiebigkeit der Aufbaubefestigung. Während ein Fahrzeug im Straßeneinsatz kaum mehr als  $\pm 2^\circ$  Verwindung zwischen Vorder- und Hinterachse ausgleichen muss, sind im Geländeeinsatz bis zu  $\pm 20^\circ$  Verwindung möglich (vgl. [6], S.343). Wie in Abbildung 2.1 zu erkennen ist, muss die Verwindung bei einem torsionssteifen Rahmen (b) fast vollständig durch das Fahrwerk (Federn) ausgeglichen werden, während beim torsionsweichen Rahmen (a) ein Großteil der Verwindung über die Rahmentorsion abgefangen wird. Eine Verwindung von  $20^\circ$  entspricht dann bei einer Spurweite von 2200mm schon einem Höhenunterschied von 800mm.

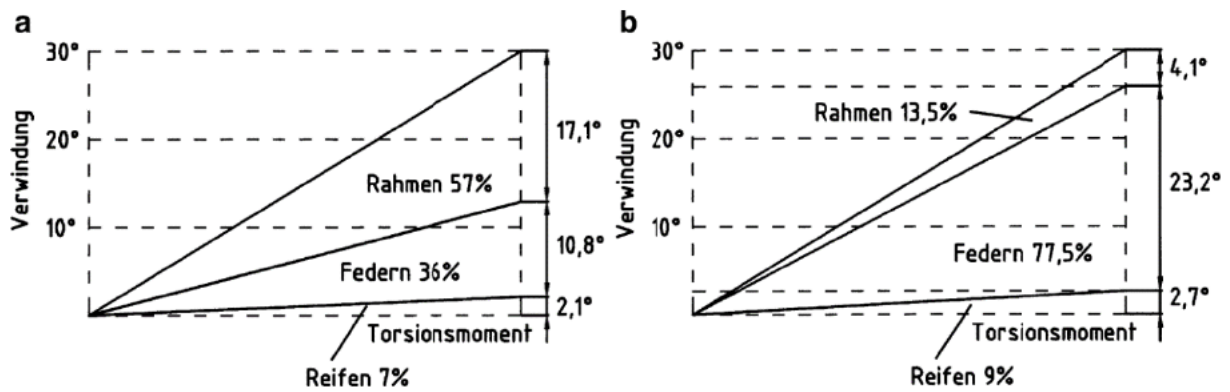


Abbildung 2.1: Anteile Gesamtfederung Torsion

Profil	A (cm <sup>2</sup> )	I <sub>ax</sub> (cm <sup>4</sup> )	W <sub>ax</sub> (cm <sup>3</sup> )	I <sub>p</sub> (cm <sup>4</sup> )	W <sub>p</sub> (cm <sup>3</sup> )
U 200 x 100 x 7,5	29	1790	179	6	8
Rechteckrohr 200 x 100 x 5	29	1520	152	1410	300

Tabelle 2.1 Offenes und geschlossenes Profil im Vergleich [6]

Die unterschiedlichen Torsionssteifigkeiten lassen sich am effektivsten über die Profilform realisieren. Ein offenes Profil weist bei großem axialem Flächenmoment 2. Grades I<sub>ax</sub> ein kleines polares Flächenmoment I<sub>p</sub> auf (Siehe Tabelle 2.1). Ein geschlossenes Profil ist bei etwa gleichen Hauptabmessungen deutlich torsionssteifer (Siehe Tabelle 2.1, vgl. U-Profil und Rechteckrohr). Die großen Unterschiede entstehen durch die eingeschränkte Verschiebung der Flächen bei geschlossenen Profilen. Bei geschlossenen Profilen bleiben alle Querschnitte in sich selbst eben und verschieben sich nur gegenseitig (vgl. [6], S. 344). Wie in Abbildung 2.2 zu erkennen ist, verwölben sich bei offenen Profilen die Querschnitte unter Torsionsbelastung. Diese Verwölbung bewirkt eine Verschiebung der Ränder in entgegengesetzte Richtung parallel zur Profillängsachse.

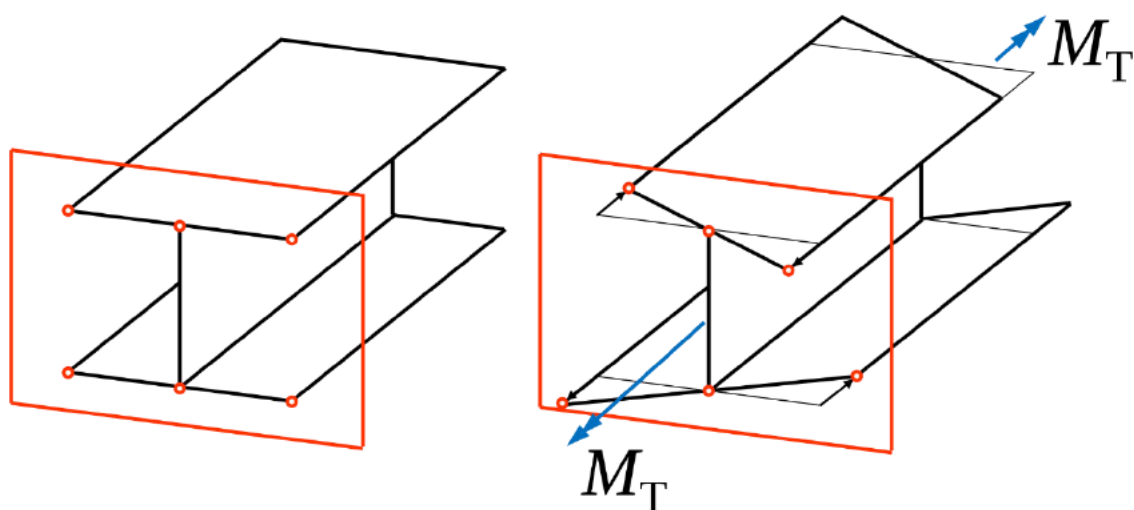


Abbildung 2.2: Verwölbung offener Profile unter Torsion [7]

Auch die Anbindung der verschiedenen Träger untereinander beeinflusst die Torsionssteifigkeit des Rahmens. Durch eine umlaufend feste Einspannung eines offenen Profils, wird die Verschiebung verhindert bzw. eingeschränkt und das Profil wird dadurch Torsionssteifer. Außerdem entstehen an den Rändern der Einspannstellen, wie in Abbildung 2.3 zu erkennen ist, deutlich erhöhte Spannungen, welche eine erhöhte Bruchgefahr bedeuten können. Deswegen ist speziell bei torsionsweichen Rahmen auf angepasste Profilanschlüsse zu achten.

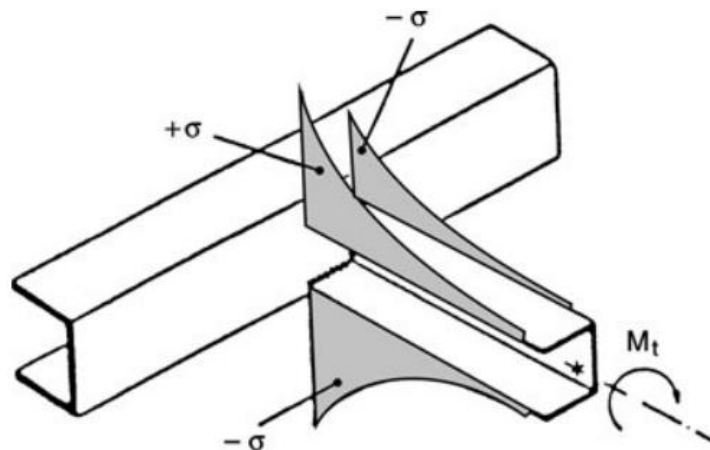


Abbildung 2.3: Querträgeranschluss an Längsträger unter Torsion [6], S.345

### 2.1.2 Belastungen

Ein Fahrzeug ist durch sein Eigengewicht, sowie durch das Gewicht der Nutzlast bereits im Stand statisch belastet. Zusätzlich kommen dann im Fahrbetrieb dynamische Belastungen hinzu. Zu den statischen Belastungen zählen (vgl. [6] S.352):

- Biege- und Torsionsbelastungen aus Gewichtskräften
- Biege- und Torsionsbelastungen infolge einseitiger Beladung und Seitenwind
- Biegebelastung durch Achslastverlagerungen
- Biegebelastung aus Hangabtriebskräften
- Torsionsbelastung aufgrund diagonaler Bodenunebenheiten

## 2.2 Grundlagen Elektrischer Antrieb

### 2.2.1 Antriebskonfiguration

Bei batterieelektrischen Nutzfahrzeugen erfolgt der Antrieb elektrisch. Die Energie wird aus in dem Fahrzeug mitgeführten Batterien bereitgestellt. Beim konventionellen Antrieb mit Verbrennungsmotor hat sich ein zentraler Motor, der über ein Getriebe, Gelenkwellen sowie Achsdifferentialie mit den Rädern verbunden ist, etabliert. Für elektrische Fahrzeugantriebe ergeben sich neue Möglichkeiten aufgrund des einfacheren Aufbaus (vgl. [8], Kap. 2):

- Radnabenantrieb:

Beim Radnabenantrieb sitzt der Elektromotor, wie in Abbildung 2.4 zu erkennen, direkt in der Radnabe und jedes Rad wird einzeln angetrieben. Vorteil dieses Konzeptes ist der geringe Platzbedarf. Allerdings gibt es auch viele Nachteile. Da zwei Motoren mehr Komponenten wie, zwei Wechselrichter, mehr elektrische Verkabelung, mehr Kühlmittelanschlüsse/ -leitungen sowie eine komplexere Synchronisierung der Regelungen benötigen, ist mit erhöhten Kosten zu rechnen. Durch die großen ungefederten Massen ergibt sich außerdem ein schlechteres Fahrverhalten. Die Konstruktion der Motoren hat hohe Anforderungen, da sie durch die Lage nahe der Bremse in einem großen Temperaturbereich arbeiten müssen und Schmutz, Feuchtigkeit sowie Vibrationen ausgesetzt sind. Durch die Lage der Motoren können auch bei kleinen Unfällen große Reparaturkosten entstehen. Aus diesen Gründen werden Radnabenantriebe heute nur in speziellen Anwendungsbereichen verwendet.

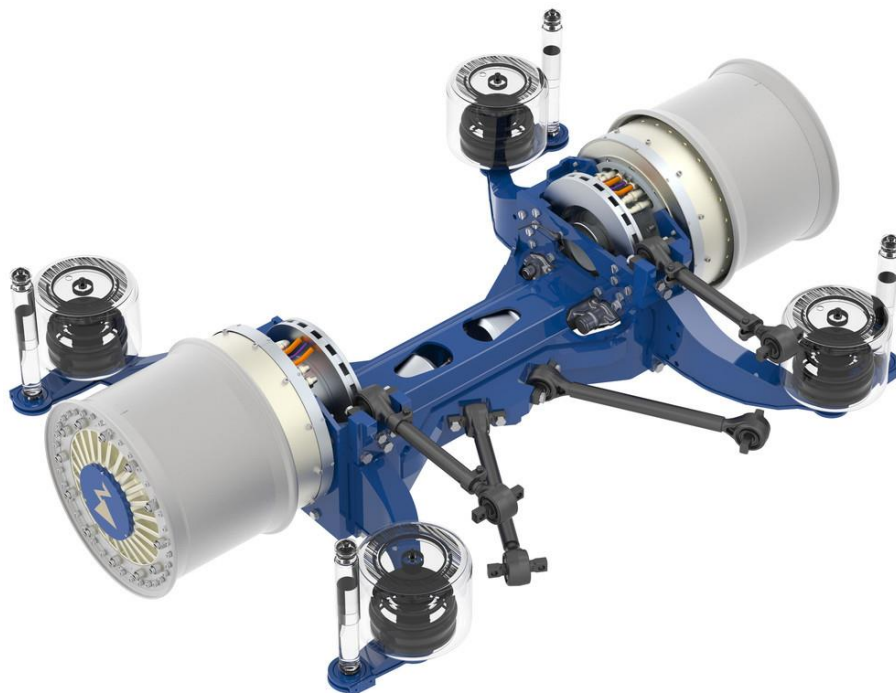


Abbildung 2.4: Busantrieb mit Radnabenmotoren [9]

- Radantrieb

Beim Radantrieb wird ebenfalls jedes Rad mit einem einzelnen Motor angetrieben, allerdings sitzen diese nicht direkt in der Radnabe. Die Motoren sind bei dieser Antriebsart an der Antriebswelle im Fahrzeuginneren angebracht. Meist ist zwischen Welle und Motor noch ein Getriebe geschaltet (vgl. [8]). Durch das Getriebe lassen sich hochdrehende Motoren verwenden, die eine bessere Leistungsdichte als die Radnabenmotoren besitzen. Auch bei diesem Konzept entstehen durch zwei Motoren, sowie die zugehörigen Komponenten erhöhte Kosten.

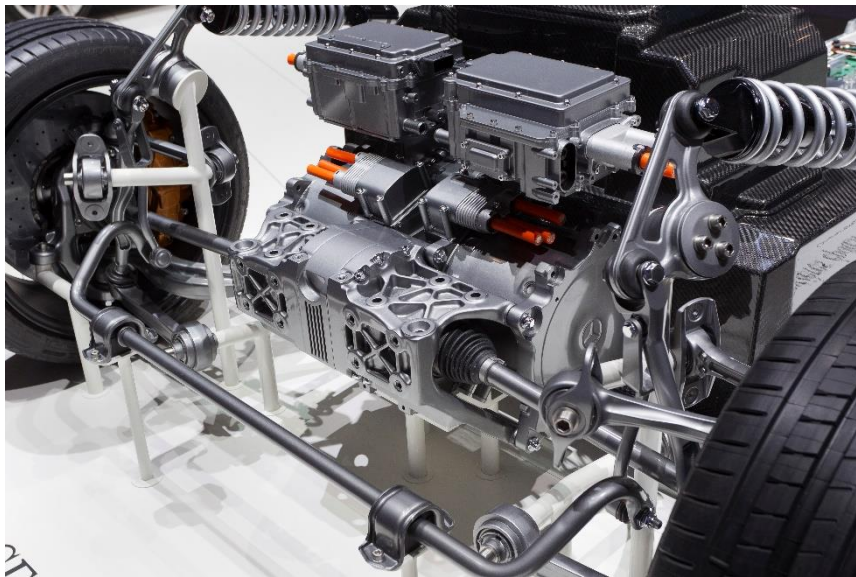


Abbildung 2.5: Radantrieb des SLS AMG E-Cell [10]

- Achsantrieb

Beim Achsantrieb wirkt ein zentraler Motor über ein Getriebe und ein Differenzial auf die Antriebsachse (vgl. [8]). Diese Antriebsart ist für elektrische Fahrzeuge die gebräuchlichste. Bei diesem Konzept wird zusätzlich aufgrund verschiedener Motorenanordnungen unterschieden (siehe Abb. 2.6).

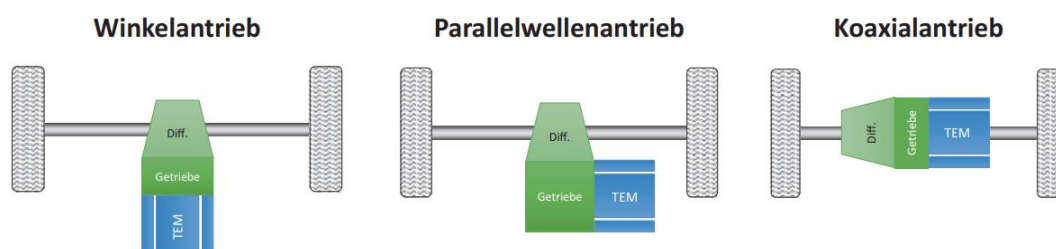


Abbildung 2.6: Varianten Achsantrieb [8], S.61

Der Winkelantrieb bietet die größten Freiräume für die Gestaltung des Elektromotors, welche beim Parallelwellenantrieb im Durchmesser des Motors eingeschränkt sind. Beim Koaxialantrieb wird die Antriebswelle durch die hohle Motorwelle zurück nach außen geleitet. So lässt sich ein besonders kompakter Antrieb realisieren, allerdings muss die Motorentechnologie einen solchen Aufbau zulassen.

Mit dem Winkelantrieb lässt sich eine ähnliche Antriebskonfiguration wie bei konventionellen LKW mit Verbrennungsmotor realisieren. Hierfür kann der Elektromotor gemeinsam mit dem Getriebe über Antriebswellen mit dem Achsdifferential verbunden werden. Der Motor kann dann im Fahrgestell beispielsweise unter der Kabine untergebracht werden. Durch die Entkopplung von Achse und Motor ist dieser nicht den vollen Vibrationen, die von der Fahrbahn ausgehen, ausgesetzt, was die Langlebigkeit des Antriebstrangs verbessert. Da die Antriebswelle Packageraum im Fahrgestell versperrt, setzen die meisten Nutzfahrzeughersteller aktuell dennoch auf elektrifizierte Achsen (siehe Abbildung 2.7), da so mehr Raum für die Energiespeicher zur Verfügung steht.

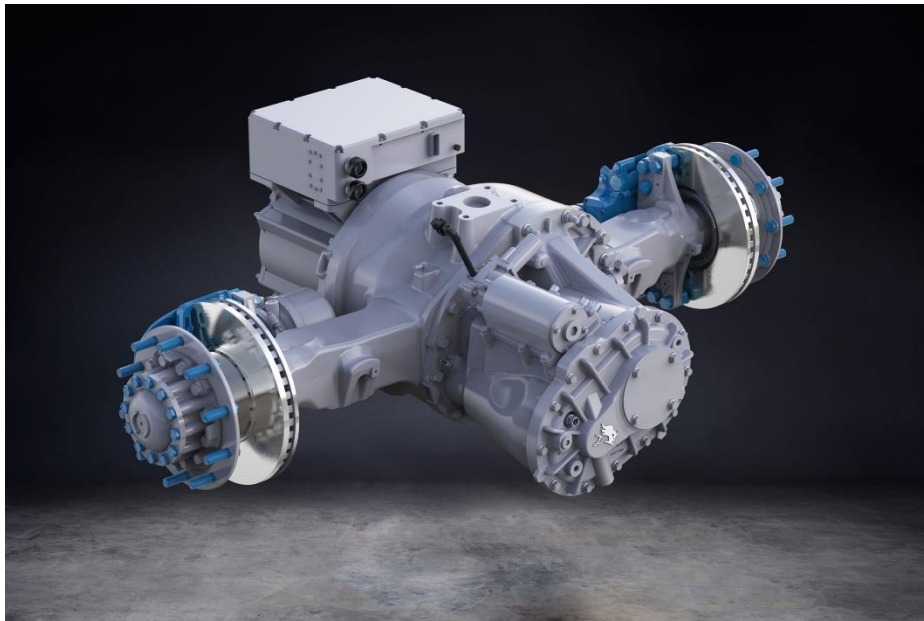


Abbildung 2.7: Elektrifizierte LKW-Achse, 420 kW [22]



## 2.2.2 Aufbau Energiespeicher

Die Energiespeicher, die für Elektrofahrzeuge verwendet werden, arbeiten elektrochemisch. Diese elektrochemischen Speicher werden in Primärelemente, Sekundärelemente und Tertiärelemente unterschieden. **Primärelemente** sind Energiespeicher, die irreversible arbeiten, also nicht wiederaufladbar sind (Batterien). **Sekundärelemente** arbeiten hingegen mit reversibler Zellreaktion und sind somit wieder aufladbar. Umgangssprachlich werden sie ebenfalls als Batterien bezeichnet, der korrekte Begriff lautet allerdings Akkumulator (kurz: Akku). **Tertiärelemente** sind Energiespeicher, bei denen die Zellreaktion kontinuierlich ablaufen kann. Ein Anwendungsfall von Tertiärelementen sind Brennstoffzellen (vgl. [8] S.130). In dieser Arbeit werden Sekundärelemente betrachtet, da diese für batterieelektrische Fahrzeuge verwendet werden.

Die kleinste Einheit im Energiespeicher sind die Zellen. Dort findet die Umwandlung von chemischer in elektrische Energie statt. Diese Zellen bestehen, wie in Abbildung 2.8 zu erkennen, aus zwei unterschiedlichen Materialien (Anode und Kathode), welche eine Differenz in der elektrochemischen Spannungsreihe besitzen. Diese Differenz ergibt die Zellspannung. Die beiden Materialien werden von einer Elektrolytlösung umgeben. Dieses Elektrolyt darf nur Ionen leiten, da die Elektronen über den Verbraucher wandern und somit genutzt werden können. Zusätzlich schützt ein Separator die beiden Materialien vor einem direkten Kontakt, welcher zu einem Kurzschluss führen würde. Der Separator sollte möglichst dünn sein, sowie eine gute Ionen-Leitfähigkeit besitzen (vgl. [8]).

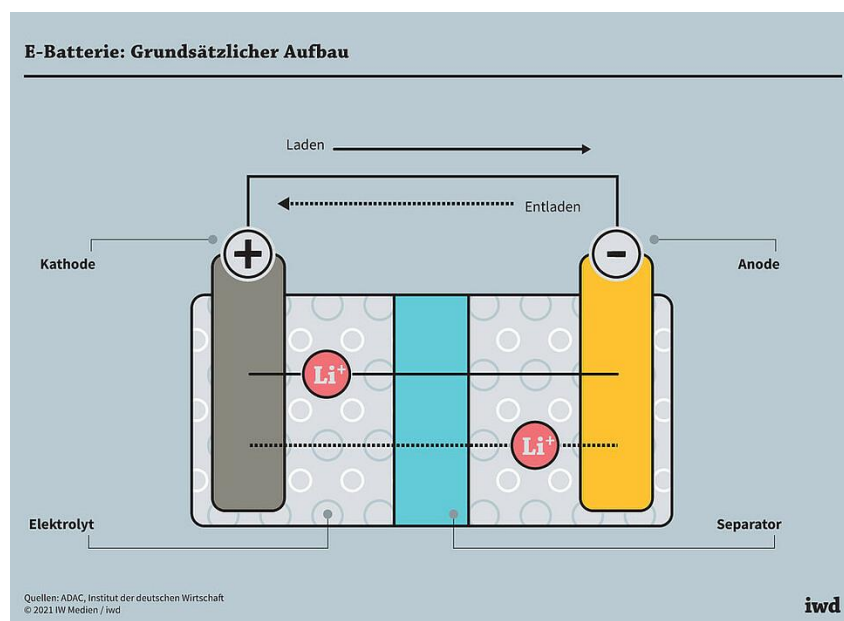
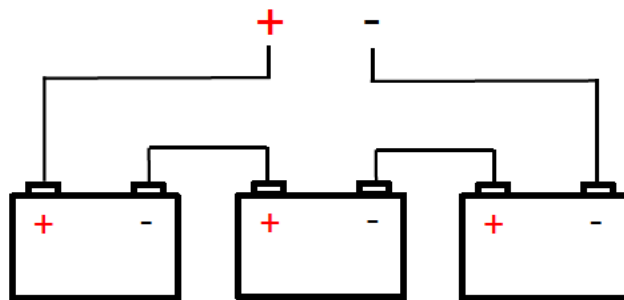


Abbildung 2.8: Aufbau Zelle [11]

Viele dieser Zellen werden in Batteriemodulen zusammengefasst. Die Art, wie diese miteinander verschaltet sind, bestimmt die Modulspannung und die Kapazität. Es gibt zwei Möglichkeiten die Zellen miteinander zu verschalten. Entweder in Reihen- oder in Parallelschaltung. Bei der Reihenschaltung werden die Zellen hintereinandergeschaltet. Der Ausgang einer Zelle wird dann mit dem Eingang der nächsten Zelle verbunden (- → + ; + → -), wie in Abbildung 2.9 zu erkennen ist. Durch diese Art der Verschaltung fließt immer der gleiche Strom und die Einzelspannungen werden addiert. So lassen sich mit den Zellen höhere Gesamtspannungen erreichen. Bei der Parallelschaltung werden die Pole gleichartig verbunden (- → - ; + → +). So liegt an allen Zellen die gleiche Spannung an, der maximal mögliche Gesamtstrom sowie die entnehmbare Kapazität steigt allerdings (vgl. [13]).

#### Reihenschaltung:



#### Parallelschaltung:

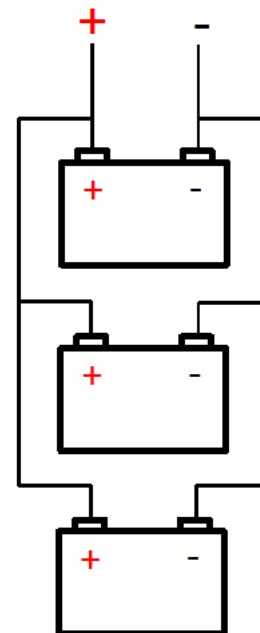


Abbildung 2.9: Schaltung Batteriezellen

Durch eine Kombination der beiden Verschaltungsvarianten lassen sich die Gesamtspannung und Kapazität beeinflussen. Um beispielsweise einen Akku mit 30 V Gesamtspannung und 5 Ah Gesamtkapazität aus Einzelzellen mit einer Spannung von 3 V und einer Kapazität von 1 Ah zu erhalten, müssen 10 Zellen in Reihe und 5 dieser Zellblöcke parallel verschaltet werden. Durch die in Reihe geschalteten Zellen ergibt sich die Gesamtspannung von 30 V:

$$10 * 3 V = 30 V$$

Durch die Parallelschaltung der Zellblöcke ergibt sich die Gesamtkapazität von 5 Ah:

$$5 * 1 Ah = 5 Ah$$

Insgesamt werden für diese Konfiguration dann 50 einzelne Zellen benötigt.

Die benötigte Spannung und Kapazität ergibt sich aus den Anforderungen, die an das Fahrzeug gestellt werden. Die Gesamtkapazität wird dabei maßgeblich von der angestrebten Reichweite in Kombination mit dem Gewicht des Fahrzeugs bestimmt. Auch äußere Umstände, wie zum Beispiel das Wetter können die Reichweite eines elektrischen Fahrzeugs aufgrund zusätzlich benötigter Kühl- bzw. Heizleistung einschränken. Laut Herstellerangaben von Volvo liegt der Verbrauch eines 40 Tonnen Elektro-LKW bei ca. 1,1 kWh [12]. Ein realistischer Wert dürfte diesen unter idealen Testbedingungen Verbrauch etwas übersteigen.

### 2.2.3 Zellformate

Der beschriebene Aufbau der Batteriezellen wird durch mehrlagige Folien ausgeführt. Die erste Lage bildet die negative Elektrode. Sie besteht meist aus einer beidseitig mit Graphit beschichteten Kupferfolie. Als nächstes folgt der als Kunststoffolie ausgeführte Separator und die positive Elektrode, die als beidseitig mit Lithium-Kobaltoxid beschichtete Aluminiumfolie ausgeführt ist. Aus diesem Grundaufbau lassen sich verschiedene Zellformate formen, welche individuelle Vor- und Nachteile besitzen.

#### Rundzelle:

Für die Rundzelle werden, wie in Abbildung 2.10 zu erkennen, lange Streifen des beschriebenen Zellaufbaus aufgerollt und die Kontakte der Elektroden nach oben und unten abgeführt. Vorteilhaft bei diesem Zellformat ist die gute Automatisierbarkeit der Fertigung sowie eine hohe Lebenserwartung. Allerdings ist die Kühlung der Zelle nur von außen möglich und beim Stapeln mehrerer Zellen entstehen Zwischenräume, welche Bauraum versperren. Die Rundzellen werden nach ihrer Länge und ihrem Durchmesser benannt. Die Bezeichnung 14500 beschreibt zum Beispiel eine Zelle mit 14mm Durchmesser und 50mm Länge. Der Autohersteller Tesla setzt in seinen Fahrzeugen ausschließlich Rundzellen ein (vgl. [8]).

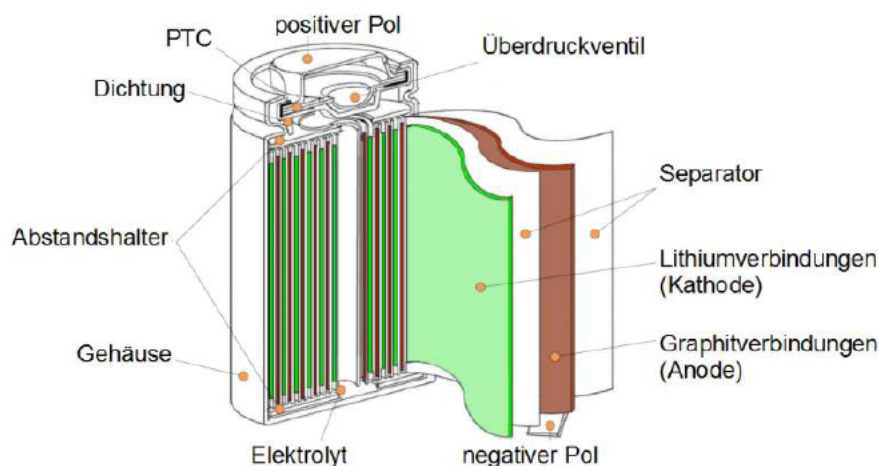


Abbildung 2.10: Aufbau Rundzelle [14]

**Pouchzelle:**

Bei der Pouchzelle werden rechteckige Lagen der zuvor beschriebenen Folien aufeinander gestapelt. Die Elektroden werden, wie in Abbildung 2.11 zu erkennen, meist zu einer Seite geleitet. Durch diese Anordnung steigt bei gleichem Spannungsniveau die Kapazität bzw. der Energiegehalt im Vergleich zur Rundzelle. Sie haben eine hohe volumetrische Energiedichte und lassen sich durch den Aufbau gut kühlen. Die Zellschichten werden durch eine laminierte Metallfolie abgedichtet, weswegen man dieses Zellformat auch als Coffee Bag bezeichnet. Die Abdichtung der Zellschichten stellt die größte Herausforderung bei diesem Zellformat dar. Die meisten Hersteller von Elektrofahrzeugen setzen Pouchzellen ein (vgl. [8]).

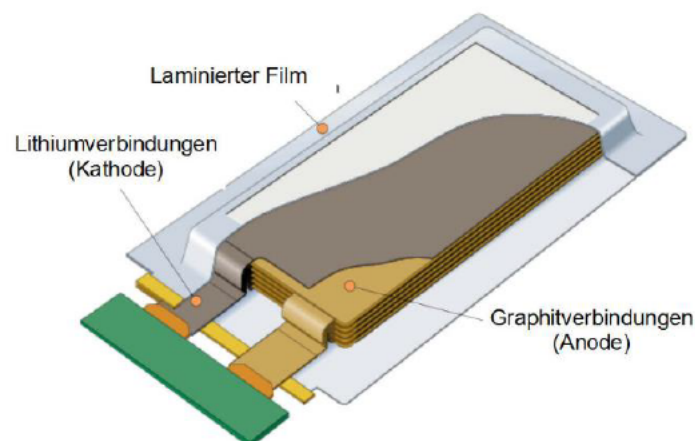


Abbildung 2.11: Aufbau Pouchzelle [14]

**Prismatische Zellen:**

Prismatische Zellen sind wie Pouchzellen aufgebaut. Allerdings werden diese über ein festes Gehäuse abgedichtet, was den Aufbau von Batteriepaketen vereinfacht (siehe Abbildung 2.12). Die Kühlung wird durch das Gehäuse erschwert.

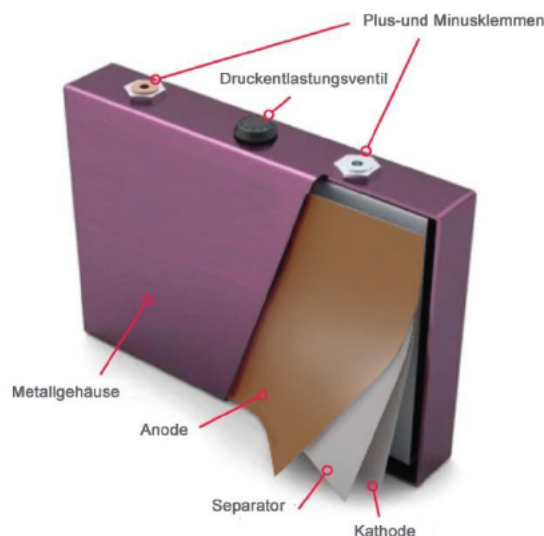


Abbildung 2.12: Aufbau prismatische Zelle [15]

## **2.2.4 Zusätzliche Komponenten**

Für wiederaufladbare Energiespeicher werden zusätzliche Komponenten benötigt um einen Reibungslosen und langlebigen Ablauf zu gewährleisten.

### **2.2.4.1 Batteriemanagementsystem**

Das Batteriemanagementsystem ist ein wichtiger Faktor, um Schäden beim Be- und Entladen des Energiespeichers zu verhindern. Das Batteriemanagementsystem überwacht kontinuierlich den Ladezustand, die Alterung sowie die Temperatur des Batteriesystems. Es definiert die zulässigen Be- und Entladeströme und regelt den Kühlmittelstrom. Im Falle eines Unfalls trennt das Batteriemanagementsystem in kürzester Zeit die Batterie vom Hochvoltkreis des Fahrzeugs. Da es bei den Batteriezellen zu Schäden führen kann, wenn diese vollständig entladen oder überladen werden, überwacht das System den Ladezustand jeder einzelnen Zelle und sorgt dafür dass sich alle Zellen gleichmäßig be- oder entladen. Wenn eine einzige Zelle des Batteriepakets vollständig geladen oder entladen ist, kann das gesamte Paket aufgrund der Verschaltung untereinander nicht weiter be- oder entladen werden, weswegen eine genaue Überwachung erforderlich ist. Aufgrund von Fertigungstoleranzen bei der Zellproduktion in Form von leicht schwankenden Schichtdicken, ergeben sich Abweichungen der Innenwiderstände der einzelnen Batteriezellen. Würde man beim Laden von in Reihe geschalteten Zellen lediglich über die Summenspannung regeln, würden sich die Zellen unterschiedlich schnell laden, was zu einer Überladung einzelner Zellen führt. Diese Überladung reduziert die Lebensdauer der Zelle stark, da sich dabei das Elektrolyt zersetzt. Deswegen ist es erforderlich, die Zellen individuell über das Batteriemanagementsystem zu be- und entladen. Da es auch schon in der Nähe von vollständiger Be- oder Entladung der Zellen zu Schäden kommen kann, werden meist nur 80-90% der Batteriekapazität freigegeben, um die Langlebigkeit zu erhöhen.

### **2.2.4.2 Thermomanagement**

Die Batterien arbeiten nur in einem kleinen Temperaturbereich zwischen 20°C und 40°C optimal, da es bei niedrigen Temperaturen zu erheblichen Kapazitätseinschränkungen kommt und bei zu hohen Temperaturen die Alterung der Zellen steigt. Um diesen Temperaturbereich einzuhalten ist ein Thermomanagement erforderlich. Die Kühlung bzw. Heizung der Batteriemodule erfolgt bei batteriebetriebenen Fahrzeugen meist über eine Flüssigkeitskühlung. Die Batteriepakete besitzen neben den elektrischen Anschlüssen Kühlmittelanschlüsse. Die Regelung des Kühlmittel-

telstroms erfolgt über das Batteriemanagementsystem. Bei konventionellen LKW wird die Kühlwasserpumpe als Nebenverbraucher über den Verbrennungsmotor angetrieben. Für elektrische Fahrzeuge wird die Pumpe mit einem Elektromotor betrieben.

### **2.2.4.3 Druckluftsystem**

In LKW arbeiten die Bremsen, sowie häufig auch das Fahrwerk in Form von Luftfedern, mit Druckluft. Die Druckluft wird im konventionellen LKW über einen Kompressor, der ebenfalls an Verbrennungsmotor angebunden ist, erzeugt. Auch dieser Antrieb muss für elektrische LKW durch einen Hochvolt-Elektromotor ersetzt werden. Dadurch ist der Kompressor an keinen festen Ort in Nähe des Motors gebunden und kann an anderer Stelle untergebracht werden. Zu beachten ist allerdings das lange Kabel, sowie Druckluftleitungen das Gewicht des Fahrzeugs erhöhen können.

### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Batterieanbindung/ Fahrgestell

Die aktuell auf dem Markt verfügbaren batterieelektrischen LKW nutzen fast ausschließlich die Fahrgestelle der konventionellen Modelle mit Verbrennungsmotor. Diese werden dann anstelle eines Tanks mit Batterien bestückt und mit einer E-Achse, bzw. zentralem Elektromotor ausgerüstet. Im folgenden Kapitel sollen verschiedenen Konzepte vorgestellt werden.

##### 3.1.1 Mercedes Urban eTruck

Der Mercedes Urban eTruck ist für den städtischen Verteilerverkehr konzipiert und verwendet einen klassischen Leiterraum. Die Batterien sind zwischen den beiden Längsträgern platziert und nutzen somit den Freiraum, der durch den Wegfall des Verbrennungsmotor-Antriebsstrang entsteht (Siehe Abb. 3.1). Die zusätzlichen Komponenten werden außen an den Längsträgern befestigt und nutzen den Raum zwischen den Rädern. In Abbildung 3.2 ist zu erkennen, dass die Batterien teilweise über den Leiterraum in Z-Richtung aufbauen. So werden eventuell Anbau-räume für Aufbauhersteller blockiert. Eine Crashstruktur zum Schutz der Batterien ist nicht erforderlich, da die Längsträger diese Funktion übernehmen.

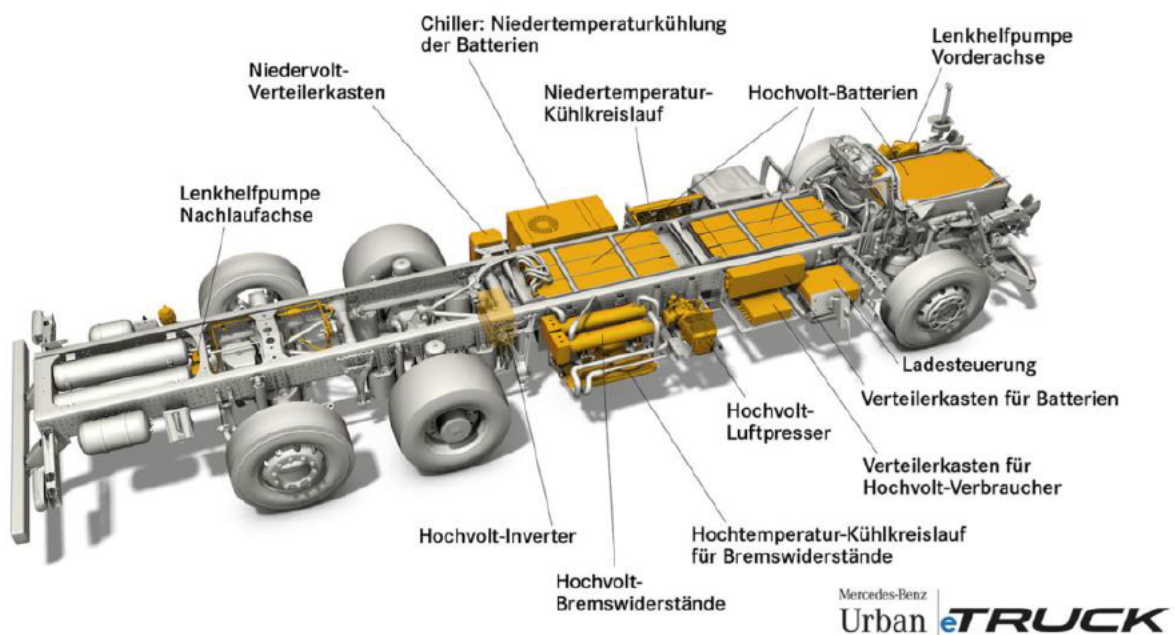


Abbildung 3.1 Mercedes Urban eTruck Aufbau [4]

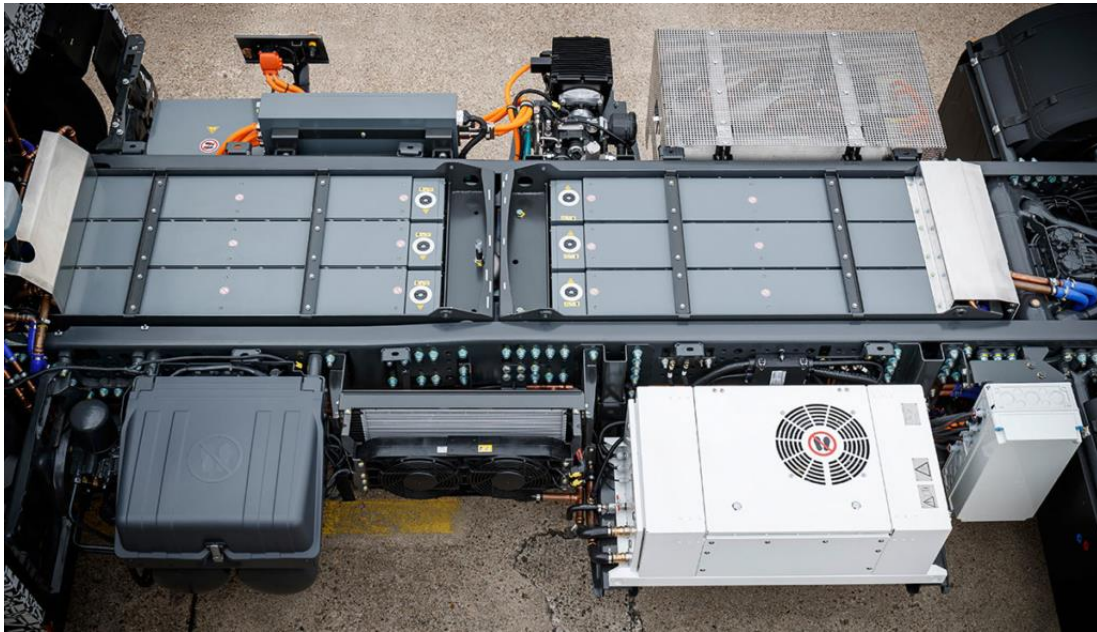


Abbildung 3.2 Mercedes Urban eTruck Prototyp [4]

### 3.1.2 Mercedes eActros

Wie in Abbildung 3.3 zu erkennen ist, nutzt der aktuellere Mercedes eActros hingegen den Raum unter dem Leiterraum für die Hochvolt-Batterien. Unter der Fahrerhauskabine sitzen bei diesem Konzept die übrigen Komponenten. Da die Batterien bis an den Rand des Fahrzeugs ragen, ist eine Crashstruktur erforderlich, die die Batterien schützt, aber auch zusätzliches Gewicht mit sich bringt. An den Längsträgern sind Befestigungsarme für die Batterie angeschraubt. Dieselbe Fahrzeugarchitektur verwendet die dazugehörige Sattelzugmaschine eActros LongHaul.

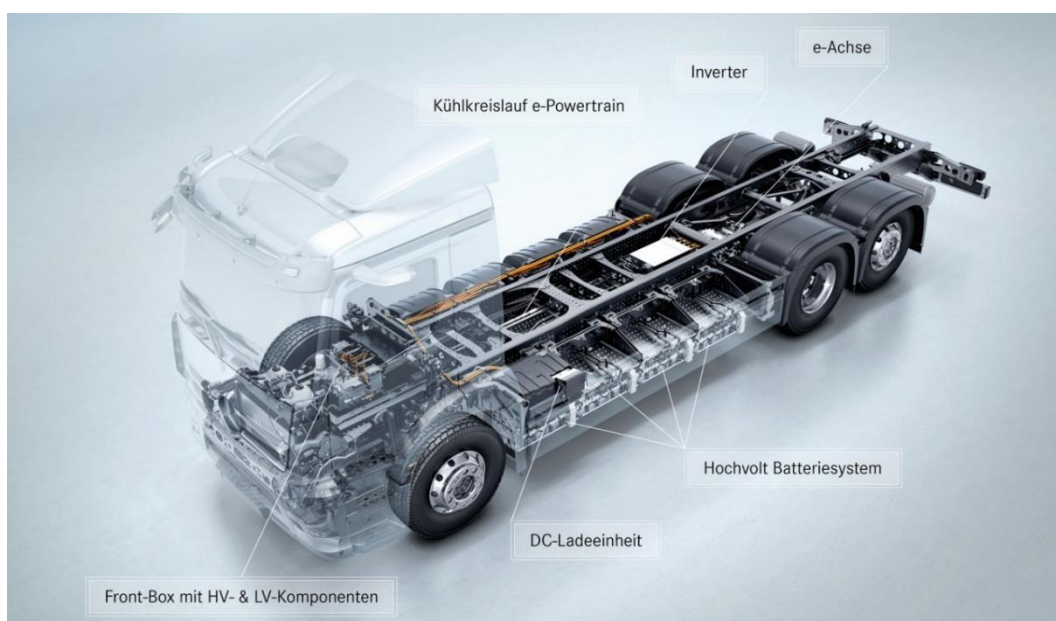


Abbildung 3.3 Mercedes eActros [5]



## 4 Konzeptfindung

### 4.1 Definition Randbedingungen und Packegeraum

#### 4.1.1 Fahrzeugabmessungen

LKW werden häufig gezielt an ihr Anwendungsgebiet angepasst. So ergeben sich viele verschiedene Fahrzeugkonfigurationen mit den unterschiedlichsten Randbedingungen. Die Nutzfahrzeughersteller liefern meist nur das Fahrgestell und Aufbauhersteller rüsten die Fahrzeuge mit den erforderlichen Aufbauten aus. Um hierbei dem Aufbauhersteller einen möglichst großen Freiraum zu bieten, wird der Raum oberhalb des Fahrgestells komplett dem Aufbauhersteller überlassen, sodass dort keine Bauteile des eigentlichen Fahrzeugs untergebracht werden können. Für die verschiedenen Anwendungsgebiete bieten Nutzfahrzeughersteller unterschiedlichste Achskonfigurationen mit entsprechend unterschiedlichen Rahmenlängen an. Für einen Batterieelektrischen LKW sind dabei die Konfigurationen mit kurzem Rahmen/ Radstand am kritischsten, da wenig Platz für Batterien zwischen den Achsen zur Verfügung steht. Kritischstes Fahrzeug unter diesem Aspekt mit einem großen Marktanteil ist hierbei die Sattelzugmaschine. Im Dezember 2021 waren 226.404 Sattelzugmaschinen von insgesamt 564.059 Lastkraftwagen über 3,5 tonnen Nutzlast in Deutschland zugelassen [17]. Dies entspricht einem Marktanteil von ca. 40%. Eine Sattelzugmaschine ist ein Fahrzeug, das mit einer speziellen Vorrichtung (Sattelplatte) zum Mitführen von Sattelanhängern ausgerüstet ist, wobei ein Großteil des Gewichts des Anhängers von der Zugmaschine aufgenommen wird (siehe Abbildung 4.1).

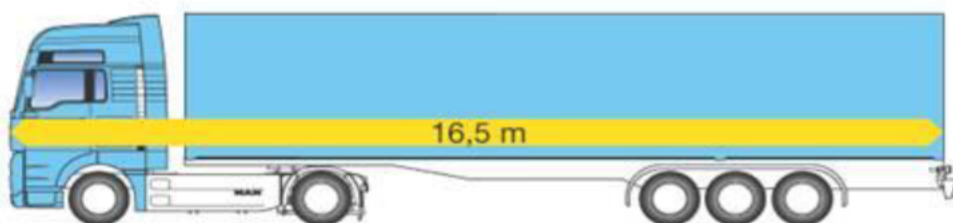


Abbildung 4.1: Sattelkraftfahrzeug [16]

Der Radstand ergibt sich dabei aus den Kurvenlaufeigenschaften im BO-Kraftkreis. In der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) werden in §32d die Kurvenlaufeigenschaften festgelegt. Hier wird definiert, dass ein Fahrzeug bei einer Kreisfahrt mit einem Radius von 12,5m eine Ringfläche von 7,2m Breite nicht überschreiten darf. Aus den Standartabmessungen eines Sattelanhängers, siehe Abbildung 4.2, ergeben sich mögliche Abmessungen für die Zugmaschine. Die dabei BO-Kraftkreis relevanten Maße betreffen den Radstand, die Breite sowie den vorderen

Überhang. Für diese Arbeit wird ein Radstand von 3,9m definiert, um möglichst viel Freiraum für die Unterbringung der Batteriepakete zu bieten.

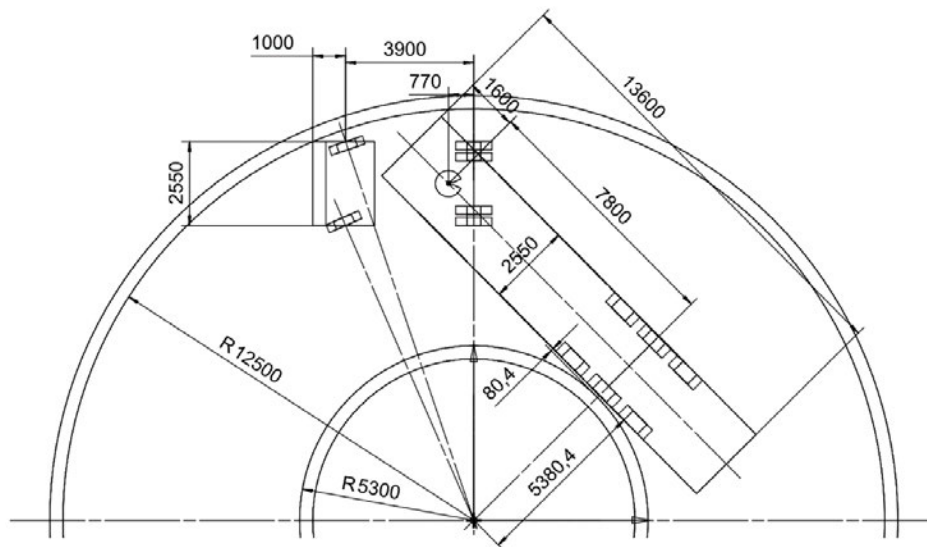


Abbildung 4.2: Sattelkraftfahrzeug im BO-Kraftkreis

#### 4.1.2 Energiespeicher Abmessungen

Wichtiger Bestandteil des Packageraums sind die Energiespeicher. Das benötigte Volumen ist unmittelbar von der angestrebten Reichweite und damit von dem Energiegehalt abhängig. In Abbildung 4.3 sind die durchschnittlichen Fahrleistungen pro Tag stichprobenartig erfasst.

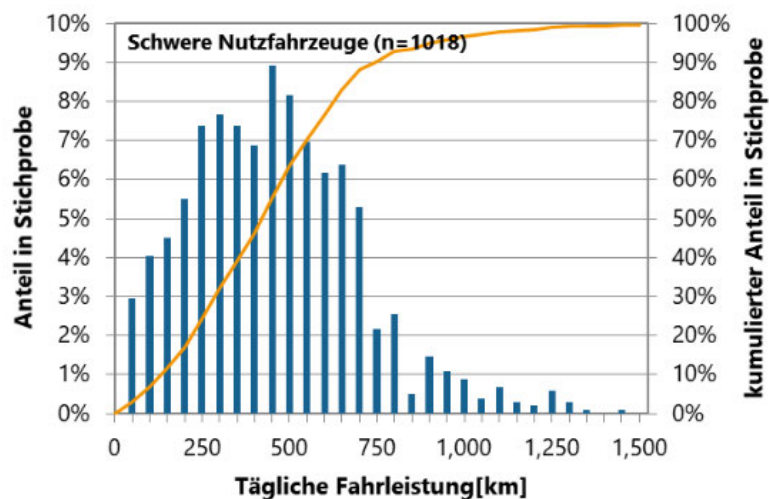


Abbildung 4.3: Tägliche Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge [18]

Um 100% aller Fahrleistungen für schwere Nutzfahrzeuge dieser Statistik abzudecken, wäre eine Fahrleistung von 1450 km mit einer Ladung abzudecken. Da dies aktuell nur sehr schwer realisierbar wäre, wird eine andere Berechnungsgrundlage verwendet.

In Deutschland sind die maximalen Lenkzeiten für den gewerblichen Güterverkehr fest geregelt. Spätestens nach 4,5 Stunden Fahrzeit muss die Fahrt für 45 Minuten unterbrochen werden. Nach der Fahrtunterbrechung beginnen weitere 4,5 Stunden Lenkzeit [19]. Die Fahrtunterbrechung kann dazu genutzt werden, das Fahrzeug aufzuladen. Unter dieser Annahme muss lediglich genügend Energie für eine 4,5-stündige Fahrt und nicht für einen gesamten Arbeitstag mitgeführt werden.

Setzt man die zulässige Höchstgeschwindigkeit für Fahrzeuge < 7,5 Tonnen von 80 km/h auf deutschen Autobahnen voraus ergibt sich folgende erforderliche Reichweite.

$$s = v * t = 80 \frac{km}{h} * 4,5 h = 360 km \quad (1)$$

$s = \text{Weg [km]}$

$v = \text{Geschwindigkeit} \left[ \frac{km}{h} \right]$

$t = \text{Zeit [h]}$

Die Verbrauchszahlen sind aufgrund der noch wenigen Elektro-LKW sowie der sich stetig verbesserten Technologien nur abzuschätzen. Mit einem geschätzten Energieverbrauch von 1,5 kWh/km basierend auf [12] ergibt sich folgender Energiegehalt:

$$W_{netto} = s * E = 360 km * 1,5 \frac{kWh}{km} = 540 kWh \quad (2)$$

$W = \text{Energiegehalt [kWh]}$

$E = \text{Energieverbrauch} \left[ \frac{kWh}{km} \right]$

Um den Energiespeicher nicht zu beschädigen und eine höhere Lebensdauer zu erzielen, wird wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben, nur 85 % der Verfügbaren Energie verwendet.

$$W_{brutto} = \frac{W_{netto}}{0,85} = \frac{540 kWh}{0,85} = 635 kWh \quad (3)$$

Über die volumetrische Leistungsdichte lässt sich damit das benötigte Batterievolumen berechnen. Mit einem geschätzten Wert von 500 Wh/l ([8] S.134) berechnet sich folgendes Volumen:

$$V_{Energiespeicher} = \frac{W_{brutto}}{l_v} = \frac{635 kWh}{500 \frac{kWh}{m^3}} = 1,27 m^3 \quad (4)$$

$V_{Energiespeicher} = \text{Volumen Energiespeicher [m}^3\text{]}$

$$l_v = \text{Volumetrische Leistungsdichte} \left[ \frac{kWh}{m^3} = \frac{Wh}{l} \right]$$

Mit dem Energiegehalt lässt sich ebenfalls gemeinsam mit der gravimetrischen Energiedichte das Gewicht des Energiespeichers berechnen. Als gravimetrische Energiedichte wird ein Wert von 250 Wh/kg angenommen.

$$m_{\text{Energiespeicher}} = \frac{W_{\text{brutto}}}{l_m} = \frac{635 \text{ kWh}}{0,25 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 2540 \text{ kg} \quad (5)$$

$$l_m = \text{Gravimetrische Energiedichte} \left[ \frac{Wh}{kg} \right]$$

Somit sind die erforderlichen Abmessungen des Energiespeichers definiert, für welchen Bau-  
raum zur Verfügung stehen muss.

## 4.2 Morphologischer Kasten

Um eine hohe Anzahl verschiedener Konzepte zu erarbeiten, wird ein Morphologischer Kasten angewendet. Der Morphologische Kasten ist eine Kreativitätstechnik, die der systematischen Analyse komplexer Aufgaben dient, um dadurch innovative und zielführende Ideen herauszuarbeiten. Die Technik beschreibt eine Methode, um mögliche Lösungen und deren Variationen und Kombinationen zu einem konkreten Problem zu untersuchen. Der Morphologische Kasten besteht aus einer Tabelle, in die die einzelnen Lösungsparameter und deren mögliche Ausprägungen eingetragen werden. Durch die Kombination der Ausprägungen der Parameter können mögliche Lösungen ermittelt werden (vgl. [20]). Die Nutzung des Morphologischen Kastens bietet zahlreiche Vorteile. Er ist sehr übersichtlich, aber gleichzeitig strukturiert und methodisch. Komplexe Aufgaben werden in ihre Einzelteile zerlegt, was die Lösungsfindung erleichtert. Schritt für Schritt kann sich nach dem „Baukastenprinzip“ der Lösung angenähert werden. Alle relevanten Details werden berücksichtigt und es stehen zu jedem Zeitpunkt Alternativen bereit (vgl. [21]). Für die Konzeptfindung werden folgende Lösungsparameter mit ihren Ausprägungen gewählt:

	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3
Batterieposition	vorne	mitte <span style="color:red">●</span> <span style="color:blue">●</span>	
tragende Batterie	ja <span style="color:blue">●</span>	nein <span style="color:red">●</span>	teilweise
Fahrgestell	Leiterrahmen <span style="color:red">●</span>	Spaceframe	Schalenbauweise/ Blech <span style="color:blue">●</span>
Anbindungsart	Mechanisch direkt <span style="color:blue">●</span>	Mechanisch über Halter <span style="color:red">●</span>	
Montagerichtung	X	Y	Z <span style="color:blue">●</span> <span style="color:red">●</span>

Tabelle 4.1: Morphologischer Kasten

Um die einzelnen Konzepte zu generieren, werden die verschiedenen Parameter miteinander kombiniert. In Tabelle 4.1 ist beispielhaft die Konfiguration von Konzept 2 dargestellt mit Hilfe von roten Punkten. Konzept 3 ist mit blauen Punkten dargestellt. Im folgenden Kapitel werden die so generierten Konzepte vorgestellt.

## 4.3 Konzepte

### 4.3.1 Konzept 1

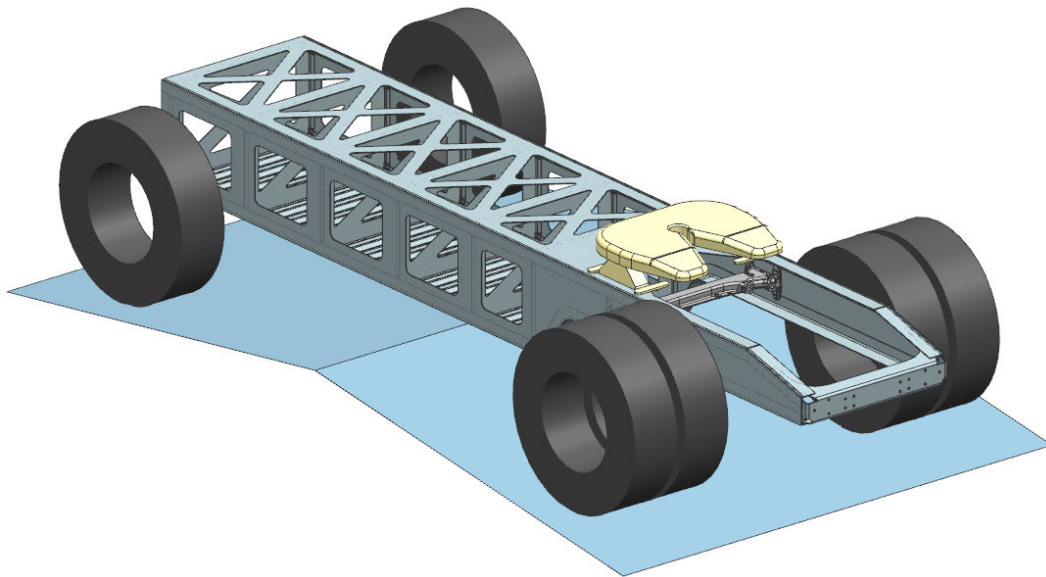


Abbildung 4.4: Konzept 1 - isometrische Ansicht

In Konzept 1 (Abbildung 4.4) wird das Fahrgestell durch verschweißte Bleche realisiert. Die Batteriezellen sind im inneren des Rahmens platziert und werden durch das Fahrgestell aufgenommen. Dadurch benötigen die Batteriepakete keine großen Strukturen um Kräfte aufzunehmen, da sie auf dem Boden des Fahrgestells stehen. Wie in Abbildung 4.5 zu erkennen, verjüngt sich das Fahrgestell im hinteren Bereich des Fahrzeugs in die Form des konventionellen Leiterrahmens, um ausreichend Freiheit für angetriebene durchlaufende Starrachsen zu gewährleisten. Das C-Profil entsteht hierbei durch das Verschweißen der verschiedenen Bleche. Diese Vorgehensweise ist aus dem Anhängerbau für Nutzfahrzeuge bekannt. Die Montage der Batterien erfolgt von oben in Z-Richtung durch abnehmbare Bleche.



Abbildung 4.5: Konzept 1 - Seitenansicht

### 4.3.2 Konzept 2

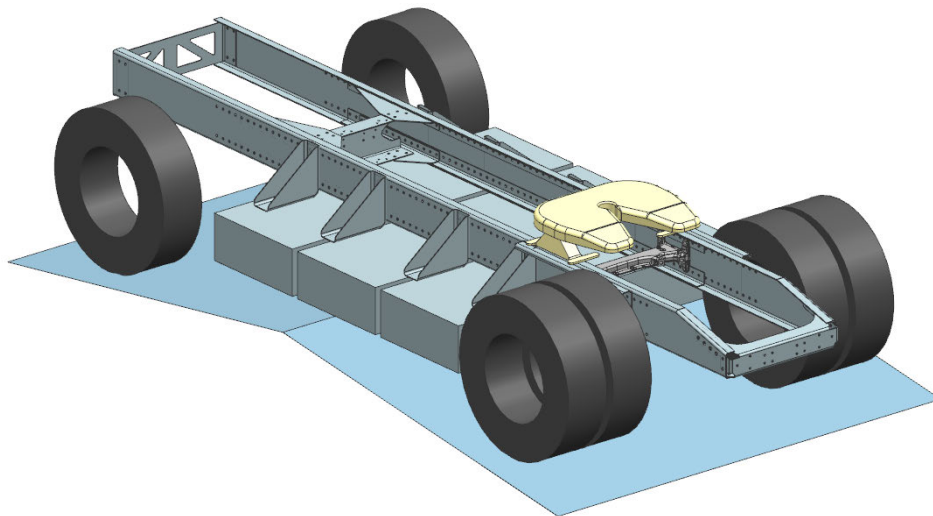


Abbildung 4.6: Konzept 2 - isometrische Ansicht

Konzept 2 (Abbildung 4.6) verwendet einen klassischen Leiterraum. Die Batterieboxen sind quer unter dem Leiterraum angebracht, ähnlich dem eActros-Konzept aus Kapitel 3.1.2. Die Anbindung der Boxen erfolgt über zusätzliche Halter, die von außen mit dem Leiterraum und von unten mit den Batterien verschraubt werden. Die Boxen müssen so ihr volles Gewicht selbst tragen und benötigen deshalb eine stabile Struktur, die zusätzliches Gewicht mit sich bringt. Da nur der Bereich unter dem Leiterraum verwendet werden kann, ist die Kapazität der Batterien eingeschränkt.

### 4.3.3 Konzept 3

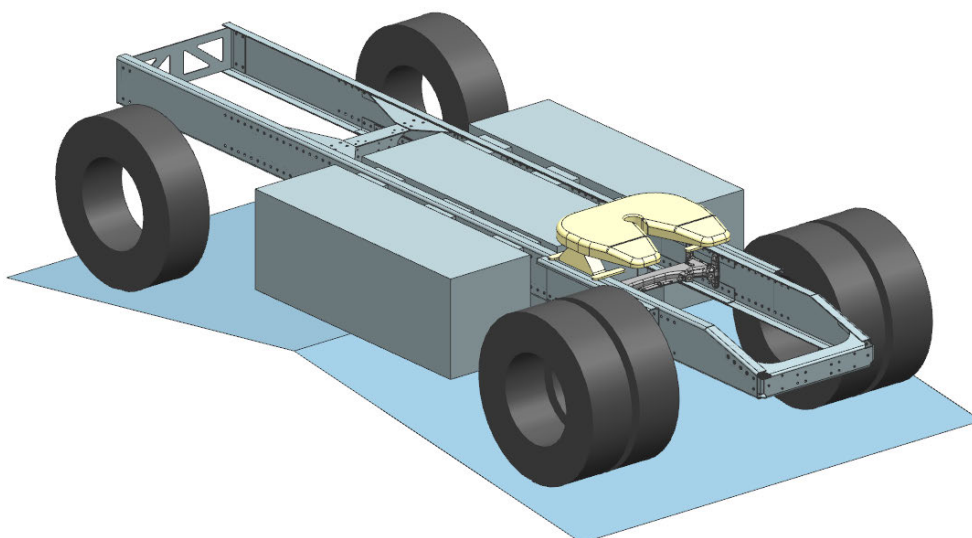


Abbildung 4.7: Konzept 3 - isometrische Ansicht

Auch Konzept 3 (Abbildung 4.7) basiert auf einem Leiterraum. Allerdings nutzen die Batterieboxen ihren Bauraum besser aus, da sie längs montiert werden und so bis an die Oberkante des Fahrgestells ragen können. Auch bei diesem Konzept tragen die Boxen ihr volles Gewicht selbst, weswegen sie zusätzliche Strukturen benötigen. Um im Falle eines Unfalls die Batterien zu schützen, muss seitlich eine zusätzliche Crashstruktur angebracht oder in die Batterieboxen integriert werden. Die Befestigung erfolgt über zusätzliche Halter, welche mit dem Leiterraum verschraubt werden. Durch die seitliche Befestigung der äußeren Batteriepakete wird ein großes Drehmoment in das Fahrgestell eingeleitet (siehe Abbildung 4.8), welches zu einer Verdrehung des C-Profiles führen würde. Um dies zu verhindern ist eine Querverbindung der seitlichen Boxen unterhalb erforderlich, welche die Bodenfreiheit einschränkt.

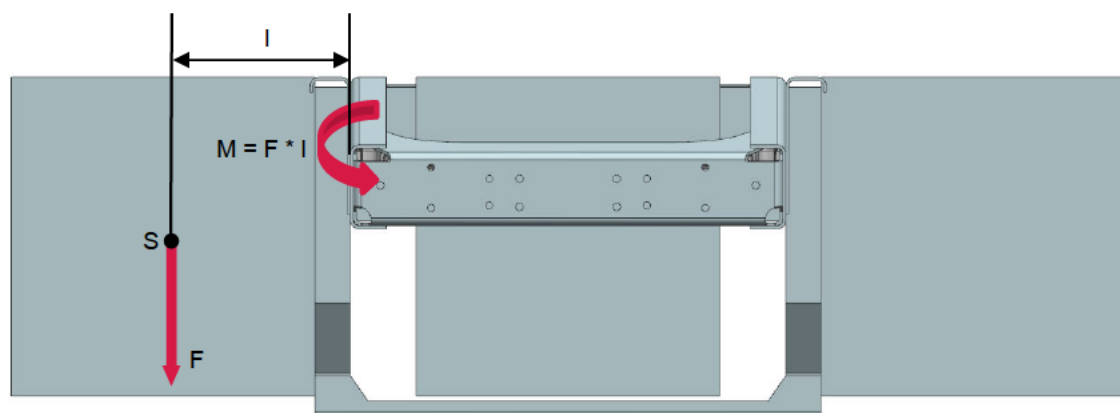


Abbildung 4.8: Konzept 3 - Heckansicht



#### 4.3.4 Konzept 4

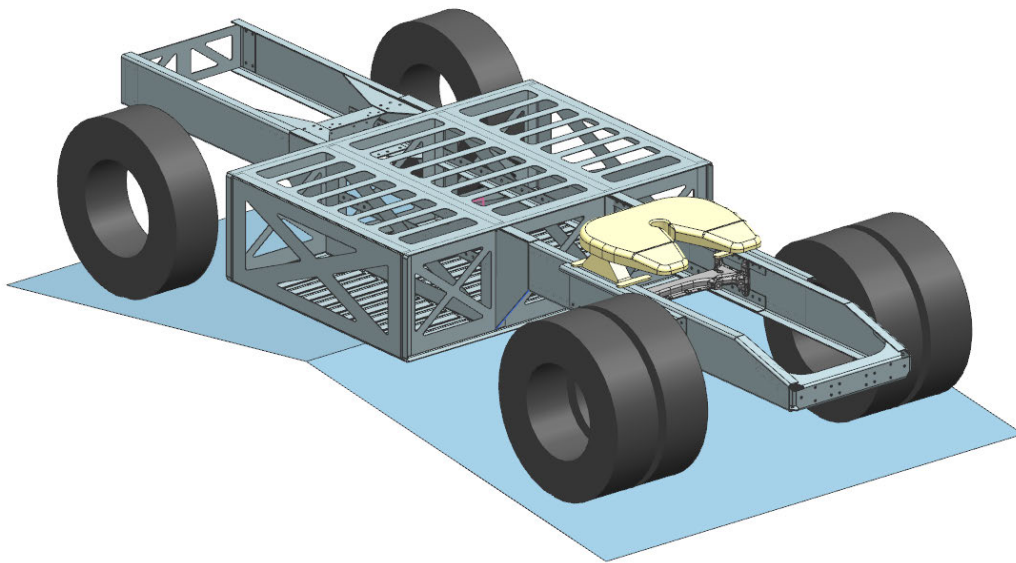


Abbildung 4.9: Konzept 4 - isometrische Ansicht

In Konzept 4 (Abbildung 4.9) sind die selbsttragenden Batteriepakete in einen Leiterraum mit C-Profilen integriert. Die C-Profile sind im Bereich der Batterien unterbrochen und die gesamten Kräfte laufen durch die Struktur der Batteriegehäuse. Diese sind als Blechkonstruktion ausgeführt. Der Bauraum wird vollständig ausgenutzt und es wird keine zusätzliche Struktur für die Batterien benötigt. Durch die verbleibende Leiterraumstruktur bleibt eine große Modularität für verschiedene Fahrzeuglängen erhalten.

#### 4.3.5 Konzept 5

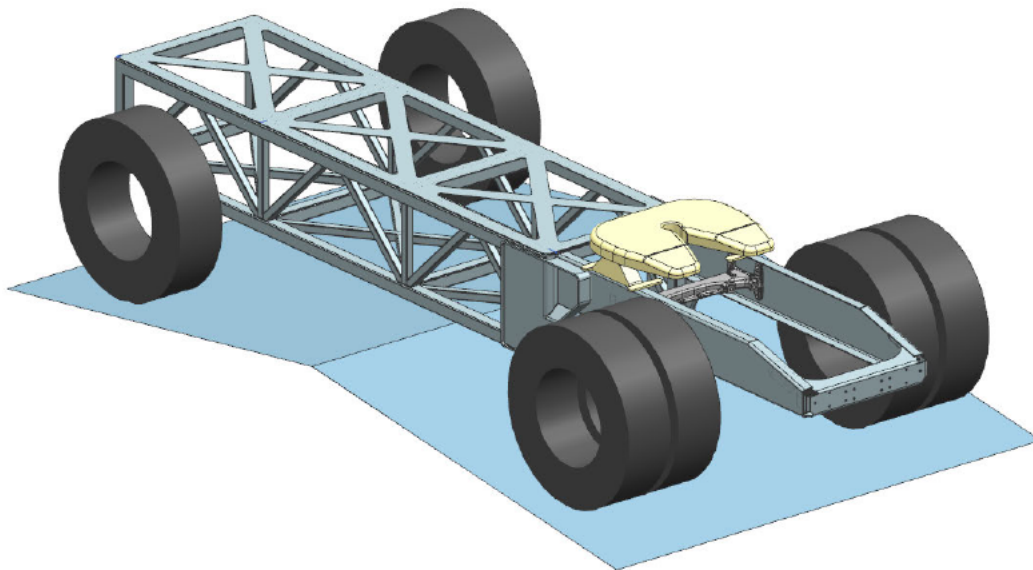


Abbildung 4.10: Konzept 5 - isometrische Ansicht

Im Konzept 5 (Abbildung 4.10) wird eine ähnliche Fahrgestellform wie in Konzept 1 verwendet. Die vordere Struktur wird dort als verschweißter Gitterrohrrahmen und die hintere Struktur als Leiterrahmen mit C-Profilen ausgeführt. Die Verbindung erfolgt über eine Gusskonstruktion. Auch bei diesem Konzept müssen die Batteriepakete lediglich sich selbst in Form halten, weswegen sie nur wenig Struktur benötigen. Die Montage erfolgt durch ein abnehmbares Blech von oben in Z-Richtung. Da die Batterien im Falle eines Unfalls durch den Rahmen geschützt werden, ist keine zusätzliche Crashstruktur erforderlich.

### 4.3.6 Konzept 6

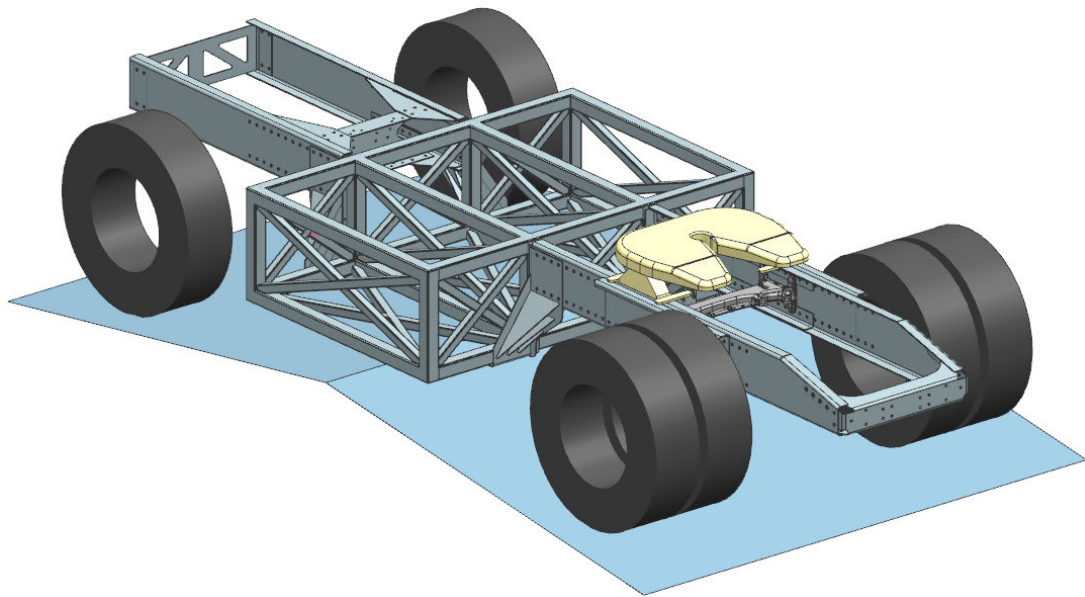


Abbildung 4.11: Konzept 6 - isometrische Ansicht

Konzept 6 verwendet ähnlich wie bei Konzept 4 ein tragendes Batteriegehäuse, das in den Rahmen integriert ist (siehe Abbildung 4.11). Das Batteriegehäuse ist hierbei als Gitterrohrrahmen ausgeführt. Die Verbindung zum hinteren Leiterrahmen erfolgt über eine Schweißkonstruktion aus Blechen verschiedener Materialstärken.

## 5 Konzeptbeurteilung

Zur Bewertung der verschiedenen Konzepte wird eine Bewertungsmatrix verwendet (siehe Tabelle 5.1). Dort werden in Tabellenform die verschiedenen Kriterien mit einer Gewichtung versehen. Die Konzepte werden dann in den einzelnen Kriterien anhand eines Punktesystems zwischen 1 und 5 Punkten bewertet. 5 stellt dabei die beste und 1 die schlechteste Bewertung dar. Durch Multiplikation der Gewichtung mit der Punktzahl wird die tatsächliche Punktzahl berechnet. Die Summe aller Punkte ergibt die Gesamtpunktzahl. Anhand der Maximalpunktzahl von 95 Punkten kann der Erfüllungsgrad der jeweiligen Konzepte berechnet werden.







Punkte	Bewertung	Konzept 1:		Konzept 2:		Konzept 3:		Konzept 4:		Konzept 5:		Konzept 6:		
														
5	Sehr gut													
4	Gut													
3	Neutral													
2	Ungenügend													
1	Schlecht													
Anforderungen		Gewichtung	Punkte	Summe	Punkte	Summe	Punkte	Summe	Punkte	Summe	Punkte	Summe	Punkte	Summe
Kosten		4	4	16	4	16	4	16	3	12	3	12	3	12
Gewicht		5	5	25	3	15	3	15	4	20	4	20	4	20
Modularität		3	3	9	5	15	5	15	5	15	3	9	5	15
Stabilität		4	4	16	5	20	5	20	2	8	4	16	2	8
Kapazität		3	4	12	2	6	3	9	5	15	4	12	5	15
Gesamtpunktzahl		95		78		72		75		70		69		70
Erfüllungsgrad [%]		100		82		76		79		74		73		74

Tabelle 5.1: Bewertungsmatrix

Zur Bewertung werden die Anforderungen Kosten, Gewicht, Modularität, Stabilität und Kapazität definiert. Bei der Anforderung Kosten können vor allem die Konzepte 2 und 3 mit klassischem Leiterraum sowie das Konzept 1 durch seine Blechbauweise punkten. Das Gewicht wird vor allem bei den beiden Konzepten mit Leiterraum schlechter bewertet. Aufgrund der zusätzlich benötigten Halter und den selbsttragenden Batterieboxen, die im Falle eines Unfalls keinen Schaden an den Batteriezellen zulassen dürfen, ist von einem höheren Gewicht auszugehen als bei den Konzepten, die diese Funktionen in den Fahrzeugrahmen integrieren. Im Gegenzug ist die Modularität bei diesen Konzepten als sehr gut zu bewerten, da sie sich individuell in der Länge und Achszahl anpassen lassen. Bei dieser Anforderung schließen die Konzepte 1 und 5 am schlechtesten ab, da sie an der Vorderachse nicht ausreichend Raum für eine durchgehende Starrachse und den dazugehörigen Federweg bieten, weswegen hier auf eine Einzelradaufhängung zurückgegriffen werden muss. In der Länge sind sie wie alle anderen Konzepte variabel. Um die Anforderung Stabilität zu bewerten, wird eine einfache FEM-Analyse nur mit der Belastung durch die Energiespeicher erstellt. Als Belastung werden 30000 N in Z auf die Energiespeicherposition gewählt (in Abbildung 5.1 rote Pfeile). Befestigt werden die Fahrgestelle an dafür vorgesehenen Bohrungen im Fahrzeugrahmen, die an reale Befestigungen für Achsaggregate angepasst sind (in Abbildung 5.1 in blau).

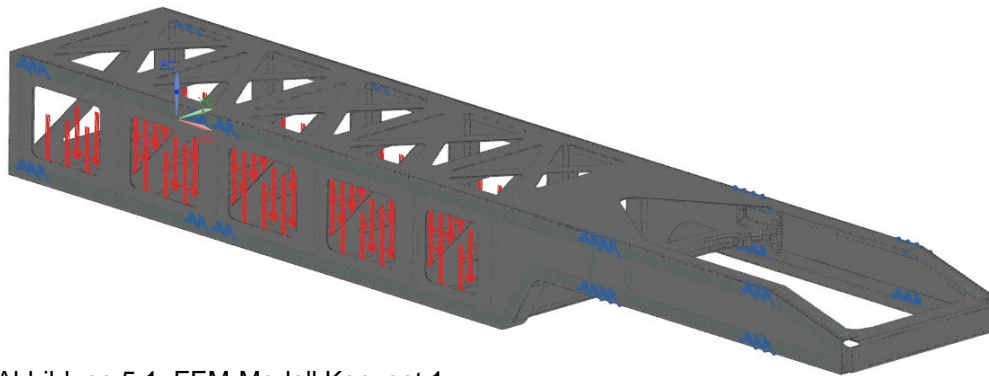


Abbildung 5.1: FEM-Modell Konzept 1

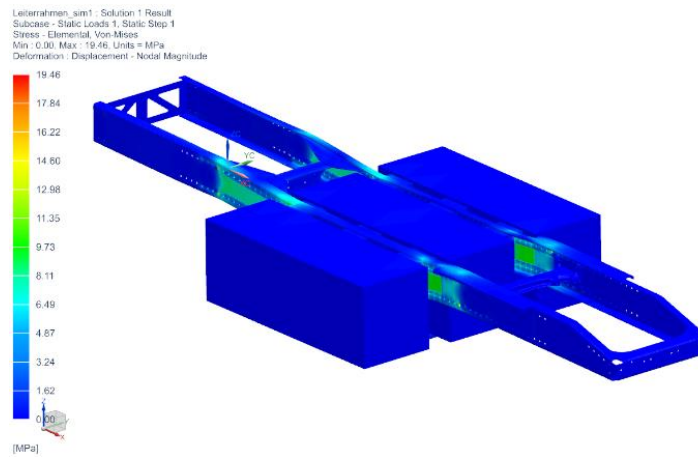


Abbildung 5.2: FEM-Analyse Konzept 3

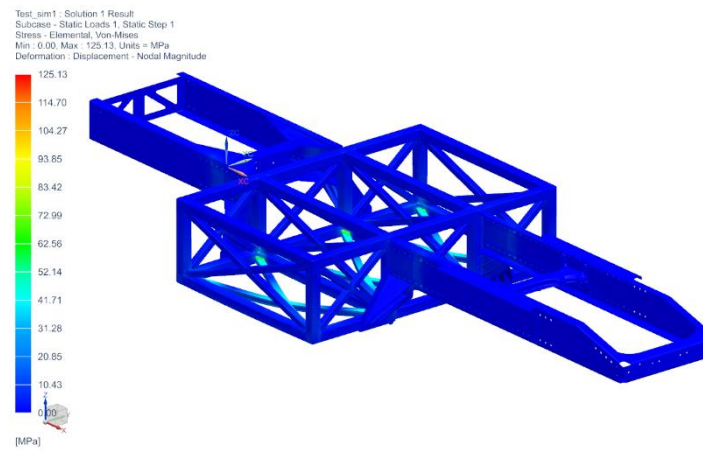


Abbildung 5.3: FEM-Analyse Konzept 4

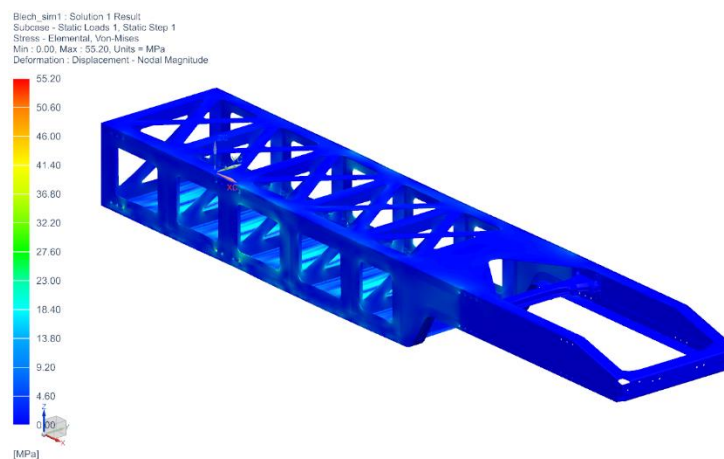


Abbildung 5.4: FEM-Analyse Konzept 1

Wie in Abbildung 5.2 zu erkennen, ergeben sich in Konzept 3 die geringsten Werte von nur 19,5 N/mm<sup>2</sup> Spannung und 0,1 mm Verformung. Am schlechtesten schneidet Konzept 4 in Abbildung 5.3 mit einer maximalen Spannung von 125 N/mm<sup>2</sup> und einer Verformung von 1,3 mm ab. Dies ist durch den Sprung in der Höhe des Fahrzeugrahmens, sowie durch die hochbelasteten Knotenpunkte, an denen alle Kräfte zusammenlaufen, zu erklären. In Konzept 1 tritt eine maximale Spannung von 55 N/mm<sup>2</sup> und eine Verformung von 0,6 mm auf. Bei diesem Konzept ist davon auszugehen, dass durch lokale Erhöhung der Materialstärken im Bereich des Anschlusses an das Bodenblech, sowie durch lokale Verstärkung an den Einspannpunkten die Spannungsspitzen abzufangen sind. Die Bewertung erfolgt demnach für die Konzepte mit Leiterrahmen am besten und für die Konzepte mit in den Leiterrahmen integrierte Batterieboxen am schlechtesten. Bei der Kapazität wird die Möglichkeit zusätzliches Energiespeichervolumen generieren zu können bewertet. Konzept 2 kann hierbei am wenigsten überzeugen, da kein zusätzliches Volumen zur Verfügung steht und durch die stabile Struktur der Boxen weniger Raum für Batteriezellen im Inneren verfügbar ist. Das gleiche Kriterium erklärt die Unterschiede zwischen dem Konzept 3 zu den Konzepten 4 und 6. Durch die selbsttragende Bauweise der Boxen geht Raum für Batteriezellen verloren.

Insgesamt liegen die Konzepte mit Leiterrahmen hinsichtlich des Erfüllungsgrads im oberen Mittelfeld mit 76% und 79%, welches den Leiterrahmen weiterhin als solide Konzept bestätigt. Am besten bewertet ist das Konzept 1, welches vor allem durch sein Gewicht durch die Integration aller Funktionen in das Fahrgestell überzeugen kann. Dieses Konzept wird ausgewählt und realisiert.

## 6 Ausarbeitung und Berechnung der Siegervariante

### 6.1 Konstruktion

Zunächst muss eine Auswahl der einzusetzenden Materialien, sowie der Fertigungsverfahren getroffen werden. Als Material für Fahrzeugrahmen von Nutzfahrzeugen hat sich Stahl durchgesetzt. Durch seine hohen Festigkeitswerte und hohen Elastizitätsmodul eignet er sich hervorragend für den Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen, wo er große Kräfte aufnehmen muss. Durch verschiedenen Legierungen lassen sich seine Eigenschaften speziell auf den Anwendungszweck anpassen. Durch verschiedene Verarbeitungsverfahren wie Biegen, Tiefziehen, Gießen oder Schweißen lassen sich verschiedenste Geometrien realisieren. Für die Ausarbeitung von Konzept 1 kommen die Verfahren Tiefziehen, Biegen und Schweißen zu Einsatz.

Zunächst wird die Breite des Fahrgestells, die auch Rahmenspur bezeichnet wird, definiert. Um ausreichend Volumen für die Energiespeicher zu erreichen, wird eine Rahmenspur von 1000 mm gewählt (siehe Abbildung 6.1). Hierbei ist mit leichten Einschränkungen bei der Breite der Reifen zu rechnen, welche durch den Einsatz von Super-Single-Reifen ausgeglichen werden können. Die Vorteile gegenüber einer Zwillingsbereifung ergeben sich aus der geringen Baubreite (siehe Abbildung 6.2).

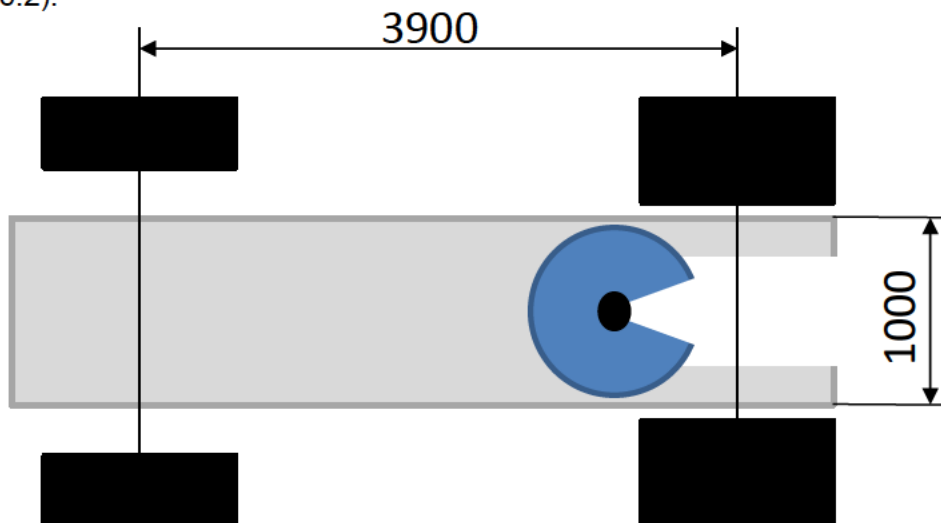


Abbildung 6.1: Abmessungen Fahrgestell



Abbildung 6.2: Vergleich Zwillingsbereifung - Super-Single [23]

Das Erstellen von unterschiedlich hohen Profilquerschnitten für Fahrgestelle mittels Schweißen findet häufig Anwendung im Anhängerbau für Nutzfahrzeuge (siehe Abbildung 6.3). Zu erkennen ist, dass die Profilhöhe des Trägers mit steigender Biegebelastung steigt. So lässt sich die Festigkeiten der Belastung anpassen und ein gewichtsoptimiertes Fahrgestell entsteht. Die Serienreife für hohe Stückzahlen dieses Prozesses wird somit bestätigt.

Zu Beginn wird die Grundgeometrie des Fahrgestells definiert, die in Abbildung 6.4 zu erkennen ist. Die seitlichen Öffnungen dienen dabei der Gewichtsreduzierung. Die Höhe des Fahrgestells wird durch das zuvor definierte Packagemodell nach oben, sowie nach unten durch die Bodenfreiheit bestimmt. Die Profilhöhe im hinteren Bereich beträgt 300 mm.



Abbildung 6.3: Geschweißtes Anhängerfahrgestell [24]

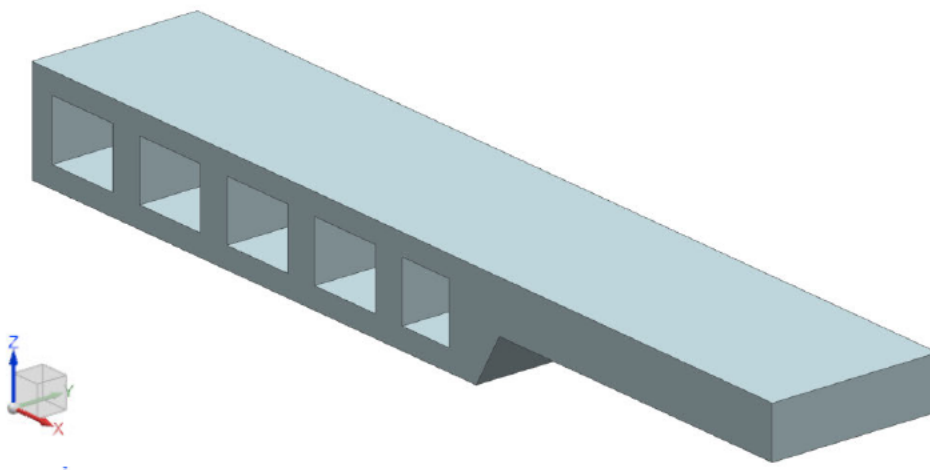


Abbildung 6.4: Grundgeometrie Fahrgestell



Im nächsten Schritt werden, wie in Abbildung 6.5 zu erkennen, Bleche mit einer Materialstärke von 5 mm abgeleitet und durch verschieden Beschnitte gewichtsreduziert. Im hinteren Bereich ist jetzt die Struktur des Leiterraumens erkennbar. Dieser verjüngt sich zum Heck, um Spannungsspitzen zu vermeiden.

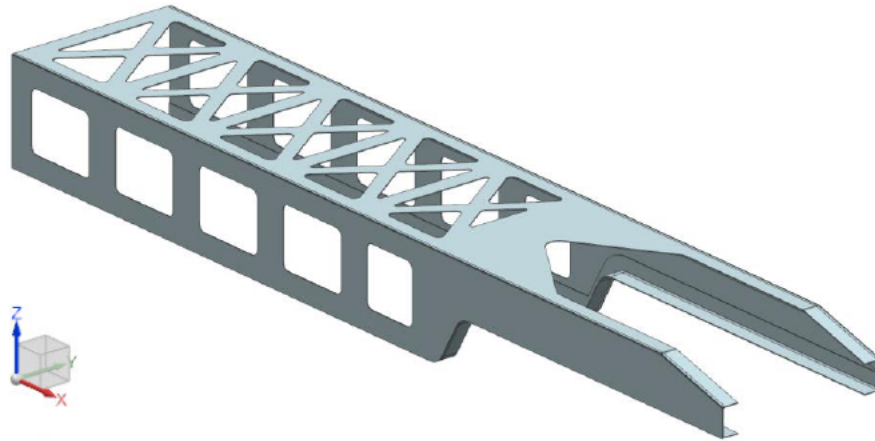


Abbildung 6.5: Konstruktion Bleche

Als Auflagefläche für die Energiespeicher dient ein tiefgezogenes Wellblech, welches am Rand an den Rest des Fahrgestells angebunden ist (siehe Abbildung 6.6). In Abbildung 6.6 sind außerdem die unteren Winkelbleche zu erkennen, welche von der Fron bis ans Heck verlaufen. Als zusätzliche Versteifung folgen dann noch tiefgezogene Bleche zum Abtrennen der verschiedenen Batteriepakete, sowie Verstärkungsbleche im Bereich der Sattelkupplung und an den Befestigungspunkten der Achsen (siehe Abbildung 6.7). Im Heck, in dem das Fahrgestell einem Leiterahmen ähnelt, werden 2 zusätzliche Querträger eingesetzt. Der hintere wird als Falt-Biege-Teil und der vordere als Gusskonstruktion realisiert, um zusätzliche Anbindungspunkte für das Achsaggregat zu bieten.

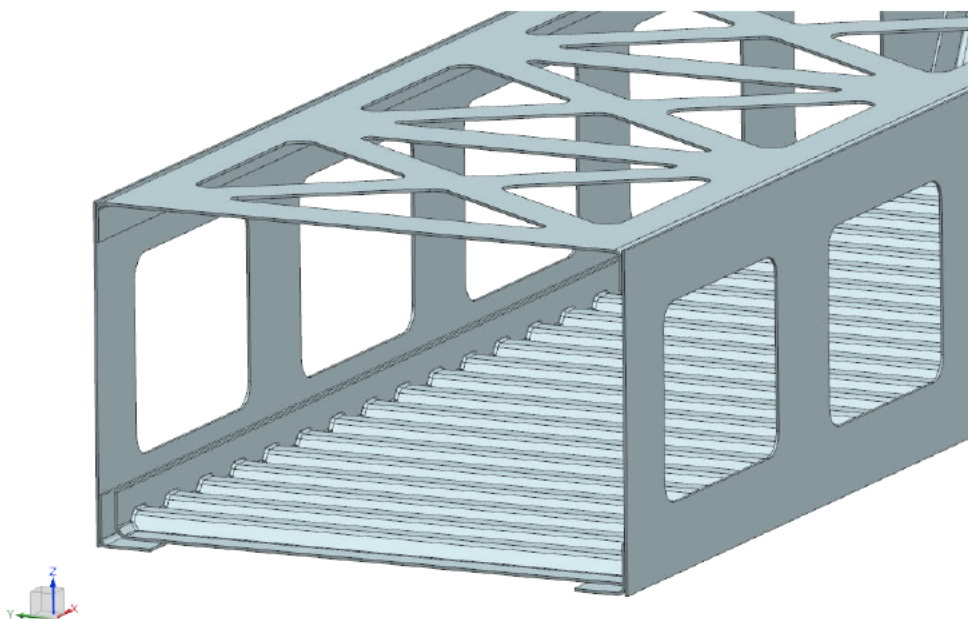


Abbildung 6.6: Bodenblech Fahrgestell

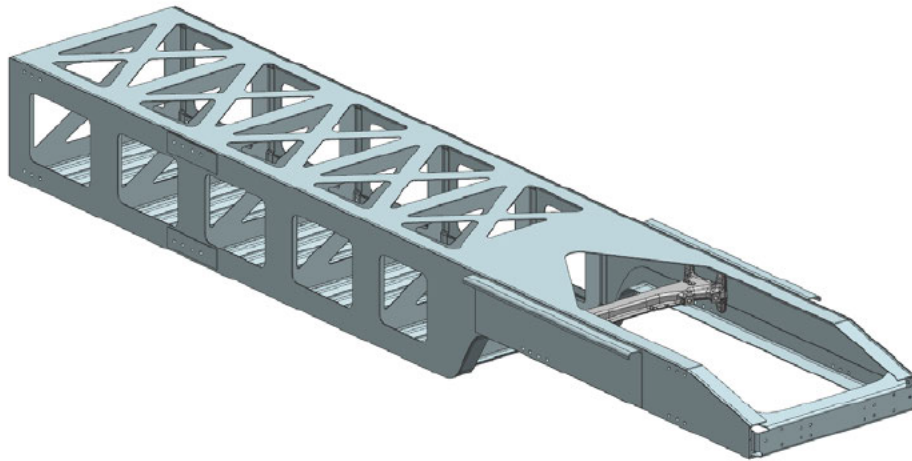


Abbildung 6.7: Fahrgestell mit Verstärkungen

## 6.2 Berechnung

Für die Berechnung wird zunächst das Berechnungsmodell vorbereitet. Die Komponenten werden dafür mit dem Befehl „Unite“ verschmolzen, um die Schweißverbindungen zu simulieren. Auch Bauteile, die miteinander verschraubt sind, können so, unter der Annahmen, dass die auftretenden Kräfte nicht die Reibkraft der Schraubverbindung überschreiten, simuliert werden. Das Berechnungsmodell besteht somit aus einem Körper, dem als Material Stahl zugewiesen wird. In NX wird dieser Werkstoff als isotropes Material mit einem E-Modul von  $E = 206.940 \text{ MPa}$  und einer Dichte von  $7,829 \text{ kg/dm}^3$  definiert. Nach der Definition des Materials kann der Körper vernetzt werden. Hierfür eignet sich die Funktion 3D-Tetrahedral, welche Volumenelemente generiert. Hierfür wird die Kantenlänge der Elemente definiert. NX bietet die Möglichkeit die Kantenlänge selbst sinnvoll zu definieren. Für das Berechnungsmodell wird eine Elementgröße von  $17,4 \text{ mm}$  vorgeschlagen und verwendet. Wie in Abbildung 6.8 zu erkennen, sind die Volumenelemente in den Randbereichen kleiner als auf den Flächen ausgeführt. Kleinere Elemente bedeuten einen höheren Rechenaufwand bei einer größeren Genauigkeit, weswegen die Elemente so klein wie möglich, aber so groß wie nötig gewählt werden, um ausreichend genaue Ergebnisse zu erhalten.

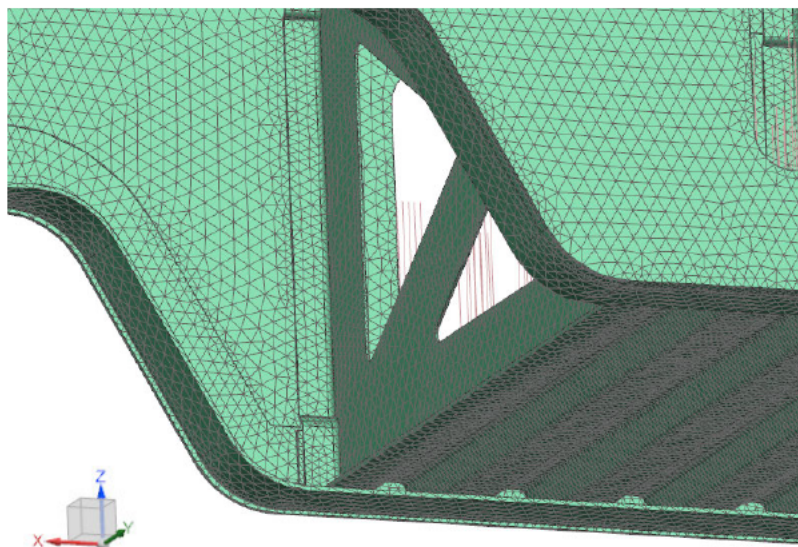


Abbildung 6.8: Vernetztes Berechnungsmodell

Als nächstes folgt mit dem Befehl „Activate Simulation“ der Wechsel in die Simulationsumgebung. Hier werden die Lagerbedingungen, sowie die Belastungen definiert. Angebunden wird das Simulationsmodell über Bohrungen durch die Längsträger auf Positionen, die einer Achsanbindung mit einem Blattfeder-Achsaggregat entsprechen. In Abbildung 6.9 sind diese an den blauen Linien zu erkennen. Als Belastung wird über Befehl „Force“ das Gewicht der Energiespeicher flächig auf dem Boden des Fahrgestells mit 30000 N simuliert und im hinteren Bereich das Gewicht einer Sattelplatte mit 100000 N simuliert. Die eingeleiteten Kräfte sind in Abbildung 6.9 an den roten Pfeilen zu erkennen.

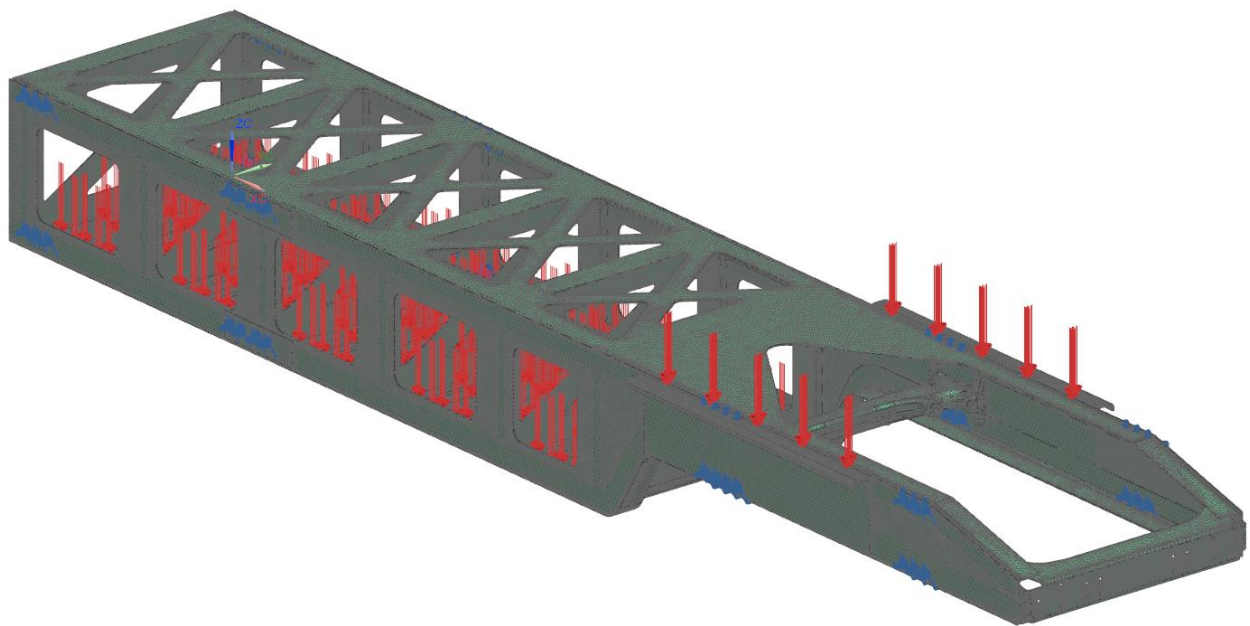


Abbildung 6.9: Berechnungsmodell in Simulationsumgebung

Abschließend wird ein „Model Setup Check“ durchgeführt, bei dem das Modell auf mögliche Fehler oder fehlende Eingangswerte untersucht wird. Sobald keine Fehler erkannt werden, kann das Modell über den Befehl „Solve“ berechnet werden.

### 6.3 Auswertung

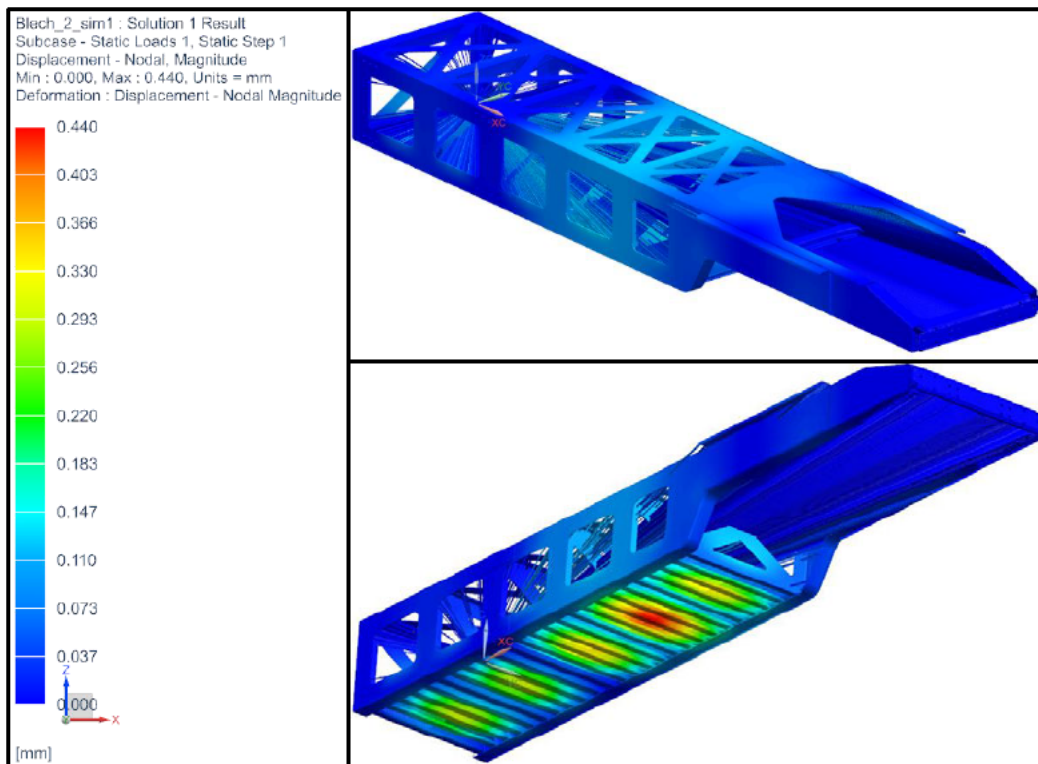


Abbildung 6.10: Simulation Verformung

Wie in Abbildung 6.10 zu erkennen, weist das Berechnungsmodell eine maximale Verformung von 0,44 mm auf. Dieser Maximalwert tritt im Bereich des Bodenblechs auf. Die maximale Durchbiegung des eigentlichen Fahrgestells beträgt ungefähr 0,13 mm.

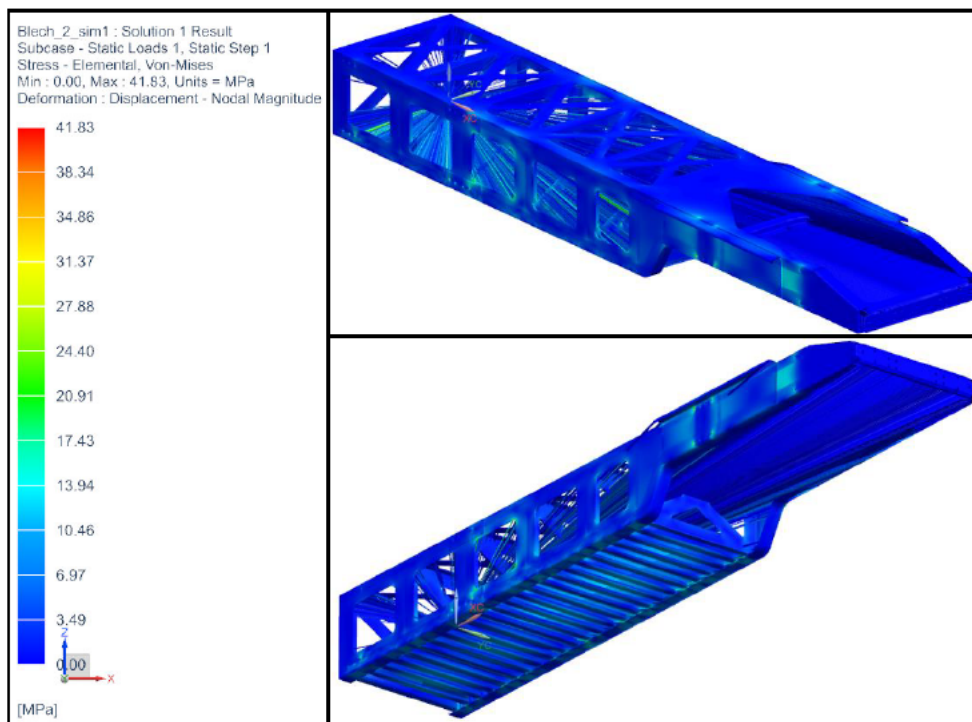


Abbildung 6.11: Simulation Spannungen

Auch die Spannungen (siehe Abbildung 6.11) haben insgesamt ein niedriges Niveau. Die Maximale Spannung beträgt 41,8 MPa und befindet sich an den Einspannstellen. Durch kleinere Optimierungen, wie dem Einsatz von Verstärkungsblechen an den Einspannstellen, konnten die Spannungen im Vergleich zu der Analyse aus Kapitel 5 trotz höherer Belastung durch die Sattellast erheblich reduziert werden. In dieser Analyse fehlen zwar viele Einflussgrößen, wie das Gewicht der Kabine oder anderer Zusatzaggregate, die am Fahrgestell befestigt werden müssen, sie liefert allerdings einen ersten Einblick in die Tauglichkeit für einen Serieneinsatz.

## 7 Fazit

Die Elektrifizierung von LKW ist ein wichtiger Schritt zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Transportsektor. Geringe Reichweiten und fehlende Infrastruktur sind die größten Hemmschwellen für den flächendeckenden Einsatz von E-LKW. Die Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge stellt im Vergleich zu leichteren Klassen noch immer eine Herausforderung dar

### 7.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es neue Möglichkeiten und Konzepte für die Unterbringung und die Befestigung der Energiespeicher an das LKW-Fahrgestell zu finden. Zunächst werden die Grundlagen und der Aufbau von klassischen Fahrgestellen, die als Leiterraum ausgeführt sind, aufgeführt. Diese lassen sich in ihren Eigenschaften durch eine Kombination aus offenen und geschlossenen Profilen gezielt an den Anwendungszweck anpassen. Als Grundlage für die elektrischen Komponenten eines batterieelektrischen LKW werden die in Frage kommenden Antriebskonfigurationen vorgestellt und auf Vor- und Nachteile untersucht. Der Aufbau sowie die elektrische Verschaltung der Batteriezellen zu Batteriemodulen werden erklärt. Durch eine Kombination von in Reihe und Parallel geschalteten Batteriezellen lassen sich Spannungen sowie die Kapazität der Energiespeicher gezielt steuern. Die Energiespeicher werden durch das Batteriemanagementsystem kontinuierlich überwacht und geregelt, damit keine Schäden an den Zellen entstehen.

Als nächstes werden verschiedene Konzepte aktueller elektrisch betriebener LKW vorgestellt und analysiert. Diese basieren auf den konventionellen LKW mit Verbrennungsmotoren und Leiterraum. Für die Anforderungen werden Berechnungen zu den benötigten Energiespeichern durchgeführt und Abmessungen sowie Bauräume für das Fahrzeug definiert. Die Konzepte werden über einen Morphologischen Kasten generiert anschließend ausgearbeitet und analysiert. Die Konzepte bilden klassische Leiterraum sowie neue Konzepte und Ideen für LKW-Fahrgestelle ab. Die erarbeiteten Konzepte werden mit einer Bewertungsmatrix bewertet und analysiert. Das am besten Bewertete Konzept wird ausgewählt und in NX genauer ausgearbeitet um es anschließend in einer FEM-Simulation zu berechnen. Hierfür wird ein statischer Lastfall bestehend aus dem Gewicht der Batterien sowie der Sattellast definiert. Die Ergebnisse der Simulation werden ausgewertet und gedeutet.

## 7.2 Ausblick

Um das gewählte Konzept zu einem seriennahen Stand zu bringen sind noch viele weitere Berechnungen und Optimierungen sowie Versuche an einem Prototyp erforderlich. Die vielen verschiedenen Lastfälle, welchen ein LKW-Fahrgestell ausgesetzt ist, lassen sich in dieser Arbeit nur schwer abbilden. Die Nutzfahrzeughersteller haben hierfür in der Regel eine hohe Anzahl an definierten Lastfällen, um ihre Fahrgestelle zu analysieren und zu validieren. Der klassische Leiterraum hat sich seit vielen Jahren im Nutzfahrzeugbau etabliert und deckt die gestellten Anforderungen sehr gut ab. Die Bewertung der verschiedenen Konzepte hat aufgezeigt, dass der Leiterraum auch für elektrische LKW geeignet sein kann. Speziell die anpassbare Rahmentorsion des Leiterraums, lässt sich mit dem gewählten Konzept in Schalenbauweise nur schwer umsetzen. Jedoch stellt diese Torsion batterieelektrische Fahrzeuge mit Leiterraum auch vor Herausforderungen bezüglich der Anbindung der Energiespeicher an das Fahrgestell. Die Verdrehung des Fahrgestells darf dabei keine Beschädigungen an den Energiespeichern sowie deren Anbindung verursachen. Hierfür müssen elastische Anbindungen entwickelt und verwendet werden. Das in dieser Arbeit verwendete Konzept benötigt durch die torsionssteife Ausführung eine nicht so aufwendige Anbindung. Zusätzlich wird durch die Integration der Energiespeicher in das Fahrgestell Gewicht eingespart, da keine zusätzlichen Batteriegehäuse mit Crashstruktur benötigt werden. Ob sich batterieelektrische Nutzfahrzeuge durchsetzen, lässt sich derzeit noch schwer abschätzen. Gerade im Fernverkehr fehlt aktuell die passender Ladeinfrastruktur sowie Anreize auf CO<sub>2</sub>-arme Alternativen zum Verbrennungsmotor umzusteigen. Neue Entwicklungen bei Batterietechnologien oder auch anderen Antriebstechnologien wie Wasserstoff oder synthetischen E-Fuels könnten hierbei einen Durchbruch bedeuten. Zumindest Mittelfristig sowie im Verteilerverkehr werden sich batterieelektrische Fahrzeuge dennoch etablieren, weswegen Entwicklungen von Lösungen für die neuen Anforderungen im Fahrzeugbau weiterhin wichtig bleiben.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ), „Umweltverband: EU soll ab 2035 nur emissionsfreie Neu-Lkw zulassen“, Deutsche Verkehrs-Zeitung (DVZ), 16 09 2022. [Online]. Available: <https://www.dvz.de/rubriken/politik/detail/news/te-forderung-eu-soll-ab-2035-nur-emissionsfreie-neu-lkw-zulassen.html#:~:text=Das%20w%C3%BCrde%20bedeuten%2C%20dass%20ab,beraten%20die%20EU%2DGesetzgeber%20derzeit.> [Zugriff am 24 01 2023]
- [2] Zeit Online, „Wasserstoff oder Batterie? Diskussion um Lkw-Antriebe“, Zeit Online, 11 02 2022 [Online]. Available: <https://www.zeit.de/news/2022-02/11/wasserstoff-oder-batterie-diskussion-um-lkw-antriebe> [Zugriff am 25 01 2023]
- [3] Infineon, „Chancen und Möglichkeiten durch E-Nutzfahrzeuge“, Infineon, 07 2021 [Online]. Available: <https://www.infineon.com/cms/de/discoveries/elektro-nutzfahrzeuge/#:~:text=Die%20Vorteile%20von%20E%2DNutzfahrzeugen,-Die%20Vorteile%20von&text=Das%20f%C3%BChrt%20zu%20selteneren%20Ausf%C3%A4llen,L%C3%A4rm%20als%20Fahrzeuge%20mit%20Verbrennungsmotoren.> [Zugriff am 25 01 2023]
- [4] Ecomento, „Technik-Details zum Mercedes-Benz Elektro-Lkw Urban eTruck“, Ecomento, 02 08 2016 [Online]. <https://ecomento.de/2016/08/02/technik-details-zum-mercedes-benz-elektro-lkw-urban-etruck/> [Zugriff am 02 02 2023]
- [5] Thomas Geiger, „Antriebswende bei den Lkws“, Elektroautomobil, 24 09 2021 [Online]. Available: <https://www.elektroautomobil.com/newsbeitrag/fahrbericht-mercedes-eactros/> [Zugriff am 02 02 2023]
- [6] Erich Hoepke und Stefan Breuer, Nutzfahrzeugtechnik Grundlagen, Systeme, Komponenten, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [7] Wikipedia, „Verwölbung“ 17 01 2020 [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/wiki/Verw%C3%B6lbung#/media/Datei:Verwoelbung\\_I-Profil.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Verw%C3%B6lbung#/media/Datei:Verwoelbung_I-Profil.svg) [Zugriff am 07 02 2023]
- [8] Martin Doppelbauer, Grundlagen der Elektromobilität, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020
- [9] Auto.de, „Bus mit Radnabenantrieb geht in Münster auf die Linie“, 10 03 2014 [Online]. Available: <https://www.auto.de/magazin/bus-mit-radnabenantrieb-geht-in-muenster-auf-die-linie/> [Zugriff am 09 02 2023]
- [10] Mercedes Benz, „Der Antrieb des Mercedes-Benz SLS AMG E-CELL“, 09 03 2012 [Online]. Available: <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Der-Antrieb-des-Mercedes-Benz-SLS-AMG-E-CELL-Hightech---sichtbar-gemacht.xhtml?oid=9917787> [Zugriff am 14 02 2023]
- [11] iwd, „So funktioniert eine E-Batterie“, 28 06 2021 [Online]. Available: <https://www.iwd.de/artikel/so-funktioniert-eine-e-batterie-513730/> [Zugriff am 22 02 2023]



- [12] Jan Burgdorf, „Supertest Volvo FH“, TRUCKER 01/2022 Available: <https://brochures.volvotrucks.com/de/volvo-trucks/testberichte/2022/volvo-fh-electric-testbericht-trucker-2022-01/?page=4> [Zugriff am 22 02 2023]
- [13] Linergy, „Grundlagen der Akkutechnik“ Available: <https://linergy.de/wiki/grundlagen-der-akkutechnik/> [Zugriff am 22 02 2023]
- [14] Kay-Uwe Schult, Dr. Joachim Harmel, „Entwicklung einer Prüfzelle zur sicherheitstechnischen Prüfung elektrischer Energiespeicher mit umweltverträglicher Wirkungsweise“, SLG Prüf- und Zertifizierungs GmbH, Januar 2011 Available: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-27187.pdf> [Zugriff am 28 02 2023]
- [15] Flash Battery, „Recycling von Lithium-Batterien: Wir schaffen Klarheit“ Available: <https://www.flashbattery.tech/de/recycling-lithium-batterien/> [Zugriff am 28 02 2023]
- [16] RollerReiner, „Länge von Nfz“, [Online] Available: <http://rollerreiner.org/EU%20Sattel-%20und%20Gliederzug.htm> [Zugriff am 22 03 2023]
- [17] Kraftfahrt-Bundesamt, „Entwicklung der Fahrzeugflotte Dezember 2021“, [Online]. Available: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/vd\\_mon-atl\\_Fahrzeugflotte/entwicklung\\_der\\_dt\\_fahrzeugflotte\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/vd_mon-atl_Fahrzeugflotte/entwicklung_der_dt_fahrzeugflotte_node.html)
- [18] P. Plötz, D. Speth und P. Rose, „Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw. Kurzstudie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA),“ Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, 2020.
- [19] KFZ-Auskunft, „Lenk- und Ruhezeiten für Kraftfahrer“ [Online]. Available: <https://www.kfz-auskunft.de/lkw/lenkzeiten-ruhezeiten.php> [Zugriff am 22 03 2023]
- [20] BWL-Lexikon.de, „Morphologischer Kasten“ [Online]. Available: <https://www.bwl-lexikon.de/wiki/morphologischer-kasten/> [Zugriff am 27 03 2023]
- [21] braintool, „Wie funktioniert der Morphologische Kasten?“ [Online]. Available: <https://www.braintool.com/blog/morphologischer-kasten/> [Zugriff am 27 03 2023]
- [22] Meritor, „17Xe™ ePowertrain“ [Online] Available: <https://www.meritor.com/en/products/ePowertrains/17Xe> [Zugriff am 29 03 2023]
- [23] Oponiarski online [Online] Available: <https://przegladoponiarski.pl/art/5035/ciezarowe-i-dostawcze-2-3-4-5-6-7-8-9.html> [Zugriff am 30 03 2023]
- [24] SCHMITZ Cargobull, „S.KI LIGHT“ [Online] Available: <https://www.cargobull.com/de/produkte/kipper/sattelkipper/s-ki-light#ChassisUndFahrwerk> [Zugriff am 30 03 2023]

**Anhang****Anhang A: Eigenständigkeitserklärung****Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit**

Hiermit versichere ich,

Name: Storch

Vorname: Julian

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema:

„Konzeption einer gewichtsoptimierten Fahrgestell-Batterie Kombination für batterieelektrische LKW“

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

\_\_\_\_\_

Ort

\_\_\_\_\_

Datum



\_\_\_\_\_

Unterschrift