

Diplomarbeit

Nr. KFT/07/2023

Untersuchung eines Feder-Masse-Dämpfer-Schutzsystem für den Antriebsbatteriepack in Elektrofahrzeugen

eingereicht bei der Fakultät Automobil- und Maschinenbau
der Westsächsischen Hochschule Zwickau
am 30.06.2023

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: **Yuyang Li** geb. am:26.03.1998

Studiengang Kraftfahrzeugtechnik
Schwerpunkt Karosserieentwicklung und -konstruktion

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

Autorenreferat

In dieser Arbeit wurde das Feder-Masse-Dämpfer-System für den Antriebsbatteriepack in Elektrofahrzeugen untersucht, dazu wurden den mathematischen Modellen der erzwungenen Schwingungen von Systemen mit einem Freiheitsgrad mit Dämpfung gebildet. Es gibt zwei Hauptaufgaben.

- Erste Aufgabe: numerische Analyse

Bei Kenntnis der Anregung und der Reaktion ist das System zu ermitteln. Mehrere Datensätze sind bekannt: Intrusionsbeschleunigung der Batteriepack, Intrusionsgeschwindigkeit, Verformung der äußeren Batteriepack. Umfassend den inhärenten Schwingungseigenschaften des Systems werden auch die Elastizitäts- und Dämpfungskoeffizienten des einzelnen Feder-Masse-Dämpfer-Systems gelöst. Weitere Untersuchung von in Parallel geschalteten mehreren Feder-Masse-Dämpfer-Systemen.

- Zweite Aufgabe: Analyse der Simulation

- Methode 1:

Die Erregung und das System sind bekannt, werden die Reaktion per Rechner gerechnet.

Die Hauptaufgabe besteht darin, zu überprüfen, ob die dynamische Reaktion des Systems während des Betriebs (z. B. Verformungen, Verschiebungen, Spannungen usw.) den vorgesehenen Sicherheitsanforderungen entspricht.

Zunächst wurde mit Catia V5 ein Modell des Batteriepacks eines Elektrofahrzeugs erstellt und anschließend mit der Finite-Elemente-Software Abaqus eine dynamische Analyse des Batteriepacks durchgeführt.

Es wird simuliert, ob die folgenden Anforderungen für den Batteriepacks bei einem Frontalaufprall erfüllt sind:

- Die Verformung der Zellen liegt innerhalb von 4,5 mm.
- Die Streckgrenze von normalem Stahl DC03 liegt bei 183 MPa und die Festigkeitsgrenze bei 413 MPa. Um die Sicherheit des Batteriepacks zu gewährleisten, darf die Belastung des Batteriepackgehäuses und der Laschen während des Aufpralls die Festigkeitsgrenze nicht überschreiten.

- Methode 2:

Der Batteriepack ohne Feder-Masse-Dämpfungssystem und der Batteriepack mit Feder-Masse-Dämpfungssystem werden getrennt simuliert und die Ergebnisse der beiden Analysen werden verglichen, um zu beweisen, dass das entworfene Feder-

Masse-Dämpfungssystem aus Sicht der Beanspruchung, Dehnung und Energie schützend für den Batteriepack ist.

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 30.06.2023

.....

Yuyang Li

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	IV
Verzeichnis der Tabellen	VI
Verzeichnis der Formeln	VII
Abkürzungen und Erläuterung	VIII
Begriffserläuterung	IX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	4
2.1 Aufbau von Batterien für E-Autos	4
2.2 Theorie von Feder-Masse-Dämpfer-System	5
2.3 Stand der Forschung und Entwicklung zu den Lithium-Ionen-Batterien für E-Autos	6
2.3.1 Aktueller Stand der Forschung zur Finite-Elemente-Analyse von Antriebsbatterie	6
2.3.2 Aktueller Stand der Forschung zur Strukturoptimierung von Antriebsbatterie	8
2.3.3 Aktueller Stand der Forschung zur Ermüdungslebensdauer von Antriebsbatterie	9
3 Finite-Elemente-Modellierung bei Frontalaufprall	11
3.1 Fahrdynamikkordinatensystem	11
3.2 Vereinfachung des Gesamtfahrzeugmodells	11
3.2.1 Finite-Elemente-Modellierung des Gesamtfahrzeugs	12
3.2.2 Modellierung des Frontalaufpralls mit finiten Elementen	13

3.3	Validierung des Finite-Elemente-Modells für den Frontalaufprall	14
3.3.1	Kurve der Frontalaufprallenergie	15
3.3.2	Zusätzliche Massenkurve für Frontalaufprall	15
3.3.3	Vergleich der Verformung beim Frontalaufprall	16
3.3.4	Vergleichskurve der Frontalaufprallbeschleunigung	17
4	Analyse der Sicherheit von Batteriepack bei einem Frontalaufprall	19
4.1	Überblick über den Prozess der Batteriepacksbewegung	20
4.1.1	Analyse der Beschleunigung	21
4.1.2	Analyse der Verformung von Batteriepack	23
4.1.3	Analyse der Kraft	27
4.1.4	Analyse der Energieabsorption	28
5	Numerische Analyse von Feder-Masse-Dämpfer-System	31
5.1	Allgemeine Berechnungsinformationen	32
5.2	Berechnung der Elastizitäts- und Dämpfungskoeffizienten eines Feder-Masse-Dämpfungssystems	34
5.2.1	Analyse der relevanten Parameter	36
5.2.2	Die Bedeutung der Dämpfung	37
5.3	Parallelschaltung von Feder-Masse-Dämpfungssystem	38
5.3.1	Zusammengesetzte Federn	39
5.3.2	Zusammengesetzte Dämpfer	40
5.3.3	Bedeutung von Parallelschaltung der Feder-Masse-Dämpfer-System	40
6	Simulationsanalyse des Batteriepacks bei einem Frontaufprall	42

6.1	Allgemein	43
6.2	Mechanische Grundmodell	43
6.3	Modellierung der Struktur des Batteriepacks	44
6.3.1	Aufbau eines dreidimensionalen geometrischen Modells (Catia)	45
6.3.2	Vorverarbeitung des Modells (Part & Mesh)	46
6.3.3	Materialzuweisung (Property)	49
6.3.4	Aufbau von Verbindungszusammenhängen (Assembly & Interaction)	50
6.3.5	Definition von Randbedingungen (Load)	52
6.3.6	Festlegung von Modellausgaben und -steuerung (Step)	55
6.4	Vergleich der Simulationsergebnisse	56
6.4.1	Vergleich von Dehnung	57
6.4.2	Vergleich von Spannung	58
6.4.3	Vergleich von Energie	60
7	Zusammenfassung und Ausblick	62
	Quellenverzeichnis	64

Verzeichnis der Abbildungen

Bild 2- 1: Aufbau einer Antriebsbatterie im VW ID.3	5
Bild 3- 1: Fahrdynamikkordinatensystem	11
Bild 3- 2: Finite-Elemente-Modell des Gesamtfahrzeugs	12
Bild 3- 3: Finite-Elemente-Modell für Frontalaufprall	14
Bild 3- 4: Energiekurve	15
Bild 3- 5: Zusätzliche Masse-Kurven	16
Bild 3- 6: Crash-Verformung eines echten Autos	17
Bild 3- 7: Simulierte Crash-Verformung	17
Bild 3- 8: Crash-Beschleunigungs-Vergleichskurve	18
Bild 4- 1: Beschleunigungskurve beim Aufprall eines Batteriepacks	21
Bild 4- 2: Geschwindigkeitsprofil des Aufpralls auf den Batteriepack	22
Bild 4- 3: Ausmaß der Verformung des äußeren Gehäuses des Batteriepacks	24
Bild 4- 4: Ausmaß der Verformung der internen Halterung des Batteriepacks	25
Bild 4- 5: Batterie-Module	26
Bild 4- 6: Verformung des Batteriemoduls	27
Bild 4- 7: Energieaufnahmekurve des Batteriepacks	29
Bild 5- 1: Kraftanalyse des Batteriepackmodells	32
Bild 5- 2: Verteilung der vier Feder-Masse-Dämpfungssysteme	39
Bild 6- 1: Konventionelle CAE-Prozesskette	44
Bild 6- 2: Explosion von Batteriepack	46
Bild 6- 3: Batterieabdeckung_mesh controls	48
Bild 6- 4: Create Instance	50
Bild 6- 5: Randbedingungen von Batteriepack_mit Schutzsystem	52
Bild 6- 6: Randbedingungen von Batteriepack_mit Schutzsystem	53
Bild 6- 7: Randbedingungen von Batteriepack_ohne Schutzsystem	54
Bild 6- 8: Edit Step von erzwungen Kraft	55
Bild 6- 9: Edit Field Output & History Output Request	56
Bild 6- 10: Dehnung_ohne Schutzsystem	57
Bild 6- 11: Dehnung_mit Schutzsystem	57
Bild 6- 12: Spannung_ohne Schutzsystem	58
Bild 6- 13: Spannung_mit Schutzsystem	59

Bild 6- 14: Total Energy_ohne Schutzsystem60
Bild 6- 15: Total Energy_mit Schutzsystem60

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 6-1: Konsistente Einheiten	43
Tabelle 6-2: Geometrie des Batteriepacks Modellabmessungen	46
Tabelle 6-3: Auswahl der Materialien und Dicken für die einzelnen Komponenten des Batteriepacks	49

Verzeichnis der Formeln

Verzeichnis	Einheit	Erläuterung
T	ms	die Impulsdauer
Ω	1/s	die Erregerkreisfrequenz
\hat{F}	N	die Amplitude der Erregerkraft
b	N/m	die Elastizität
c	Ns/m	die Dämpfung
\dot{x}	m/s	Geschwindigkeit des Eindringens in den Batteriepack
\ddot{x}	m/s ²	Beschleunigung des Eindringens in den Batteriepack
x	mm	Die äußere Verformung des Batterie-packs
ω_0	1/s	Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems
D	/	Dämpfungsgrad
ω_1	1/s	Eigenkreisfrequenz des gedämpften Systems
η	/	Abstimmung Verhältnis
V_1	/	Verstärkung

Abkürzungen und Erläuterung

Abkürzung	Erläuterung
FEM	Finite Element Methode
DC	Gleichstrom
AC	Wechselstrom
EV	Elektrofahrzeuge
RP	Referenzpunkt
BMS	Batteriemanagementsysteme

Begriffserläuterung

Begriff

- 2. Newtonsches Gesetz: „Wirkt auf einen Körper eine Kraft, so wird er in Richtung der Kraft beschleunigt. Die Beschleunigung ist dabei direkt proportional zur Kraft und indirekt proportional zur Masse des Körpers.“ Dieses wird auch als Aktionsprinzip oder „lex secunda“ bezeichnet.
- 3. Newtonsches Gesetz: „Besteht zwischen zwei Körpern 1 und 2 eine Kraftwirkung, so ist die Kraft, die Körper 1 auf Körper 2 auswirkt, gleich der Kraft, die Körper 2 auf Körper 1 auswirkt.“ Es wird auch als Reaktionsprinzip, Wechselwirkungsprinzip, Gegenwirkungsprinzip oder als lex tertia bezeichnet.
- Halbschwingung: Als Halbschwingung, umgangssprachlich auch Halbwelle, bezeichnet man denjenigen Anteil einer sinusförmigen Schwingung, der keinen Vorzeichenwechsel enthält. Eine Halbschwingung wird demnach durch die periodisch auftretenden Nulldurchgänge begrenzt. Man kann in positive und negative Halbschwingungen unterscheiden. Die Dauer ist gleich der halben Periodendauer.
- FEM: Die FEM ist eine allgemeine numerische Methode zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen in zwei oder drei Raumvariablen (d.h. einige Randwertprobleme). Um ein Problem zu lösen, unterteilt die FEM ein großes System in kleinere, einfachere Teile, die als endliche Elemente bezeichnet werden. Dies wird durch eine bestimmte räumliche Diskretisierung in den Raumdimensionen erreicht, die durch die Konstruktion eines Netzes des Objekts umgesetzt wird: der numerische Bereich für die Lösung, der eine endliche Anzahl von Punkten hat. Die Formulierung eines Randwertproblems mit der Methode der finiten Elemente führt schließlich zu einem System algebraischer Gleichungen. Die Methode approximiert die unbekannte Funktion über das Gebiet. Die einfachen Gleichungen, die diese finiten Elemente modellieren, werden dann zu einem größeren Gleichungssystem zusammengefügt, das das gesamte Problem modelliert. Die FEM nähert sich dann einer Lösung durch Minimierung einer zugehörigen Fehlerfunktion über die Variationsrechnung.

1 Einleitung

nach der ersten Energiekrise in den 1970er Jahren hat ein starker Wandel von der fossilen zur post-fossilen Mobilitätskultur stattgefunden. Die Einführung des Elektromotors hat dabei eine wichtige Rolle gespielt, da er den Verbrennungsmotor entweder ergänzen (Hybridtechnologie) oder vollständig ersetzen kann. Dies schien den Zielkonflikt zwischen dem Bedürfnis nach Ressourcenschonung und der individuellen Mobilität zu lösen.

Ab den 1990er Jahren begann eine intensive Phase der Entwicklung von Elektrofahrzeugen. In dieser Zeit gab es jedoch einige Herausforderungen aufgrund der technischen Unreife, insbesondere im Bereich der Batterien. Die Batterietechnologie war noch nicht ausgereift genug, um den Anforderungen an eine ausreichende Reichweite und Leistungsfähigkeit gerecht zu werden.

In den letzten Jahren haben sich jedoch erhebliche Fortschritte in der Batterietechnologie ergeben. Es wurden neue Materialien und Technologien entwickelt, um die Energiedichte, Lebensdauer und Schnellladefähigkeit von Batterien zu verbessern. Dies haben zu einer erheblichen Zunahme der Reichweite und Leistungsfähigkeit von Elektrofahrzeugen geführt.

Dennoch gibt es noch viele Aspekte, die im Zusammenhang mit Elektrofahrzeugen weiterentwickelt werden müssen. Dazu gehören der Ausbau der Ladeinfrastruktur, die Weiterentwicklung von Schnellladetechnologien, die Integration erneuerbarer Energien in das Stromnetz, die effiziente Nutzung und Wiederverwertung von Batterien sowie die Reduzierung der Herstellungskosten. [1]

Die Sicherheit der Batterien ist von entscheidender Bedeutung für Elektrofahrzeuge (EVs). Ein korrektes Design und eine sorgfältige Konstruktion der Hochvoltbatterien sind unerlässlich, um potenzielle Gefahren zu minimieren.

Um die Sicherheit der Batterien zu gewährleisten, müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden. Das Batteriegehäuse muss robust und widerstandsfähig sein, um die Zellen vor äußeren Einflüssen und Beschädigungen zu schützen. Es sollten Materialien verwendet werden, die hohe Temperaturen und mechanischen Belastungen standhalten können.

Die Anordnung und der Schutz der Zellen innerhalb des Batteriegehäuses sind ebenfalls von großer Bedeutung. Die Zellen sollten so angeordnet sein, dass sie ausreichend

gekühlt werden können, um Überhitzung zu vermeiden. Gleichzeitig sollten sie so geschützt sein, dass sie bei einem Unfall keinen Schaden nehmen. Dies kann durch den Einsatz von speziellen Halterungen, Isolatoren und stoßdämpfenden Materialien erreicht werden.

Im Falle einer Beschädigung der Batterie, zum Beispiel durch einen Unfall, ist es wichtig, dass Mechanismen vorhanden sind, um schnell darauf zu reagieren. Ein solcher Mechanismus könnte beispielsweise eine Abschaltung der Stromversorgung sein, um die Wahrscheinlichkeit eines thermischen Durchgehens zu verringern. Es können auch Brandschutzsysteme wie Feuerlöscher oder automatische Löschsyste in Betracht gezogen werden, um ein unkontrollierbares Feuer zu verhindern oder einzudämmen.

Die Batteriemanagementsysteme (BMS) spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Sicherheit der Batterien. Sie überwachen die Temperatur, den Zustand und die Leistung der Batterie und können bei Abweichungen Maßnahmen ergreifen, um potenzielle Gefahren zu vermeiden. Das BMS kann beispielsweise die Lade- und Entladevorgänge überwachen, um eine Überladung oder Tiefentladung zu verhindern.

Die Hersteller von Elektrofahrzeugen setzen große Anstrengungen ein, um die Sicherheit der Batterien kontinuierlich zu verbessern. Sie unterziehen die Batterien umfangreichen Tests und Qualitätskontrollen, um sicherzustellen, dass sie den erforderlichen Sicherheitsstandards entsprechen. Regulierungsbehörden setzen ebenfalls strenge Vorschriften und Normen für die Sicherheit von Elektrofahrzeugen und deren Batterien fest.

[2]

In den letzten Jahren haben Wissenschaftler aus verschiedenen Ländern zahlreiche Forschungsarbeiten zu Fragen der Batteriesicherheit durchgeführt.

Die meisten von ihnen konzentrieren sich auf das Wärmemanagement, die statische Festigkeit, Vibrationen und Stöße sowie die Ermüdungslebensdauer von Batteriepacks, aber es gibt weniger Analysen zu Kollisionen und Quetschungen von Batteriepacks, insbesondere zu den Kollisions- und Quetschungsbedingungen in den Sicherheitsvorschriften für Batteriepacks. [3]

Allerdings scheinen externe Schutzsysteme für Batterien bisher weniger Aufmerksamkeit erhalten zu haben. In Ihrer Arbeit möchten Sie sich mit Feder-Masse-Dämpfer-Systemen als externe Batterieschutzsysteme beschäftigen, inspiriert von Stoßdämpfern für Kraftfahrzeuge.

Solche Systeme könnten potenziell dazu beitragen, die Batterie vor äußeren Einflüssen und Erschütterungen zu schützen. Eine effektive Stoßdämpfung könnte helfen, die Auswirkungen von Stößen und Vibrationen auf die Batterie zu reduzieren und so deren Lebensdauer und Leistung zu verbessern.

Die Integration von Feder-Masse-Dämpfer-Systemen als externen Schutz für Batterien könnte eine vielversprechende Richtung sein, um die Batteriesicherheit weiter zu verbessern. Allerdings ist es wichtig zu beachten, dass solche Systeme sorgfältig entwickelt, konstruiert und getestet werden müssen, um sicherzustellen, dass sie effektiv funktionieren und die Integrität der Batterie gewährleisten.

2 Stand der Technik

2.1 Aufbau von Batterien für E-Autos

Lithium-Ionen-Batterien bestehen aus einer positiven Elektrode, die aus Lithiumverbindungen wie Lithiumcobaltoxid besteht, und einer negativen Elektrode, die aus Graphit besteht. Der Elektrolyt, der zwischen den beiden Elektroden liegt, ist eine spezielle Flüssigkeit, die dazu dient, den Transport von Lithiumionen zwischen den Elektroden zu ermöglichen.

Lithium-Ionen sind positiv geladene Ionen, da sie ein Elektron verloren haben. Während des Entladungsprozesses bewegen sich die Lithiumionen vom positiven Pol zur negativen Elektrode durch den Elektrolyten. Gleichzeitig werden Elektronen von der negativen Elektrode abgegeben und über einen externen Stromkreis zur positiven Elektrode geleitet, wo sie mit den Lithiumionen reagieren und die elektrische Energie erzeugen.

Bei der Aufladung des Akkus wird dieser Prozess umgekehrt. Die elektrische Energie von einer externen Stromquelle wird verwendet, um die Lithiumionen von der negativen Elektrode zur positiven Elektrode zu bewegen, wodurch der Akku wieder aufgeladen wird.

Die Verwendung von negativ geladenen Ionen spielt in Lithium-Ionen-Batterien keine Rolle. Der Hauptmechanismus basiert auf dem Austausch von Lithiumionen zwischen den Elektroden.

Elektroautos verwenden in der Regel Lithium-Ionen-Zellen, ähnlich wie Mobiltelefone oder Notebooks. Eine einzelne Batteriezelle ist die kleinste Einheit im Batteriesystem und hat eine bestimmte Spannung und Kapazität. Im Falle des VW-Konzerns werden beispielsweise 24 Zellen zu einem Batteriemodul zusammengefasst.

Die Anzahl der Module kann je nach Fahrzeug und gewünschter Reichweite variieren. Durch das Zusammenschalten mehrerer Module wird eine höhere Gesamtkapazität und Reichweite erreicht. Die Spannung in diesen Batteriesystemen ist deutlich höher als die Spannung einer herkömmlichen Steckdose. Im VW-System liegt die Spannung bei bis zu 408 Volt, während andere Hersteller sogar mit bis zu 800 Volt arbeiten.

Um den Energiefluss zwischen Batterie und Elektromotor zu steuern und den in der Batterie gespeicherten Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln, wird eine

Leistungselektronik eingesetzt. Diese wandelt den Gleichstrom (DC) in Wechselstrom (AC) um, der vom Elektromotor des Fahrzeugs verwendet wird. Außerdem wird durch die Leistungselektronik der Gleichstrom für das 12-Volt-Bordnetz erzeugt, das für andere elektrische Komponenten im Fahrzeug benötigt wird.

Die Batteriesysteme in Elektroautos sind normalerweise flach im Unterboden des Fahrzeugs eingebaut. Dies bietet mehrere Vorteile, wie zum Beispiel den Schutz vor Kollisionen und die Ausnutzung des verfügbaren Raums. Die Batterien tragen auch zum tiefen Schwerpunkt von batterieelektrischen Fahrzeugen bei, was sich positiv auf die Fahrstabilität auswirkt.

Es ist wichtig anzumerken, dass die beschriebenen Details spezifisch für den VW-Konzern erwähnt wurden und es von Hersteller zu Hersteller Unterschiede in der genauen Umsetzung und den technischen Spezifikationen geben kann. [4]

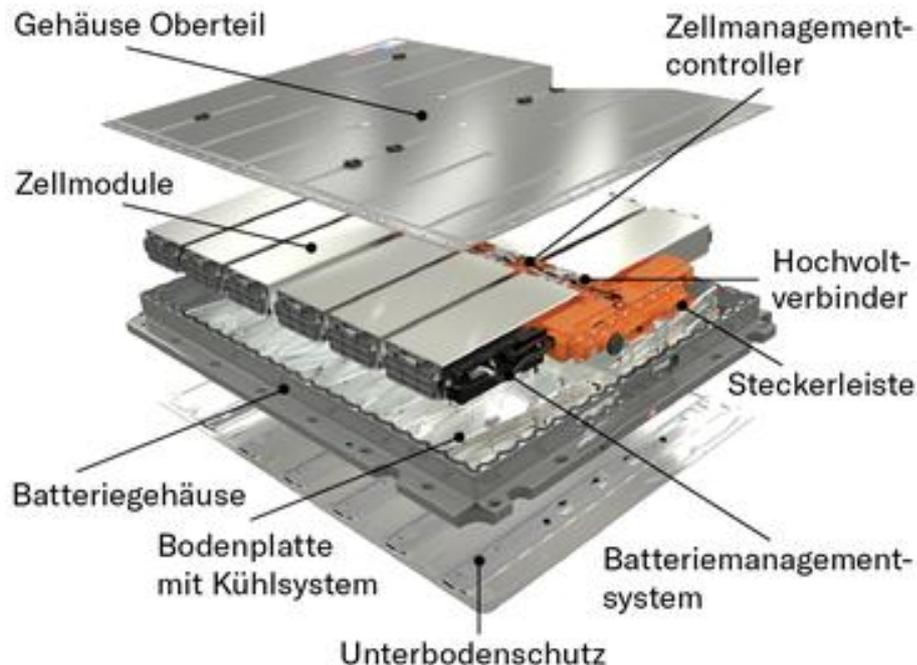


Bild 2-1: Aufbau einer Antriebsbatterie im VW ID.3

2.2 Theorie von Feder-Masse-Dämpfer-System

Die Grundelemente eines jeden mechanischen Systems sind die Masse, die Feder und der Stoßdämpfer.

- Masse (einschließlich Rotationsträgheit):

Die Masse eines Körpers ist ein Maß für seine Trägheit und die Menge an Materie, die er enthält. Sie bestimmt, wie schwer ein Objekt ist und wie es auf äußere Kräfte reagiert. Die Massenträgheit bezieht sich auf die Fähigkeit eines Körpers, seine Geschwindigkeit oder Richtung zu ändern. Die Masse beinhaltet auch die Rotationsträgheit, die angibt, wie schwer es ist, die Rotationsbewegung eines Objekts zu ändern.

– Feder:

Eine Feder ist ein elastisches Element, das potenzielle Energie speichern kann. Wenn eine Feder zusammengedrückt oder gestreckt wird, speichert sie potenzielle Energie, die später wieder in kinetische Energie umgewandelt werden kann. Die Steifigkeit der Feder beschreibt, wie leicht oder schwer sie komprimiert oder gedehnt werden kann. Eine steifere Feder erfordert mehr Kraft, um sie zu verformen, während eine weichere Feder weniger Kraft erfordert.

– Dämpfer:

Ein Dämpfer ist ein Element, das mechanische Energie verbraucht und somit die Bewegung eines Systems dämpft. Dämpfer werden verwendet, um die Schwingungen oder Vibrationen in mechanischen Systemen zu reduzieren. Der Dämpfungsfaktor beschreibt das Ausmaß der Dämpfung, also wie effektiv der Dämpfer die Energie absorbiert und in Wärme umwandelt. Ein höherer Dämpfungsfaktor bedeutet eine stärkere Dämpfung und eine schnellere Reduktion der Bewegung des Systems. [5]

2.3 Stand der Forschung und Entwicklung zu den Lithium-Ionen-Batterien für E-Autos

2.3.1 Aktueller Stand der Forschung zur Finite-Elemente-Analyse von Antriebsbatterie

Als wichtiges lasttragendes Bauteil muss die Power-Battery-Box mit einer großen Anzahl von Energiezellen ausgestattet sein, um die Leistungsanforderungen des Fahrzeugs zu erfüllen. Der Einsatz von Simulationssoftware zur Durchführung von Finite-Elemente-Analysen des Batteriekastens während der Entwurfsphase kann die Zuverlässigkeit des Entwurfs wirksam und schnell überprüfen und die Testkosten senken.

Xia Y., Tomasz W. et al. [6] stellen eine umfassende Diskussion über die Auswirkungen des Bodens eines Lithium-Ionen-Batteriegehäuses eines Elektrofahrzeugs auf den Boden vor. Es wurde ein Finite-Elemente-Modell entwickelt, um die Verformung des Bodens des Batteriekastens nach dem Eindringen der Spitze durch Kräfte und Verschiebungen zu untersuchen und schließlich ein verbessertes Design der Schutzstruktur des Batteriekastens vorzuschlagen. Durch die Erstellung eines verfeinerten Modells des Batteriegehäuses, das sich auf die Beschleunigungswerte und die Verformung des Innenrahmens, der Batteriekontakte und der Laschen während des Kollisionsprozesses konzentrierte, fanden sie die Mängel des Batteriegehäusedesigns und lieferten eine effektive Methode für die Designentwicklung und Verbesserung des Batteriegehäuses. Peixin H. et al. [7] von der South China University of Technology führten eine Studie über die Sicherheit des Batteriegehäuses unter zufälligen Vibrations- und Aufprallbedingungen durch, indem sie ein verfeinertes Modell des Batteriegehäuses erstellten, zunächst zufällige Vibrationen in X-, Y- und Z-Richtung durchführten und dann eine Halbsinus-Stoßwelle von 25 g in Z-Richtung auf das Batteriegehäuse aufbrachten. Schließlich wurden die Ergebnisse des Batteriekastens aus der Spannungs- und Beschleunigungsperspektive analysiert, um die Spannungs- und Beschleunigungsverteilungen des Kastens und der Kontakte zu erhalten und die Stellen der sicherheitsgefährdenden Kontakte zu ermitteln, was eine Referenz für die Sicherheitsauslegung des Batteriekastens darstellt. Xu H. [8] von der Universität Hunan verwendete die Software ABAQUS, um den Batteriekasten bei scharfem Bremsen auf holprigen Straßen und scharfem Abbiegen auf holprigen Straßen zu analysieren, und verwendete dann die Modalanalyse, um die Eigenfrequenz und das Schwingungsmuster zu extrahieren und zu überprüfen, ob die Steifigkeit und Festigkeit des Kastens den Anforderungen entsprachen. Fuchun F. et al. [9] von Lixin Power Battery Co., Ltd. erstellten mit der Software PROE ein dreidimensionales Modell des Batteriekastens und führten dann in der Software ANSYS Workbench eine Analyse der statischen Eigenschaften gemäß den Anforderungen des Herstellers durch. Schließlich wurde die Modalanalyse des Batteriekastens durchgeführt, und entsprechend den Ergebnissen der Analyse wurde die lokale Steifigkeit des Batteriekastens durch Hinzufügen von Verstärkungsträgern erhöht.

2.3.2 Aktueller Stand der Forschung zur Strukturoptimierung von Antriebsbatterie

Strukturoptimierung ist von großem Wert für die Verbesserung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Batteriegehäusen und für die Realisierung von Leichtbaukonstruktionen.

Matthias H. et al. [10] optimierten mithilfe von Optistruct die Form des Batteriegehäuses, wodurch die dynamische Steifigkeit, die weit über dem Resonanzbereich liegt, sowie die statische Festigkeit verbessert und eine Leichtbauweise erreicht wurde. Guiting T. [11] von der Chongqing Jiaotong University führte statische und dynamische Analysen eines Batteriegehäuses für ein Modell eines reinen Elektrofahrzeugs mit Batteriewechsel durch und optimierte das Design auf der Grundlage der Analyseergebnisse. Pinjian W. [12] von der Universität Hunan führte eine Reihe von Strukturoptimierungen für ein Batteriepack eines reinen Elektrofahrzeugs durch, wobei er die obere Abdeckung durch ein leichtes Material ersetzte, die Topologie des Verstärkungsbalkens optimierte, die Abmessungen der Laschen des Batteriepacks, der Batterieabdeckung, des Batteriefachs und der unteren Abdeckung optimierte und die Form der oberen Abdeckung optimierte. Die Leichtbauweise wurde unter Beibehaltung einer guten Sicherheit erreicht.

Gaosong J. [13] von der Universität Hunan setzte Optistruct ein, um die Abmessungen des unteren Gehäuses und die Form des oberen Deckels für einen Batteriekasten eines reinen Elektrofahrzeugs zu optimieren. Yu Z. et al. [14] führten eine Studie zur Gewichtsreduzierung des unteren Gehäuses eines Elektroauto-Batteriekastens mit der Software HYPERMESH durch. Vor der Optimierung des unteren Gehäuses wurde zunächst die Festigkeit durch Aufprallbedingungen überprüft, und es wurde festgestellt, dass die Redundanz der ursprünglichen Struktur die Masse reduzieren konnte. Das untere Gehäuse wurde dann hinsichtlich seiner Form mit Hilfe von Verstärkungsstäben optimiert. Schließlich wurden die beiden Optimierungslösungen zusammen betrachtet, um den unteren Kasten so zu gestalten, dass er die Anforderungen an das Gewicht erfüllt. Shujian Y. [15] von der Universität Hunan führte die Optimierung eines Batteriekastens für ein Unternehmen durch. Zunächst wurden die Beanspruchungen der Struktur unter scharfen Bremsbedingungen auf holprigen Straßen und scharfen Kurvenfahrten auf holprigen Straßen analysiert, dann wurden Simulationen der ersten Modalwerte siebter Ordnung und der Festfrequenzschwingungen analysiert, während spezifische Tests zu Festfrequenzschwingungen durchgeführt und die Daten verglichen wurden. Schließlich

wurden die oberen und unteren Platten optimiert und die Verteilung der Bewehrung von Decke und Boden rationalisiert. Das neue Design reduzierte das Gewicht des Batteriekastens um 7,2 % und verbesserte die Sicherheitsleistung. Junshan G. et al. [16] führten eine Studie zur Gewichtsreduzierung einer neuen Energiebus-Batteriebox durch. Zunächst wurden die Beschleunigungswerte für Beschleunigung, Bremsen, Kurvenfahrt und Springen entsprechend den Anforderungen des Unternehmens ermittelt. Schließlich wurden Schwingungssimulationen und Schwingungstests an der entworfenen Batteriebox durchgeführt, um die Richtigkeit der Optimierungsmethode zu demonstrieren.

2.3.3 Aktueller Stand der Forschung zur Ermüdungslebensdauer von Antriebsbatterie

Bei der Konstruktion von Baumaschinen muss neben der Festigkeit und Steifigkeit auch das Risiko von Ermüdungsschäden aufgrund von Strukturversagen berücksichtigt werden. In den letzten Jahren haben viele Wissenschaftler eine Reihe von Studien zur Analyse der Ermüdungslebensdauer von Energiebatteriekästen durchgeführt.

Wenwei W. et al. [17] von der Technischen Universität Peking führten eine Ermüdungslebensanalyse eines Batteriekastens für ein Elektrofahrzeug auf der Grundlage des SAE J2380-Standards durch, basierend auf der Frequenzbereichsmethode und unter zufälligen Schwingungen, um die am meisten gefährdeten Stellen der Kastenstruktur zu finden. Yike H. et al. [18] von der Southwest Jiaotong University verwendeten die Software MSC Fatigue, um eine innovative mehrachsige Ermüdungslebensdaueranalyse in Z-, Y- und X-Richtung für einen Batteriekasten eines Zuges durchzuführen.

Gu R. [19] von der Dalian Jiaotong University hat die Schweißnaht des BP-1-Akkupacks als Ermüdungslebensdauer berechnet. Die Ermüdungslebensdauer der Schweißnaht wurde mit der Software Fe-weld auf der Grundlage der Strukturspannungsmethode und die Ermüdungslebensdauer der Schweißnaht wurde mit der Software nCode-DesignLife auf der Grundlage der Nennspannungsmethode gelöst. Die verschiedenen Methoden werden verglichen und validiert. Die verschiedenen Methoden werden verglichen und validiert. Zhigang C. et al [20] von der Nanjing Automotive Engineering Research Institute für eine Batterie-Box, die Box Schloss Körper für die Ermüdungslebensdauer Analyse. Fatigue Software wurde verwendet, um die Ermüdungslebensdauer des Schlosskörpers unter zufälligen Vibrationen zu berechnen, die beste Lösung für die Konstruktion des Schlosskörpers zu finden und die optimale Verteilung der Dicke des Schlosskörpers

schnell zu erhalten und die Entwicklungseffizienz zu verbessern. Changde W. et al [21] von der Universität Hunan untersuchten die Ermüdungslebensdauer eines Batteriekastens mit Hilfe der Software HYPERMESH, ABAQUS und nCode. Zunächst wurde eine Schwingungsstudie mit konstanter Frequenz durchgeführt, um die maximale Spannungsverteilung an den Schweißnähten des Kastens zu ermitteln.

Anschließend wurde eine Analyse der Ermüdungslebensdauer durchgeführt, um die Lebensdauerwerte an den Schweißnähten zu ermitteln. Schließlich wurden Schwingungsprüfungen durchgeführt, um die Ergebnisse zu verifizieren, und die Ergebnisse der Simulationsanalyse wurden kombiniert, um eine vernünftige Anordnung für die Schweißnähte des Kastens vorzuschlagen. Qian P. et al. vom Xiamen Institute of Technology [22] verwendeten die Software Optistruct und nCode, um das Problem zu reproduzieren und die Ermüdungslebensdauer unter Verwendung der Leistungsspektrumdichte der Straßenoberfläche für einen Batteriekasten eines Elektrofahrzeugs zu lösen, der während der tatsächlichen Nutzung beschädigt wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass Ermüdungsschäden in Z-Richtung auftreten und dass der Ort der Schäden mit dem tatsächlichen Ort übereinstimmt, was die Schlüsselrolle der Simulationsanalyse verdeutlicht. Xiaowei L. [23] von der Universität Qingdao untersuchte die Ermüdungslebensdauer eines Batteriekastens und stieß dabei auf strukturelle Konstruktionsprobleme. Um die Struktur des Batteriegehäuses genau zu simulieren, wurde den Batteriepack in feste Zellen unterteilt und in Kontakt mit dem Gehäuse gebracht. Dann wurde eine Frequenzgangstudie und schließlich eine Ermüdungslebensdauerstudie mit der nCode-Software durchgeführt. Die Berechnungen ergaben, dass eine Beschädigung der Füße in Z-Richtung möglich ist, was zu weiteren Konstruktionsverbesserungen führen wird.

3 Finite-Elemente-Modellierung bei Frontalaufprall

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, dass die Verformung des simulierten Unfallfahrzeugs im Allgemeinen mit der des realen Fahrzeugs übereinstimmt, indem nach relevanten Informationen gesucht wird, die eine Grundlage für die anschließende Untersuchung des Batteriepacks bilden.

3.1 Fahrdynamikkordinatensystem

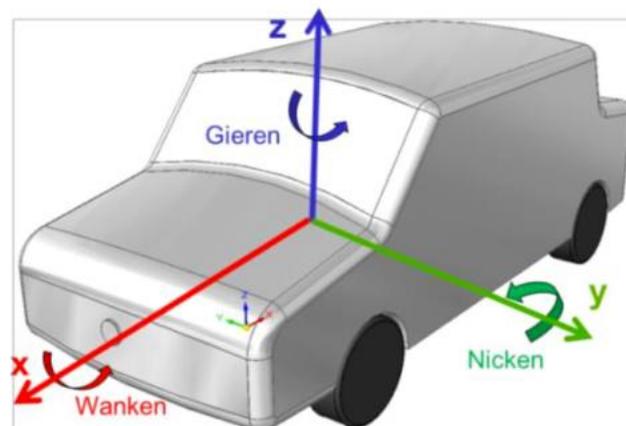


Bild 3-1: Fahrdynamikkordinatensystem

- positive x-Achse zeigt in Fahrtrichtung des Fahrzeugs
- die z-Achse zeigt nach oben
- die y-Achse zeigt nach links
- Definiert die Bewegungen des Fahrzeuges [24]

3.2 Vereinfachung des Gesamtfahrzeugmodells

Die Vereinfachungen, die nach einem Frontalaufprall vorgenommen werden, dienen dazu, die Simulationsgenauigkeit zu gewährleisten und gleichzeitig die Berechnungszeit zu verkürzen. Es werden hauptsächlich zwei Arten von Vereinfachungen angewendet:

(1) Vereinfachung betroffener Bauteile: Die Bauteile, die während des Frontalaufpralls direkt betroffen waren, können eine komplexe Geometrie und Materialverhalten aufweisen. Um die Berechnungszeit zu reduzieren, werden diese Bauteile vereinfacht. Beispielsweise werden das Batteriesteuerungs-system von Elektrofahrzeugen, Fahrzeugsitze und der Fahrzeuginnenraum in der Simulation möglicherweise nicht berücksichtigt. Anstelle dieser

detaillierten Bauteile können Punktmassen verwendet werden, um das Gesamtverhalten des Fahrzeugs zu repräsentieren. Dies ermöglicht eine schnellere Berechnung, da die Analyse auf der Ebene des Gesamtfahrzeugs erfolgt.

(2) Vereinfachung weniger betroffener Teile: Teile, die beim Frontalaufprall selbst weniger verformt und strukturell weniger komplex sind, können ebenfalls vereinfacht werden. Da diese Teile einen geringeren Einfluss auf die Gesamtstruktur des Fahrzeugs haben, können sie in der Simulation weniger detailliert modelliert werden. Dies kann die Berechnungszeit weiter reduzieren, da weniger Berechnungen für diese Teile durchgeführt werden müssen.

Durch die Anwendung dieser Vereinfachungen können die Simulationszeiten erheblich verkürzt werden, während immer noch ein akzeptables Maß an Genauigkeit für die Analyse der Hauptkomponenten und Strukturen nach dem Frontalaufprall gewährleistet wird. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass diese Vereinfachungen Auswirkungen auf die Präzision der Ergebnisse haben können. Daher ist eine sorgfältige Abwägung zwischen Genauigkeit und Rechenzeit erforderlich, um die Anforderungen der spezifischen Analyse zu erfüllen.

3.2.1 Finite-Elemente-Modellierung des Gesamtfahrzeugs

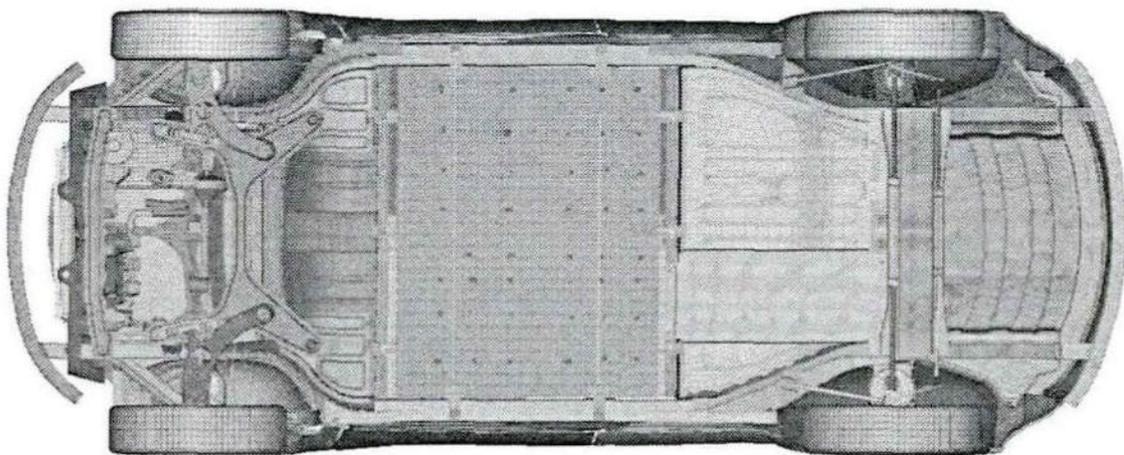


Bild 3-2: Finite-Elemente-Modell des Gesamtfahrzeugs

Für das Elektrofahrzeug wurde ein Finite-Elemente-Modell entwickelt, bei dem die Maschenweite des Fahrzeugs der Größe des Batteriepacks entspricht. Um die

Kompatibilität des Modells sicherzustellen, wurde eine Maschenteilung von 10 mm verwendet. Die Verbindungen zwischen den Karosserieteilen wurden mit BEAM-Zellen simuliert, während die Schweißverbindungen der Karosserie mit *CONTACT-SPOTWELD simuliert wurden. Die Qualität des Netzes wurde gemäß den Standards für Zellenqualität streng kontrolliert.

Um eine korrekte Berechnung sicherzustellen, wurde das Finite-Elemente-Modell des Fahrzeugs mit durchdringenden Zellen versehen und einer Gegenprobe unterzogen. Um die Genauigkeit des Modells zu gewährleisten, wurde angestrebt, dass der Anteil der dreieckigen Netzzellen an der Gesamtzahl der Zellen des Fahrzeugnetzes innerhalb von 10 % liegt, wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Das Modell hat eine maximale Länge von 4613 mm, eine maximale Breite von 1842 mm und eine maximale Höhe von 1547 mm. Insgesamt gibt es 2052529 Zellen und 1409278 Knoten, wobei der Anteil der dreieckigen Zellen 1,07 % beträgt. Das Jacques-Verhältnis, eine Kennzahl zur Beurteilung der Netzqualität, liegt unter 0,6.

3.2.2 Modellierung des Frontalaufpralls mit finiten Elementen

Für die Simulation des Frontalaufpralls bei einem Elektrofahrzeug wird der Batteriepack mit dem Fahrzeug verbunden. Hierfür werden simuliert RB2-Schraubverbindungen verwendet. Anschließend werden die Modellteile für die Kontaktaufnahme eingerichtet. Es gibt drei Hauptarten von Kontakten: Selbstkontakt, Face-to-Face-Kontakt und Schaufensterkontakt. Im Finite-Elemente-Modell des gesamten Fahrzeugs müssen neben den Volumenkörpern auch die Zusammensetzungen der verschiedenen Teile mit direktem Kontakt aufgebaut werden.

Daher wird im Modell ein direkter Kontakt (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID) zwischen dem Fahrzeug und dem Batteriepack sowie zwischen dem Fahrzeug und der festen Aufprallwand hergestellt. Zusätzlich wird eine starre Wand aufgebaut, um den Boden zu simulieren und einen Kontakt zwischen den Fahrzeugreifen und dem Boden herzustellen.

Die Erstellung eines Finite-Elemente-Simulationsmodells gemäß den chinesischen C-NCAP-Vorschriften von 2018 für den Frontalaufprall eines Elektrofahrzeugs wird durchgeführt. (Siehe Bild 3-3)

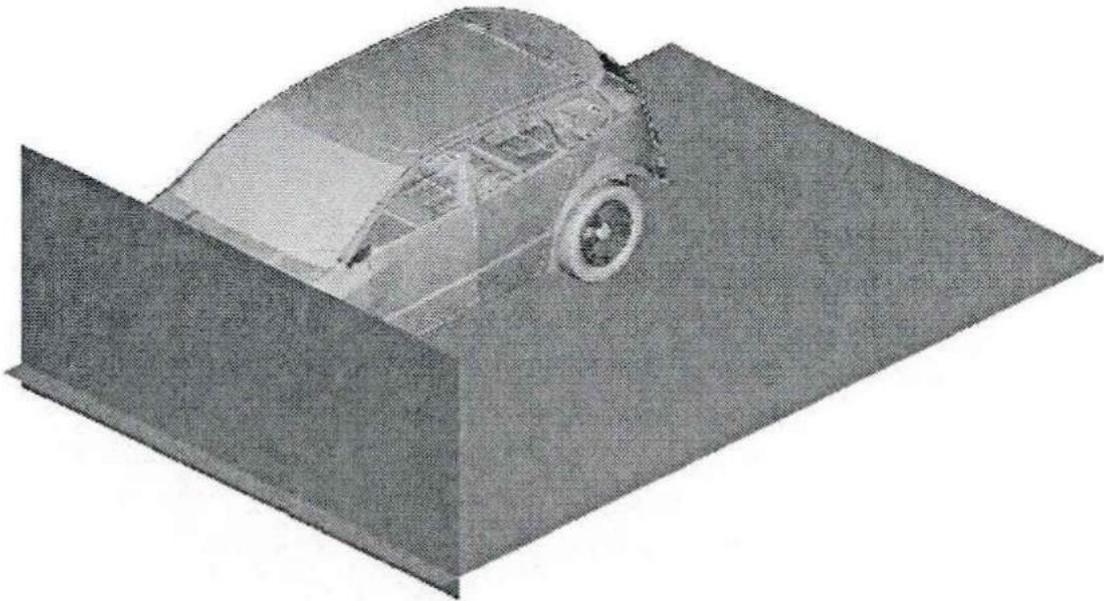


Bild 3-3: Finite-Elemente-Modell für Frontalaufprall

3.3 Validierung des Finite-Elemente-Modells für den Frontalaufprall

Um eine zuverlässige Simulationsanalyse durchzuführen, wird die Gültigkeit des Finite-Elemente-Modells überprüft. Durch die Verwendung eines gültigen Finite-Elemente-Modells kann eine umfassende vergleichende Analyse des Batteriepacks ermöglicht werden. Das in dieser Studie verwendete Finite-Elemente-Modell für den Frontalaufprall basiert auf realen Frontalcrash-Experimenten, die an tatsächlichen Fahrzeugen durchgeführt wurden.

Durch die Berücksichtigung von realen Frontalcrash-Experimenten bei der Entwicklung des Finite-Elemente-Modells wird sichergestellt, dass das Modell realitätsnah und repräsentativ ist. Die während der Experimente gesammelten Daten und Erkenntnisse werden in das Modell integriert, um die Simulationsergebnisse so genau wie möglich abzubilden.

Durch die Verwendung eines validierten Finite-Elemente-Modells können wir Vertrauen in die Ergebnisse der Simulation gewinnen und sie zur Analyse des Batteriepacks im Frontalaufprall nutzen. Dies ermöglicht eine fundierte Bewertung der Auswirkungen des Frontalaufpralls auf den Batteriepack und unterstützt die Entwicklung von Sicherheitsmaßnahmen und -strukturen, um die Integrität und Leistung des Batteriesystems in solchen Szenarien zu gewährleisten.

3.3.1 Kurve der Frontalaufprallenergie

Gemäß Bild 3-3 beträgt die Gesamtenergie des gesamten Systems, das an der Kollision beteiligt ist, 132.600 J. Diese Gesamtenergie setzt sich aus der anfänglichen kinetischen Energie des Elektrofahrzeugs zusammen. Ab dem Zeitpunkt, an dem die vordere Versicherung des Elektrofahrzeugs die feste Kollisionswand berührt, wird die kinetische Energie des Fahrzeugs allmählich in innere Energie umgewandelt. Dies führt zu einer Verformung und Zerquetschung der Fahrzeugfront.

Während des gesamten Kollisionsprozesses bleibt die Gesamtenergie konstant, und es gibt keine abrupten Änderungen oder plötzlichen Kurven. Ein großes Sanduhrleck tritt nicht auf. Die maximale Sanduhrleckenergie beträgt 3347 J, was etwa 2,52 % der Gesamtenergie entspricht. Dieser Wert liegt unter 5 % der Gesamtenergie.

Diese Informationen zeigen, dass während der Kollision eine effiziente Energieabsorption stattfindet, da die kinetische Energie des Fahrzeugs in die Verformung und Verzerrung der Fahrzeugfront umgewandelt wird. Die begrenzte Energie des Sanduhrlecks deutet darauf hin, dass die Struktur des Fahrzeugs wirksam in der Lage ist, die Energie des Aufpralls zu absorbieren und zu verteilen, was zu einer besseren Sicherheit für die Insassen und den Schutz des Batteriepacks führt.

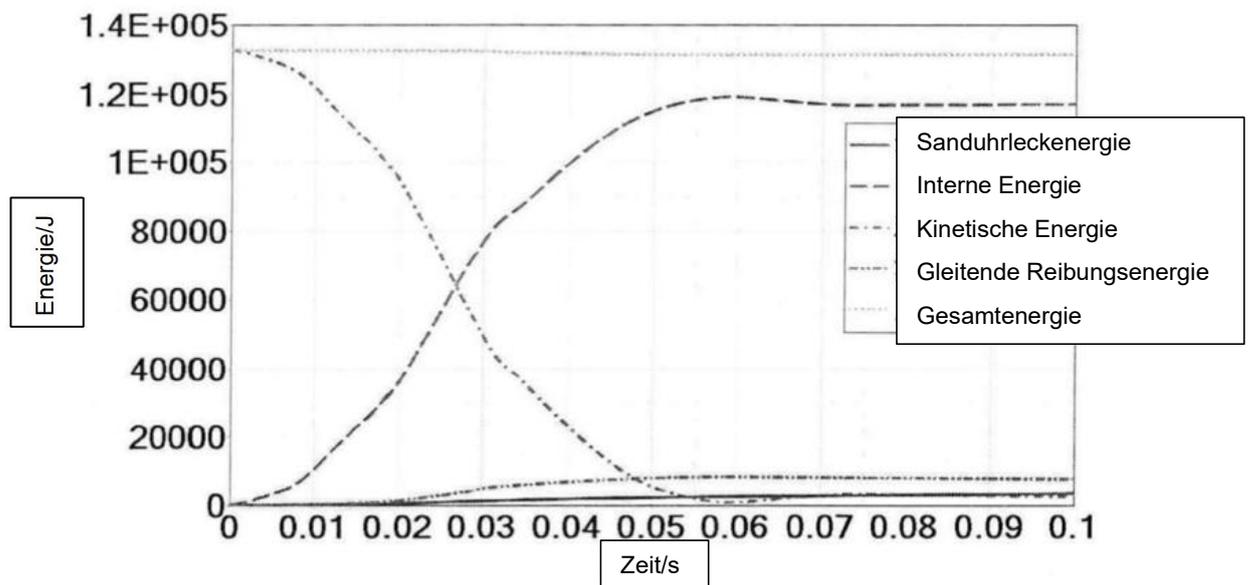


Bild 3-4: Energiekurve

3.3.2 Zusätzliche Massenkurve für Frontalaufprall

Bei den Simulationsberechnungen werden verschiedene Berechnungsmethoden angewendet, und um die Genauigkeit des Modells zu gewährleisten, wird automatisch eine zusätzliche Masse für das Bauteil hinzugefügt. Die zusätzliche Massenkurve der Simulation dient als Indikator für die Überprüfung der Modellgenauigkeit. Im Fall des Frontalaufpralls beträgt die maximale Gesamt-Zusatzmasse während der Simulation 0,06 kg, was etwa 0,04 % der Gesamtmasse des Fahrzeugs entspricht. Diese Ergebnisse werden in Bild 3-5 dargestellt und liegen innerhalb des akzeptablen Fehlerbereichs.

Die Tatsache, dass die zusätzliche Masse innerhalb der Fehlermarge liegt, zeigt, dass das Modell korrekt kalibriert wurde und die Simulationsergebnisse verlässlich sind. Eine angemessene Massezunahme ermöglicht eine realitätsgetreuere Abbildung des Fahrzeugverhaltens und unterstützt die Analyse der Kollisionsdynamik und Energieabsorption während des Frontalaufpralls.

Diese Informationen bestätigen, dass das Modell für die Simulation des Frontalaufpralls geeignet ist und genaue Ergebnisse liefert, um wichtige Erkenntnisse zur Strukturfestigkeit und Energieabsorption des Fahrzeugs zu gewinnen.

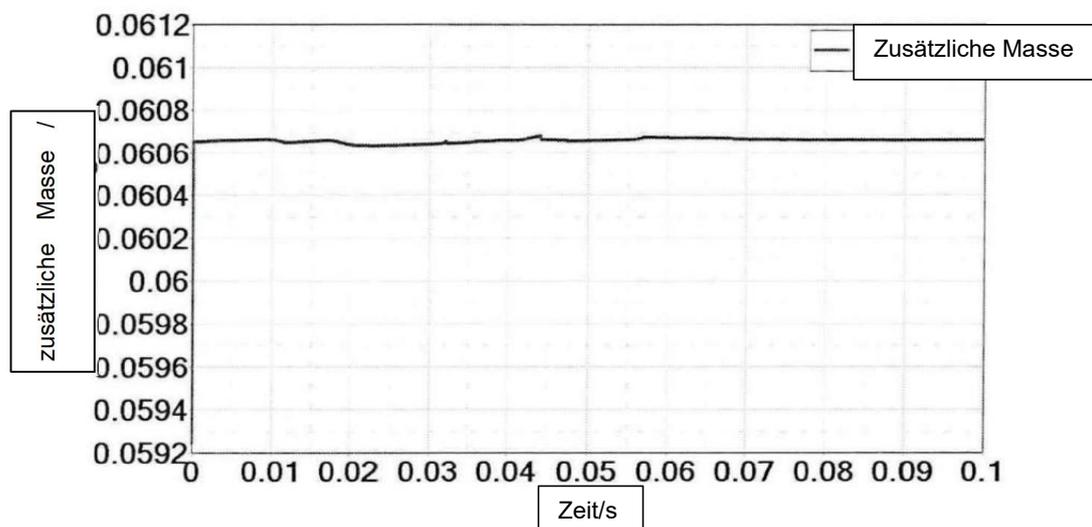


Bild 3-5: Zusätzliche Masse-Kurven

3.3.3 Vergleich der Verformung beim Frontalaufprall

Beim Zusammenstoß eines Elektrofahrzeugs mit einer festen, starren Wand bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h tritt aufgrund des Blockierungseffekts eine signifikante Verformung im vorderen Bereich des Fahrzeugs auf, wie es von den gesetzlichen

Anforderungen gefordert wird. Die Bilder 3-6 und 3-7 zeigen, dass die Verformung des simulierten Fahrzeugs im Allgemeinen gut mit der tatsächlichen Fahrzeugkollision übereinstimmt.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Modell in der Lage ist, die komplexe Verformung des Fahrzeugs während des Aufpralls präzise abzubilden. Die Verformungsmuster und -ausmaße des simulierten Fahrzeugs stimmen mit den tatsächlichen Kollisionsereignissen überein, was darauf hinweist, dass das Modell geeignet ist, um das Verhalten des Fahrzeugs unter solchen Aufprallbedingungen vorherzusagen.

Diese Ergebnisse sind von großer Bedeutung, da sie den Entwicklern und Ingenieuren helfen, das Fahrzeugdesign zu optimieren, um die Sicherheit der Insassen zu verbessern und die strukturelle Integrität des Fahrzeugs zu gewährleisten. Die Übereinstimmung zwischen den simulierten und tatsächlichen Verformungen bestätigt die Validität des Modells und stärkt das Vertrauen in die Simulationsergebnisse.



Bild 3-6: Crash-Verformung eines echten Autos

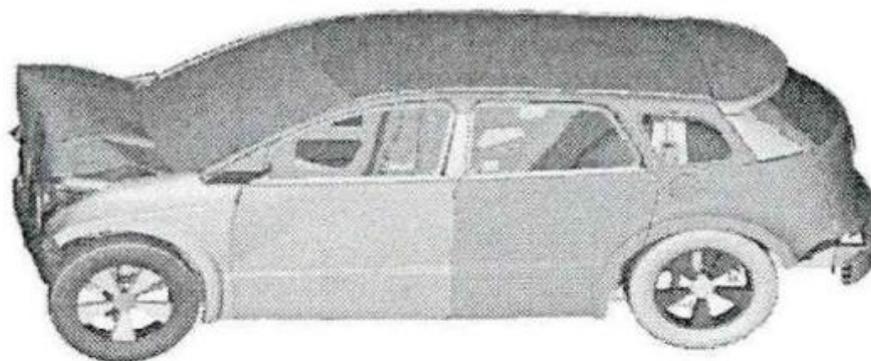


Bild 3-7: Simulierte Crash-Verformung

3.3.4 Vergleichskurve der Frontalaufprallbeschleunigung

Die Aufprallbeschleunigung ist ein wichtiger Faktor bei der Analyse von Fahrzeugaufprallsimulationen, da sie die Genauigkeit des Finite-Elemente-Simulationsmodells gut widerspiegeln kann. In diesem Fall beträgt die maximale Aufprallbeschleunigung des realen Fahrzeugs 44,9 g, während die maximale simulierte Aufprallbeschleunigung 52,4 g beträgt. Die Kurven beider Werte zeigen den gleichen Trend, wie in Bild 3-8 dargestellt.

Die Tatsache, dass die simulierte Aufprallbeschleunigung dem Trend der realen Fahrzeugaufprallbeschleunigung folgt, zeigt, dass das Finite-Elemente-Simulationsmodell die Dynamik des Aufpralls gut abbildet. Obwohl es eine geringfügige Abweichung zwischen den Werten gibt, liegen sie immer noch im akzeptablen Bereich. Diese Übereinstimmung zwischen den simulierten und realen Aufprallbeschleunigungen bestätigt die Gültigkeit des Finite-Elemente-Simulationsmodells.

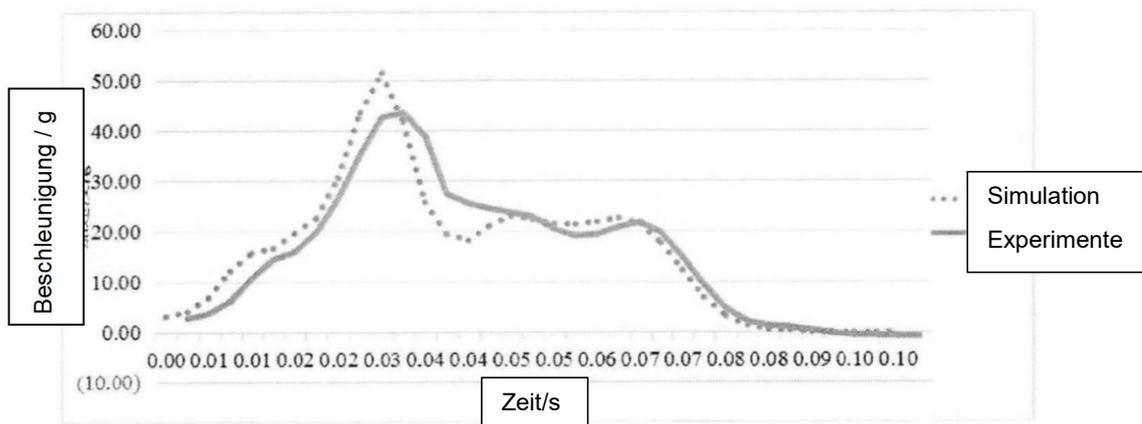


Bild 3-8: Crash-Beschleunigungs-Vergleichskurve

Zusammenfassend erfüllt das Finite-Elemente-Simulationsmodell die Anforderungen der Simulation in Bezug auf Energie und zusätzliche Massenänderung. Es zeigt auch eine wesentliche Übereinstimmung mit den Ergebnissen eines realen Fahrzeugcrashes in Bezug auf die Verformung und die Aufprallbeschleunigung. Dadurch wird die hohe Validität des Finite-Elemente-Simulationsmodells bestätigt, was den Ingenieuren und Entwicklern Vertrauen gibt, die Simulationsergebnisse für die weitere Optimierung der Fahrzeugsicherheit und Strukturfestigkeit zu verwenden.

4 Analyse der Sicherheit von Batteriepack bei einem Frontalaufprall

Die Sicherheit der Batterie in einem Elektrofahrzeug wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, darunter die Aufprallbeschleunigung, die Aufprallgeschwindigkeit, die Verformung, die Kraft und die Energieabsorption. Simulationstests ermöglichen es den Ingenieuren, diese Faktoren zu analysieren und die Auswirkungen eines Frontalaufpralls auf die Batterie zu bewerten.

Bei einem Frontalaufprall auf eine feste Kollisionswand wird die Batterie des Elektrofahrzeugs aufgrund der plötzlichen Abbremsung und der daraus resultierenden Kräfte beansprucht. Die Simulationstests ermöglichen es den Ingenieuren, die Verformung der Batterie zu untersuchen und sicherzustellen, dass sie innerhalb akzeptabler Grenzen bleibt.

Die Aufprallbeschleunigung ist ein wichtiger Parameter, der angibt, wie schnell die Geschwindigkeit des Fahrzeugs während des Aufpralls abnimmt. Eine geringe Aufprallbeschleunigung zeigt an, dass die Abbremsung des Fahrzeugs kontrolliert erfolgt, was zu einer geringeren Belastung der Batterie führt.

Die Aufprallgeschwindigkeit gibt die Geschwindigkeit an, mit der das Fahrzeug auf die Kollisionswand trifft. Durch die Analyse der Aufprallgeschwindigkeit können die Ingenieure feststellen, wie stark die Belastung der Batterie ist und ob sie innerhalb ihrer Grenzen bleibt.

Die Verformung der Batterie ist ein weiterer wichtiger Aspekt, der untersucht werden muss. Durch Simulationstests können die Ingenieure die Verformung der Batterie während des Aufpralls analysieren und sicherstellen, dass sie nicht zu stark ist. Eine zu starke Verformung könnte zu Schäden an den Batteriezellen führen und die Sicherheit beeinträchtigen.

Die Kraft, die auf die Batterie während des Aufpralls wirkt, und die Energieabsorption sind ebenfalls entscheidende Faktoren. Eine ausreichende Energieabsorption durch andere Fahrzeugkomponenten oder Sicherheitsvorrichtungen kann dazu beitragen, die Belastung der Batterie zu verringern und die Sicherheit zu gewährleisten.

Durch die Kombination von Simulationstests, detaillierten Analysen und weiteren Sicherheitsmaßnahmen können die Ingenieure sicherstellen, dass die Batterie des Elektrofahrzeugs auch bei Frontalkollisionen ausreichend geschützt ist und die Sicherheitsstandards erfüllt werden.

Die Simulationstests haben gezeigt, dass die Batterie des Elektrofahrzeugs geringen Belastungen ausgesetzt ist, wenn es zu einem frontalen Aufprall mit einer festen Kollisionswand kommt. Dies bedeutet, dass die Batterie eine geringe Verformung aufweist und somit ihre strukturelle Integrität und Sicherheit beibehält. Die Ingenieure analysieren nun eingehend die Auswirkungen der Aufprallbeschleunigung, Aufprallgeschwindigkeit sowie der Verformung, Kraft und Energieabsorption auf die Batteriesicherheit.

4.1 Überblick über den Prozess der Batteriepacksbewegung

Wenn ein Elektrofahrzeug einem Frontalaufprall ausgesetzt ist, lässt sich die Bewegung des Batteriesatzes wie folgt zusammenfassen:

- **Anfangsphase:** Wenn ein Elektrofahrzeug mit einem Hindernis oder einem anderen Fahrzeug kollidiert, wird die Aufprallkraft auf die vorderen Strukturen und Schutzsysteme des Fahrzeugs übertragen. Diese Strukturen und Systeme sind so ausgelegt, dass sie die Aufprallenergie absorbieren und zerstreuen und die Auswirkungen auf die Fahrzeuginsassen und die Batterie verringern.
- **Fahrzeugverzögerung:** Durch die Aufprallkräfte beginnt das Fahrzeug zu verlangsamen. Die kinetische Energie wird in Verformungs- und Beschädigungsenergie umgewandelt, was zu einer allmählichen Verringerung der Bewegungsgeschwindigkeit des Fahrzeugs führt.
- **Reaktionskraft:** Gemäß dem dritten Newtonschen Gesetz erzeugt die Verzögerung und das Anhalten des Fahrzeugs eine Reaktionskraft, die entgegengesetzt zur Aufprallrichtung wirkt. Diese Reaktionskraft wirkt sich auch auf den Batteriepack aus.
- **Trägheit der Batterie:** Aufgrund der Reaktionskraft besitzt den Batteriepack eine Trägheit und setzt seine Bewegung in Fahrtrichtung fort, obwohl das Fahrzeug verlangsamt oder gestoppt wird.
- **Eindringen und Verformung:** Bei einem Aufprall wird den Batteriepack eingedrückt und verformt. Es kann durch die vordere Struktur des Fahrzeugs verformt und beschädigt

werden, oder es kann mit anderen Komponenten oder Strukturen in Wechselwirkung treten.

4.1.1 Analyse der Beschleunigung

Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass die Batterie eines Elektrofahrzeugs nur einem halbsinusförmigen Aufprall standhalten kann, bei dem die maximale Beschleunigung 35 g beträgt und die Impulsdauer 51 ms beträgt. Obwohl die Wahrscheinlichkeit, dass ein solcher Sinus-Aufprall mit einer Dauer von 51 ms auftritt, gering ist, kann eine zu hohe Aufprallbeschleunigung die Sicherheit der Batterie gefährden. Es könnte zu einer schlechten Montage der Batterie führen und einen Kurzschluss zwischen den internen positiven und negativen Elektroden verursachen, was zu einem Brand oder einer Explosion führen könnte.

Bei einem Aufprall eines Elektrofahrzeugs auf eine sich bewegende Kollisionswand wirkt die Beschleunigung hauptsächlich entgegengesetzt zur Fahrzeugbewegung (entgegengesetzt zur x-Richtung) auf die Batterie. Durch Simulationen können Intrusionsbeschleunigungskurven für die Kollisionsbeschleunigung des Fahrzeugs selbst und die Richtung des Aufpralls auf den Batteriepack erstellt werden, wie in Bild 4-1 dargestellt.

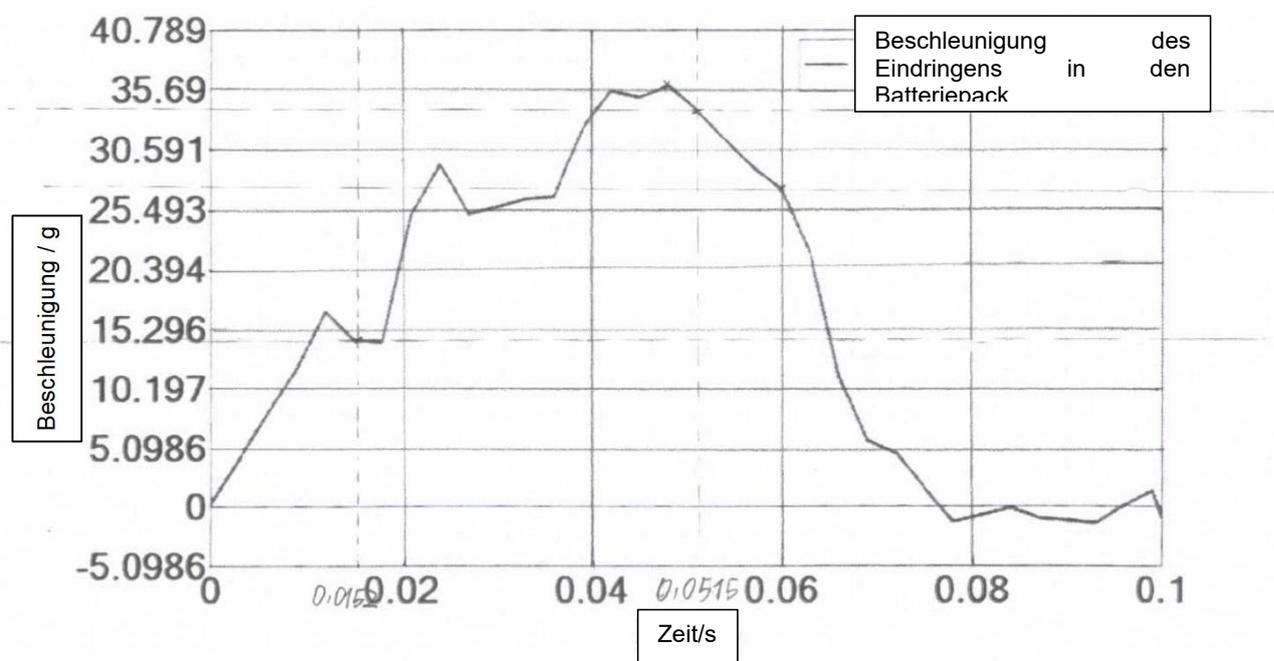


Bild 4-1: Beschleunigungskurve beim Aufprall eines Batteriepacks

Basierend auf der vergleichenden Beschleunigungskurve des Batteriepacks lässt sich feststellen, dass die maximale Beschleunigung während eines Frontalaufpralls 35,97 g beträgt, was über der Sicherheitsanforderung von 35 g liegt. Diese hohe Aufprallbeschleunigung überschreitet die Belastungsgrenze, die der Batterie standhalten kann, und stellt somit eine gewisse Gefahr dar. Der Bild 4-2 zeigt, dass die Eindringgeschwindigkeit des Batteriepacks vor dem Aufprall 13,88 m/s (50 km/h) beträgt. Nach dem Aufprall nimmt die Geschwindigkeit des Elektrofahrzeugs ab, bis sie auf 0 m/s sinkt. Anschließend bewegt sich den Batteriepack mit einer Höchstgeschwindigkeit von 1,75 m/s in die entgegengesetzte Richtung.

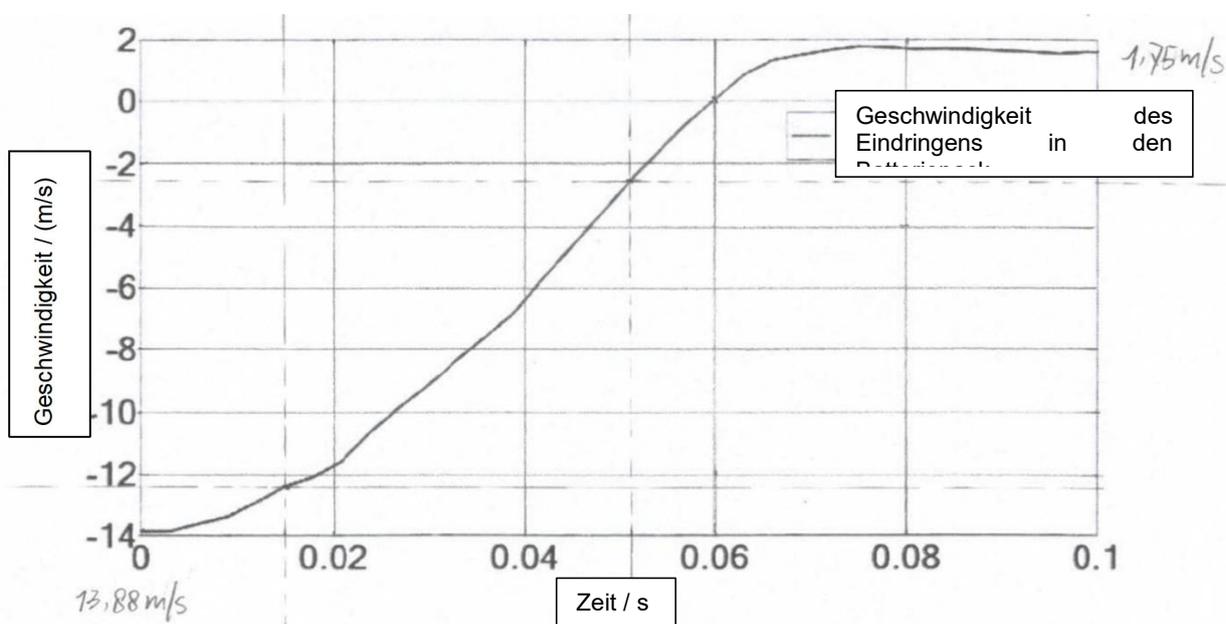


Bild 4-2: Geschwindigkeitsprofil des Aufpralls auf den Batteriepack

Wenn die Geschwindigkeit mit $V_0 = -13,88$ m/s angegeben ist, bedeutet dies in der Tat, dass die Eindringgeschwindigkeit des Batteriepackts entgegengesetzt zur Bewegung des Fahrzeugs ist.

Wenn ein Elektrofahrzeug in einen Frontalaufprall verwickelt ist, wird die kinetische Energie des Fahrzeugs in Verformungs- und Zerstörungsenergie umgewandelt, wodurch das Fahrzeug verlangsamt oder zum Stillstand gebracht wird. In solch einem Szenario ist der Batteriepack normalerweise einer Aufprallkraft ausgesetzt, die zu einer entgegengesetzten Bewegung führt. Gemäß dem dritten Newtonschen Gesetz wirkt eine gleich große und entgegengesetzte Reaktionskraft auf die Batterie.

Diese entgegengesetzte Bewegungsrichtung spielt eine schützende Rolle für die Insassen und das Fahrzeug. Durch spezielle Schutzstrukturen und aufprallabsorbierende Zonen um den Batteriepack herum können die Auswirkungen des Aufpralls auf das Pack reduziert und das Risiko einer Beschädigung minimiert werden. Automobilhersteller setzen zudem verschiedene Sicherheitsmaßnahmen ein, wie z. B. den Einsatz von Schutzschilden und aufprallabsorbierenden Materialien, um sowohl den Batteriepack als auch die Insassen zusätzlich zu schützen.

Diese Informationen deuten darauf hin, dass der Frontalaufprall eine beträchtliche kinetische Energie auf den Batteriepack überträgt, was zu einer Überschreitung der zulässigen Belastung führt. Dies kann potenzielle Sicherheitsrisiken wie Beschädigungen der Batteriezellen, einen schlechten Zusammenbau der Batterie oder sogar einen Kurzschluss und die Möglichkeit von Bränden oder Explosionen verursachen. Es ist daher wichtig, geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um die Sicherheit der Batterie während eines Frontalaufpralls zu verbessern und die Belastung auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren.

4.1.2 Analyse der Verformung von Batteriepack

4.1.2.1 Analyse der äußeren Verformung des Batteriepacks

Das Ausmaß der Verformung des Batteriepacks ist ein wichtiger Indikator für die Messung der Batteriesposition gemäß den gesetzlichen Anforderungen. Die Karte der Verformungswolke des Batteriepacks während des Kollisionsprozesses wurde erstellt, die maximale Verformungsposition wurde ausgewählt und der maximale Quetschungsabstand des Batteriepacks wurde gemessen. Die Messung zeigt, dass die Verformung des Batteriepacks während des gesamten Prozesses gering ist. Die maximale Verformung beträgt nur 1,43 mm, wie in Bild 4-3 dargestellt.

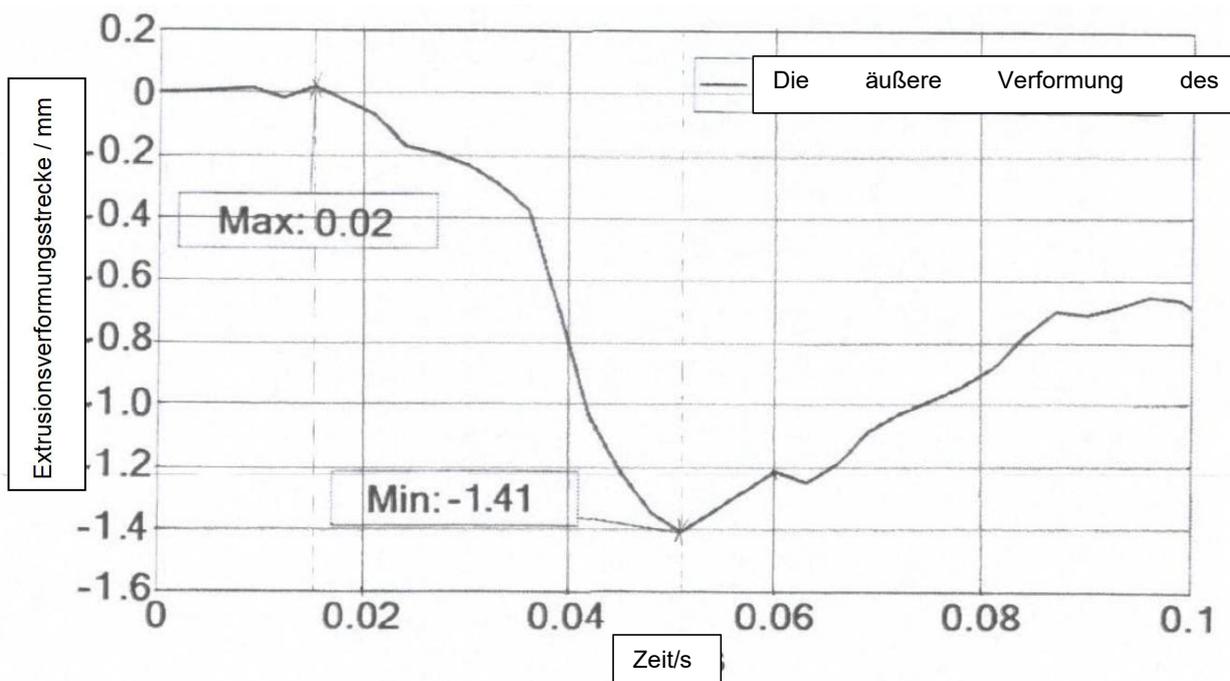


Bild 4-3: Ausmaß der Verformung des äußeren Gehäuses des Batteriepacks

4.1.2.2 Analyse der Verformung von internen Batteriehalterungen

Die obere Stütze der externen internen Halterung ist der erste Bereich, der der Kollisionskraft ausgesetzt ist. Es wurde die maximale Position der Verschiebungswolke der internen Halterung ausgewählt, um die Extrusionsverformungsstrecke der internen Halterung zu messen. Die Verformungskurve der internen Halterung zeigt, dass nach dem Frontalaufprall eine leichte elastische Verformung zwischen dem internen Batteriepack auftrat. Die Verformung war jedoch nicht deutlich sichtbar und betrug lediglich 0,63 mm gemäß Bild 4-4. Die Kompression des internen Batteriemoduls ist gering.

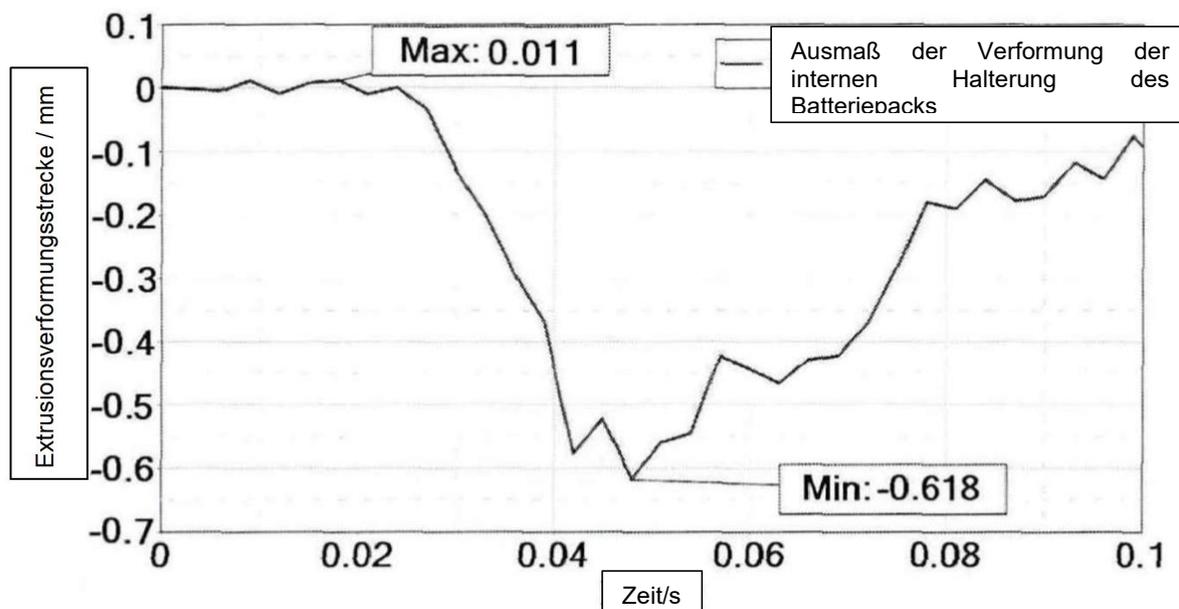


Bild 4-4: Ausmaß der Verformung der internen Halterung des Batteriepacks

4.1.2.3 Analyse der Verformung von Batteriepack-Zellenmodulen

Bei Batterien ist es wichtig, die Druckverformung im Auge zu behalten, da sie ein Indikator für die Sicherheit und Integrität des Batteriesystems ist. Eine Verformung von weniger als 4,5 mm wird als sicher betrachtet, da sie keine wesentlichen Auswirkungen auf die Leistung oder die Struktur der Batterie hat.

Wenn die Druckverformung jedoch zwischen 4,5 mm und 6,0 mm liegt, besteht ein erhöhtes Risiko eines Kurzschlusses. In diesem Bereich könnte es zu Beschädigungen der Batteriezellen oder des Elektrolyts kommen, was zu einer Störung der internen Struktur führen kann. Ein Kurzschluss kann dann auftreten, was zu einer plötzlichen Entladung der Batterie führt.

Bei einer Verformung von mehr als 6,0 mm wird angenommen, dass die Batterie bei einem Kurzschluss versagt. In diesem Stadium sind die strukturelle Integrität und die Sicherheitsmerkmale der Batterie stark beeinträchtigt, was zu einem hohen Risiko von thermischen Reaktionen, Brand oder Explosion führen kann.

Daher ist es wichtig, die Verformung des Batteriesystems zu überwachen und sicherzustellen, dass sie innerhalb der akzeptablen Grenzen bleibt. Bei Überschreiten der maximalen Verformungsgrenze sollten entsprechende Maßnahmen ergriffen werden, um

die Sicherheit zu gewährleisten, wie zum Beispiel der Austausch der betroffenen Batteriemodule oder des gesamten Batteriesystems.

Die Batterien sind in 4 Module aufgeteilt: Batteriemodul 1, Batteriemodul 2, Batteriemodul 3 und Batteriemodul 4, wie in Bild 4-5 dargestellt.

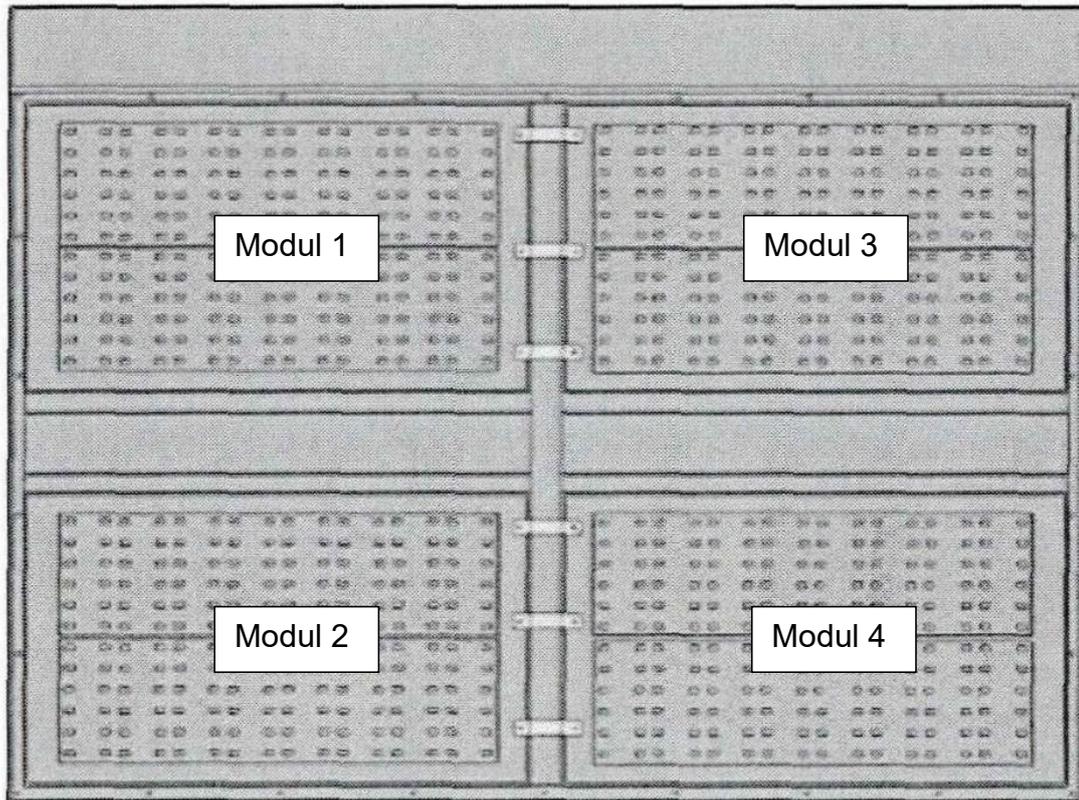


Bild 4-5: Batterie-Module

Es wurden zwei Messpunkte für jedes Modul des Batteriepacks ausgewählt, um die Auswirkungen des Frontalaufpralls zu erfassen. Durch den Aufprall wurde das Batteriemodul teilweise eingedrückt. Anhand der inneren Verformung der Batterie lässt sich erkennen, dass das Batteriepack, das der Vorderseite des Elektrofahrzeugs am nächsten liegt, am stärksten betroffen ist. Im Laufe der Zeit nach dem Aufprall nivelliert sich die Verformung allmählich aus.

Die Eindringtiefe des Batteriemoduls 1 betrug 0,76 mm, des Batteriemoduls 2 0,24 mm, des Batteriemoduls 3 1,61 mm und des Batteriemoduls 4 0,73 mm. Die Eindringtiefe des Zellmoduls 4 betrug 0,73 mm, wie in Bild 4-6 dargestellt. Die Eindringtiefe während des Aufpralls lag unterhalb von 4,5 mm, was keine Gefahr für die innere Sicherheit des Batteriepacks darstellte und das Pack gut geschützt war.

Diese Ergebnisse zeigen, dass das Batteriepack die Kollision gut abgefangen hat und die Eindringtiefe innerhalb eines akzeptablen Bereichs liegt. Dies deutet darauf hin, dass die Batterie während des Aufpralls keine schwerwiegenden strukturellen Schäden erlitten hat und weiterhin sicher betrieben werden kann. Dennoch ist es wichtig, die Batterie regelmäßig auf mögliche latente Schäden oder Veränderungen zu überprüfen, um die langfristige Sicherheit zu gewährleisten.

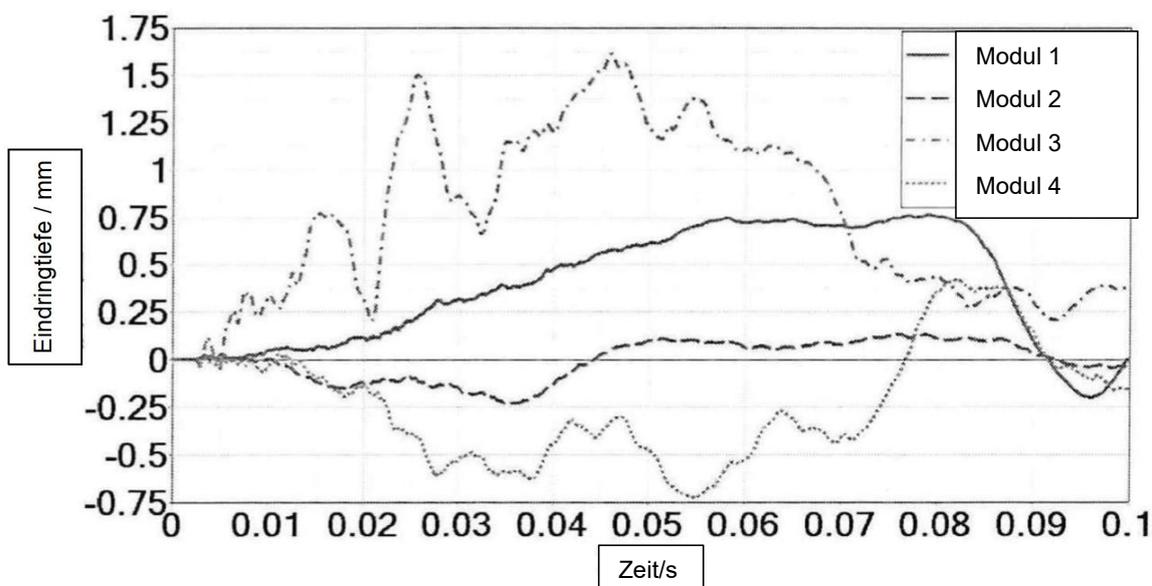


Bild 4-6: Verformung des Batteriemoduls

4.1.3 Analyse der Kraft

Um die Sicherheit der Batterie zu gewährleisten, ist es wichtig, dass die Belastung des Batteriegehäuses und der Laschen während eines Aufpralls die Festigkeitsgrenze nicht überschreitet. Wenn die Belastung zu hoch ist, besteht das Risiko, dass der Akku reißt und herunterfällt, was zu Sekundärschäden führen kann.

Bei einem Frontalaufprall ist die Belastung des Batteriepacks groß und konzentriert sich hauptsächlich auf die Laschen, während die auf das interne Batteriemodul übertragene Belastung geringer ist. Basierend auf Simulationsanalysen wurde festgestellt, dass das Gehäuse des Batteriepacks einer maximalen Spannung von 625,8 MPa, die interne Halterung einer maximalen Spannung von 536,2 MPa und das Batteriemodul einer maximalen Spannung von 105,9 MPa ausgesetzt sind. Diese Spannungen liegen über der Festigkeitsgrenze von normalem Stahl.

Aufgrund dieser Erkenntnisse besteht die Gefahr, dass die Laschen und das äußere Gehäuse des Batteriepacks bei einem Aufprall brechen oder herunterfallen. Die Spannung konzentriert sich insbesondere auf die Laschen, da sie die Verbindung zwischen dem Batteriegehäuse und den internen Komponenten darstellen.

Um sicherzustellen, dass eine solide Verbindung zwischen den Laschen und dem Gehäuse während eines Aufpralls gewährleistet ist, ist es daher ratsam, die Laschen zu verstärken. Dies kann durch die Verwendung von hochfesten Materialien, die Anwendung zusätzlicher Verstärkungen oder die Optimierung des Konstruktionsdesigns erfolgen. Die verstärkten Laschen sollten so ausgelegt sein, dass sie der erhöhten Belastung standhalten und die strukturelle Integrität des Batteriepacks gewährleisten können.

Die Verstärkung der Laschen ist ein wesentlicher Aspekt, um die Sicherheit der Batterie bei Kollisionen zu gewährleisten und das Risiko von Schäden zu minimieren. Es ist wichtig, dass Hersteller und Entwickler von Batteriesystemen entsprechende Konstruktionsmaßnahmen ergreifen, um die Stabilität und Sicherheit des Batteriepacks zu verbessern und potenzielle Schwachstellen zu minimieren. [25]

4.1.4 Analyse der Energieabsorption

Beim Aufprall des Batteriepacks spielen die Laschen und das äußere Gehäuse als die wichtigsten äußeren Kontaktteile eine entscheidende Rolle bei der Energieabsorption. Sie absorbieren mehr Energie als die interne Halterung und das Batteriemodul. Die von den Laschen absorbierte Energie beträgt 280,27 J, die vom externen Gehäuse absorbierte Energie 110,24 J, die von der internen Halterung absorbierte Energie 1,78 J und die vom Batteriemodul absorbierte Energie 0,078 J, wie in Bild 4-7 dargestellt.

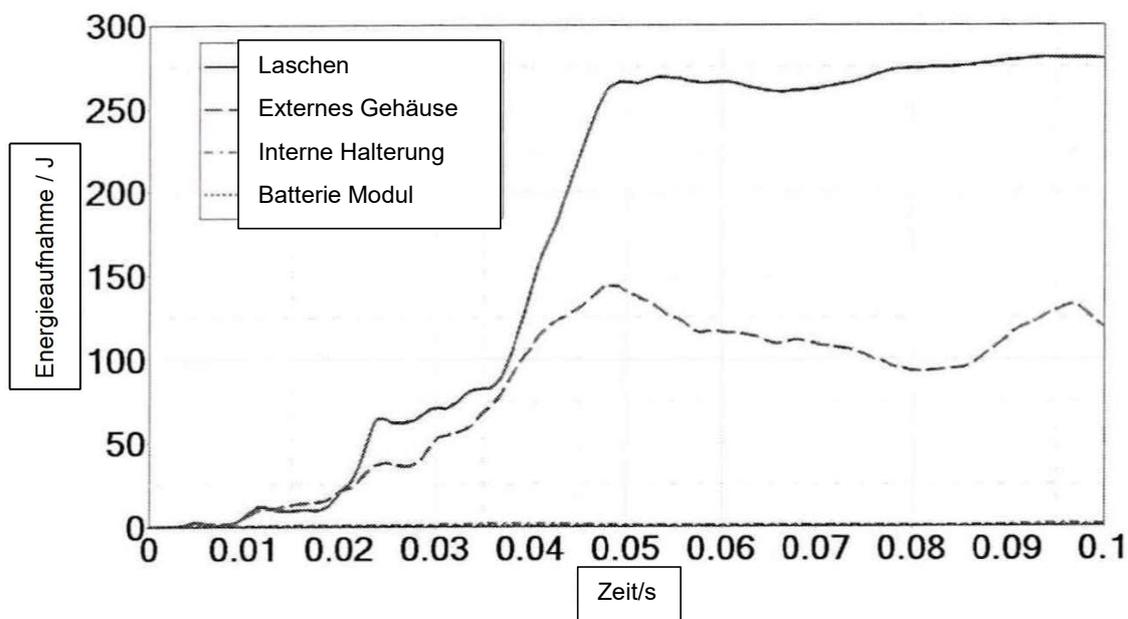


Bild 4-7: Energieaufnahmekurve des Batteriepacks

Die Analyse der Energieabsorption der einzelnen Teile zeigt, dass die Laschen die Hauptrolle bei der Energieabsorption während eines Frontalaufpralls spielen und dabei mehr Energie als andere Teile absorbieren. Eine höhere Energieabsorption kann jedoch zu übermäßiger Verformung oder Spannungskonzentration führen, was die Stabilität der Laschen des Batteriepacks und deren Verbindung mit dem äußeren Gehäuse beeinträchtigen kann.

Es ist wichtig, dass die Laschen so ausgelegt sind, dass sie die Energieabsorption effektiv bewältigen können, ohne dabei ihre strukturelle Integrität zu gefährden. Dies kann durch die Verwendung von hochfesten Materialien, die Optimierung der Laschengeometrie oder die Anwendung zusätzlicher Verstärkungen erreicht werden. Ziel ist es, eine ausgewogene Energieabsorption zu gewährleisten, die die Laschen vor übermäßiger Verformung und möglichen Schäden schützt.

Darüber hinaus ist es wichtig, die Verbindung zwischen den Laschen und dem äußeren Gehäuse zu überprüfen und sicherzustellen, dass sie während des Aufpralls stabil bleibt. Bei Bedarf können verstärkte Verbindungselemente oder spezielle Befestigungstechniken eingesetzt werden, um eine sichere und zuverlässige Verbindung zu gewährleisten.

Durch die Berücksichtigung der Energieabsorption der Laschen und die Stärkung ihrer strukturellen Integrität kann die Sicherheit des Batteriepacks bei Kollisionen verbessert und das Risiko von Schäden minimiert werden. Eine sorgfältige Konstruktion und

Überwachung der Laschen und ihrer Verbindung zum Gehäuse sind entscheidend, um die Langzeitintegrität des Batteriesystems zu gewährleisten.

Basierend auf der Simulationsanalyse wird festgestellt, dass die Verformung des Batteriepacks während eines Frontalaufpralls gering ist, was bedeutet, dass das interne Batteriemodul gut vor Quetschungen geschützt ist und somit das Risiko von Flüssigkeitsaustritt und Kurzschlüssen minimiert wird. Dies ist ein positives Ergebnis für die Sicherheit der Batterie.

Jedoch wurde auch festgestellt, dass die Beschleunigung des Batteriepacks die Sicherheitsnorm von 35g überschritten hat. Dies deutet darauf hin, dass die auftretenden Kräfte während des Aufpralls zu hoch sind und möglicherweise zu potenziellen Schäden führen können. Es ist wichtig, die Belastung der Batterie während des Aufpralls zu kontrollieren und sicherzustellen, dass sie innerhalb sicherer Grenzen bleibt.

Darüber hinaus zeigt die Analyse, dass die Spannung an den Laschen konzentrierter ist. Dies bedeutet, dass die Laschen einer erhöhten Belastung ausgesetzt sind und das Risiko von Brüchen oder Beschädigungen besteht. Um die Sicherheit zu verbessern, ist es wichtig, die Laschen zu verbessern und zu verstärken, um sicherzustellen, dass sie den auftretenden Kräften standhalten können.

Die Verbesserung der Laschen kann durch verschiedene Maßnahmen erfolgen, wie z.B. die Verwendung von hochfesten Materialien, die Optimierung der Laschengometrie oder die Anwendung zusätzlicher Verstärkungen. Dadurch wird die Spannungskonzentration reduziert und die strukturelle Integrität der Laschen verbessert.

5 Numerische Analyse von Feder-Masse-Dämpfer-System

In diesem Kapitel werden zunächst die Feder- und Dämpfungskoeffizienten für ein einzelnes Feder-Masse-Dämpfungssystem berechnet und anschließend die Verteilung von vier Feder-Masse-Dämpfungssystemen parallel zu den vier Ecken der Vorderseite des Batteriepacks betrachtet.

Um das System zu ermitteln, wenn sowohl die Anregung als auch die Reaktion bekannt sind, verwenden wir mehrere bekannte Datensätze, darunter die Intrusionsbeschleunigung des Batteriepacks, die Intrusionsgeschwindigkeit und die Verformung des äußeren Batteriepacks. Zusätzlich zu diesen Daten werden auch die inhärenten Schwingungseigenschaften des Systems berücksichtigt, einschließlich der Elastizitäts- und Dämpfungskoeffizienten des einzelnen Feder-Masse-Dämpfer-Systems.

Zunächst werden die bekannten Datensätze analysiert, um das Verhalten des Systems unter den gegebenen Bedingungen zu verstehen. Durch die Untersuchung der Intrusionsbeschleunigung, der Intrusionsgeschwindigkeit und der Verformung des äußeren Batteriepacks können wir wertvolle Informationen über die Wechselwirkungen zwischen dem System und seiner Umgebung gewinnen.

Basierend auf diesen Daten können die Elastizitäts- und Dämpfungskoeffizienten des einzelnen Feder-Masse-Dämpfer-Systems ermittelt werden. Diese Koeffizienten sind wichtige Parameter, die das Verhalten des Systems bei Schwingungen beeinflussen. Durch die Lösung dieser Koeffizienten können wir die Eigenschaften des Feder-Masse-Dämpfer-Systems besser verstehen und präzisere Vorhersagen über seine Reaktion auf bestimmte Anregungen treffen.

Darüber hinaus können wir durch weitere Untersuchungen von parallel geschalteten Feder-Masse-Dämpfer-Systemen mehr über deren Verhalten erfahren. Dies ermöglicht es uns, die Auswirkungen der Kombination mehrerer dieser Systeme auf die Gesamtleistung des Systems zu analysieren. Durch die Untersuchung der Schwingungsübertragung und der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemen können wir optimale Konfigurationen identifizieren und geeignete Parameter für eine verbesserte Leistung festlegen.

Die ganzheitliche Betrachtung der Anregung, Reaktion und der inhärenten Schwingungseigenschaften des Systems, einschließlich der Elastizitäts- und Dämpfungskoeffizienten der Feder-Masse-Dämpfer-Systeme, ermöglicht es uns, ein umfassendes Verständnis des Systems zu entwickeln. Dies erleichtert die Optimierung des Systems, um eine bessere Schutzwirkung für das Batteriepack zu erzielen und potenzielle Schäden oder Überlastungen zu minimieren.

Die folgende Darstellung ist eine Vereinfachung des Modells:

1. das Feder-Masse-Dämpfungssystem wird als starre Verbindung mit dem Akkupack betrachtet.
2. bei einem Frontalaufprall des Fahrzeugs wird die Aufprallkraft auf den Untersuchungsgegenstand idealisiert, d. h. auf den Mittelpunkt der Vorderseite des Batteriepacks oder seinen Kraftpunkt entlang der x-Achse.
3. Die Fahrtrichtung des Fahrzeugs wird als die positive Richtung der x-Achse angegeben.
4. Alle Daten stammen von einem simulierten Frontalzusammenstoß mit einer starren Wand eines Fahrzeugs, der von Huachen Z. von der Northeast Forestry University durchgeführt wurde. [25]

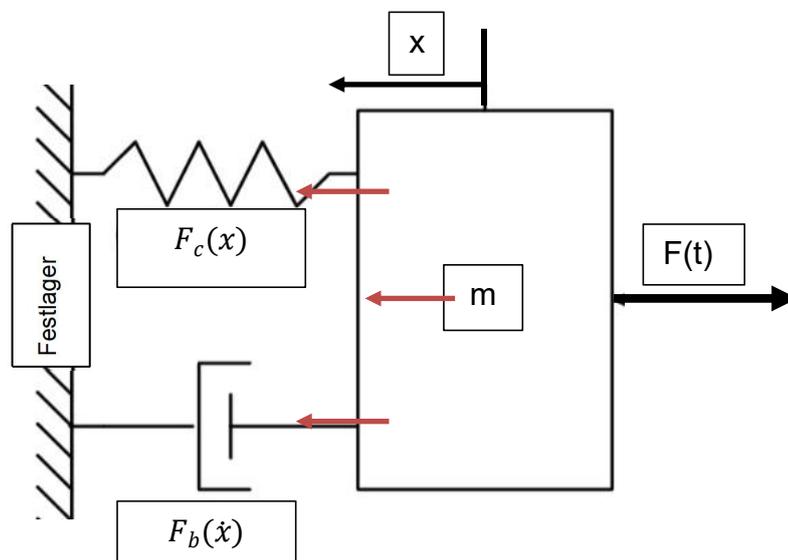


Bild 5-1: Kraftanalyse des Batteriepackmodells

5.1 Allgemeine Berechnungsinformationen

- Die Ergebnisse der Experimente haben gezeigt, dass das Batteriemodul bestimmten Belastungen standhalten kann. Es wurde festgestellt, dass das Modul Halbsinuswellen mit einer maximalen Beschleunigung von 35 g und einer Impulsdauer von 51 ms erfolgreich verkraften kann.

Die maximale Beschleunigung von 35 g gibt an, dass das Batteriemodul Kräften ausgesetzt werden kann, die das 35-fache der Erdbeschleunigung betragen. Diese Belastung kann beispielsweise bei abrupten Bewegungen, Vibrationen oder Stößen auftreten. Das Modul wurde speziell darauf ausgelegt, solche Kräfte zu tolerieren, ohne dass dabei strukturelle Schäden oder Leistungsverluste auftreten.

Die Impulsdauer von 51 ms gibt an, wie lange das Batteriemodul in der Lage ist, die maximale Beschleunigung zu ertragen. Bei einer Halbsinuswelle ist die Impulsdauer die Zeit, die benötigt wird, um den halben Sinuszyklus abzuschließen. In diesem Fall beträgt die Impulsdauer 51 ms, was darauf hinweist, dass das Modul diese Belastung für diesen Zeitraum aushalten kann.

D.h.

$$T = 51ms \times 2 = 102ms \quad \Omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{102ms} = 61,60 \frac{1}{s}$$

- Im Allgemeinen liegt die Spitzenbeschleunigung in der Nähe des Fahrers eines Personenkraftwagens während eines Frontalaufpralltests zwischen 30 g und 50 g. Dieses Beispiel basiert auf dem 50 km/h-Frontalaufpralltest des China New Car Assessment Programm (C-NCAP).

Bei einem Frontalaufpralltest wird das Fahrzeug mit einer definierten Geschwindigkeit gegen eine Barriere oder ein Hindernis gefahren. Der Test simuliert eine reale Kollisionssituation und ermöglicht es, die Auswirkungen auf Insassen und Fahrzeugstruktur zu bewerten.

Die Spitzenbeschleunigung bezieht sich auf den maximalen Wert der Beschleunigung, dem der Fahrer während des Aufpralls ausgesetzt ist. Die Werte von 30 g bis 50 g geben an, dass die Beschleunigung während des Tests das 30- bis 50-fache der Erdbeschleunigung erreicht. Diese hohen Werte können auftreten, wenn das

Fahrzeug einem abrupten Abbremsen oder Zusammenstoß ausgesetzt ist. Hier wird 50g verwendet zu berechnen.

D.h.

$$\hat{F} = 50g \cdot m$$

- Die Masse des Batteriepacks beträgt sowohl in der Berechnung als auch in der Simulation 400 kg.

D.h.

$$m = 400kg$$

- Dieses System ist eine nichtlinear gedämpfte erzwungene Schwingung mit einem Freiheitsgrad.

D.h.

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + c \cdot x = \hat{F} \cdot \sin(\Omega \cdot t) \quad (5.1)$$

\hat{F} ...die Amplitude der Erregerkraft

Ω ...die Erregerkreisfrequenz

- Die Verformung des Außengehäuse des Batteriepacks wird als die Verschiebung des Batteriepacks bei einem Frontalaufprall betrachtet. D.h. x

5.2 Berechnung der Elastizitäts- und Dämpfungskoeffizienten eines Feder-Masse-Dämpfungssystems

Gemäß der Methode des proportionalen Ablesens sollten in Bild 4-3 zunächst die Zeitpunkte abgelesen werden, die den Höchst- und Mindestwerten der Verformung des äußeren Gehäuses des Batteriepacks entsprechen.

Um dies zu tun, beziehen Sie sich auf die x-Achse des Diagramms, die die Zeit darstellt, und die y-Achse, die die Verformung des äußeren Gehäuses des Batteriepacks darstellt. Identifizieren Sie den höchsten Punkt auf der y-Achse, der den Höchstwert der Verformung repräsentiert, und bestimmen Sie den entsprechenden Zeitpunkt auf der x-Achse.

Ebenso identifizieren Sie den niedrigsten Punkt auf der y-Achse, der den Mindestwert der Verformung repräsentiert, und bestimmen Sie den entsprechenden Zeitpunkt auf der x-Achse.

- Ein Beispiel: der Zeitpunkt bei den Mindestwert der Verformung des Außengehäuses des Batteriepacks

Zunächst wird mit einem Lineal den Abstand von 0,04s bis zur Projektion des Mindestwertes des Außengehäuses des Batteriepacks auf x-Achse (d.h. die Zeitachse) als 1,39cm gemessen.

Dann wird mit einem Lineal die Länge von 0,04s-0,06s auf der x-Achse als 2,42cm gemessen.

Das Δx kann nun durch die Proportionalmethode ermittelt werden.

D.h.

$$\frac{1,39}{2,42} = \frac{\Delta x}{0,02}$$

Gerechnet

$$\Delta x = 0.0115$$

Also der Zeitpunkt, der dem Mindestwert der Verformung des äußeren Gehäuses des Batteriepacks entspricht, ist

$$0,04s + \Delta x = 0,0515s$$

In ähnlicher Weise kann der Höchstwert der Verformung des äußeren Gehäuses des Batteriepacks bei 0,0152s erreicht werden.

Auf der Grundlage der obigen skalierten Messwerte können die Beschleunigungen des Batteriepacksaufpralls bei $t_{x_{max}} = 0,0152s$ und $t_{x_{min}} = 0,0515s$ nun aus Bild 4-1 mit $\ddot{x}_{x_{max}} = 14,446g$ bzw. $\ddot{x}_{x_{min}} = 33.092g$ ermittelt werden.

Dasselbe ergibt sich aus Bild 4-2 $\dot{x}_{x_{max}} = -12,362 m/s$ und $\dot{x}_{x_{min}} = -2,605 m/s$.

Also Die beiden erhaltenen Datensätze

- Bei $t_{x_{max}} = 0,0152s$, $x_{max} = 0,02mm$

$$\ddot{x}_{x_{max}} = 14,446g$$

$$\dot{x}_{x_{max}} = -12,362 \text{ m/s}$$

– Bei $t_{x_{min}} = 0,0515 \text{ s}$, $x_{min} = -1,41 \text{ mm}$

$$\ddot{x}_{x_{min}} = 33.092 \text{ g}$$

$$\dot{x}_{x_{min}} = -2,605 \text{ m/s.}$$

werden in Gleichung 5.1 eingesetzt, bekommt

$$c = 111190902,6 \frac{\text{N}}{\text{m}} \approx 1,1112 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$b = -8016,99312 \left(\frac{\text{N}}{\text{s}} \right) \approx -8,1 \left(\frac{\text{N}}{\text{s}} \right)$$

5.2.1 Analyse der relevanten Parameter

Im Intervall von 0,0152s bis 0,0515s, das in Bild 5-1 dargestellt ist, wird der Verbindungspunkt zwischen dem Feder-Masse-Dämpfungssystem und dem Kraftfahrzeug als Referenzpunkt genommen, was bedeutet, dass dieser Punkt als feststehend angenommen wird.

Während dieser Zeit wird das Batteriepack zusammengedrückt, was einer Bewegung des Packs in entgegengesetzter Richtung von x entspricht. Daher ist die Verschiebung negativ und die Eindringgeschwindigkeit des Packs ist ebenfalls negativ.

Während des Zusammendrückens erfährt die Feder eine Zugkraft, was bedeutet, dass die Feder selbst einer elastischen Kraft in Richtung nach links ausgesetzt ist. Gemäß dem dritten Newtonschen Gesetz wirkt die Kraft der Feder auf das Batteriepack in Richtung nach rechts, was bedeutet, dass $F_c = c \cdot x < 0$ ist, also die entgegengesetzte Krafrichtung zu der in Bild 5-1 angenommenen Richtung.

Da der Dämpfer verhindern soll, dass das Batteriepack durch Vibrationen zusammengedrückt wird, muss eine Kraft in entgegengesetzter Richtung zur von der Feder ausgeübten Kraft auf das batteriepack wirken, also eine Kraft in Richtung nach links, entsprechend $F_b = b \cdot \dot{x} > 0$, in derselben Richtung wie die in Bild 5-1 angenommene Kraft.

Diese Betrachtungen zeigen, wie die Kräfte im Feder-Masse-Dämpfungssystem wirken, um die Schwingungen des Batteriepacks zu kontrollieren und eine unerwünschte Kompression zu verhindern. Durch das Verständnis dieser Kräfte können geeignete

Parameter für das System festgelegt werden, um eine optimale Leistung und Schutz des Batteriepacks zu gewährleisten.

- Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems:

$$\omega_0^2 = \frac{c}{m} = \frac{111190902,6 \frac{N}{m}}{400kg} = 277977,2565 \frac{1}{s^2}$$

$$\omega_0 = 527.234 \frac{1}{s}$$

- Dämpfungsgrad:

$$D = \frac{b}{2 \cdot \sqrt{c \cdot m}} = \frac{8016,99312 \left(\frac{N}{m \cdot s} \right)}{2 \cdot \sqrt{111190902,6 \frac{N}{m} \cdot 400kg}} = 0.019$$

Dieses System ist also eine schwach gedämpfte, quasi-periodische Schwingung

- Eigenkreisfrequenz des gedämpften Systems:

$$\omega_1 = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - D^2} = 527.234 \frac{1}{s} \cdot \sqrt{1 - (-0.019)^2} = 527,139 \frac{1}{s}$$

- Abstimmung Verhältnis:

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega_0} = \frac{61.60 \frac{1}{s}}{527.234 \frac{1}{s}} = 0.1169$$

Unterkritisch, hoch abgestimmt.

- Verstärkung:

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4 \cdot D^2 \cdot \eta^2}} = 1,0139$$

5.2.2 Die Bedeutung der Dämpfung

In einem physikalischen System führt die Dämpfung dazu, dass die Bewegung eines Objekts allmählich abnimmt und schließlich zum Stillstand kommt. Die Dämpfung erzeugt

eine Kraft, die der Richtung der Bewegung entgegengesetzt ist und Energie vom System absorbiert.

Ein Federschwinger ist ein gutes Beispiel für ein System mit Dämpfung. Wenn ein Federschwinger ohne Dämpfung gestört wird, würde er kontinuierlich zwischen potenzieller Energie (gespeichert in der Feder) und kinetischer Energie (Bewegungsenergie) hin und her schwingen, wobei die Amplitude der Schwingung konstant bleibt.

Wenn jedoch eine Dämpfung im System vorhanden ist, wird bei jedem Schwingungszyklus Energie abgezogen. Die Dämpfung erzeugt eine Kraft, die der Bewegungsrichtung entgegengesetzt ist und die Amplitude der Schwingung allmählich reduziert. Dies kann durch verschiedene Formen von Widerstand erreicht werden, wie Reibungskräfte zwischen den beweglichen Teilen des Federschwingers oder der Einfluss des aerodynamischen Widerstands.

Im Laufe der Zeit wird die Energie des Federschwingers durch die Dämpfung kontinuierlich reduziert und die Schwingungsdauer nimmt ab. Die Amplitude der Schwingung wird immer kleiner, bis die Bewegung schließlich zum Stillstand kommt und das System in einem stabilen Gleichgewichtszustand verbleibt.

Die Dämpfung spielt eine wichtige Rolle bei der Kontrolle von Schwingungen und Bewegungen in verschiedenen physikalischen Systemen. Sie dient dazu, unerwünschte oder übermäßige Schwingungen zu reduzieren, die Stabilität des Systems zu verbessern und die Energieeffizienz zu erhöhen. Durch das gezielte Hinzufügen oder Entfernen von Dämpfung kann das Verhalten des Systems angepasst und optimiert werden, um den spezifischen Anforderungen gerecht zu werden.

5.3 Parallelschaltung von Feder-Masse-Dämpfungssystemen

Der Elastizitätskoeffizient der Feder wird in der Regel durch den verwendeten Werkstoff und die Konstruktion der Feder bestimmt. Obwohl der Elastizitätskoeffizient der Feder innerhalb eines Bereichs gewählt werden kann, sind Federkoeffizienten von bis zu 100.000 N/mm in Routineanwendungen nicht üblich.

Der Elastizitätskoeffizient der Feder hängt in der Regel von den Materialeigenschaften ab, einschließlich des Elastizitätsmoduls des Materials, der Geometrie und der Querschnittsfläche. Bei gängigen Federwerkstoffen wie Stahl und legiertem Stahl liegt das

Elastizitätsmodul üblicherweise im Bereich von einigen 1000 bis einigen 10000 Megapascal (GPa). Das bedeutet, dass Federn in der Regel einen Elastizitätskoeffizienten im Bereich von mehreren 1000 bis mehreren 10000Newton pro Meter (N/m) oder Newton pro Millimeter (N/mm) haben.

Der genaue Wert des Dämpfungskoeffizienten hängt von der Art und Ausführung des verwendeten Dämpfers ab. Bei gängigen Dämpfern wie Flüssigkeits- oder Gasdämpfern liegt der Dämpfungskoeffizient in der Regel im Bereich von mehreren 1000 bis mehreren 10000 Newton-Sekunden pro Meter (N/m/s).

Wie aus den Berechnungen in den Abschnitten 5.1 und 5.2 hervorgeht, ist es nicht üblich, nur ein Feder-Masse-Dämpfungssystem mit einem zu großen Federelastizitätskoeffizienten auszulegen. Betrachten wir nun vier parallel geschaltete Feder-Masse-Dämpfungssysteme, die an jeder der vier Ecken vor dem Batteriepack angebracht sind. Sie wirken jeweils auf eine Fläche von 150mm*80mm. (Siehe Bild 5-2)

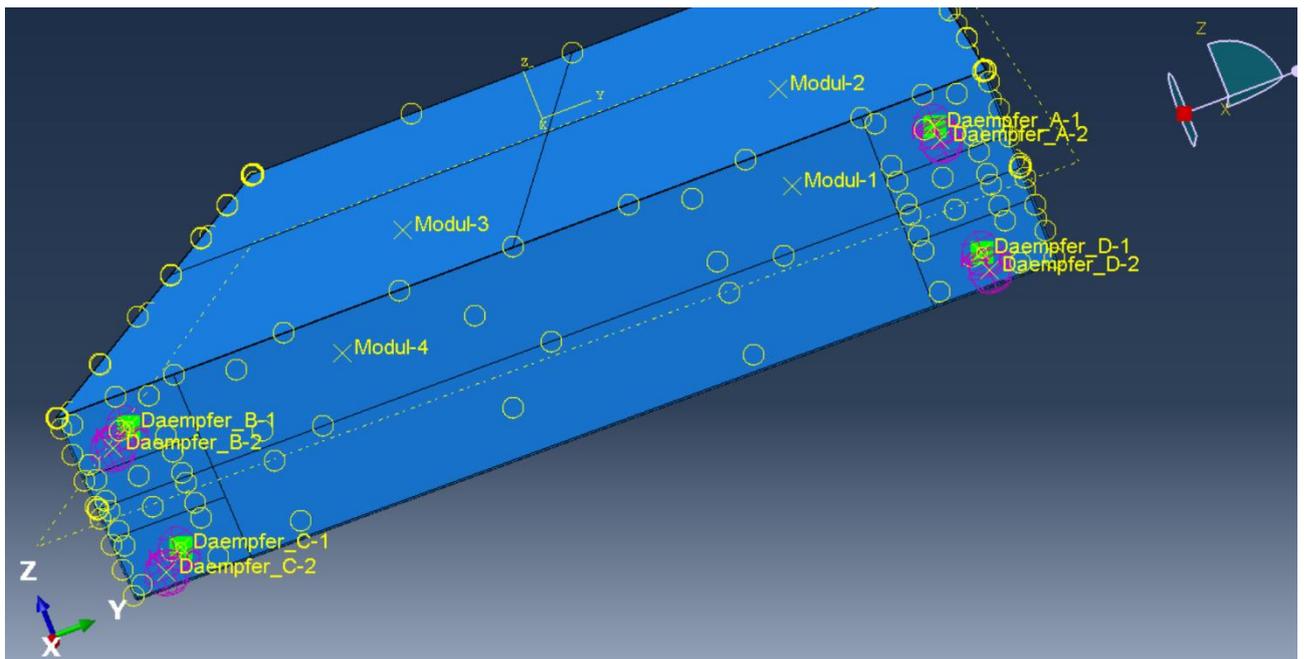


Bild 5-2: Verteilung der vier Feder-Masse-Dämpfungssysteme

5.3.1 Zusammengesetzte Federn

Das Kennzeichen der Parallelschaltung von Federn ist, dass die Federendpunkte die gleiche Verschiebung besitzen.

Allgemein gilt für n parallel geschaltete Federn mit den Federkonstanten k_1, k_2, \dots, k_n

die Formel [26]

$$k_{ers} = k_1 + k_2 + \dots + k_n = \sum k_i \quad (5.2)$$

Es sollen vier Feder-Massen-Dämpfungssysteme mit demselben Elastizitätskoeffizienten entworfen werden, so dass der Elastizitätskoeffizient jedes Systems folgender ist

$$k_A = k_B = k_C = k_D = \frac{1,1112 \times 10^5 \frac{N}{mm}}{4} = 2,778 \times 10^4 \frac{N}{mm}$$

5.3.2 Zusammengesetzte Dämpfer

Bei der Parallelschaltung von Dämpfern wird die Belastung auf mehrere Dämpfer aufgeteilt. Dies kann dazu beitragen, die Lebensdauer der einzelnen Dämpfer zu verlängern und ihre Effizienz aufrechtzuerhalten.

Allgemein gilt für n parallel geschalteten Dämpfern mit den Dämpfungsfaktoren c_1, c_2, \dots, c_n

die Formel

$$c_{ers} = c_1 + c_2 + \dots + c_n = \sum c_i \quad (5.3)$$

Alle vier Feder-Massen-Dämpfungssysteme haben den gleichen Dämpfungsfaktoren, gilt

$$c_A = c_B = c_C = c_D = \frac{8,1 \left(\frac{N}{mm} \right)}{4} = 2,025 \left(\frac{N}{mm} \right)$$

5.3.3 Bedeutung von Parallelschaltung der Feder-Masse-Dämpfer-Systems

Erhöhte Federsteifigkeit: Durch die Parallelschaltung von Feder-Masse-Dämpfer-Systemen wird die Gesamtsteifigkeit im System erhöht. Jedes einzelne Feder-Masse-Dämpfer-System trägt zur Gesamtsteifigkeit bei, was zu einer erhöhten Widerstandsfähigkeit gegen Verformungen und Schwingungen führt. Dies kann die Stabilität und Kontrolle des Systems verbessern.

Verbesserte Schwingungsabsorption: Die Parallelschaltung von Feder-Masse-Dämpfer-Systemen ermöglicht eine verbesserte Absorption von Schwingungen im System. Jedes System kann Schwingungen in seiner eigenen Resonanzfrequenz absorbieren und dadurch unerwünschte Schwingungsenergie reduzieren. Die Kombination mehrerer

Systeme in Parallelschaltung erhöht die Gesamtabsorption und reduziert die Auswirkungen von Resonanz.

Verteilte Belastung: Bei der Parallelschaltung von Feder-Masse-Dämpfer-Systemen wird die Belastung auf mehrere Systeme aufgeteilt. Dadurch wird die Belastung auf einzelne Systeme reduziert und die Lebensdauer und Effizienz der Komponenten erhöht. Die Verteilung der Belastung kann auch eine gleichmäßigere Kraftverteilung im System ermöglichen.

Die Parallelschaltung von Feder-Masse-Dämpfer-Systemen kann dazu beitragen, die Schwingungen zu kontrollieren, die Belastung zu verteilen und die Leistungsfähigkeit des Systems zu verbessern. Durch eine sorgfältige Auswahl und Abstimmung der Feder-Masse-Dämpfer-Systeme können die gewünschten Eigenschaften erreicht und das System an die spezifischen Anforderungen angepasst werden.

6 Simulationsanalyse des Batteriepacks bei einem Frontaufprall

In diesem Kapitel werden Catia und Abaqus verwendet. Aufgrund der Verwendung von Simulationsdaten und Analysen in Kapitel 5 zur Berechnung der Federelastizitäts- und Dämpfungskoeffizienten beschränkt sich dieser Abschnitt darauf, ausschließlich die im Autorenreferat erwähnte Methode 2 anzuwenden. Das Hauptziel besteht darin, die Wirksamkeit des konzipierten Feder-Masse-Dämpfungssystems bei der Reduzierung der Verformung des Batteriepacks zu überprüfen.

Um nachzuweisen, dass das entworfene Feder-Masse-Dämpfungssystem den Batteriepack hinsichtlich Beanspruchung, Dehnung und Energie schützt, werden der Batteriepack ohne Feder-Masse-Dämpfungssystem und der Batteriepack mit Feder-Masse-Dämpfungssystem separat mit ABAQUS simuliert. Anschließend werden die Ergebnisse der beiden Analysen verglichen.

Zu diesem Zweck werden die simulierten Szenarien unter verschiedenen Belastungsbedingungen durchgeführt. Zunächst wird der Batteriepack ohne Feder-Masse-Dämpfungssystem simuliert, wobei die auftretenden Kräfte und Schwingungen erfasst werden.

Als nächstes erfolgt die Simulation des Batteriepacks mit dem entworfenen Feder-Masse-Dämpfungssystem. Dabei werden die gleichen Belastungsbedingungen wie zuvor angewendet, um eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Das Feder-Masse-Dämpfungssystem wird aktiv, um die auftretenden Kräfte und Schwingungen zu absorbieren und zu reduzieren.

Nach Abschluss beider Simulationen werden die Ergebnisse gegenübergestellt und analysiert. Hierbei liegt der Fokus auf der Bewertung der Beanspruchung und Dehnung des Batteriepacks in beiden Szenarien sowie der Vergleich von Energie. Falls die Simulation mit dem Feder-Masse-Dämpfungssystem eine geringere Beanspruchung, Dehnung und Energie aufweist als die Simulation ohne das System, kann dies als Beweis für die Schutzwirkung des entworfenen Feder-Masse-Dämpfungssystems dienen.

6.1 Allgemein

Die Finite Element Methode (FEM):

- Ist ein Näherungsverfahren welches auf der Basis mathematischer Modelle zur Lösung physikalisch-technischer Aufgabenstellung insbesondere an Körpern mit komplexer Geometrie angewendet wird.
- Dazu erfolgt eine Zerlegung des Körpers in finite Elemente mit einfacher geometrischer Struktur, die über Knoten miteinander verbunden sind.
- Diesen Elementen werden über Ansatzfunktionen mit physikalischen Eigenschaften verknüpft. [24]

Konsistente Einheiten:

- CAE-Systeme arbeiten grundsätzlich ohne Einheiten.
- Die Zuordnung der Einheiten erfolgt über eine technisch sinnvolle Interpretation.

Tabelle 6-1: Konsistente Einheiten

	Einheitensystem	
Größe	mm - N	SI
Länge	mm	m
Kraft	N	N
Masse	t	kg
Zeit	s	s
Spannung	N/mm ² od. MPa	N/m ² od. Pa
Energie	mJ od. 10 ⁻³ J	J
Dichte	t/mm ³	kg/m ³

$$1N = 1 \frac{(kg \cdot m)}{s^2} = 1 \frac{kg \cdot 10^3 mm}{s^2} \quad (6.1)$$

6.2 Mechanische Grundmodell

Autokollisionen sind Festkörperkollisionen, und die Lagrangesche Methode ist derzeit die ausgereifteste und bequemste Methode zur Beschreibung von Festkörperkollisionen. Sie

kann den Prozess der Lösung der Kontrollgleichungen vereinfachen. Bei einigen Simulationen mit großen Verformungen und nichtlinearen Problemen wird in der Regel die inkrementelle Lagrangesche Methode verwendet. Die spezifischen Kontrollgleichungen umfassen die Bewegungsgleichungen, die Massenerhaltungsgleichung, die Impulserhaltungsgleichung usw.

6.3 Modellierung der Struktur des Batteriepacks

Die Erstellung umfasst von Kollisions-Finite-Elemente-Modellen folgende Aspekte [27]:

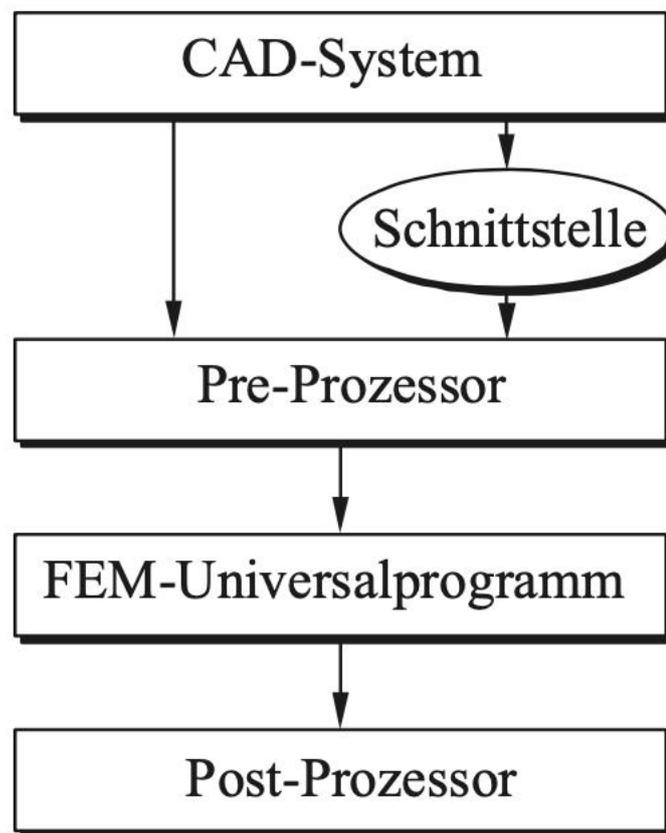


Bild 6-1: Konventionelle CAE-Prozesskette

- 1) Aufbau eines dreidimensionalen geometrischen Modells: Durch die Verwendung von computergestützter Konstruktion (CAD) wird ein dreidimensionales geometrisches Modell erstellt oder importiert, um die Form und Größe des Kollisionssystems präzise zu beschreiben.

- 2) Vorverarbeitung des Modells: Das geometrische Modell wird vorverarbeitet, indem Schritte wie die Bereinigung des Modells, das Beheben von geometrischen Fehlern und die Unterteilung in Elemente durchgeführt werden, um das Modell für die Finite-Elemente-Analyse vorzubereiten.
- 3) Materialzuweisung: Den verschiedenen Komponenten des Modells werden geeignete Materialeigenschaften zugewiesen, wie beispielsweise Elastizitätsmodul, Dichte, Bruchfestigkeit usw. Diese Materialeigenschaften sind entscheidend für die Durchführung der Kollisionsanalyse.
- 4) Aufbau von Verbindungszusammenhängen: Für die Kollisionsmodellierung mehrerer Teile müssen die Verbindungszusammenhänge zwischen den Teilen definiert werden, wie beispielsweise Schweißverbindungen, Schraubverbindungen usw. Diese Verbindungen können die Verteilung von Spannungen und Verformungen während der Kollision beeinflussen.
- 5) Definition von Randbedingungen: Die Randbedingungen des Modells werden festgelegt, wie Einschränkungen, Anfangsgeschwindigkeiten, externe Belastungen usw. Diese Bedingungen beschreiben die externen Einschränkungen und Belastungen, denen das Kollisionssystem ausgesetzt ist, und sind von großer Bedeutung für die Simulation realistischer Szenarien.
- 6) Festlegung von Modellausgaben und -steuerung: Es werden die gewünschten Ausgabeparameter definiert, wie Verschiebung, Spannung, Dehnung usw. Zusätzlich können Steuerparameter des Modells festgelegt werden, wie Zeitschrittgröße, Konvergenzkriterien usw.

6.3.1 Aufbau eines dreidimensionalen geometrischen Modells (Catia)

Basierend auf den in Tabelle 6-1 angegebenen geometrischen Abmessungen des Batteriepacks wird in der CATIA 3D-Modellierungssoftware ein vereinfachtes 3D-Modell erstellt. [25]

Tabelle 6-2: Geometrie des Batteriepacks Modellabmessungen

Typ des Batteriepacks	Länge/mm	Breite/mm	Höhe/mm
Quadratischer Batteriepack	1639	1180	248

Die Struktur des Batteriepack wird in Catia wie den Bild 6-2 gezeigt. Es besteht vereinfacht gesagt aus Gehäuse_Abdeckung, Gehäuse_Unterteil, Module und Modulehalter.

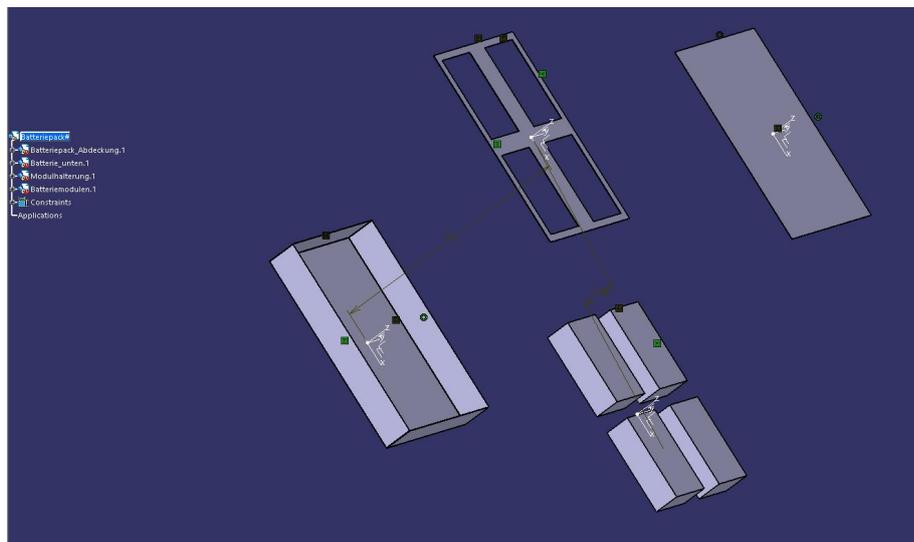


Bild 6-2: Explosion von Batteriepack

6.3.2 Vorverarbeitung des Modells (Part & Mesh)

Der Hauptrahmen des Batteriepacks besteht hauptsächlich aus Blechteilen. Da das äußere Gehäuse des Batteriepacks der Hauptgegenstand der Untersuchung ist, wird die innere Struktur des Packs vereinfacht und wie folgt behandelt:

- Um den Einfluss von Spannungskonzentrationen auf die Analyseergebnisse zu vermeiden, werden die äußeren Kanten des Packs um 4 cm abgerundet, während die inneren Kanten um 2 cm abgerundet werden.
- Da sowohl die Bolzen als auch der Modulehalter aus DC03 bestehen, können alle Bolzen mit einem zusätzlichen 2 mm dicken Modulehalter gleichgesetzt werden.
- Um die Vorgabe einer Gesamtmasse von 400 kg für das Batteriepack zu erfüllen, wird jedem Modul nach Messung und Berechnung eine Masse von 73,3 kg zugewiesen.

Anschließend werden die Abaqus-Simulationen unter Verwendung dieser zugewiesenen Massenpunkte analysiert.

- Die Module und ihre Verbindungen werden zu einer einzigen Einheit vereinfacht, und das Versagen der Module wird in der nachfolgenden Analyse nicht berücksichtigt.

Module: Part

In dem mechanischen Modell der Platten- und Schaleneinheit wird die Neutralebene der Struktureinheit als Referenzebene betrachtet. Dies bedeutet, dass jede Neutralebene verwendet wird, um eine Kombination von Platten- oder Schaleneinheiten mit unterschiedlichen Dicken darzustellen, um den Strukturkörper zu simulieren. Die Mittelflächen repräsentieren die geometrische Mittelebene der Platten- und Schaleneinheiten und dienen als Ausgangspunkt für die weitere Modellierung und Simulation. Durch die Erzeugung dieser Mittelflächen wird die geometrische Darstellung der Komponenten vereinfacht und ermöglicht eine präzisere Analyse der Struktur.

Daher ist es bei der Durchführung dieser Modellanalyse erforderlich, zunächst die Mittelflächen im Modul_Part für die Batterieabdeckung, das Batterieunterteil und die Modulhalterung zu generieren.

Module: Mesh

Aufgrund der Tatsache, dass die Batterieabdeckung, das Batterieunterteil und der Modulehalter alle als 2D-Schalenelemente modelliert sind, erfolgt deren Vernetzung mittels „quadrilateraler“ Elemente. Hingegen handelt es sich bei den Modulen um 3D-Volumenelemente, weshalb sie mit "hexahedralen" Elementen vernetzt werden.

Bei der Auswahl zwischen der Verwendung von Quadrilateral-Elementen oder Hexahedral-Elementen zur Vernetzung stehen zwei alternative Algorithmen zur Verfügung: Medial Axis und Advancing Front.

Der Medial Axis-Algorithmus beginnt mit der Unterteilung des zu vernetzenden Bereichs in eine Reihe einfacher Regionen und verwendet anschließend eine strukturierte Vernetzungsmethode, um diese einfachen Regionen weiter zu unterteilen. Insbesondere bei der Anwendung des Medial Axis-Algorithmus auf ein 2D-Modell kann die Auswahl der Option „Minimize the mesh transition“ die Qualität des Netzgitters signifikant verbessern.

Es ist wichtig zu beachten, dass der Medial Axis-Algorithmus dazu neigt, die Vernetzung in einer strukturierten Weise zu generieren, was zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Elemente und einer besseren Anpassung an den Modellbereich führen kann.

Der Advancing Front-Algorithmus hingegen basiert auf einer „voranschreitenden Front“, die sich von Rand zu Rand des zu vernetzenden Bereichs bewegt. Dabei werden neue Knotenpunkte und Elemente entlang dieser Front generiert, um die Vernetzung zu erweitern.

Da die Kanten von der Batterieabdeckung, des Batterieunterteils und des Modulhalters alle abgerundet sind, ist es notwendig, die Teile zunächst in Regionen zu unterteilen und dann den Medial Axis-Algorithmus für die Vernetzung zu verwenden. Der folgende Bild 6-4 zeigt ein Beispiel für die Vernetzung der Batterieabdeckung.

Aufgrund der Tatsache, dass die Kanten der Batterieabdeckung, des Batterieunterteils und des Modulhalters alle abgerundet sind, erfordert die Vernetzung der Teile eine Unterteilung in Regionen und die Verwendung des Medial Axis-Algorithmus. Ein Beispiel für die Vernetzung der Batterieabdeckung ist in Bild 6-4 dargestellt.

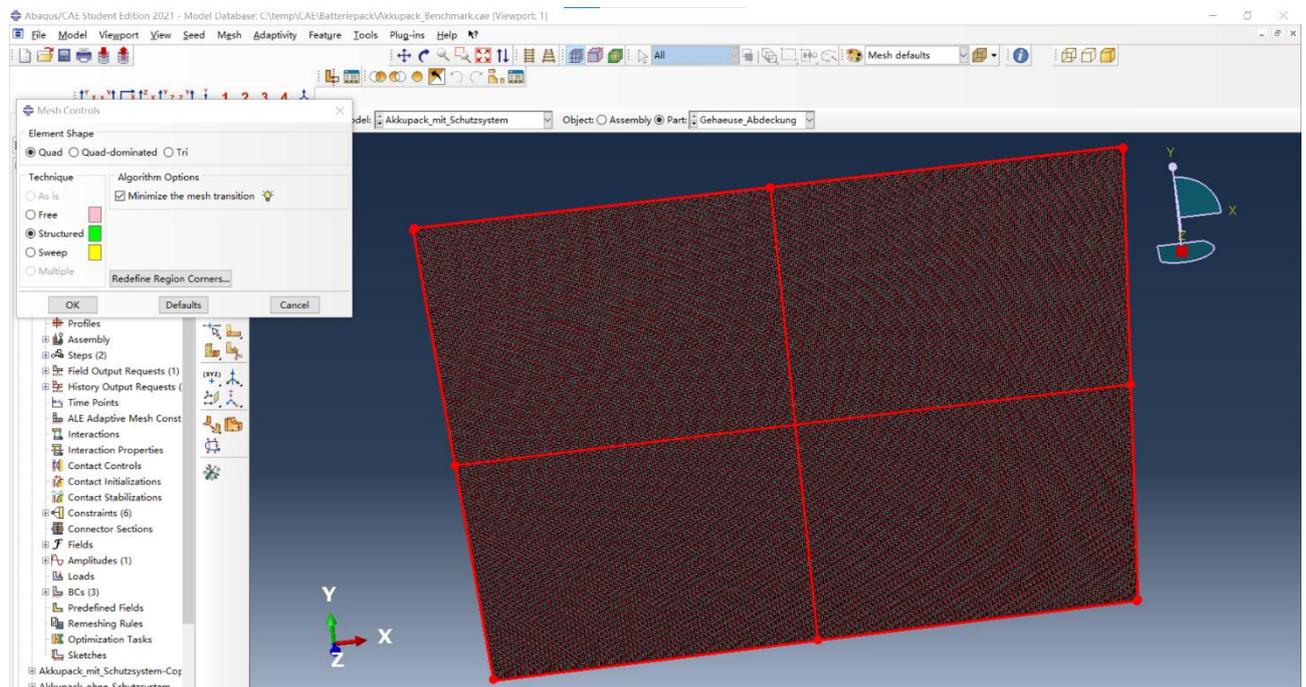


Bild 6-3: Batterieabdeckung_mesh controls

Verarbeitung von Batterie_Module als Massenpunkten:

Bei der Durchführung der Simulationsanalyse, bei der das äußere Batteriegehäuse im Fokus steht, kann die Batterie-Module als Massenpunkten betrachtet werden. Um dies zu

ermöglichen, wird der Schwerpunkt jedes Zellmoduls zunächst basierend auf seiner Geometrie als Referenzpunkt ermittelt. Dieser Referenzpunkt wird dann im „Struktumbaum“ Assembly-Engineering-Feature-Inertias verwendet, um die entsprechende berechnete Masse zu erhalten.

6.3.3 Materialzuweisung (Property)

Tabelle 6-3: Auswahl der Materialien und Dicken für die einzelnen Komponenten des Batteriepacks

	Material	Dicke/mm	Type	Elastizitätsmodul/Gpa	Poissonsche Zahl	Dicht/(kg*m ⁻³)	Streckgrenze/Gpa
Batterie_abdeckung	DC03	2	Shell	206	0,3	7850	0,162
Batterie_unterteil	DC03	2	Shell	206	0,3	7850	0,162
Modulhalterung	DC03	2	Shell	206	0,3	7850	0,162
Bolzen	DC03		tetraeder	206	0,3	7850	0,162
Module			quadrat	0,5	0,01	2000	

Gemäß Tabelle 6-2 kann wie folgt vorgegangen werden:

- Create Material: Das lineare Materialmodell „DC03“ wird erstellt. Es wird die entsprechenden Materialeigenschaften angegeben, wie zum Beispiel Elastizitätsmodul, Poissonzahl und Dichte.
- Create Section: Das Profil für das „DC03“ Stahlblech wird erstellt. Dabei wird der Typ „Schale, homogen“ gewählt und die entsprechende Dicke von 2 mm bzw. 4 mm angegeben. Das zuvor erstellte Material wird mit dem Profil kombiniert, um die Materialzuweisung abzuschließen.
- Assign Section: Das erstellte Profil wird der entsprechenden Geometrie zugewiesen. Dabei werden die entsprechenden Werkzeuge oder Funktionen in der

Modellierungssoftware verwendet, um das Profil auf die Oberflächen oder Flächen des Batteriepacks anzuwenden. Es wird sichergestellt, dass das Profil korrekt mit den relevanten Teilen des Modells verbunden ist.

6.3.4 Aufbau von Verbindungszusammenhängen (Assembly & Interaction)

Module: Assembly

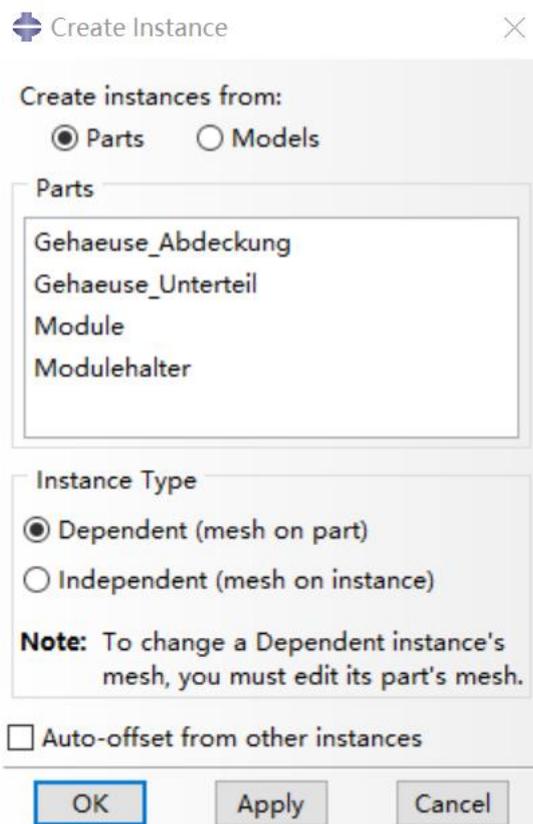


Bild 6-4: Create Instance

Die vier Teile „Gehaeuse_Abdeckung, Gehaeuse_Unterteil, Module und Modellehalter“ werden wie in Bild 6-3 zusammengesetzt.

Die ersten beiden Module Part & Property sind Part-Module.

Alle Weiteren Module sind Assembly-module.

Beliebig viele Parts können in einer CAE-Datei gehabt werden, aber nur das, was zum Assembly hinzugefügt wurde, wird einer FE-Analyse unterzogen.

Bemerkung: In diesem Fall wird der Part als „Dependent (mesh on part)“ zum Assembly hinzugefügt.

Das bedeutet, dass nicht das Assembly vernetzt wird, sondern das Part. Besonders sinnvoll ist dies beim Hinzufügen von Gleichteilen.

Module: Interaction

- Tie:

Verbindung von Batterie_abdeckung mit Batterie_unterteil

Verbindung von Batterie_unterteil mit Modulehaltung

Die „Tie“-Verbindung stellt eine starre Verbindung zwischen zwei Flächen dar, bei der die Übertragung von Steifigkeitsdaten erfolgt, ohne dass es zu einer Relativbewegung oder Verformung im Verbindungsbereich kommt. Diese Verbindung weist eine erhöhte Steifigkeit auf.

Hinsichtlich der Art der Bindungsform handelt es sich um Fläche-zu-Fläche-Zwänge, die hauptsächlich für Punkte (ein oder mehrere, jedoch nicht für den RP) und Flächen sowie für Bindungszwänge zwischen Flächen verwendet werden.

- Coupling:

Verbindung von Massenpunkten_Module mit Modulehaltung

„Coupling“ kann verwendet werden, um Zwangsbedingungen für den RP und den Kopplungspunkt festzulegen. Dabei wird sichergestellt, dass die Starrkörperbewegung zwischen dem RP und dem Kopplungspunkt identisch ist. Dadurch können Zwangslasten auf den RP übertragen werden.

„Continuum Distributed Coupling“ wird in der Verbindung von Massenpunkten_Module mit Modulehaltung. Zwischen dem Master-Knoten (z.B. RP) und dazugehörigen Slave-Knoten (Support-Bereich) wird eine Zwangsbedingung generiert, deren definierbare Verteilung der Verschiebung jedoch von der Struktursteifigkeit des Support-Bereiches abhängig ist.

Benutzerdefiniert kann man einzelne Freiheitsgrade freigeben. [28]

6.3.5 Definition von Randbedingungen (Load)

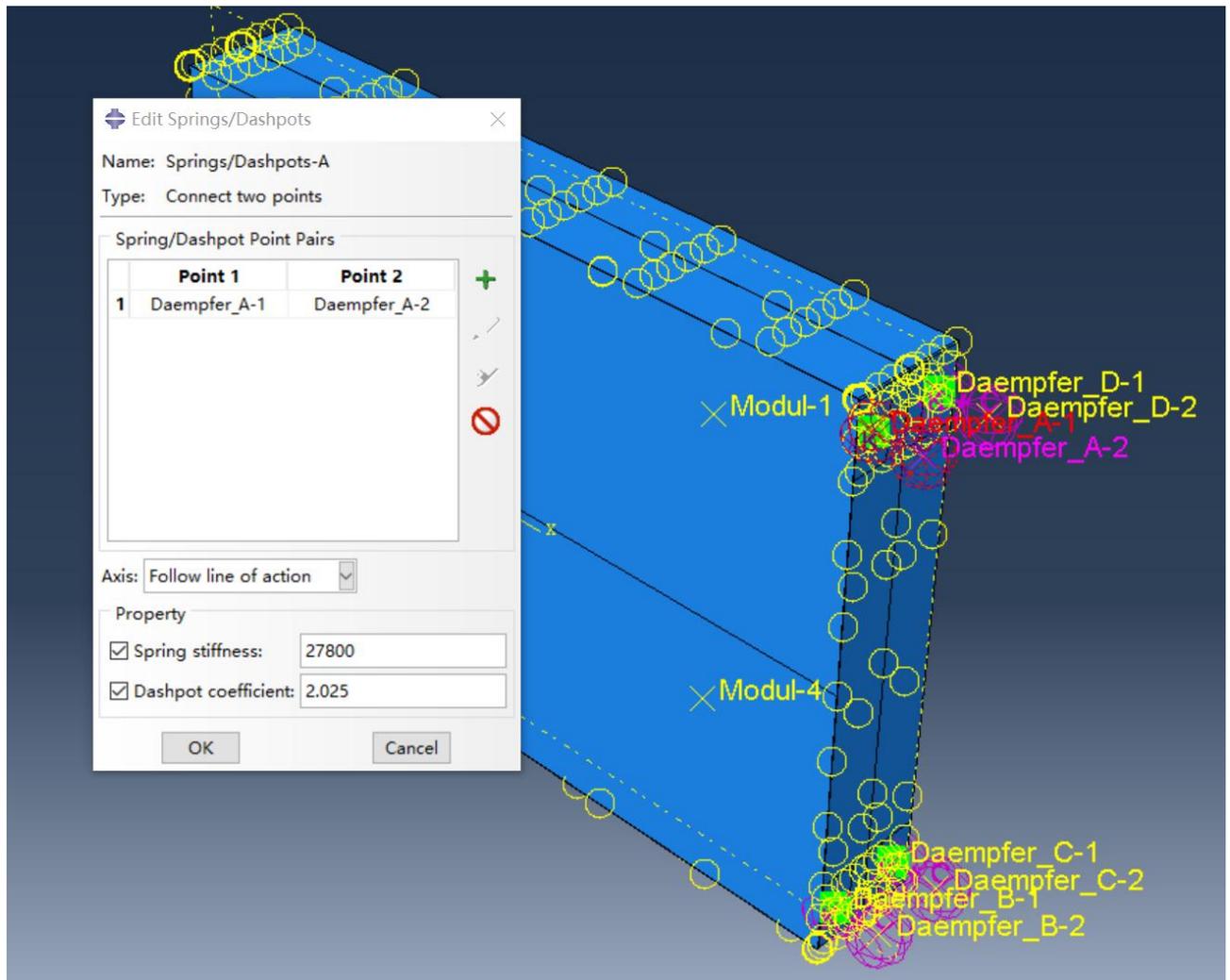


Bild 6-5: Randbedingungen von Batteriepack_mit Schutzsystem

Wie in Bild 6-5 dargestellt, wurde das Feder-Masse-Dämpfungssystem nach der Methode „zwei Punkte verbinden“ erstellt, wobei jedem System eine Federsteifigkeit von $27800 \frac{N}{mm}$ und ein Dashpot-Koeffizient von $2,025 \frac{N \cdot s}{mm}$ zugewiesen wurde.

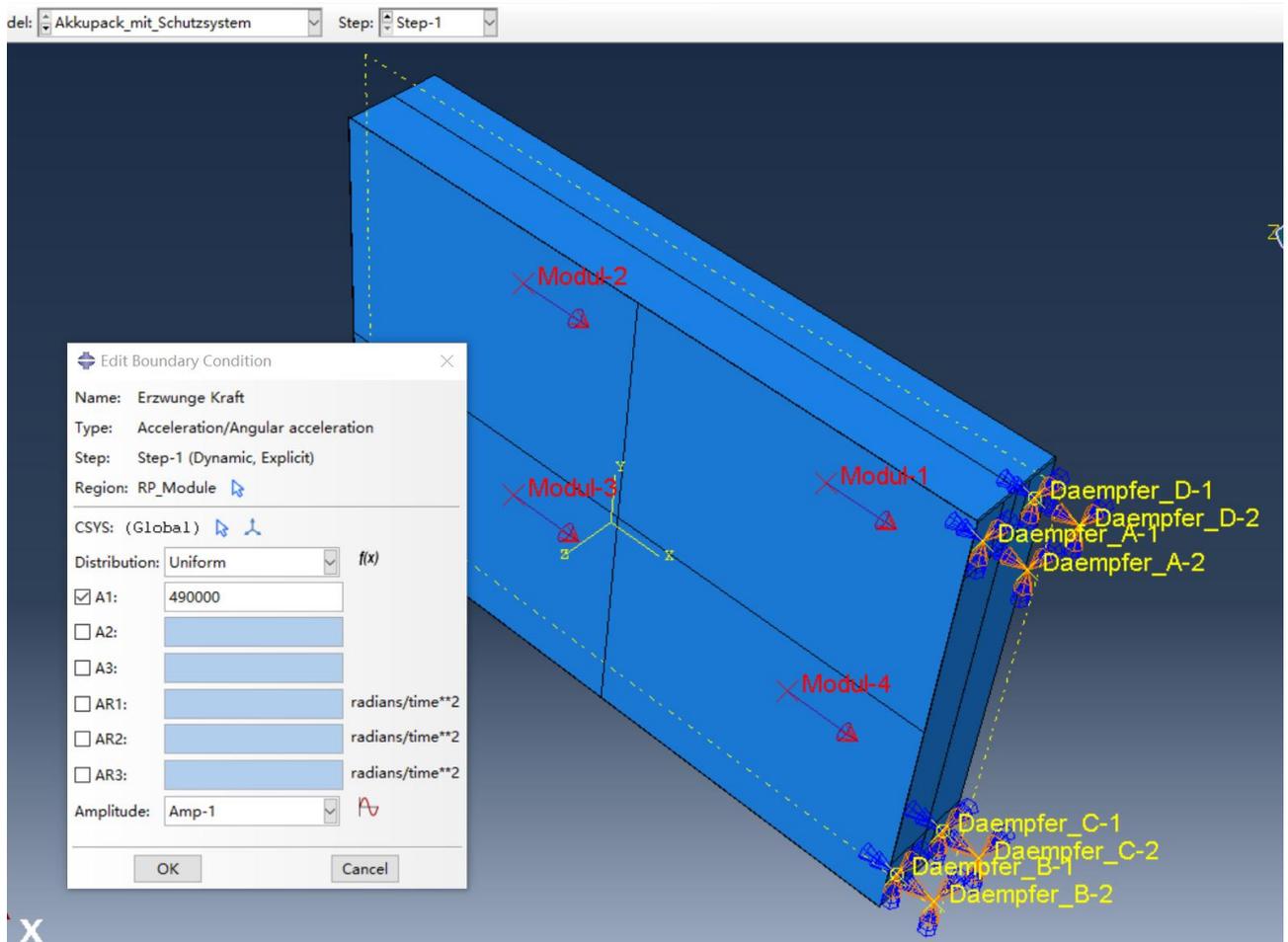


Bild 6-6: Randbedingungen von Batteriepack_mit Schutzsystem

Bild 6-6 simuliert den Aufprall eines Batteriepacks auf ein starres Hindernis.

Die vier Feder-Masse-Dämpfungssysteme sind über Loslager mit dem Batteriepack verbunden und weisen nur einen translatorischen Freiheitsgrad in x-Richtung auf.

Die anderen Enden der vier Feder-Masse-Dämpfungssysteme werden durch das Festlager gehalten, was einer 0-Freiheitsgrad-Verbindung des Batteriepacks mit dem starren Hindernis entspricht.

Obwohl das Hauptuntersuchungsobjekt in dieser Simulation das Gehäuse des Batteriepacks (d.h. Batterie_Abdeckung und Batterie_Unterteile) ist, sind die Massenpunkte der Module über RBE3 mit der Modulhaltung verbunden, und sowohl die Batterie_Abdeckung als auch die Batterie_Unterteile sind über Tie mit der Modulhaltung verbunden. Dadurch entsteht eine starre Bewegung zwischen dem äußeren Gehäuse des Batteriepacks und dem Referenzpunkt (RP) die Batterie_Moduls. Die Stoßkräfte, die

normalerweise auf das äußere Gehäuse des Batteriepacks einwirken würden, können auf den RP übertragen werden.

Die „Tie“-Verbindung und die „Coupling“-Verbindung ermöglicht es, die Bewegungen und Kräfte zwischen dem äußeren Gehäuse des Batteriepacks und dem RP präzise zu erfassen. Dadurch kann eine realistische Simulation des Aufpralls durchgeführt werden, wobei die Stoßkräfte auf den RP übertragen werden, um die Reaktion des Batteriepacks auf den Aufprall zu analysieren.

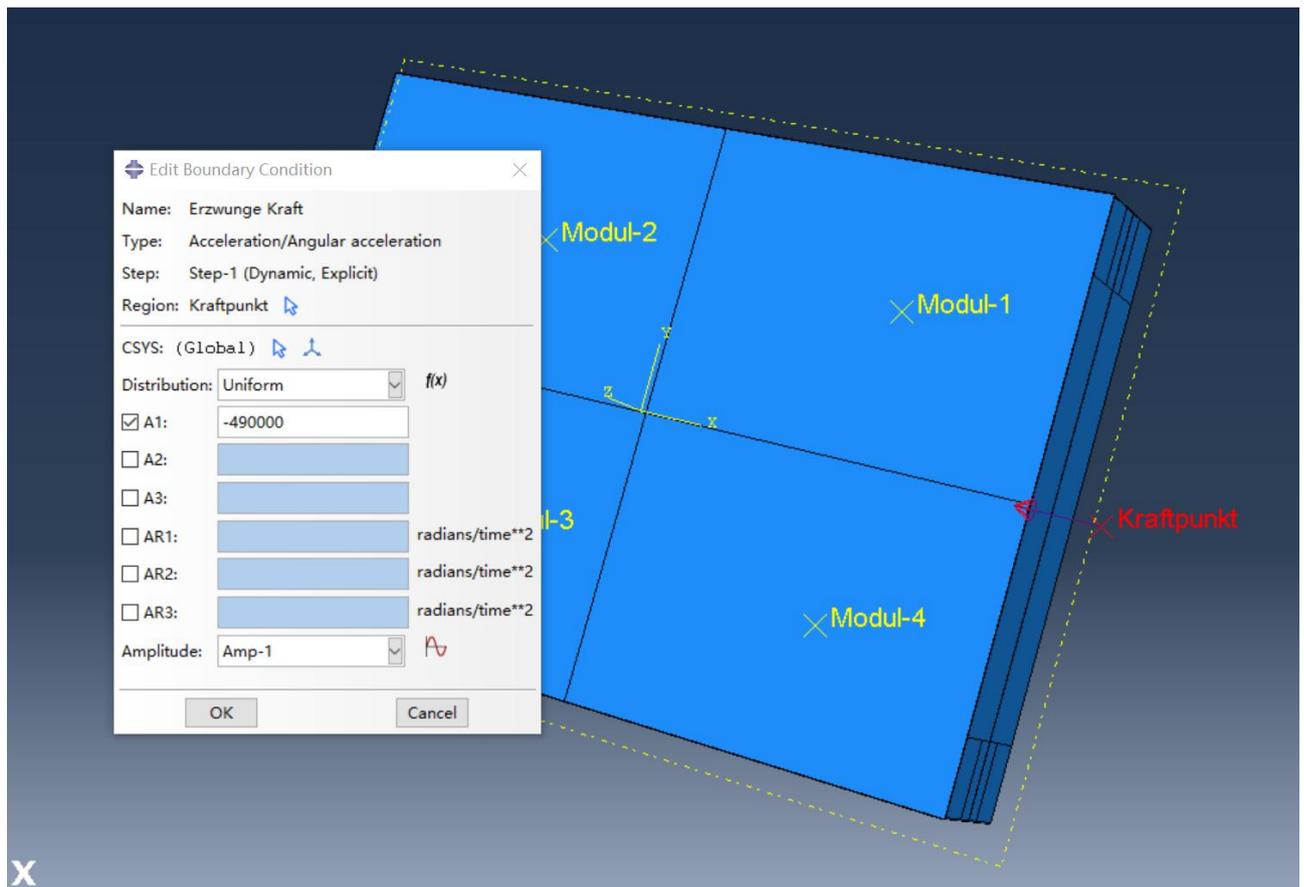


Bild 6-7: Randbedingungen von Batteriepack_ohne Schutzsystem

Bei dieser Simulation wird nur eine Kraft auf der Kraftseite des Batteriepacks berücksichtigt, ohne „Displacement/Rotation“-Beschränkungen. Das Software-System geht automatisch von einer starren Verbindung auf der anderen Seite des Batteriepacks in Richtung der Kraft aus, d.h. diese Seite hat null Freiheitsgrade.

Eine vergleichende Anmerkung zu den Wirkungspunkten der beiden Kräfte:

Basierend auf dem dritten Newton'schen Gesetz kann der Angriffspunkt beider Kräfte mit dem vorderen Ende des Batteriepacks gleichgesetzt werden, wo es mit dem Auto verbunden ist, während eines Frontalaufpralls.

Die „Edit Boundary Condition“ erlaubt die gleichzeitige Einstellung einer Stoßkraft von $490.000 \frac{mm}{s^2}$ mit einer Periode von 61,6s.

6.3.6 Festlegung von Modellausgaben und -steuerung (Step)

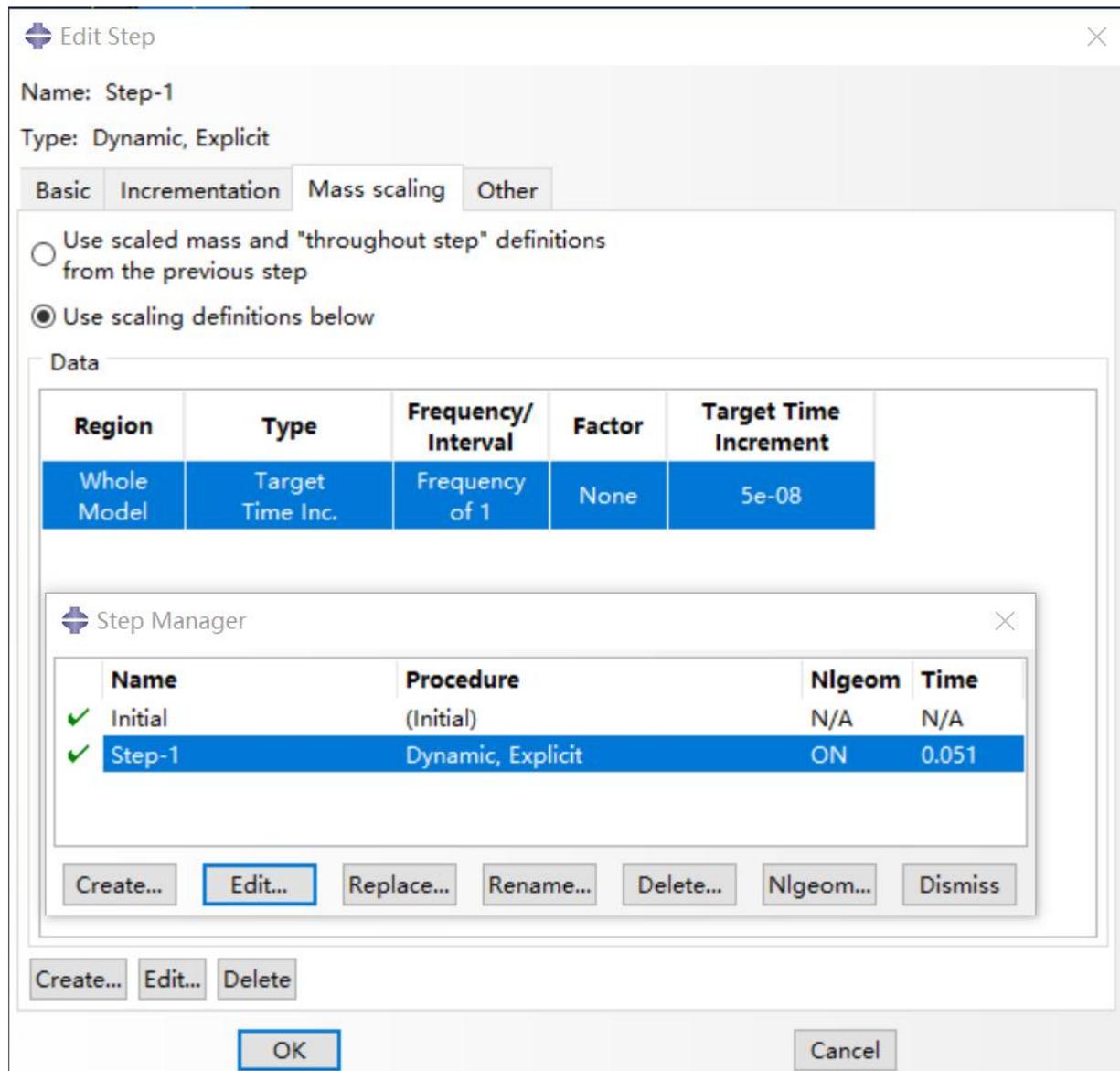


Bild 6-8: Edit Step von erzwungen Kraft

Wie in Bild 6-8 gezeigt, wird ein Analyseschritt mit einer Zeit von 51 ms und einer Schrittweite von 1 erstellt.

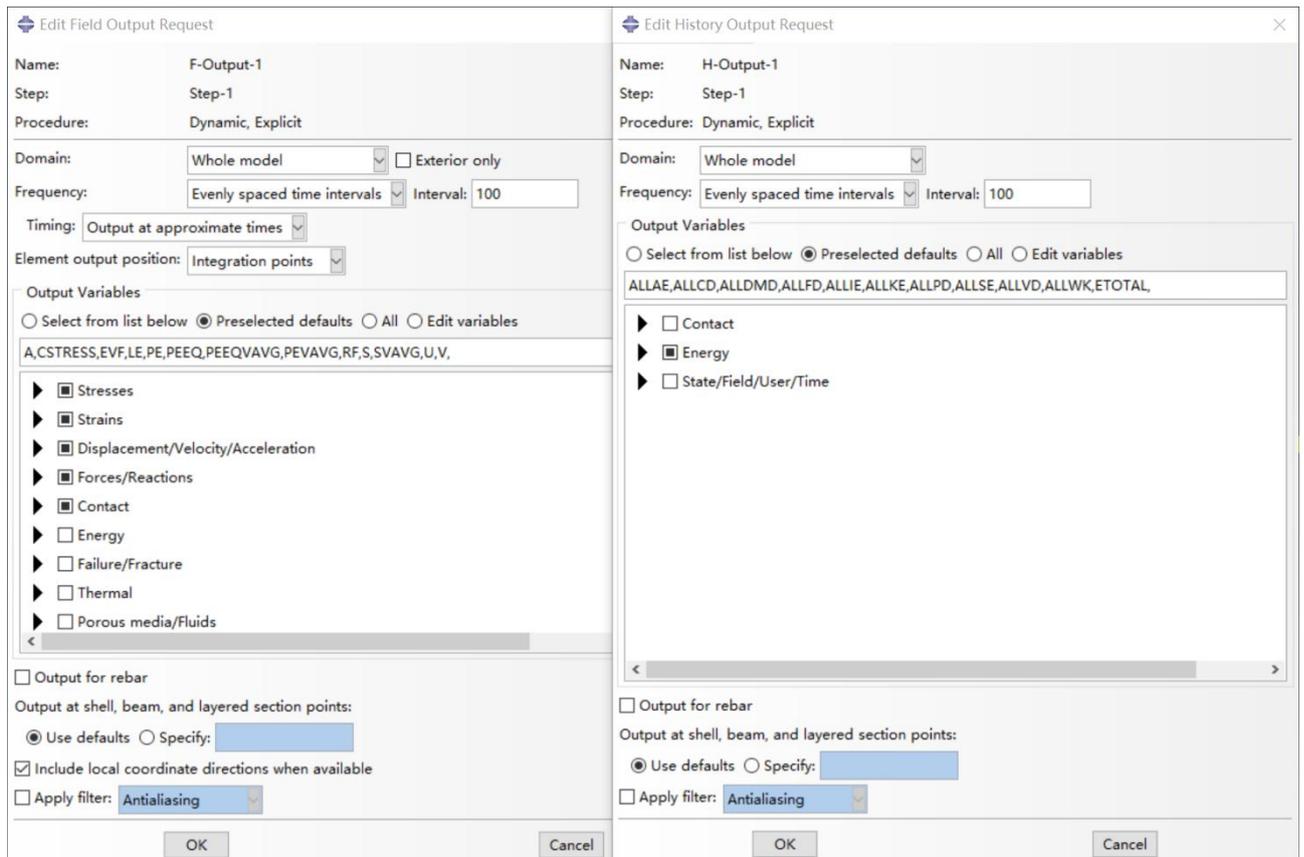


Bild 6-9: Edit Field Output & History Output Request

Die definierte gewünschte resultierende Leistung, wie in Bild 6-9 dargestellt, umfasst die Analyse von Spannungen, Dehnungen und der Energie im Batteriepack sowie des gesamten Systems. Diese Parameter stehen im Fokus der durchgeführten Simulation.

6.4 Vergleich der Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse des Batteriepack_mit Schutzsystems und der Batterie_ohne Schutzsystems verglichen und unter drei Gesichtspunkten analysiert: Spannung, Dehnung und Energie.

6.4.1 Vergleich von Dehnung

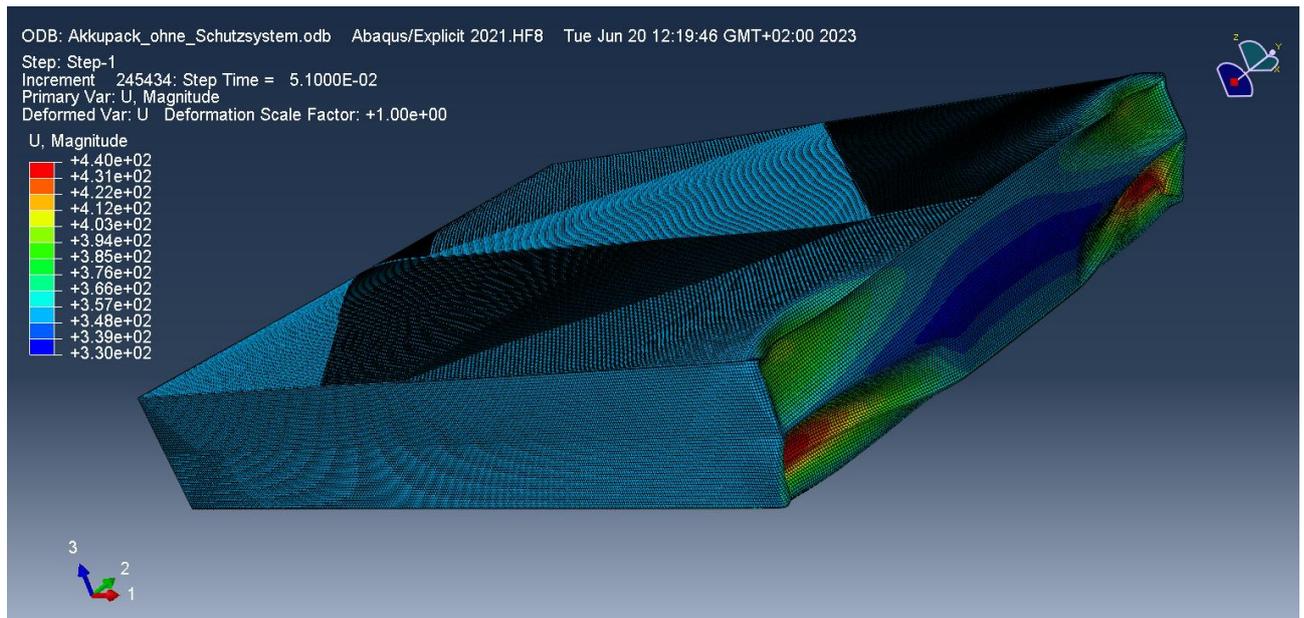


Bild 6-10: Dehnung_ohne Schutzsystem

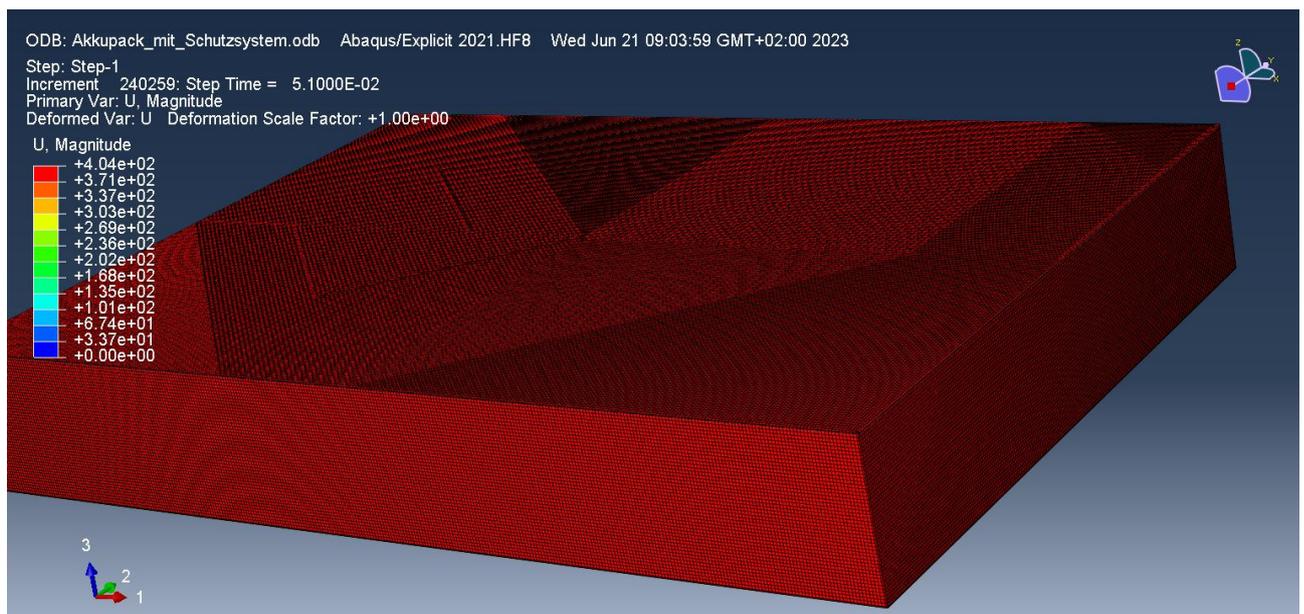


Bild 6-11: Dehnung_mit Schutzsystem

Wenn man Bild 6-10 mit Bild 6-11 vergleicht, lässt sich feststellen, dass die maximale Verformung des Batteriepacks bei einem halbsinusförmigen Aufprall von 50 g mit einer Impulsdauer von 51 ms 440 mm beträgt.

Die Angabe von 50 g bezieht sich auf die Spitzenbeschleunigung in der Nähe des Fahrers eines Pkw, wenn das gesamte Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h frontal auf eine starre Wand trifft. Das vordere Ende des Fahrzeugs, wie zum Beispiel der Stoßfänger,

verfügt über Energieabsorber, wodurch die tatsächliche Beschleunigung, die auf das Batteriepack einwirkt, deutlich geringer ist als 50 g.

Beide Simulationen sind aus wissenschaftlicher Sicht nicht geeignet, um zu überprüfen, „ob die Zelle bis auf 4,5 mm ihrer Verformung komprimiert, ist“.

Es ist auch nicht möglich, aufgrund der in Bild 6-10 gezeigten Zwangseinstellungen nachzuweisen, ob das Feder-Masse-Dämpfungssystem die Batterie aus Sicht der Beanspruchung angemessen schützt.

6.4.2 Vergleich von Spannung

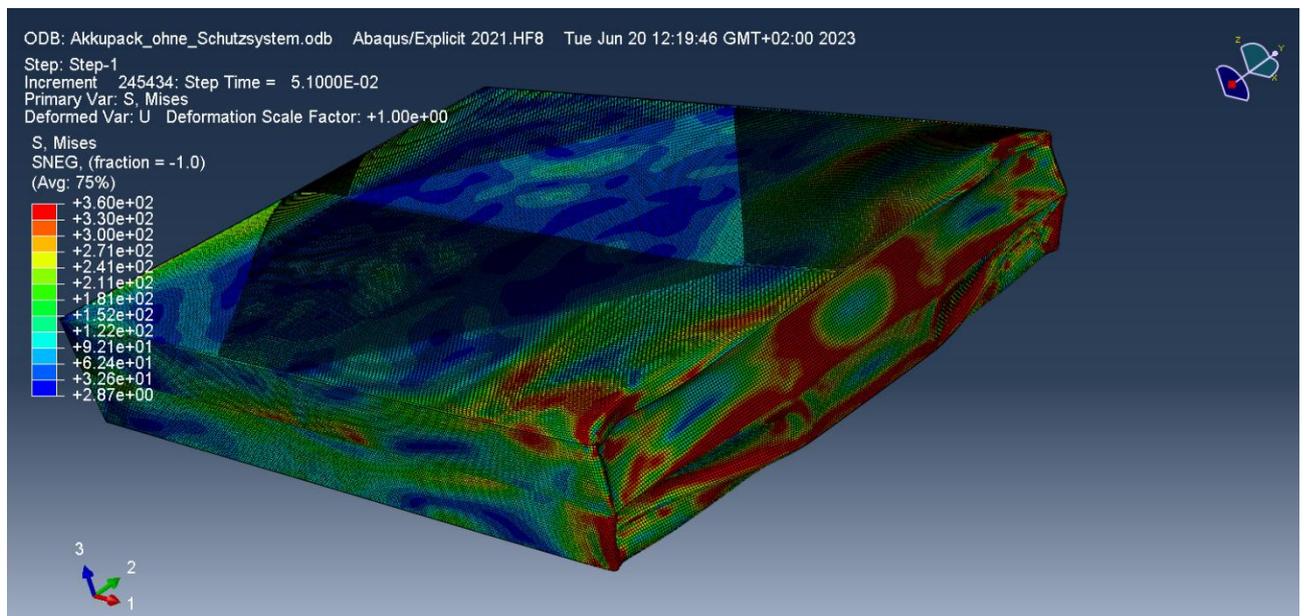


Bild 6-12: Spannung_ohne Schutzsystem

Gemäß Bild 6-12 ist zu erkennen, dass die maximale Spannung im Batteriepack ohne das Feder-Masse-Dämpfungssystem 360 Gpa beträgt und sich auf die vordere Hälfte des Packs

Im Bereich des Aufpralls konzentriert.

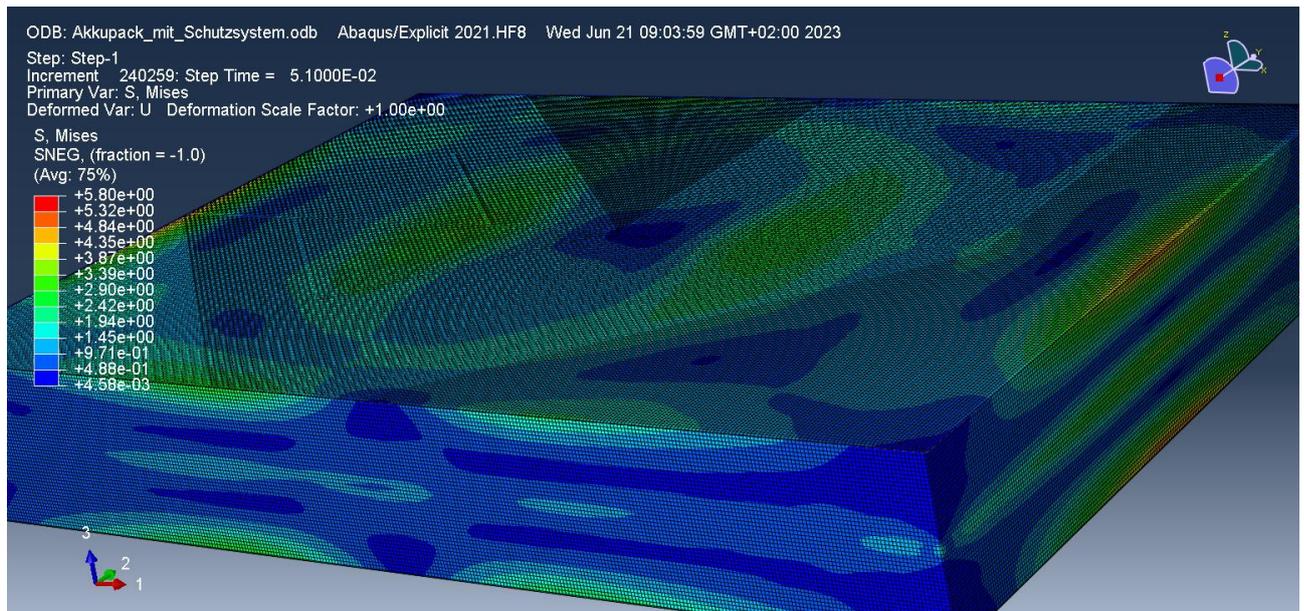


Bild 6-13: Spannung_mit Schutzsystem

Wie aus Bild 6-13 hervorgeht, beträgt die maximale Spannung in der Pack 5,8 Gpa und konzentriert sich hauptsächlich auf den Bereich, der nicht direkt vom Feder-Masse-Dämpfungssystem betroffen ist. Diese maximale Spannung entspricht jedoch immer noch nicht der Anforderung der „DC03-Streckgrenze von 0,162 Gpa“.

Die Reduzierung der Spannung von 360 GPa auf 5,8 GPa verdeutlicht ausreichend, dass das Feder-Dämpfungssystem die Batterie unter Betrachtung der Spannungsaspekte schützt.

6.4.3 Vergleich von Energie

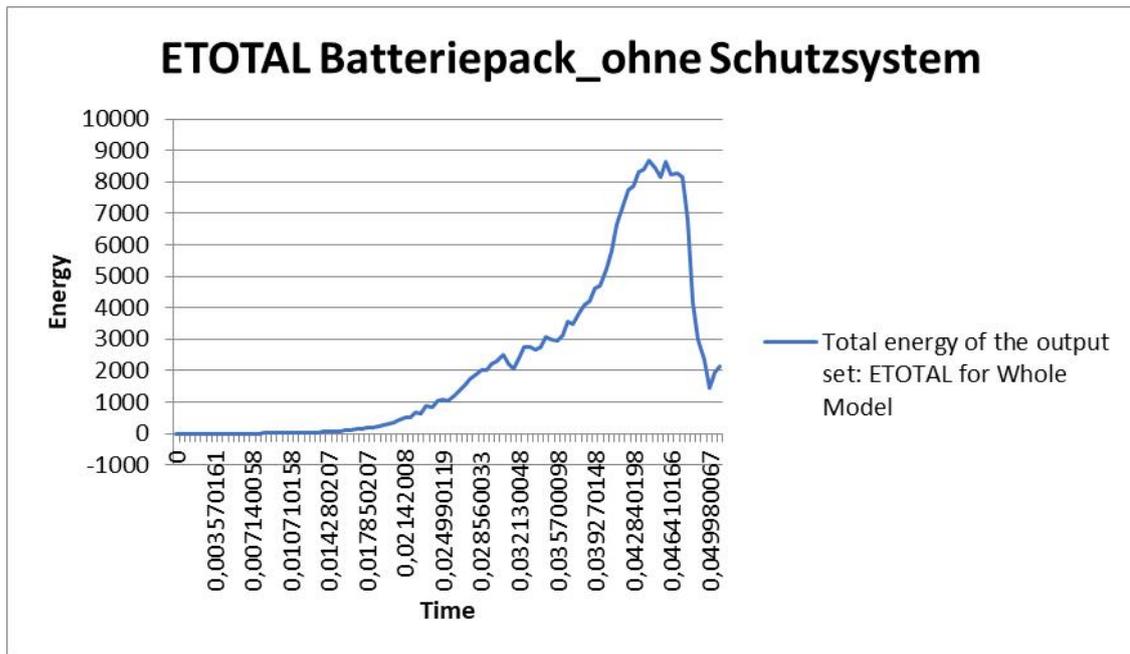


Bild 6-14: Total Energy_ohne Schutzsystem

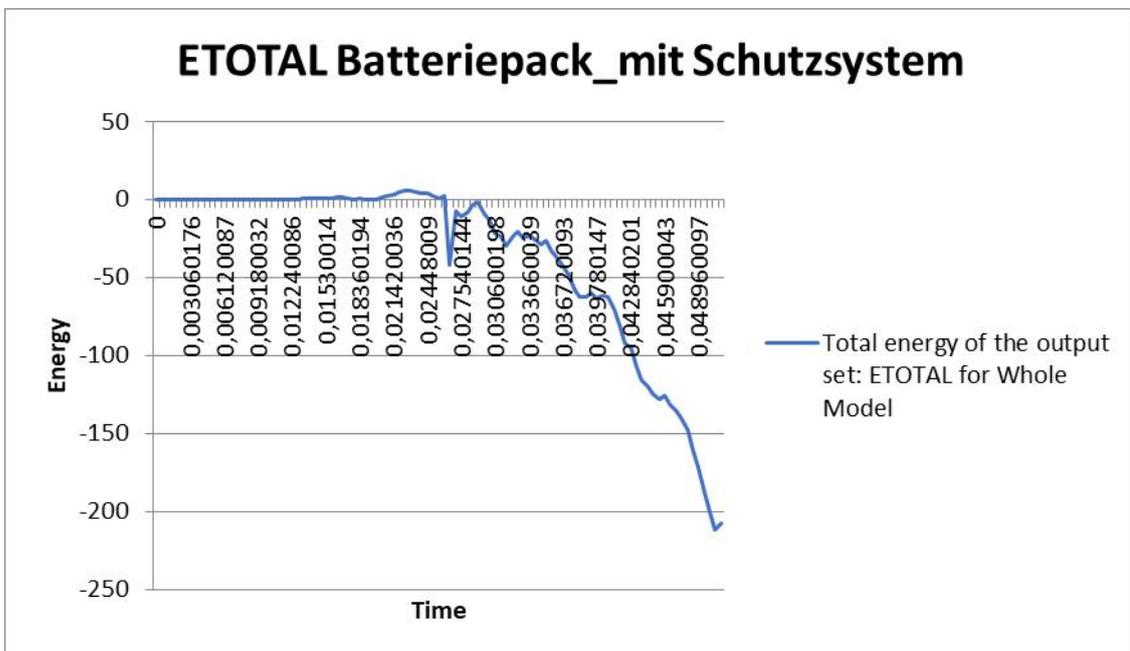


Bild 6-15: Total Energy_mit Schutzsystem

Grundsätzlich ist die von der Zwangskraft erzeugte äußere Arbeit bei beiden Systemen gleich. In einem System ohne Masse-Feder-Dämpfungssystem wird die von der äußeren Kraft geleistete Arbeit vollständig in eine Erhöhung der kinetischen Energie des Systems umgewandelt. In einem System mit Masse-Feder-Dämpfungssystem muss zusätzlich zur

von der Kraft auf das System geleisteten Arbeit die von der Dämpfungskraft geleistete Arbeit berücksichtigt werden. Die Dämpfungskraft ist proportional zur Geschwindigkeit der Masse und wirkt in entgegengesetzter Richtung zur Geschwindigkeit. Wenn das System einer äußeren Kraft ausgesetzt ist, verlangsamt die Dämpfungskraft die Bewegung des Systems und gibt Energie an das System ab.

Da die Arbeit, die von der Dämpfungskraft auf das System verrichtet wird, negativ ist (d. h. das Produkt aus Dämpfungskraft und Verschiebung ist negativ), führt sie zu einer Verringerung der Gesamtenergie des Systems. Daher hat ein System mit Masse-Feder-Dämpfungssystem aufgrund der Dämpfungskraft eine geringere Gesamtenergie als ein nicht gedämpftes System, wenn die gleiche äußere Kraft darauf wirkt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein System mit Masse-Feder-Dämpfungssystem aufgrund der Dämpfungskraft eine geringere Gesamtenergie aufweist, da die von der externen Kraft geleistete Arbeit teilweise in die Energie des Systems umgewandelt wird. In einem System ohne Masse-Feder-Dämpfungssystem wird die von der externen Kraft geleistete Arbeit vollständig in eine Erhöhung der kinetischen Energie des Systems umgewandelt, wodurch die Gesamtenergie größer ist.

Ein Vergleich der Werte von Bild 6-13 mit denen von Bild 6-14 reicht aus, um zu zeigen, dass das Feder-Masse-Dämpfungssystem den Batteriepack schützt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Abaqus-Simulationen liefern ausreichende Nachweise dafür, dass das entworfene System, bestehend aus vier parallel geschalteten Feder-Masse-Dämpfern, die mit einem einzelnen Elastizitätsfaktor von 27.800 N/mm und einem Dämpfungsfaktor von 2,025 (N·s) /mm ausgestattet sind, die Batterie effektiv in Bezug auf Spannung und Energie schützt. Aufgrund der Beschränkungen der Constraint-Einstellungen im 3D-Modell von Abaqus ist es jedoch nicht möglich, eine visuelle Darstellung zur Bestätigung des Schutzes der Batterie hinsichtlich der Spannung zu generieren.

Die in Kapitel 5 verwendeten Daten zur Datenanalyse und Auslegung des Feder-Masse-Dämpfungssystems wurden aus einer simulierten Kollision eines Fahrzeugs mit einer starren Wand gewonnen. Die Durchführung dieser Simulation wurde von Huachen Z. von der Northeast Forestry University durchgeführt. Es ist zu beachten, dass die Art und Weise, wie die Daten während der Berechnungen behandelt wurden, einen Einfluss auf die Endresultate hatte, einschließlich der Genauigkeit der Dezimalstellen, die beibehalten wurden. Darüber hinaus ist es wichtig zu beachten, dass die Methode des proportionalen Ablesens keine präzise Datenerfassung ermöglicht und daher gewisse Einschränkungen in Bezug auf die Genauigkeit der Daten aufweist.

Die Angabe von 50g bezieht sich auf die maximale Beschleunigung in der Nähe des Fahrers eines Kraftfahrzeugs während eines frontalen Aufpralls mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h gegen eine starre Wand. Es ist jedoch zu beachten, dass die tatsächliche Beschleunigung, die auf das Batteriepack während des Aufpralls übertragen wird, erheblich geringer ist als 50g. Dies liegt daran, dass die Frontpartie des Fahrzeugs eine gewisse Energieabsorption aufweist, die dazu dient, die Auswirkungen des Aufpralls abzumildern. Dadurch wird die tatsächliche Belastung des Batteriepacks deutlich reduziert und die resultierende Beschleunigung ist wesentlich niedriger als die ursprünglich angegebene Zahl von 50g.

Unter geeigneten Bedingungen kann die Durchführung dieser Studie wie folgt erfolgen:

1. Ein reales Fahrzeug kollidiert frontal mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h gegen eine starre Wand. An der Batterie werden Sensoren angebracht, die relevante Daten erfassen, während ein Computer diese Daten aufzeichnet und Bilder für die

nachfolgende Analyse generiert. Die zu erfassenden Daten umfassen: die Eindringgeschwindigkeit der Batterie, die Eindringbeschleunigung der Batterie, die Verschiebung der Batterie relativ zur Fahrzeugkarosserie oder die Kompressionsverformung der Batterie sowie die Impulsdauer und die Wellenform der Aufprallkräfte auf die Batterie. Das Produkt aus der maximalen Eindringbeschleunigung des Batteriepacks und der Masse des Packs wird als Amplitude der erregenden Kraft bezeichnet.

2. Basierend auf den in Schritt 1 gemessenen Daten werden die entsprechenden Federsteifigkeits- und Dämpfungskoeffizienten durch Lösung der Differentialgleichungen für erzwungene Schwingungen mithilfe mathematischer Software (z. B. Matlab) ermittelt. Anschließend werden die Anzahl und Anordnung des Feder-Masse-Dämpfungssystems berücksichtigt, wobei angenommen wird, dass das Feder-Masse-Dämpfungssystem starr mit dem Batteriepack verbunden ist.
3. Basierend auf den relevanten Eigenschaften des in Schritt 1 getesteten Batteriepacks wird eine detailliertere Modellierung und Simulationsanalyse in Abaqus durchgeführt.

Dieser oben beschriebene Ansatz liefert aussagekräftigere Ergebnisse für die praktische Anwendung.

In dieser Arbeit wurde ausschließlich die Schutzwirkung eines Feder-Masse-Dämpfungssystems, das auf der Aufprallfläche angebracht ist, bei einem Frontalaufprall auf die Batterie untersucht. Es gibt jedoch weitere Fälle, die in zukünftigen Untersuchungen betrachtet werden können:

Bei einem Frontalaufprall kann untersucht werden, ob das Batteriepack durch Feder-Masse-Dämpfungssysteme, die sowohl auf der aufprallenden als auch auf der nicht aufprallenden Seite in der Aufprallrichtung (d. h. entlang der x-Richtung) angebracht sind, besser geschützt wird.

Bei einem Seitenaufprall kann Feder-Masse-Dämpfungssysteme an allen vier Seiten des Batteriepacks (d. h. in der x-y-Ebene) angebracht werden, um zu beobachten, wie sich das Batteriepack verhält und ob es dadurch besser geschützt wird.

Quellenverzeichnis

- [1] Oliver, S., Marcus, K.: Das Elektroauto, ATZ/MTZ-Fachbuch, 2. Auflage
- [2] Der Elektroantrieb: So funktioniert ein Elektroauto, Suche: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/elektroantrieb/>, 06.03.2023
- [3] Guangliang, Y., Guangzhi, J.: Extrusion Analysis of Battery Pack under Impact Condition, 2021, 1617-7988(2021)19-09-04
- [4] Elf Antworten zu Lithium-Ionen-Batterien, Suche: <https://www.nzz.ch/mobilitaet/lithium-ionen-batterien-antworten-auf-die-meistgestellten-fragen-ld.1526839>, 20.12.2019
- [5] Hans, D., Franz, H.: Maschinendynamik, 12. Auflage
- [6] Yong X., Tomasz, W., Elham, S., Xiaowei Z.: Damage of cells and battery packs due to ground impact, Elsevier B.V., 2014, 267
- [7] Peixin, H., Fengchong, L., Jiqing, C.: The Structural Response Analysis of EV Battery Pack Under Random Vibration and Impact Conditions, Automotive Engineering, 2017, 39(09):1087-1093+1099
- [8] Xu, H.: Finite element simulation and modal analysis of power battery box for electric vehicle, Hunan University, 2015
- [9] Fuchun, F., Xiaoyan, S., Lirong, L., Xiaojun, Z.: Finite Element Analysis of Power Battery Box Based on ANSYS Workbench, 2014(11):33-35
- [10] Matthias, H., Martin, R., Ziad, K.: Enhanced Battery Pack for Electric Vehicle: Noise Reduction and Increased Stiffness, Trans Tech Publications Ltd, 2013, 2530
- [11] Guiting, T.: The Swapping traction battery enclosure structure optimization and lightweight design, Chongqing Jiaotong University, 2016
- [12] Pinjian, W.: Lightweight design and optimization of power battery pack structure for electric vehicle, North China University of Science and Technology, 2015
- [13] Gaosong, J.: The structure design analysis and optimization of electric vehicle battery box, Hunan University, 2016
- [14] Yu, Z., Youqiang, C., Xianjun, H., Qiuying, Z.: Study on lightweight for electric car battery case, 2014(01):38-41
- [15] Shujian, Y.: Static-dynamic analysis and structural optimization of electric vehicle battery box, Hunan University, 2012
- [16] Junshan, G., Dapeng, Y., Yanbing, Z., Jinjun, W.: Multi-condition Topology Optimization of Bus Battery Box Structure Based on

- Compromise Programming, Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019,43(02),363-367
- [17] Wenwei, W., Yuting, C., Weiyuan, J., Zhishan, L.: Random Vibration Fatigue Analysis of Electric Vehicle Battery Box, Chinese Journal of Automotive Engineering, 2016, 6(01):10-14
- [18] Yike, H.: Prediction of multiaxial random vibration fatigue life based on frequency domain, Southwest Jiaotong University, 2015
- [19] Lixiang, G.: Key Technology Research on Fatigue Life Prediction of EV Battery Packs, Dalian Jiaotong University, 2014
- [20] Zhigang, C., Vibration Fatigue Life Calculation of Pack's Lock in Electric Car, 2013:75-78
- [21] Changde, W., Jiangliang, D., Wei, T., Guojiang, Y., Yi, L.: Fatigue Life Prediction and Optimization of Welding Spot based on Battery Box of a Electric Car, Journal of mechanical Strength, 2013, 35(5):663-667
- [22] Qian, P., Jihui, W., Youhuai, L., Ruihong, W., Guanghua, L., Yingqiang, K.: Car Battery Box Structure Fatigue Life Prediction Based on Frequency Response, Mechanical Engineering & Automation, 2016, (05): 31-33+36
- [23] Xiaowei, L., Zuoqiang, D., Lili, Z., Qin Hai, Z., Kemei, R.: Research on Fatigue Life of Battery Box Based on nCodeDesignlife, Bus & Coach Technology and Research, 2018, 40(03), 17-19
- [24] Prof. Fischer: Script zur LV CAE 1, Westsächsische Hochschule Zwickau, 2021
- [25] Huachen, Z.: Structural Design of Battery Pack for Electric Vehicle, Northeast Forestry University, 2020
- [26] Helmut, J., Roland, M., Manfred, K.: Technische Schwingungslehre, 8. Auflage
- [27] Bernd, K.: FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 7. Auflage
- [28] Andreas, U.: Hinweise zum Umgang mit Abaqus/CAE, Westsächsische Hochschule Zwickau, 2018