

Diplomarbeit

Nr. MKO/09/2022

Untersuchung zur Erhöhung der Sicherheit des Antriebsbatteriepacks in Elektrofahrzeugen

eingereicht bei der Fakultät Automobil- und Maschinenbau
der Westsächsischen Hochschule Zwickau
am 29.09.2022

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: **Peng Gao** geb. am: 26.04.1997

Studiengang Maschinenbau
Schwerpunkt Maschinenkonstruktion

Auftraggeber: Herr Prof. Dr. Weibo Zhang
Herr Prof. Dr. habil. Michael Scheffler

Autorenreferat

In dieser Diplomarbeit ist zunächst ein Batteriepackmodell eines Elektrofahrzeugs mit Catia V5 zu erstellen. Analyse des Batteriepacks mit Hilfe der Finite-Elemente-Software Abaqus. Insgesamt gibt es zwei Arten von Analysen, die statische Festigkeitsanalyse und die Steifigkeitsanalyse. Die erhaltenen Verschiebungs- und Spannungsergebnisse werden analysiert, um festzustellen, welche Komponenten des ursprünglichen Packs konstruktionsbedingt fehlerhaft sind. Optimierung der Struktur von wichtigen Komponenten in Batteriepacks. und andere Lösungen vorschlagen, die die Sicherheit des Batteriepacks verbessern können.

Erklärung zur selbstständigen Anfertigung der Arbeit

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u. a. sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit oder eine ähnliche Arbeit mit in Teilen wesentlicher Inhaltsübereinstimmung noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Zwickau, am 29.09.2022

A handwritten signature in black ink, reading "Gao Peng", written in a cursive style. The signature is positioned above a horizontal dotted line.

Peng Gao

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	IV
Verzeichnis der Tabellen	VIII
Verzeichnis der Formeln.....	IX
1 Einleitung	1
2 Wissenschaftliche Grundlagen.....	2
2.1 Grundlagen Finite-Element-Method	2
2.2 Grundlagen der statischen Festigkeitsanalyse.....	3
2.3 Grundlagen Werkstofffestigkeit	4
2.4 Elastizitätsmodul	4
2.5 Grundlagen Hookesche Gesetz	5
2.6 Widerstandsmoment	5
3 Parametrische Modellierung von Batteriepacks.....	7
3.1 Einführung in die Batteriepacks.....	7
3.1.1 Platzierung des Batteriepacks.....	7
3.1.2 Form des Batteriepacks	8
3.2 Anforderungen an die Struktur der Batteriepacks	10
3.3 Modell des Batteriepacks	12
4 Abaqus-basiert Finite-Elemente-Modellierung	14
4.1 Modell-Import und Materielle Parameter	14
4.2 Mesh	15
4.2.1 Kriterien für Vernetzung	15

4.2.2	Inspektion und Einstellung des Gitters	16
4.3	Interaktion, Belastungen und Randbedingungen	18
4.3.1	Interaktion	18
4.3.1.1	Schweißverbindungen.....	18
4.3.1.2	Schraubverbindungen	19
4.3.2	Belastung (Load).....	20
4.3.2.1	Berechnung der Vorspannkraft	20
4.4	Einheiten in Abaqus	22
4.5	Erstellung von Analyseschritten (Step)	22
5	Statische Festigkeitsanalyse	25
5.1	Belastungen und Randbedingungen	25
5.1.1	Belastungen	26
5.1.2	Randbedingungen.....	27
5.2	Ergebnisse der statischen Festigkeitsanalyse.....	28
5.2.1	Notbremsung.....	28
5.2.2	Bodenwellen und scharfen Kurven.....	32
5.3	Auswertung der Ergebnisse der statischen Festigkeitsanalyse und Optimierungsmöglichkeiten	35
6	Steifigkeitsanalyse.....	37
6.1	Belastungen und Randbedingungen	37
6.1.1	Belastungen	37
6.1.2	Randbedingungen.....	38
6.2	Ergebnisse der Steifigkeitsanalyse	39
7	Entwicklung von Sicherheitskonzepten.....	41

7.1	Optimierung bestehender Batteriepacks	41
7.1.1	Formoptimierung der oberen Abdeckung des Batteriegehäuses	42
7.1.2	Formoptimierung der Modulhalterung	43
7.1.3	Formoptimierung von Tragbalken	44
7.1.4	Optimiertes Modell	45
7.1.5	Analyse des optimierten Batteriepacks	46
7.1.5.1	Notbremsung.....	46
7.1.5.2	Bodenwellen und scharfen Kurven.....	50
7.2	Entwicklung kleiner Batteriepacks.....	54
7.2.1	Analyse kleines Batteriepacks.....	56
7.2.1.1	Notbremsung.....	56
7.2.1.2	Bodenwellen und scharfen Kurven.....	58
7.3	Anwendung von Dämpfung und Federn.....	62
8	Auswertung der zwei Optimierungsmöglichkeiten	63
8.1	Ergebnisse unter Notbremsbedingungen.....	63
8.2	Ergebnisse unter kombinierten Betriebsbedingungen.....	65
8.3	Gesamtauswertung der Konstruktion	67
8.3.1	Ursprünglicher Batteriepack.....	67
8.3.2	Optimiertes Batteriepack (Optimierung bestehender Batteriepacks).....	68
8.3.3	Kleine Batteriepack	69
9	Zusammenfassung	70
	Quellenverzeichnis	72

Verzeichnis der Abbildungen

Bild 2-1 Widerstandsmoment über Querschnitt	6
Bild 3-1 Abbildung Montageposition des Batteriepacks /3/	8
Bild 3-2 Velite5 T-Batteriepack /4/	8
Bild 3-3 Volkswagen E-Golf Batteriepack /5/ /6/	9
Bild 3-4 Volkswagen MEB und Tesla Model S /7/ /8/	9
Bild 3-5 NIO ES8 Batteriepack und Explosionszeichnung /9/	10
Bild 3-6 Montagezeichnung des Batteriepacks	12
Bild 3-7 Explosionszeichnung des Batteriepacks	12
Bild 3-8 Ursprüngliches Profil und Abmessungen des Batteriepacks	13
Bild 4-1 Elementtyp C3D8R 8-Knoten und vier Integrationspunkte pro Fläche	15
Bild 4-2 Vernetzung von nicht partitionierten Schraubenlöchern	16
Bild 4-3 Vernetzung von partitionierten Schraubenlöchern	17
Bild 4-4 Vernetzung von partitionierter Schraube	17
Bild 4-5 Bindung-Verbindung (Tie) des unteren Gehäuses mit dem Tragbalken	18
Bild 4-6 Querschnitt von Schraubverbindung	19
Bild 4-7 Schraube-Vorspannkraft	21
Bild 4-8 Vorspannkraft-Belastung der Schraube	22
Bild 4-9 Zwei Analyseschritte	23
Bild 4-10 Zeitspanne in Abaqus	23
Bild 4-11 Inkrement in Abaqus	23
Bild 5-1 XYZ-Achse des Batteriepacks	26
Bild 5-2 Randbedingungen für Batteriepacks (statische Festigkeitsanalyse)	27
Bild 5-3 Verschiebung-Diagramm des Batteriepacks unter Notbremsung	28
Bild 5-4 Obere Abdeckung Verschiebung-Diagramm unter Notbremsung	28
Bild 5-5 Obere Abdeckung Verschiebung und Spannung-Diagramm unter Notbremsung	28
Bild 5-6 Spannung-Diagramm des Batteriepacks unter Notbremsbedingung	29
Bild 5-7 Spannung-Diagramm der Schraube	29
Bild 5-8 Modulhalterung Verschiebung-Diagramm unter Notbremsung	30
Bild 5-9 Modulhalterung Spannung-Diagramm unter Notbremsung	30
Bild 5-10 Batteriemodule Verschiebung-Diagramm unter Notbremsung	30

Bild 5-11 Tragbalken Verschiebung-Diagramm unter Notbremsung	31
Bild 5-12 Tragbalken Spannung-Diagramm unter Notbremsung	31
Bild 5-13 Verschiebung-Diagramm des Batteriepacks unter Bodenwellen und scharfen Kurven.....	32
Bild 5-14 Obere Abdeckung Verschiebung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven.....	32
Bild 5-15 Modulhalterung Verschiebung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven	33
Bild 5-16 Modulhalterung Spannung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven	33
Bild 5-17 Batteriemodule Verschiebung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven	33
Bild 5-18 Unteres Gehäuse Verschiebung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven.....	34
Bild 5-19 Tragbalken Verschiebung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven	34
Bild 5-20 Tragbalken Spannung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven	35
Bild 6-1 Kopplung zwischen Referenzpunkt und Stirnfläche	37
Bild 6-2 Konzentrierte Kraftbelastungen in der Steifigkeitsanalyse.....	38
Bild 6-3 Randbedingungen in der Steifigkeitsanalyse.....	38
Bild 6-4 Verschiebungsdiagramm für die Steifigkeitsanalyse des Ursprungsmodells	39
Bild 6-5 Tragbalken Spannung-Diagramm für Steifigkeitsanalyse des Ursprungsmodells.....	39
Bild 6-6 Tragbalken Verschiebung-Diagramm für Steifigkeitsanalyse des Ursprungsmodells.....	39
Bild 7-1 Optimierte obere Abdeckung des Batteriepacks	42
Bild 7-2 Optimierte Modulhalterung des Batteriepacks	43
Bild 7-3 Löcher in der Modulhalterung	43
Bild 7-4 Querschnitt des ursprünglichen Tragbalkens	44
Bild 7-5 Optimierter Tragbalken.....	45
Bild 7-6 Montagezeichnung des optimierten Batteriepacks	45
Bild 7-7 Explosionszeichnung nach der Optimierung	46
Bild 7-8 Verschiebung-Diagramm des Batteriepacks nach der Formoptimierung unter Notbremsung	46
Bild 7-9 Verschiebung-Diagramm der oberen Abdeckung nach der Formoptimierung unter Notbremsung	47

Bild 7-10 Verschiebung-Diagramm der Modulhalterung nach der Formoptimierung unter Notbremsung	47
Bild 7-11 Spannung-Diagramm der Modulhalterung nach der Formoptimierung unter Notbremsung	48
Bild 7-12 Verschiebung-Diagramm der Batteriemodule nach der Formoptimierung unter Notbremsung	48
Bild 7-13 Verschiebung-Diagramm des Tragbalkens nach der Formoptimierung unter Notbremsung	48
Bild 7-14 Spannung-Diagramm des Tragbalkens nach der Formoptimierung unter Notbremsung	49
Bild 7-15 Verschiebung-Diagramm des Batteriepacks nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen	50
Bild 7-16 Verschiebung-Diagramm der oberen Abdeckung nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen	50
Bild 7-17 Verschiebung-Diagramm der Modulhalterung nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen	51
Bild 7-18 Spannung-Diagramm der Modulhalterung nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen	51
Bild 7-19 Verschiebung-Diagramm des unteren Gehäuses nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen	52
Bild 7-20 Verschiebung-Diagramm des Tragbalkens nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen	52
Bild 7-21 Spannung-Diagramm des Tragbalkens nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen	53
Bild 7-22 Benz Smart EQ Kleiner Batteriepack.....	54
Bild 7-23 Konstruktionsanforderungen für kleine Batteriepacks	54
Bild 7-24 Montagezeichnung des kleinen Batteriepacks	55
Bild 7-25 Explosionszeichnung des kleinen Batteriepacks	55
Bild 7-26 Profil und Abmessungen des kleinen Batteriepacks.....	55
Bild 7-27 Verschiebung-Diagramm des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung...56	
Bild 7-28 Verschiebung-Diagramm der oberen Abdeckung des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung	56
Bild 7-29 Verschiebung-Diagramm der Modulhalterung des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung	57
Bild 7-30 Verschiebung-Diagramm der Modulhalterung des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung	57
Bild 7-31 Verschiebung-Diagramm des Tragbalkens des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung	58

Bild 7-32 Spannung-Diagramm des Tragbalkens des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung	58
Bild 7-33 Verschiebung-Diagramm des kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen.....	58
Bild 7-34 Verschiebung-Diagramm der oberen Abdeckung unter kombinierten Betriebsbedingungen.....	59
Bild 7-35 Verschiebung-Diagramm der Modulhalterung des kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen	59
Bild 7-36 Spannung-Diagramm der Modulhalterung des kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen	60
Bild 7-37 Verschiebung-Diagramm des Tragbalkens des kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen	60
Bild 7-38 Spannung-Diagramm des Tragbalkens des kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen	61
Bild 7-39 Abstützung des Batteriepacks mit Federn und Dämpfern	62

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3-1 Anforderungen an die Konstruktion	11
Tabelle 4-1 Materielle Parameter für Batteriepack	14
Tabelle 4-2 Interaktion von Schraubverbindungen	19
Tabelle 4-3 SI-System (mm).....	22
Tabelle 5-1 Belastungen für die statische Festigkeitsanalyse	27
Tabelle 7-1 Optimierte Konzepte	41
Tabelle 8-1 Zusammenfassung der Daten der ursprünglichen Batteriepacks unter Notbremsung	63
Tabelle 8-2 Zusammenfassung der Daten des optimierten Batteriepacks unter Notbremsung	63
Tabelle 8-3 Zusammenfassung der Daten der kleinen Batteriepacks unter Notbremsung	63
Tabelle 8-4 Zusammenfassung der Daten der ursprünglichen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen	65
Tabelle 8-5 Zusammenfassung der Daten des optimierten Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen	65
Tabelle 8-6 Zusammenfassung der Daten der kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen	65

Verzeichnis der Formeln

d	mm	Außendurchmesser des Außengewindes
d_2	mm	Flankendurchmesser des Außengewindes
d_3	mm	Kerndurchmesser des Außengewindes im Gewindegrund
d_h	mm	Bohrungsdurchmesser der verspannten Teile
d_w	mm	Außendurchmesser der ebenen Kopfauflage
F_{Mmax}	N	Maximale Montagevorspannkraft
F_{Mmin}	N	Minimale Montagevorspannkraft
F_{MTab}	N	Tabellenwert der Montagevorspannkraft
D	mm	Außendurchmesser des Innengewindes
D_A	mm	Ersatz-Außendurchmesser des Grundkörpers in der Trennfuge
D_{AGr}	mm	Grenzaußendurchmesser, max. Durchmesser des Verformungskegels
α_x		Anziehungsfaktor
f_z	μm	Richtwerte für Setzbeträge bei massiven Stahlbauteilen
δ_s, δ_p	mm/N	Elastische Nachgiebigkeit von Bauteil/Schraube
δ_{sk}	mm/N	Elastische Nachgiebigkeit des Schraubenkopfes
φ	$^\circ$	Steigungswinkel des Schraubengewindes
l	mm	Länge, allgemein
l_k	mm	Klemmlänge
W	mm^3	Widerstandsmoment

1 Einleitung

Elektrifizierung und Leichtbau von Fahrzeugen als wirksame Maßnahmen zur Bewältigung der Energiekrise und der Umweltbelastungen. Die Energiedichte von Batteriepacks nimmt entsprechend den Anforderungen der Gesellschaft zu, und die daraus resultierenden Sicherheitsaspekte von Batteriepacks lösen in der Gesellschaft große Besorgnis aus. Um die Sicherheit und Praxistauglichkeit von Elektrofahrzeugen zu gewährleisten, ist es notwendig, die Sicherheit von Batteriepacks zu untersuchen.

Elektrofahrzeuge unterscheiden sich erheblich von konventionell angetriebenen Modellen in Bezug auf die Gesamtanordnung des Fahrzeugs, die Massenverteilung und die Energiespeichersysteme, wobei große Massenblöcke wie Energiespeicherbatterien mehr als 20 % der Politik und der Masse ausmachen. Aufgrund der Eigenschaften von Elektrofahrzeugen mit niedrigem Schwerpunkt, großer Masse und kleinen Modellen liegt der Schwerpunkt bei der Entwicklung der Batteriepacks auf Sicherheit.

In den letzten Jahren haben der steigende Ölpreis und das zunehmende Bewusstsein für den Umweltschutz dazu geführt, dass die Menschen ständig nach alternativen Energiequellen für den Fahrzeugverkehr suchen, und Elektrofahrzeuge mit ihren energiesparenden und umweltfreundlichen Eigenschaften heben sich zu einem wichtigen Entwicklungsschwerpunkt entwickelt. Diese Diplomarbeit konzentriert sich auf die Überprüfung der Sicherheit der Batteriepacks.

2 Wissenschaftliche Grundlagen

2.1 Grundlagen Finite-Element-Method

Die Methode der Finiten Elemente (FEM) ist ein numerisches Berechnungsverfahren zur Lösung von Problemstellungen der mathematischen Physik. Es ist ein auf geometrisch abgegrenzte Bereich (Elemente) angewandtes numerisches Näherungsverfahren. Es dient zur Lösung der Differentialgleichungen, die zur Beschreibung physikalischer Eigenschaften einer Struktur aufgestellt werden.

Im Allgemeinen ist die Finite-Elemente-Analyse in fünf Arbeitsschritte unterteilt: Idealisierung, Diskretisierung, Aufstellung des FE-Gleichungssystem, Lösung des FE-Gleichungssystem und Auswertung von Ergebnissen.

Das untersuchte Lösungsgebiet wird zunächst in Gitterzellen, die finiten Elemente eingeteilt. Im Finiten Element werden n Ansatzfunktionen definiert, die nur auf endlich vielen der Gitterzellen ungleich Null sind. Die möglichen Lösungen der numerischen Näherung werden durch eine Linearkombination der n Ansatzfunktionen innerhalb des Elements bestimmt. Die Differentialgleichungen und Randbedingungen, multipliziert mit Gewichtungsfunktionen und integriert über das Lösungsgebiet. Dieses Integral wird durch die Summe der Einzelintegrale der Finiten Elemente ersetzt. Die Ansatzfunktionen ist nur auf wenigen Elementen ungleich Null, so dass ein dünnbesetztes, häufig so großes Gleichungssystem entsteht, bei dem die Faktoren der Linearkombination unbekannt sind. Das Problem wird dann mit einer speziellen Methode der numerischen linearen Algebra gelöst.

2.2 Grundlagen der statischen Festigkeitsanalyse

Die lineare statische Finite-Elemente-Analyse ist im Bereich der Konstruktion und Simulation von Strukturen weit verbreitet. Die Materiallinearität stellt das lineare elastische Verhalten eines Materials dar, d. h. dem linearen Teil der Spannungs-Dehnungs-Kurve (ε - σ -Kurve) in der Werkstoffmechanik. Dieser lineare Teil entspricht dem Hookeschen Gesetz.

Das Hookesche Gesetz beschreibt die elastische Verformung von Festkörpern, wenn deren Verformung proportional zur einwirkenden Belastung ist.

Formel des Hookeschen Gesetzes:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Das Hookesche Gesetz beschreibt die Fähigkeit eines Objekts, einer elastischen Verformung zu widerstehen, wenn eine äußere Kraft auf es einwirkt.

Die allgemeine Gleichung für die Dynamik eines Objekts lässt sich aus der Theorie der klassischen Mechanik ableiten. In der Strukturdynamik ist die Bewegungsgleichung eines dynamisch belasteten Tragwerks die Grundlage der Berechnung:

$$M \cdot \ddot{x}(t) + D \cdot \dot{x}(t) + K \cdot x(t) = F(t) \quad (2)$$

Hierbei ist $F(t)$ der Lastvektor des Systems. M sind die Massematrizen, D sind die Dämpfungsmatrizen, und K sind Steifigkeitsmatrizen. Der Vektor $x(t)$ enthält die Verschiebungsgrößen. Der Vektor $\dot{x}(t)$ ist der Geschwindigkeitsvektor. Der Vektor $\ddot{x}(t)$ ist Beschleunigungsvektor.

Wenn Geschwindigkeit und Beschleunigung nicht berücksichtigt werden und die Last konstant ist, kann die Gleichung vereinfacht werden zu:

$$K \cdot x(t) = F(t) \quad (3)$$

Die Randbedingungen werden ebenfalls durch die Gleichungen (3) realisiert. Zum Beispiel, ein Knoten mit einer festen Randbedingung, der Wert der Verschiebung u dieses Knotens ist 0. Die Auflagerreaktionskraft f dieses Knotens muss mit Abaqus gelöst werden. Der Vektor der Knotenreaktionskräfte F wird in Gleichung (2) eingesetzt, um den Verschiebungsvektor x des Modellknotens zu erhalten. Sobald die einzelnen Knotenkräfte und Knotenverschiebungen gelöst sind, kann der Spannungsvektor für jede Zelle mit Hilfe der Gleichungen (4) berechnet werden.

$$\sigma = D \cdot B \cdot x \quad (4)$$

In Formel (4) ist σ der Spannungsvektor der Zelle. Daraus ergeben sich die Knotenverschiebungen, Knotenreaktionskräften und die Spannungen der Zelle. Die Abbildungen der berechneten Ergebnisse sind über das Post-Processing von Abaqus verfügbar.

2.3 Grundlagen Werkstofffestigkeit

Alle Bauteile werden unter dem Einfluss äußerer Kräfte verformt. Die inneren Kräfte im Werkstoffgefüge des Bauteils wirken diesen äußeren Kräften entgegen und widerstehen der Verformung. Innere und äußere Kräfte sind normalerweise im Gleichgewicht. Mit zunehmender äußerer Belastung des Bauteils, also mit zunehmender äußerer Kraft, steigen auch die inneren Widerstandskräfte im Werkstoff. Die mechanische Spannung ist ein Maß für die Spannung im Bauteil, und ist die mit der Flächeneinheit verbundene Kraft. Mechanische Spannungen werden in der Regel auf die unverformte Ausgangsquerschnittsfläche bezogen. Die internationale Einheit der Nennspannung ist N/mm^2 mit der Bezeichnung Pascal (Pa).

Festigkeit ist eine Werkstoffeigenschaft und beschreibt den mechanischen Widerstand, den ein Werkstoff einer plastischen Verformung oder Trennung entgegensetzt. Aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm werden die technisch relevanten Festigkeitskennwerte ermittelt. In Werkstoffprüfungen werden die Festigkeitsgrenzen durch Versuche ermittelt. /1/

2.4 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul (Youngscher Modul, E-Modul) ist ein Materialkennwert aus der Werkstofftechnik. Der Elastizitätsmodul beschreibt das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung in einem festen Körper, wenn dieser einer mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist. Werkstoffe mit hohem Elastizitätsmodul sind steif, Werkstoffe mit niedrigem Elastizitätsmodul sind weich. Der Grund dafür ist, dass je höher der Elastizitätsmodul eines Materials ist, desto größer ist der Widerstand dieses Materials gegen Verformung. Der Elastizitätsmodul ist die Steigung der Kurve des Spannungs-Dehnungs-Diagramms im Elastizitätsbereich.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (5)$$

Formel (5), σ bezeichnet die mechanische Spannung (Zugspannung), ε bezeichnet die Dehnung. Die Dehnung ist das Verhältnis zwischen dem Betrag der Längenänderung und der ursprünglichen Länge.

Wenn sich das Material in einem elastischen Verformungsprozess befindet, d. h. einem linearen Prozess im Spannungs-Dehnungs-Diagramm, ist der Elastizitätsmodul gegeben durch:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

Der Elastizitätsmodul hängt von verschiedenen Umgebungsbedingungen ab, wie Druck oder Temperatur, die sich auf die Materialeigenschaften auswirken können. In dieser Diplomarbeit wird der Elastizitätsmodul jedoch als eine Konstante betrachtet, da die durch die Umgebungsbedingungen verursachten Veränderungen vernachlässigbar sind.

2.5 Grundlagen Hookesche Gesetz

Das Hookesche Gesetz besagt, dass die elastische Deformation eines Körpers ε proportional zur angelegten Spannung σ ist. Im Allgemeinen wird das Hookesche Gesetz durch die lineare Tensorgleichung dargestellt.

$$\sigma = \tilde{\tilde{C}} \cdot \tilde{\varepsilon} \quad (7)$$

$\tilde{\tilde{C}}$ in Formel (7) ist der Elastizitätstensor, der die elastischen Eigenschaften des deformierten Materials darstellt.

Das Hookesche Gesetz gilt nur für lineare elastische Deformationen. Diese Bedingung ist normalerweise bei kleinen Deformationen erfüllt. Bei Deformationen oberhalb der Proportionalitätsgrenze ist die Verformung dagegen nichtlinear, d. h. die Spannung σ ist nicht mehr proportional zur Dehnung ε . In diesem Fall ist die Verformung noch reversibel. Die Deformation ist nur bei der plastischen Deformation irreversibel. Die Verformung erholt sich nicht vollständig, selbst wenn die Spannung nachlässt.

2.6 Widerstandsmoment

Als Widerstandsmoment W wird in der technischen Mechanik eine allein aus der Geometrie (Form und Maße) eines Balkenquerschnitts abgeleitete Größe bezeichnet. Bei Kräften senkrecht zu einer Bezugsachse will die Kraft den Körper biegen. Wird die Drehung durch Einspannung verhindert, entsteht ein Biege- oder Torsionsmoment.

Das Widerstandsmoment wird definiert als:

$$W = \frac{I}{a_{max}} \quad (8)$$

Mit Flächenträgheitsmoment I und dem maximalen senkrechten Abstand a_{max} der Randfaser (Querschnittsrand) zur neutralen (spannungsfreien) Faser. /2/

Trägheits- und Widerstandsmomente

Querschnitt	Biegung	
	Trägheitsmoment	Widerstandsmoment
	$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12}$ $I_y = \frac{h \cdot b^3}{12}$	$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6}$ $W_y = \frac{h \cdot b^2}{6}$
	$I_x = I_y = \frac{a^4}{12}$	$W_x = W_y = \frac{a^3}{6}$
	$I_x = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{12}$ $I_y = \frac{H \cdot B^3 - h \cdot b^3}{12}$	$W_x = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{6 \cdot H}$ $W_y = \frac{H \cdot B^3 - h \cdot b^3}{6 \cdot B}$
	$I_x = I_y = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \approx \frac{d^4}{20}$	$W_x = W_y = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \approx \frac{d^3}{10}$
	$I_x = I_y = \frac{\pi}{64} \cdot (d_1^4 - d_2^4)$	$W_x = W_y = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_1^4 - d_2^4}{d_1}$

Bild 2-1 Widerstandsmoment über Querschnitt

3 Parametrische Modellierung von Batteriepacks

Mit der Reife der Lithiumbatterietechnologie importieren viele Automobilhersteller komplette Batteriepakete von OEMs. So nutzt BYD beispielsweise seine selbst entwickelte Blade-Batterie, um ein modulfreies Konzept für Batteriepakete zu entwickeln, und Great Wall Motors Wabenförmige Batterie liefert nicht nur Batteriepakete an Great Wall Ola, sondern beliefert auch andere Marken als Komponentenhersteller.

Die Parameter des Batteriepakets wirken sich auf die Reichweite des gesamten Fahrzeugs aus, während die mechanische Leistung der Strukturkonstruktion die Sicherheit des Fahrzeugs beeinflusst.

3.1 Einführung in die Batteriepacks

3.1.1 Platzierung des Batteriepacks

In Elektrofahrzeugen ist das Batteriepack ein relativ großes und schweres Bauteil. Im Vergleich zu herkömmlichen Autos. Elektroautos haben keine Komponenten wie Motoren und Getriebe, aber es ist immer noch schwierig, den perfekten Platz für das Batteriepack zu finden. Im Hinblick auf den Standort der Batteriepacks für Elektrofahrzeuge sind die folgenden Punkte zu beachten:

Die Batteriepacks von Elektrofahrzeugen befinden sich im Allgemeinen zwischen 120 und 200 mm über dem Boden. So viele Batterien wie möglich anordnen, um die Reichweite zu erhöhen und weniger häufig aufzuladen. Der schmale, flache Raum zwischen dem Fahrerhaus und dem Fahrgestell eines Elektrofahrzeugs muss daher voll ausgenutzt werden.

Berücksichtigen die Auswirkungen der Befestigungsposition des Batteriesatzes auf die Sicherheit des gesamten Elektrofahrzeugs. Vermeiden die Montage des Batteriepacks an der vorderen Stoßstange, am Heck des Elektrofahrzeugs und an der Seite. Andernfalls, wenn ein Elektrofahrzeug in einen Aufprall verwickelt ist. Der Batteriepack wird beschädigt, wodurch die Batteriezellen durchstoßen werden und ein Brand und eine Explosion verursacht werden.

Batteriepacks wiegen in der Regel zwischen 400 und 700 kg. Elektrofahrzeuge erzeugen während der Fahrt erhebliche statische und dynamische Belastungen. Insbesondere bei Elektrofahrzeugen, die auf unebenen Straßen gefahren werden, besteht die Gefahr von

Ermüdungsschäden an der mechanischen Struktur des Batteriepacks durch anhaltende Vibrationen und Stöße.



Bild 3-1 Abbildung Montageposition des Batteriepacks /3/

3.1.2 Form des Batteriepacks

In den Anfängen der Entwicklung von Elektrofahrzeugen wurden die meisten Elektrofahrzeuge von herkömmlichen Kraftfahrzeugen umgerüstet. Ausbau des Motors, des Getriebes und der Getriebeeinheit. Mehr als genug Platz im Elektrofahrzeug für die Unterbringung des Batteriepacks. Zum Beispiel das T-Batteriepack, das im Buick Velite5.



Bild 3-2 Velite5 T-Batteriepack /4/

Es gibt auch spezielle Formen von Batteriepacks, die aufgrund der Energiedichte der Batterien entwickelt wurden. Zum Beispiel das Batteriepack für den Volkswagen E-Golf.



Bild 3-3 Volkswagen E-Golf Batteriepack /5/ /6/

Mit der Einführung von ternären Lithiumbatterien und Lithium-Eisenphosphat-Batterien sind Batteriepacks für Elektrofahrzeuge in einem einheitlichen flachen, einteiligen Pack erhältlich, z. B. für das Tesla Model 3 und den Volkswagen MEB. Diese Form der Batterie ist als Teil des Fahrgestells am Rahmen montiert, wodurch der Raum optimal genutzt wird und der Schwerpunkt des Fahrzeugs sinkt. Da es Teil des Fahrgestells ist, werden die Steifigkeit und die Festigkeitseigenschaften des Fahrgestells verbessert.

Daher wird in dieser Diplomarbeit auch eine einteilige Batteriepackstruktur verwendet. Die vier Ecken des Batteriepacks sind mit abgerundeten Ecken gestaltet. Aus Sicht des Herstellungsprozesses einfacher zu produzieren, und es reduziert die Spannungskonzentration während des Zusammenstoßes und des Extrusion.

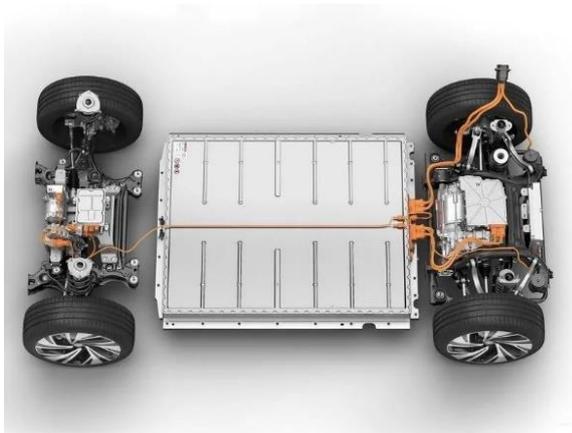


Bild 3-4 Volkswagen MEB und Tesla Model S /7/ /8/

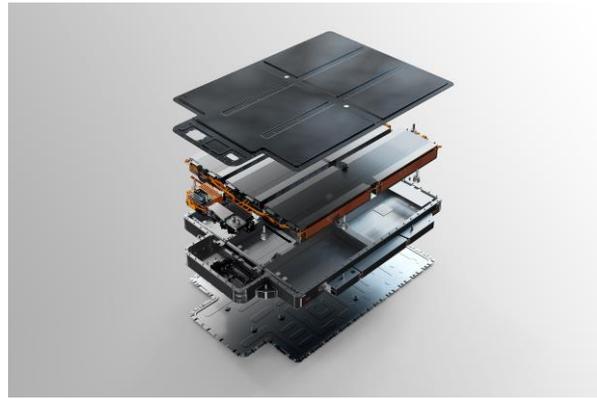


Bild 3-5 NIO ES8 Batteriepack und Explosionszeichnung /9/

Daher wird in dieser Diplomarbeit auch eine integrierte, einteilige Batteriepackstruktur verwendet.

3.2 Anforderungen an die Struktur der Batteriepacks

Die Konstruktion des Batteriegehäuses muss in Verbindung mit seinen Eigenschaften analysiert werden. Obwohl das Fahrzeug durch Dämpfungsvorrichtungen wie die Fahrzeugaufhängung gedämpft wird, können Vibrationen von unebenen Straßenoberflächen über die Karosserie auf das Batteriepaket übertragen werden. Daher sollte bei der Konstruktion des Akkupacks darauf geachtet werden, dass der tragende Balken eine ausreichende Festigkeit aufweist. Der Tragbalken muss in der Lage sein, das Gewicht des Batteriepacks zu tragen und gleichzeitig eine ausreichende Lebensdauer zu haben.

Obere Gehäuseabdeckung:

Das Gehäuse des Batteriepacks ist im Allgemeinen nicht sehr dick, insbesondere die obere Gehäuseabdeckung, die im Allgemeinen aus einem dünnwandigen Stück verzinktem Stahlblech besteht, das aus DC01-Material gestanzt und geschweißt wurde.

Wenn die Vibrationen von außen ein bestimmtes Niveau erreichen, wird die obere Abdeckung in hohem Maße verschoben, daher sollte auch die Steifigkeit der oberen Abdeckung berücksichtigt werden.

Batterie:

Die zylindrische Lithium-Batteriezelle besteht aus fünf Hauptteilen: Metallhülle, positive Elektrode, negative Elektrode, Diaphragma und Elektrolyt. Das Diaphragma ist zerbrechlich und kann leicht von harten Gegenständen durchstoßen werden, was zu einem Kurzschluss

zwischen den positiven und negativen Elektroden führt und eine große Menge Wasserstoffgas erzeugt, während die durch den Kurzschluss verursachten Funken eine brennende Explosion verursachen können. Dies erfordert, dass das Gehäuse des Batteriepacks ausreichend stabil ist, um Verformungen zu widerstehen.

Im Allgemeinen liegt die Betriebstemperatur von Lithiumbatterien zwischen -20°C und 60°C , aber wenn die Temperatur unter den Nullpunkt sinkt, verringert sich die Leistung beim Laden und Entladen, so dass das Auto im Winter eine ausreichende Reichweite haben sollte und die Batterie im Sommer aufgrund der hohen Temperatur nicht überhitzt. Daher sollte das Gehäuse des Batteriepacks so konstruiert sein, dass genügend Platz für interne Kühl- und Heizvorrichtungen vorhanden ist. Viele Batteriepacks werden zurzeit wassergekühlt, was ihre Konstruktion erschwert, so dass sie wasser-, staub- und korrosionsbeständig sein müssen.

Modulhalterung:

Die Modulhalterung ist so leicht wie möglich gestaltet. Und die Abstände zwischen den Batteriemodulen sollten groß sein, um Kontaktkurzschlüsse zu vermeiden.

Zielmodell-Kilometerstand	400km
Verbindungsmethode	Schweißen, Kleben, Geschraubte Verbindungen
Gewicht des Batteriepacks	400-550kg
Anzahl der Montagestellen für den Batteriepack	12
Materialien für das Gehäuse des Batteriepacks	DC01, RSt37
Anforderungen an die Steifigkeit des Batteriegehäuses	Keine Extrusionsverformung im Inneren der Gehäuse unter extremen Betriebsbedingungen

Tabelle 3-1 Anforderungen an die Konstruktion

3.3 Modell des Batteriepacks

Auf der Grundlage der oben genannten Konstruktionsanforderungen wird das endgültige Batteriepack wie folgt dargestellt.

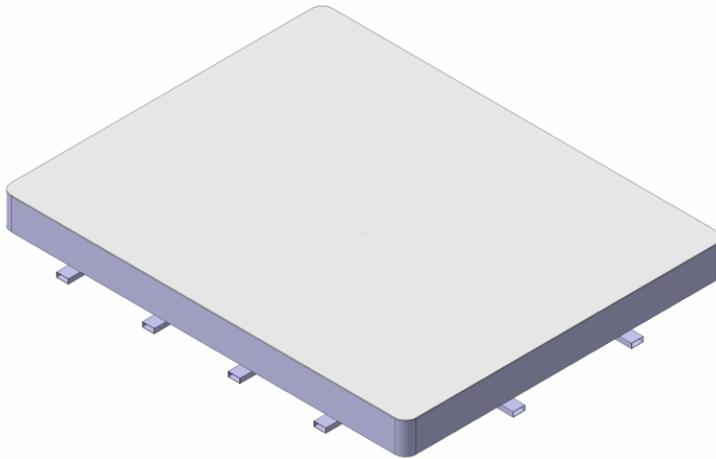


Bild 3-6 Montagezeichnung des Batteriepacks

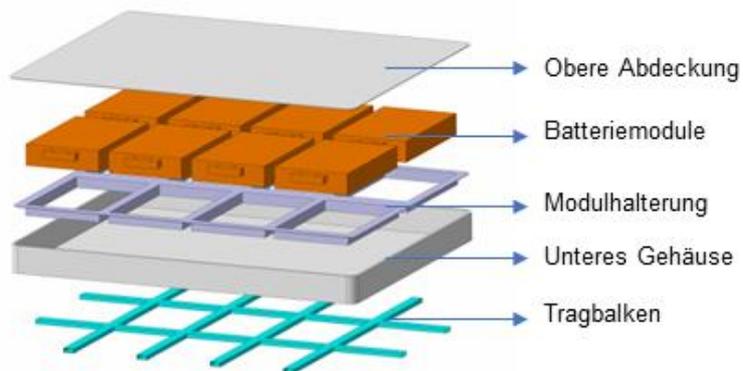


Bild 3-7 Explosionszeichnung des Batteriepacks

Das Modell besteht aus fünf Teilen: der oberen Abdeckung, dem Batteriemodul, der Modulhalterung, dem unteren Gehäuse und dem Tragbalken.

Die Dicke der oberen Abdeckung beträgt 4 mm. Die Dicke der vier Seiten des unteren Gehäuses beträgt 12 mm, die Dicke der Bodenplatte des unteren Gehäuses beträgt 4 mm. Die Dicke der Modulhalterung beträgt 3 mm.

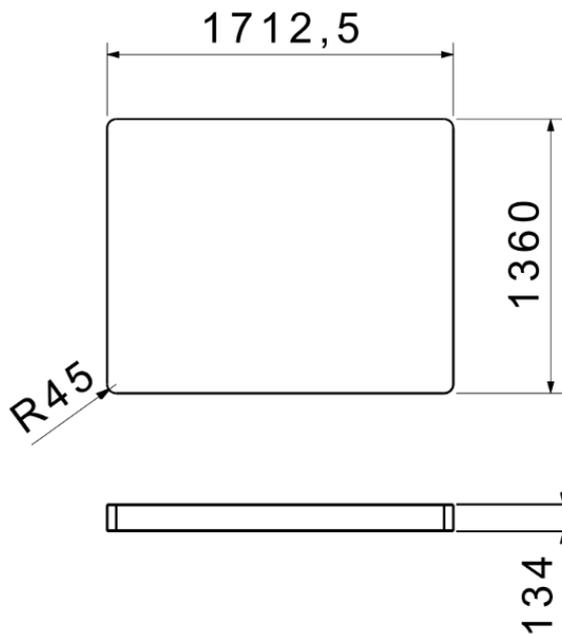


Bild 3-8 Ursprüngliches Profil und Abmessungen des Batteriepacks

Das Batteriepack enthält insgesamt acht Batteriemodule. Und jedes Batteriemodul ist mit vier Schrauben an der Modulhalterung befestigt.

Die Modulhalterung wird durch Schweißen an der Innenseite des unteren Gehäuses befestigt.

Der tragende Balken ist ebenfalls durch Schweißen mit dem unteren Gehäuse verbunden.

4 Abaqus-basiert Finite-Elemente-Modellierung

4.1 Modell-Import und Materielle Parameter

Das fertige 3D-Modell in Catia wurde in Abaqus importiert. Und die Komponenten wurden nach Nummern umbenannt, um die Bearbeitung der einzelnen Komponenten zu erleichtern. Weil die dynamische Analyse des Batteriepacks nicht berücksichtigt wurde, wurde nur die statische Festigkeitsanalyse durchgeführt, so dass die Komponenten in 3D modelliert wurden.

Der erste Schritt besteht darin, die Materialparameter und Querschnittseigenschaften der einzelnen Komponenten hinzuzufügen. Zu den Materialparametern gehören Dichte, Elastizitätsmodul, Poisson-Zahl und Fließgrenze. Die Materialparameter können experimentell ermittelt werden und sind für jedes Modell annähernd gleich, so dass sie durch Konsultation materialbezogener Informationen ermittelt werden können. Die Parameter des Batteriemoduls sind homogenisierte Körper. Die spezifischen Materialparameter sind in der nachstehenden Tabelle aufgeführt. /10/

Komponent	Material	Dichte (mm)	Elastizitätsmodul (t/mm ³)	Poissonsche Zahl	Streckgrenze (MPa)
Gehäuse	DC01	7,85E-09	2,09E+05	0,29	270
Modulhalterung	DC01	7,85E-09	2,09E+05	0,29	270
Batteriemodule	Homogenisierung	7,90E-09	3000	0,3	235
Tragende Balken	RSt37	1,40E-09	2,10E+05	0,3	

Tabelle 4-1 Materielle Parameter für Batteriepack

Die Gesamtmasse des ursprünglichen Batteriepacks beträgt 516 kg.

4.2 Mesh

Mit dem Mesh-Modul von Abaqus gilt: Je feiner die Vernetzung, desto genauer die Berechnungsergebnisse. Deshalb sollte die Vernetzung so fein wie möglich sein. Es sollte jedoch auch beachtet werden, dass eine zu feine Vernetzung zu viele Elemente zur Folge hat und damit die Berechnungszeit von Abaqus erhöht.

4.2.1 Kriterien für Vernetzung

Die Vernetzung der Zellen ist einer der wichtigsten Schritte in der Finite-Elemente-Simulationsanalyse und ist ein Prozess der Diskretisierung des Kontinuums, das durch einen Block von Zellen dargestellt wird. Für ein Kontinuum gibt es eine unendliche Anzahl von Freiheitsgraden durch die Unterteilung in eine endliche Anzahl von Maschenzellen wird das Problem in eine endliche Anzahl von Freiheitsgraden umgewandelt. Praktische Probleme in Gleichungsprobleme verwandeln.

Wahl des Gittertyps:

Da die Struktur des Batteriemodells nicht komplex ist, wurde für die Vernetzung aller Komponenten ein hexaedrisches Netz gewählt. Und durch die Aufteilung der verschiedenen Bereiche können alle Komponenten in strukturierter Vernetzung verwendet werden. Der Elementtyp ist C3D8R. Für das Solid-Element C3D8R gibt es acht Knoten mit jeweils drei Freiheitsgraden (Verschiebung in X-, Y- und Z-Richtung). Das C3D8R-Element hat 6 Flächen und vier Integrationspunkte pro Fläche.

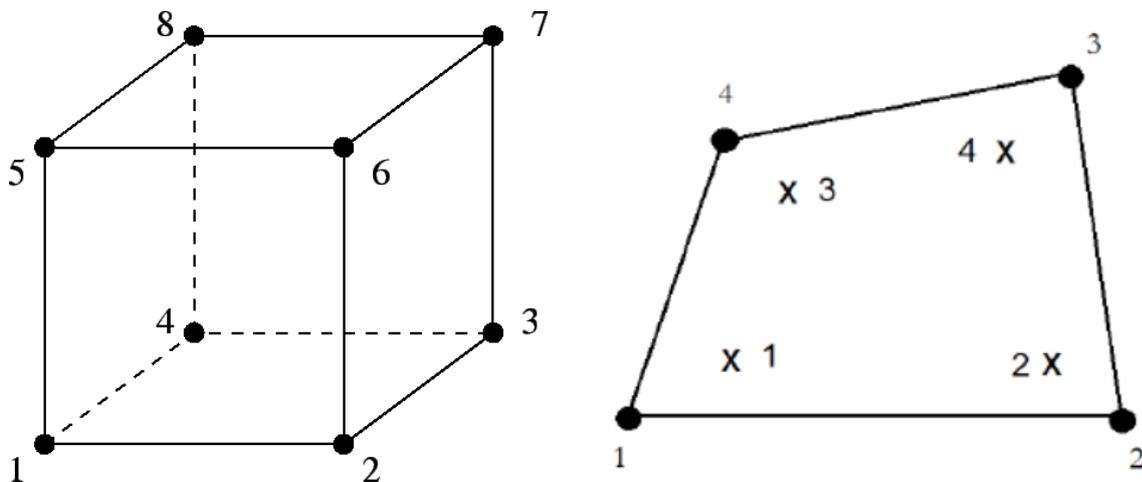


Bild 4-1 Elementtyp C3D8R 8-Knoten und vier Integrationspunkte pro Fläche

Dichte des Gitters:

Bei der Vernetzung der Komponenten des Batteriepacks. Je kleiner und zahlreicher die Gitterzellen sind und je höher die Gitterdichte ist, desto höher ist die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Berechnungslösung und desto näher sind die Simulationsergebnisse an der Realität.

Da jedoch die Anzahl der Knoten zunimmt, wird auch die Anzahl der Freiheitsgrade größer und die Anzahl der zu lösenden Gleichungen steigt, was zu einer übermäßigen Anzahl von Matrixoperationen und einem erhöhten Verbrauch von Hardware-Ressourcen wie Computerprozessoren und Speicher führt.

Die Anzahl und die Dichte der Gitter sollten daher entsprechend der tatsächlichen Situation festgelegt werden. Bei der statischen Festigkeitsanalyse kann die Zellengröße des Netzes etwas größer sein, wenn der Schwerpunkt nur auf der Verschiebungsverformung liegt.

4.2.2 Inspektion und Einstellung des Gitters

Einer der wichtigsten zu beachtenden Punkte ist die Vernetzung der Schrauben und Schraubenlöcher, die zu großen Abweichungen in den Berechnungsergebnissen führen kann, wenn die Vernetzung nicht optimal ist.

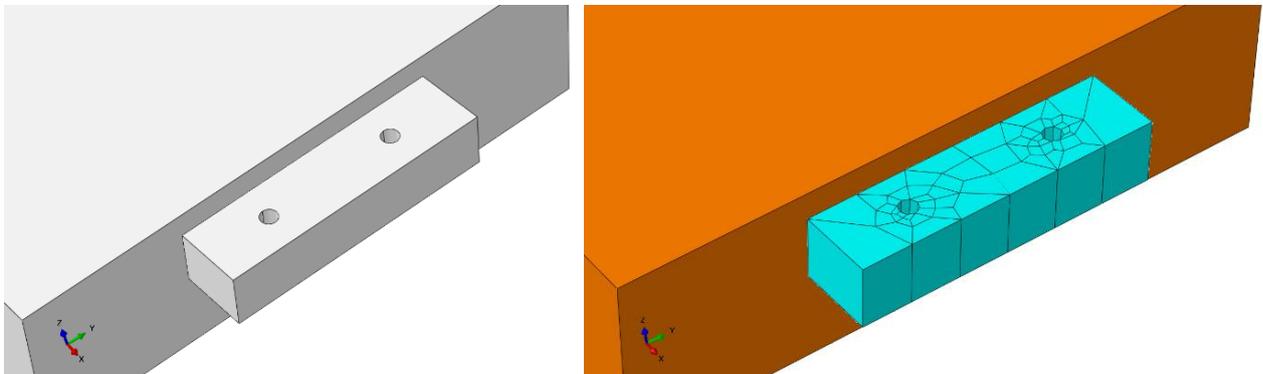


Bild 4-2 Vernetzung von nicht partitionierten Schraubenlöchern

Für Schraubenlöcher und Schrauben muss das Bauteil vor der Vernetzung partitioniert und eingerichtet werden. Wie in Bild 4-2 dargestellt, dies ist das Schraubenloch im Batteriemodul. Wenn das Bauteil direkt vernetzt wird, sind die Ergebnisse der Vernetzung nicht ideal.

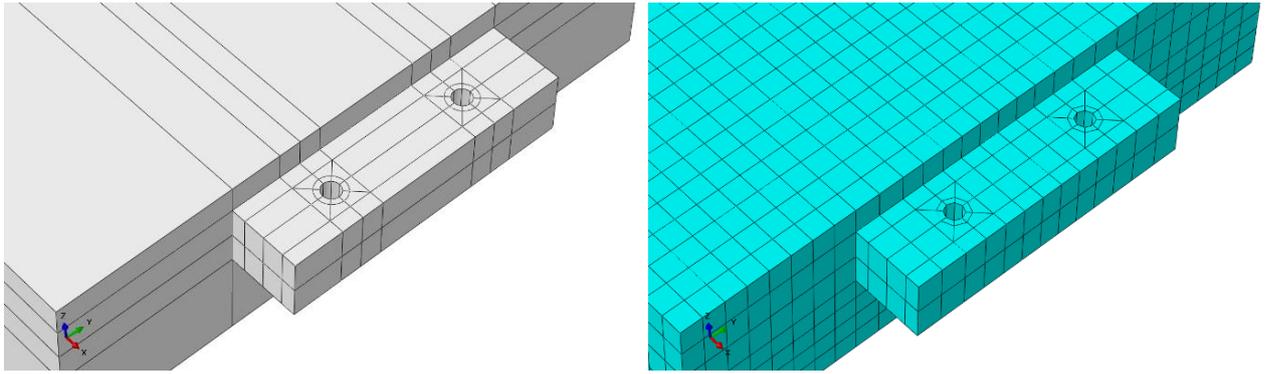


Bild 4-3 Vernetzung von partitionierten Schraubenlöchern

Wie in Bild 4-3 dargestellt, ist das Ergebnis der Partitionierung und anschließenden Vernetzung des Bauteils. Durch die Partitionierung des Vorgangs wird die Qualität des Gitters verbessert und die Ergebnisse werden genauer sein.

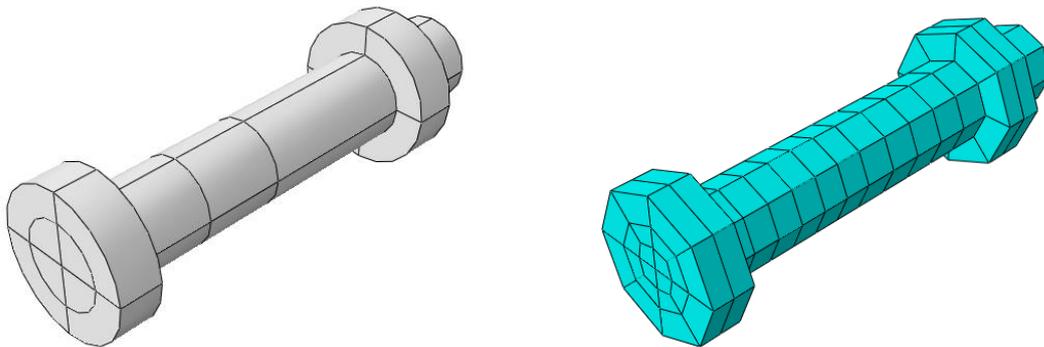


Bild 4-4 Vernetzung von partitionierter Schraube

4.3 Interaktion, Belastungen und Randbedingungen

4.3.1 Interaktion

Es ist sehr wichtig, Verbindungseigenschaften in Finite-Elemente-Simulationen zu erstellen. Dies ist ein entscheidender Schritt bei der Übertragung des Reaktionsverhaltens von zwei Materialkomponenten mit unterschiedlichen Eigenschaften. Unter verschiedenen Betriebsbedingungen kann die Verbindungseinheit die Zwangsbeziehungen und Verbindungen zwischen den Komponenten in realen Situationen effektiver und genauer simulieren.

Der Anschluss von Batteriepacks ist sehr komplex. In dieser Diplomarbeit werden zwei Hauptverbindungsverfahren angewandt: Schraubverbindungen und Schweißen.

4.3.1.1 Schweißverbindungen

Der erste ist die Verbindung zwischen dem tragenden Balken und dem unteren Gehäuse. In der Praxis wird die Verbindung durch Schweißen zwischen dem tragenden Balken und dem unteren Gehäuse hergestellt. In dieser Diplomarbeit wird die Festigkeit der Schweißung nicht berücksichtigt, die Analyse konzentriert sich auf die Verformung des tragenden Balkens und des Gehäuses. Verwendung des Bindung-Befehls in der Abaqus-Software, um zu simulieren, dass sich zwei Teile in aneinander geschweißter Verbindung befinden. Ebenso wird die Modulhalterung über den Bindung- Befehl mit dem Gehäuse verbunden.

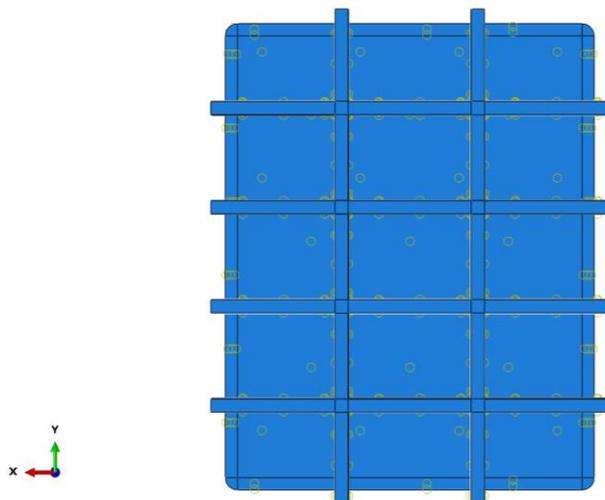


Bild 4-5 Bindung-Verbindung (Tie) des unteren Gehäuses mit dem Tragbalken

Die Verbindung zwischen dem oberen Deckel und dem unteren Gehäuse ist im Prinzip als Schraubverbindung ausgeführt. Die Verbindung zwischen dem oberen Deckel und dem unteren Gehäuse ist im Prinzip eine Schraubverbindung. Bei Finite-Elemente-Simulationen

spielt es jedoch keine Rolle, wie die obere Abdeckung mit dem unteren Gehäuse verbunden ist. Der Grund dafür ist, dass es bei der statischen Festigkeitsanalyse und der Steifigkeitsanalyse keine Spannungen oder Verformungen in der Verbindung zwischen den beiden gibt.

4.3.1.2 Schraubverbindungen

Die Verbindung zwischen dem Batteriemodul und dem Modulträger ist als Schraubverbindung ausgeführt. Aufgrund der großen Masse des Batteriemoduls wurden für diese Diplomarbeit Anschlagsschrauben M10x50-10,9 gewählt, um ein Herausfallen des Batteriemoduls aus der Modulhalterung unter extremen Betriebsbedingungen zu verhindern.

Um die Simulationsergebnisse für das Batteriepack genauer zu machen, werden die Schrauben zur Befestigung der Batteriemodule mit Vorspannkraft versehen.

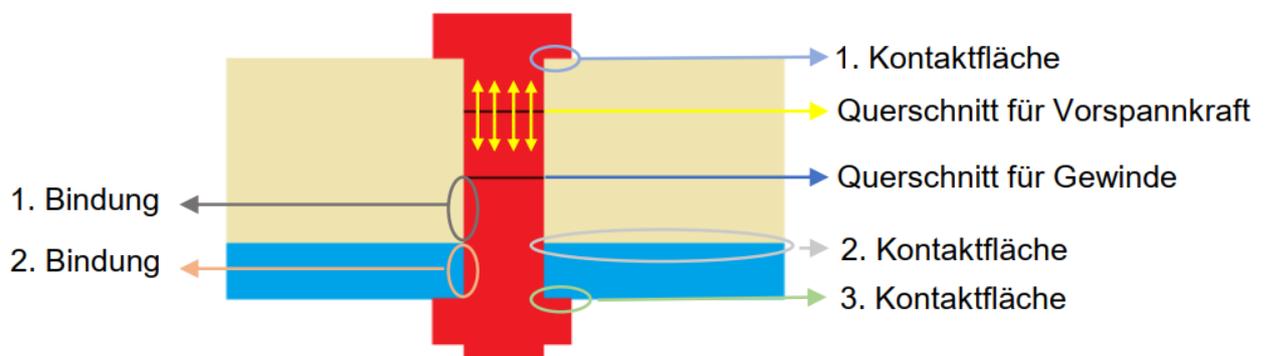


Bild 4-6 Querschnitt von Schraubverbindung

Wie in Bild 4-6 dargestellt, ist der rote Teil der Schraube, der gelbe Teil ist der Befestigungspunkt für das Batteriemodul und der blaue Teil ist die Modulhalterung. Für jede Schraube sind drei Kontakt-Befehle und zwei Bindung-Befehle erforderlich. Die spezifischen Bindungsbeziehungen sind in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Interaktion	Master surface	Slave surface
1. Kontakt-Befehl	Oberseite der Befestigungsstelle des Batteriemoduls	Unterseite der Schraube-Kopfauflage
2. Kontakt-Befehl	Unterseite der Befestigungsstelle des Batteriemoduls	Oberseite der Modulhalterung
3. Kontakt-Befehl	Unterseite der Modulhalterung	Oberseite der Schraubenmutter
1. Bindung-Befehl	Gewindeloch für Batteriemodul	Schraubengewinde
2. Bindung-Befehl	Gewindeloch für Modulhalterung	Schraubengewinde

Tabelle 4-2 Interaktion von Schraubverbindungen

4.3.2 Belastung (Load)

In dieser Diplomarbeit ist es unabhängig von der Art der Simulationsanalyse notwendig, eine Last auf die Vorspannkraft der Schraube zu anlegen. Bei allen Analysetypen sind alle Lasten für die Schraubenvorspannung konstant.

Für verschiedene Arten von Analysen müssen verschiedene andere Lasten angewendet werden. Die einzelnen Lastarten werden in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

4.3.2.1 Berechnung der Vorspannkraft

Der Wert der Vorspannkraft wird durch eine analytische Rechnung realisiert, und der Wert der Vorspannkraft hängt von folgenden Faktoren ab:

- Materialkennwerten
- Nenndurchmesser, Klemmlänge
- Gewindereibungsbeiwerten
- Nachgiebigkeiten
- Plattengeometrie
- Krafteinleitungsfaktor
- Fugenanzahl
- Rauheiten
- Anziehverhalten

Die für diese Diplomarbeit gewählten Schrauben sind M10x50-10,9. Mit Außendurchmesser des Außengewindes $d = 10mm$, Klemmlänge $l_K = 38mm$, Steigung $P = 1,5$, Außendurchmesser der ebenen Kopfaufgabe $d_w = 14,6mm$, Bohrungsdurchmesser der verspannten Teile $d_h = 11,0mm$, Anziehungsfaktor $\alpha_A = 1,6$ und Tabellenwert der Montagevorspannkraft $F_{MTab} = 43,4kN$. /11/

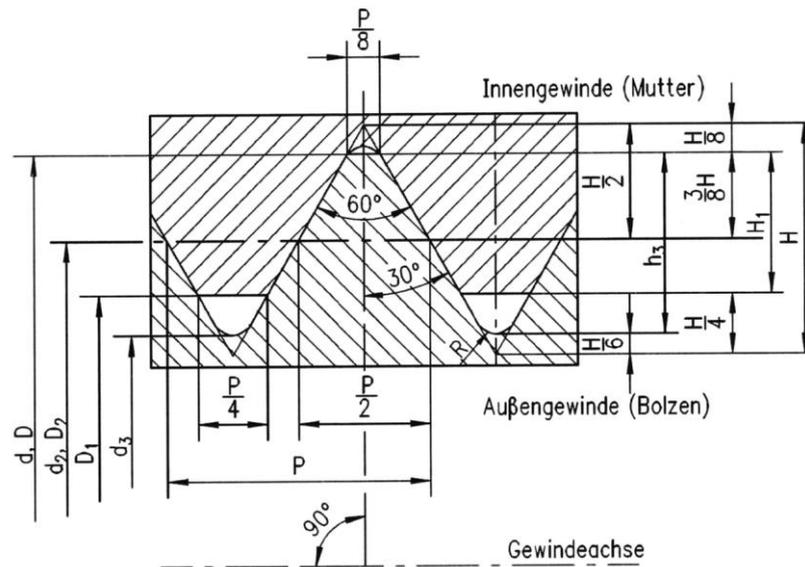


Bild 4-7 Schraube-Vorspannkraft

Die Lösung durch Außendurchmesser des Außengewindes und Steigung ergibt Flankendurchmesser des Außengewindes und Kerndurchmesser des Außengewindes im Gewindegrund:

$$d_2 = d - 0,65 \cdot P = 9,025\text{mm} \quad (9)$$

$$d_3 = d - 1,23 \cdot P = 8,155\text{mm} \quad (10)$$

$$d_s = \frac{d_2 + d_3}{2} = 8,59\text{mm} \quad (11)$$

Minimale Montagevorspannkraft von d_s und Anziehungsfaktor α_A

$$F_{Mmin} = \frac{F_{MTab}}{\alpha_A} = 27125\text{N} \quad (12)$$

$$\delta_{Gew} = \frac{l_{Gew}}{E_S \cdot A_{d3}} = \frac{l_K}{E_S \cdot \frac{\pi}{4} d_3^2} = 3,464 \cdot 10^{-6} \text{mm/N} \quad (13)$$

$$(\delta_{SK} + \delta_{GM}) \approx \frac{1,6}{E_S \cdot d} = 0,762 \cdot 10^{-6} \text{mm/N} \quad (14)$$

$$\delta_s = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_{Gew} + (\delta_{SK} + \delta_{GM}) = 4,226 \cdot 10^{-6} \text{mm/N} \quad (15)$$

$$D_{AGr} = d_w + w \cdot l_K \cdot \tan \varphi = 37,4\text{mm} \quad (16)$$

$$D_A = 80\text{mm}$$

$$D_A > D_{AGr}$$

$$\delta_p = \frac{2 \cdot \ln \left[\frac{(d_h + d_h) \cdot (d_w + w \cdot l_k \cdot \tan \varphi - d_h)}{(d_h - d_h) \cdot (d_w + w \cdot l_k \cdot \tan \varphi + d_h)} \right]}{w \cdot E_p \cdot \pi \cdot d_h \cdot \tan \varphi} = 0,623 \cdot 10^{-6} \text{ mm/N} \quad (17)$$

$$f_z = 14,5 \cdot 10^{-3}$$

$$F_z = \frac{f_z}{\delta_s + \delta_p} = 2990,55 \text{ N} \quad (18)$$

$$F_{vor} = F_{Mmin} - F_z = 24134,45 \text{ N} \quad (19)$$

Die endgültige Vorspannkraft F_{vor} für die Schrauben wurde mit 24134,45N ermittelt.

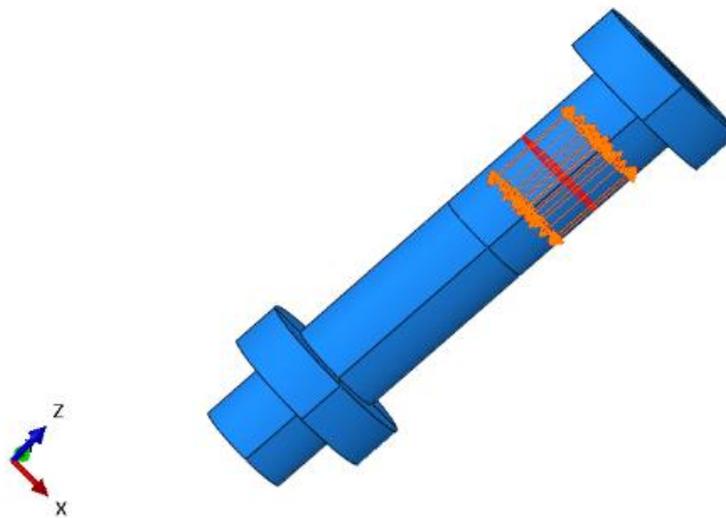


Bild 4-8 Vorspannkraft-Belastung der Schraube

4.4 Einheiten in Abaqus

Abaqus kennt keine Einheiten, daher muss auf ein konsistentes Einheitensystem geachtet werden. In dieser Diplomarbeit wird das SI-Einheitensystem verwendet.

Größe	Länge	Kraft	Masse	Zeit	Druck, Spannung	Dichte
SI-System(mm)	mm	N	T (Tonne)	s	MPa=N·mm ⁻²	t·mm ⁻³

Tabelle 4-3 SI-System (mm)

4.5 Erstellung von Analyseschritten (Step)

Am Beispiel der statischen Festigkeitsanalyse des Batteriepacks. Die Verformung des Batteriepacks tritt auf, wenn der Batteriepack externen statischen oder quasistatischen

Belastungen ausgesetzt ist. Solche Belastungen können auch als quasistatisch angenähert werden, wenn das System einer zeitabhängigen Belastung ausgesetzt ist, die sich sehr langsam ändert. Daher ist bei der Erstellung des Analyseschrittes der Static, General-Typ zu wählen.

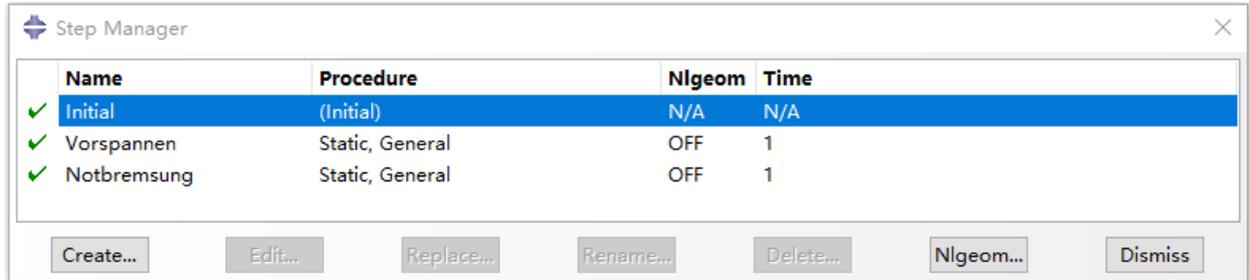


Bild 4-9 Zwei Analyseschritte

Neben dem initialen Analyseschritt müssen insgesamt zwei Analyseschritte angelegt werden: Vorspannung und Statische Festigkeitsanalyse.

Der Zweck des Vorspannung-Analyseschnittes besteht darin, Vorspannkraft auf alle Schrauben anzuwenden.

Time period:

Nlgeom: Off (This setting controls the inclusion of nonlinear effects of large displacements and affects subsequent steps.)
 On

Automatic stabilization:

Bild 4-10 Zeitspanne in Abaqus

In Abaqus ist die Zeitspanne 1 für den statischen Analyseschritt, was sich nicht auf eine Sekunde bezieht, sondern auf den relativen Zeitbegriff, der für den Abschluss der gesamten Analyse erforderlich ist. Die Nlgeom-Option muss nicht aktiviert werden, da es bei der Analyse des Batteriepacks keine große Verschiebung gibt.

Basic **Incrementation** Other

Type: Automatic Fixed

Maximum number of increments:

Increment size:	Initial	Minimum	Maximum
	<input type="text" value="0.01"/>	<input type="text" value="1E-06"/>	<input type="text" value="0.1"/>

Bild 4-11 Inkrement in Abaqus

Ein Inkrement ist ein Teil eines Schrittes. Bei nichtlinearen Analysen wird die Gesamtlast, die in einem Schritt aufgebracht wird, in kleinere Inkremente aufgeteilt, damit der nichtlineare Lösungsweg verfolgt werden kann. Daher ist Inkrement der Teil der Gesamtlast, der schrittweise aufgebracht wird. Um genauere Simulationsergebnisse zu erhalten, wird das anfängliche Inkrement auf 0,01, das minimale Inkrement auf 1E-06 und das maximale Inkrement auf 0,1 in jedem Analyseschritt gesetzt. Und die maximale Anzahl der Inkremente auf 10000 setzen.

5 Statische Festigkeitsanalyse

Dieses Kapitel befasst sich mit der Simulationsanalyse der abgeschlossenen parametrischen Modellierung des Batteriepacks.

Die statische Festigkeitsanalyse in dieser Diplomarbeit untersucht die Auswirkung von konstanten Trägheitslasten auf die mechanische Struktur des Batteriepacks. Die Ergebnisse der Simulation beziehen sich nur auf die Masse und die Gravitationsbeschleunigung. Durch die Berechnung der maximalen Verformung und der maximalen Spannungen im Gehäuse des Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen wie Bremsen, Kurvenfahrten und Bodenwellen. Überprüfung der Spannungs- und Dehnungsverteilung, um festzustellen, ob die Struktur des Elektrofahrzeug-Batteriepacks ihre Festigkeitsgrenze erreicht hat. Obwohl die Last durch Beschleunigung aufgebracht wird. Aus dem zweiten Newtonschen Gesetz ist jedoch bekannt, dass die auf ein Objekt wirkende Kraft proportional zur Größe der Beschleunigung ist, wenn die Beschleunigung und die Masse konstant sind. Es ist die Kraft und nicht die Beschleunigung, die letztlich auf den Knoten wirkt. Dies ist ein quasi-statischer Prozess.

5.1 Belastungen und Randbedingungen

Die Belastungen, denen die Batteriepacks während des Betriebs von Elektrofahrzeugen ausgesetzt sind, sind äußerst komplex. Kein perfektes Design für Betriebsbedingungen kann alle Belastungen simulieren, denen die Struktur eines Batteriepacks ausgesetzt ist. Um die Spannungs- und Dehnungsverteilung des Batteriepacks während des Fahrens eines Elektrofahrzeugs in der Praxis genau wiederzugeben, müssen daher einige typische Betriebsbedingungen ausgewählt werden, um das Batteriepack für die statische Festigkeitsanalyse zu simulieren. In dieser Diplomarbeit wird das Batteriepaket einer statischen Festigkeitsanalyse unter holprigen Bedingungen, Notbremsbedingungen und Kurvenfahrten unterzogen.

5.1.1 Belastungen

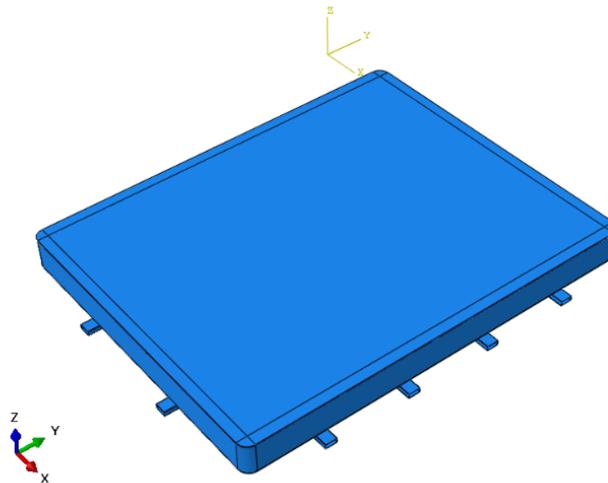


Bild 5-1 XYZ-Achse des Batteriepacks

Die X-Richtung ist die linke Seite der Fahrtrichtung des Elektrofahrzeugs.

Die Y-Richtung ist die entgegengesetzte Richtung der Fahrtrichtung des Elektrofahrzeugs. Daher sollte die Beschleunigungsbelastung bei einer Notbremsung in Y-Richtung gerichtet sein.

Die Z-Richtung ist die Richtung, die der Richtung der Gravitationsbeschleunigung entgegengesetzt ist.

Für Notbremsung:

Basierend auf den Betriebsbelastungen in den einschlägigen Referenzen. Gegenwärtig beträgt der Notbremsweg für ein Elektrofahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h in der Praxis zwischen 35 und 40 m. Aus der Gleichung $2 \cdot a \cdot x = v^2 - v_0^2$ ergibt sich, dass die Beschleunigung an diesem Zeitpunkt ungefähr $10m/s^2$ beträgt. Der Batteriepack wird einer Beschleunigung von 1,05 G ausgesetzt, wobei G die Gravitationsbeschleunigung ist.

Für Bodenwellen und scharfen Kurven:

Nach den relevanten Referenzen. In dieser Diplomarbeit wird die Beschleunigung eines Elektrofahrzeugs in einer scharfen Kurve mit 0,75 G festgelegt. Die Beschleunigung von Elektrofahrzeugen über Bodenwellen ist 3G.

Der für diese Diplomarbeit gewählte Wert für die Gravitationsbeschleunigung beträgt $9,81\text{m/s}^2$. In der Abaqus-Software ist der Gravity-Befehl erforderlich, um das gesamte Batteriepack zu belasten.

	Beschleunigung in X-Richtung	Beschleunigung in Y-Richtung	Beschleunigung in Z-Richtung
Notbremsung	0	1,05g	-g
Bodenwellen und scharfen Kurven	0,75g	0	-3g

Tabelle 5-1 Belastungen für die statische Festigkeitsanalyse

5.1.2 Randbedingungen

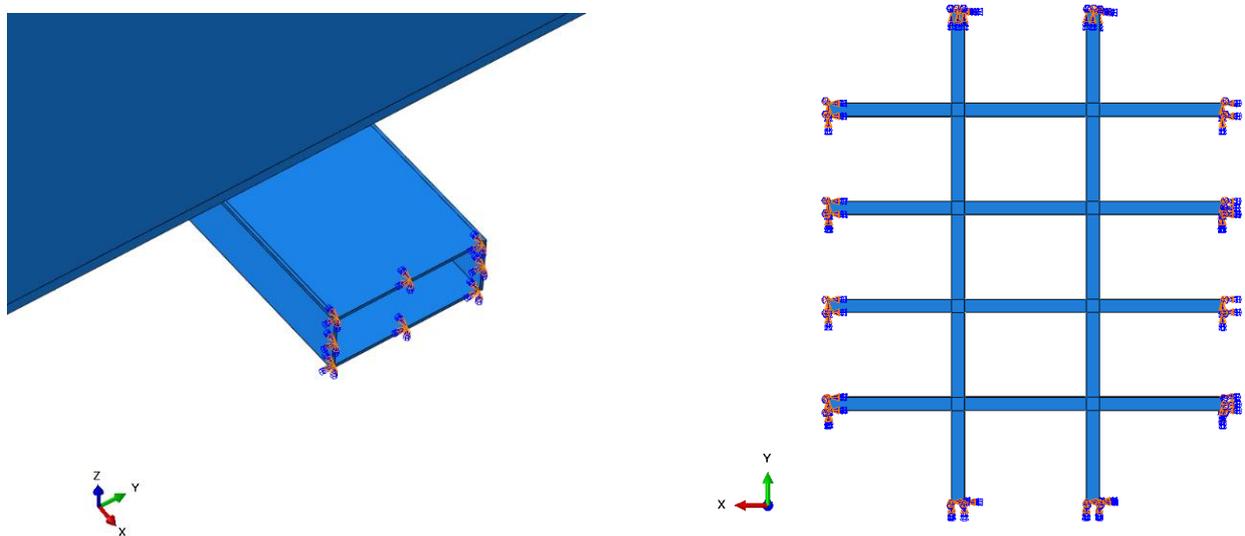


Bild 5-2 Randbedingungen für Batteriepacks (statische Festigkeitsanalyse)

Für die beiden unterschiedlichen Betriebsbedingungen der statischen Festigkeitsanalyse sind die Randbedingungen dieselben. Das Batteriepack wird mit dem Tragbalken am Rahmen befestigt. Für die Befestigungspunkte auf dem Tragbalken sind daher Randbedingungen erforderlich.

Für den Tragbalken des Batteriepacks gibt es insgesamt 12 Befestigungspunkte. Die Randbedingung ist daher, dass die sechs Freiheitsgrade an jedem Befestigungspunkt Null sind.

5.2 Ergebnisse der statischen Festigkeitsanalyse

5.2.1 Notbremsung

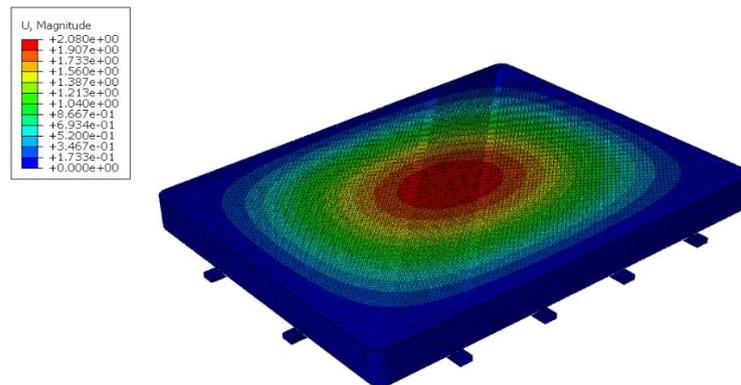


Bild 5-3 Verschiebung-Diagramm des Batteriepacks unter Notbremsung

Zunächst ein Diagramm der Verschiebung des gesamten Batteriepacks des Elektrofahrzeugs. Die maximale Verschiebung beträgt 2,08 mm.

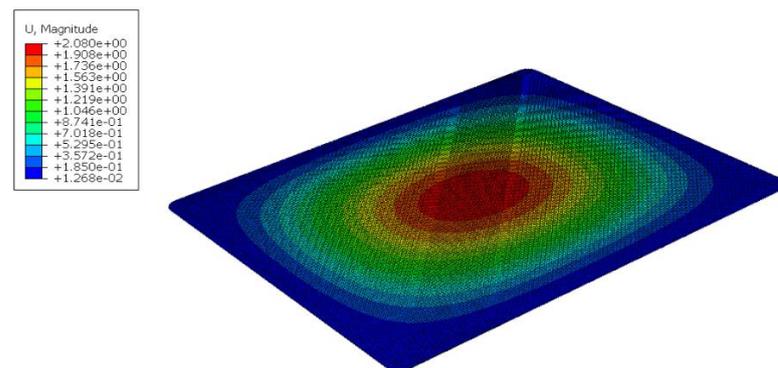


Bild 5-4 Obere Abdeckung Verschiebung-Diagramm unter Notbremsung

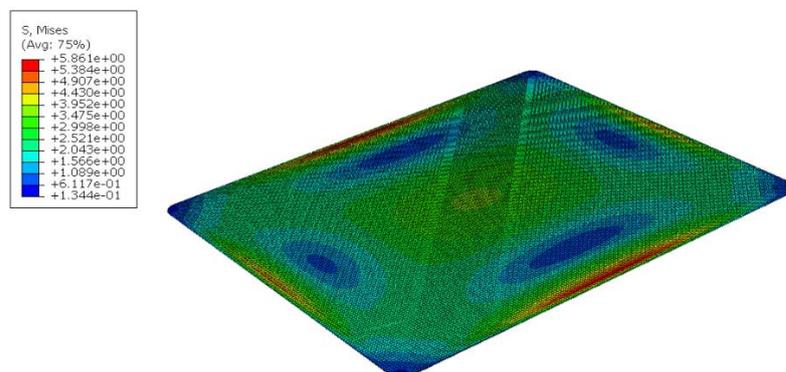


Bild 5-5 Obere Abdeckung Verschiebung und Spannung-Diagramm unter Notbremsung

Wie in Bild 5-4 dargestellt, tritt die Verformung hauptsächlich in der Mitte der oberen Abdeckung des Batteriepacks auf. Die maximale Verschiebung beträgt 2,08 mm. Die obere Abdeckung des Batteriepacks ist relativ flach und dünn. Die Konstruktion dieser Struktur ist anfällig für Verformungen.

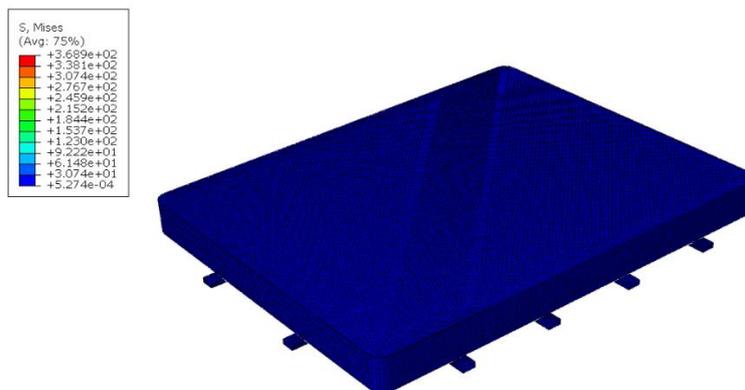


Bild 5-6 Spannung-Diagramm des Batteriepacks unter Notbremsbedingung

Das Spannung-Diagramm des Batteriepacks und des Tragbalkens ist in Bild 5-6 dargestellt. Die maximale Spannung beträgt 368,9 MPa. Dieser Spannungswert ist sehr hoch. Einzelne Komponenten müssen nacheinander überprüft werden.

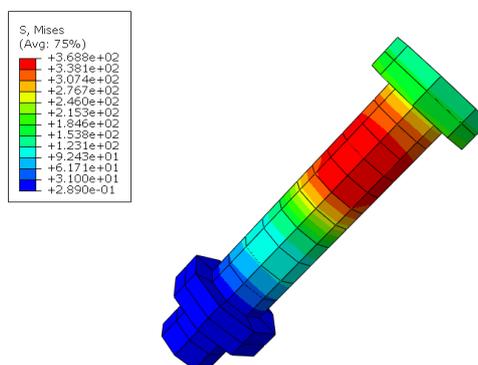


Bild 5-7 Spannung-Diagramm der Schraube

Die Einzelanalyse der Komponenten des Batteriepacks ergab, dass die maximalen Spannungen in den Schrauben auftreten. Dies ist das Ergebnis der auf die Schrauben aufgebrachtten Schraubenvorspannung und beeinträchtigt nicht die Sicherheit des Batteriepacks.

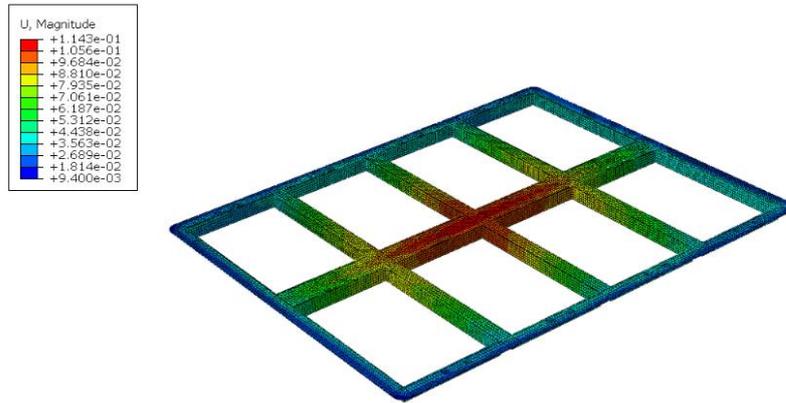


Bild 5-8 Modulhalterung Verschiebung-Diagramm unter Notbremsung

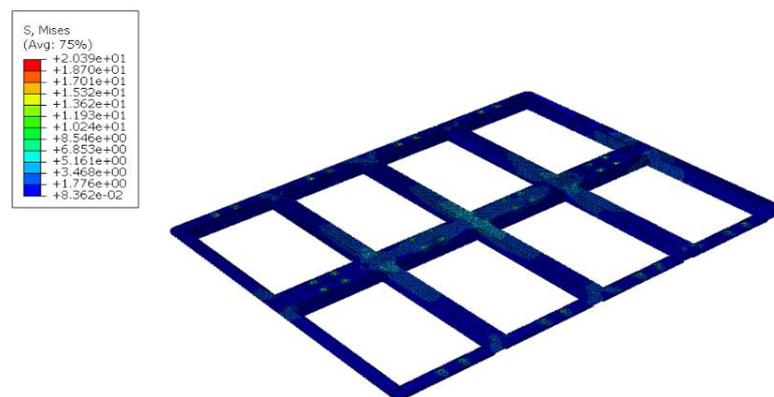


Bild 5-9 Modulhalterung Spannung-Diagramm unter Notbremsung

Die Modulhalterung des Batteriepacks wird bei Notbremsung nicht zu stark verformt. Die maximale Verschiebung der Modulhalterung beträgt nur 0,1143 mm und die maximale Spannung beträgt 20,39 MPa. Die Verformung konzentriert sich jedoch auf den mittleren Bereich der Modulhalterung. Daher muss das Verschiebung-Diagramm des Batteriemoduls betrachtet werden.

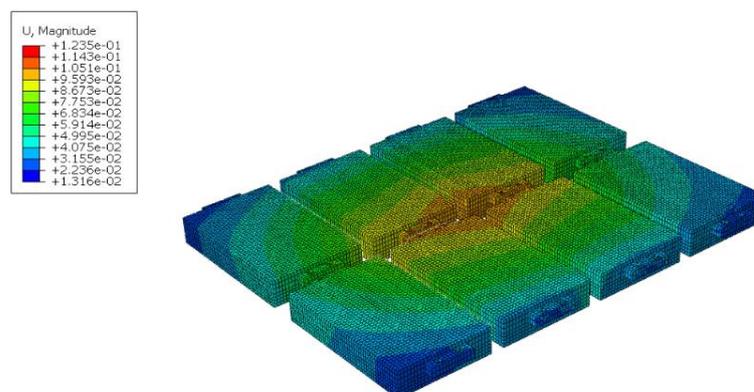


Bild 5-10 Batteriemodule Verschiebung-Diagramm unter Notbremsung

Die maximale Verschiebung der Batteriemodule beträgt 0,1235 mm.

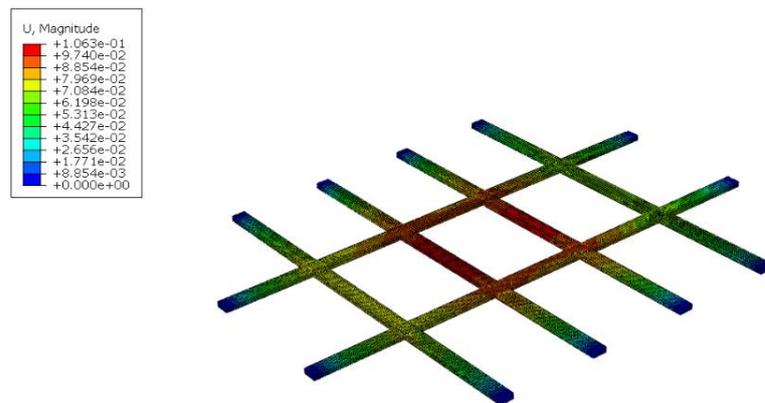


Bild 5-11 Tragbalken Verschiebung-Diagramm unter Notbremsung

Die maximale Verschiebung der Modulhalterung beträgt 0,1063 mm, wie in Bild 5-11 dargestellt. Dies deutet darauf hin, dass sich die Verschiebung des Tragbalkens hauptsächlich auf den mittleren Bereich konzentriert.

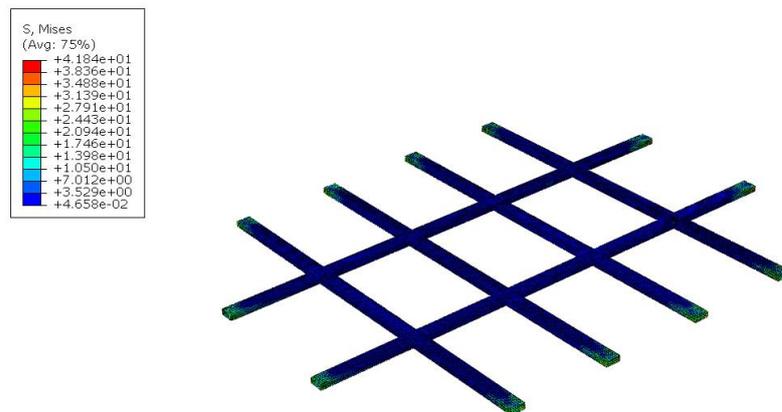


Bild 5-12 Tragbalken Spannung-Diagramm unter Notbremsung

Die lokale Vergrößerung zeigt, dass die höchsten Spannungen hauptsächlich an den Befestigungspunkten der tragenden Balken auftreten. Obwohl die maximale Spannung nur 41,84 MPa beträgt, was weit unter der Streckgrenze des Materials liegt. Aber die Spannungen sind sehr konzentriert. Dies ist eine sehr gefährliche Situation für Elektrofahrzeuge in der Praxis.

5.2.2 Bodenwellen und scharfen Kurven

In der Praxis sind Elektrofahrzeuge oft einer Kombination von Betriebsbedingungen unterzogen. Wenn nur ein einziger Betriebszustand analysiert wird, ist es schwierig, gefährliche Konstruktionen zu erkennen. Daher wird in dieser Diplomarbeit eine Kombination aus Bodenwellen und scharfen Kurven verwendet.

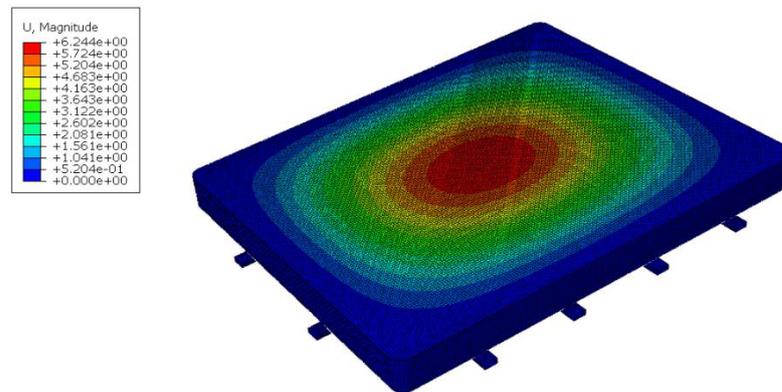


Bild 5-13 Verschiebung-Diagramm des Batteriepacks unter Bodenwellen und scharfen Kurven

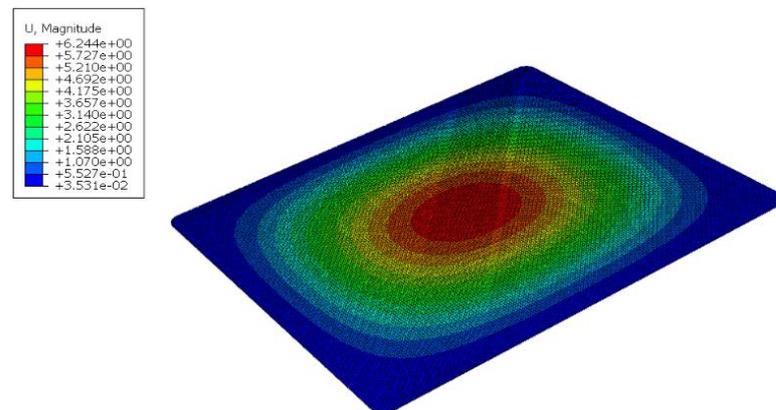


Bild 5-14 Obere Abdeckung Verschiebung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven

Starke Verformung der oberen Abdeckung des Batteriepacks bei einer Kombination aus Bodenwellen und scharfen Kurvenfahrten. Die maximale Verschiebung beträgt 6,244 mm. Die Verformung der oberen Abdeckung des Batteriepacks hat die Sicherheit des Batteriepacks ernsthaft beeinträchtigt. Die Verformung der oberen Abdeckung des Batteriepacks kann zu einer Beschädigung der Hochspannungskomponenten im Inneren des Batteriepacks führen.

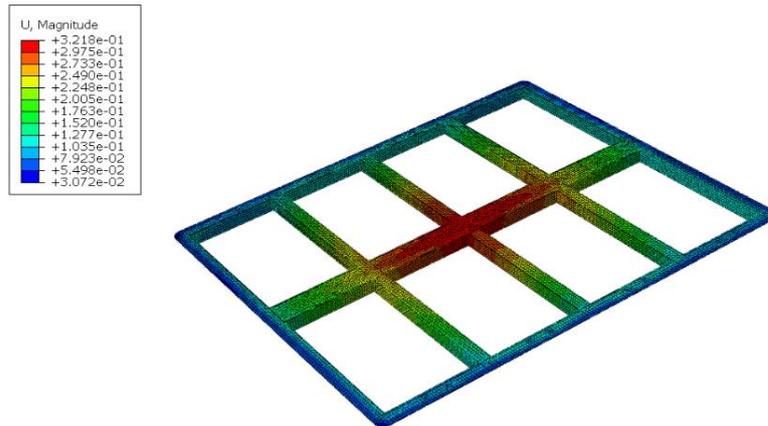


Bild 5-15 Modulhalterung Verschiebung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven

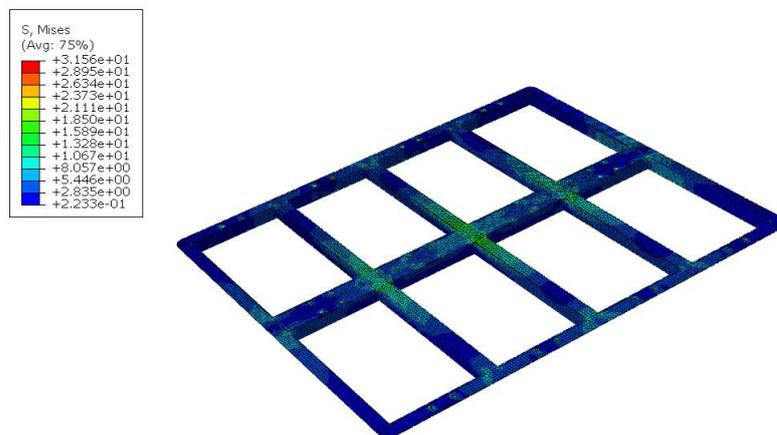


Bild 5-16 Modulhalterung Spannung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven

Die maximale Verformung der Modulhalterung beträgt nur 0,3218 mm und die maximale Spannung beträgt nur 31,56 MPa unter den kombinierten Bedingungen von Bodenwellen und scharfen Kurven des Elektrofahrzeugs.

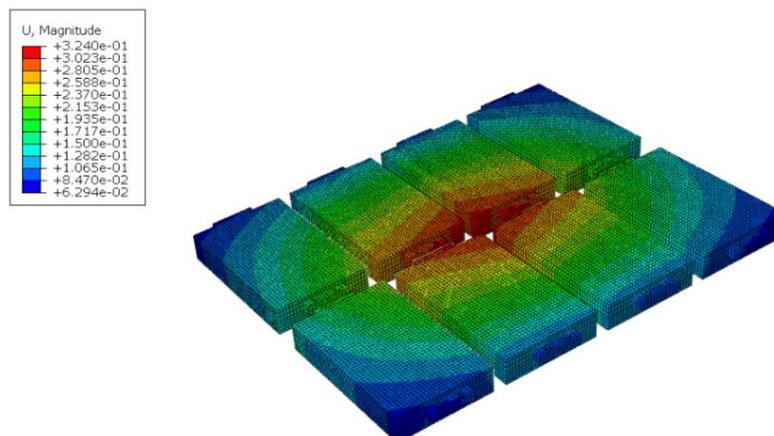


Bild 5-17 Batteriemodule Verschiebung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven

Die maximale Verschiebung des Batteriemoduls beträgt 0,324 mm, und die Verschiebung des Batteriemoduls konzentriert sich hauptsächlich auf den zentralen Bereich.

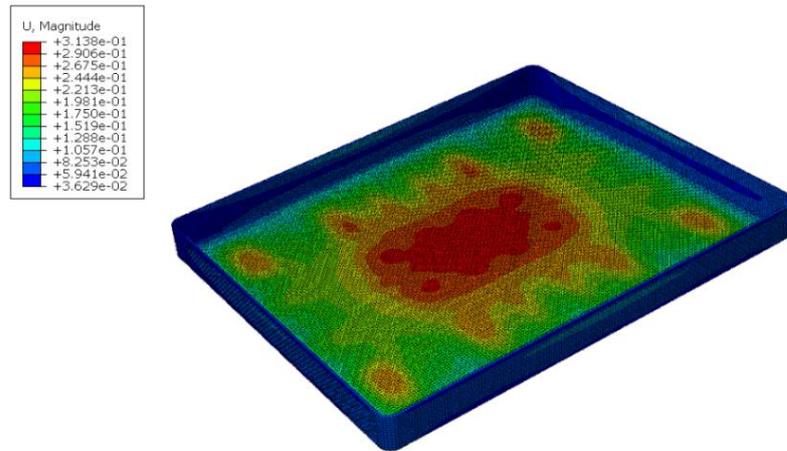


Bild 5-18 Unteres Gehäuse Verschiebung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven

Das Verschiebung-Diagramm des unteren Gehäuses des Batteriepacks zeigt deutlicher, dass die Verschiebung im mittleren Bereich des unteren Gehäuses des Batteriepacks stärker ausgeprägt ist. Verschiebungs- und Spannungsdiagramme für Tragbalken müssen analysiert werden.

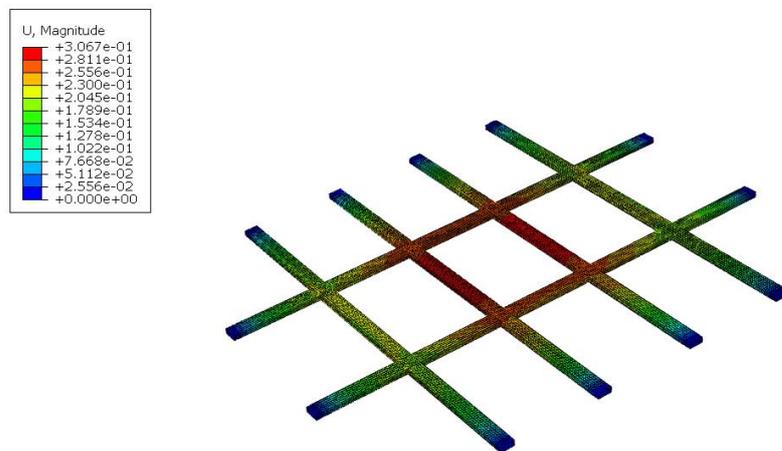


Bild 5-19 Tragbalken Verschiebung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven

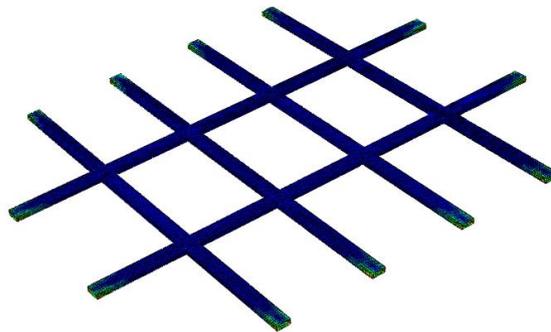
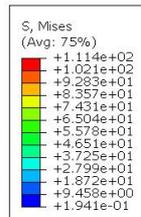


Bild 5-20 Tragbalken Spannung-Diagramm unter Bodenwellen und scharfen Kurven

Die maximale Verformung des Tragbalkens des Batteriepacks tritt im mittleren Bereich auf, während die maximale Spannung an der Befestigungsstelle des Tragebalkens auftritt. Maximale Verschiebung von 0,3067 mm und maximale Spannung von 111,4 MPa.

5.3 Auswertung der Ergebnisse der statischen Festigkeitsanalyse und Optimierungsmöglichkeiten

Obere Abdeckung

Zunächst wird die obere Abdeckung des Batteriepacks um maximal 6,244 mm verschoben, Wenn das Batteriepack sich in einer Kombination aus Bodenwellen und scharfen Kurven befindet. Eine übermäßige Verschiebung kann zu Kollisionen zwischen der oberen Abdeckung des Batteriepacks und dem Batteriemodul führen. Die obere Abdeckung des Batteriepacks kann daher in Bezug auf die Form optimiert werden.

Ursprünglich entwickelt als 4 mm dicke obere Abdeckung des Batteriepacks. Es besteht die Möglichkeit, die Dicke der oberen Abdeckung des Batteriepacks zu verringern und eine vernünftige Verstärkungsstruktur hinzuzufügen.

Tragbalken

Das Spannung-Diagramm des Tragbalkens zeigt, dass sich die Spannungen im Tragbalken hauptsächlich auf die Befestigungspositionen des Tragbalkens und der

Fahrgestellhalterung des Elektrofahrzeugs konzentrieren. Wenn Elektrofahrzeuge heftigen Aufprallen oder Kollisionen ausgesetzt sind. Ein Bruch kann leicht dort auftreten, wo die Spannung konzentriert ist.

Die Verschiebungsdiagramme des unteren Gehäuses des Batteriepacks und des Batteriemoduls zeigen, dass der zentrale Bereich des Batteriepacks unter verschiedenen Betriebsbedingungen verformt wird, was darauf hindeutet, dass der Tragbalken keine gute Stützfunktion hat. Daher muss die Verteilung der Tragbalken neu geordnet werden. Die Verteilung der Tragbalken muss optimiert werden.

Modulhalterung

Modulhalterung zur Befestigung von Batteriemodulen mit einer maximalen Verschiebung von 0,3218 mm und einer maximalen Spannung von nur 31,56 MPa. Die Spannungen werden hauptsächlich durch die Vorspannkraft der Schrauben verursacht. Dies bedeutet, dass die Belastung der Modulhalterung durch externe Lasten sehr gering ist. Dieser Wert liegt weit unter der Streckgrenze des DC01-Materials. Der Batteriemodulhalter dient nicht nur als Stütze, sondern auch und vor allem als Energieabsorber. Geringe Spannung deutet auf eine geringe Dehnungsenergie in der Modulhalterung hin. Dies ist der Sicherheit des Batteriepacks nicht förderlich. So kann das Gewicht des Modulhalters reduziert und die Abmessungen des Bauteils optimiert werden, sofern die mechanischen Eigenschaften erfüllt sind. Es ist auch möglich, entsprechende Öffnungen in den nicht beanspruchten Bereichen des Modulhalters anzubringen.

6 Steifigkeitsanalyse

Die Steifigkeitsanalyse untersucht die Auswirkung einer konstanten konzentrierten Kraftbelastung auf die mechanische Struktur des Batteriepacks. Zwei konzentrierte Kräfte gleicher Größe und entgegengesetzter Richtung wirken auf beide Enden des Tragbalkens ein.

6.1 Belastungen und Randbedingungen

6.1.1 Belastungen

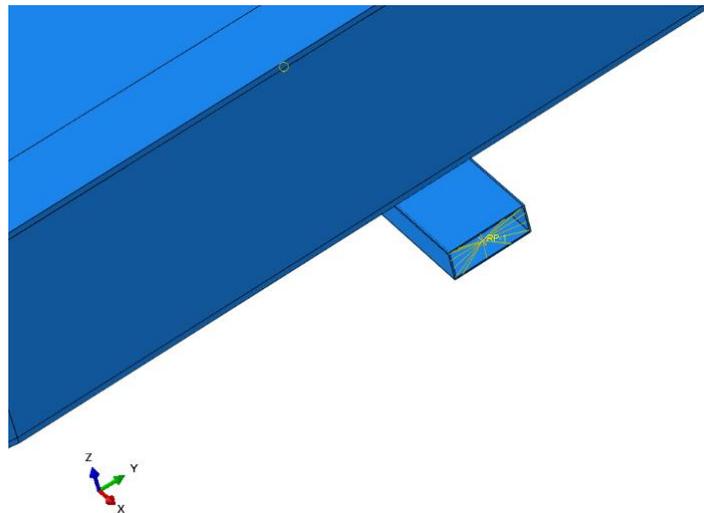


Bild 6-1 Kopplung zwischen Referenzpunkt und Stirnfläche

Zunächst werden zwei Referenzpunkte, RP-1 und RP-2, in der Nähe des Tragbalkens des Batteriepacks erstellt. Die beiden Referenzpunkte werden dann mit den Stirnflächen des Tragbalkens an jedem Ende verbunden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass konzentrierte Kraftbelastungen nur auf einen Knoten angewendet werden können. Wenn jedoch zwischen dem Referenzpunkt und der Stirnfläche eine Kopplung besteht, wirkt die auf den Referenzpunkt ausgeübte konzentrierte Kraft schließlich auf die Stirnfläche.

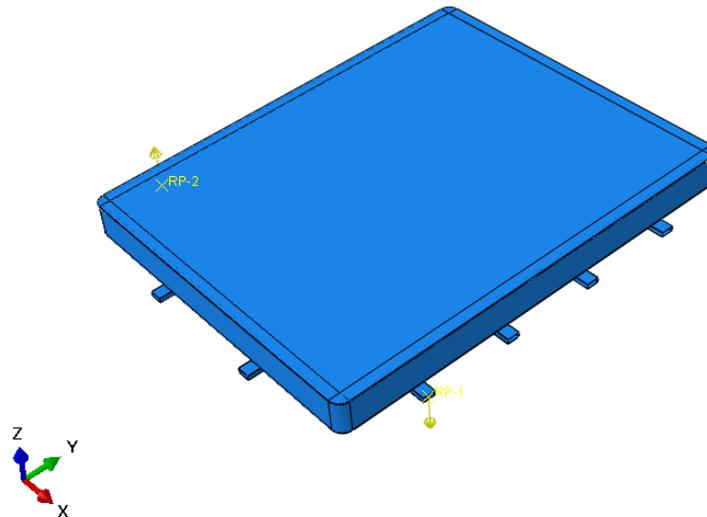


Bild 6-2 Konzentrierte Kraftbelastungen in der Steifigkeitsanalyse

Zwei gleiche und entgegengesetzte Einzellasten werden auf die Referenzpunkte auf der linken und rechten Seite des Tragbalkens aufgebracht. Der Wert der Konzentrationskraft wird auf 1000 N festgelegt.

6.1.2 Randbedingungen

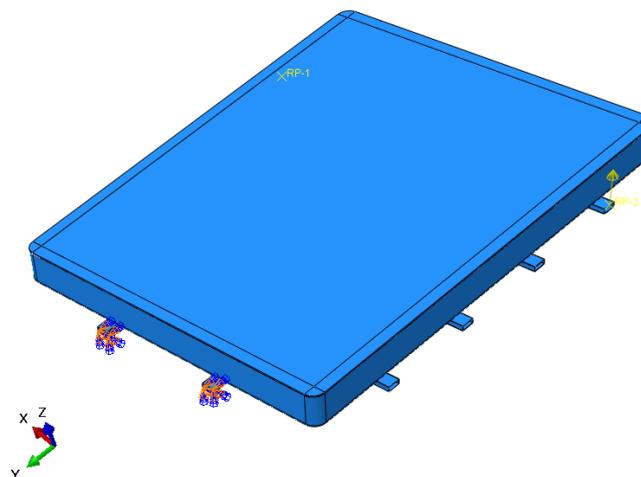


Bild 6-3 Randbedingungen in der Steifigkeitsanalyse

Erstelle Randbedingungen an den Stirnflächen der beiden Befestigungspunkte auf der Hinterseite des Tragbalkens, so dass die sechs Freiheitsgrade an diesen beiden Stirnflächen Null sind.

6.2 Ergebnisse der Steifigkeitsanalyse

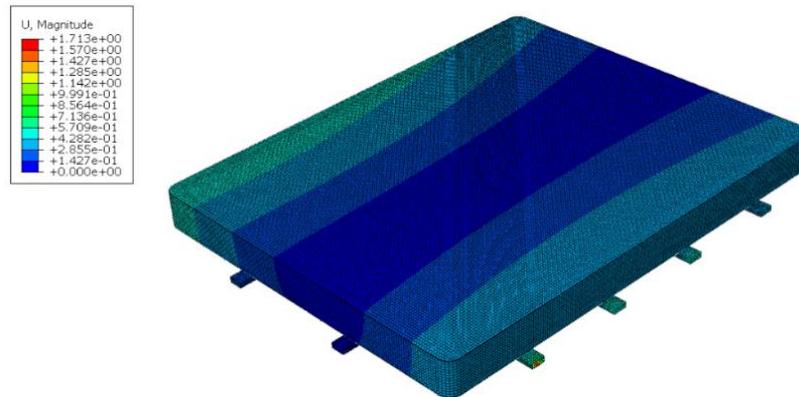


Bild 6-4 Verschiebungsdiagramm für die Steifigkeitsanalyse des Ursprungsmodells

Wie in Bild 6-4 dargestellt, beträgt die maximale Verschiebung der Batteriepackstruktur 1,713 mm.

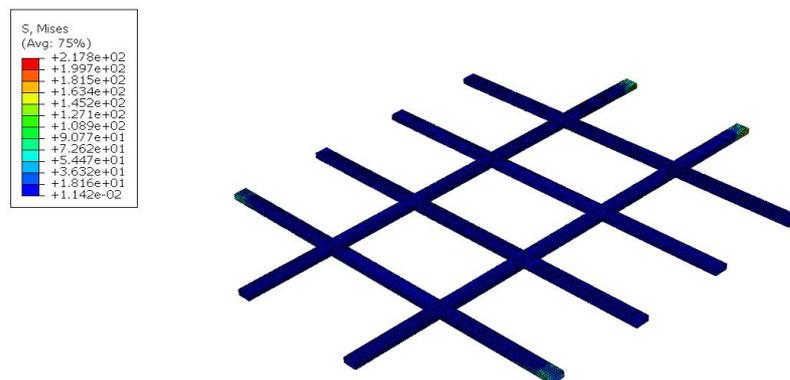


Bild 6-5 Tragbalken Spannung-Diagramm für Steifigkeitsanalyse des Ursprungsmodells

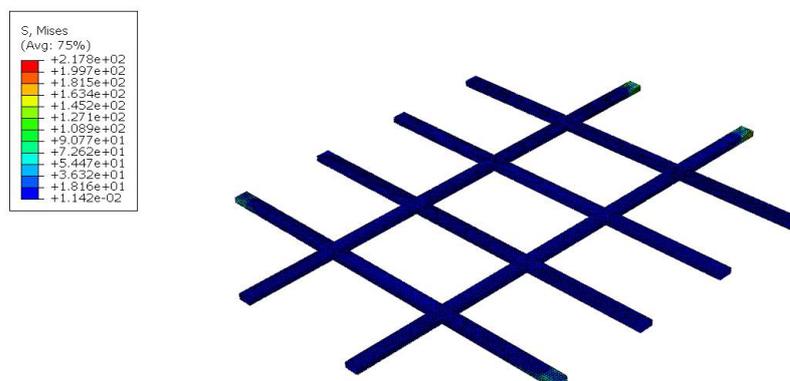


Bild 6-6 Tragbalken Verschiebung-Diagramm für Steifigkeitsanalyse des Ursprungsmodells

Eine separate Darstellung des Tragbalkens zeigt, dass sich die Spannungen hauptsächlich in der Nähe der Stirnfläche konzentrieren, wo die konzentrierten Kräfte einwirken, mit einer maximalen Spannung von 217,8 MPa.

7 Entwicklung von Sicherheitskonzepten

Es gibt drei Möglichkeiten zur Verbesserung der Sicherheit von Batteriepacks für Elektrofahrzeuge:

1. Optimierung bestehender Batteriepacks: Optimierung einiger Bauteile des Batteriepacks unter Beibehaltung der Hauptstruktur des bestehenden Batteriepacks.

2. Entwicklung kleiner Batteriepacks: Variieren der Gesamtlänge des Batteriepacks bei gleichbleibenden Abmessungen wie Höhe, Breite und Dicke des Batteriepacks. Untersuchung der Sicherheit von kleinen Batteriepacks im Vergleich zum ursprünglichen Entwurf, mit konstanten Lasten und Randbedingungen.

3. Anwendung von Dämpfung und Federn: Verbesserte Sicherheit des Batteriepacks durch den Einsatz von Federn und Dämpfung.

7.1 Optimierung bestehender Batteriepacks

Auf der Grundlage der Festigkeitsanalyse typischer Batteriepacks in den beiden vorangegangenen Kapiteln wurde die mechanische Leistung des Batteriepacks bewertet, wurden Konstruktionsmängel festgestellt und Komponenten identifiziert, die einer strukturellen Optimierung bedürfen. Dieser Kapitel basiert auf dem Abaqus-Löser.

Optimierte Komponenten	Optimierte Inhalte
Obere Abdeckung	Verstärkung
Modulhalterung	entsprechende Öffnungen
Tragende Balken	Verteilung der Balken

Tabelle 7-1 Optimierte Konzepte

7.1.1 Formoptimierung der oberen Abdeckung des Batteriegehäuses

Die Ergebnisse der statischen Festigkeitsanalyse ergaben, dass die obere Abdeckung des Batteriepacks nicht ausreichend steif ist. Obwohl die Verschiebung der oberen Abdeckung gering ist, nimmt die Verschiebung der oberen Abdeckung unter extremen Betriebsbedingungen zu. Außerdem neigt eine zu flache Abdeckung zu niederfrequenten Resonanzen, die der Sicherheit der Packung abträglich sind.

In dieser Diplomarbeit wird die Form der oberen Abdeckung des Batteriepacks durch Hinzufügen einer Verstärkungsstruktur optimiert. Die Verstärkungsstruktur ist ein geformtes Bauteil, das an der oberen Abdeckung befestigt ist. Die Form der Verstärkungen ist ein langer Streifen. Diese Verstärkungsstruktur erhöht die lokale Steifigkeit von dünnwandigen Bauteilen, verbessert die Verformungsfestigkeit und reduziert die Schwingungsamplitude der Platten wirksam. Die erhöhte Struktur der oberen Abdeckung bietet auch Platz für Hochspannungskabel.

Die Hauptfunktion der oberen Abdeckung des Batteriepacks ist die Abdichtung, Wasser- und Staabdichtigkeit. Und die maximale Spannung auf die obere Abdeckung des Batteriepacks beträgt unter extremen Betriebsbedingungen nur 17,6 MPa. Dies zeigt, dass die obere Abdeckung des Batteriepacks ein weniger belastetes Bauteil ist.

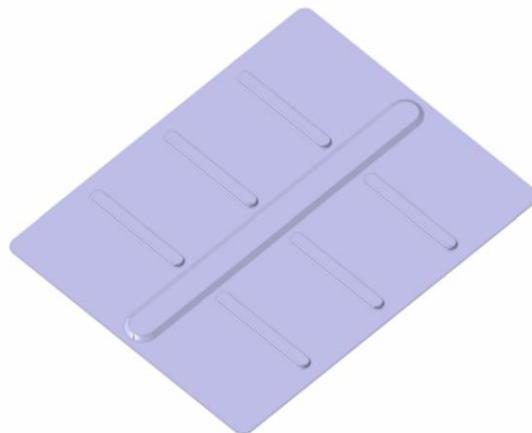


Bild 7-1 Optimierte obere Abdeckung des Batteriepacks

Die Dicke der oberen Abdeckung des Batteriepacks wird von ursprünglich 4 mm auf 2 mm optimiert, was zu einem leichteren Konstruktionsprinzip und einer Verstärkung führt, die die Sicherheit des Batteriepacks erhöht.

7.1.2 Formoptimierung der Modulhalterung

Die Hauptfunktion der Modulhalterung ist das Halten des Batteriemoduls. Die Modulhalterung kann auch als energieabsorbierende Zone dienen. Die Ergebnisse der statischen Festigkeitsanalyse zeigen, dass die Modulhalterung keine großen Verformungen erfährt. Und der Hauptgrund für die Verformung ist, dass die ursprüngliche Konstruktion der Tragbalken keine gute Unterstützung bietet. Dies zeigt an, dass die Modulhalterung stark genug ist, um das Batteriemodul zu schützen, und das Bohren im nicht belasteten Bereich der Modulhalterung möglich ist. Unter Knautschzone versteht man diejenigen Bereiche eines Fahrzeugs, die sich im Falle einer Kollision verformen und so Energie absorbieren.

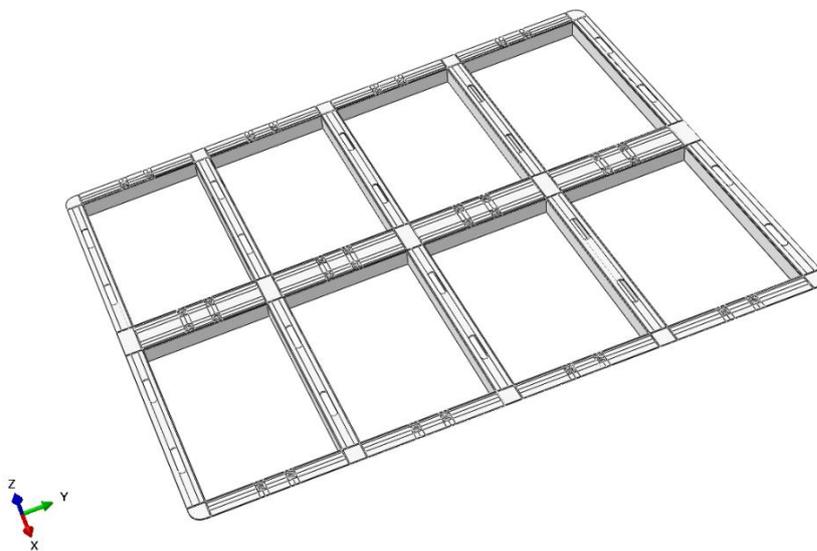


Bild 7-2 Optimierte Modulhalterung des Batteriepacks

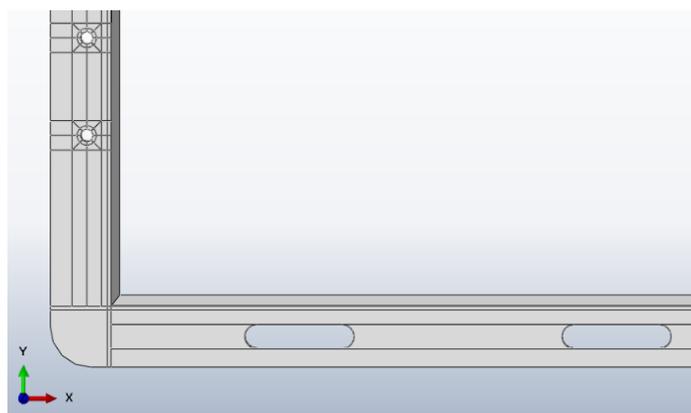


Bild 7-3 Löcher in der Modulhalterung

Aus den Spannungsdiagrammen der Modulhalterung unter zwei verschiedenen Betriebsbedingungen in Kapitel 5 geht hervor, dass sich die Spannungen in der Modulhalterung

hauptsächlich auf den zentralen Bereich konzentrieren und die Spannungen in anderen Bereichen sehr gering sind. Wie in Bild 7-2 dargestellt, werden insgesamt 20 Löcher in die Modulhalterung gestanzt.

7.1.3 Formoptimierung von Tragbalken

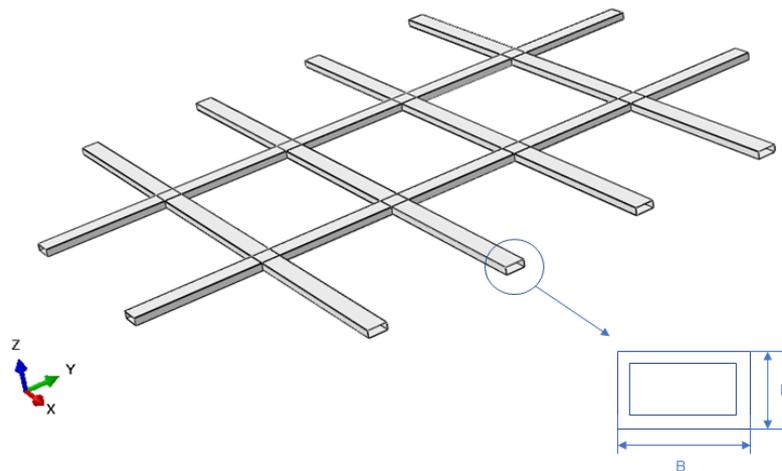


Bild 7-4 Querschnitt des ursprünglichen Tragbalkens

Die Hauptfunktion des Tragbalkens besteht darin, das gesamte Batteriepack zu stützen und es am Karosserierahmen zu befestigen. Der Querschnitt des ursprünglichen Tragbalkens ist in Abbildung 7-4 dargestellt. Die Seitenlänge $B=50\text{mm}$ ist größer als die Seitenlänge $H=20\text{mm}$.

Ausgehend vom Widerstandsmoment ist bekannt,

Wenn das Biegemoment um die X-Achse wirkt, ist das Widerstandsmoment:

$$W_x = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{6 \cdot H} = 1000,53 \text{mm}^3 \quad (20)$$

Wenn das Biegemoment um die Y-Achse wirkt, ist das Widerstandsmoment:

$$W_y = \frac{H \cdot B^3 - h \cdot b^3}{6 \cdot B} = 1697,81 \text{mm}^3 \quad (21)$$

dies bedeutet, dass die ursprüngliche Konstruktion des Tragbalkens zur Abstützung des Batteriepacks nicht optimal ist.

Das endgültige Modell des Tragbalkens ist in Bild 7-5 dargestellt. Mit $B=20\text{mm}$, $H=50\text{mm}$.

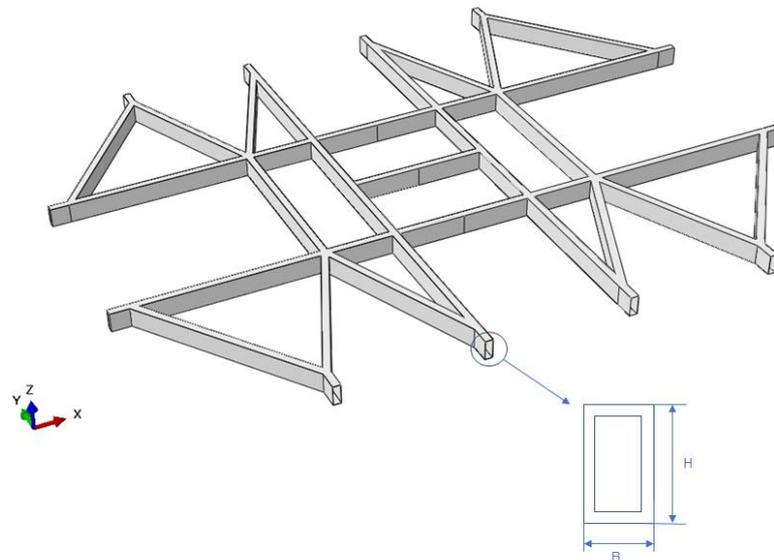


Bild 7-5 Optimierter Tragbalken

Neben der Formoptimierung des Batteriepacks kann auch der höherfeste Konstruktionsstahl S355JR verwendet werden. Streckgrenze von S355JR-Stahl erreicht 355 MPa. Werkstoff S355JR hat eine gute Schweißbarkeit, Kalt und Warmbearbeitbarkeit und Korrosionsbeständigkeit. Weit verbreitet in Brücken, Schiffen, und Fahrzeugen.

7.1.4 Optimiertes Modell

Das optimierte Batteriepack ist in Bild 7-6 dargestellt.

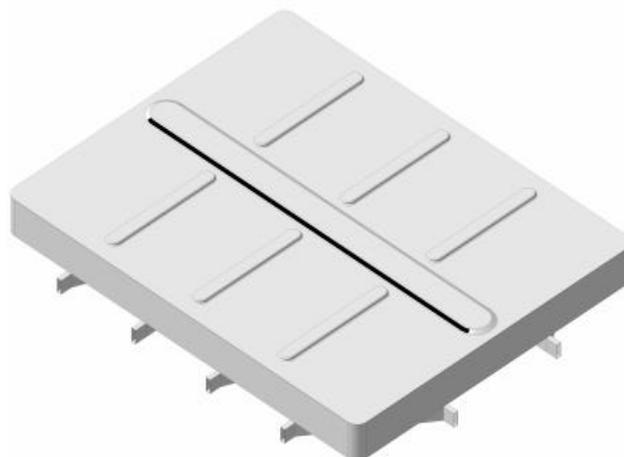


Bild 7-6 Montagezeichnung des optimierten Batteriepacks

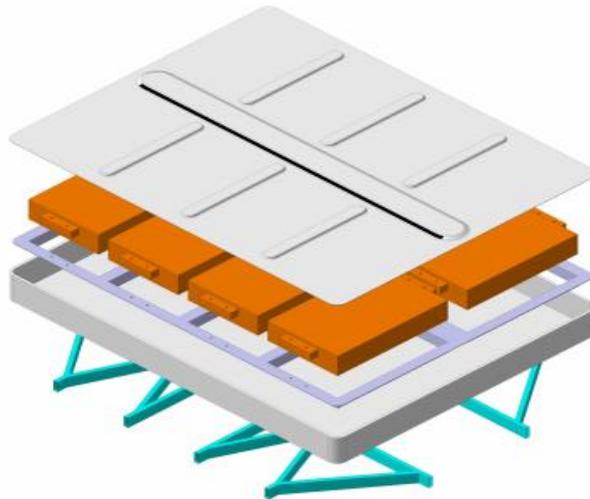


Bild 7-7 Explosionszeichnung nach der Optimierung

Die Gesamtmasse des optimierten Batteriepacks beträgt 485 kg.

7.1.5 Analyse des optimierten Batteriepacks

Die relevanten Ergebnisse für den optimierten Batteriepack werden mit der gleichen Anwendung von Belastungen und Randbedingungen wie in den Kapiteln 5 und 6 erzielt. Die relevanten Ergebnisse für den optimierten Batteriepack werden unter den gleichen Bedingungen wie bei der Anwendung der Belastungen in den Kapiteln 5 und 6 erzielt.

Die Randbedingungen sind so definiert, dass die sechs Freiheitsgrade der zwölf Stirnflächen des optimierten Tragbalkens Null sind.

7.1.5.1 Notbremsung

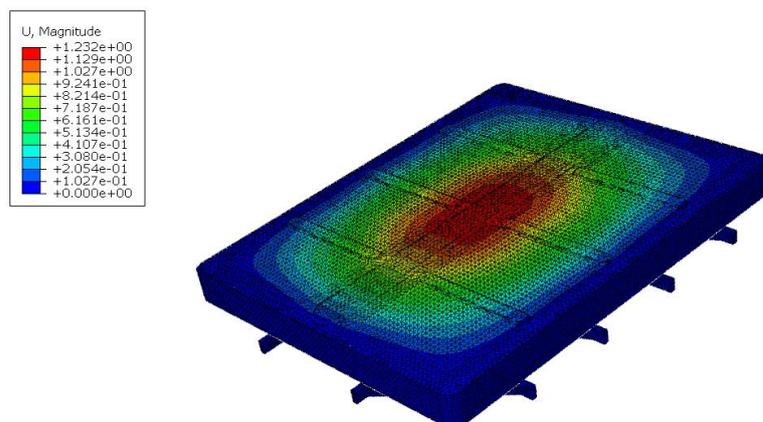


Bild 7-8 Verschiebung-Diagramm des Batteriepacks nach der Formoptimierung unter Notbremsung

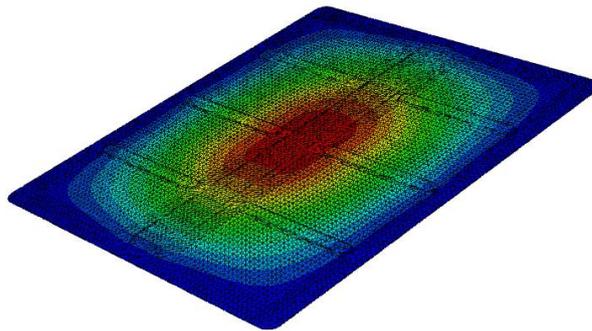
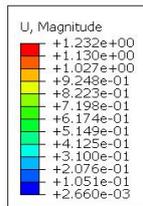


Bild 7-9 Verschiebung-Diagramm der oberen Abdeckung nach der Formoptimierung unter Notbremsung

Die obere Abdeckung des Batteriepacks ist nach wie vor das am stärksten verformte Bauteil der gesamten Batteriepack-Struktur, mit einer maximalen Verschiebung von 1,232 mm. Dies ist jedoch bereits viel kleiner als die maximale Verformung des ursprünglichen Batteriepacks.

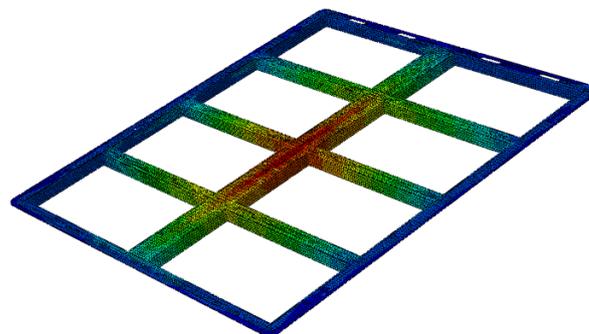
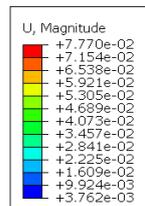


Bild 7-10 Verschiebung-Diagramm der Modulhalterung nach der Formoptimierung unter Notbremsung

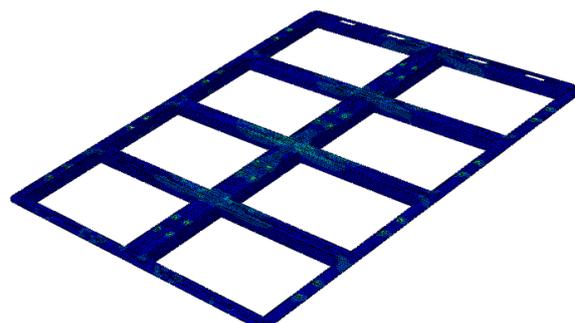
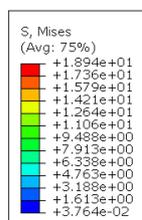


Bild 7-11 Spannung-Diagramm der Modulhalterung nach der Formoptimierung unter Notbremsung

Die optimierte Modulhalterung hat eine maximale Spannung von 18,94 MPa und eine maximale Verschiebung von 0,0777 mm unter Notbremsung.

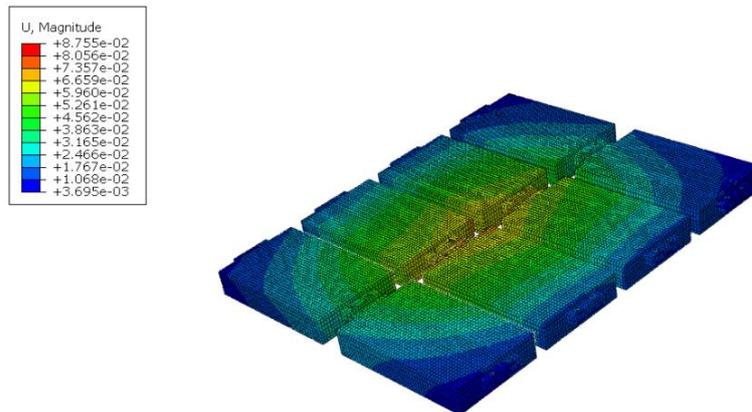


Bild 7-12 Verschiebung-Diagramm der Batteriemodule nach der Formoptimierung unter Notbremsung

Mit der optimierten Konstruktion der Batteriepackstruktur beträgt die maximale Verschiebung der gesamten Batteriemodule bei der Notbremsung nur 0,08755 mm.

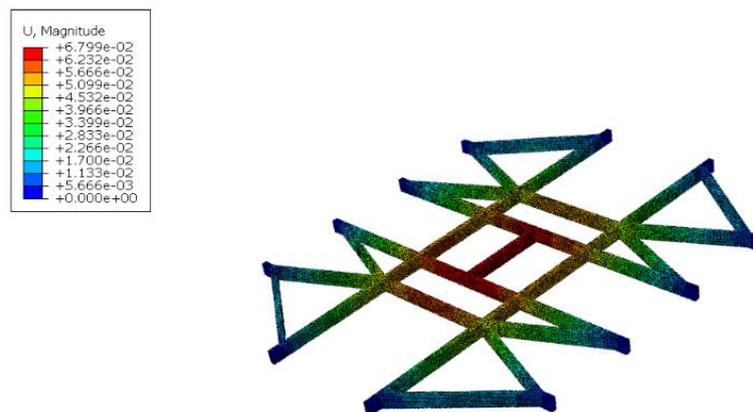


Bild 7-13 Verschiebung-Diagramm des Tragbalkens nach der Formoptimierung unter Notbremsung

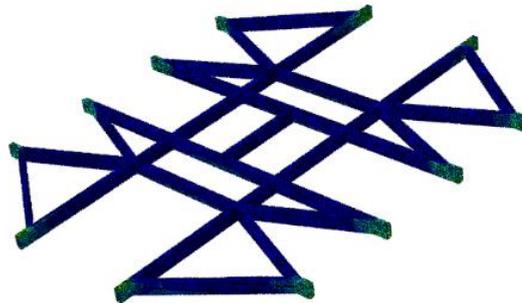
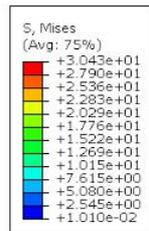


Bild 7-14 Spannung-Diagramm des Tragbalkens nach der Formoptimierung unter Notbremsung

Die maximale Verschiebung des optimierten Tragbalkens unter Notbremsung beträgt 0,06799 mm und die maximale Spannung 30,43 MPa.

7.1.5.2 Bodenwellen und scharfen Kurven

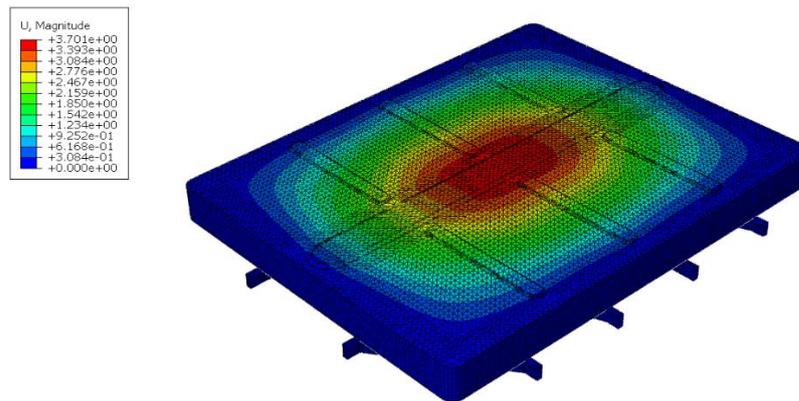


Bild 7-15 Verschiebung-Diagramm des Batteriepacks nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen

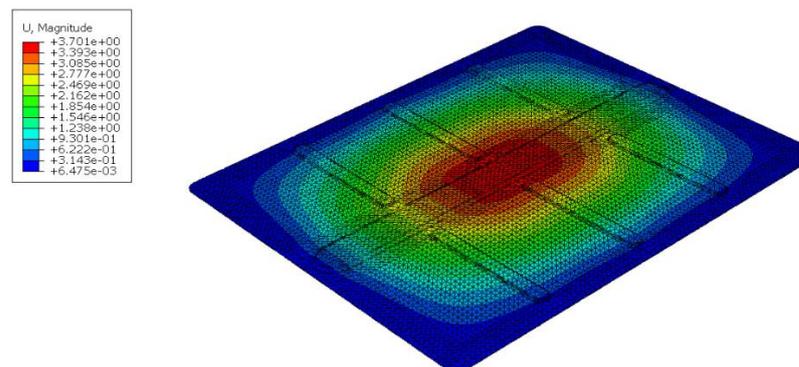


Bild 7-16 Verschiebung-Diagramm der oberen Abdeckung nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen

Wie in Bild 7-15 dargestellt, die maximale Verformung des Batteriepacks beträgt 3,701 mm. 2,543 mm geringere maximale Verschiebung im Vergleich zur ursprünglichen Konstruktion des Batteriepacks.

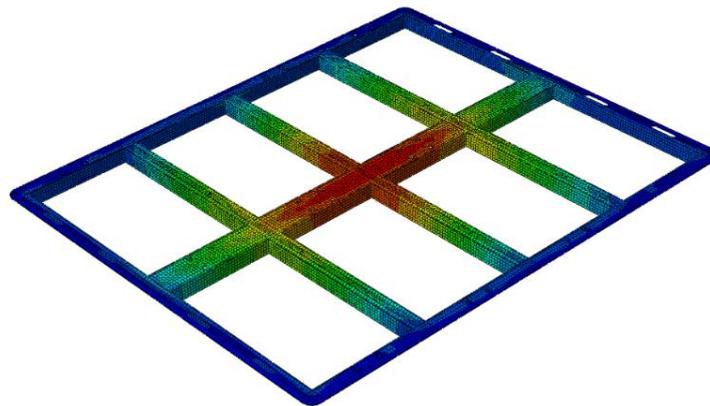
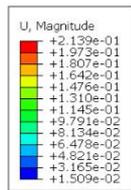


Bild 7-17 Verschiebung-Diagramm der Modulhalterung nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen

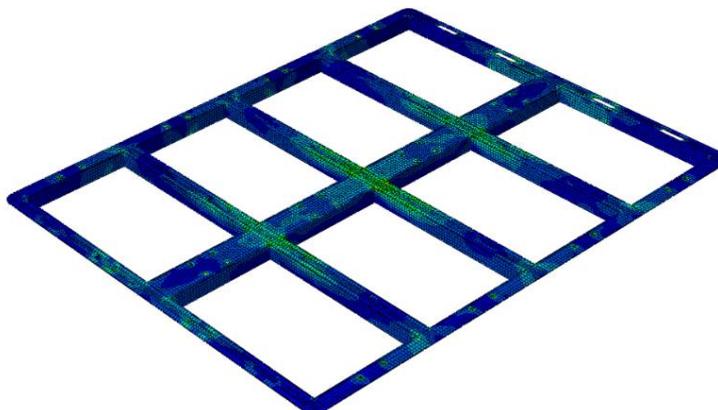
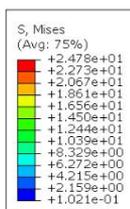


Bild 7-18 Spannung-Diagramm der Modulhalterung nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen

Die maximale Verschiebung der Modulhalterung betrug 0,2139 mm und die maximale Spannung 24,78 MPa.

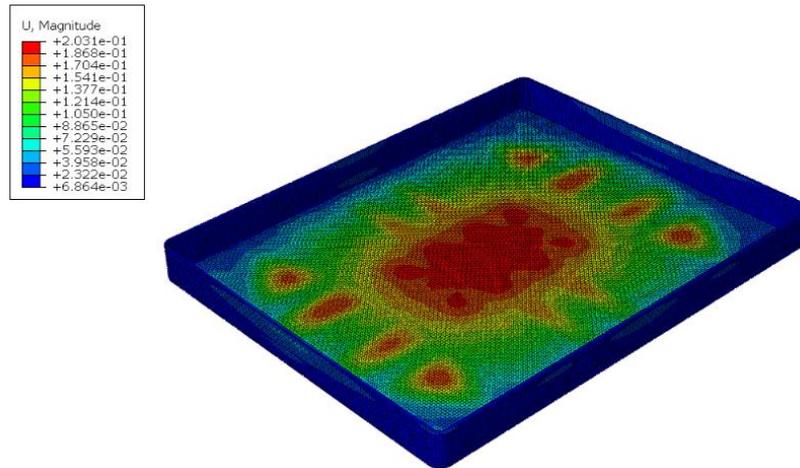


Bild 7-19 Verschiebung-Diagramm des unteren Gehäuses nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen

Obwohl sich die Verschiebung hauptsächlich auf den mittleren Bereich des unteren Gehäuses konzentriert, beträgt die maximale Verschiebung des unteren Gehäuses nur 0,2031 mm.

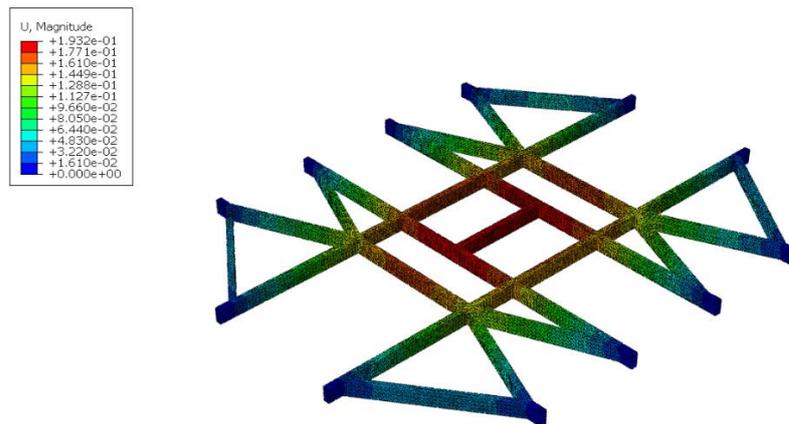


Bild 7-20 Verschiebung-Diagramm des Tragbalkens nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen

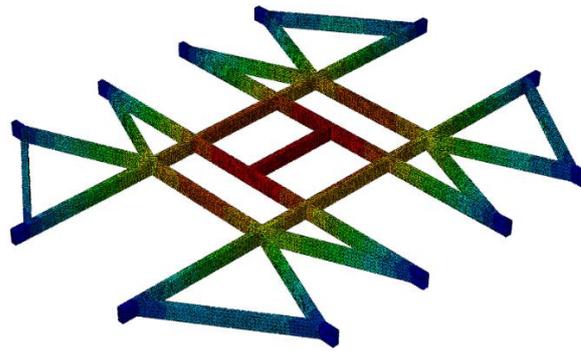
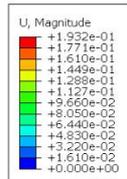


Bild 7-21 Spannung-Diagramm des Tragbalkens nach der Formoptimierung unter kombinierten Betriebsbedingungen

Die maximale Verschiebung des strukturell optimierten Tragbalkens beträgt 0,1932 mm und die maximale Spannung beträgt nur 78,25 MPa.

7.2 Entwicklung kleiner Batteriepacks

Obwohl die meisten Elektrofahrzeuge über große Batteriepacks verfügen, sogar solche mit einer Länge von bis zu 1800 mm, machen die kleine Elektrofahrzeuge, z.B. Smart EQ von Mercedes-Benz und MINIEV von Shanghai General Motors Wuling, immer noch einen gewissen Anteil des Marktes aus.



Bild 7-22 Benz Smart EQ Kleiner Batteriepack

Die Länge des ursprünglichen Batteriepacks beträgt 1712,5 mm. Ändern der Länge des Batteriepacks auf die Hälfte der ursprünglichen Länge des Batteriepacks. In diesem Kapitel soll untersucht werden, ob die Sicherheit von kleinen Batteriepacks besser mit anderen Parametern (z. B. Gehäusedicke, Dicke des Tragbalkens, Höhe des Batteriepacks usw.) vereinbar ist, wenn diese unverändert bleiben.

Zielmodell-Kilometerstand	200km
Verbindungsmethode	Schweißen, Kleben, Geschraubte Verbindungen
Gewicht des Batteriepacks	200-275kg
Anzahl der Montagestellen für den Batteriepack	8
Materialien für das Gehäuse des Batteriepacks	DC01, RSt37
Anforderungen an die Steifigkeit des Batteriegehäuses	Keine Extrusionsverformung im Inneren der Gehäuse unter extremen Betriebsbedingungen

Bild 7-23 Konstruktionsanforderungen für kleine Batteriepacks

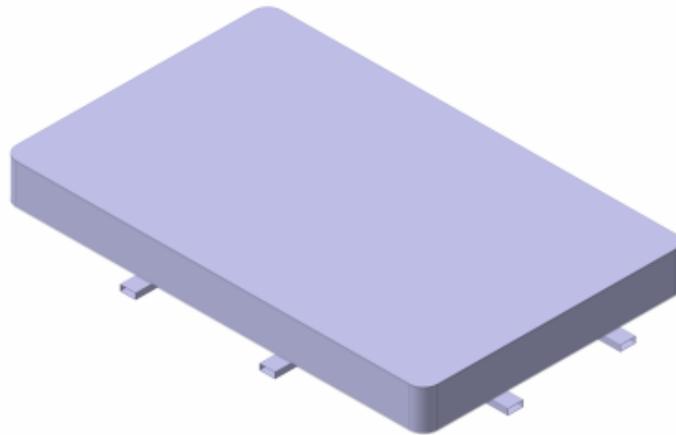


Bild 7-24 Montagezeichnung des kleinen Batteriepacks

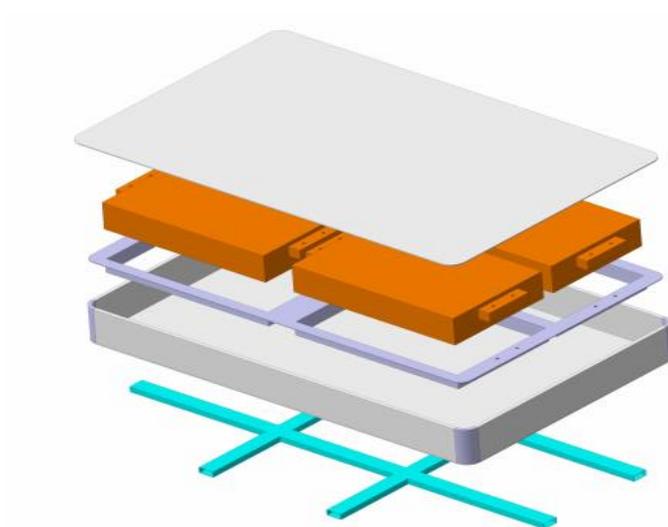


Bild 7-25 Explosionszeichnung des kleinen Batteriepacks

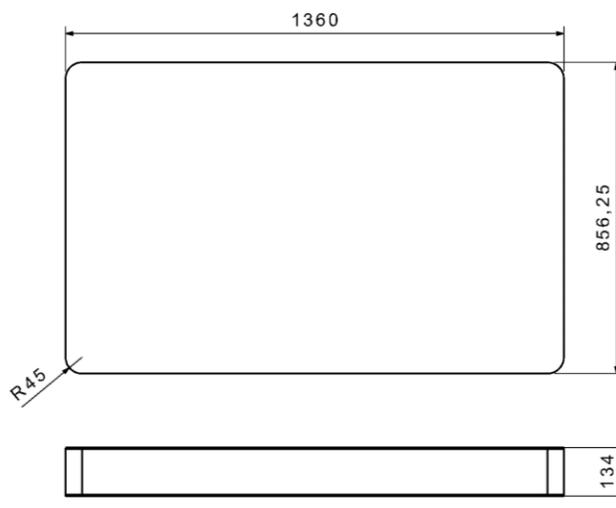


Bild 7-26 Profil und Abmessungen des kleinen Batteriepacks

Das Gesamtgewicht des kleinen Batteriepacks beträgt 273 kg.

7.2.1 Analyse kleines Batteriepacks

Es folgt eine statische Festigkeitsanalyse des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung.

7.2.1.1 Notbremsung

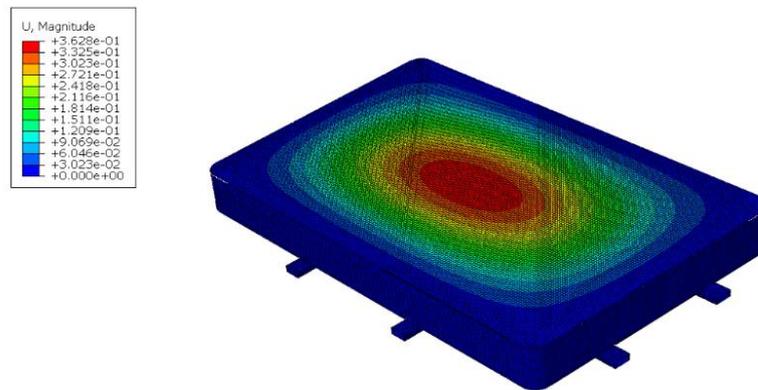


Bild 7-27 Verschiebung-Diagramm des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung

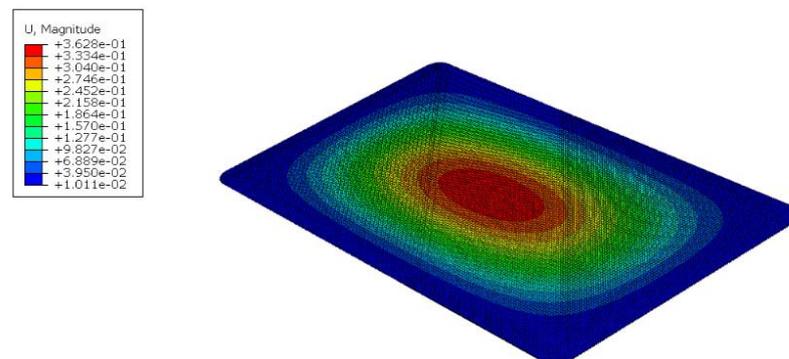


Bild 7-28 Verschiebung-Diagramm der oberen Abdeckung des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung

Die maximale Verschiebung der oberen Abdeckung des kleinen Batteriepacks beträgt 0,3628 mm.

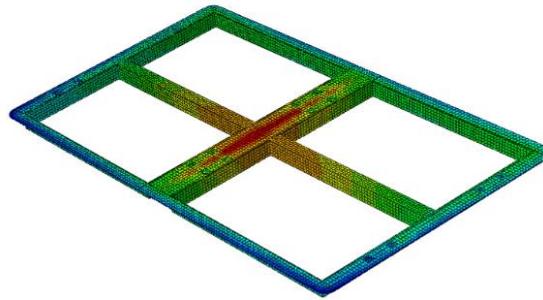
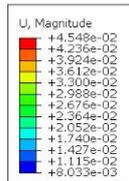


Bild 7-29 Verschiebung-Diagramm der Modulhalterung des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung

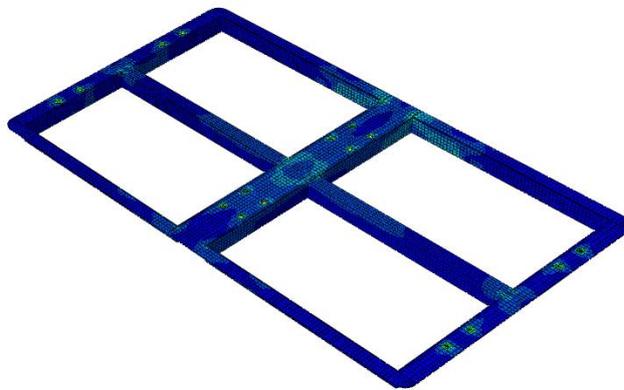
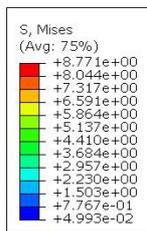


Bild 7-30 Verschiebung-Diagramm der Modulhalterung des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung

Die maximale Verschiebung der Modulhalterung beträgt 0,04548 mm und die maximale Spannung 8,771 MPa, wenn sich das kleine Batteriepack bei der Notbremsung befindet.

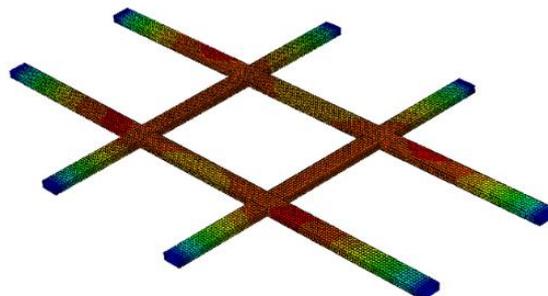
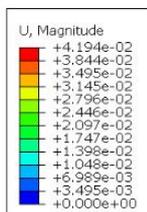


Bild 7-31 Verschiebung-Diagramm des Tragbalkens des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung

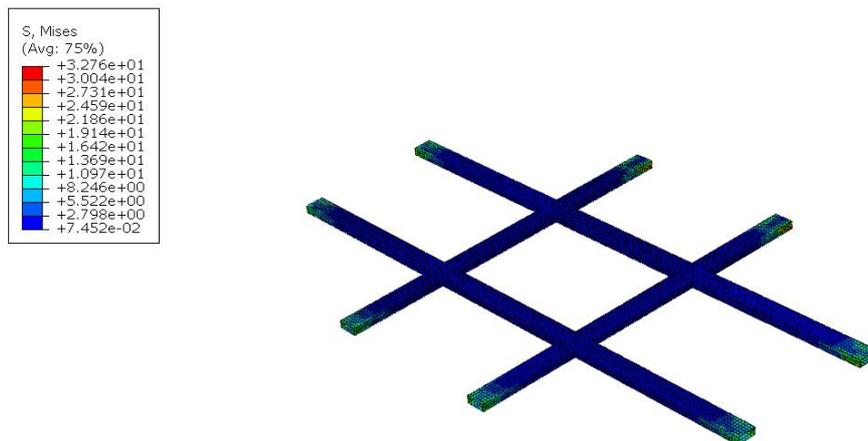


Bild 7-32 Spannung-Diagramm des Tragbalkens des kleinen Batteriepacks unter Notbremsung

Die maximale Verschiebung und die maximale Spannung des Tragbalkens des kleinen Batteriepacks sind gering, wenn das Elektrofahrzeug unter Notbremsung fährt. Die maximale Verschiebung des Tragbalkens beträgt 0,04194 mm und die maximale Spannung beträgt 32,76 MPa.

7.2.1.2 Bodenwellen und scharfen Kurven

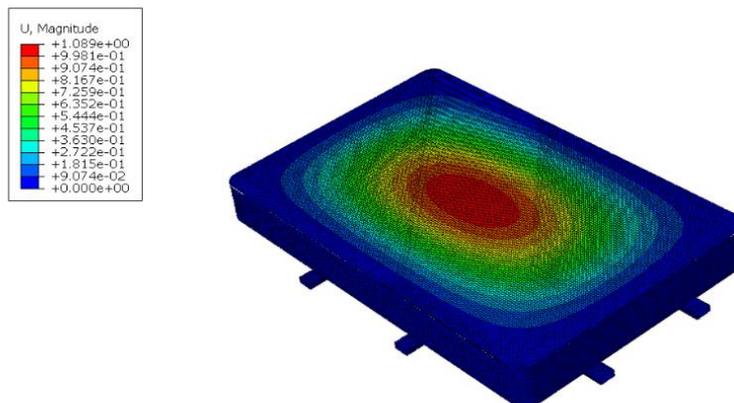


Bild 7-33 Verschiebung-Diagramm des kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen

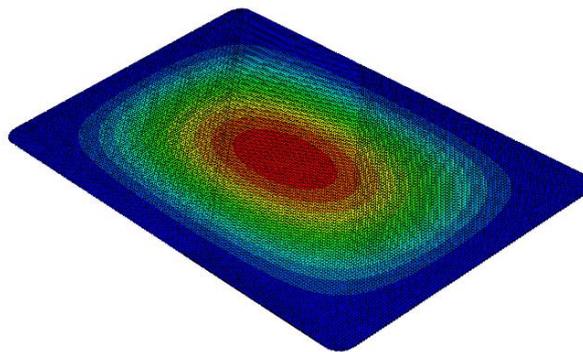
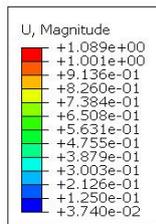


Bild 7-34 Verschiebung-Diagramm der oberen Abdeckung unter kombinierten Betriebsbedingungen

Leichte Verformung der oberen Abdeckung kleines Batteriepacks bei einer Kombination aus Bodenwellen und scharfen Kurvenfahrten. Die maximale Verschiebung beträgt 1,089mm.

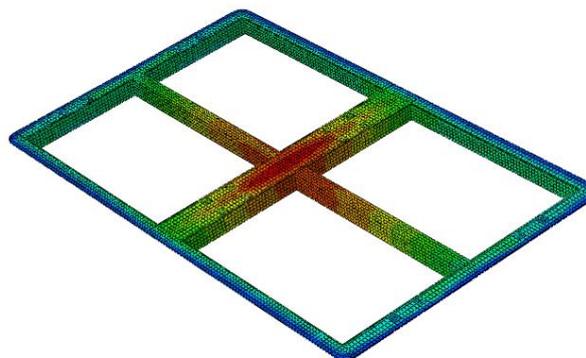
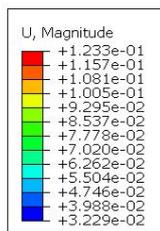


Bild 7-35 Verschiebung-Diagramm der Modulhalterung des kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen

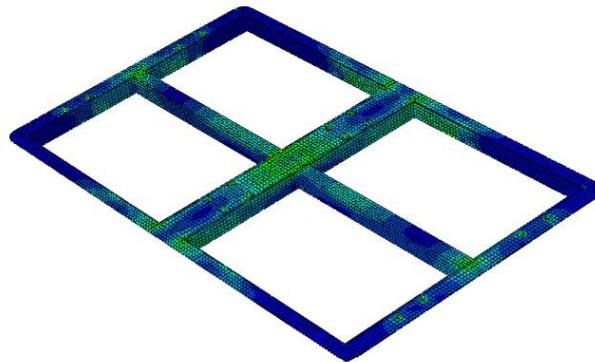
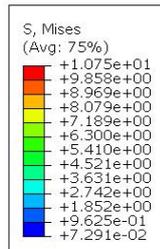


Bild 7-36 Spannung-Diagramm der Modulhalterung des kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen

Die maximale Verformung der Modulhalterung beträgt 0,1233mm und die maximale Spannung beträgt 10,75MPa unter den kombinierten Bedingungen von Bodenwellen und scharfen Kurven des Elektrofahrzeugs.

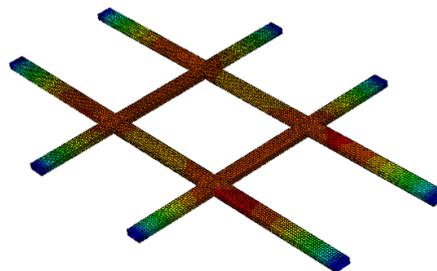
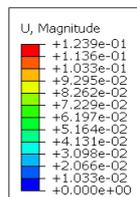


Bild 7-37 Verschiebung-Diagramm des Tragbalkens des kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen

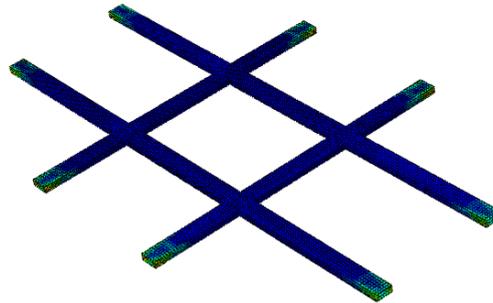
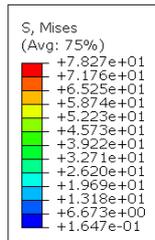


Bild 7-38 Spannung-Diagramm des Tragbalkens des kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen

Die maximale Verschiebung des Tragbalkens beträgt 0,1239 mm und die maximale Spannung beträgt 78,27 MPa.

7.3 Anwendung von Dämpfung und Federn

Nach der relevanten Literatur, die aktuelle Untersuchung des Einsatzes von Federn und Dämpfung zur Befestigung von Batteriepacks an der Karosseriestruktur beschränkt sich auf die Konzeptionierung.

Das Batteriepack ist durch vier Gruppen von Federn und Dämpfern an den Rahmen gekoppelt. Mit Dämpfern werden Schwingungen abgeschwächt. Und die Federn haben die Funktion, den Aufprall zu dämpfen.

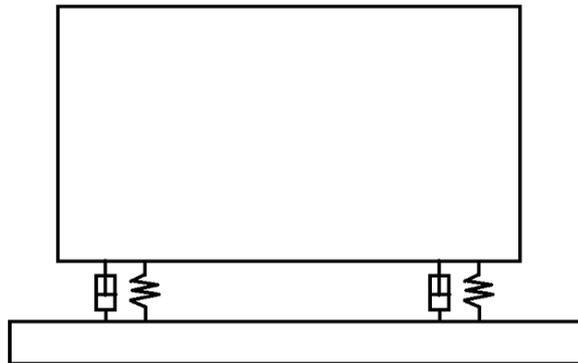


Bild 7-39 Abstützung des Batteriepacks mit Federn und Dämpfern

Das Feder- und Dämpfersystem bietet jedoch keine hohe Stabilität beim Beschleunigen, Bremsen oder Kurvenfahren des Elektrofahrzeugs. Die Hochspannungsleitungen und Hochspannungskomponenten im Batteriepack halten starken Schwingungen nicht stand. Und Federn und Dämpfer nehmen im Fahrwerk eines Elektrofahrzeugs viel Platz in Anspruch. Federn und Dämpfer auch sind Verschleißteile. Dies ist für die Sicherheit des Batteriepacks nicht förderlich.

Daher sollte der Batteriepack durch Schraubverbindungen, Schweißverbindungen usw. mit der Karosserie verbunden sein. Federn und Dämpfer können als Energieabsorber und nicht als Verbindungselemente wirken.

8 Auswertung der zwei Optimierungsmöglichkeiten

Die drei im Kapitel 7 erwähnten Methoden zur Optimierung von Batteriepacks werden hier systematisch ausgewertet. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf dem Vergleich der Ergebnisse von drei Varianten des Batteriepacks unter verschiedenen Betriebsbedingungen.

8.1 Ergebnisse unter Notbremsbedingungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei Varianten des Batteriepacks bei Betriebsbedingung mit Notbremsung verglichen.

Ursprüngliches Batteriepack	Statische Festigkeitsanalyse (Notbremsung)	
	Maximale Verschiebung [mm]	Maximale Spannung [MPa]
Obere Abdeckung	2,080	
Modulhalterung	0,1143	20,39
Tragbalken	0,1063	41,84
Batteriemodule	0,1235	

Tabelle 8-1 Zusammenfassung der Daten der ursprünglichen Batteriepacks unter Notbremsung

Optimiertes Batteriepack	Statische Festigkeitsanalyse (Notbremsung)	
	Maximale Verschiebung [mm]	Maximale Spannung [MPa]
Obere Abdeckung	1,232	
Modulhalterung	0,0777	18,94
Tragbalken	0,06799	30,43
Batteriemodule	0,08755	

Tabelle 8-2 Zusammenfassung der Daten des optimierten Batteriepacks unter Notbremsung

Kleine Batteriepacks	Statische Festigkeitsanalyse (Notbremsung)	
	Maximale Verschiebung [mm]	Maximale Spannung [MPa]
Obere Abdeckung	0,3628	
Modulhalterung	0,04548	8,771
Tragbalken	0,04194	32,76
Batteriemodule	0,0525	

Tabelle 8-3 Zusammenfassung der Daten der kleinen Batteriepacks unter Notbremsung

Beim Vergleich der Tabellen 8-1 und 8-2 ist ersichtlich, dass die maximale Verschiebung der oberen Abdeckung des formoptimierten Batteriepacks um 0,848 mm kleiner ist als die Verschiebung der ursprünglichen oberen Abdeckung des Batteriepacks. Dies bedeutet, dass die maximale Verschiebung des gesamten Batteriepacks um 0,848 mm verringert wird. Die maximale Verschiebung der Modulhalterung, die zum Schutz der Batteriemodule dient, wird um 0,0366 mm reduziert und die maximale Spannung um 1,45 MPa verringert. Die maximale Verschiebung des Tragbalkens, der zur Abstützung des gesamten Batteriepacks dient, wird um 0,03831 mm verringert, und die maximale Spannung wird um 11,41 MPa reduziert. Die maximale Verschiebung der Batteriemodule wird um 0,03595 mm verringert.

Aus dem Vergleich der Tabellen 8-1 und 8-3 geht hervor, dass die maximale Verschiebung der oberen Abdeckung des kleineren Batteriepacks um 1,7172 mm geringer ist als die Verschiebung der ursprünglichen oberen Abdeckung des Batteriepacks. Die maximale Verschiebung der Modulhalterung wird um 0,06882 mm und die maximale Spannung um 11,619 MPa reduziert. Die maximale Verschiebung des Tragbalkens wird um 0,06436 mm verringert und die maximale Spannung um 9,08 MPa reduziert. Die maximale Verschiebung der Batteriemodule wird um 0,071 mm verringert.

8.2 Ergebnisse unter kombinierten Betriebsbedingungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei Varianten des Batteriepacks bei Betriebsbedingungen mit Bodenwellen und scharfen Kurven verglichen.

Ursprüngliches Batteriepack	Statische Festigkeitsanalyse (Kombinierte Betriebsbedingungen)	
	Maximale Verschiebung [mm]	Maximale Spannung [MPa]
Obere Abdeckung	6,244	
Modulhalterung	0,3218	31,56
Tragbalken	0,3067	111,4
Batteriemodule	0,324	

Tabelle 8-4 Zusammenfassung der Daten der ursprünglichen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen

Optimiertes Batteriepack	Statische Festigkeitsanalyse (Kombinierte Betriebsbedingungen)	
	Maximale Verschiebung [mm]	Maximale Spannung [MPa]
Obere Abdeckung	3,701	
Modulhalterung	0,2139	24,78
Tragbalken	0,1932	78,25
Batteriemodule	0,2166	

Tabelle 8-5 Zusammenfassung der Daten des optimierten Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen

Kleine Batteriepacks	Statische Festigkeitsanalyse (Kombinierte Betriebsbedingungen)	
	Maximale Verschiebung [mm]	Maximale Spannung [MPa]
Obere Abdeckung	1,089	
Modulhalterung	0,1233	10,75
Tragbalken	0,1239	78,27
Batteriemodule	0,1213	

Tabelle 8-6 Zusammenfassung der Daten der kleinen Batteriepacks unter kombinierten Betriebsbedingungen

Die Verschiebung der oberen Abdeckung des optimierten Batteriepacks wird um 2,543 mm reduziert. Die maximale Verschiebung der Modulhalterung wird um 0,1079 mm und die maximale Spannung um 6,78 MPa reduziert. Die maximale Verschiebung des Tragbalkens

wird um 0,1135 mm reduziert und die maximale Spannung um 33,15 MPa verringert. Die maximale Verschiebung der Batteriemodule wird um 0,1074 mm verringert.

Aus dem Vergleich der Tabellen 8-4 und 8-6 geht hervor, dass die maximale Verschiebung der oberen Abdeckung des kleineren Batteriepacks um 1,7172 mm geringer ist als die Verschiebung der ursprünglichen oberen Abdeckung des Batteriepacks. Die maximale Verschiebung der Modulhalterung wird um 0,06882 mm und die maximale Spannung um 11,619 MPa reduziert. Die maximale Verschiebung des Tragbalkens wird um 0,06436 mm verringert und die maximale Spannung um 9,08 MPa reduziert. Die maximale Verschiebung der Batteriemodule wird um 0,071 mm verringert.

8.3 Gesamtauswertung der Konstruktion

Nach der vorläufigen Analyse der Ergebnisse der drei Batteriepacks in den Kapiteln 8.1 und 8.2 wird in diesem Kapitel eine Gesamtauswertung der Konstruktion der drei Batteriepacks vorgenommen. In einer Vorteil/ Nachteil-Auflistung wird die Beurteilung übersichtlich dargestellt.

8.3.1 Ursprünglicher Batteriepack

Vorteile:

- + Einfache Struktur
- + Leicht zu verarbeiten
- + Fasst bis zu acht Batteriemodule
- + Große Batteriepacks entsprechen eher der Marktnachfrage

Nachteile:

- Schwerstes Gewicht
- Zu große Verschiebungen und Spannungen
- Schlechte Sicherheit

Das ursprüngliche Design des Batteriepacks wies viele Mängel auf. Die obere Abdeckung des Batteriepacks ist zu dick, was zu einem hohen Gesamtgewicht führt. Und die obere Abdeckung ist zu flach und diese flache Struktur ist anfällig für große Verformungen. Die Verteilung der Tragbalken trägt das gesamte Batteriepack nicht gut. Und die Modulhalterung fungiert nicht als Knautschzone.

Das Gesamtgewicht des ursprünglichen Batteriepacks beträgt 516 kg.

8.3.2 Optimiertes Batteriepack (Optimierung bestehender Batteriepacks)

Vorteile:

- + Hohe Sicherheit
- + Große Batteriepacks entsprechen eher der Marktnachfrage
- + Leichteres Gewicht
- + Bessere Struktur der Tragbalken
- + Fasst bis zu acht Batteriemodule

Nachteile:

- Komplexe Balkenstruktur
- Schwierig zu verarbeiten

Optimierter Tragbalken für eine bessere Unterstützung der gesamten Packungsstruktur. Die Modulhalterung kann auch als Knautschzone dienen, und die Modulhalterung kann das Batteriemodul besser schützen. Die Verwendung einer verstärkten Struktur reduziert die Verschiebung der oberen Abdeckung des Batteriepacks.

Das Gewicht des optimierten Batteriepacks beträgt nur 485 kg im Vergleich zum ursprünglichen Batteriepack. Beide können acht Batteriemodule aufnehmen.

8.3.3 Kleine Batteriepack

Vorteile:

- + Hohe Sicherheit
- + Einfache Struktur
- + Leicht zu verarbeiten
- + Leichtestes Gewicht

Nachteile:

- Nur vier Batteriemodule können eingebaut werden
- Kleine Batteriepacks entsprechen nicht der Marktnachfrage

Obwohl die maximale Verschiebung und die maximale Belastung kleines Batteriepack relativ gering sind, ist die Konstruktion von kleines Batteriepack immer noch fehlerhaft. Kleines Batteriepack mit einem Gewicht von 273 kg.

9 Zusammenfassung

Gegenstand dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung, wie die Sicherheit von Batteriepacks für Elektrofahrzeuge verbessert werden kann. Modellierung der Komponenten des Batteriepacks mit Catia V5, gefolgt von einer Finite-Elemente-Analyse des Batteriepacks.

In dieser Diplomarbeit werden hauptsächlich zwei Arten von Analysen durchgeführt: statische Festigkeitsanalysen und Steifigkeitsanalysen. Anhand der Ergebnisse der Finite-Elemente-Analyse, d. h. der Spannungs- und Verschiebungsdaten des Batteriepacks unter verschiedenen Betriebsbedingungen, lässt sich feststellen, welche Komponenten des Batteriepacks nicht richtig ausgelegt sind. Das Design dieser Komponenten wird dann optimiert.

Außerdem wird ein kleines Batteriepack entworfen und schließlich die drei Optionen zu vergleichen.

Quellenverzeichnis

- /1/ K.K. Decker Karl-Heinz, Maschinenelemente, München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- /2/ Maschinenbau-Wissen, Widerstandsmoment, <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/balken-biegung/210-biegegewiderstandsmoment1>
- /3/ NIO ES8, https://www.sohu.com/a/491570570_120868542
- /4/ Velite5, Available: <https://www.saicmotor.com/m/xwzx/xwk/2017/48010.shtml>
- /5/ Volkswagen E-Golf, Available: <https://autophorie.de/2017/08/22/test-vw-e-golf-facelift/>
- /6/ Volkswagen E-Golf, Available: https://www.zeit.de/mobilitaet/2015-08/elektromobilitaet-batterie-recycling?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F
- /7/ Volkswagen ID.4, <https://www.thetigerhood.com/meb-id4/>

- /8/ Tesla model s, model-s-performance-tri-motor-desktop_carousel-new
- /9/ https://www.sohu.com/a/491570570_120868542
- /10/ Unlegierter Baustahl, <https://www.esb-group.com/produkte-din-en/unlegierter-baustahl/>
- /11/ WHZ Arbeitsblätter
