



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Ogün Turp

Modellierung von Fahrzeugkarosserie und Battery Pack zur Untersuchung der Steifigkeitsabhängigkeit mittels der Finite-Elemente-Methode

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department Automotive and
Aeronautical Engineering*

Ogün Turp

Modellierung von Fahrzeugkarosserie und Battery Pack zur Untersuchung der Steifigkeitsabhängigkeit mittels der Finite-Elemente-Methode

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Benedikt Plaumann
Zweitprüfer: Eugen Hein, M.Sc.

Abgabedatum: 07.10.2024

Zusammenfassung

Ogün Turp

Thema der Bachelorthesis

Modellierung von Fahrzeugkarosserie und Battery Pack zur Untersuchung der Steifigkeitsabhängigkeit mittels der Finite-Elemente-Methode

Stichworte

Fahrzeugkarosserie, Battery Pack, CAD, Siemens-NX, Flächenmodellierung, Steifigkeit, FEM, HCC21

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Modellierung eines CAD-Flächenmodells einer Fahrzeugkarosserie sowie eines Battery Packs in Siemens-NX, um Untersuchungen zur Steifigkeitsabhängigkeit mittels der FEM durchführen zu können. Zunächst wird der Stand der Technik dargelegt. Anschließend werden die Grundlagen der Fahrzeugkarosserie, E-Fahrzeug-Batterie und der FEM erläutert. Daraufhin erfolgt eine detaillierte Beschreibung des Modellaufbaus, wobei das Referenzfahrzeug, die Anforderungen sowie die vorgenommenen Vereinfachungen und die systematische Vorgehensweise während der Modellierung behandelt werden. Darüber hinaus wird eine Verifizierung des Modells vorgenommen. Im Anschluss darauf wird anhand eines Beispiels aufgezeigt, dass der Einsatz der FEM gewährleistet ist. Abschließend werden im Fazit die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf die zukünftige Weiterentwicklung des Modells gegeben.

Ogün Turp

Title of the paper

Modeling of vehicle body and battery pack to investigate the stiffness dependence using the finite element method

Keywords

vehicle body, battery pack, CAD, Siemens-NX, surface modelling, stiffness, FEA, HCC21

Abstract

This thesis deals with the modeling of a CAD surface model of a vehicle body and a battery pack in Siemens-NX in order to be able to carry out investigations on the stiffness dependency using the FEA. First, the state of the art is presented. The basics of the vehicle body, e-vehicle battery and FEA are explained. This is followed by a detailed description of the model structure, covering the reference vehicle, the requirements, the simplifications made and the systematic approach during modeling. In addition, the model is verified. Subsequently, an example is used to show that the use of the FEA is guaranteed. Finally, the most important findings are summarized in the conclusion and an outlook on the future development of the model is given.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	III
Symbolverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik	2
3 Grundlagen und Theorie.....	3
3.1 Grundlagen der Fahrzeugkarosserie	3
3.2 Grundlagen der Elektrofahrzeug-Batterie.....	6
3.2.1 Aufbau und Funktionsweise	7
3.2.2 Batteriezellformate	8
3.2.3 Integration der Batterie ins Fahrzeug	12
3.3 Grundlagen der Finite-Elemente-Methode	14
4 Aufbau des Modells in Siemens-NX.....	17
4.1 Referenzfahrzeug Hamburg Concept Car 2021	17
4.2 Anforderungen und vorgenommene Vereinfachungen.....	19
4.3 Beschreibung des Aufbaus	21
5 Verifizierung des Modells	34
6 Anwendung der FEM-Umgebung	36
7 Fazit und Ausblick.....	38
Literaturverzeichnis.....	39
Eigenständigkeitserklärung	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Jahresbilanz 2024 des Pkw-Bestands in Deutschland nach Kraftstoffart [2] ..	1
Abbildung 2.1: Einsatz der FEM am Beispiel einer Fahrzeugkarosserie [4]	2
Abbildung 3.1: Fahrzeugrahmen eines Lkws [5, S. 127]	3
Abbildung 3.2: Aufbau (l.) und Unterbau (r.) [6, S. 174, 177]	4
Abbildung 3.3: selbsttragende Karosserie in Schalenbauweise des BMW E60 [5, S. 129]	4
Abbildung 3.4: Space-Frame-Bauweise des Audi A8 (Baureihe D3) [6, S. 188]	5
Abbildung 3.5: Gitterrohrrahmen-Bauweise des Mercedes-Benz SL 300 [7]	5
Abbildung 3.6: Vergleich der Batterietechnologien im Ragone-Diagramm [9, S. 10]	6
Abbildung 3.7: schematischer Aufbau einer Li-Ionen-Zelle beim Entladevorgang [11, S. 3] ..	8
Abbildung 3.8: Aufbau der Rundzelle [12, S. 225]	8
Abbildung 3.9: Vergleich der drei Rundzellentypen [13]	9
Abbildung 3.10: Aufbau der prismatischen Zelle [12, S. 225]	10
Abbildung 3.11: Aufbau der Pouch-Zelle [12, S. 225]	11
Abbildung 3.12: modulare Bauform der Traktionsbatterie [16]	12
Abbildung 3.13: Cell2Pack Bauform der Traktionsbatterie [17]	13
Abbildung 3.14: Bauformen von Batteriesystemen [3, S. 28]	13
Abbildung 3.15: Schritte bei der Anwendung der FEM [19, S. 4]	14
Abbildung 3.16: farbliche Unterteilung der FEM anhand eines Beispiels	15
Abbildung 3.17: Elementtypen [21, S. 6]	16
Abbildung 4.1: CAD-Modell des HCC-Rohbaus [24]	17
Abbildung 4.2: CAD-Modell des HCC-Battery Packs [25]	18
Abbildung 4.3: Strukturbaum des Gesamtmodells	21
Abbildung 4.4: Komponenten des „Batterieminiduls“	22
Abbildung 4.5: „Batterieminidul“ (l.) und alle 16 „Batterieminidule“ (r.)	22
Abbildung 4.6: „Batterierahmen“	23
Abbildung 4.7: „Fachwerkstruktur“	23
Abbildung 4.8: „Batterierahmen“ mit „Fachwerkstruktur“ und „Batterieminidulen“	24
Abbildung 4.9: „Batteriedeckel“ (o.l.), „Schaumplatten“ (o.r.) und „Schockdämpfer“ (u.)	24
Abbildung 4.10: ZSB „Battery_Pack“	24
Abbildung 4.11: Strukturbaum der UZSB „Vorderwagen“	25
Abbildung 4.12: „Querträger“	25
Abbildung 4.13: „Crashbox“	25
Abbildung 4.14: „Prallplatte_Crashbox“ (l.) und „Längsträger“ (r.)	26
Abbildung 4.15: UZSB „Vorderwagen“	26
Abbildung 4.16: Strukturbaum der UZSB „Unterboden“	27
Abbildung 4.17: „Bodenblech“ (o.), „Schweller“ (u.l.) und „Verbindungsbleche“ (u.r.)	27
Abbildung 4.18: „Battery_Pack“ verbunden mit „Unterboden“ (ohne „Bodenblech“)	27
Abbildung 4.19: Strukturbaum der UZSB „Aufbau“	28
Abbildung 4.20: Komponenten des „Seitenwandrahmens“	28
Abbildung 4.21: „Rahmenboden“ mit UZSB „Unterboden“	28
Abbildung 4.22: „Verbindung“ mit „Rahmenboden“ und UZSB „Vorderwagen“	29
Abbildung 4.23: „Seitenwand_vorne“	29
Abbildung 4.24: „B-Säule“	30
Abbildung 4.25: „Seitenwand_hinten“	30
Abbildung 4.26: „Seitenwandrahmen“	31
Abbildung 4.27: „Heck“	31
Abbildung 4.28: UZSB „Aufbau“	32
Abbildung 4.29: Gesamtmodell – „Fahrzeugkarosserie_und_Battery_Pack“	32

Abbildung 4.30: schematische Vorgehensweise während der Modellierung.....	33
Abbildung 5.1: Verifizierung der ZSB "Battery_Pack"	34
Abbildung 5.2: Verifizierung der UZSB "Vorderwagen"	35
Abbildung 5.3: Verifizierung der UZSB "Aufbau" und der UZSB "Unterboden"	35
Abbildung 6.1: Vernetzung der ET des "Vorderwagens"	36
Abbildung 6.2: Verklebung, Zwangsbedingungen und wirkende Last am "Vorderwagen" ...	37
Abbildung 6.3: Verschiebung - Fall 1.....	37
Abbildung 6.4: Verschiebung - Fall 2.....	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Vergleich der drei Batteriezellformate für BEVs [15]	11
Tabelle 3.2: Vergleich der drei Batteriesysteme	13
Tabelle 4.1: Anforderungen und vorgenommene Vereinfachungen des Modells	20
Tabelle 4.2: Materialwerte aus der NX-Bibliothek.....	22

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
d	Durchmesser	m
h	Höhe	m
V	Volumen	m ³
π	Kreiszahl pi	-

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
Akku	Akkumulator
Al	Aluminium
BEV	battery electric vehicle (dt. batterieelektrisches Fahrzeug)
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design (dt. rechnerunterstütztes Konstruieren)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cu	Kupfer
dt.	deutsch
EDV	elektronische Datenverarbeitung
E-Fahrzeug	Elektro-Fahrzeug
E-Maschine	Elektro-Maschine
engl.	englisch
ET	Einzelteil
FE	Finite-Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FG	Formelementgruppe
Gl.	Gleichung
HCC21/HCC	Hamburg Concept Car 2021
KET	Karosserie Entwicklung Thurner
l.	links
Li	Lithium
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
LiMO ₂	Metalloxid
Lkw	Lastkraftwagen
Nfz	Nutzfahrzeug
NX	Siemens-NX
o. D.	ohne Datum
o.	oben
OEM	Original Equipment Manufacturer (dt. Automobilhersteller/Erstausrüster)
Pkw	Personenkraftwagen
r.	rechts
SEI	Solid-Electrolyte-Interface (dt. Feststoff-Elektrolyt-Grenzschicht)
sog.	sogenannt
u.	unten
UZSB	Unterbaugruppe
v.l.n.r.	von links nach rechts
z.B.	zum Beispiel
ZSB	Zusammenbaugruppe

1 Einleitung

Die Energiewende hat zu einem rasanten Anstieg in der Entwicklung und Produktion von batterieelektrischen Fahrzeugen (engl. battery electric vehicle, kurz BEV) geführt. Diese Entwicklung ist sowohl eine Reaktion auf die dringende Notwendigkeit, den globalen CO₂-Ausstoß zu reduzieren, als auch auf die zunehmenden Anforderungen des Gesetzgebers hinsichtlich der Schadstoffemissionen. Da den Automobilherstellern (engl. OEM) erhebliche Strafzahlungen drohen, wenn sie den CO₂-Flottenverbrauchswert von 95 g/km nicht einhalten, sind sie dazu angehalten, den Übergang zur nachhaltigen Mobilität voranzutreiben und vermehrt Elektrofahrzeuge zu produzieren [1]. Die Abbildung 1.1 verdeutlicht den zunehmenden Anteil elektrifizierter Fahrzeuge in Deutschland.

Kraftstoffart	Anzahl am 1. Januar 2024	Anteil in %	Anzahl am 1. Januar 2023	Anteil in %	Veränderung gegenüber dem 1. Januar 2023 in %
Benzin	30.235.032	61,6	30.556.538	62,7	-1,1
Diesel	14.142.184	28,8	14.437.489	29,6	-2,0
Flüssiggas	313.723	0,6	326.853	0,7	-4,0
Erdgas	77.421	0,2	80.630	0,2	-4,0
Hybrid	2.911.262	5,9	2.337.897	4,8	+24,5
darunter Plug-in	921.886	1,9	864.712	1,8	+6,6
Elektrisch (BEV)	1.408.681	2,9	1.013.009	2,1	+39,1

Abbildung 1.1: Jahresbilanz 2024 des Pkw-Bestands in Deutschland nach Kraftstoffart [2]

Die Entwicklung von BEVs ist ein fortlaufender Prozess, der kontinuierliche Verbesserungen in den Bereichen Antriebsmaschinen-Optimierung, Batterietechnologie und Karosseriegestaltung erfordert. Besonders bedeutsam ist die Konstruktion und Integration des Battery Packs (dt. Batteriepaket). Dieses sollte so konzipiert sein, dass es platzsparend und leicht ist, um die Energieeffizienz des Fahrzeugs zu maximieren. Darüber hinaus sollte das Battery Pack universell in verschiedene Fahrzeugmodelle integrierbar sein. Dabei ist zu beachten, dass die Karosserien verschiedener Fahrzeugmodelle unterschiedliche Steifigkeitswerte aufweisen, was die Verteilung der Kräfte zwischen den beiden Komponenten beeinflusst.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung eines CAD-Flächenmodells einer abstrahierten Fahrzeugkarosserie und eines Battery Packs. Dieses Modell soll als Basis für nachfolgende studentische Arbeiten und Untersuchungen zur Steifigkeitsabhängigkeit mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) dienen. Darüber hinaus soll es die Analyse der Interaktion zwischen den beiden Komponenten sowie deren Gesamtverformung unter Einwirkung spezifischer Kräfte ermöglichen. Hierfür wird zunächst der Stand der Technik vorgestellt. Anschließend werden die Grundlagen der Fahrzeugkarosserie, der E-Fahrzeug-Batterie sowie der FEM behandelt. Im Anschluss wird der Aufbau des CAD-Modells in „Siemens-NX“ beschrieben. Hierbei wird auf das Referenzfahrzeug „HCC21“ der „HAW Hamburg“, auf die Anforderungen bzw. vorgenommenen Vereinfachungen sowie auf die systematische Vorgehensweise während der Modellierung eingegangen. Daraufhin wird eine Verifizierung des Modells vorgenommen. Im Anschluss wird anhand eines Beispiels aufgezeigt, dass der Einsatz der FEM gewährleistet ist. Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf die mögliche Weiterentwicklung des Modells gegeben.

2 Stand der Technik

Die Traktionsbatterien von Elektrofahrzeugen (E-Fahrzeug) befinden sich in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess, wobei der Schwerpunkt der OEMs insbesondere auf der Reichweite der Fahrzeuge liegt, da diese für die Kunden von entscheidender Bedeutung ist. Um die Reichweite eines BEVs zu erhöhen, muss eine größere Batterie mit höherer Speicherkapazität eingesetzt werden. Hierfür sind kontinuierliche Anpassungen der Batteriegeometrie erforderlich, was dazu führt, dass die Batterie größer, schwerer und steifer wird. Da die Batterie ein sperriges Bauteil ist, wird sie aus Packaging-Gründen in den meisten Fällen unterflur eingebaut. Für eine derartige Integration der Batterie ist eine Optimierung der Fahrzeugkarosserie erforderlich. In diesem Zusammenhang spielt die Steifigkeit der beiden Komponenten, die den Widerstand gegen Verformung beschreibt, eine wichtige Rolle. Da die Steifigkeit sowohl von dem verwendeten Material als auch von der Geometrie des Bauteils abhängt, muss bei der mechanischen Kopplung dieser beiden Komponenten darauf geachtet werden, dass die während des Betriebs auf sie einwirkenden Lasten und Beanspruchungen keine unzulässigen Verwindungen verursachen. Zudem muss sichergestellt werden, dass die Festigkeit der Komponenten unter den vorliegenden Spannungen gewährleistet ist.

An eine steife Traktionsbatterie werden vor allem zwei zentrale Anforderungen gestellt. Zum einen muss sie in der Lage sein, die Lasten, die während der Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge entstehen, aufzunehmen. Zum anderen muss sie Vibrationen und Stöße, die im Fahrbetrieb auftreten, ertragen können. Zur Erfüllung dieser Anforderungen wird die Batterie in einem Gehäuse untergebracht. Um dieses Gehäuse in der Fahrzeugkarosserie einzubauen, werden zusätzlich Seitenstrukturen integriert. Diese Seitenstrukturen dienen nicht nur der Festigkeit und Steifigkeit, sondern erfüllen außerdem eine wichtige Funktion als Crashelemente, die im Falle eines Unfalles zusätzlichen Schutz bieten [3, S. 136, 140].

Um die Interaktion zwischen Fahrzeugkarosserie und Battery Pack sowie deren Gesamtverformung unter Einwirkung spezifischer Kräfte analysieren zu können, werden in der Entwicklungsphase von Fahrzeugen Simulationen mittels der FEM durchgeführt. Durch Parameterstudien werden kritische Stellen identifiziert, an denen im Fahrbetrieb Torsion und Biegung auftreten können. Zudem ermöglicht die Analyse von Verformungen und Spannungsverteilungen die Optimierung potenzieller Designschwächen. Aufgrund dessen findet die Finite-Elemente-Analyse (FEA) in vielen Disziplinen der Ingenieurwissenschaften Anwendung, darunter Bereiche wie Automobilbau, Luftfahrttechnik und Elektronik [4]. Die Abbildung 2.1 zeigt den Einsatz der FEM am Beispiel einer Fahrzeugkarosserie.

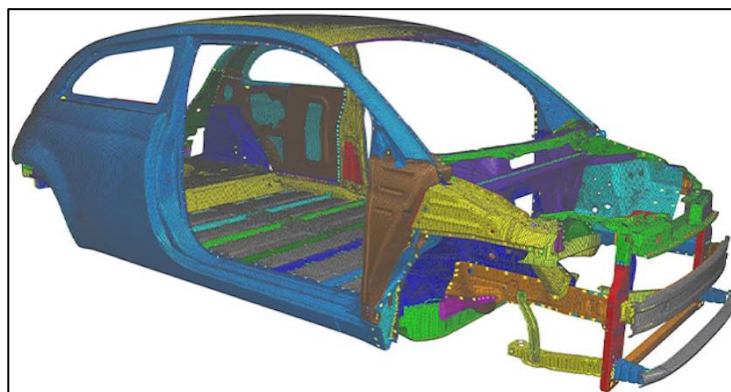


Abbildung 2.1: Einsatz der FEM am Beispiel einer Fahrzeugkarosserie [4]

3 Grundlagen und Theorie

Um einen Überblick und tieferes Verständnis zu vermitteln, werden in den folgenden Abschnitten die Grundlagen der Fahrzeugkarosserie, der Elektrofahrzeug-Batterie sowie die Grundlagen der Finite-Elemente-Methode erläutert.

3.1 Grundlagen der Fahrzeugkarosserie

Die Konstruktion der Fahrzeugkarosserie richtet sich nach den spezifischen Anforderungen, die sie erfüllen muss. Je nach Fahrzeugklasse und den damit verbundenen Anforderungen lassen sich im Wesentlichen vier Karosseriebauweisen unterscheiden [5, S. 127]:

1. Rahmenbauweise
2. selbsttragende Karosserie
3. Space-Frame
4. Gitterrohrrahmen

Die Rahmenbauweise

Die Rahmenbauweise stellt das erste und gleichzeitig einfachste Konzept für den Fahrzeugaufbau dar. Bei dieser Bauweise übernimmt der Rahmen die tragende Funktion der Karosserie, wodurch letztere keine strukturelle Last tragen muss. Diese Bauweise wird weiterhin für Nutzfahrzeuge (Nfz) und Off-Road-Fahrzeuge verwendet. Die niedrigen Kosten ermöglichen die Realisierung verschiedener Aufbauten bei Nutzfahrzeugen. Ein wesentliches Problem der Rahmenbauweise ist die Neigung des Rahmens zur starken Verwindung. Dies muss bei der Gestaltung des Fahrwerks, insbesondere hinsichtlich der Querdynamik, berücksichtigt werden [5, S. 127]. Die Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft den Fahrzeugrahmen eines Lastkraftwagens (Lkw).

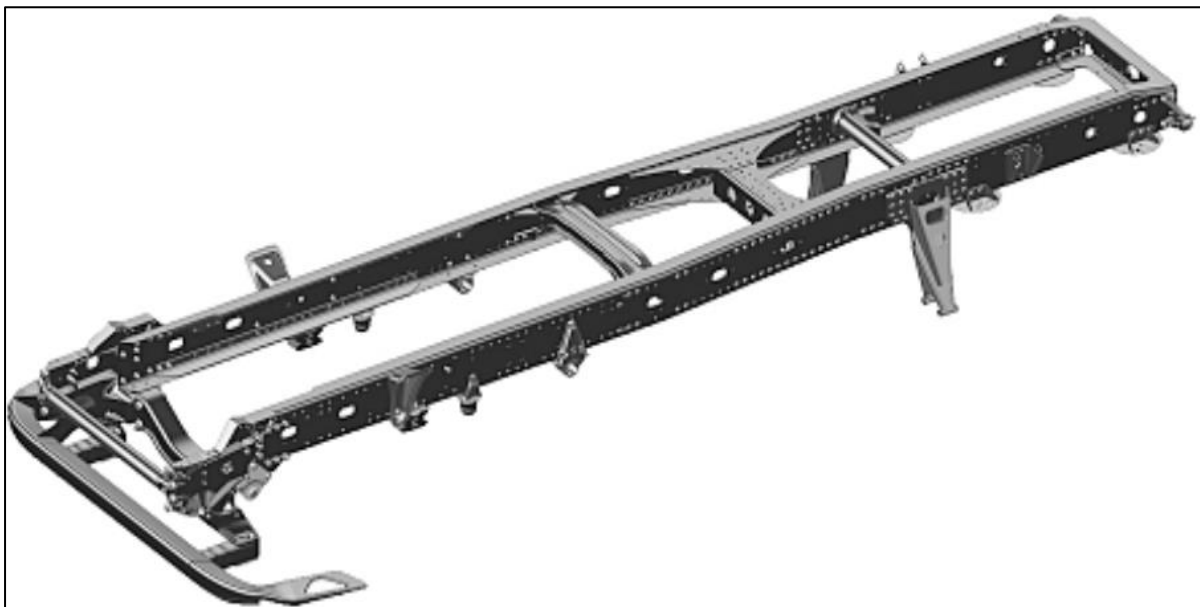


Abbildung 3.1: Fahrzeugrahmen eines Lkws [5, S. 127]

Die selbsttragende Karosserie

Der Großteil der heutigen Pkw ist mit einer selbsttragenden Karosserie in Schalenbauweise ausgestattet. Bei dieser Karosseriebauweise werden die Bleche geformt und durch verschiedene Schweiß- und Klebeverfahren miteinander verbunden. Die selbsttragende Karosserie wird in zwei Hauptbaugruppen unterteilt: den Aufbau, der das Dach sowie die A-, B- und C-Säulen umfasst, und den Unterbau, der in die Unterbaugruppen Vorderwagen, Unterboden vorn und Unterboden hinten gegliedert ist (Abbildung 3.2) [6, S. 174].

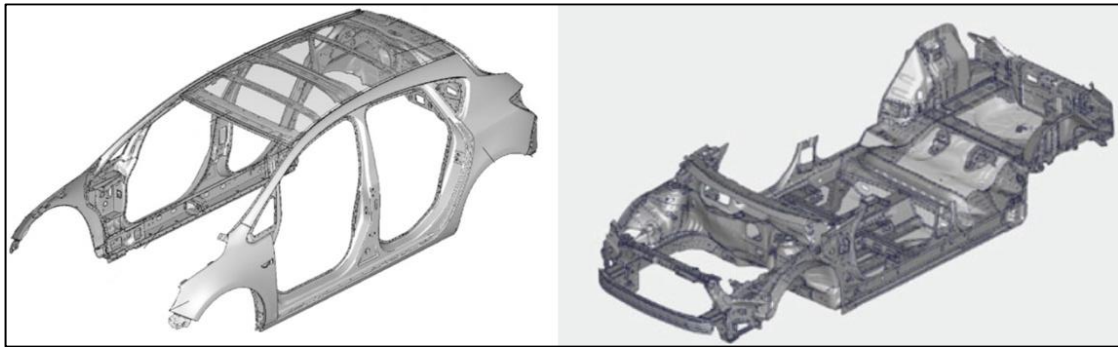


Abbildung 3.2: Aufbau (l.) und Unterbau (r.) [6, S. 174, 177]

Im Vergleich zur Rahmenbauweise bietet die selbsttragende Karosserie ein geringeres Gewicht bei höherer Steifigkeit, einen reduzierten Schwerpunkt sowie eine verringerte Fahrzeugfrontfläche bei gleichem Innenraumangebot. Darüber hinaus verbessert sie die passive Sicherheit durch die Integration von Knautschzonen. Diese Bauweise ermöglicht es, innerhalb der Struktur unterschiedliche Anforderungen an Steifigkeit, Festigkeit und plastische Verformbarkeit zu realisieren. Die Knautschzonen sind so gestaltet, dass sie bei einem Unfall stark plastisch verformbar sind, um die auftretenden Kräfte abzuleiten und die Insassen zu schützen. Die Fahrgastzelle wird so ausgelegt, dass sie eine hohe Festigkeit aufweist. Gleichzeitig wird die gesamte Struktur so konstruiert, dass sie eine hohe Steifigkeit aufweist, um Komfort, Akustik und Fahrdynamik zu optimieren. Zur Erfüllung dieser Anforderungen werden verschiedene Materialien wie Stahl, Aluminium, Magnesium sowie unterschiedliche Stahlgüten verwendet [5, S. 129]. Die Abbildung 3.3 zeigt eine selbsttragende Karosserie mit verschiedenen Materialien am Beispiel des 5er BMW (Baureihe E60).

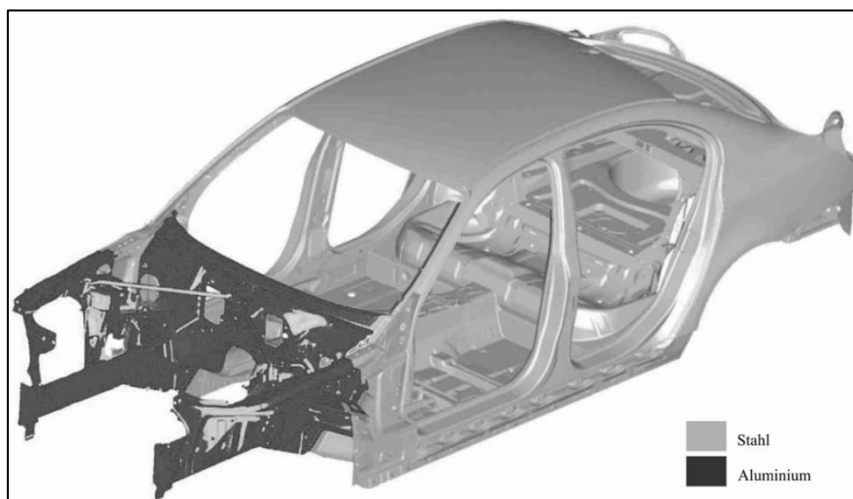


Abbildung 3.3: selbsttragende Karosserie in Schalenbauweise des BMW E60 [5, S. 129]

Die Space-Frame-Bauweise

Die Space-Frame-Bauweise ist eine Weiterentwicklung der selbsttragenden Karosserie. Da neue Fahrzeugmodelle tendenziell schwerer werden und somit der Energieverbrauch steigt, wird ein verstärkter Schwerpunkt auf die Gewichtsreduzierung in der Karosserie gelegt. Neben Tiefziehblechen kommen dabei Strangpressprofile sowie Guss- und Schmiedeteile zum Einsatz. Die Bleche der Außenhaut werden durch dünnwandige und aus Aluminium gefertigte Teile ersetzt, um das Gewicht zu reduzieren. Ein Problem dieser Bauweise ist jedoch, dass die verschiedenen Materialien nicht verschweißt werden können. Stattdessen sind Nieten, Schrauben und Klebeverbindungen erforderlich, was bei größeren Unfallschäden die Reparaturkosten der Karosserie deutlich erhöht [5, S. 130]. Die Abbildung 3.4 zeigt ein Beispiel der Space-Frame-Bauweise anhand des Audi A8.

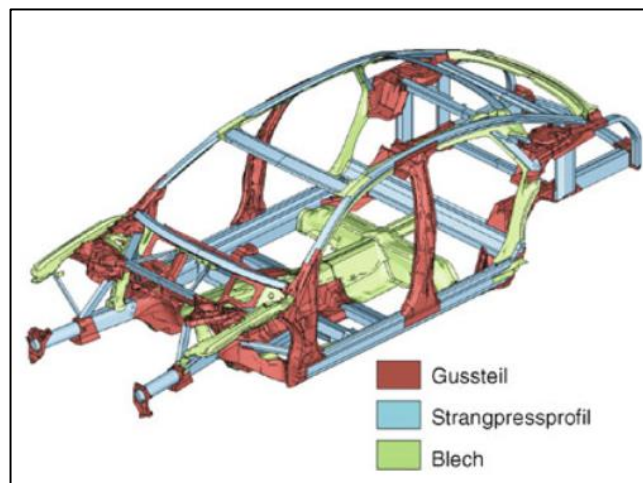


Abbildung 3.4: Space-Frame-Bauweise des Audi A8 (Baureihe D3) [6, S. 188]

Die Gitterrohrrahmen-Bauweise

Um eine leichte, aber gleichzeitig steife Karosserie zu realisieren, bietet sich die Gitterrohrrahmen-Bauweise an. Bei korrekter Gestaltung des Rahmens werden die Rohre hauptsächlich auf Zug und Druck beansprucht, wodurch Verwindungen vermieden werden. Diese Bauweise findet gelegentlich Anwendung bei modernen Sportwagen und ist im Rennsport beliebt [5, S. 130]. Das bekannteste Beispiel für diese Bauweise ist der Mercedes-Benz 300 SL (Abbildung 3.5). Aufgrund ihrer Komplexität ist diese Bauweise jedoch eine Seltenheit.

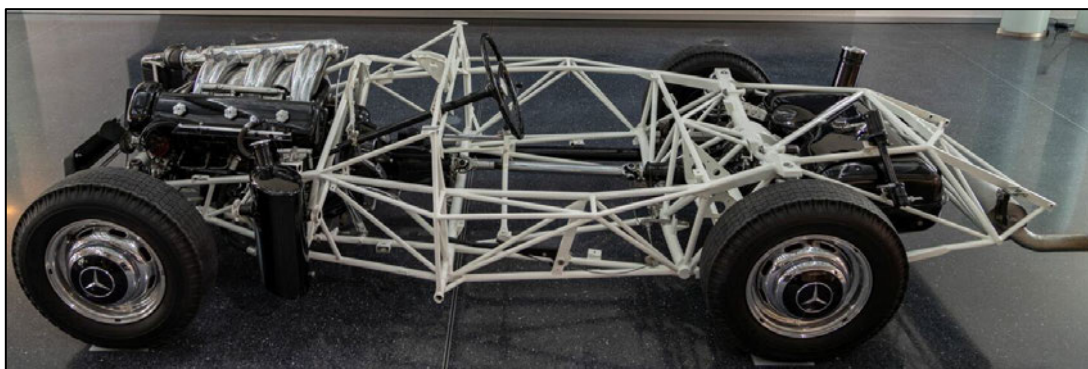


Abbildung 3.5: Gitterrohrrahmen-Bauweise des Mercedes-Benz SL 300 [7]

3.2 Grundlagen der Elektrofahrzeug-Batterie

In der Automobilindustrie wird der Begriff „Batterie“ fälschlicherweise gleichgesetzt mit dem Begriff „Akkumulator“ (kurz „Akku“). Im Gegensatz zu einer Batterie können Akkus, wenn sie entladen sind, wieder mit Strom aufgeladen werden, wodurch sie wiederverwendbar sind. Folglich wäre „Akku“ die alleinig zutreffende Bezeichnung für den elektrochemischen Speicher im Fahrzeug. Diese Unterscheidung wird jedoch in der englischsprachigen Welt nicht gemacht. Hier wird nur das Wort „battery“ verwendet. Die entsprechenden Fahrzeuge werden als „battery electric vehicle“ bezeichnet. Aus diesem Grund hat sich die Bezeichnung „batterieelektrisches Fahrzeug“ in der Rückübersetzung in Deutschland durchgesetzt [8, S. 71]. Daher werden in dieser Arbeit die Begriffe „Batterie“ und „Akku“ synonym genutzt, wobei vorrangig die Bezeichnung „Batterie“ verwendet wird.

Das Ragone-Diagramm in der Abbildung 3.6 verdeutlicht, dass Lithium-Ionen-Batterien (LIB) im Vergleich zu anderen etablierten Batterietechnologien als die vielversprechendste Option für den Einsatz in Elektrofahrzeugen gelten, da sie sowohl eine hohe Leistungsdichte als auch eine hohe Energiedichte aufweisen. Dennoch wird kontinuierlich an der Weiterentwicklung der Lithium-Technologie geforscht, um die Speicherkapazität der Batterien und damit die Reichweite von Elektrofahrzeugen weiter zu erhöhen. Durch die Variation der Anoden- und Kathodenmaterialien sowie durch die Erforschung potenzieller Alternativen zur Lithium-Ionen-Batterie kann eine Reichweitenverbesserung erzielt werden. Da in dieser Arbeit jedoch nur die Grundlagen der E-Fahrzeug-Batterie behandelt werden, wird die chemische Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Batterie nicht näher erläutert.

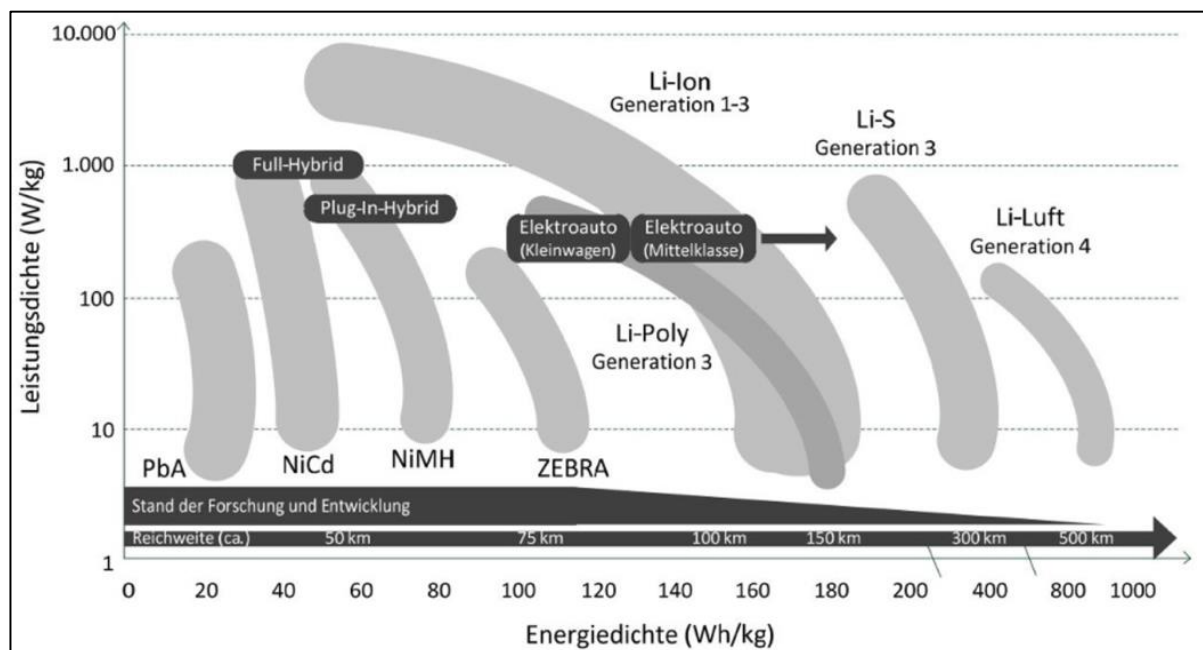


Abbildung 3.6: Vergleich der Batterietechnologien im Ragone-Diagramm [9, S. 10]

In den folgenden Unterkapiteln werden der Aufbau und die Funktionsweise der LIB erläutert. Im Anschluss werden die gängigen Batteriezellformate vorgestellt. Abschließend wird die Integration der Batterie ins Fahrzeug thematisiert.

3.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Die Lithium-Ionen-Batterie besteht aus einer Verschaltung einzelner Lithium-Ionen-Zellen, wobei jede Zelle eine positive Elektrode (Kathode) und eine negative Elektrode (Anode) enthält. Der Ladungsaustausch zwischen den Elektroden wird durch einen Elektrolyten ermöglicht, der sich zwischen Kathode und Anode befindet. Zur Vermeidung von Kurzschlüssen werden die Elektroden durch einen Separator getrennt, der den Durchfluss von Li-Ionen ermöglicht, aber den Durchfluss von Elektronen blockiert.

Lithium, welches das leichteste aller Metalle ist, wird als Kathodenmaterial in den heutigen LIB eingesetzt, da es das Element mit dem niedrigsten elektrischen Potential von $-3,04\text{ V}$ ist. Es wird in Form von metallischem Lithium in verschiedenen Legierungen verwendet. Grafit, mit einem elektrischen Potential von $+0,75\text{ V}$, wird als Anodenmaterial verwendet. Durch die Differenz der Potentiale ergibt sich, je nach Legierungszusammensetzung, eine Zellspannung von $3,0$ bis $4,2\text{ V}$ [10, S. 147].

Um zu verstehen, wie eine LIB funktioniert, wird in den folgenden Schritten der Entladevorgang einer Li-Ionen-Zelle erläutert [10, S. 148]:

1. Transport der Li-Ionen von der Anode in Richtung der Grenzschicht (SEI) zum Elektrolyten. Dabei wird ein Elektron von der Anode abgetrennt.
2. Das Li-Ion löst sich aus der Gitterstruktur der Anode und tritt in den Elektrolyten über.
3. Das freigesetzte Elektron bewegt sich durch die Anode zurück zur dahinter liegenden Ableitfolie (Kollektor) aus Kupfer (Cu).
4. Das Elektron bewegt sich durch die äußere elektrische Verbindung zur Kathode, wodurch ein elektrischer Stromfluss erzeugt wird.
5. Auf der Seite der Kathode erfolgt gleichzeitig der Transport von Elektronen vom Stromabnehmer (Al-Kollektor) in das Metalloxid (LiMO_2).
6. Währenddessen wandern die Lithium-Ionen durch den Elektrolyten und den Separator bis zur Grenzschicht an der Oberfläche der Kathode.
7. Die Lithium-Ionen werden in das Metallgitter der Kathode interkaliert (eingelagert), wobei es zu einer Ladungsreaktion kommt und die Elektronen von der Metallverbindung der positiven Elektrode aufgenommen werden.

Die folgende Abbildung 3.7 dient zur Veranschaulichung des Aufbaus und der Funktionsweise einer Li-Ionen-Zelle beim Entladevorgang.

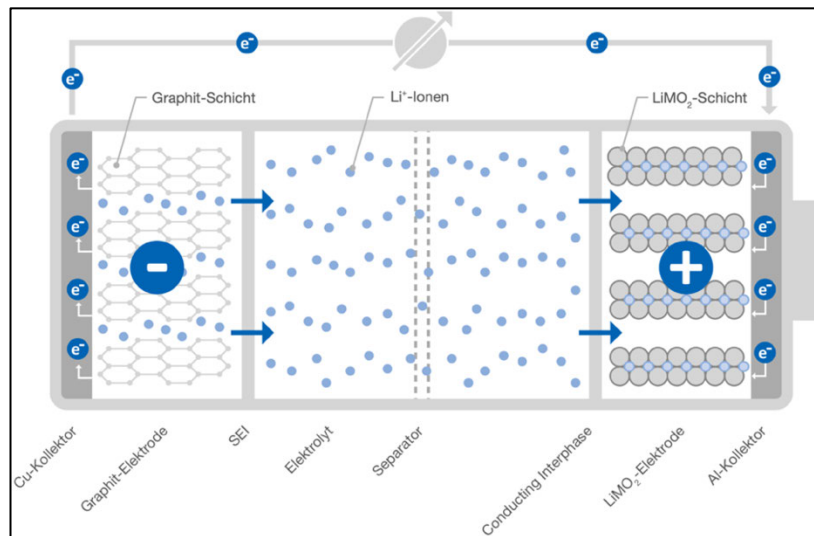


Abbildung 3.7: schematischer Aufbau einer Li-Ionen-Zelle beim Entladevorgang [11, S. 3]

3.2.2 Batteriezellformate

Die Lithium-Ionen-Batterie ist in drei verschiedenen Zellformaten erhältlich. Jedes der drei verfügbaren Zellformate hat spezifische Vor- und Nachteile, die es für bestimmte Anwendungen besser geeignet machen als die anderen Formate. In diesem Unterkapitel werden die drei Batteriezellformate für LIB vorgestellt und miteinander verglichen, um ihre jeweiligen Vor- und Nachteile aufzuzeigen.

Die Rundzelle

Die Rundzelle ist die am weitesten verbreitete Form der Batterie und hat sich seit vielen Jahren in der Konsumelektronik bewährt, beispielsweise bei Fernbedienungen, Taschenlampen, Spielzeugen und anderen Geräten. Die Abbildung 3.8 zeigt den Aufbau einer Rundzelle.

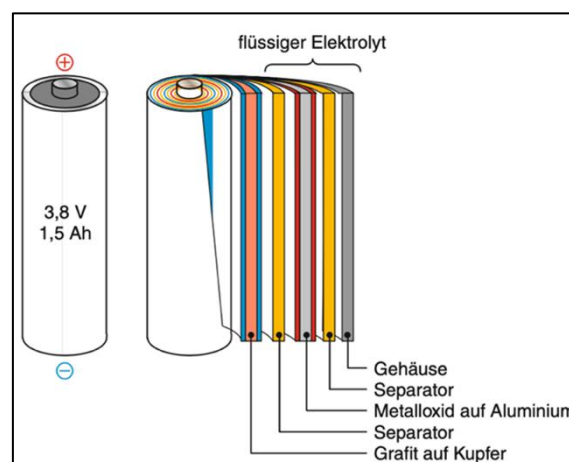


Abbildung 3.8: Aufbau der Rundzelle [12, S. 225]

Bei diesem Format der Batteriezelle ist die Zellchemie in einem runden, metallischen Gehäuse untergebracht, wodurch eine hohe mechanische Stabilität gewährleistet ist. Die Bauform hat jedoch den Nachteil, dass die Wärmeabfuhr schlechter ist, was zu Problemen bei erhöhter Belastung und Temperatur führen kann. Die Rundzelle ist entlang ihrer zylindrischen Achse hohl, um eine Ausdehnung nach außen bei Erwärmung zu verhindern. Stattdessen ermöglicht dieser Hohlraum ein „atmen“ der Batterie nach innen [11, S. 16].

Die Rundzelle ist in drei verschiedenen Bautypen erhältlich: Typ 1865, Typ 2170 und Typ 4680. Die ersten beiden Ziffern in der Bezeichnung beziehen sich auf den Durchmesser der Zelle, während die letzten beiden Ziffern deren Höhe in Millimetern angeben. Die drei Rundzellentypen sind in der folgenden Abbildung 3.9 dargestellt.



Abbildung 3.9: Vergleich der drei Rundzellentypen [13]

Die Grundidee des Typs 4680 besteht darin, dass mit einer Erhöhung des Volumens die Energiedichte und somit die Reichweite der Batterie gesteigert werden kann. Das Volumen einer zylindrischen Zelle wird nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$V = \frac{\pi}{4} * d^2 * h \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Durch Einsetzen der jeweiligen Durchmesser und Höhen ergeben sich folgende Volumina für die jeweiligen Zelltypen:

- Typ 1865 $\rightarrow V_{1865} = 16,54 \text{ cm}^3$
- Typ 2170 $\rightarrow V_{2170} = 24,25 \text{ cm}^3$, Erhöhung um 46,61% zur 1865-Zelle
- Typ 4680 $\rightarrow V_{4680} = 132,95 \text{ cm}^3$, Erhöhung um 448,25% zur 2170-Zelle

Durch die Volumenerhöhung von 448,25 % im Vergleich zum Typ 2170 kann der Typ 4680 etwa fünfmal so viel Energie speichern. Durch diese Steigerung der Energiedichte soll eine erhebliche Erhöhung der Reichweite erreicht werden.

Die prismatische Zelle

Ein weiteres Zellformat für LIB ist die prismatische Zelle, die ähnlich aufgebaut ist wie die Rundzelle. Allerdings werden bei diesem Format die einzelnen Komponenten der Zelle nicht rund, sondern flach gewickelt und in ein festes, prismatisches Gehäuse verpackt. Dank ihrer rechteckigen und flachen Form sind die Volumenausnutzung und Wärmeabfuhr bei der prismatischen Zelle besser als bei der Rundzelle. Ein großer Nachteil ist jedoch die aufwendige Herstellung und der Zusammenbau der Zelle [11, S. 17]. Erwähnenswert ist, dass bei der prismatischen Zelle die Elektrodenpole auf der gleichen Seite liegen und nicht wie bei der Rundzelle gegenüber voneinander angeordnet sind. Der entscheidende Vorteil der prismatischen Zelle gegenüber der Rundzelle liegt darin, dass eine effizientere Nutzung des Bauraums ermöglicht wird. Ansonsten gibt es nur geringfügige Unterschiede zwischen den beiden Zellformaten. Die Abbildung 3.10 zeigt den Aufbau der prismatischen Zelle.

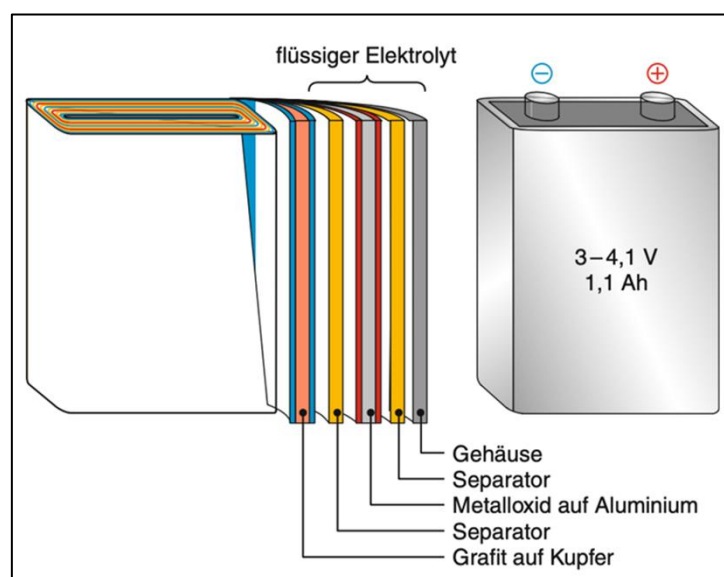


Abbildung 3.10: Aufbau der prismatischen Zelle [12, S. 225]

Die Pouch-Zelle

Die Pouch-Zelle, auch bekannt als „Coffee-Bag-Zelle“, ist eine abgewandelte Form der prismatischen Zelle. Statt eines massiven Gehäuses aus Aluminium oder Stahl wird bei der Pouch-Zelle eine dünne Aluminiumfolie mit einer Kunststoffbeschichtung verwendet, die eine Dicke von etwa 150 µm aufweist [14, S. 296]. Die Pouch-Zellen setzen sich aus mehreren rechteckigen Schichten von negativen und positiven Elektroden, Ableitfolien und Separatoren zusammen, die wie ein Sandwich geschichtet werden. Im Gegensatz zu Rundzellen erhöht sich dadurch bei gleichem Spannungsniveau die Kapazität bzw. der Energieinhalt. In der Regel werden die Elektroden zu einer Seite geführt, während die Abdichtung durch verschweißte Metallfolien erfolgt [10, S. 168]. Die Abbildung 3.11 zeigt den Aufbau der Pouch-Zelle.

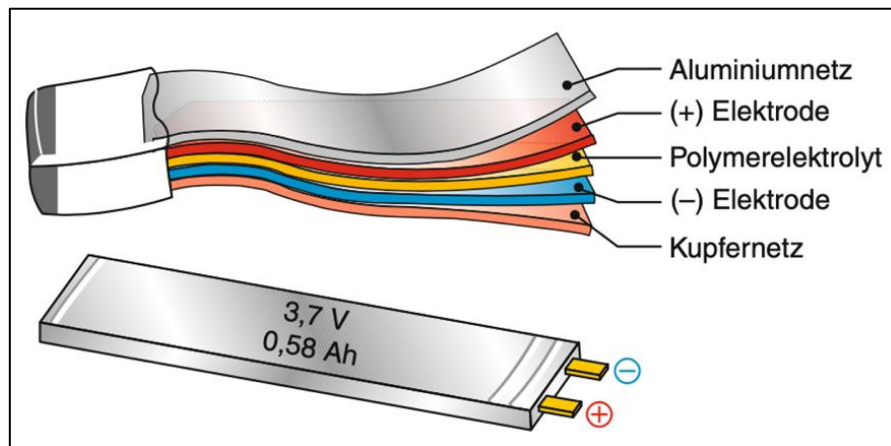


Abbildung 3.11: Aufbau der Pouch-Zelle [12, S. 225]

Die Pouch-Zelle bietet den Vorteil einer geringeren Masse des Gehäuses im Vergleich zur prismatischen Bauform, da auf ein festes Metallgehäuse verzichtet wird. Aufgrund der geringeren Gehäusemasse lässt sich die Zelle zudem leichter kühlen, da die Wärmekapazität des Gehäuses geringer ist. Allerdings ist die geringere mechanische Robustheit aufgrund der Aluminiumfolientasche ein Nachteil dieser Bauform [14, S. 296].

In der folgenden Tabelle 3.1 werden die drei Batteriezellformate im Hinblick auf die wichtigsten Kategorien für Elektrofahrzeuge miteinander verglichen.

Tabelle 3.1: Vergleich der drei Batteriezellformate für BEVs [15]

Zellformat	Energiedichte	Lebensdauer	Gehäuse	Abmessungen	Festigkeit	Thermische Regulierung
Rundzelle	++	+	hart	-	++	-
prismatische Zelle	+	+	hart	+	+	0
Pouch-Zelle	++	+	weich	++	-	++

Zum Abschluss ist anzumerken, dass bislang kein einziges Zellformat dauerhaft dominiert hat. Vielmehr setzen die Automobilhersteller je nach Fahrzeugmodell unterschiedliche Batteriezellformate in ihren Elektrofahrzeugen ein.

3.2.3 Integration der Batterie ins Fahrzeug

Um ein Batteriesystem für ein BEV zusammenzustellen, gibt es mehrere Ansätze. Dazu zählen insbesondere die modulare Bauweise, die Cell2Pack-Technologie sowie die sich noch in der Entwicklung befindliche Cell2Chassis-Technologie. In den folgenden Abschnitten werden die Bauweisen näher erläutert.

Die modulare Bauweise

Die modulare Bauweise des Batteriesystems umfasst das Zusammenführen einzelner Batteriezellen zu einem sog. „Modul“, das ein Zell-Kontrollsystem enthält. Diese Module werden in einem Rahmen untergebracht und zu einem Batteriesystem verschaltet. Abhängig von der Fahrzeugleistung kann die Kühlung entweder durch Luft oder Wasser erfolgen. Um die Batterie vor äußeren Schäden zu schützen, wird ein Unterfahrschutz verwendet. Die Abbildung 3.12 zeigt die modulare Bauweise anhand des Audi RS e-tron GT.

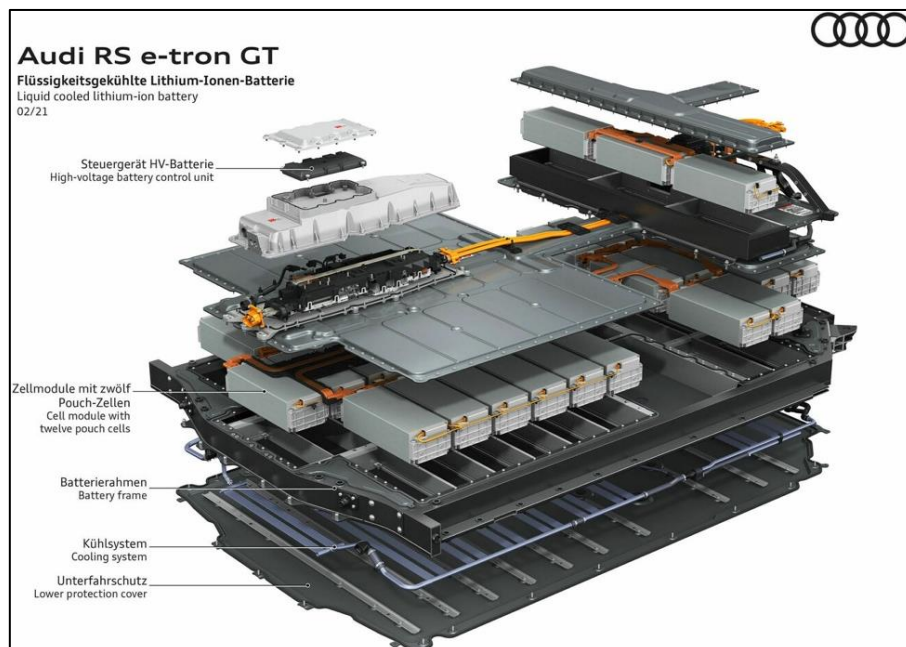


Abbildung 3.12: modulare Bauform der Traktionsbatterie [16]

Die Cell2Pack-Bauweise

Bei der Cell2Pack-Technologie werden Batteriezellen direkt in das Batteriegehäuse integriert, ohne separate Module zu verwenden. Die Zellen sind direkt miteinander verbunden, was zu einer besseren Raumausnutzung und höheren Energiedichte führt, da das Gewicht der Modulgehäuse und Befestigungselemente entfällt. Ein großer Nachteil dieser Technologie ist, dass bei einem Defekt der Batterie das gesamte Batteriesystem ausgetauscht werden muss. Im Gegensatz dazu genügt bei der modularen Bauform der Austausch des defekten Moduls. Die Abbildung 3.13 zeigt die Cell2Pack-Technologie am Beispiel des „Tesla Model Y“, während Abbildung 3.14 die Unterschiede zwischen den verschiedenen Batteriesystem-Bauweisen veranschaulicht.



Abbildung 3.13: Cell2Pack Bauform der Traktionsbatterie [17]

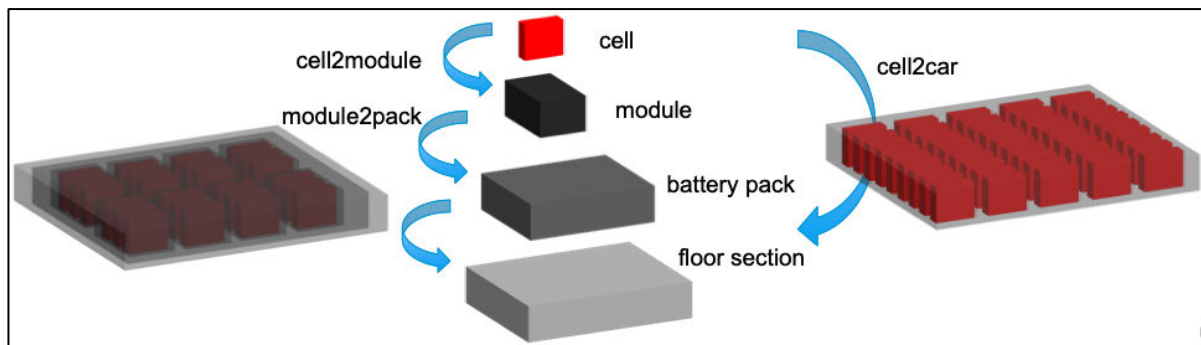


Abbildung 3.14: Bauformen von Batteriesystemen [3, S. 28]

Die Cell2Chassis-Bauweise

Eine vielversprechende Möglichkeit zur weiteren Erhöhung der Reichweite und Verringerung des Stromverbrauchs von Elektrofahrzeugen ist die Cell2Chassis-Technologie, bei der Batteriezellen direkt in die Fahrzeugstruktur oder das Fahrwerk eingebaut werden [18]. Diese Technologie befindet sich derzeit noch in der Entwicklungsphase. Trotz der Vorteile, wie besserer Raumausnutzung und erhöhter Reichweite, gibt es Nachteile. Dazu gehören eingeschränkte Reparatur- und Austauschmöglichkeiten im Vergleich zur Cell2Pack-Technologie sowie potenzielle Sicherheitsrisiken bei Unfällen.

In der folgenden Tabelle 3.2 werden die drei Batteriesysteme im Hinblick auf die wichtigsten Kategorien für Elektrofahrzeuge verglichen.

Tabelle 3.2: Vergleich der drei Batteriesysteme

Batteriesystem	Energiedichte	Sicherheit	Austauschbarkeit	Kühlung	Gewicht	Kosten
modular	0	++	++	++	-	-
Cell2Pack	+	+	0	+	+	+
Cell2Chassis	++	0	-	0	++	++

3.3 Grundlagen der Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode ist ein numerisches Verfahren, welches in vielen Bereichen des Ingenieurwesens Anwendung findet. Durch die rasante Weiterentwicklung der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) können physikalische Vorgänge, die früher nur durch Versuche oder aufwendige händische Berechnungen nachvollzogen werden konnten, nun auf einem Rechner simuliert werden [19, S. 3]. Die FEM ermöglicht Frontloading, wodurch bereits in einer frühen Entwicklungsphase die wesentlichen Grundstrukturen eines Produkts mithilfe virtueller Modelle simuliert, analysiert, optimiert und festgelegt werden können. Hierfür werden dem Rechner die relevanten Eingabedaten wie die Geometrie des Bauteils, Materialeigenschaften, einwirkenden Kräfte und Randbedingungen übermittelt. Anhand dieser Daten simuliert der Rechner physikalische Größen wie Verformungen, Spannungen und Dehnungen, wodurch Rückschlüsse auf die Steifigkeit der Struktur gezogen werden können.

Um eine Finite-Elemente-Analyse durchzuführen, wird das CAD-Modell in eine endliche (finite) Anzahl von Teilen bzw. Elementen zerlegt. Diese Diskretisierung erzeugt das FE-Mesh (FE-Netz). Die Modellierung, auch „Pre-processing“ (dt. Vorverarbeitungsphase) genannt, wird durch die Festlegung der Geometrie, des Materials, der Randbedingungen und der einwirkenden Lasten abgeschlossen. Der „Solver“ (dt. Löser) übernimmt die Berechnung, indem er zunächst die Steifigkeitsmatrizen der einzelnen Elemente erstellt. Diese einzelnen Steifigkeitsmatrizen werden daraufhin zu einer Gesamtsteifigkeitsmatrix summiert, die die Koeffizientenmatrix eines Gleichungssystems bildet. Dessen Lösung liefert die gesuchten Unbekannten. Aus den berechneten Verformungen werden anschließend die Spannungen, Dehnungen und andere physikalische Größen bestimmt. Die Ergebnisse der Berechnung werden im „Post-processing“ (dt. Nachverarbeitungsphase) grafisch dargestellt [19, S. 3-5]. Durch die farbliche Unterteilung (blau = gering, rot = hoch) können kritische Stellen identifiziert und entsprechend optimiert werden. Die Abbildung 3.15 veranschaulicht die Schritte bei der Anwendung der FEM, während die Abbildung 3.16 die farbliche Unterteilung anhand eines Beispiels aufzeigt.

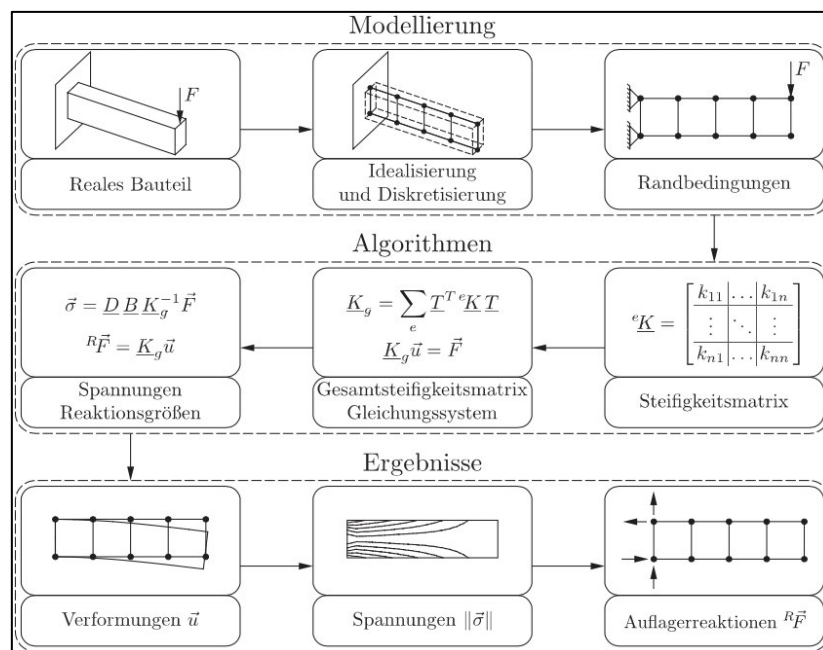


Abbildung 3.15: Schritte bei der Anwendung der FEM [19, S. 4]

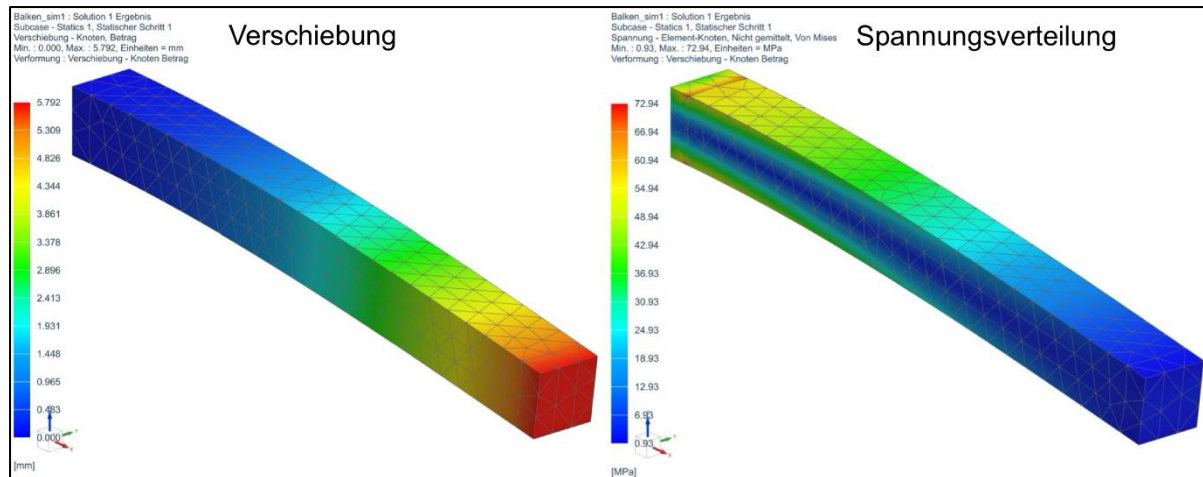


Abbildung 3.16: farbliche Unterteilung der FEM anhand eines Beispiels

Für das FE-Netz legt der Benutzer des FEM-Programms den Elementtyp fest. Dabei kann zwischen 1D-Stabelementen, 2D-Flächenelementen und 3D-Volumenelementen gewählt werden. Die 1D-Stabelemente finden Anwendung bei der Untersuchung von Modellen, die aus nur zwei Knoten bestehen, wie beispielsweise Balkenelemente. Der Einsatz dieser Elemente eignet sich für die Analyse von Strukturen in der frühen Entwicklungsphase, die oft komplex zu modellieren sind. Mit diesen Elementen lässt sich die Körperdynamik früh bewerten, ohne dass die gesamte Geometrie des Produkts bereits vollendet sein muss [4].

Die 2D-Flächenelemente, die auch als Schalenelemente bekannt sind, eignen sich besonders für dünne Strukturen mit konstanten Wanddicken, da sie Belastungen in Ebenen- und Querrichtung aufnehmen. Hierbei werden Membran-, Schub- und Biegeeffekte berücksichtigt. Bei der Verwendung von Schalenelementen ist es wichtig zu beachten, dass die Elementeneigenschaften die Dicke des Schalenelements festlegen. Diese Dicke wird dann vom Solver zur Berechnung von Spannungen, Verformungen und anderen physikalischen Größen herangezogen. Insbesondere im Fahrzeugbau, in der Luft- und Raumfahrttechnik und im Bauingenieurwesen werden 2D-Schalenelemente genutzt [20, S. 110].

Die 3D-Volumenelemente werden bei massiven und komplexen Geometrien eingesetzt. Sie bieten eine hohe Genauigkeit bei den Berechnungen, jedoch verlängert sich die Berechnungszeit erheblich. Aus diesem Grund werden sie häufig bei bereits bestehenden Strukturen verwendet, um in der Entwicklungsphase Zeit zu sparen. Um einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungszeit einzugehen, werden für die meisten Anwendungen 2D-Schalenelemente statt 3D-Volumenelemente verwendet.

Die Auswahl des Elementtyps und die Größe der einzelnen Elemente hängt stark von der gewünschten Genauigkeit der Ergebnisse ab. Je feiner das Netz gewählt wird, desto genauer ist das Ergebnis. Dies führt jedoch zu einer längeren Berechnungszeit. In der folgenden Abbildung 3.17 sind die drei möglichen Elementtypen dargestellt.

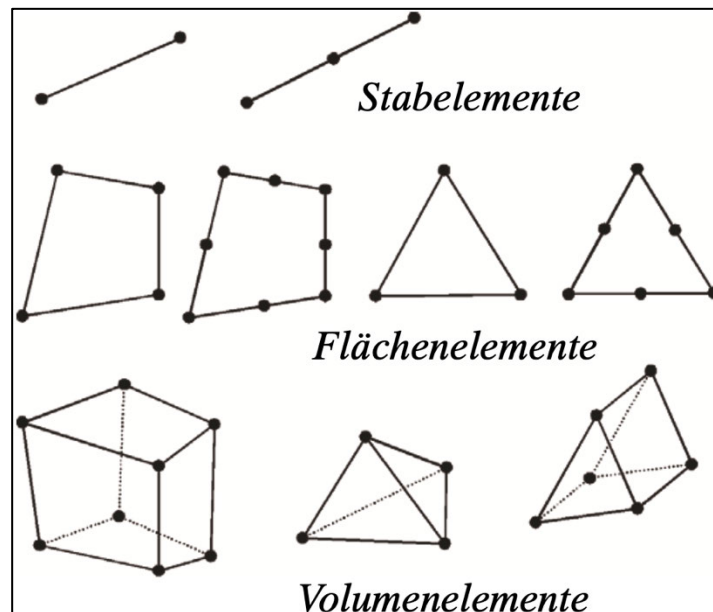


Abbildung 3.17: Elementtypen [21, S. 6]

Die schwarzen Punkte der Elemente, die als Knoten bezeichnet werden, sind die Stellen, an denen die Freiheitsgrade definiert sind und an denen die einwirkenden Lasten und Randbedingungen angelegt werden. Die Verschiebung der einzelnen Elemente wird anhand dieser Knoten berechnet. Um die Genauigkeit des Netzes zu erhöhen, können zusätzliche Knoten zwischen zwei Eckknoten eingefügt werden [19, S. 5]. Diese Verfeinerung des Netzes führt ebenfalls zu einer erhöhten Berechnungszeit.

Bei der Verwendung von FEM-Programmen ist darauf zu achten, dass das CAD-Modell möglichst wenige Verrundungen, Radien oder kleine Bohrungen enthält. Solche Verrundungen führen zu einem komplexeren Netz, was sowohl die Berechnungszeit verlängert als auch die Fehleranfälligkeit erhöht. Zu diesem Zweck bieten verschiedene FEM-Programme Befehle an, mit denen ein sog. „idealisiertes Teil“ erzeugt werden kann. Dadurch kann die Geometrie des Bauteils vereinfacht werden, ohne die ursprüngliche Geometrie zu verändern [22].

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass Bauteile aus unterschiedlichen Materialien korrekt miteinander vernetzt werden müssen. Dafür stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Zum einen kann der Kontakt durch Kontaktelemente zwischen den Knoten der Bauteile realisiert werden und zum anderen können die Bauteile an ihren gemeinsamen Knoten ideal miteinander verschweißt werden. Die Entscheidung zwischen diesen beiden Ansätzen hängt von der angestrebten Berechnungszeit und dem gewünschten Ergebnis bzw. der Genauigkeit ab.

4 Aufbau des Modells in Siemens-NX

In dem folgenden Kapitel wird der Aufbau des Modells im CAD-Programm „Siemens-NX“ (kurz NX) ausführlich erläutert. Zunächst werden das Referenzfahrzeug und die Referenzbatterie des „HCC21“ vorgestellt. Daraufhin werden die Anforderungen an das Modell sowie die während der Modellierung vorgenommenen Vereinfachungen erläutert. Im Anschluss folgt eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus, in der die systematische Vorgehensweise während des Modellierungsprozesses aufgezeigt wird.

4.1 Referenzfahrzeug Hamburg Concept Car 2021

Das "Hamburg Concept Car 2021" (HCC21 bzw. HCC) ist ein Konzeptfahrzeug der „HAW Hamburg“ und des Kooperationspartners „Karosserie Entwicklung Thurner“ (KET), das im Rahmen von Lehr- und Forschungsprojekten entwickelt wurde. Es fungiert sowohl als Showcar als auch als virtueller Prototyp eines elektrisch betriebenen und vollautomatisierten Fahrzeugs. An der Entwicklung des HCC sind über 350 Personen beteiligt, darunter mehrere Studierende, die im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten an dem Vorhaben mitgewirkt haben [23].

Für die Modellierung einer abstrahierten Fahrzeugkarosserie und eines Battery Packs wurden die CAD-Modelle des HCC-Rohbaus [24] und des HCC-Battery Packs [25] zur Verfügung gestellt, um als Basis und Inspirationsquelle zu dienen. In der Abbildung 4.1 ist der Rohbau des HCC zu sehen, während in Abbildung 4.2 das Battery Pack des HCC dargestellt ist.

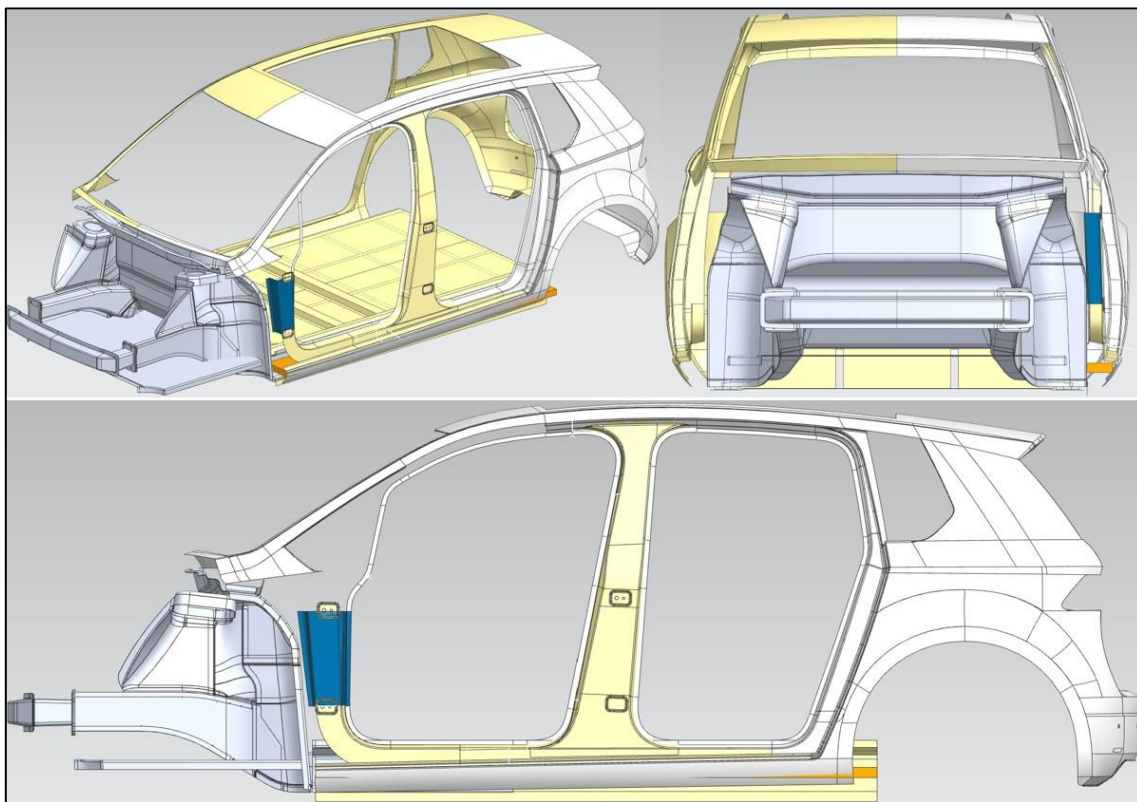


Abbildung 4.1: CAD-Modell des HCC-Rohbaus [24]

Der Rohbau des HCC gliedert sich in zwei Hauptbaugruppen: den "ZSB_Vorderwagen" und den "ZSB_RMitte". Dabei ist zu beachten, dass der Rohbau nicht ausschließlich aus Flächenkörpern besteht. Während die meisten Komponenten der Baugruppe "ZSB_RMitte" als Flächenkörper modelliert wurden, sind die Teile des Vorderwagens als Volumenkörper erstellt worden. Für die eigene Modellierung dient der Vorderwagen des HCC als Referenz. Dabei werden sowohl das Design als auch die geometrischen Abmessungen weitgehend übernommen, während darauf geachtet wird, dass alle Komponenten als Flächenkörper konstruiert werden. Da das Ziel dieser Arbeit die Modellierung einer abstrahierten Fahrzeugkarosserie ist, werden Rundungen und Sicken vernachlässigt, was zu einer kantigeren Form der Karosserie führt.

Das in der Abbildung 4.2 dargestellte Battery Pack des HCC stammt aus der Veröffentlichung „Ein nachhaltiges Battery Pack für das Hamburg Concept Car“ von der HAW Hamburg [25]. Diese Arbeit wurde von mehreren Studierenden im Rahmen des Moduls „Mechatronisches Design“ im Wintersemester 2022/2023 erstellt. Dieses Modell des Battery Packs dient ebenfalls als Referenz für die eigene Modellierung. Dabei ist wichtig zu beachten, dass dieses Battery Pack vollständig als Volumenkörper erstellt wurde. In der eigenen Modellierung werden sämtliche Komponenten als Flächenkörper umgesetzt, wobei das Design sowie die geometrischen Abmessungen im Wesentlichen beibehalten werden. Die Bauteile „Rücksitzbankbox“, „Kabelbaumträger“ und „Schütz“ werden jedoch nicht übernommen.

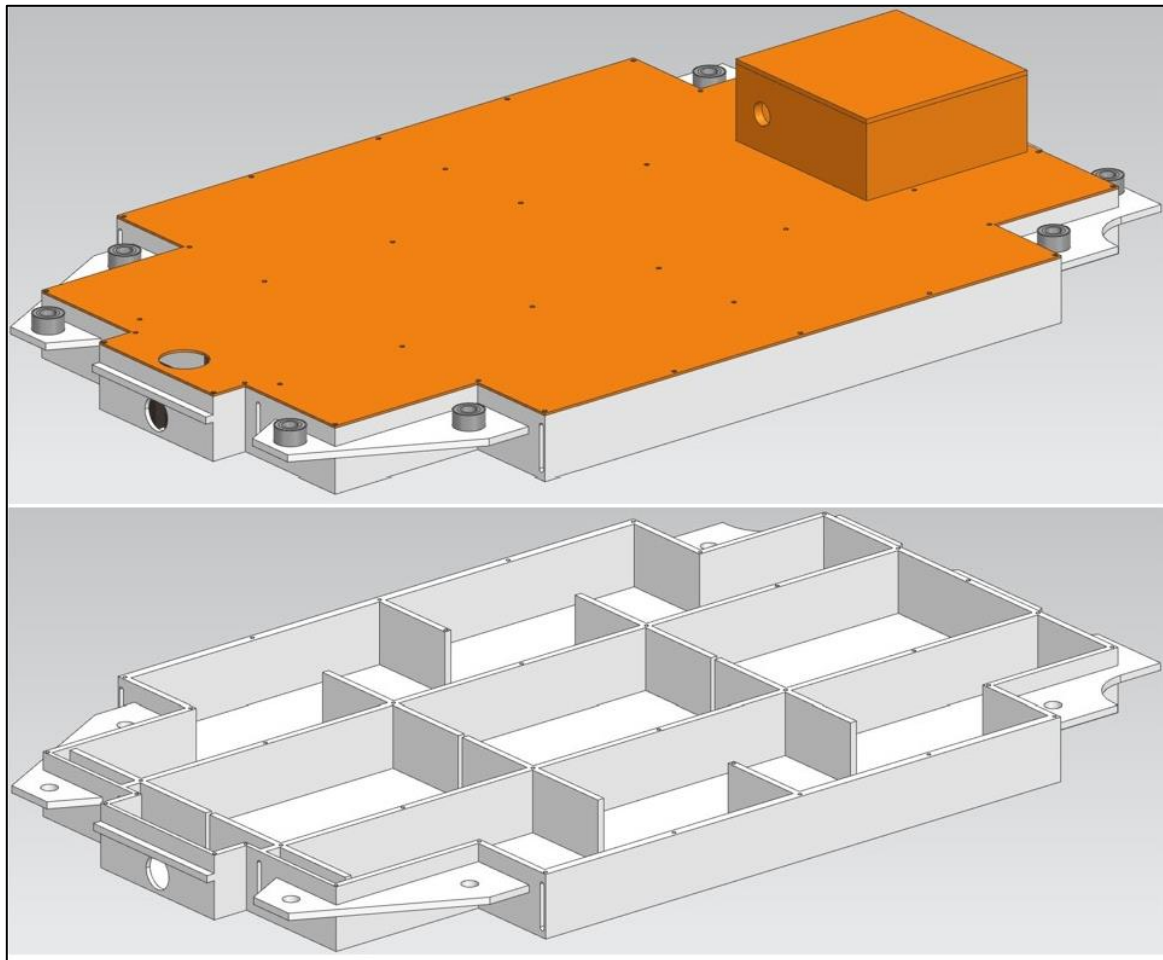


Abbildung 4.2: CAD-Modell des HCC-Battery Packs [25]

4.2 Anforderungen und vorgenommene Vereinfachungen

Vor Beginn der Modellierung werden die Anforderungen, die das Modell zu erfüllen hat, definiert. Zu diesen Anforderungen gehört, dass sowohl das Battery Pack als auch die Fahrzeugkarosserie aus Flächenelementen bestehen müssen. Die im Battery Pack integrierten prismatischen Batteriezellen werden zur Vereinfachung als Volumenkörper erstellt. Eine weitere Anforderung ist, dass die Fahrzeugkarosserie und das Battery Pack so modelliert werden, dass sie schlüssig ineinander übergehen. Es dürfen keine abstehenden oder hervorstehenden Flächen sowie Lücken vorhanden sein. Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass es keine überlappenden oder durchgehenden Flächen gibt. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die nachfolgende Nutzung des Modells wichtig, da das Überlappen oder Abstehen von Flächen bei der Verwendung von FEM-Programmen zu Fehlermeldungen führen kann und das Modell nicht richtig vernetzt wird. Hierfür wird bei der Modellierung darauf geachtet, dass die einzelnen Bauteile dort beginnen, wo das angrenzende Bauteil aufhört. Dadurch wird sichergestellt, dass zwischen den einzelnen Komponenten keine Abstände vorhanden sind. Dies sorgt dafür, dass in der grafischen Anzeige in NX die Körper so wirken, als würden sie ineinander liegen.

Da die Bauteile zwar grafisch ineinander liegen, jedoch nicht miteinander verbunden sind, ist es notwendig, eine Verbindung herzustellen. In NX steht hierfür der „Sew“-Befehl zur Verfügung, der Flächenkörper durch das Zusammenfügen gemeinsamer Kanten kombiniert. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass dieser Befehl nur innerhalb einer Baugruppe angewendet werden kann. Um zwei oder mehrere Baugruppen miteinander zu verbinden, muss die FEM-Umgebung verwendet werden. Hierfür bieten die verschiedenen FEM-Programme Befehle an, die das Verkleben oder Verschweißen von Kanten an Kanten sowie Kanten an Flächen ermöglichen. Daher werden die Bauteile, wo es möglich ist, mit dem „Sew“-Befehl verbunden. In Fällen, in denen dies nicht umsetzbar ist, wird darauf geachtet, dass zwischen den Kanten bzw. Flächen der Baugruppen keine Abstände vorhanden sind, um eine Verbindung in der FEM-Umgebung zu ermöglichen.

Da Flächenkörper keine Wandstärke besitzen, wird das Material der einzelnen Bauteile in der Konstruktionsumgebung nicht angegeben. Die Festlegung der Wandstärke sowie die Auswahl des Materials erfolgen ebenfalls in der FEM-Umgebung. Die prismatischen Batteriezellen, die als Volumenkörper modelliert werden, erhalten jedoch ein zugewiesenes Material. Im nachfolgenden Unterkapitel wird näher darauf eingegangen. Des Weiteren werden keine Parametrisierungen der Bauteile vorgenommen. Die geometrischen Abmessungen der einzelnen Bauteile entsprechen nahezu den Abmessungen des Referenzfahrzeugs und der Referenzbatterie. In nachfolgenden Arbeiten mit dem Modell können diese somit beliebig angepasst werden.

Das Hauptziel besteht darin, ein abstrahiertes Modell zu erstellen, weshalb der Ansatz „so grob wie möglich und so fein wie nötig“ verfolgt wird. Um Komplikationen bei der Modellierung zu vermeiden, wird beschlossen, Rundungen der Karosserie sowie Sicken zu vernachlässigen. Das Modell soll abstrahiert und kantig gestaltet werden, um die Berechnungszeit in der FEM-Umgebung zu reduzieren und potenzielle Fehlerquellen zu minimieren. Lediglich die drei Säulen der Karosserie (A-, B- und C-Säule) werden gekrümmt modelliert, um sicherzustellen, dass die Dachbreite von der Gesamtbreite des Fahrzeugs abweicht.

Die Tabelle 4.1 bietet einen Überblick über die Anforderungen an das Modell sowie über die während der Modellierung vorgenommenen Vereinfachungen.

Tabelle 4.1: Anforderungen und vorgenommene Vereinfachungen des Modells

Anforderungen	vorgenommene Vereinfachungen
→ Battery Pack und abstrahierte Karosserie aus 2D-Flächenelementen	→ prismatische Batteriezellen aus 3D-Volumenelementen
→ lückenloser Übergang zwischen den einzelnen Flächenkörpern	→ Bauteil B fängt da an wo Bauteil A aufhört
→ keine Überlappungen zwischen den einzelnen Flächenkörpern	→ Verbinden der Bauteile in der FEM-Umgebung, wenn in Konstruktionsumgebung nicht möglich
→ geometrische Abmessungen der Bauteile nahezu identisch zum HCC, keine Parametrisierung der Bauteile	→ Verrundungen und Sicken werden vernachlässigt, nur Säulen werden gekrümmt
→ keine Angabe von Wandstärken oder Materialien für Flächenkörper in Konstruktionsumgebung	→ prismatische Batteriezellen (Volumenkörper) bekommen Material zugewiesen

4.3 Beschreibung des Aufbaus

Im Verlauf des Studiums behandelt das Modul „CAD“ ausschließlich die Erstellung von Volumenmodellen, sodass es erforderlich war, die Flächenmodellierung selbstständig zu erlernen. Um sich mit den Befehlen der Flächenmodellierung in NX vertraut zu machen und einen grundlegenden Überblick über deren Anwendung zu erlangen, wurden verschiedene Videotutorials auf der Plattform „YouTube“ angesehen [26]. Im Anschluss daran wurden erste einfache Modelle erstellt, um praktische Übung zu erhalten. Nach dem Erwerb eines grundlegenden Verständnisses der Flächenmodellierung wurden erste Ideen aufgeschrieben und ein Strukturbaum erstellt, der die Zusammenbaugruppen (ZSB), Unterbaugruppen (UZSB) sowie die dazugehörigen Einzelteile (ET) umfasst. Dieser Strukturbaum wurde im Laufe der Modellierung angepasst, wenn z.B. neue Bauteile hinzugefügt oder nicht benötigte Bauteile entfernt wurden. Außerdem ist zu erwähnen, dass nach der Erstellung eines Bauteils stets der aktuelle Stand der Datei als Kopie gespeichert wurde, um im Falle eines fatalen Fehlers oder eines Datenverlusts abgesichert zu sein.

Das CAD-Modell mit dem Namen „Fahrzeugkarosserie_und_Battery_Pack“ ist in zwei Haupt-Zusammenbaugruppen gegliedert: „Battery_Pack“ und „Karosserie“. Die ZSB „Battery_Pack“ besteht aus insgesamt sechs Einzelteilen, wobei das ET „Batteriemodul“ 16-mal vorkommt. Hierfür wird ein Batteriemodul konstruiert, das anschließend vervielfältigt wird. Die Karosserie unterteilt sich in zwei Unterbaugruppen: den „Aufbau“, der aus drei ET besteht, und den „Unterbau“. Letzterer wird weiter in zwei UZSB aufgeteilt: den „Vorderwagen“ mit sechs ET und den „Unterboden“ mit drei ET. Insgesamt setzt sich das Modell aus sieben ZSB/UZSB und 33 ET zusammen. In der Abbildung 4.3 sind der Strukturbaum sowie die Namen der Einzelteile dargestellt.

Baugruppen-Navigator	
Beschreibender Teilename ▲	Anzahl
[-] Schnitte	
[-] Fahrzeugkarosserie_und_Battery_Pack (Reihenfolge: Ne...	40
[-] Battery_Pack	22
Batteriedeckel	
Schaumplatten	
Batteriemodul x 16	
Fachwerkstruktur	
Batterierahmen	
Schockdämpfer	
[-] Karosserie	17
Aufbau	4
Seitenwandrahmen	
Scheiben	
Heck	
Unterbau	12
Vorderwagen	7
Querträger	
Crashbox	
Prallplatte_Crashbox	
Längsträger	
Stirnwand	
Anbindung_Federbein	
Unterboden	4
Bodenblech	
Verbindungsblech_Schweller_zu_Batterierahmen	
Schweller	

Abbildung 4.3: Strukturbaum des Gesamtmodells

Die Modellierung beginnt mit dem Battery Pack, wobei das ET „Batteriemodul“ zuerst konstruiert wird. Dieses setzt sich aus den in der Abbildung 4.4 dargestellten fünf Komponenten (v.l.n.r.) zusammen: „prismatische_Batteriezele“, „Abstandsplatte“, „Kupferschiene“, „Slave“ und „Halterung“. Die geometrischen Abmessungen sowie das Design werden, wie bereits erwähnt, weitgehend von der Referenzbatterie übernommen.

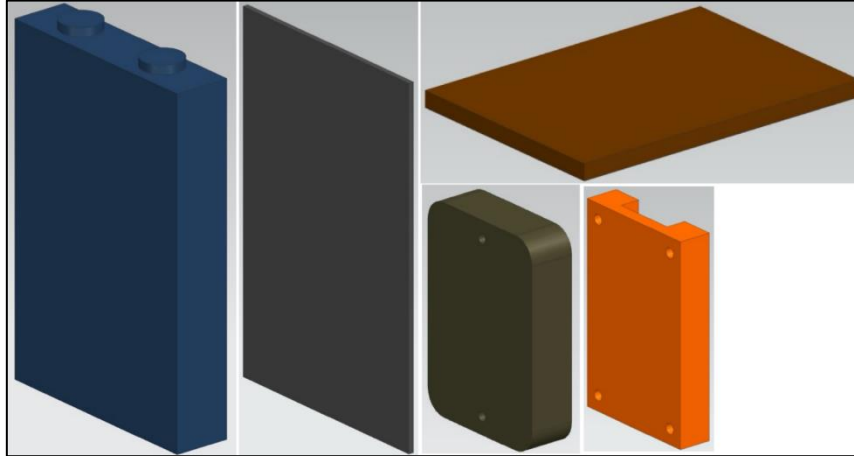


Abbildung 4.4: Komponenten des „Batteriemeduls“

Um ein Modul mit 16 Zellen zu konstruieren, werden die prismatische Batteriezele, die Abstandsplatte und die Kupferschiene vervielfältigt. Das dadurch entstehende Batteriemodul wird insgesamt 16-mal vervielfältigt und falls nötig gedreht, wodurch alle Module des Battery Packs erstellt werden. Da es sich bei den Batteriemodulen um Volumenkörper handelt und diese eine vorgegebene Wandstärke besitzen, werden feste Materialien zugewiesen, die bei der späteren Nutzung des Modells jederzeit angepasst werden können. Die Batteriezele, der Slave und die Halterung erhalten die Materialzuweisung „Aluminium_2014“. Die Abstandsplatten werden mit „Polypropylen“ ausgestattet, während die Kupferschienen das Material „Copper_C10100“ erhalten. In der Abbildung 4.5 sind ein Batteriemodul und alle 16 Batteriemodule dargestellt, wohingegen die Tabelle 4.2 die Materialwerte der aus der NX-Bibliothek verwendeten Materialien aufzeigt.

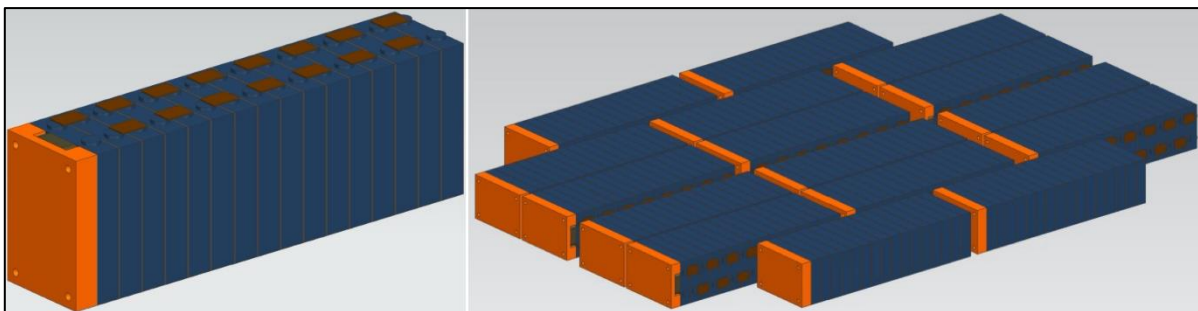


Abbildung 4.5: „Batteriemedul“ (l.) und alle 16 „Batteriemedule“ (r.)

Tabelle 4.2: Materialwerte aus der NX-Bibliothek

Material	Dichte [kg/dm ³]	E-Modul [N/mm ²]	Streckgrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]
Aluminium_2014	2,794	73119	393,7	441,5
Polypropylen	0,12	2000	31	/
Copper_C10100	8,92	114000	30	207

Nach der Erstellung des Batteriemoduls werden der „Batterierahmen“ und die „Fachwerkstruktur“ modelliert. Der Batterierahmen setzt sich aus zwei Formelementgruppen (FG) zusammen: „Batterierahmen_Rohteil“ und „Befestigungspunkte“. Letztere wird zudem in kleinere FG unterteilt. Das Design und die Abmessungen sind nahezu identisch mit denen der Referenzbatterie. Da die Befestigungspunkte keine gemeinsame Kante mit dem Rahmen besitzen und stattdessen an der Außenfläche des Rahmens angebracht werden, ist der Einsatz des „Sew“-Befehls nicht möglich. Hierfür muss in der FEM-Umgebung sichergestellt werden, dass die vier Befestigungspunkte an die Außenfläche des Rahmens verklebt bzw. verschweißt werden. In der folgenden Abbildung 4.6 ist der Batterierahmen abgebildet.

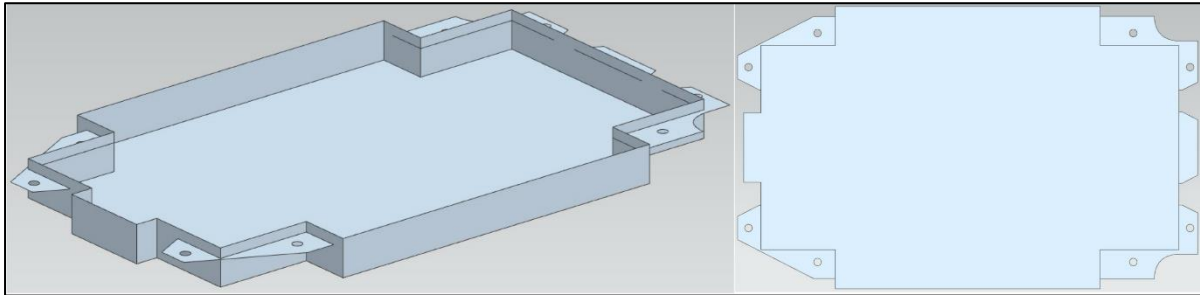


Abbildung 4.6: „Batterierahmen“

Um die Batteriemodule im Batterierahmen unterzubringen und zu fixieren, wird die in der Abbildung 4.7 dargestellte „Fachwerkstruktur“ erstellt. Hierfür wird die Fachwerkstruktur in vier Skizzen („oben“, „mitte“, „unten“ und „seitlich“) aufgeteilt, die anschließend als Flächenkörper einzeln extrudiert werden. Durch den Befehl „Extract Geometry“ werden alle Extrudes in einer assoziativen Kopie zusammengefasst. Da die Längsfläche immer in der Mitte der Querflächen endet, kann der „Sew“-Befehl zum Verbinden nicht verwendet werden. Stattdessen müssen die Funktionen der FEM-Umgebung zum Verbinden genutzt werden.

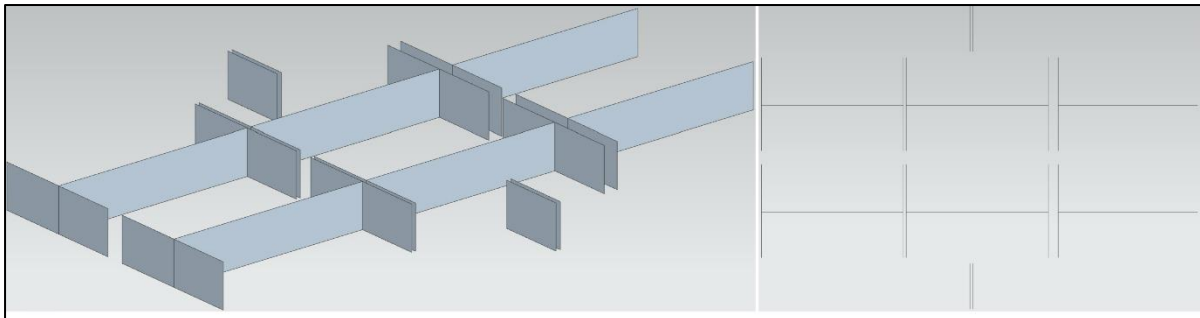


Abbildung 4.7: „Fachwerkstruktur“

Um dem Batterierahmen und der Fachwerkstruktur unterschiedliche Wandstärken zuweisen zu können, werden sie als zwei separate ET erstellt. Bei der Erstellung der Fachwerkstruktur wird darauf geachtet, dass eine Wandstärke von bis zu 10 mm realisiert werden kann, ohne dass die Fachwerkstruktur in die Batteriemodule hineinragt. Bei der Vervielfältigung der Batteriemodule wird ebenfalls für einen Abstand von 10 mm zwischen den Modulsträngen gesorgt. Für die Integration der Fachwerkstruktur in den Batterierahmen ist es notwendig, dass die beiden Komponenten durch die Funktionen der FEM-Umgebung miteinander verbunden werden. Die Abbildung 4.8 zeigt den Batterierahmen mit der Fachwerkstruktur und eine Darstellung mit integrierten Batteriemodulen.

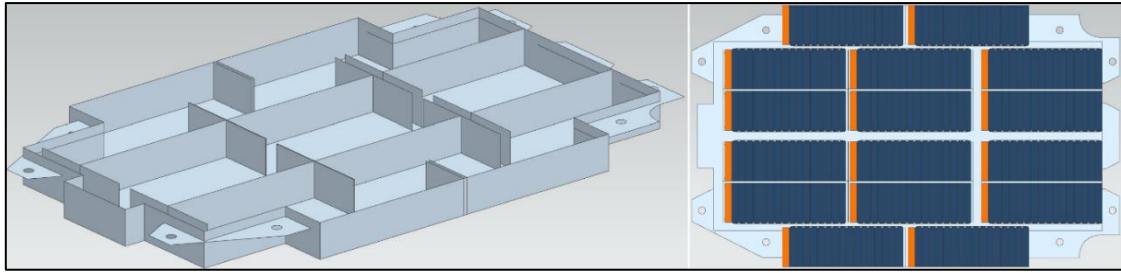


Abbildung 4.8: „Batterierahmen“ mit „Fachwerkstruktur“ und „Batteriemodulen“

Um das Battery Pack von oben zu verschließen, wird der „Batteriedeckel“ modelliert, der die gleiche Form wie der Batterierahmen aufweist. Hierfür wird das Profil des Batterierahmens nachskizziert, extrudiert und mit einer Abdeckfläche versehen. Abschließend werden der extrudierte Flächenkörper und die Abdeckfläche miteinander vernäht. Zwischen dem Batteriedeckel und den Batteriemodulen sind „Schaumplatten“ platziert. Für die Modellierung dieser Platten wird ein Sketch auf den 16 Batteriemodulen erstellt. Die daraus resultierenden 16 Rechtecke werden durch einzelne Flächen extrudiert. Mit dem Befehl „Extract Geometry“ werden alle Flächen in einer assoziativen Kopie zusammengefasst. Abschließend werden die „Schockdämpfer“ modelliert, die an den Bohrungen der Befestigungspunkte angebracht sind. In der Abbildung 4.9 sind die drei ET dargestellt, während die Abbildung 4.10 mehrere Ansichten der fertigen ZSB „Battery_Pack“ aufzeigt.

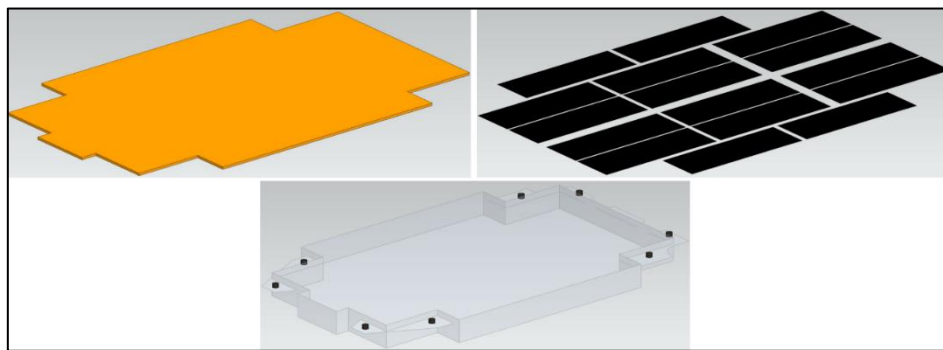


Abbildung 4.9: „Batteriedeckel“ (o.l.), „Schaumplatten“ (o.r.) und „Schockdämpfer“ (u.)

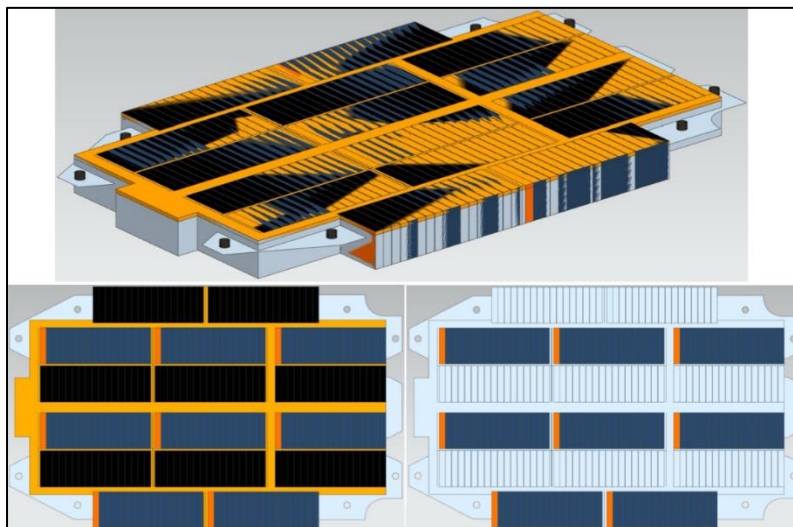


Abbildung 4.10: ZSB „Battery_Pack“

Die Modellierung der Karosserie beginnt mit dem UZSB „Vorderwagen“. Dieser wird in die in der Abbildung 4.11 aufgezeigten ET unterteilt.

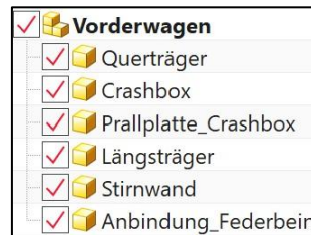


Abbildung 4.11: Strukturbaum der UZSB „Vorderwagen“

Der Vorderwagen ähnelt vom Design und von den geometrischen Abmessungen her dem des HCC-Rohbaus, mit der Änderung, dass alle Bauteile nicht verrundet, sondern kantiger dargestellt werden. Da NX beim Vernähen geschlossener Körper ein Volumenmodell generiert, die Bauteile jedoch als Flächen erstellt werden sollen, erfolgt die Konstruktion ausschließlich in Form von Hohlkörpern oder C-Profilen. Dafür wird ein Rechteckprofil skizziert, das als Fläche extrudiert wird. Die Stirnseite des Extrudes wird durch eine „Bounded Plane“ abgedeckt. Die Fläche des Extrudes und die Abdeckfläche werden miteinander vernäht. Um den Querträger bündig mit dem angrenzenden Bauteil verbinden zu können, wird eine Flanschfläche erstellt. Hierfür wird der „Law Extension“-Befehl von NX verwendet, der eine Erweiterung einer Basisfläche erzeugt. In Abbildung 4.12 ist der Querträger dargestellt.

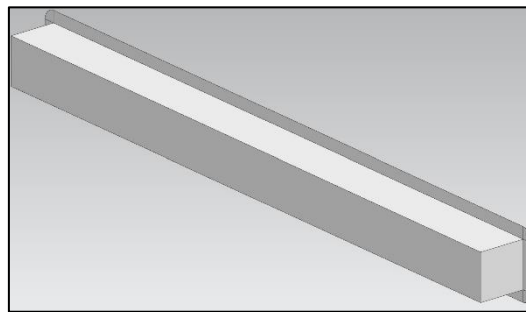


Abbildung 4.12: „Querträger“

Das zum Querträger angrenzende Bauteil ist die „Crashbox“. Diese wird als Hohlkörper konstruiert. Dazu wird ein Viereckprofil skizziert, das in Längsrichtung extrudiert wird. Um eine Kontaktfläche zum Querträger herzustellen, wird ebenfalls eine Flanschfläche erstellt. Da die Crashbox auf beiden Seiten des Vorderwagens vorhanden ist, wird sie um die Mittelebene gespiegelt. Die Abbildung 4.13 zeigt die Crashbox.

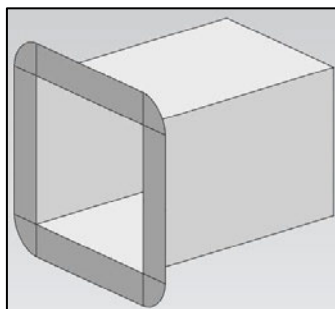


Abbildung 4.13: „Crashbox“

Im Anschluss an die Crashbox werden die „Prallplatte_Crashbox“ und der „Längsträger“ konstruiert. Die Prallplatte wird als dünnes C-Profil erstellt, während der Längsträger analog zur Crashbox als Hohlkörper ausgeführt wird. Beide Bauteile werden um die Mittelebene des Modells gespiegelt. Die folgende Abbildung 4.14 zeigt die beiden ET.

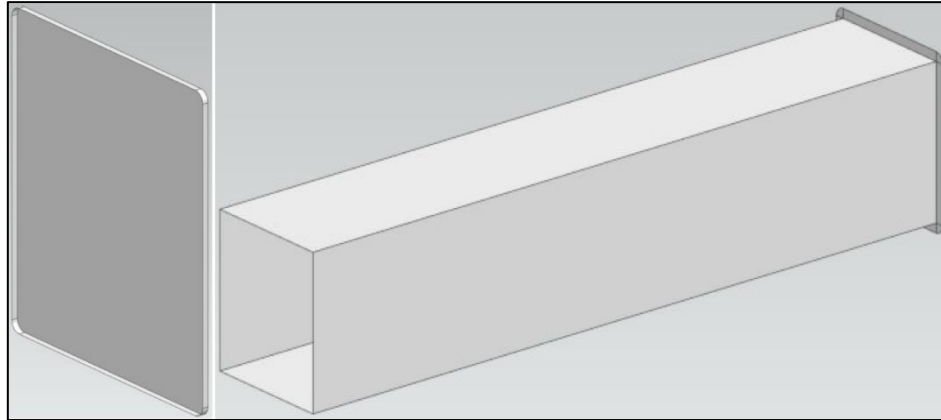


Abbildung 4.14: „Prallplatte_Crashbox“ (l.) und „Längsträger“ (r.)

Abschließend werden für den Vorderwagen die Komponenten „Anbindung_Federbein“ und „Stirnwand“ erstellt. Die Stirnwand wird als einfache, rechteckige Fläche modelliert, da Versuche, diese in runder Form darzustellen, zu Fehlermeldungen beim Aufdicken mit dem „Thicken“-Befehl führten. Um mögliche Komplikationen in der FEM-Umgebung zu vermeiden, wurde diese vereinfachte Darstellung gewählt. Die Komponente „Anbindung_Federbein“ wird am Ende des Längsträgers platziert und steht in Kontakt mit der Stirnwand. Der Aufbau dieses Bauteils unterteilt sich in zwei Formelementgruppen. Zunächst wird die „Anbindung_oben“ modelliert, gefolgt von der „Halterung“, die auf dem Längsträger sitzt. Auch dieses Bauteil wird entlang der Mittelebene gespiegelt, da es auf beiden Seiten des Vorderwagens vorhanden ist. In der folgenden Abbildung 4.15 wird die fertige UZSB „Vorderwagen“ aufgezeigt.

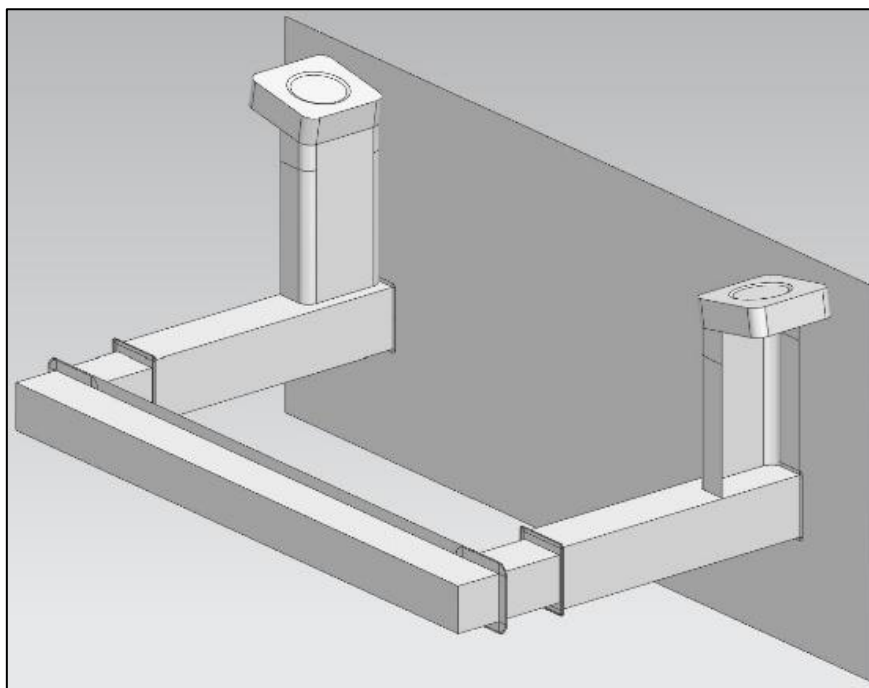


Abbildung 4.15: UZSB „Vorderwagen“

Zur Fertigstellung der ZSB „Unterbau“ wird als nächster Schritt die UZSB „Unterboden“ erstellt. Diese UZSB wird in die in der Abbildung 4.16 dargestellten ET unterteilt.



Abbildung 4.16: Strukturbaum der UZSB „Unterboden“

Für die Erstellung des „Bodenblechs“, das den Fahrzeugboden darstellt, wird ein C-Profil skizziert, das in Längsrichtung des Fahrzeugs extrudiert wird. An den Seiten des Bodenblechs befindet sich der „Schweller“. Hierfür wird ebenfalls ein Profil skizziert, welches in Längsrichtung des Fahrzeugs als Flächenkörper extrudiert wird. Um das Battery Pack im Unterboden einbauen zu können, werden „Verbindungsbleche“ konstruiert. Diese werden zur Vereinfachung als L-Profile gestaltet, wobei eine Seite an dem Schweller montiert wird und die andere Seite mit einer Bohrung an dem Stoßdämpfer des Battery Packs verschraubt wird. Die folgenden Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18 zeigen die drei ET des Unterbodens sowie eine Ansicht, in der das Battery Pack am Unterboden montiert ist.

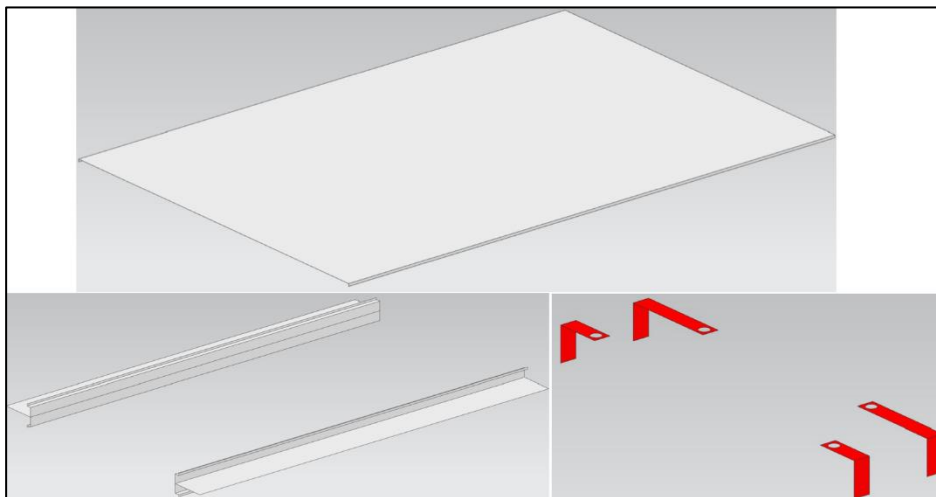


Abbildung 4.17: „Bodenblech“ (o.), „Schweller“ (u.l.) und „Verbindungsbleche“ (u.r.)

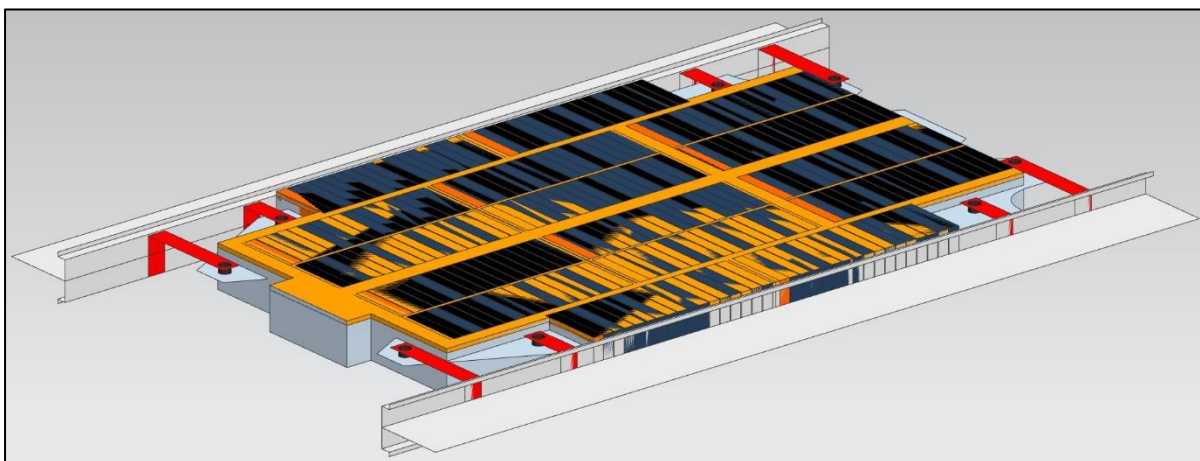


Abbildung 4.18: „Battery_Pack“ verbunden mit „Unterboden“ (ohne „Bodenblech“)

Als letztes wird der schwierigste Teil der Karosserie, der "Aufbau", modelliert. Dieser setzt sich aus den in der Abbildung 4.19 dargestellten Einzelteilen zusammen, wobei das ET "Seitenwandrahmen" mehrere Komponenten umfasst.



Abbildung 4.19: Strukturbaum der UZSB „Aufbau“

Die wichtigste Baugruppe des Aufbaus ist der „Seitenwandrahmen“. Dieser umfasst die einzelnen Säulen der Karosserie, den Rahmenboden sowie das Dach. Bei der Modellierung des Seitenwandrahmens wird darauf geachtet, dass alle Komponenten – mit Ausnahme des Daches – als C-Profile erstellt werden. Dabei wird darauf geachtet, dass die geöffnete Seite der C-Profile stets nach innen zeigt. In der Abbildung 4.20 sind die einzelnen Formelementgruppen des Seitenwandrahmens dargestellt.



Abbildung 4.20: Komponenten des „Seitenwandrahmens“

Zu Beginn wird der "Rahmen_Boden" konstruiert. Hierzu wird eine Skizze angefertigt, die den Unterboden umschließt, sodass die Außenkante des Bodenblechs exakt an der Innenkante des Rahmens anliegt. Diese Anordnung ermöglicht es, die beiden Komponenten in der FEM-Umgebung miteinander zu verbinden. Die Skizze wird anschließend extrudiert und mit einer Abdeckfläche versehen. Die beiden Flächenkörper werden an ihrer gemeinsamen Kante miteinander vernäht. Mithilfe des Befehls „Extract Geometry“ wird eine assoziative Kopie des Rahmenbodens erstellt. Die Abbildung 4.21 zeigt den Rahmenboden mit dem transparenten Unterboden.

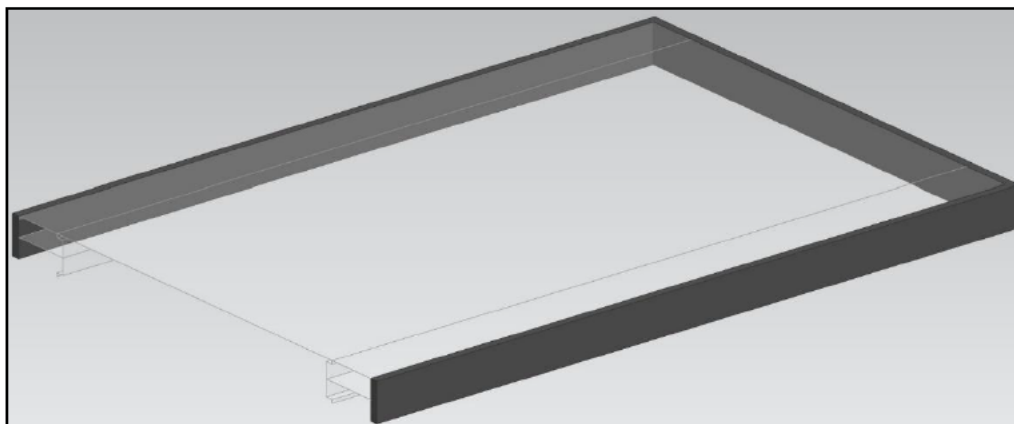


Abbildung 4.21: „Rahmenboden“ mit UZSB „Unterboden“

Im Anschluss an den Rahmenboden wird die „Verbindung“ erstellt, die als Verbindungsstelle zwischen dem Aufbau und dem Vorderwagen dient. Die Stirnwand wird an die vordere Seite geklebt, während der Rahmenboden an die andere Seite geklebt wird. Darüber hinaus wird die anschließend angefertigte A-Säule an der „Verbindung“ befestigt. Der Aufbau der Verbindung erfolgt analog zum Rahmenboden. In der Abbildung 4.22 sind die Verbindung, der Rahmenboden und der transparente Vorderwagen dargestellt.

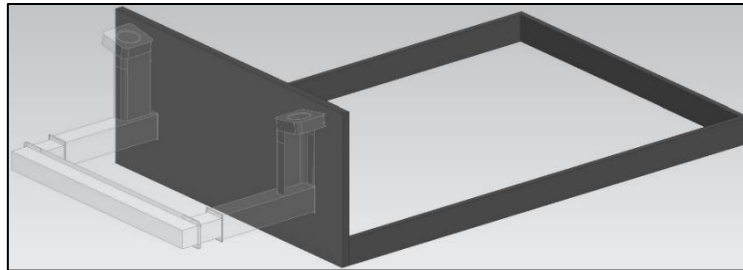


Abbildung 4.22: „Verbindung“ mit „Rahmenboden“ und UZSB „Vorderwagen“

Als Nächstes wird die „Seitenwand_vorne“ erstellt, die in zwei Formelementgruppen unterteilt wird: zum einen in die FG „A-Säule_(unten)“ und zum anderen in die FG „oben“. Der Grund für diese Unterteilung liegt darin, dass die A-Säule gebogen konstruiert werden muss, um sicherzustellen, dass das Dach und der Rahmenboden nicht die gleiche Breite besitzen. Dadurch wird der Seitenwandrahmen zusätzlich nach innen gewölbt. Für die Erstellung der A-Säule wird eine Bezugsebene im Winkel der geplanten Frontscheibe erzeugt. Auf dieser Ebene wird ein gebogenes Profil skizziert, aus dem anschließend eine Fläche erzeugt wird. Um die A-Säule an der Verbindung zu befestigen, wird eine weitere Fläche erzeugt, die an der unteren Kante der gebogenen Fläche liegt. Durch den Einsatz des „Swept“-Befehls, der einen Körper durch das Extrudieren eines Schnitts entlang einer oder mehrerer Führungslinien erzeugt, werden die restlichen Flächen der A-Säule generiert. Hierbei werden jeweils die äußeren Kanten der benachbarten Flächen als Schnitt- bzw. Führungslinie ausgewählt. Dabei ist es irrelevant, welche der beiden Kanten als Schnitt- oder Führungslinie fungiert, da in beiden Fällen die richtige Fläche erzeugt wird. Diese Flächen werden im Anschluss alle miteinander vernäht. Als letztes werden diese Flächen in einer assoziativen Kopie zusammengefasst. Im Anschluss an die gebogene A-Säule wird der obere Teil der Seitenwand konstruiert. Hierfür wird ein Bezugskoordinatensystem am Endpunkt der A-Säule erzeugt. Die restliche Seitenwand wird skizziert, extrudiert und mit einer Abdeckfläche versehen. Durch das Vernähen der gemeinsamen Kanten entsteht der Flächenkörper „Seitenwand_vorne_oben“. Um die beiden Komponenten der vorderen Seitenwand zu verbinden, müssen die Befehle der FEM-Umgebung genutzt werden, da zwischen ihnen keine gemeinsame Kante für die Nutzung des „Sew“-Befehls vorhanden ist. In der Abbildung 4.23 sind zwei Ansichten der Komponente „Seitenwand_vorne“ dargestellt.

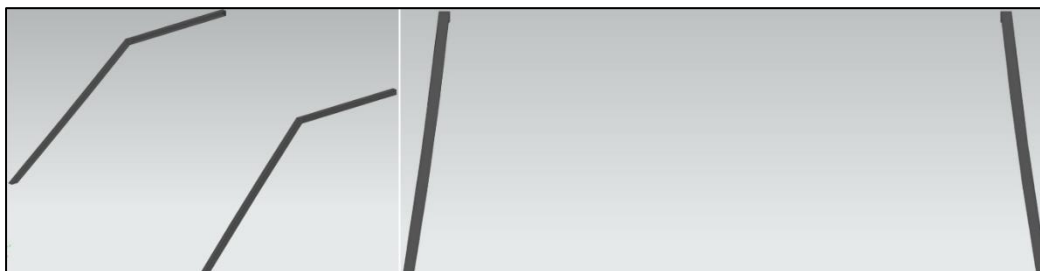


Abbildung 4.23: „Seitenwand_vorne“

Die nächste zu konstruierende Komponente ist die „B-Säule“. Hierzu wird am Endpunkt der vorderen Seitenwand ein Bezugskordinatensystem erzeugt. Auf der XZ-Ebene wird das Profil der B-Säule skizziert. Um einen nahtlosen Übergang zwischen dem Rahmenboden und dem noch zu erstellenden Dach zu schaffen, erhält die B-Säule eine gewölbte Form. Anschließend wird die B-Säule in Längsrichtung extrudiert. Um die Außenflächen der B-Säule zu erzeugen, wird der „Law Extension“-Befehl verwendet. Da bei der Anwendung dieses Befehls Lücken im Flächenkörper entstehen, wird ein Sketch angelegt, auf dem die „Verbindungsstücke“ skizziert werden, die die Lücken der B-Säule schließen sollen. Mit dem „Offset Surface“-Befehl werden die Außenflächen auf die gegenüberliegende Seite der B-Säule versetzt bzw. kopiert. Durch das abschließende Vernähen und Extrahieren entsteht die fertige B-Säule, die in Abbildung 4.24 dargestellt ist.

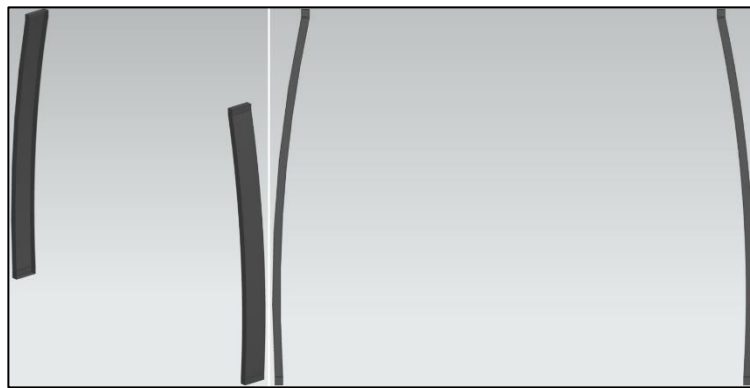


Abbildung 4.24: „B-Säule“

Um den Seitenwandrahmen abzuschließen, wird zuletzt die Komponente „Seitenwand_hinten“ erstellt. Ähnlich wie bei der vorderen Seitenwand wird diese in mehrere Formelementgruppen unterteilt. Die beiden FG „unten“ und „oben“ werden analog zum oberen Teil der vorderen Seitenwand erstellt. Da die C-Säule (das mittlere Teil) ebenfalls eine gebogene Form benötigt, wird eine Bezugsebene im Winkel der geplanten Heckscheibe erstellt. Auf dieser Ebene wird das Profil der C-Säule skizziert. Mithilfe des „Swept“-Befehls wird die C-Säule, analog zur A-Säule, konstruiert. Um das Modell zu vereinfachen, wird auf eine Rundung zwischen der C-Säule und dem unteren Teil der hinteren Seitenwand verzichtet. Stattdessen wird ein Knick zwischen den beiden Komponenten erzeugt. Ähnlich wie bei der vorderen Seitenwand ist es erforderlich, die einzelnen Komponenten in der FEM-Umgebung miteinander zu verbinden. In der folgenden Abbildung 4.25 ist die Komponente „Seitenwand_hinten“ dargestellt.

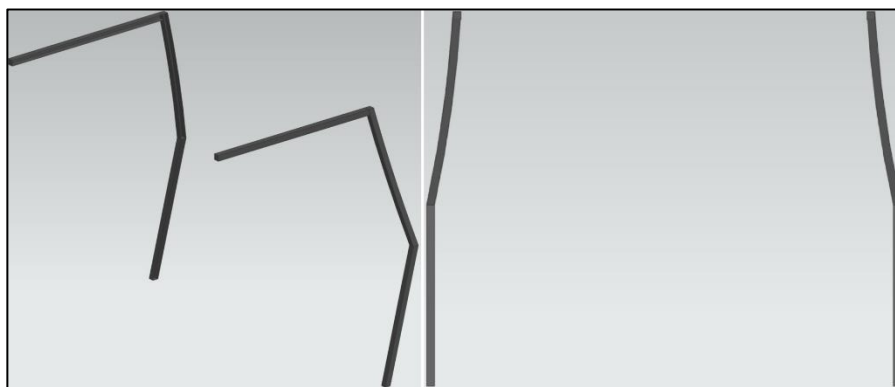


Abbildung 4.25: „Seitenwand_hinten“

Im abschließenden Schritt wird das „Dach“ konstruiert. Da die Komponenten „Seitenwand_vorne“, „B-Säule“ und „Seitenwand_hinten“ jeweils einseitig konstruiert sind, erfolgt zunächst eine Spiegelung dieser um die Mittelebene des Modells. Zur Erstellung des Dachs wird ein Bezugskoordinatensystem an der inneren Kante der A-Säule definiert. Auf der XY-Ebene dieses Koordinatensystems wird eine rechteckige Skizze angefertigt, die anschließend als „Bounded Plane“ das Dach bildet. Als Start- und Endpunkte des Dachs werden in der Skizze die Eckpunkte der A- bzw. C-Säule in die Skizze eingeschlossen. In der Abbildung 4.26 sind alle Komponenten der Baugruppe „Seitenwandrahmen“ dargestellt.

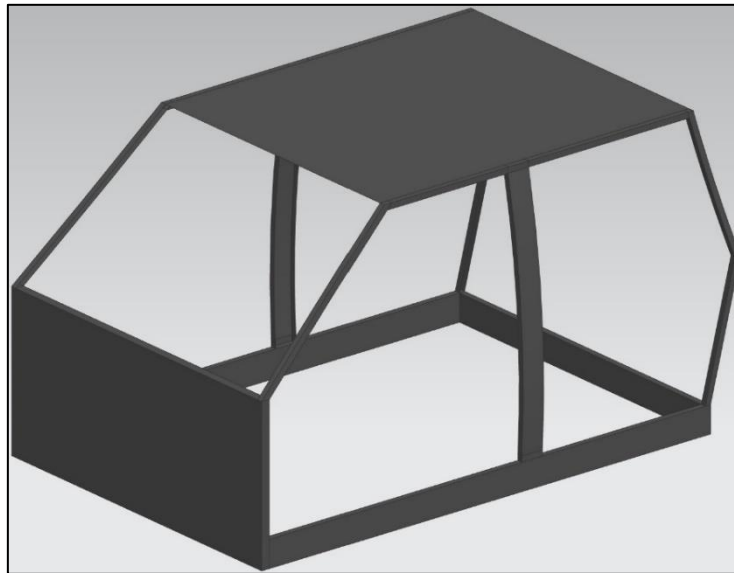


Abbildung 4.26: „Seitenwandrahmen“

Abschließend werden im Anschluss an den Seitenwandrahmen das „Heck“ und die „Scheiben“ modelliert. Das Heck wird an der „Heckwand“ montiert, die an der Kante der hinteren Seitenwand befestigt ist. Für die Modellierung des Hecks wurde eine leicht gewölbte Form gewählt, um eine ansprechendere Designoptik zu erzielen, als es bei einer plumpen rechteckigen Fläche der Fall wäre. Die gewölbte Form macht es notwendig, Verbindungselemente zu modellieren. Dadurch wird sichergestellt, dass beim späteren Aufdicken der Flächenkörper keine Fehlermeldungen wegen möglicher Überlappungen der einzelnen Flächen entstehen. In Abbildung 4.27 ist das Heck aus drei Ansichten dargestellt.

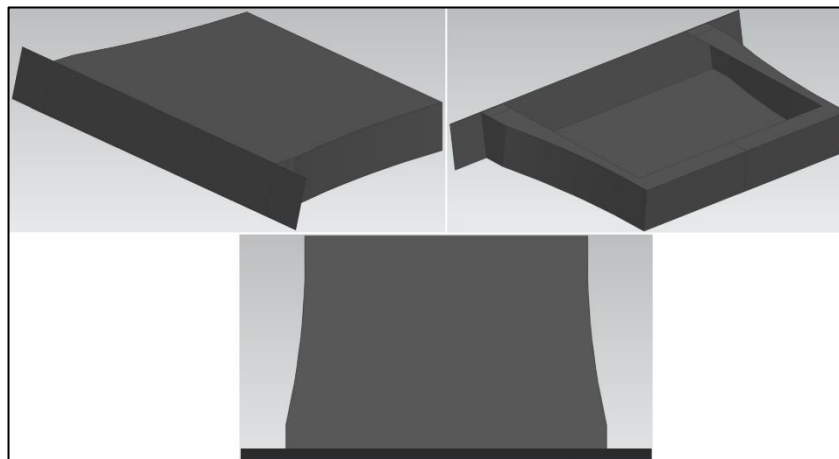


Abbildung 4.27: „Heck“

Die Scheiben werden in zwei Formelementgruppen unterteilt: "Frontscheibe" und "Heckscheibe". In beiden FG wird die gleiche Vorgehensweise angewandt. Zunächst wird eine Bezugsebene erzeugt, die im Winkel der Scheibe liegt. Anschließend wird der „Rahmen“ der jeweiligen Scheibe skizziert und mit einer "Bounded Plane" versehen. Auf der Bezugsebene wird das Profil der jeweiligen Scheibe gezeichnet. Danach wird durch den Befehl "Through Curves" ein Flächenkörper erzeugt, der durch mehrere Schnitte definiert wird, wobei die Form des Körpers an jeden Schnitt angepasst wird. Dadurch erhält die jeweilige Scheibe eine sanfte Wölbung nach außen. Um das Erscheinungsbild zu verbessern, werden die Scheiben transparent gemacht. Die Modellierung dieses Bauteils vervollständigt die in der Abbildung 4.28 dargestellte UZSB „Aufbau“.

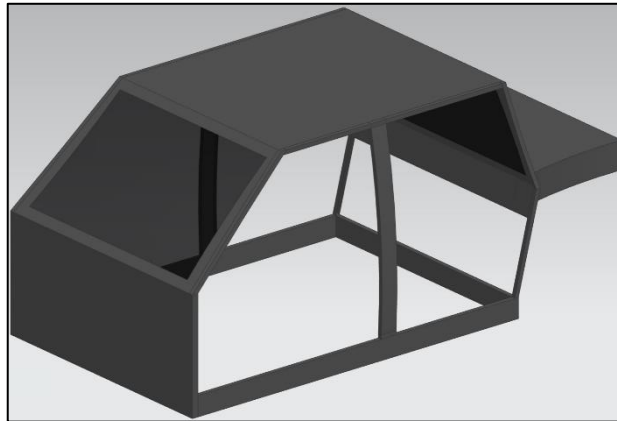


Abbildung 4.28: UZSB „Aufbau“

Somit ist das Modell „Fahrzeugkarosserie_und_Battery_Pack“ fertiggestellt. In der nachfolgenden Abbildung 4.29 sind zwei Ansichten des fertigen CAD-Modells dargestellt.

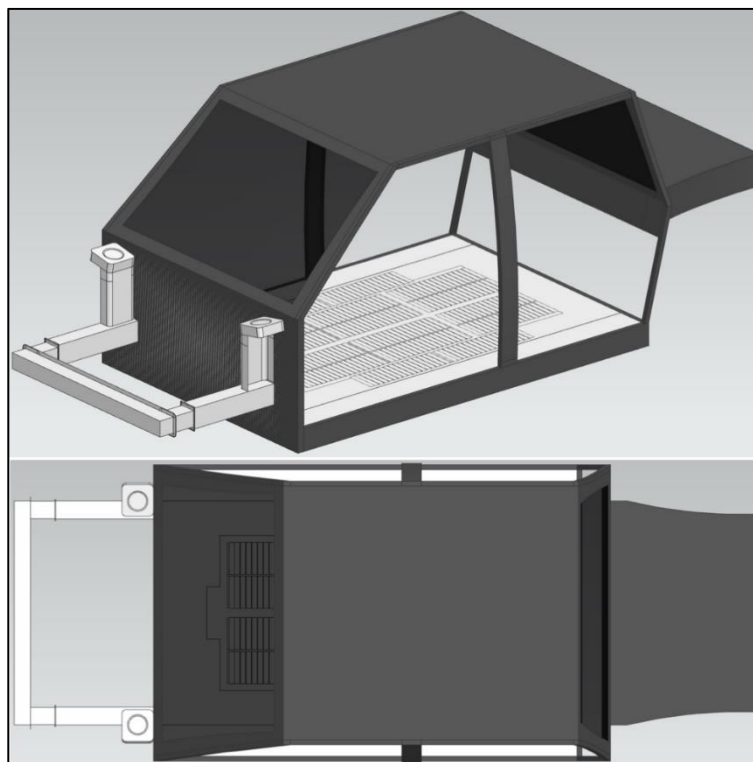


Abbildung 4.29: Gesamtmodell – „Fahrzeugkarosserie_und_Battery_Pack“

Abschließend wird durch das folgende Flussdiagramm in der Abbildung 4.30 die systematische Vorgehensweise während der Modellierung schematisch dargestellt.

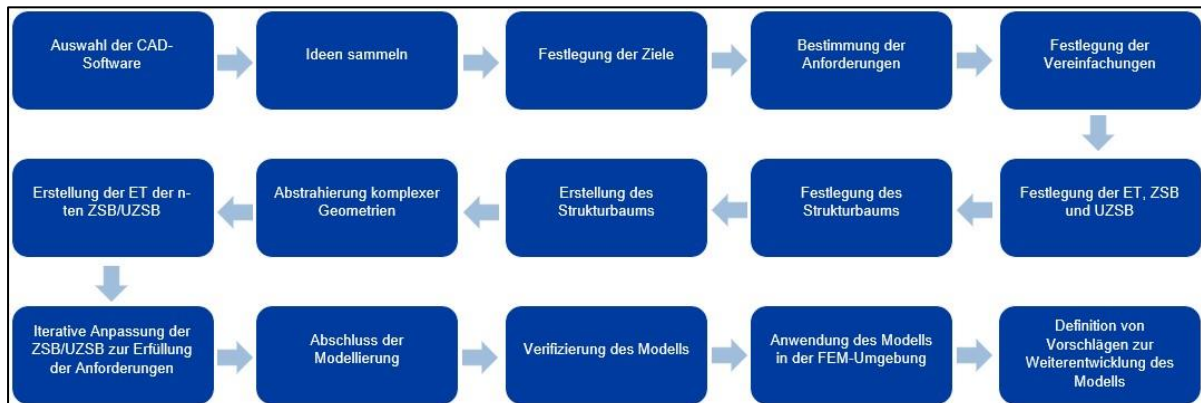


Abbildung 4.30: schematische Vorgehensweise während der Modellierung

5 Verifizierung des Modells

Da das Ziel der Arbeit die Erstellung eines CAD-Flächenmodells ist, bei dem sich die einzelnen Flächenkörper nicht überschneiden und keine Lücken im Modell vorhanden sind, wird am Ende der Modellierung überprüft, ob diese Anforderung erfüllt ist. Hierfür wird in jeder Zusammenbaugruppe überprüft, ob die Bauteile, die in der FEM-Umgebung miteinander verbunden werden müssen, einen sog. „Abdruck“ auf dem benachbarten Bauteil hinterlassen, da dies ein Hinweis darauf ist, dass die beiden Teile in Kontakt stehen. Auch die grafische Darstellung in NX zeigt an, dass die Bauteile sich berühren, wenn sie ineinander liegend dargestellt werden. Zusätzlich kommt der Befehl „Examine Geometry“ zum Einsatz. Dieser analysiert einen Volumenkörper, eine Fläche oder eine Kante hinsichtlich bestimmter Optionen, die vom Anwender festgelegt werden. Bei der Nutzung dieses Befehls werden die Optionen „Face Intersections“, „Sheet Boundaries“ und „Self-Intersection“ aktiviert. Wenn das Programm „Passed“ anzeigt und die Komponente grün dargestellt wird, sind keine Fehler vorhanden. Sollte hingegen „Highlight Results“ angezeigt werden, deutet dies darauf hin, dass im Modell potenzielle Fehler bestehen, die korrigiert werden müssen. Die Option „Sheet Boundaries“ zeigt bei offenen Flächenkörpern „Highlights“ an, da das Programm offene Körper als Lücken identifiziert. Dies ist bei der Prüfung mit dem Befehl zu beachten.

Zunächst wird die ZSB „Battery_Pack“ überprüft. Dafür werden die einzelnen Baugruppen des Battery Packs nacheinander in der grafischen Darstellung des Programms angezeigt. Begonnen wird mit dem „Batterierahmen“. Die Befestigungspunkte an den vier Ecken des Rahmens bilden eine Kante an der Außenseite des Rahmens, was darauf hindeutet, dass diese in Kontakt miteinander stehen. Durch das Aktivieren der „Fachwerkstruktur“ entstehen auf der Bodenfläche des Rahmens ebenfalls Abdrücke. Dadurch ist sichergestellt, dass die beiden ET in der FEM-Umgebung miteinander verbunden werden können. Die „Schockdämpfer“ liegen bündig auf den Bohrungen der Befestigungspunkte, was den Kontakt gewährleistet. Beim Aktivieren der 16 „Batteriemodule“ wird deutlich, dass diese mit dem Rahmen „verschmelzen“. Zudem zeigen ihre Abdrücke auf der Bodenfläche des Batterierahmens den Kontakt zwischen den beiden Komponenten an. Schließlich werden die „Schaumplatten“ und der „Batteriedeckel“ aktiviert. Das Grafikfenster von NX zeigt, dass die Komponenten in Kontakt stehen, da die Baugruppen sichtbar ineinander liegen. Abschließend wird der Befehl „Examine Geometry“ ausgeführt. Die grüne Darstellung des Battery Packs in Abbildung 5.1 bestätigt, dass die oben genannten Optionen erfüllt sind und dass das Battery Pack weder sich überschneidende Flächen noch Lücken aufweist.

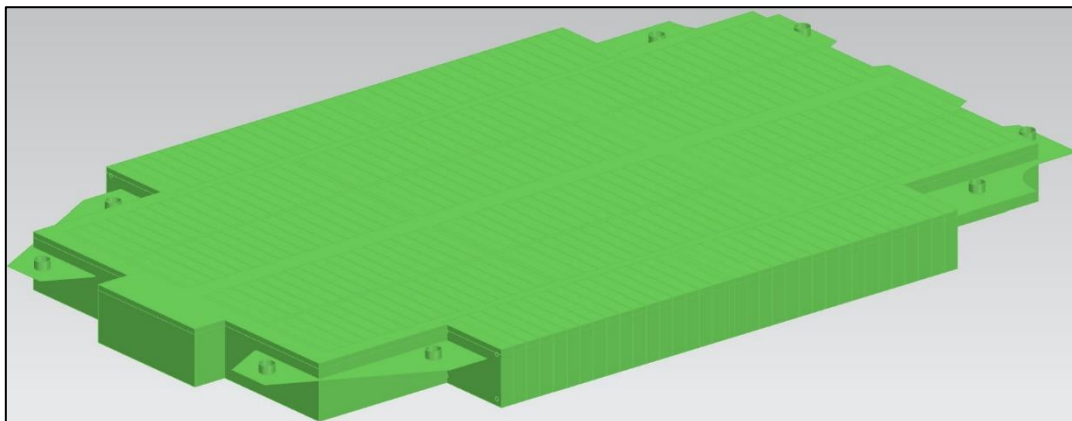


Abbildung 5.1: Verifizierung der ZSB "Battery_Pack"

Im nächsten Schritt erfolgt die Überprüfung der UZSB „Vorderwagen“ innerhalb der ZSB „Karosserie“. Dabei wird die gleiche Vorgehensweise wie beim Battery Pack angewendet. Zunächst wird überprüft, ob die Abdrücke der „Längsträger“ und des ET „Anbindung_Federbein“ auf der Rückseite der „Stirnwand“ sichtbar sind. Nach der Bestätigung des Kontakts zwischen der Stirnwand und den beiden zuvor genannten Bauteilen wird überprüft, ob das Bauteil „Anbindung_Federbein“ einen Abdruck auf der Innenseite des Längsträgers hinterlässt. Dies ermöglicht die Verbindung der Kanten dieses Bauteils mit der Fläche des Längsträgers. Abschließend wird kontrolliert, ob die Bauteile „Prallplatte_Crashbox“, „Crashbox“ und „Querträger“ Abdrücke auf ihren benachbarten Bauteilen hinterlassen. Analog zum Battery Pack wird auch hier der Befehl „Examine Geometry“ angewendet. Die Abbildung 5.2 verdeutlicht, dass der Vorderwagen lückenlos und ohne Überlappungen der einzelnen Flächenkörper modelliert wurde.

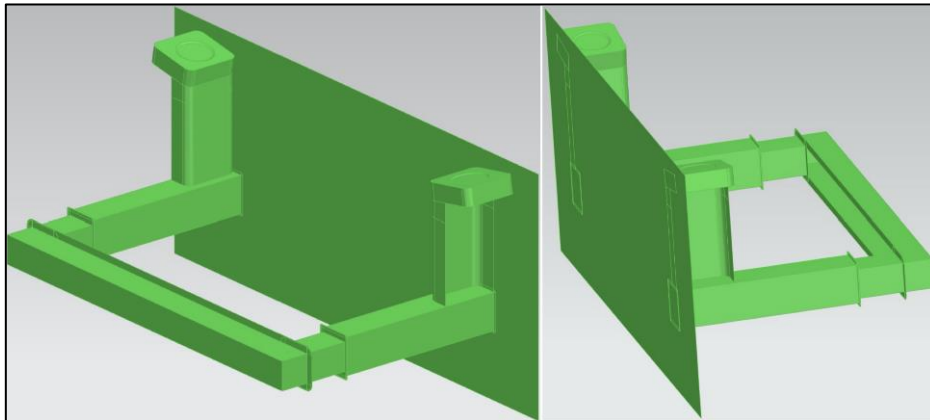


Abbildung 5.2: Verifizierung der UZSB "Vorderwagen"

Abschließend werden die UZSB „Unterboden“ und „Aufbau“ gemeinsam überprüft, da sie in Kontakt stehen müssen. Durch die Kontrolle der Abdrücke des „Schwellers“ und des „Bodenblechs“ auf dem „Rahmen_Boden“ des „Seitenwandrahmens“ wird sichergestellt, dass der Unterboden mit dem Aufbau verbunden werden kann. Zudem wird geprüft, ob die „Verbindungsbleche“ in Kontakt mit dem „Schweller“ stehen und bündig auf den „Schockdämpfern“ des „Batterierahmens“ aufliegen. Im Anschluss erfolgt die Überprüfung der ET der UZSB „Aufbau“ nach demselben Schema. Die Abbildung 5.3 zeigt, dass sowohl der Aufbau als auch der Unterboden lückenlos und ohne Überlappungen modelliert sind. Dadurch ist das Gesamtmodell konsistent und erfüllt die Anforderung der lückenlosen Modellierung.

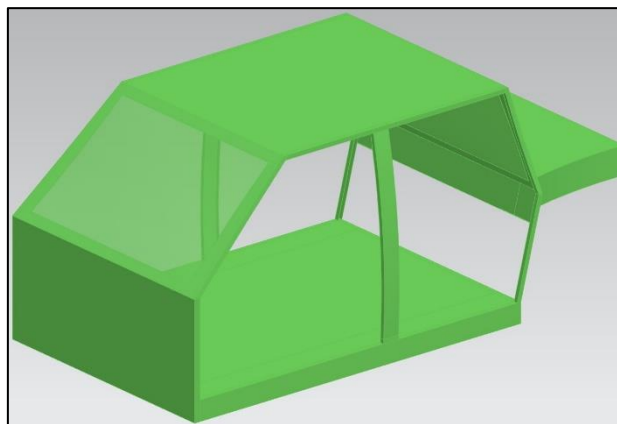


Abbildung 5.3: Verifizierung der UZSB "Aufbau" und der UZSB "Unterboden"

6 Anwendung der FEM-Umgebung

Um zu demonstrieren, dass das Modell in der FEM-Umgebung eingesetzt werden kann, wird exemplarisch eine FEA an ausgewählten Komponenten des „Vorderwagens“ durchgeführt, ohne dabei explizit auf die auftretenden Spannungen oder Verformungen einzugehen. Hierfür kommt die „Pre/Post“-Anwendung von Siemens-NX zum Einsatz. Die verwendeten Einzelteile sind „Querträger“, „Crashbox“, „Prallplatte_Crashbox“ und „Längsträger“. Das Ziel dieser Analyse ist es, aufzuzeigen, dass die Funktionen der FEM-Umgebung es ermöglichen, die Einzelteile, die während des Modellierungsprozesses nicht miteinander verbunden werden konnten, miteinander zu verbinden. Dazu werden Kanten mit Flächen bzw. Flächen mit Flächen verklebt, wodurch das Vernetzen einer Gesamtheit von Bauteilen ermöglicht wird.

Zu Beginn wird das 2D-Netz erstellt. Als Elementgröße wird hierbei 10 mm ausgewählt, wodurch eine Anzahl von 13292 Elementen und 13733 Knoten im Netz erzeugt wird. Im nachfolgenden Schritt werden dem Netz die Materialeigenschaften und die Wandstärke der Bauteile zugewiesen. Als Material wird dabei „Aluminium_2014“ mit den in Kapitel 4.3 bereits aufgeführten Materialwerten verwendet und als Wandstärke wird 2 mm gewählt. Die Abbildung 6.1 zeigt das FE-Mesh auf den oben genannten Komponenten.

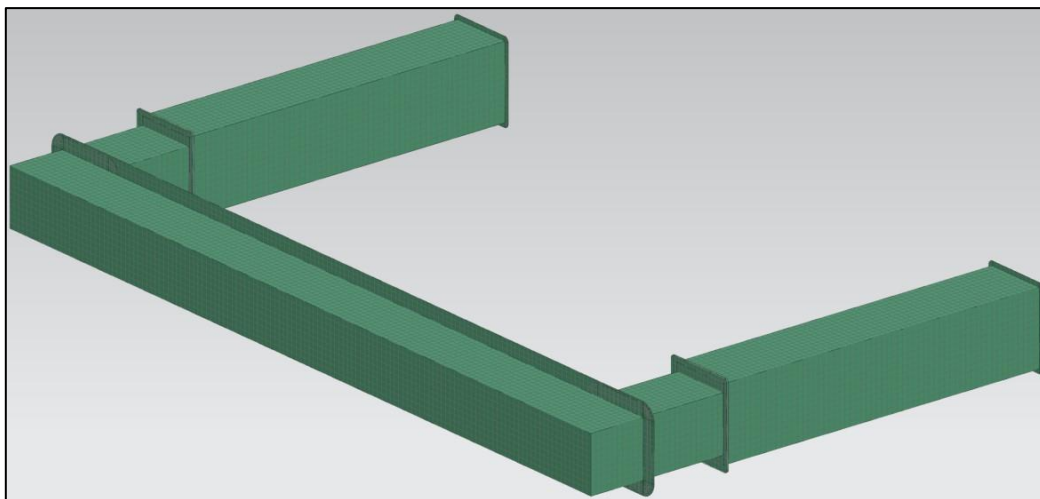


Abbildung 6.1: Vernetzung der ET des "Vorderwagens"

Im nachfolgenden Schritt werden die Kanten der Crashbox und des Längsträgers mithilfe des Befehls „Edge-to-Surface Gluing“ an die Fläche der Prallplatte verklebt. Analog dazu werden die Flächen, die miteinander verklebt werden müssen, über die automatische Flächenpaarerzeugung des Befehls „Surface-to-Surface Gluing“ miteinander verbunden. Anschließend werden der Zwangsbedingungs- und Lasttyp festgelegt. Die Längsträger sind fest an der „Stirnwand“ des Vorderwagens verbunden, weshalb hier eine feste Einspannung an den Flanschflächen der Längsträger angebracht wird. Als Last wird eine Kraft angenommen, die einen Frontalcrash simuliert. Im ersten Fall wird die Kraft auf die Stirnfläche des Querträgers angebracht, während im zweiten Fall die Kraft an den Außenkanten des Querträgers ausgeübt wird. Hierdurch sollen die Unterschiede der Simulationsergebnisse verdeutlicht werden. In der folgenden Abbildung 6.2 sind die Verklebung (gelb), die Zwangsbedingungen (blau) und die wirkende Kraft (rot) der beiden Fälle dargestellt.

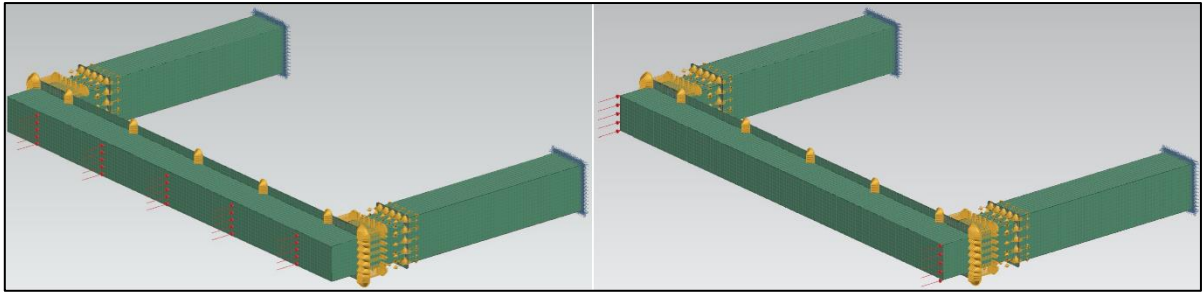


Abbildung 6.2: Verklebung, Zwangsbedingungen und wirkende Last am "Vorderwagen"

Somit sind alle Bedingungen für den Einsatz der FEM erfüllt, wodurch die Berechnung durch den Solver gestartet werden kann. Im Post-Processing können im Anschluss an die Berechnung die Verschiebung, Rotation, Spannung und Reaktionskraft an den Knoten veranschaulicht und analysiert werden. Anhand der Abbildung 6.3 und der Abbildung 6.4 werden die Verschiebungen der Knoten der beiden oben genannten Fälle durch Standbilder der Animation aufgezeigt. Dadurch, dass sich alle Teile verschieben, wird bestätigt, dass das Verkleben der Einzelteile in der FEM-Umgebung möglich ist und somit der Einsatz der FEM am Modell gewährleistet ist.

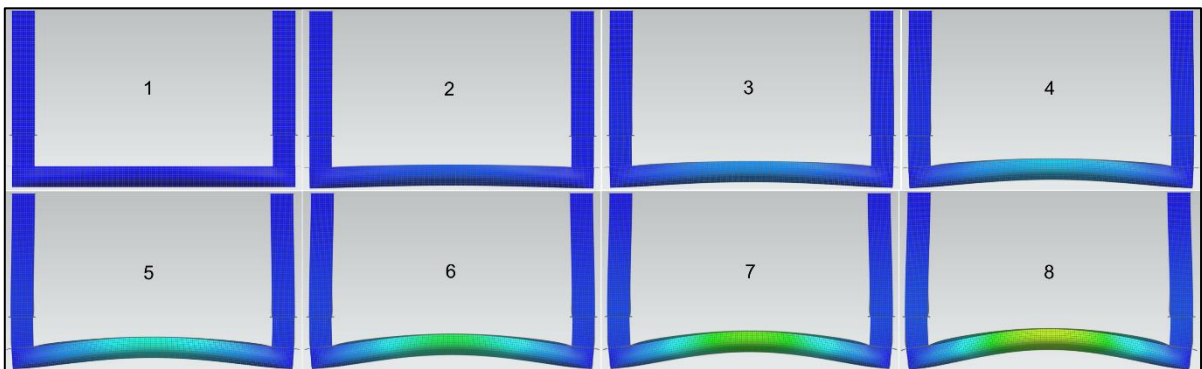


Abbildung 6.3: Verschiebung - Fall 1

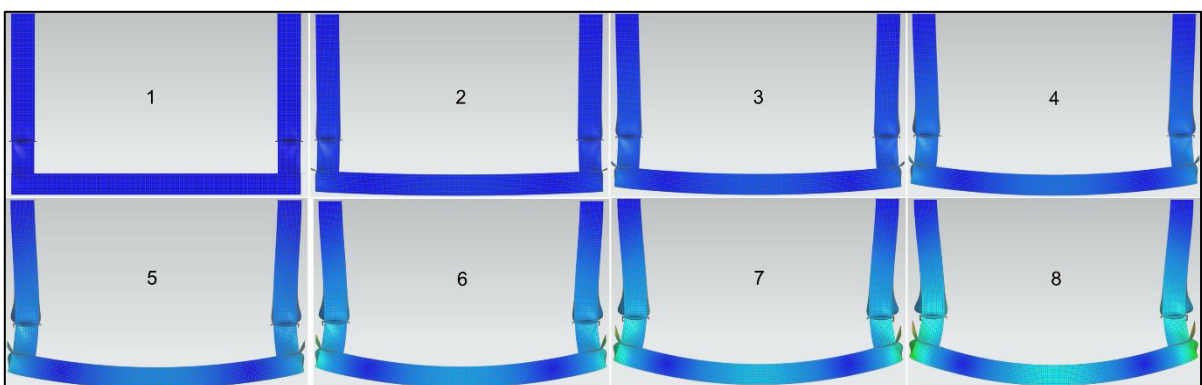


Abbildung 6.4: Verschiebung - Fall 2

7 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde ein CAD-Flächenmodell einer abstrahierten Fahrzeugkarosserie sowie eines Battery Packs modelliert. Dieses Modell bildet die Basis für zukünftige studentische Arbeiten, in denen die Steifigkeitsabhängigkeit und die Interaktion zwischen den beiden Komponenten unter dem Einfluss spezifischer Kräfte mithilfe der FEM untersucht werden sollen. Hierfür wurden die Grundlagen der Fahrzeugkarosserie, der E-Fahrzeug-Batterie und der FEM vorgestellt. Im Anschluss daran wurde der Aufbau des Modells in Siemens NX ausführlich beschrieben, wobei besondere Aufmerksamkeit auf die Anforderungen, die vorgenommenen Vereinfachungen sowie die systematische Vorgehensweise während der Modellierung gelegt wurde.

Durch die systematische Vorgehensweise wird sichergestellt, dass die Anforderungen an das Modell jederzeit höchste Priorität besitzen und ein konsistenter Ablauf während des gesamten Modellierungsprozesses beibehalten wird. Die vorgenommenen Vereinfachungen, wie das Abstrahieren und kantige Erstellen von komplexen Geometrien, tragen dazu bei, den Aufwand für die Modellierung zu reduzieren. Gleichzeitig minimieren sie das Risiko von Fehlern, die bei der Verwendung des Modells in den FEM-Untersuchungen in nachfolgenden Arbeiten auftreten könnten. Darüber hinaus wird durch die iterative Überprüfung und Anpassung der einzelnen Zusammenbaugruppen der Kontakt zwischen den einzelnen Flächenkörpern sichergestellt.

Die Beschreibung des Modellaufbaus verdeutlicht, dass durch die Abstraktion der Fahrzeugkarosserie ein CAD-Flächenmodell erstellt werden kann, das die grundlegenden geometrischen Abmessungen und die ungefähre Form einer realen Fahrzeugkarosserie abbildet. Durch die Modellierung der Körper als Flächen besteht die Möglichkeit, mithilfe von FEM-Programmen unterschiedliche Wandstärken der Flächenkörper festzulegen sowie verschiedene Materialien zuzuweisen. Dies ermöglicht die Durchführung von Simulationen, die Erkenntnisse über unterschiedliche Steifigkeitsverhalten liefern, ohne dass die Wandstärken der einzelnen Bauteile in der Konstruktionsumgebung angepasst werden müssen.

Die Anwendung des Modells am Beispiel des „Vorderwagens“ hat gezeigt, dass die FEM-Umgebung die Verbindung von Flächenkörpern aus unterschiedlichen Baugruppen ermöglicht. Die beiden Simulationsfälle haben aufgezeigt, dass das Vernetzen und das Aufbringen von Kräften zu Verformungen an der gesamten Struktur führen, wodurch sichergestellt wird, dass das Modell in der FEM-Umgebung genutzt werden kann.

Eine wesentliche Vereinfachung des Modells besteht darin, dass die Auswirkungen von Verrundungen und Sicken, die im Referenzfahrzeug des HCC vorhanden sind, nicht berücksichtigt wurden. Um genauere Simulationsergebnisse zu erzielen, könnte ein möglicher Ansatz zur Verbesserung darin bestehen, die Karosserie des Modells zu überarbeiten und an den Rohbau des HCC anzupassen. Dies könnte durch fundiertes Know-how im Bereich der Flächenmodellierung realisiert werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass das Ziel dieser Arbeit, die Erstellung eines Modells einer abstrahierten Fahrzeugkarosserie sowie eines Battery Packs, erreicht wurde. Das in dieser Arbeit erstellte Modell kann somit als Grundlage für nachfolgende studentische Arbeiten und zur Untersuchung der Steifigkeitsabhängigkeit mittels der Finite-Elemente-Methode genutzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz,“ 07. Mai 2020. [Online]. Available: <https://www.bmuv.de/gesetz/die-eu-verordnungen-zur-verminderung-der-co2-emissionen-von-strassenfahrzeugen>. [Zugriff am 30. Sep. 2024].
- [2] „Kraftfahrt-Bundesamt,“ o. D.. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/2024/2024_b_jahresbilanz_tabellen.html. [Zugriff am 18. Jul. 2024].
- [3] B. Plaumann, *Vorlesungsskript: VMK - Part II, Battery Packs*, 2023.
- [4] „SIEMENS,“ o. D.. [Online]. Available: <https://www.sw.siemens.com/de-DE/technology/finite-element-analysis-fea/>. [Zugriff am 20. Jul. 2024].
- [5] K.-L. Haken, *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik*, 3. Auflage, München: Hanser Verlag, 2013.
- [6] S. Pischinger und U. Seiffert, *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 9. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021.
- [7] M. Jordan, „mbpassionblog,“ 04. Jun. 2022. [Online]. Available: <https://mbpassion.de/2022/06/der-gitterrohrrahmen-fuer-den-legendaeren-mercedes-benz-300-sl/>. [Zugriff am 26. Jul. 2024].
- [8] A. Karle, *Elektromobilität : Grundlagen und Praxis*, 6. Auflage, München: Hanser, 2022.
- [9] A. Kohs, *Batteriemodell zur Prädiktion des Gesundheitszustands von Lithium-Ionen-Batterien*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022.
- [10] M. Doppelbauer, *Grundlagen der Elektromobilität : Technik, Praxis, Energie und Umwelt*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [11] L. Dormann, K. Sann-Ferro, P. Heininger und J. Mähliß, „Kompendium: Li-Ionen-Batterien Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen,“ VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Frankfurt am Main, 2021.
- [12] P. Kurzweil und O. K. Dietlmeier, *Elektrochemische Speicher : Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [13] M. Kane, „INSIDEEVs,“ 02. Jun. 2022. [Online]. Available: <https://insideevs.com/news/589715/panasonic-4680-battery-samples-tesla/>. [Zugriff am 04. Jul. 2024].
- [14] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.
- [15] C. Köllner, „SpringerProfessional,“ 23. Dez. 2021. [Online]. Available: <https://www.springerprofessional.de/batterie/energiespeicher/was-sind-die-vor--und-nachteile-verschiedener-zellformate-/19085588>. [Zugriff am 07. Jul. 2024].
- [16] „Audi MediaCenter,“ 09. Feb. 2021. [Online]. Available: <https://www.audi-mediacycenter.com/de/fotos/detail/audi-rs-e-tron-gt-98555>. [Zugriff am 19. Jul. 2024].
- [17] „24AUTO,“ 14. Mär. 2024. [Online]. Available: <https://www.24auto.de/service/e-mobilitaet-batterie-garantie-kosten-austausch-elektroauto-akkus-92419399.html>. [Zugriff am 19. Jul. 2024].
- [18] „CATL,“ o. D.. [Online]. Available: <https://www.catl.com/de/research/technology/>. [Zugriff am 19. Jul. 2024].

- [19] P. Steinke, Finite-Elemente-Methode : Rechnergestützte Einführung, 5. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [20] M. Wagner, Lineare und nichtlineare FEM : eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit LS-DYNA®, 3. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022.
- [21] K. Schier, Finite Elemente Modelle der Maschinenelemente, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023.
- [22] P. Blaschke, A. Wunsch und M. Schabacker, Siemens NX für Fortgeschrittene - kurz und bündig, 5. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2023.
- [23] J. Friedhoff und R. Griebel, *Hamburg Concept Car 2021: Showcar of a vehicle concept and interior design for electric automated driving*, 2021.
- [24] *CAD-Modell des HCC21-Rohbaus*, HAW Hamburg.
- [25] Studierende, *Ein nachhaltiges Battery Pack für das Hamburg Concept Car*, HAW Hamburg, Mechatronisches Design, Wintersemester 2022/2023.
- [26] TechDesign, „YouTube,“ 2019-2022. [Online]. Available: https://www.youtube.com/playlist?list=PLQ140rlt4aOUXmOKRTDLHXeeTN_0Vr9pK. [Zugriff am August 2024].

Eigenständigkeitserklärung



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Turp

Vorname: Ogün

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Modellierung von Fahrzeugkarosserie und Battery Pack zur Untersuchung der Steifigkeitsabhängigkeit mittels der Finite-Elemente-Methode

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.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

07.10.2024

Datum

Unterschrift im Original