

Johannes Pumsleitner, Bsc.

**Entwicklung von sicherheitsrelevanten
Prüfverfahren für die Absicherung von Lithium-
Ionen Traktionsbatterien in Bezug auf Vibrationen
im Fahrbetrieb**

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Steffan

Institut für Fahrzeugsicherheit

Graz, 18.2.2018

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

Graz am _____

Johannes Pumsleitner

VORWORT UND DANKSAGUNG

Obwohl der Elektroantrieb noch vor dem konventionellen Automobil mit Verbrennungsmotor erfunden wurde, haben sich die konventionell betriebenen Pkw auf Basis von Verbrennungskraftmaschinen im alltäglichen Leben durchgesetzt. Aktuell steigen für OEMs die Kosten exponentiell um weitere Innovationen zur Senkung des Treibstoffverbrauches und der Schadstoffemissionen von Verbrennungskraftmaschinen umzusetzen, d.h. dass eine Systemoptimierung zu Gunsten des Verbrauches und/oder zur Senkung der Abgasemission an Finanzintensivität zunimmt, der tatsächliche Nutzen davon aber bleibt eher im unteren Mittelmaß. Gleichzeitig fordern auch die steigenden Flottenverbrauchsabgaben den Tribut eines jeden OEM. Konsumenten ist es auch immer wichtiger ihren CO₂ Footprint zu verringern und sich umweltfreundlich zu bewegen, sie nehmen nicht nur den Zusatzaufwand durch Aufladen ihrer E-Fahrzeuge in Kauf, sondern auch die derzeit höheren Kosten bei der Anschaffung eines Elektroautos. Die Gesellschaft scheint nun bereit zu sein für diesen technologischen Wandel, Fahrzeughersteller erhöhen die Angebote und die Nachfrage nach dieser Technologie steigt. Mit dieser Masterarbeit versuche ich einen Beitrag an dieser Entwicklung zu leisten.

Ich bedanke mich hiermit bei allen involvierten Personen insbesondere bei DI Dr. Gregor Gstrein für die Betreuung der Masterarbeit seitens der TU Graz, bei Philipp Kreisel (CEO Kreisel Electric GmbH & Co KG) für die Ermöglichung der Masterarbeit, bei DI Peter Dobusch für die Betreuung bei Kreisel Electric und bei DI Johann Payer vom Kompetenzzentrum Virtual Vehicle für fachliche Unterstützung und das Durchführen der Fahrzeugmessungen.

Diese Arbeit wird im Zuge des K-Projekts SafeBattery verfasst. Das K-Projekt SafeBattery wird im Rahmen von COMET – Competence Centers for Excellent Technologies durch das BMVIT und das BMDW gefördert. Das Programm COMET wird durch die FFG abgewickelt.

ABSTRACT

This master thesis is focused on vibration safety due to the life time of an electric driven vehicle. Therefore, vibrations have been measured on a representative electric vehicle during certain drives on test tracks. Based on these measurements a calculation methodology has been developed to create a lifetime testing profile for a vibration test bench. The lifetime prediction grounds on energy equivalence. Furthermore, battery modules got tested for resonant frequencies and damping components were investigated to reduce effective vibration on the battery modules.

KURZFASSUNG

Ein repräsentatives Versuchsfahrzeug mit E-Antrieb wurde mit Sensoren an dessen Traktionsbatterie bestückt um damit real auftretende Vibrationen während definierter Fahrten auf unterschiedlichen Fahrbahnprofilen zu ermitteln. Die daraus gewonnenen Messdaten wurden ausgewertet und dienen als Basis eines Berechnungstools mit welchem sich ein Prüfstandsprofil berechnen lässt. Mit dem generierten Prüfstandsprofil lässt sich die mech. Lebensdauer einer Traktionsbatterie innerhalb kurzer Zeit simulieren.

Bestehende Vibrationsnormen wurden mit dem berechneten Vibrationslebensdauerprofil (VILEP) in Relation gesetzt und analysiert.

Um die Wirkung von Schwingungen und mech. Schocks vom Fahrzeug auf die Batterie zu minimieren wurden verschiedene Entkoppelungselemente auf Modulebene untersucht und deren Wirksamkeit bestimmt, sowie Spektralanalysen von Batteriemodulen durchgeführt.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
<hr/>		
1.1	Motivation	1
1.1.1	Potentielle Auswirkungen von Schwingungen	2
1.1.2	Potentielle Schäden an Zellen und Traktionsbatterie durch Vibration	3
1.2	Vorgehensweise	4
1.3	Theoretische Grundlagen	4
1.3.1	Betriebsfestigkeit Grundlagen	4
1.3.2	Batteriezelle als elektrisches Ersatzmodell	6
1.3.3	Innenwiderstand: Verhalten in der Zelle	8
1.3.4	Ausführungen von Lithium-Ionen-Batterien	9
1.3.5	Schwingungsanregung: Sinus- und Breitbandrauschen	12
1.4	Internationale Normen und Richtlinien bzgl. Vibrationsprüfungen an spezifischen Bauteilen	13
1.4.1	LV 124-2 Elektrische und elektronische Komponenten in Personenkraftwagen bis 3,5t – Allgemeine Anforderungen, Prüfbedingungen und Prüfungen Teil 2: Umwelanforderungen [3]	13
1.4.2	RTCA DO-160G Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment [15]	14
1.4.3	United Nations: ST/SG/AC.10/Rev.6/38.3 Transport of Dangerous Goods [6]	14
1.4.4	UNECE L87/1 Regelung Nr. 100 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) [2015/505] [4]	15
1.4.5	Übersicht mechanischer Belastungstests für (elektrische) Komponenten des Automotive Sektors und ähnlich relevante Normen	15
2	MESSUNGEN	17
<hr/>		
2.1	Schwingungs- und Schocktests am Prüfstand	17
2.2	Batteriearchitektur	19
2.3	Spektralanalyse eines gedämpften und eines nichtgedämpften 2s46p Batteriemoduls	20
2.3.1	Prüfkörper Aufbau	20
2.3.2	Spektralanalyse eines 2s46p Modul ohne Dämpfer	22
2.3.3	Spektralanalyse eines 2s46p Modul mit Dämpfungselementen	27
2.4	Messung realer Schwingungen an Traktionsbatterie	32
2.4.1	Elektrisches Testfahrzeug	33

Inhaltsverzeichnis

2.4.2	Sensorpositionen am Fahrzeug	34
2.4.3	Messfahrten auf Testgelände	35
2.5	Messdatenauswertung	36
2.5.1	Analyse der Rohdaten im Zeitbereich	37
2.5.2	Analyse der signifikanten Frequenzbereiche	39
2.5.3	Analyse mittels RMS Absolutwerten im Frequenzbereich	41
2.5.4	Auswertung des kumulierten Energieeintrages	43
2.5.5	Analyse der Übertragungsfunktionen	46
2.5.6	Auswertung mittels Terzbandfilter	48
3	VIBRATIONSLEBENSDAUER BERECHNUNG	53
3.1	Durchschnittliche Fahrzeugnutzung	53
3.1.1	Geschwindigkeitsanteile	54
3.1.2	Fahrbahnanteile	55
3.2	Profilerstellung für Schwingungsprüfstand	56
3.3	Erprobung des VILEP Profils	60
3.3.1	Vorgehen	60
3.3.2	Schwingungsprüfstand	61
3.3.3	Prüfaufbau und Durchführung	62
3.3.4	Testergebnis der Erprobung	63
4	ZUSAMMENFASSUNG	66
4.1	Zusammenfassung aller Kapitel	66
4.1.1	Ergebnis Literaturrecherche	66
4.1.2	Ergebnis Spektraluntersuchung eines 2s46p Modules	67
4.1.3	Ergebnis Schwingungsdämpfer	67
4.1.4	Ergebnis Schwingungsmessung an einem BEV	67
4.1.5	Ergebnis VILEP Profil Berechnung	68
4.1.6	Ergebnis des Lebensdauertests mit VILEP	69
4.2	Ausblick	69
5	REFERENZEN	70

APPENDIX

1

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1-1: Anzahl weltweit verkaufter Elektrofahrzeuge von 2012 bis 2016 [1]	1
1-2: μ CT Bilder einer a) Pouch Zelle und b) 18650 Rundzelle; grüne Bereiche entsprechen der Verformung durch Schwingungsanregung in z- Richtung, der Ausgangszustand ist in weiß dargestellt [5]	3
1-3: Beschädigte Zellstruktur durch 300 Schocks in z- Achse nach Test UN38.3 T4 [5] [6]	3
1-4: Logarithmisch vereinfachtes Betriebsfestigkeitsdiagramm [9]	5
1-5: Bauteillebensdauer: Vom Neuzustand durch Rissbildung zum Materialbruch [10]	5
1-6: Elektrisches Ersatzmodell einer Batteriezelle in Leer- und Lastschaltung	7
1-7: Nominative Kapazitäts- und Innenwiderstandsabhängigkeit zur äquivalenten Anzahl an Vollzyklen und SOC Lade-/Entladebereichen an einer Sanyo UR18650E Zelle [12]	9
1-8: Gebräuchliche Zellformen von Lithium-Ion-Batterien nach Wickeltyp [13]	10
1-9: Prismatische Zelle für BEV Anwendung, Samsung SDI 94AH [14]	10
1-10: Aufbau einer Pouch Zelle [25]	11
1-11: Aufbau einer zylindrischen Zelle [25]	11
1-12: Stochastisch verteiltes Breitbandrauschen und sinusförmige Anregung	12
1-13: Vergleich der wichtigsten internationalen Norm-Vibrationsprofile	16
2-1: RMS 10kN Schwingungsprüfstand SW2-1240APP	17
2-2: Prinzipieller Aufbau und Einbaulage der untersuchten Traktionsbatterie auf Lithium-Ion Rundzellenbasis	19
2-3: 2s46p Prüfkörper Aufbau und Sensorpositionen	20
2-4: Adapter für Beschleunigungssensor zur Messung an 18650er Zellen	21
2-5: Dämpfungsvarianten des 2s46p Moduls: links Silentblockdämpfer, rechts Drahtseildämpfer	22
2-6: Auswirkung verschiedener Anregungsamplituden auf das Resonanzverhalten	23
2-7: Spektralanalyse Auswertung in z- Achse bei Sinusanregung 1g	24
2-8: Spektralanalyse Auswertung in y- Achse bei Sinusanregung 1g	25
2-9: Spektralanalyse Auswertung in x- Achse bei Sinusanregung 1g	25
2-10: Vergleich repräsentativer Messsignale in x, y und z bei 1g Sinusanregung	26
2-11: Prüfaufbau mit Dämpfungselementen: Links Silentblockdämpfer, rechts Drahtseildämpfer	27
2-12: Spektralanalyse Auswertung in z- Achse bei Sinusanregung und Silentblockdämpfung	27
2-13: Spektralanalyse Auswertung in z- Achse bei Sinusanregung und Drahtseildämpfung	28
2-14: Wirkung der Dämpfer in z- Achse bei Sinusanregung auf Position G Hollowblock	28
2-15: Wirkung der Dämpfer in y- Achse bei Sinusanregung auf Position K Sammelkontakt	29
2-16: Wirkung der Dämpfer in x- Achse bei Sinusanregung auf Position R Seite links unten	29
2-17: Wirkung der Dämpfer in z- Achse bei 20g Schockbeanspruchung, Position G Hollowblock	30
2-18: Wirkung der Dämpfer in y- Achse bei 20g Schockbeanspruchung, Position K Sammelkontakt	31
2-19: Wirkung der Dämpfer in x- Achse bei 20g Schockbeanspruchung, Position R Seite links unten	31
2-20: Vibrationsmessungen an verschiedenen BEV in z- Richtung [18]	32
2-21: Schwingungsmessung an verschiedenen Fahrzeugpositionen [19]	32

2-22: Testfahrzeug: Elektrischer Audi A2	33
2-23: Mit Beschleunigungssensoren bestückte Traktionsbatterie des Testfahrzeuges	34
2-24: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Domlager in x	37
2-25: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Batteriemodul in x	37
2-26: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Domlager in y	38
2-27: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Batteriemodul in y	38
2-28: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Domlager in z	38
2-29: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Batteriemodul in z	39
2-30: Vergleich: Beschleunigungsmessungen am Batterierahmen rechts (BRR) in z- Richtung	39
2-31: PSD Verteilung bei 50km/h auf groben Asphalt	40
2-32: PSD Verteilung bei 70km/h auf feinem Kopfsteinpflaster	40
2-33: Kumulierter Energieeintrag bei verschiedenen Messfahrten	44
2-34: Kumulierter PSD Verlauf am Batterierahmen bei 90km/h und feinem Kopfsteinpflaster	45
2-35: Prozentualer Anteil an umgesetzter Energie auf Frequenzen bezogen	45
2-36: Übertragungsfunktionen bei 70km/h und feinem Kopfsteinpflaster bezogen auf Domlager in x	47
2-37: Übertragungsfunktionen bei 70km/h und feinem Kopfsteinpflaster bezogen auf Domlager in y	47
2-38: Übertragungsfunktionen bei 70km/h und feinem Kopfsteinpflaster bezogen auf Domlager in z	48
2-39: Auswertung mittels Terzbandfilter am Batterierahmen bei 90km/h und feinem Kopfsteinpflaster	49
2-40: RMS Profile aus Terzbandfilterung in einzelne Achsen und kombiniert bei 90km/ FKP	49
2-41: PSD Profil von 5-2000Hz des Batterierahmensensors bei 90km/h auf feinem Kopfsteinpflaster	50
2-42: Kombinierte PSD Kurven bei 90km/h auf Kopfsteinpflaster in z, Feinasphalt und geglättet	51
3-1: Prozentualer Geschwindigkeitsanteil aus E-Fahrzeug Flottenversuchen des Karlsruhe Institut für Technologie 2014 [22]	54
3-2: Aufteilung der Geschwindigkeitsanteile bei durchschnittlicher Fahrzeuglebensdauer	55
3-3: Vibrationslebensdauerprofil (VILEP) im Vergleich	59
3-4: m+p Schwingungserreger Software, Prüflauf Durchführung und Überwachung	61
3-5: Prüfkörper Aufbau: 3x 1s46p Module mit verstärkter Halterung	62
3-6: Prüfstands Aufbau mit gekoppelten Schwingtisch, Module ausgerichtet in x- Richtung	62

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Zelltypen nach Bauart und Verwendungsgebiete	10
Tabelle 2: Übersicht technisch relevanter Vibrationsprüfungen für Traktionsbatterien	15
Tabelle 3: Fahrzeugspezifikationen des Testfahrzeuges	34
Tabelle 4: Sensorbezeichnungen und Positionen	35
Tabelle 5: Testfahrten bei unterschiedlichen Fahrprofilen	36
Tabelle 6: Auftretende PSD Größen am rechten Domlager DLR in x, y und z	41
Tabelle 7: PSD Werte an allen Sensoren und Dämpfungsfaktor bei 70km/h auf feinem Kopfsteinpflaster	42
Tabelle 8: PSD Werte an allen Sensoren und Dämpfungsfaktor bei 70km/h und feinem Asphalt	43
Tabelle 9: PSD Werte an allen Sensoren und Dämpfungsfaktor bei 30km/h und feinem Kopfsteinpflaster	43
Tabelle 10: Kumulierte PSD Werte am Batterierahmen	45
Tabelle 11: Terzbandfilterung: Spektrale Leistungsdichten	51
Tabelle 12: Britische Fahrbahnanteile über 100 000 Meilen [23]	55
Tabelle 13: Berechnung und Verteilung des energetischen Schwingungseintrages nach Fahrbahnanteile	56
Tabelle 14: Berechnung und Verteilung des energetischen Schwingungseintrages nach Geschwindigkeit	57
Tabelle 15: Reduzierte Fahrzeuglebensdauer bei Dauerfahrt mit 90km/h auf Kopfsteinpflaster	57
Tabelle 16: Berechnung eines Schwingungsprüfprofils für Traktionsbatterielebensdauer	58
Tabelle 17: VILEP- PSD Profil für Schwingungsprüfstand	58
Tabelle 18: Innenwiderstandsänderung durch VILEP Profil	65

TERMINOLOGIE

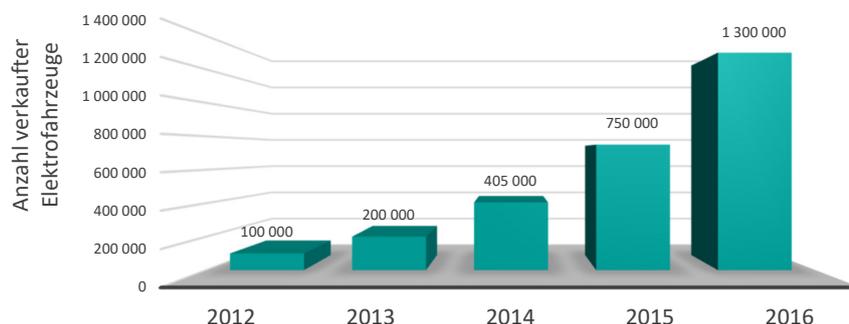
Batteriezelle, Zelle:	Kleinste Einheit eines elektrochemischen Energiespeichers auf galvanischer Basis
Primärzelle:	Elektrische Energie wird nur einmalig von chemisch gebundener in elektrische Energie umgewandelt, als typisch anzuführen sind hier „Wegwerfbatterien“ wie Alkaline AA, Knopfzellen, etc.
Sekundärzelle, Akku:	Die Umwandlung von chemischer in elektrische Energie (Entladen) kann auch umgekehrt ablaufen (Laden). In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird ausschließlich dieser Zelltyp behandelt
Batteriemodul:	mehrere Batteriezellen parallel und/oder seriell verschalten als kompakter Bestandteil des Batteriepacks
Batteriepack:	Mehrere, zusammengeschaltene Batteriemodulen
Traktionsbatterie:	Batteriepack für mobile Anwendungsfälle, typischer Einsatz für Pkw, Lkw, einspurige Kfz, Schienenfahrzeuge und Luftfahrzeuge
18650- Zelle, Consumer Zelle:	Zylinderförmige Lithium-Ion Batteriezelle (auch als Rundzelle bezeichnet) mit 18mm Außendurchmesser und 65mm Länge. Wird sehr häufig in der Consumer Elektronik eingesetzt (Akkuschrauber, Notebooks, Power Packs, Taschenlampen, tragbare Staubsauger, ...)
21700- Zelle:	Zylinderförmige Lithium-Ion Batteriezelle mit 21mm Außendurchmesser und 70mm Länge
SOC, State of Charge:	aktueller Ladezustand einer Batterie, abhängig vom vollgeladenen Zustand in %
DOD, Depth of Discharge:	Entlademenge einer Batterie in %, das Entladen von 80% auf 30% SOC ergibt einen DOD von 50%
SOH, State of Health:	„Gesundheitszustand“ einer Zelle, üblicherweise die durch Alterung verringerte Maximalkapazität in Relation zur Ausgangskapazität beim Ersteinsatz
OCV, Open Circuit Voltage:	Leerlaufspannung, bezeichnet die Spannung zwischen den Elektroden einer Batteriezelle, wenn kein Strom fließt
BEV:	Battery Electric Vehicle, Fahrzeug mit reinem Antrieb durch eine Traktionsbatterie

1 EINLEITUNG

Das Ziel dieser Masterarbeit besteht darin, die im Fahrbetrieb auftretenden Schwingungen auf Traktionsbatterien zu evaluieren und daraus ein Prüfprofil zu generieren, mit welchem mechanische Schäden auf Bauteilebene sowie elektrochemische Schäden auf Zellebene am Schwingungsprüfstand getestet werden können. Für ein besseres Verständnis des Schwingungsverhalten von Batteriemodule wurden solche im Fahrzeug und am Prüfstand mittels Spektralanalyse untersucht. Darüber hinaus wurde untersucht, wie sich das Schwingungsverhalten durch diverse Dämpfungselemente ändert. Das übergeordnete Ziel beinhaltet auch weitere Themengebiete, welche zum Zwecke der wissenschaftlichen Nachvollziehbarkeit bzw. als Argumentationsgrundlage zusätzlich angeschnitten werden. Diese Masterarbeit umfasst deswegen einzelne Kapitel aus den Bereichen der Fahrzeugtechnik, Schwingungslehre, Festigkeitslehre und Grundlagen elektrochemischer Energiespeicher sowie Referenzen und Analysen von bereits bestehenden Normen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen.

1.1 Motivation

Elektrofahrzeuge werden zunehmend ein fixer Bestandteil des täglichen Lebens, alleine in den letzten Jahren (2012 bis 2016) haben sich die weltweiten Fahrzeugzulassungen jährlich nahezu verdoppelt [1], siehe Abbildung 1-1. Die Thematik der E-Mobilität nimmt einen immer größer werdenden Anteil in den Print- und Onlinemedien ein und ist mittlerweile auch ein ständig diskutiertes Thema in der Politik, in Unternehmen und bei Privatpersonen. Das progressiv wachsende Umweltbewusstsein sowie die



1-1: Anzahl weltweit verkaufter Elektrofahrzeuge von 2012 bis 2016 [1]

Aufgeschlossenheit für umweltschonendere Elektrofahrzeuge (nach Ökobilanz alternativer Antriebe, Umweltbundesamt 2016 [2]) macht sich nicht nur bei Konsumenten bemerkbar, sondern auch bei OEMs, Energiekonzernen und in der Politik. Miteinhergehend mit dieser Entwicklung steigt auch gleichzeitig die Nachfrage nach höherer Leistung und höherer Reichweite, wodurch die Leistungs- und Energiedichten der Traktionsbatterien zwangsläufig steigen. Mit diesem Trend wird der

Fokus seitens der Automobilhersteller und Zulieferer auch zunehmend auf die Sicherheit von Traktionsbatterien gelegt. Diese beinhaltet eine Vielzahl an elektrochemischen, chemischen, mechanischen, elektrischen und physikalischen Tests. Zusätzlich müssen Traktionsbatterien gezielter Zerstörung bei sogenannten Misuse Fällen (Verhalten der Batterie bei Unfällen, Überladung, Feuer, ..) standhalten. Derzeit führen zertifizierte Prüfinstitute schon einen großen Teil dieser Prüfungen durch, um die Zelle sicherheitstechnisch zu verbessern. Bei Assemblierung der Zellen zum Batteriepack rücken jedoch andere Prüfungen in den Vordergrund welche darauf abzielen, das Batteriepack als Gesamtsystem zu testen. In diese Kategorie fallen nicht nur die vorhin genannten Sicherheitstests, sondern zusätzlich für Traktionsbatterien die Prüfanforderungen für Kraftfahrzeuge bzw. auch Flugzeuge. Als Beispiel für diese Prüfungen sind Vibrationsprüfungen, Brandtests, Kurzschluss-tests, Betauungstests, Salzsprüh-tests, Crashtests und gezielter Zellenbrand zu nennen [3] [4].

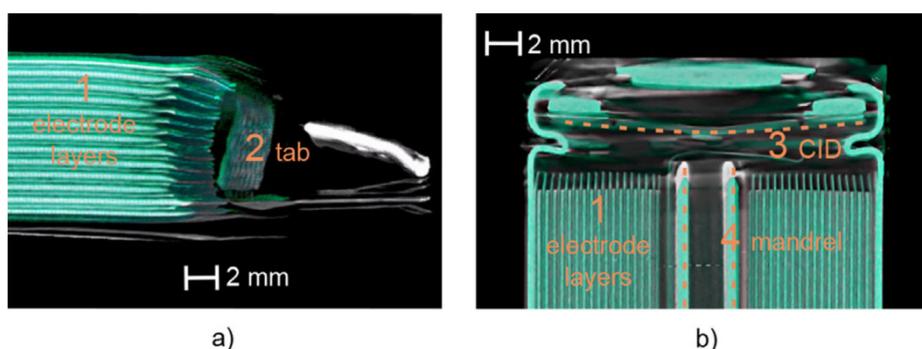
Ziel bei der Entwicklung einer Traktionsbatterie ist es, dass sie bis zum Ende der Lebensdauer mechanisch betrachtet intakt bleibt und der Kapazitätsverlust der Zellen so gering wie möglich gehalten wird. Minimiert man den Kapazitätsverlust einer Batterie, steigen damit die möglichen Lade- und Entladezyklen. Auf diese Weise verbessert sich die CO₂ Bilanz eines Elektrofahrzeuges erheblich. Um das Erreichen dieser Ziele zu gewährleisten, wird mit dieser Masterarbeit ein Teilbereich des „Gesamtsystems Batterie“ untersucht, welcher für konstruktive Verbesserungen bereits in der Vorentwicklung einer Batterie als wesentlicher Bestandteil herangezogen werden kann.

1.1.1 Potentielle Auswirkungen von Schwingungen

Jede technische Maschine, in der sich bewegende oder drehende Bauteile befinden, ist während des Betriebes Schwingungen ausgesetzt. Bei Fahrzeugen werden diese von den Rädern über die Radaufhängung (Feder und Stoßdämpfer) auf die Karosserie bis hin zur am Steuer sitzenden Person übertragen. Die Beschaffenheit der Fahrbahn, Fahrzeuggeschwindigkeit, die verwendeten Reifen, Stoßdämpfer, Federn, die Fahrzeugmasse und die Karosseriestruktur sind die wichtigsten Parameter, welche die Stärke der Vibrationsübertragung bestimmen. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschine kommt die zusätzliche Vibrationsquelle des Verbrennungsmotors hinzu, wobei die verursachten Schwingungen aufgrund der periodisch gleichen Anregung durch die zyklischen Verbrennungsstöße oft einer sinusförmigen Anregung entsprechen. Zusammenfassend sind diese Schwingungen, aufgrund ihrer Überlagerung, einem Rauschsignal ähnlich. Schwingungen können sich nicht nur bauteilschädigend auswirken, sie sind auch ein wichtiger Faktor für das Wohlbefinden von Menschen.

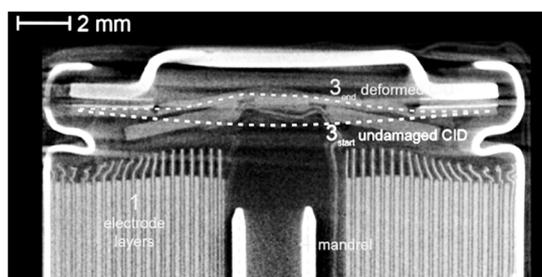
1.1.2 Potentielle Schäden an Zellen und Traktionsbatterie durch Vibration

Vibrationen und mech. Schocks dringen bis in das Innerste von Batteriezellen vor und können im Extremfall zu Verformungen der Zellstruktur führen, siehe Abbildung 1-2 und Abbildung 1-3. Optisch von außen nicht wahrnehmbar, kann dadurch der Zelleninnenwiderstand steigen, wodurch die Batterie höheren Temperaturen ausgesetzt ist. Erhöhte Zelltemperatur ist einer der Hauptparameter neben Umgebungstemperatur, Lade-/Entladezyklen und Lade-/Entladestrom welche Alterungseffekte in einer Sekundärzelle beschleunigen.



1-2: μ CT Bilder einer a) Pouch Zelle und b) 18650 Rundzelle; grüne Bereiche entsprechen der Verformung durch Schwingungsanregung in z- Richtung, der Ausgangszustand ist in weiß dargestellt [5]

Konkret verringert sich der State of Health Wert SOH (aktuelle max. Batteriekapazität im Vergleich zum Neuzustand) durch Zellalterung schneller als normal, woraus sich weniger nutzbare Ladezyklen ergeben. Weiters können Risse an den geschweißten Zellkontaktierungen auftreten und ebenfalls zu denselben, negativen Effekten führen [5]. Betriebsschwingungen können nicht nur zu mechanischen Brüchen führen, sie lassen auch Elastomere wie Dichtungen und Dämpfer vorzeitig altern. Dabei kann es vorkommen, dass die Dichtheit nicht mehr aufrechterhalten werden kann bzw. auch dämpfende Eigenschaften schneller verloren gehen können.



1-3: Beschädigte Zellstruktur durch 300 Schocks in z- Achse nach Test UN38.3 T4 [5] [6]

Untersuchungen belegen, dass der Innenwiderstand der Zellen durch Vibrationen und Schocks nach UN38.3 [6] Tests tendenziell steigt und ein messbarer Kapazitätsverlust eintritt [5]. Diese Tendenz ist für reale Schwingungsbeanspruchung über Lebensdauer auf aktuelle Lithium-Ion Batterien übertragbar. Die jeweiligen Batterietypen werden später in Kapitel 1.3.4 beschrieben.

Besonders empfindlich wirken sich Schwingungen und Schocks in Richtung der Elektroden Layer aus, da in dieser Richtung weniger Kräfte aufgenommen werden können. Kräfte, welche normal zur Elektrodenschicht einwirken, werden etwas besser aufgenommen.

1.2 Vorgehensweise

Um das Ziel der Masterarbeit zu erreichen, wurde wie folgt vorgegangen:

- 1) Erarbeiten der wichtigsten Einflussgrößen sowie Grundlagen für die Auswirkungen von mech. Schwingungen auf Traktionsbatterien
- 2) Zusammentragen und analysieren sämtlicher relevanter Normen und Norm- Vibrationsprofile
- 3) Prüfstandsarbeit: Spektralanalysen einzelner Batteriemodule, um die Resonanzcharakteristik der Batteriemodule festzustellen und um eine Aussage zu treffen, wie viel Schwingungsenergie auf die Batteriezelle übertragen wird
- 4) Im Anschluss an die Spektralanalyse wird untersucht, welche Möglichkeiten es gibt den Schwingungsenergieeintrag durch Dämpfungselemente zu reduzieren
- 5) Ermitteln von tatsächlich auftretenden Schwingungen an einer Traktionsbatterie eines Elektrofahrzeugs mit heckseitig liegender Traktionsbatterie auf verschiedenen Fahrbahnen bei definierten Geschwindigkeiten
- 6) Messdatenauswertung: Analyse der Schwingungsübertragung auf die Traktionsbatterie und Analyse der auftretenden Beschleunigungen an den einzelnen Sensorpositionen
- 7) Erstellung eines Berechnungsprozesses zur Generierung eines Prüfstands-Schwingungsprofil zur Lebensdauersimulation
- 8) Am Schwingungsprüfstand: Erprobung des Lebensdauerprofils an mehreren Batteriemodulen

1.3 Theoretische Grundlagen

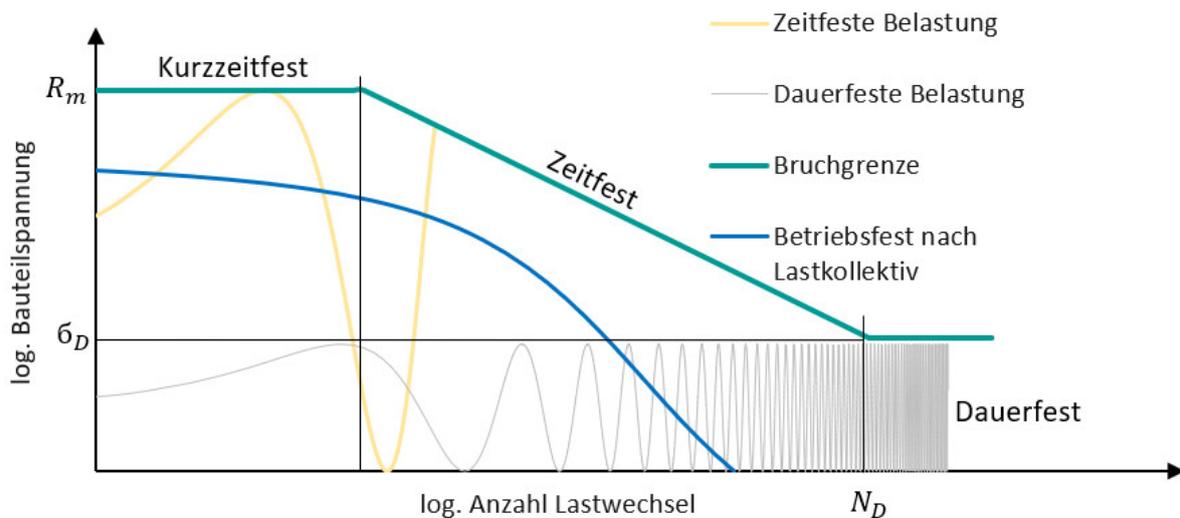
1.3.1 Betriebsfestigkeit Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Mechanismen und Auswirkungen mechanischer Schwingungen erklärt. Es gilt: Je mehr man über die Ursache eines Problems weiß, desto nachhaltiger fällt die Lösung aus. (Vibrations-) Schwingungen sind alterierende Krafteinwirkungen, welche mit einem zeitlichen Abstand auf ein Bauteil wirken.

Bis ca. 1870 kam es im laufenden Betrieb von mechanischen Maschinen immer wieder zu plötzlichen Brüchen von Bauteilen, obwohl diese umfangreich auf die betriebliche Festigkeit ausgelegt und getestet wurden [7].

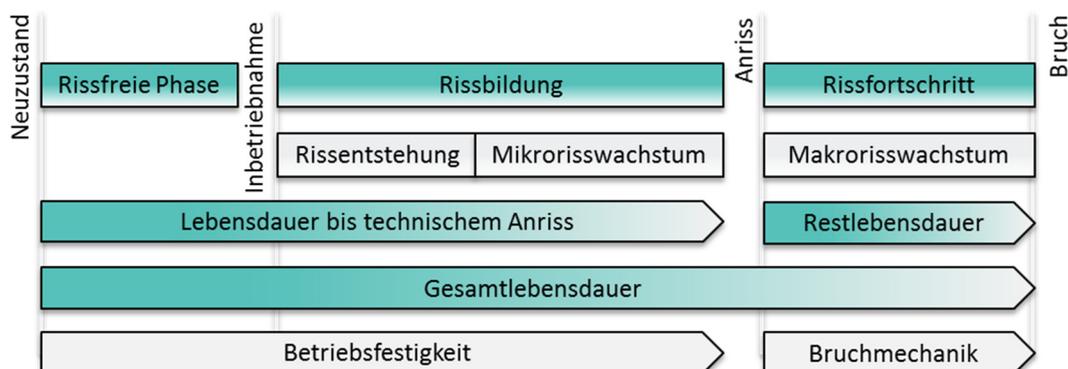
Einleitung

Der Ingenieur August Wöhler fand die Ursache des Bauteilversagens in den Lastwechseln begründet, welche im laufenden Betrieb auftreten und eine Materialermüdung hervorrufen [8]. Abhängig von Lastgröße, Lastwechselanzahl und Bauteilkennwerten kann seither jedes Bauteil ausgelegt und geprüft werden, um einen sicheren Betrieb über die Produktlebensdauer zu gewährleisten. Diesen Zeitpunkt zu kennen ist ein äußerst wichtiger Bestandteil in jeder Entwicklungsabteilung, um qualitativ hochwertige Produkte herzustellen und die Sicherheit von Personen zu gewährleisten. Abbildung 1-4 zeigt eine repräsentative Wöhlerkurve. Befindet sich ein Bauteil während des Betriebs innerhalb des zeitfesten Bereichs, so kommt es nach einer gewissen Anzahl von Lastwechseln zum Bauteilversagen.



1-4: Logarithmisch vereinfachtes Betriebsfestigkeitsdiagramm [9]

Die Bruchgrenze kennzeichnet die statistisch nach Gauß verteilte Grenzkurve, bei welcher Bauteilbrüche auftreten. Wenige, jedoch starke Belastungen führen zu einem früheren Bruch. Wird ein Bauteil hingegen nur geringen Belastungen ausgesetzt, welche unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze σ_D liegen, tritt auch bei hohem Lastwechselanteil kein Bauteilversagen auf. In Abbildung 1-5 sind die einzelnen Phasen der Gesamtlebensdauer eines Bauteils beschrieben.



1-5: Bauteillebensdauer: Vom Neuzustand durch Rissbildung zum Materialbruch [10]

Die mögliche Schwingenspielzahl N bei gegebener Spannungsamplitude σ_a lässt sich durch Gleichung 1.1 beschreiben, wobei der Exponent k (Wöhlerexponent) die Steigung der Geraden im zeitfesten Bereich charakterisiert welche aus der doppelt logarithmischen Darstellung der statistischen Bruchgrenze aus dem Betriebsfestigkeitsdiagramm ersichtlich ist.

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_D} \right)^{-k} * N_D \quad (1.1)$$

Verschiedene Belastungsarten akkumuliert ergeben ein Lastkollektiv, durch welches Bauteile auf die benötigte Lebensdauer mittels Palmgren-Miner-Regel (Gleichung 1.2), oder einer Modifikation jener, ausgelegt werden können. Ein Belastungsniveau bildet eine Stufe. Die Gesamtschadensumme D errechnet sich durch die Summenteile von m Stufen abhängig von der Stufenhäufigkeit h_i und der ertragbaren Schwingenspielzahl N_i .

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{N_i} = \sum_{i=1}^m D_i \quad (1.2)$$

Die im Wöhler Schaubild kennzeichnende Bruchgrenze ist jene statistisch, logarithmische Schwingenspielgrenze $\log N_{50}$, welche den Mittelwert aus den summierten Bruchschwingzahlen N_{Bruch} und der Prüflingsanzahl p , ersichtlich in Gleichung 1.3, bilden.

$$\log N_{50} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \log N_{Bruch} \quad (1.3)$$

Aus den logarithmischen Schwingenspielzahlen berechnet sich die Standardabweichung s wie folgt:

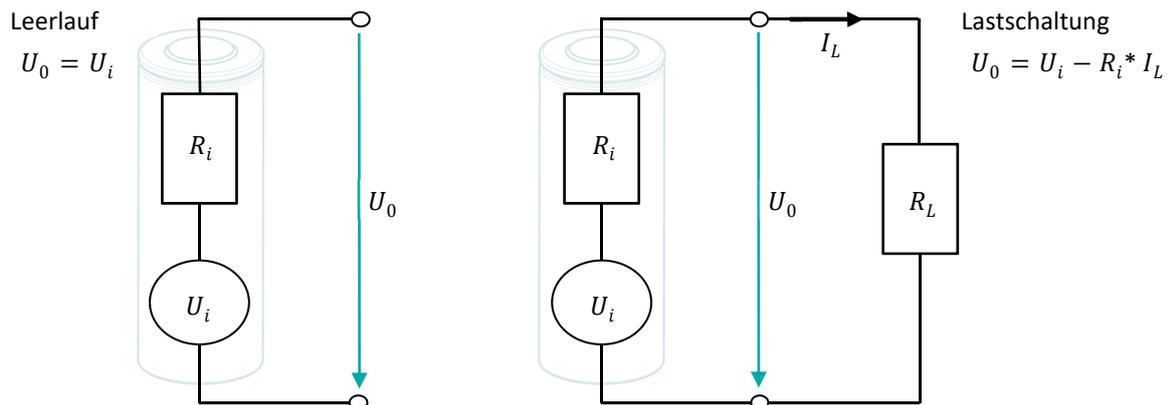
$$s = \sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (\log N_{Bruch} - \log N_{50})^2} \quad (1.4)$$

1.3.2 Batteriezelle als elektrisches Ersatzmodell

Für die Untersuchung von Dauerfestigkeit von Batteriezellen ist nicht nur mechanische Immission relevant, sondern vor allem die chemisch-elektrischen Veränderungen in einer Zelle. Diese Größen werden hier kurz erklärt, da diese für die Messung von Schwingungsschäden einer der wichtigsten Indikatoren darstellen.

Eine handelsübliche Batteriezelle lässt sich als vereinfachtes elektrisches Ersatzmodell (Abbildung 1-6), bestehend aus einer Gleichstromspannungsquelle U_i und dem zugehörigen Innenwiderstand R_i , betrachten. Prinzipiell ist zwischen Leerlauf-, Kurzschluss- und Lastschaltung zu unterscheiden.

Einleitung



1-6: Elektrisches Ersatzmodell einer Batteriezelle in Leer- und Lastschaltung

Basierend auf dem Ohm'schen Gesetz (Formel 1.5) ist erkennbar, dass im Leerlauf der Strom $I_L = 0$ sein muss nachdem der Widerstand R (bei einer Batteriezelle wäre das der Weg durch die Luft zwischen positiver und negativer Elektrode) gleich unendlich ist.

$$U = R \cdot I \quad (1.5)$$

Wird eine Last an die Gleichspannungsquelle angeschlossen wie z.B. eine Glühlampe oder ein Heizdraht, so stellt sich die Leistung in Abhängigkeit der Größe des Lastwiderstands ein. Ist hingegen der Lastwiderstand vernachlässigbar klein, spricht man vom Kurzschluss mit dem Kurzschlussstrom I_K welcher hohe, zellschädigende Größen annehmen kann. In diesem Fall geht die Spannung gegen null und der gesamte Kurzschlussstrom fließt über den Innenwiderstand R_i , dadurch wird die elektrochemisch gespeicherte Energie noch in der Zelle innerhalb kurzer Zeit in thermische Energie umgewandelt, weswegen die Zelle irreparabel geschädigt werden kann. Je höher der SOC Wert der Batteriezelle wird, umso höher das Risiko eines Thermal Runaway.

1.3.2.1 Thermal Runaway

Thermal Runaway (thermisches Durchgehen) bezeichnet eine chemisch exotherme Reaktion einer Batteriezelle. Dieser Fall kann bei SOC größer Null und (hohen) Wärmeeintrag eintreten [11]. Im schlimmsten Fall kann dieser auch durch Vibrationen oder Schocks verursacht werden, deswegen werden die Zusammenhänge genauer erklärt. Ab 70° bis 80°C Zelltemperatur beginnen tiefsiedende Elektrolytbestandteile zu verdampfen, dies führt zum inneren Druckaufbau. Ein Sicherheitsventil öffnet ab einem bestimmten Innendruck (z.B. 30bar), durch welches die Elektrolytdämpfe entweichen. Das Sicherheitsventil liegt bei einer 18650 Zelle meist am Pluspol, kann aber auch ein zusätzliches am Minuspol besitzen. Pouchzellen verfügen über kein Sicherheitsventil. Durch den Mangel an Elektrolyt steigt der Innenwiderstand in der Zelle stark an. Die meisten Zellen verfügen über ein Current Interrupting Device (CID), welches im Falle eines Kurzschlusses den Zellwickel elektrisch von dem Zellgehäuse trennt. Bei fehlendem bzw. fehlerhaften CID führt ein Kurzschluss zu schnell ansteigenden Zelltemperaturen. Erreicht eine typische Lithium-Ion Zelle durch Wärmezufuhr von innen oder von

außen eine Temperatur von ca. 140°C, kommt es zum thermischen Durchgehen. Die Separatorschichten auf Polymerbasis schmelzen, es kommt zu direktem Kontakt der Elektrodenschichten. Durch den hohen Temperaturanstieg und die daraus gesteigerte Reaktionsfähigkeit der Zellbestandteile folgt eine Selbstentzündung der Zelle. Angeordnet in einem Batteriemodul oder Batteriepack kann eine thermisch durchgehende Zelle auf benachbarte Zellen übergreifen. Diesem Ernstfall ist durch konstruktive Auslegung und (zellinterne) Sicherheitseinrichtungen vorzubeugen.

Thermisches Durchgehen kann durch folgende Szenarien eintreten:

- Innerer Kurzschluss:
 - mechanische Fremdeinwirkung
 - Produktions- und Fertigungsfehler
 - Dendritenbildung: Durch fortgeschrittene Alterung und hohe Ladeströme entstehen Kristalle, welche den Separator durchstechen und zum Kurzschluss führen können
- Hohe Umgebungstemperaturen (Elektrolyt vergast, Separator schmilzt)
- Unzureichende Temperaturüberwachung
- Fehler in dem Batteriemanagementsystem (zu hohe Ladeströme, Überladen)

1.3.3 Innenwiderstand: Verhalten in der Zelle

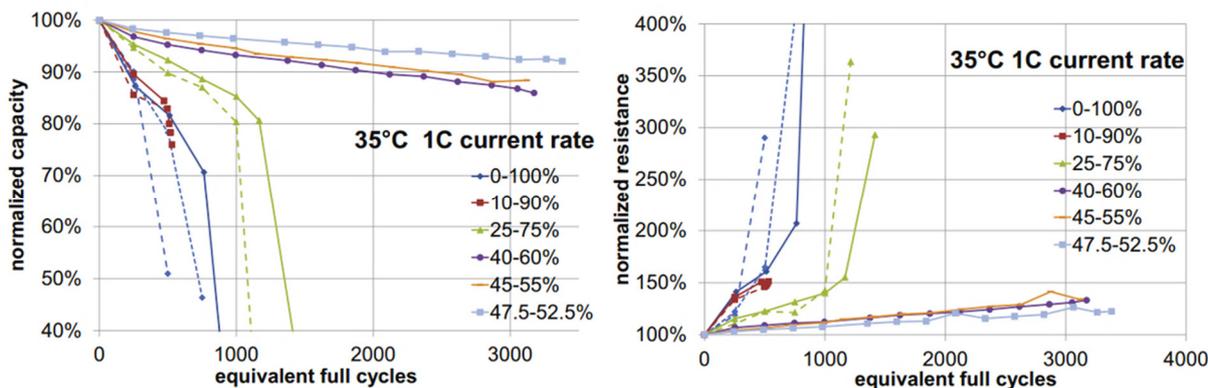
Der Innenwiderstand wird oft als Qualitätskriterium einer Zelle herangezogen. Während eines Ladungswechsels ist der Innenwiderstand von Temperatur und SOC abhängig. Mit Temperaturen außerhalb von 5° bis 40°C und sinkendem SOC nimmt der Innenwiderstand einer Lithium-Ion Batteriezelle signifikant zu, die Zelle selbst produziert in diesem Zustand mehr Wärme. Die elektrische Wirkleistung P_{elektr} berechnet sich wie folgt aus Spannung und Strom bzw. durch Strom und bekanntem Widerstand:

$$P_{elektr} = U * I \quad (1.6)$$

$$P_{elektr} = R * I^2 \quad (1.7)$$

Der Innenwiderstand ist der begrenzende Faktor, der die max. Leistungsabgabe einer Zelle bestimmt und somit auch das Maß des Zellwirkungsgrades bestimmt. Mittels Messung des Innenwiderstands kann eine eventuelle Fehlfunktion im Inneren einer Zelle festgestellt werden. Abbildung 1-7 zeigt den Zusammenhang zwischen Innenwiderstand, Kapazität und Zyklenzahl abhängig von verschiedenen Ladeniveaus am Beispiel einer Sanyo UR18650E Zelle [12].

Einleitung



1-7: Nominative Kapazitäts- und Innenwiderstandsabhängigkeit zur äquivalenten Anzahl an Vollzyklen und SOC Lade-/Entladebereichen an einer Sanyo UR18650E Zelle [12]

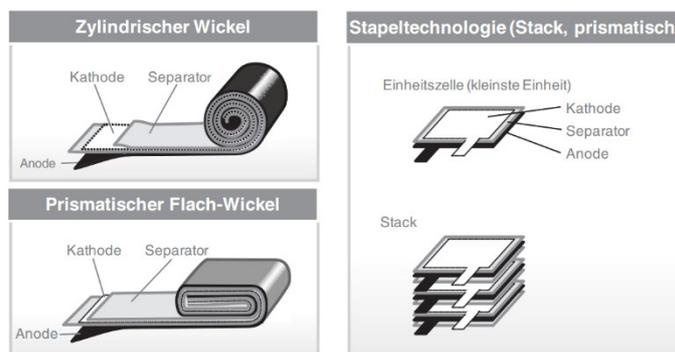
Es zeigt sich, dass Innenwiderstand und Kapazitätsverlust korrelieren, die Kapazität sinkt aufgrund von Alterungseffekten welche zu einer Erhöhung des Innenwiderstands führen. Zusätzlich ist erkennbar, dass der Grad der Alterung sehr stark von den Lade- und Entladeniveaus bei verschiedenen SOC Zuständen abhängt. Die Messung bzw. Berechnung des Innenwiderstandes einer Zelle kann mit Formel 1.8 erfolgen oder mittels spezieller Messgeräte direkt ermittelt werden. Ist der Lastwiderstand R_L bekannt, kommt nachfolgende Gleichung zur Anwendung.

$$\text{mit } I_L = \frac{R_L}{U_L} \quad R_i = \frac{U_o - U_L}{I_L} = R_L \frac{U_o - U_L}{U_L} \quad (1.8)$$

Im Rahmen der Untersuchung von Schwingungen auf Traktionsbatterien dient die Innenwiderstandsdifferenz vor und nach einer Schwingungsexposition als erfassbarer Parameter für eine Klassifizierung der Zellschädigung.

1.3.4 Ausführungen von Lithium-Ionen-Batterien

Als Stand der Technik bei Traktionsbatterien haben sich bei Fahrzeugherstellern Akkus auf Lithium-Ion Basis in drei verschiedenen Ausführung etabliert. Jede Bauform besitzt spezifische Vor- und Nachteile, eine „bessere Zelle“ gibt es zur Zeit nicht. Dies ist der Grund warum alle drei Typen in Elektrofahrzeugen zur Anwendung kommen. Ein eindeutiger Trend, welcher Zelltyp sich langfristig durchsetzen wird, ist derzeit nicht auszumachen. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Zellbauformen in der Art wie die Elektroden- und Separatorfolien gewickelt werden und wie diese durch ein Gehäuse umgeben sind. Daraus resultieren die drei gebräuchlichsten Zellformen: zylindrisch, prismatisch oder gestapelt, verpackt in einem stabilen oder weichen Gehäuse, schematisch dargestellt in Abbildung 1-8.



1-8: Gebräuchliche Zellformen von Lithium-Ion-Batterien nach Wickeltyp [13]

Die Zellspannung beträgt bei Lithium-Ion Technologie nominal 3,6 Volt (unabhängig von der Zellbauform), die Fläche der eingesetzten Elektroden sowie die Menge an Lithium entscheidet hauptsächlich über die Kapazität der Zelle. In dieser Masterarbeit wird an 18650er Rundzellen gearbeitet, des besseren Verständnisses wegen wird auf die anderen Zelltypen kurz eingegangen, da die Forschungsergebnisse auch für die anderen Zelltypen relevant sein können [5]. Tabelle 1 gibt einen ersten Überblick über Zellformen und deren bevorzugte Einsatzgebiete.

Tabelle 1: Zelltypen nach Bauart und Verwendungsgebiete

	Zelltyp	Design	Consumer Einsatzgebiete	Automotive Einsatzgebiete
Hardcase	Rundzelle	Rundwickel	Laptop, Powertools, Elektrofahrräder, E-Zigaretten, Power Banks	Tesla Model S
	Prismatisch	Flachwickel	Mobiltelefon, Kamera	BMW i3, Mitsubishi i-MiEV
Softpack	Pouch	Flachwickel	Ultrabooks, E-Book reader	
	Pouch	Stapel-Zelle	Smartphone, MP3-Player	Renault Zoe, Jaguar I-Pace

1.3.4.1 Prismatische Zellen

Aktuell in Elektroautos verwendete flachgewickelte Lithium-Ion Zellen verfügen über den höchsten Energieinhalt pro Batteriezelle, jedoch nicht zwangsläufig über die höchste Energiedichte. Exemplarisch sei hier eine Batteriezelle von Samsung SDI mit 94 Ah Kapazität pro Zelle (Stand Juli 2017 [14]) erwähnt, welche im BMW i3 zum Einsatz kommt. Bei 2 kg Zellgewicht erreicht man eine Energiedichte von 47 Ah/kg. Flachgewickelte Sekundärzellen kommen auch im Consumer Bereich vor, natürlich mit weniger Kapazität. Niedriger



1-9: Prismatische Zelle für BEV Anwendung, Samsung SDI 94AH [14]

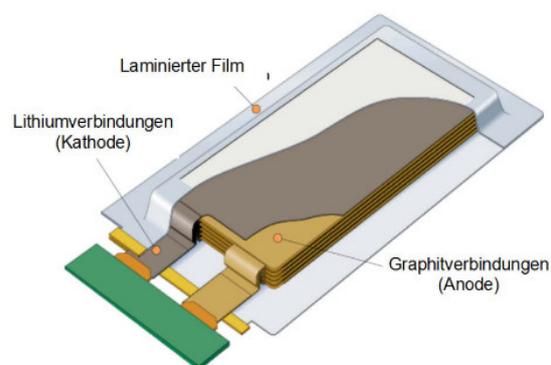
Kontaktierungswiderstand für den Einsatz als Traktionsbatterie ist als vorteilhaft einzustufen. Die größere Bauhöhe ist eher nachteilig anzusehen da, wird die Batterie unterhalb der Fahrgastzelle verbaut, die Fahrzeughöhe zunimmt und in Folge dessen sich der Luftwiderstand des Fahrzeuges

Einleitung

erhöht. Nachteilig an dieser Zellform ist, dass bei Beschädigung einer Zelle durch einen Unfall bzw. im Falle eines thermischen Durchgehens sehr viel Energie und eine dementsprechend große Menge an Elektrolytgas freigesetzt wird. Hingegen wird durch eine Verteilung auf mehrere kleine Zellen das Ansteckungspotenzial auf benachbarte Zellen verringert und die Ansteckungszeit verlängert. Das Gehäuse besteht üblicherweise aus Aluminium. In Bezug auf Wärmeleitfähigkeit lässt sich sagen, dass prismatische Zellen Wärme sehr gut in Axialrichtung des Wickels leiten, so werden existierende Zellen in BEVs beispielsweise durch Fahrtwindkühlung an der Unterseite gekühlt.

1.3.4.2 Pouch Zellen

Pouch Zellen haben den Vorteil der flexiblen Fertigung abhängig von den gewünschten Parametern. So kann die Zellkapazität relativ einfach durch Ändern der Layergrößen angepasst werden, was aus wirtschaftlicher Sicht bei einer entsprechend großen Zellstückzahl als sinnvoll zu erachten ist. Der Energieinhalt von 2 bis 140 Ah zeigt hier die große, mögliche Kapazitätsbandbreite welche mittels Pouch Zellen

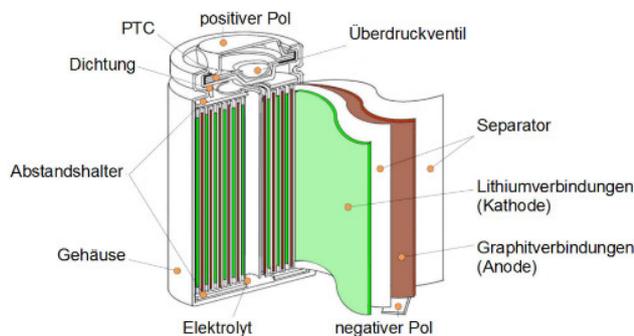


1-10: Aufbau einer Pouch Zelle [25]

erreichbar ist. Anzumerken ist hier das weiche Gehäuse, welches aus einer polymerbeschichteten Metallfolie (Aluminium) besteht und sich durch inneren Gasdruck, der bei übermäßigem Laden oder Entladen entsteht, zum Aufblähen neigt. Dieser Effekt macht konstruktiv aufwendigere Batteriesystemgehäuse notwendig, wodurch die an sich leichte Pouch Zelle im Gesamtsystem wieder an Gewicht zunimmt. Das hohe Oberfläche zu Volumen Verhältnis spricht für eine gute Kühlfähigkeit.

1.3.4.3 Rundzelle, zylindrische Zelle

Rundzellen zeichnen sich durch die hohe Packungsdichte, das stabile Gehäuse, Verlässlichkeit und günstigem Preis aufgrund bestehender Massenfertigung mehrerer Hersteller aus. Mit einem Energieinhalt von 2 bis 3,6 Ah (entspricht 8 bis 12 Wh) bei Typ 18650 müssen jedoch sehr viele dieser Zellen kontaktiert werden, (100kWh entspricht ca. 10 000 Zellen) um eine typisch geforderte



1-11: Aufbau einer zylindrischen Zelle [25]

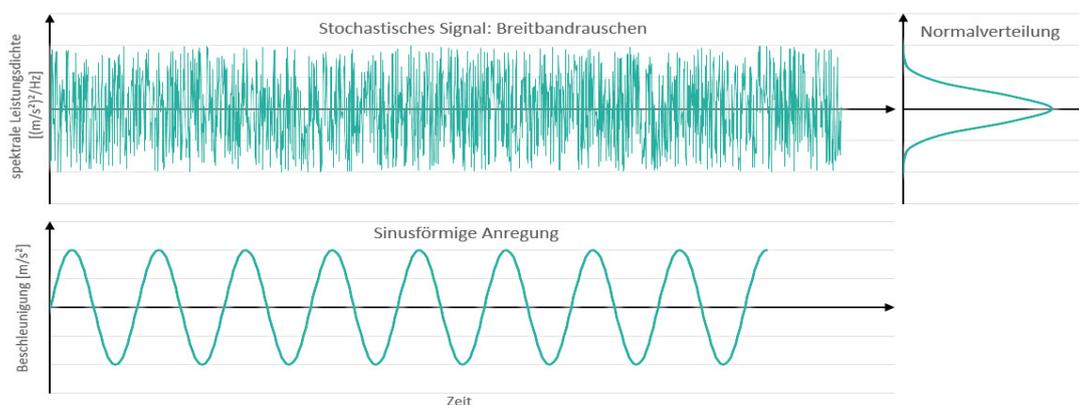
Systemleistung einer Traktionsbatterie zu realisieren. Um die Rundzelle Preis-Leistungs-Verhältnis zu optimieren, findet derzeit ein Trend zum Wechsel von der 18650 Zelle zur 21700 Zelle (mit einem

Energieinhalt von derzeit max. 5Ah) statt. Rundzellen weisen die höchsten Energiedichten auf, eine durchschnittliche Zelle mit 50 Gramm und 3000 mAh kommt auf eine Energiedichte von 60Ah/kg. Fertigungstechnisch gesehen wird nach dem Aufwickeln der Elektroden Schichten der Wickel (engl. Jelly Roll) in eine Metallhülse gepresst, der negative Pol wird an das Gehäuse geschweißt, der positive Pol abgedichtet und mit der Polkappe verschlossen. Aufgrund der für Kontaktierung ungünstigen Elektrodenform, am positiven sowie auch am negativen Pol, wirkt sich das Zellkontaktierungsverfahren entscheidend auf den Wirkungsgrad und die Zyklenfestigkeit des gesamten Batteriesystems aus. Die produktionstechnische Herausforderung besteht darin, die große Anzahl an Zellen so zu kontaktieren, damit minimaler Kontaktierwiderstand entsteht und keine Zellschädigung durch Wärmeeintrag eintritt. Etabliert haben sich Zellen der Bauart 18650, im Automotivbereich dürfte sich aber langfristig die etwas größere 21700er Zelle durchsetzen.

1.3.5 Schwingungsanregung: Sinus- und Breitbandrauschen

Gängige Vibrationserscheinungen können in Breitbandrauschen und Sinusschwingen unterteilt werden. Der Unterschied in der Signalausprägung wird in Abbildung 1-12 dargestellt.

- Sinusschwingen ist eine harmonische Anregung mit definierter Amplitude und wird bei Vibrationsprüfungen für Komponenten verwendet, welche einer solchen Belastungen ausgesetzt sind. Das Lokalisieren von Eigenfrequenzen erfolgt ebenfalls mit Sinusschwingungen. Diese Art von Tests wird an Komponenten durchgeführt, welche einer spezifischen periodischen Anregung (wie z.B. von Verbrennungsmotoren, Propellern, Transportbewegungen, etc.) gemessen in $\frac{g}{Hz}$, ausgesetzt sind.
- Breitbandrauschen stellt ein Frequenzspektrum aus stochastischen Kennwerten dar und wird primär mit der spektralen Beschleunigungsdichte in $\frac{g^2}{Hz}$ ($1g = 9,81m/s^2$) oder $\frac{(\frac{m}{s^2})^2}{Hz}$ beschrieben. In technischen Applikationen kommt diese Art der Vibrationsexposition am häufigsten vor, da sie sich aus mehreren übereinanderliegenden Frequenzen zusammensetzt.



1-12: Stochastisch verteiltes Breitbandrauschen und sinusförmige Anregung

Dieser Umstand vereinfacht die Prüfung eines Bauteiles am Schwingungsprüfstand, da jenes Bauteil während eines Prüflaufes mehreren Frequenzen und Leistungsdichtespektren simultan unterzogen wird woraus sich eine realistischere Belastungsexposition ergibt, passenderweise verkürzt sich damit auch die Prüfdauer.

1.4 Internationale Normen und Richtlinien bzgl. Vibrationsprüfungen an spezifischen Bauteilen

In den folgenden Kapiteln werden die relevantesten Normen für Vibrationsprüfungen von Traktionsbatterien kurz beschrieben.

Ein Ziel dieser Masterarbeit ist es unter anderem, die tatsächlichen Belastungen für Traktionsbatterien zu messen, um praxisnahe Schwingungbelastungen zu ermitteln und darauf aufbauend ein eigenes Prüfprogramm zu generieren. Anhand der Normprofile kann abgeschätzt werden, welche max. Schwingungbelastungen auf Bauteile wirken. Um ein Produkt in einem Staat oder Staatenbund in Verkehr zu bringen, muss jedes Produkt die jeweiligen Normen erfüllen. Seitens der Industrie existieren Konzernrichtlinien und Prüfbedingungen welche oft mit den internationalen Normen korrelieren. Viele Normen sind sehr ähnlich bzw. weisen mildere oder strengere Prüfbedingung auf. Aktuelle Normvorgaben geben eine Tendenz über potentiell gefährliche Frequenzbereiche, Amplituden und Expositionsdauern. Es folgt eine kurze Beschreibung der relevantesten Normen.

1.4.1 LV 124-2 Elektrische und elektronische Komponenten in Personenkraftwagen bis 3,5t –Allgemeine Anforderungen, Prüfbedingungen und Prüfungen Teil 2: Umwelтанforderungen [3]

Die LV-124-2 umfasst sehr umfangreich Test- und Prüfbedingungen für elektrische Komponenten im Personenkraftfahrzeugbereich, welche im Arbeitskreis 4.9 „Prozessabsicherung Hardwarequalität von Elektronikkomponenten bei Lieferanten“ von den deutschen OEMs Daimler AG, AUDI AG, Porsche AG, Volkswagen AG und BMW AG erarbeitet wurden. Die Prüfbedingungen konzentrieren sich im Wesentlichen auf elektronische Niedervoltkomponenten im Pkw (Sensoren, Signalverarbeitung, Elektromotoren, etc.), spezielle Prüfungen für Traktionsbatterien bzw. hochvoltführende Komponenten scheinen mit Stand 2013-08 noch nicht auf. Im Fokus bei dieser Norm steht die Haltbarkeit, Zuverlässigkeit und Festigkeit auf Komponentenebene für eine Fahrzeuglebensdauer hinsichtlich thermische, klimatische, chemische, elektrochemische und mechanische Einwirkungen. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden jene Kapitel als relevant eingestuft, welche die thermischen, klimatischen und mechanischen Umwelteinflüsse darstellen, da diese unabhängig von der

Funktionsweise einer Komponente von außen wirken und die Sicherheit bei diesen Einflüssen gegeben sein muss. Hinsichtlich Vibrationsprüfung korreliert die LV124- Norm sehr stark mit der EN 62660-2 (Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen Teil 2: Zuverlässigkeits- und Missbrauchsprüfung, 2012-06-01), erweitert diese aber durch einen weiteren Frequenzbereich, weswegen die LV124- Norm gegenüber EN 62660-2 schwingungsprüftechnisch vorrangig behandelt wird.

1.4.2 RTCA DO-160G Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment [15]

Sämtliche die Luftfahrt-betreffende Bauteilprüfstandards sind in der RTCA DO-160 nach Antriebsart und Einsatzbereich kategorisiert. Die Norm wurde im Dezember 2010 veröffentlicht und von europäischen und amerikanischen Luftfahrtbehörden erstellt.

Gezielt betrachtet werden in dieser Norm die Komponentenzuverlässigkeit hinsichtlich Flugzeugtyp-abhängigen Eigenfrequenzen, Druckunterschieden und thermische Wechselbedingungen. Die Luftfahrtindustrie stellt sehr hohe Anforderungen an Komponententests, da diese sehr hohen thermischen und mechanischen Wechselbelastungen ausgesetzt sind.

1.4.3 United Nations: ST/SG/AC.10/Rev.6/38.3 Transport of Dangerous Goods [6]

Für den Transport von Gefahrgütern, unter welches auch Lithium-Ion Traktionsbatterien gezählt werden, müssen zusätzlich bestimmte Tests durchgeführt werden. Das Kapitel 38.3 (kurz UN 38.3) aus der ST/SG/AC.10/Rev.6 (Jahr 2015) behandelt jene Prüfbedingungen, welche an Li-Ion Batterien durchgeführt werden müssen, um sicheren Transport und Verladung zu gewährleisten. Hauptaugenmerk wird daraufgelegt, dass das Transportgut unter allen möglichen Transportumständen thermisch, chemisch und physisch stabil bleibt. Beim Transport auftretende Umstände sind in etwa: hohe und tiefe Lagertemperaturen, Schwingungen durch Schienen-, Lkw-, Schiffs- und Flugtransport sowie mechanische Stoßeinwirkungen.

1.4.4 UNECE L87/1 Regelung Nr. 100 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) [2015/505] [4]

Die „ECE-R100“ mit Veröffentlichung am 31.3.2015 behandelt die Prüfungen des Antriebsstrangs und der Traktionsbatterie eines elektrisch betriebenen Fahrzeuges welche es für die Zulassung in der Europäischen Union zu bestehen gilt. Da diese Norm nur für die Zulassung von E-Fahrzeugen vorgesehen ist und nicht die internationalen Transportnormen (UN 38.3) miteinbezieht, welche in prüftechnischer Sicht strengere Tests fordert, wird von den meisten OEMs die UN 38.3 der ECE-R100 übergeordnet.

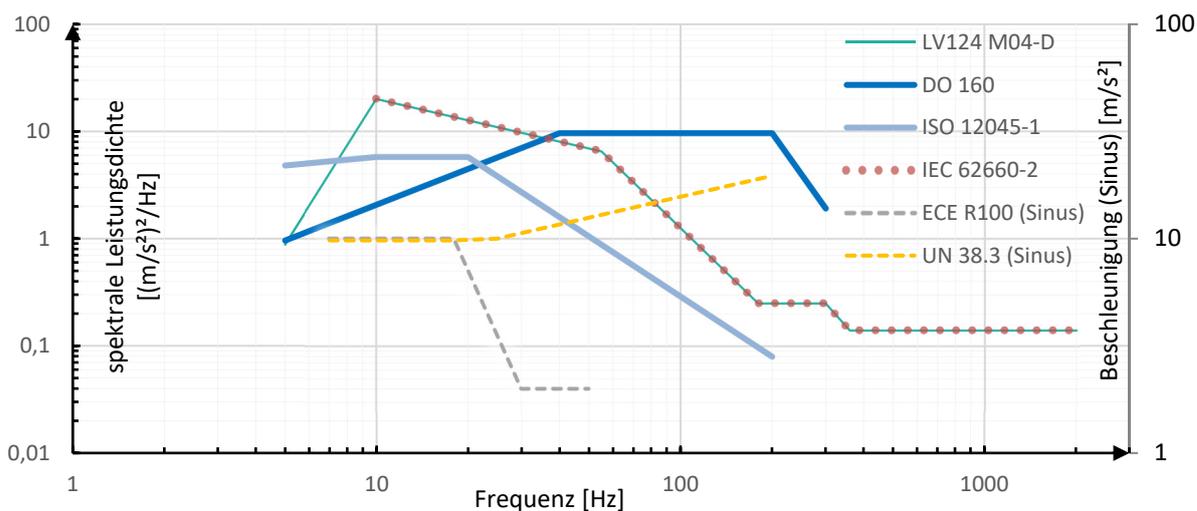
1.4.5 Übersicht mechanischer Belastungstests für (elektrische) Komponenten des Automotive Sektors und ähnlich relevante Normen

In Tabelle 2 sind einige der vorhin genannten Prüfbedingungen aufgelistet. Grundsätzlich unterscheiden sich die Prüfungen, jede Norm variiert bzgl. deren betreffenden Bauteileinsatz. Unterschieden wird z.B. ob sich die Prüfungen auf die Zelle, ein Modul oder die Gesamtbatterie mit definiertem SOC und abhängiger Last beziehen. Weiters können auch diverse Temperaturen werden der Vibrationsprüfung gefordert sein. Insgesamt unterscheiden sich die Tests hinsichtlich Frequenzbereich, Beschleunigung und Expositionsdauer.

Tabelle 2: Übersicht technisch relevanter Vibrationsprüfungen für Traktionsbatterien

Vibrationsprüfung		LV124 M04-D	DO-160G	ISO 12405-1
Objekt		Modul/Pack	Modul/Pack	Pack
Frequenzart		Breitbandrauschen	Breitbandrauschen	Breitbandrauschen
Frequenzbereich	Hz	5-2000	5-300	5-200
Beschleunigung	m/s ²	30,8 max.		14,21
Leistungsdichtespektrum	(m/s ²) ² /Hz	0,14 -20	0,96-9,6	
Gesamtdauer	h	24	9	63
Temperaturbereich	°C	-40 bis 80		
Vibrationsrichtung		X, Y, Z je 8h	X, Y, Z je 3 Stunden	X, Y, Z je 21 Stunden
SOC, Betriebsart		50% ohne Last, aktive Kühlung 50% Volllast, aktive Kühlung		50%
Vibrationsprüfung		SAE J2380	UN 38.3	ECE R100
Objekt		Modul/Pack	Zelle/Modul/Pack	Zelle/Modul
Frequenzart		Breitbandrauschen	Sinusschwingen	Sinusschwingen
Frequenzbereich	Hz	10-200	7-200-7	7-50-7
Beschleunigung	m/s ²		9,81- 19,62	2-10
Leistungsdichtespektrum	(m/s ²) ² /Hz	7,35-18,6		
Gesamtdauer	h	41	9	3
Temperaturbereich	°C			20 ±10
Vibrationsrichtung		X, Y, Z je 13,6 Stunden	X, Y, Z je 3 Stunden	Vertikal zur Einbaulage
SOC, Betriebsart		100%, 80%, 40%	vollgeladen	50%

Die detaillierten Belastungsprofile aus der Vibrations-Normübersicht sind in Abbildung 1-13 dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass die betreffenden Normen des Automotive Sektors den Höhepunkt der spektralen Leistungsdichte im Frequenzbereich zwischen 10 und 100 Hz definieren, während hingegen das Prüfungsmaximum im Luftfahrtbereich von 30 bis 200 Hz liegt. Weiters geht aus dem Diagramm hervor, dass sich alle Schwingungsprofile im Frequenzbereich von 7 bis 200 Hz bewegen, Frequenzen über 200 Hz werden dem zu Folge als weniger relevant erachtet.



1-13: Vergleich der wichtigsten internationalen Norm-Vibrationsprofile

Einige Automobilhersteller haben bereits Kritik an den Vibrationsprofilen geäußert, da diese empfindliche Frequenz- und Amplitudenbereich teilweise aussparen bzw. für bauteilverwendungsspezifische Anforderungen nicht genau zugeschnitten sind [16]. So werden bei einigen Prüfprogrammen in jede Achse gleiche Vibrationsprofile vorgeschrieben, obwohl im tatsächlichen Betrieb die Schwingungen in eine bestimmte Achse um ein Vielfaches der Belastung anderer Achsen sein können.

Für Fahrzeuge ist die LV124 die relevanteste Norm, da sie den höchsten energetischen Schwingungseintrag simuliert. Im Laufe der Masterarbeit wird auch eine Analogie von Fahrzeugmessungen zur LV124 festgestellt werden. Die sinusförmigen Profile der ECE R100 und UN38.3 sind in dieser Hinsicht weniger interessant.

2 MESSUNGEN

Schwingungen werden mit Beschleunigungssensoren gemessen. Aus der wirkenden Beschleunigung und der Zeit kann daraus auf Kraft, Geschwindigkeit und Weg zurückgerechnet werden. Mit diesen Parametern können (abhängig von der Frequenz) Bereiche mit hohem Schwingungsenergieeintrag festgestellt, sowie Resonanzbereiche identifiziert werden.

2.1 Schwingungs- und Schocktests am Prüfstand

Für die Bewertung des Einflusses von Vibrationen auf Modulebene von Batterien wurden Schwingungstests durch einen Schwingungserreger der Firma RMS der Ausführung SW2-1240APP (Abbildung 2-1) durchgeführt. Die Leistungsdaten sind in Anhang A-1 einsehbar.



2-1: RMS 10kN Schwingungsprüfstand SW2-1240APP

Schwingungsprüfstände unterscheiden sich maßgeblich durch die max. erreichbare Vektorkraft, für verschieden schwere Prüfobjekte wird im besten Fall ein Schwingungsprüfstand gewählt, dessen Belastungsgrenzen im Mittel des Prüfobjektes und dessen Relation zum Schwingungsprofil stehen. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal liegt in den verfügbaren Vibrationsrichtungen. Um die Produktfestigkeit sicherzustellen wird ein Prüfobjekt in x, y und z getestet. Schwingungsprüfstände sind oft nur in der Lage in Z- Richtung anzuregen, wobei das Bauteil an die jeweilige Prüfachse nacheinander angepasst werden muss. Für größere Produkte gibt es dazu die Möglichkeit einen Schwingtisch zu koppeln, dabei wird die Tischplatte mittels Öldruck hydraulisch gelagert, um Reibungseinflüsse zu minimieren. Der eigentliche Schwingungserreger kann dazu um 90° geschwenkt und mit der Schwingplatte formschlüssig verbunden werden. Durch das zusätzliche Gewicht der Schwingplatte reduziert sich automatisch das maximale Gewicht des Prüfobjektes bei gleichbleibenden Anregungskräften.

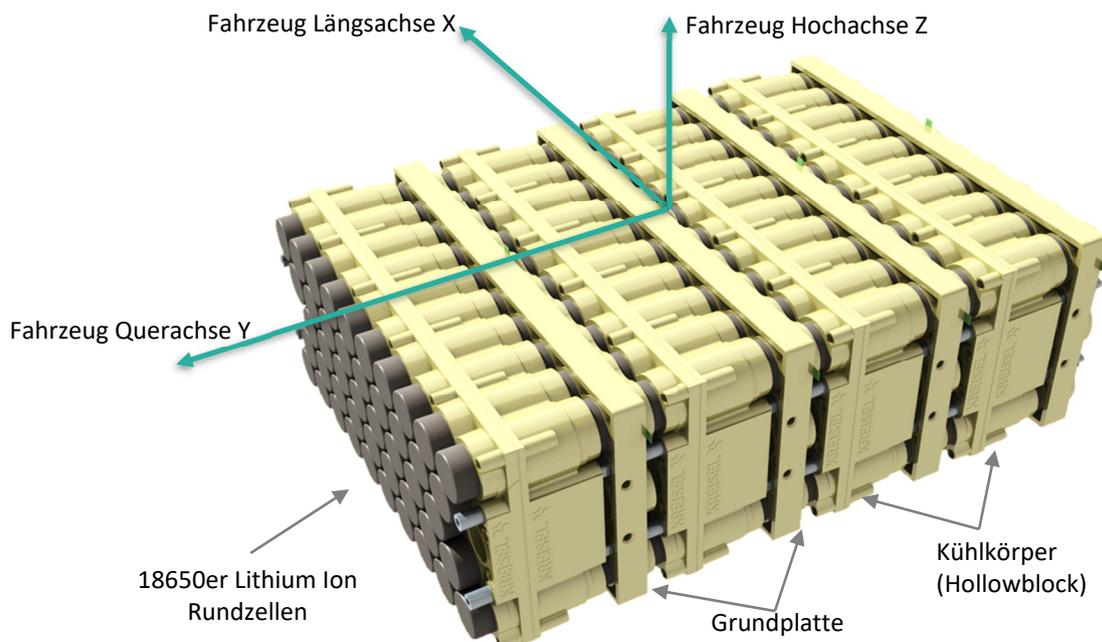
Um die Prüfobjekte realistischen Belastungen zu unterziehen, sind spezielle Schwingungsprüfstandshalterungen notwendig, mit welchen die Prüfobjekte, wie im Betriebszustand eingesetzt, befestigt werden können. Bei einem Schwingungsprüfstand ohne hydraulisch gleitender Tischplatte kann nur in eine Richtung angeregt werden. Dies hat zur Folge, dass mehrere Halterungen notwendig sein können um in alle drei Achsen testen zu können was wiederum Aufwand und Kosten für die Prüfung steigen lässt.

Für eine möglichst realitätsnahe und qualitativ aussagekräftige Bauteilprüfung sind auch Tests bei verschiedenen Temperaturniveaus notwendig. Für diesen Zweck werden Klimahauben angeboten, welche über den Schwingungserreger bzw. das Prüfobjekt positioniert werden. Somit können die Prüfobjekte bei hohen und tiefen Temperaturen unter Schwingungsanregung getestet werden. Für Kunststoffe und Elastomere sind diese Art von Prüfung empfehlenswert, da synthetische Werkstoffe empfindlicher auf Temperatur hinsichtlich Festigkeit, Elastizität, Wärmeausdehnung und Sprödigkeit reagieren können.

Für die Ansteuerung des Schwingungsprüfstands muss vor einem Test die tatsächlichen Gewichte und das Prüfprogramm definiert werden. Für die Anregung nach Prüfprogramm wird auf das Signal eines Beschleunigungssensors referenziert (Referenzsensor, Control Channel), welcher sich auf der Montageplatte des Schwingungserregers befindet. Dazu können Schwingungsabweichungen im Vergleich zum Referenzsensor identifiziert werden. Parallel dazu wird mindestens ein Beschleunigungssensor an dem Prüfobjekt befestigt, welcher in erster Linie zur Sicherheit eines Prüflaufes dient, sodass im Falle eines Bauteilbruches die Steuerungseinheit die entstehenden hohen bzw. ausbleibenden Beschleunigungen erkennt und den Prüflauf automatisch abbricht. Mit dem am Prüfobjekt angebrachten Beschleunigungssensor lässt sich auch bereits die auftretende Beschleunigung an der Sensorposition in Relation zum Referenzsensor vergleichen und gegebenenfalls eine Übertragungsfunktion daraus ableiten.

2.2 Batteriearchitektur

Die untersuchte Traktionsbatterie wurde als Prototyp der Firma Kreisel Electric konzipiert und gebaut. In Abbildung 2-2 ist der prinzipielle Aufbau eines 4s46p Stock dargestellt, welches aus 4 Stück 1s46p Modulen besteht. Die modulare Bauweise von Kreisel Electric erlaubt eine hoch flexible Assemblierung zu einer Gesamtbatterie bei gegebenem Bauraum. Die einzelnen Module werden in verschiedenen Größen hergestellt (1s14p, 1s36p, 1s46p), um Kapazität und Systemspannung flexibel auszulegen.



2-2: Prinzipieller Aufbau und Einbaulage der untersuchten Traktionsbatterie auf Lithium-Ion Rundzellenbasis

Für eine Systemspannung von beispielsweise 360 Volt müssen bei einer nominalen Zellspannung von 3,6 Volt 100 Module in Serie geschaltet werden. Die Module werden mittels Distanzschrauben und dem „Kreisel- Zellkontaktierungsverfahren“ zu einem Pack zusammengefügt und im Fahrzeug so eingebaut, dass vertikale Stoß- und Schwingungsbelastung sowie Beschleunigungs- und Bremskräfte vom Fahrzeug in radialer Zellrichtung wirken. Da Rundzellen auf Krafteinwirkung in axialer Richtung empfindlicher als in radialer Richtung reagieren [17], wäre es für eine Minderung der Vibrationseffekte besser die radialen Zellachsen in Fahrzeughochachse und in Fahrzeugquerachse auszurichten, damit sich die empfindlichere Zelllängsachse in Fahrtrichtung orientiert, da in Fahrtrichtung die geringsten Beschleunigungen auftreten. Die Kreisel Batteriemodule bieten auch die Möglichkeit einer Flüssigkühlung, welche je nach Batterieeinsatzgebiet zusätzlich eingebaut werden kann. Die Zellen sind innerhalb der Grundplatten kontaktiert. Über die Grundplatten verläuft auch die Kraftaufnahme des Batteriestocks zum Batteriegehäuse, welches wiederum am Fahrzeug kraftschlüssig verbunden ist. Das Ende eines Modulstocks, in welchem auch die Zellen zusammen leitfähig verbunden werden, wird als Endplatte bezeichnet. Die Module werden in axialer Richtung mittels Gewindestangen zusammengehalten.

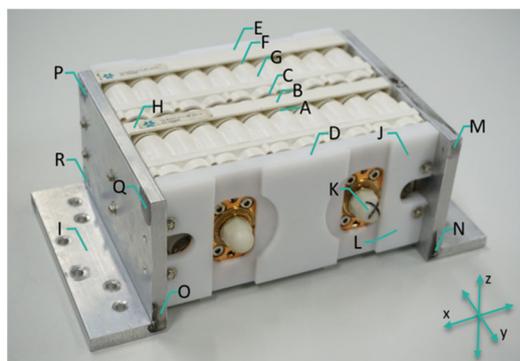
2.3 Spektralanalyse eines gedämpften und eines nichtgedämpften 2s46p Batteriemoduls

Jeder Körper besitzt ihm eigene Resonanzbereiche bzw. Eigenfrequenzen, welche sich maßgeblich aus den Materialeigenschaften und der Körpergeometrie zusammensetzen. Um die negativen Auswirkungen von auftretenden Schwingungen wie etwa Risse, Brüche oder Schäden an Elektronik bzw. Batteriezellen zu minimieren, ist es essentiell diese Schwingungen zu identifizieren, zu beurteilen und gegebenenfalls konstruktive Änderungen durchzuführen, um den schwingungsexponierten Körper bestenfalls über die normale Lebensdauerbeanspruchung hinaus auslegen zu können.

Dafür wurde ein 2s46p Batteriemodul mithilfe des Schwingungsprüfstands an ausgewählten Positionen in drei Achsen unter definierten Schwingungsanregungen vermessen. Parallel dazu wurden Dämpferelemente untersucht, um deren Wirkung auf das Schwingungsverhalten zu beurteilen. Eine Dämpfung der Zelle ist aufgrund deren geringer Größe ungeeignet, es ist sinnvoller Batteriemodule oder die Gesamtbatterie zu entkoppeln.

2.3.1 Prüfkörper Aufbau

In Abbildung 2-3 ist der Prüfkörper, die Prüfkörperhalterungen sowie die Sensorpositionen mit der zugehörigen Bezeichnung dargestellt. Das 2s46p (vgl. Kapitel 2.2) Batteriemodul wird an den kurzen Seitenflächen durch je zwei M4 Schrauben pro Grundplattenseite an den L-Profil Halterungen aus Aluminium befestigt. Im Fahrzeug werden die Batteriemodule durch Blechprofile mit 1,5mm Wandstärke eingebaut. Für eine batteriespezifische Resonanzuntersuchung ist dies jedoch ungeeignet, da durch die geringe Steifigkeit des Blechprofiles die Messergebnisse verfälscht werden. Die Endplatte ist seitlich nicht geschraubt, d.h. dass diese bei von außen angreifenden Kräften höhere Wege zurücklegen kann, was wiederum zu einem höheren Moment an der befestigten Grundplatte führt. Der Grund dafür besteht darin, dass mit derzeitigen Entwicklungsstand des Batteriemodules die Endplatte ohne zusätzliche seitliche Bohrungen gefertigt und auch so verbaut wird.

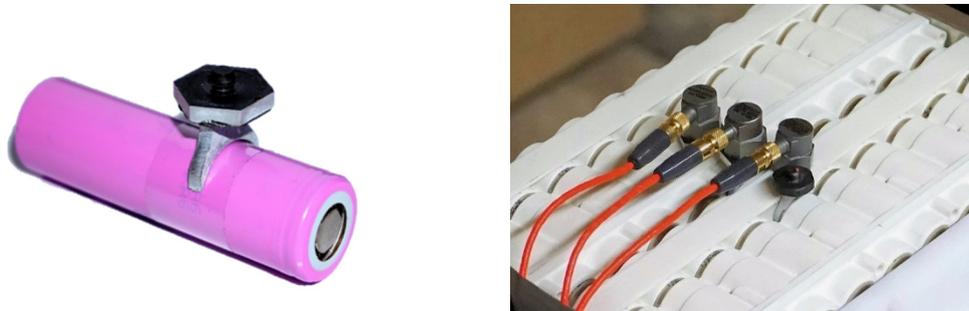


Z- Achse	A	Zelle Positiv	Y- Achse	J	Endplatte oben	
	B	Grundplatte Mitte		K	Sammelkontakt	
	C	Zelle Negativ		L	Endplatte unten	
	D	Endplatte Mitte		M	Halterung rechts oben	
	E	Grundplatte Mitte Außen		N	Halterung rechts unten	
	F	Zelle Positiv Außen		O	Halterung link unten	
	G	Hollowblock		X- Achse	P	Seite links oben
	H	Grundplatte Rand			Q	Seite rechts oben
I	Halterung	R	Seite links unten			

2-3: 2s46p Prüfkörper Aufbau und Sensorpositionen

Über die vertikalen Bohrungen an den L-Profil Halterungen wird der Prüfkörper an den Schwingungsprüfstand fixiert. Für die Untersuchung wurden eindimensionale Beschleunigungssensoren an verschiedenen Positionen verwendet. Die Halterung selbst wurde ebenfalls untersucht, um die Korrelation bzw. Dämpfung oder Verstärkung zwischen den Halterungsmesspunkten und des Batteriemoduls festzustellen.

Wegen der Sensorgröße wurde der Prüfkörper nur an den zugänglichen Stellen vermessen, eine Ausnahme bilden die Zellen: für die Erfassung der Beschleunigungsgrößen wurden spezielle Adapter verwendet mit welchen eine Ermittlung der Werte trotz der Größe der Sensoren möglich ist, siehe Abbildung 2-4.

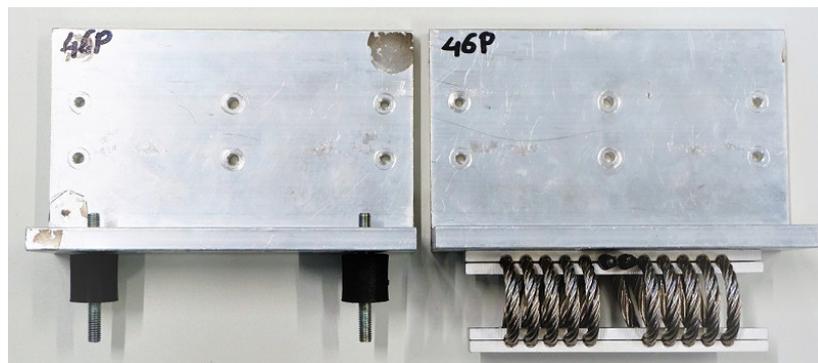


2-4: Adapter für Beschleunigungssensor zur Messung an 18650er Zellen

Da diese Adapter im Handel nicht erhältlich sind, wurde speziell für diese Anwendung eine gewichts- und designoptimierte Adapterform konstruiert und aus 3mm dickem AlSi9Cu3 Halbzeug mittels Laserschnitt gefertigt. Die Form wurde so gewählt, dass der Adapter einfach an einem bestehenden Modul mittels Cyanoacrylat Kleber angebracht werden kann. Das Sensoradapterplättchen ist ebenfalls auf den Adapter geklebt und durch das darauf angebrachte Gewinde kann ein Beschleunigungsaufnehmer befestigt werden. Der Adapter ist in seiner Ausführung für uniaxiale Sensoren in z- Richtung oder für triaxiale Sensoren in alle drei Achsrichtungen geeignet. Die Adapter sind mit mäßiger Krafteinbringung zu lösen und wiederzuverwenden.

Untersucht wurde unter anderem auch, welchen Einfluss Dämpfungselemente hinsichtlich tatsächlicher Schwingungsdämpfung und der Minimierung von Eigenfrequenzen aufweisen. Dafür wurden zwei unterschiedliche Schwingungsdämpfer herangezogen: auf Basis von elastischem Naturkautschuk und steifer Drahtseildämpfung. Diese beiden Dämpfungsvarianten wurden gewählt, da jene die häufigsten Dämpfungsmaterialien im Automobil- und Nutzfahrzeugbau repräsentieren, natürlich neben großvolumigen Feder- und Stoßdämpfersysteme für die Radaufhängung. Alternative Dämpfer basieren auf denselben Materialien und unterscheiden sich hauptsächlich in der Traglast sowie einer gerichteten Dämpfung mit eingeschränkten, räumlichen Freiheitsgraden.

Der Naturkautschuk Dämpfer (auch als Silentblock bezeichnet) setzt sich aus vier Metall-Gummidämpfer des Typ A M6 mit einer Shore-Härte von 55 und beiderseitigem M6 Gewinde zusammen. Die zugehörige Kraft- Wegkennlinie ist nicht linear und steigt progressiv mit der Belastungskraft und dem Verformungsweg des Dämpfers. Der Drahtseildämpfer dämpft durch die Elastizität einer geklemmten Drahtseilspirale, in radialer Richtung annähernd linear, axial nicht linear. Bezogen wurde der Drahtseildämpfer unter der Bezeichnung TYPE j6 54 – 10 DG von dem Hersteller Sebert GmbH. Bei dem Drahtseilmaterial handelt es sich um den nichtrostenden, austenitischen Stahl X5CrNiMo17-12-2. Abbildung 2-5 zeigt die prinzipielle Anordnung der Dämpfungselemente an den Modulhalterungen im Vergleich.



2-5: Dämpfungsvarianten des 2s46p Moduls: links Silentblockdämpfer, rechts Drahtseildämpfer

2.3.2 Spektralanalyse eines 2s46p Modul ohne Dämpfer

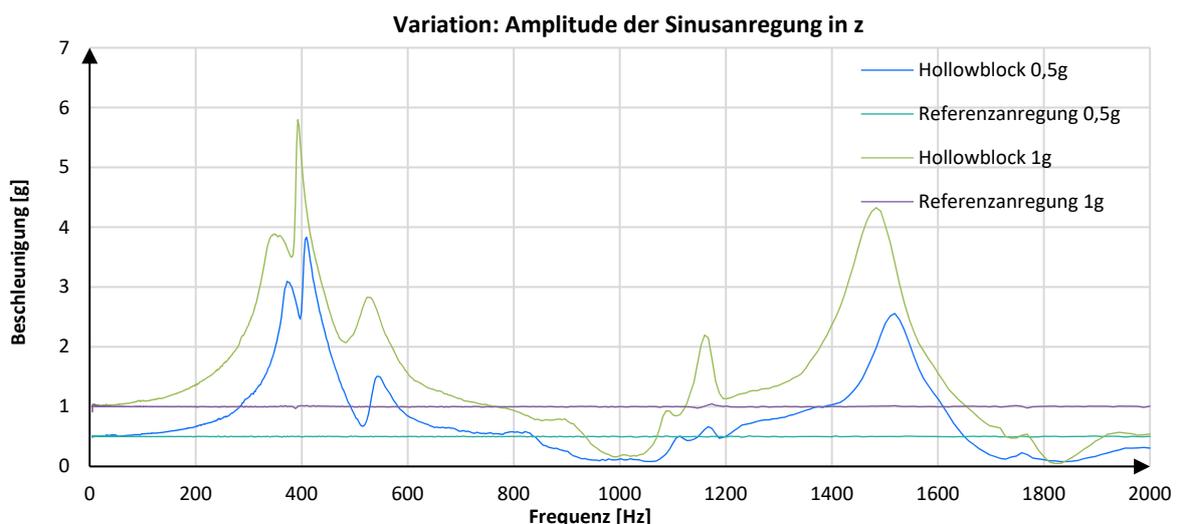
Als Spektralanalyse wird die Untersuchung eines Körpers auf Resonanzbereiche bezeichnet. Aus einer Spektralanalyse lässt sich ableiten, wo an einem Körper bei welchen Frequenzen Resonanzen auftreten und wie sich diese an unterschiedlichen Positionen und Beanspruchungsrichtungen zueinander verhalten. Potentiell gefährliche Resonanzbereiche können damit erkannt und Gegenmaßnahmen wie z.B. konstruktive Änderungen getroffen werden.

Das 2s46p Modul wurde dabei auf dem Schwingungsprüfstand ohne Dämpfungselemente fixiert und über einen Zeitraum von ca. 15 Minuten in einem Bereich von 5 – 2000Hz konstant mit 1g sinusförmig in jede Achsrichtung angeregt, das entspricht einem Sweep Faktor von 0,5 Oktave pro Minute. Der Sweep Faktor steht für die zeitliche Geschwindigkeit, in der das geforderte Frequenzprofil gefahren wird. Dabei entspricht 1 Oktave/ Minute einer Verdoppelung der Frequenz, beispielsweise von 10Hz auf 20Hz pro Minute bzw. von 1000Hz auf 2000Hz pro Minute. Das heißt automatisch, dass im großen Frequenzbereich das Ausmachen körpereigener Resonanzfrequenzen durch eine etwas höhere Ungenauigkeit gekennzeichnet ist. Mit 0,5 Oktave pro Minute heißt das beispielsweise von 1000Hz auf 1500Hz pro Minute, d.h. die Prüfzeit verlängert sich zwar, die Messung wird jedoch genauer. Als Vergleich zur Sinusanregung kann ein definiertes Rauschprofil über den selben Frequenzbereich herangezogen werden (Vgl. Kapitel 1.3.5).

Messungen

Die folgenden Diagramme (Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7) zeigen die gemessenen Beschleunigungen an den einzelnen Sensorpositionen. Die Messkurven müssen in Relation zur vorgegebenen Referenzanregung betrachtet werden, welche über den gesamten Frequenzbereich konstant bei 1g bleibt. Ein Anstieg der Messkurven bedeutet das Eintreten in einen Resonanzbereich, die Belastungsspitze in jenem markiert den Eigenfrequenzpunkt und das Abfallen ein Verlassen des Resonanzbereichs. Belastungen über der Referenzanregung von 1g stellen eine Verstärkung dar, unterhalb der 1g kommt dies einer Dämpfung gleich.

Daraus geht hervor, dass die Resonanzbereiche relativ unabhängig von der Frequenzanregungsart zum Vorschein kommen. D.h. es bilden sich bei Sinusanregung dieselben Resonanzbereiche und Resonanzpunkte aus wie bei Breitbandrauschen. Durchgeführte Variationen der Amplitude bzw. der spektralen Leistungsdichte führen zu keiner Veränderung der Eigenfrequenzpunkte, die Beschleunigungswerte an den Messpositionen verhalten sich bis 300Hz direkt proportional zur Anregung, die Ausprägung bleibt darüber hinaus in ihrer Charakteristik erhalten (Abb. 2-6).

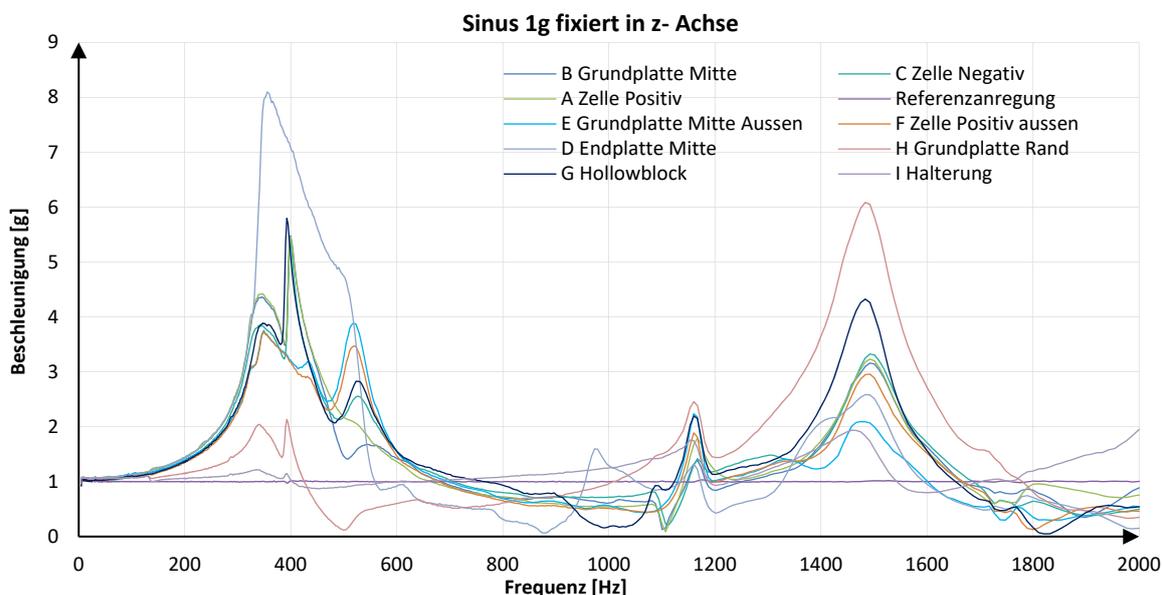


2-6: Auswirkung verschiedener Anregungsamplituden auf das Resonanzverhalten

Betrachtet man ideale, homogene Körper, so würden materialeigene Eigenfrequenzpunkte wiederholt in Abständen von Oktaven auftreten. Bei inhomogenen Körpern wie es Batteriemodule sind, ist dies nicht der Fall. Die Resonanzpunkte ergeben sich aus einem Zusammenspiel und der Wechselwirkung zwischen Materialparameter und der Konstruktionsweise. Mit zunehmender Komplexität eines Körpers ist eine Untersuchung der Resonanzbereiche per Spektralanalyse am Prüfstand unumgänglich. Um kritische Resonanzen zu vermeiden, wird nach deren Erkennen meist experimentell versucht diese zu minimieren.

Bei dem untersuchten Batteriemodul liegen die Resonanzpunkte in z- Richtung bei 357, 394, 1161 und 1483Hz, Dämpfungsbereiche liegen zwischen 800 und 1100Hz sowie ab 1700Hz, siehe Abbildung 2-7. Ab 100Hz beginnt bereits eine Verstärkung der Anregung bis hin zum ersten Eigenfrequenzpunkt bei 357Hz. Während sich der Großteil der Sensoren ähnlich verhält, sticht die Beschleunigung der Endplatte heraus, da diese an den Seitenflächen nicht geschraubt ist und daher mehr Weg zurücklegt. Die nicht geschraubte Endplatte entspricht dem derzeitigen Entwicklungs- und Einbaustand, aufgrund der Erkenntnisse aus den Messungen wird diese in Zukunft ebenfalls verschraubt werden, um die Belastung an dieser Position zu minimieren.

Weiters geht aus den Messungen hervor, dass Beschleunigungen auf die Zelle tendenziell kleiner sind als jene der angrenzenden Bauteile, dieser Unterschied ist jedoch minimal. Daraus lässt sich folgern, dass für zukünftige Spektralanalysen eine Messung mittels Sensoradapter für Zellen nicht zwingend notwendig ist, da durch den minimalen Unterschied der energetische Schwingungseintrag auf die Zelle als annähernd äquivalent zu den angrenzenden Bauteilen betrachtet werden kann. Messpunkte am Rand weisen zudem kleinere Beschleunigungen auf als in der Mitte, was durch die Hebelwirkung erklärt werden kann.

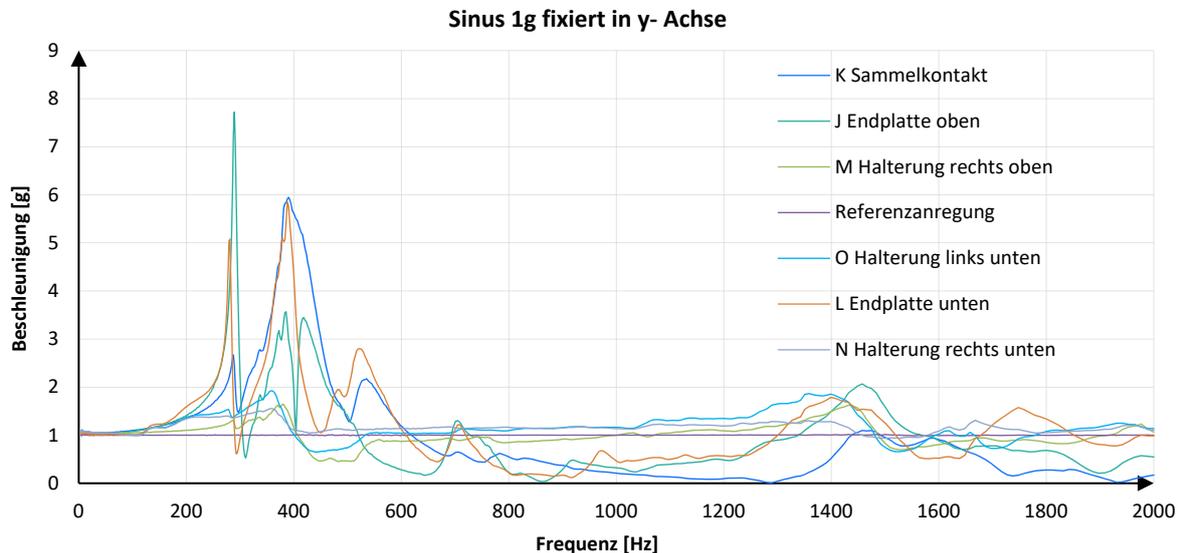


2-7: Spektralanalyse Auswertung in z- Achse bei Sinusanregung 1g

Schwingungseinflüsse in y- Richtung zeigen ein ähnliches Bild wie in z. Auch hier wird die Schwingung ab 100Hz verstärkt. Aus dem logarithmisch abgebildeten Diagramm in Abbildung 2-8 lässt sich die direkte Übertragungsfähigkeit von der Referenzanregung zu dem Prüfkörper bis zu einem Bereich von 120Hz gut erkennen. In diesem Bereich wird die Anregung nahezu 1:1, also ohne Dämpfung oder Verstärkung, übertragen.

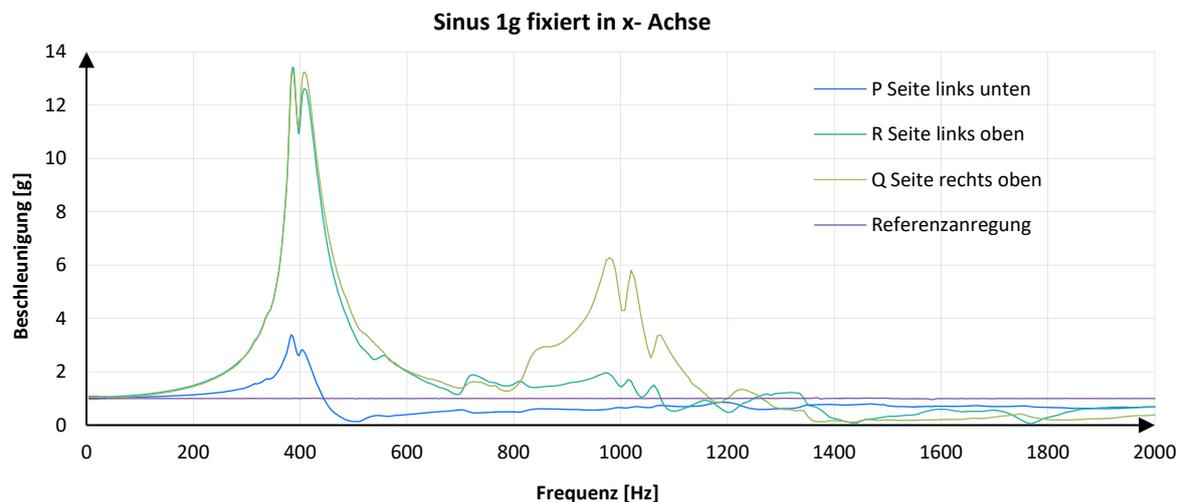
Messungen

Wäre die Amplitude an den Messpunkten kleiner als die Anregung, so wäre das Anzeichen dafür, dass eine starke Dämpfung eintritt und ein Großteil der Beschleunigung direkt in Wärme umgewandelt wird. Würde eine Verstärkung in diesem Bereich auftreten, käme dies einer hohen mechanischen Beanspruchung gleich.



2-8: Spektralanalyse Auswertung in y- Achse bei Sinusanregung 1g

Diese Feststellung ist auch für eine Anregung in x- Achse übertragbar, wobei in x- Richtung ab 1200Hz Schwingungen gut gedämpft werden, siehe Abbildung 2-9.



2-9: Spektralanalyse Auswertung in x- Achse bei Sinusanregung 1g

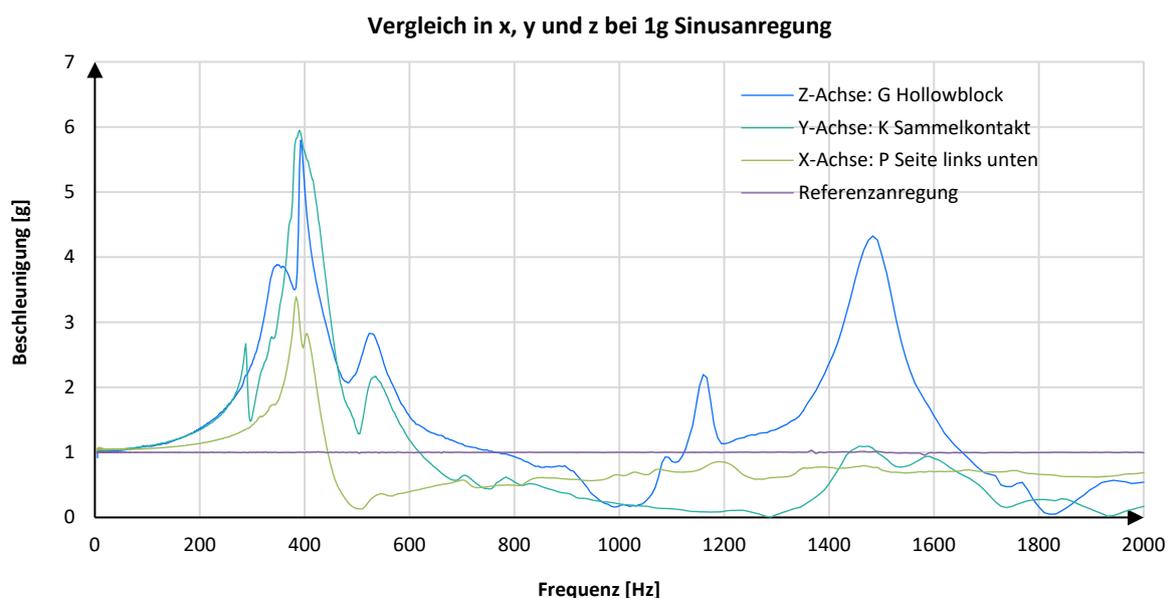
Energetisch betrachtet sind Resonanzpunkte größer 600Hz aufgrund des geringen Energieeintrages im hochfrequenten Bereich jedoch von geringerem Interesse, die Gründe dafür werden später in Kapitel 2.5.4 genauer beschrieben. In x-Achse kann bauteilbedingt nur an den Halterungen gemessen werden. Es sollte den Beschleunigungen an den Grundplatten entsprechen, da diese mit der Halterung fest verschraubt sind.

Auch hier ist der Effekt der Hebelwirkung erkennbar: die weiter oben liegenden Sensoren weisen höhere Beschleunigungen auf als weiter unten liegende.

Würde die Halterung sowie in der tatsächlichen Einbausituation im Fahrzeug aus 1,5mm Blech bestehen, so wären die Beschleunigungen definitiv höher. Die Messung zeigt auch auf, dass die Halterung in x- Richtung zu elastisch ist und für zukünftige Spektralanalysen massiver, bzw. verstärkter ausfallen muss. Trotz allem ist das Batteriemodul in x- Richtung formbedingt um ein vielfaches steifer als in y oder z, weshalb eine Schwinungsreduktionsmaßnahme primär auf diese beiden Achsen abzielen sollte.

Eine Vergleichsdarstellung in x, y und z Achse für eine spezifische Messposition ist mit uniaxialen Beschleunigungssensoren nicht möglich, da dafür Modifikationen bzw. unterschiedliche Sensoradapter erforderlich wären, welche u.a. durch Hebelwirkung und Eigenmasse das Messergebnis verfälschen würden. Mit triaxialen Sensoren ließe sich dieses Problem zwar vermeiden, diese standen jedoch für den Versuch nicht zur Verfügung. Abbildung 2-10 zeigt deswegen repräsentativ für x, y und z den Vergleich in drei Dimensionen bei gleicher Anregung.

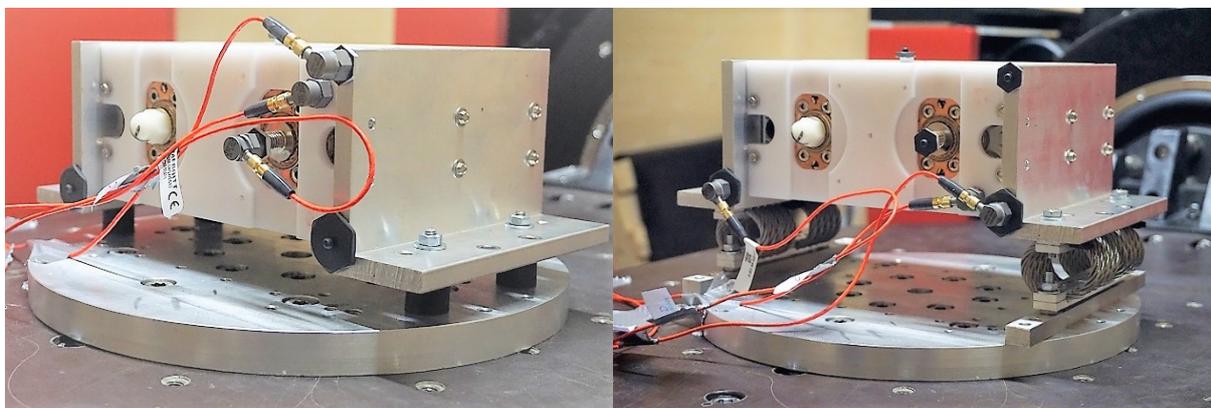
Die allgemeine Haupteckentnis besteht darin, dass in allen Achsen bei gleicher Anregung ein Resonanzbereich von 50Hz bis 700Hz mit dem höchsten Resonanzpunkt bei 391Hz auftritt. An dieser Stelle wird vorab auf ein Ergebnis aus Kapitel 2.5.4 verwiesen: Es beschreibt, dass 80% der Schwingungsenergie bis 250Hz umgesetzt wird und sich der Rest auf Bereiche darüber hinaus verteilt. Somit ist der Peak bei 391Hz als weniger kritisch zu beurteilen, da er sich außerhalb der energiereichen 250Hz befindet.



2-10: Vergleich repräsentativer Messsignale in x, y und z bei 1g Sinusanregung

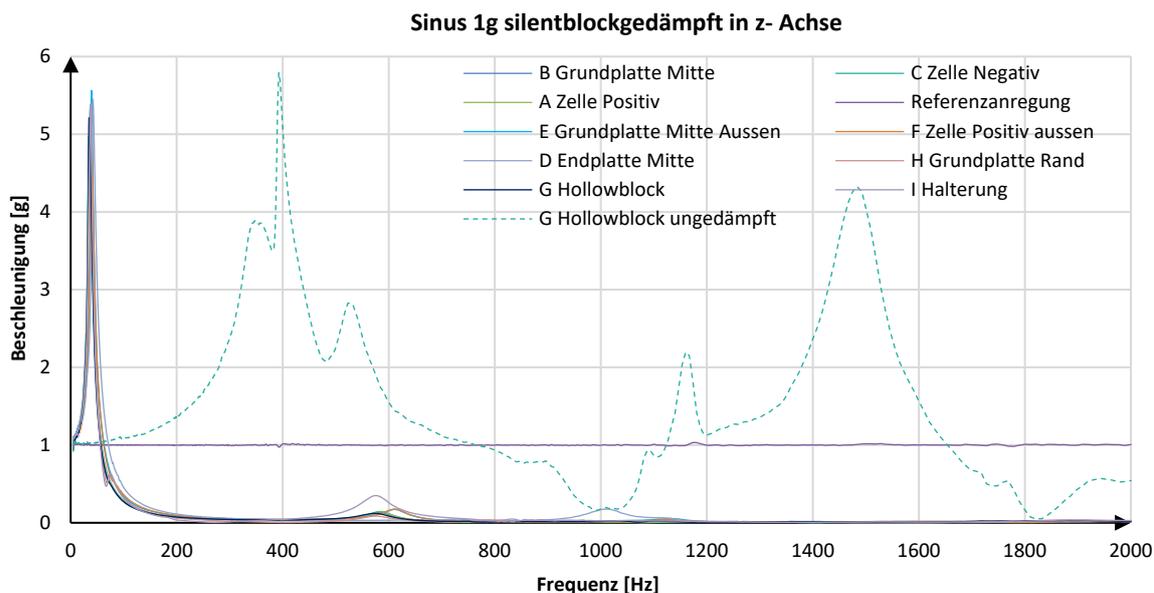
2.3.3 Spektralanalyse eines 2s46p Modul mit Dämpfungselementen

Die Dämpfungselemente (Drahtseildämpfer und Silentblockdämpfer) wurden an dem 2s46p Modul angebracht und mit gleichen Schwingungsprüfprofilen beansprucht. Der Prüfaufbau beider Dämpfer ist in Abbildung 2-11 ersichtlich.

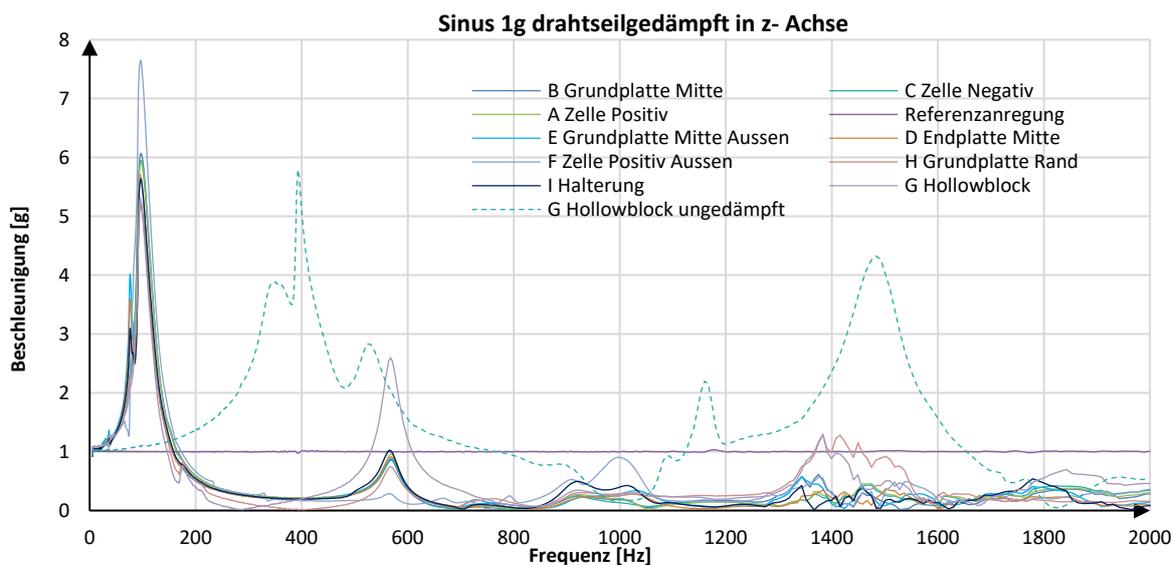


2-11: Prüfaufbau mit Dämpfungselementen: Links Silentblockdämpfer, rechts Drahtseildämpfer

Zunächst erschließt sich durch die Wirkung beider Dämpfungselemente aus den auftretenden Beschleunigungen folgendes: Eine Verlagerung der Eigenfrequenzen in den niederfrequenten Bereich, eine allgemeine Dämpfung sämtlicher Schwingungen größer 200Hz bei Drahtseildämpfern und größer 100Hz bei Silentblockdämpfer sowie ein Angleichen der Beschleunigungswerte an den jeweiligen Sensorpositionen (Abbildung 2-12 und Abbildung 2-13). Der Silentblockdämpfer verlagert die Eigenfrequenz auf 38,2 Hz, der steifere Drahtseildämpfer nach 98,5Hz.

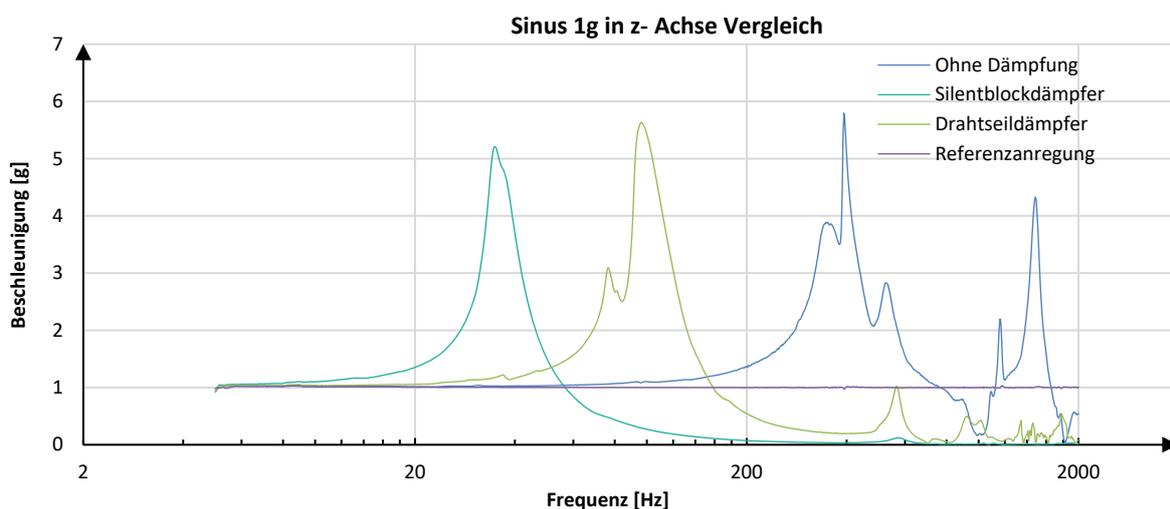


2-12: Spektralanalyse Auswertung in z- Achse bei Sinusanregung und Silentblockdämpfung



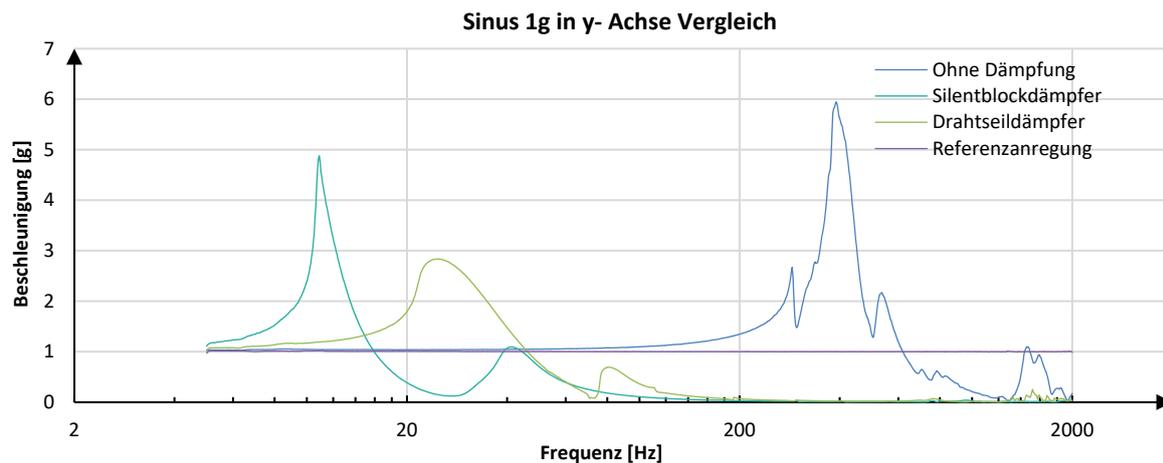
2-13: Spektralanalyse Auswertung in z- Achse bei Sinusanregung und Drahtseildämpfung

Aus den zuvor durchgeführten Modalanalysen wurde eine repräsentative Sensorposition gewählt und zur besseren Vergleichbarkeit herangezogen. In z- Richtung wird daher die Sensorposition Hollowblock in y- Richtung der Sammelkontakt und in x- Richtung die Position „Seite links unten“ gewählt. Der direkte Vergleich in den nächsten Abbildungen zeigt die Dämpfungswirkung der einzelnen Dämpfer in Relation zum ungedämpften Zustand.

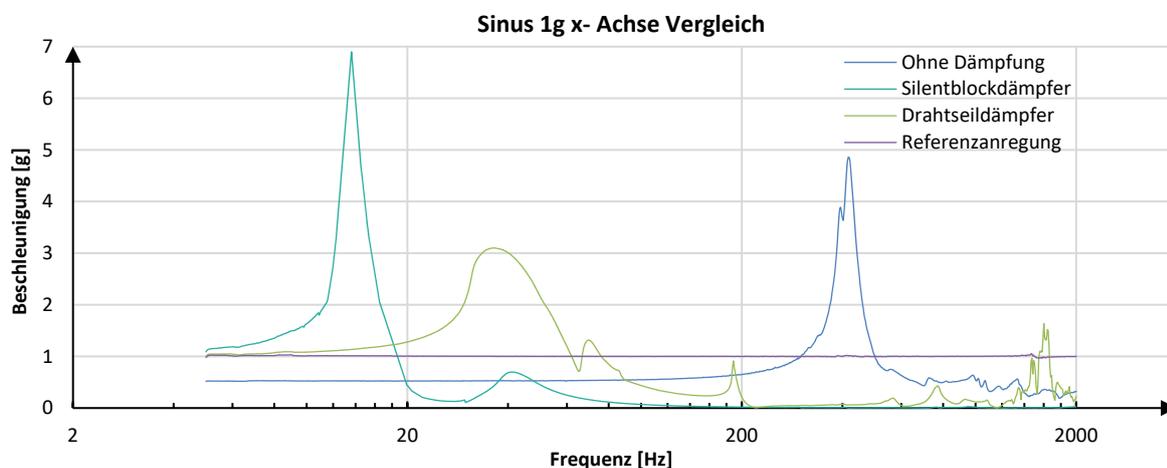


2-14: Wirkung der Dämpfer in z- Achse bei Sinusanregung auf Position G Hollowblock

Messungen



2-15: Wirkung der Dämpfer in y- Achse bei Sinusanregung auf Position K Sammelkontakt



2-16: Wirkung der Dämpfer in x- Achse bei Sinusanregung auf Position R Seite links unten

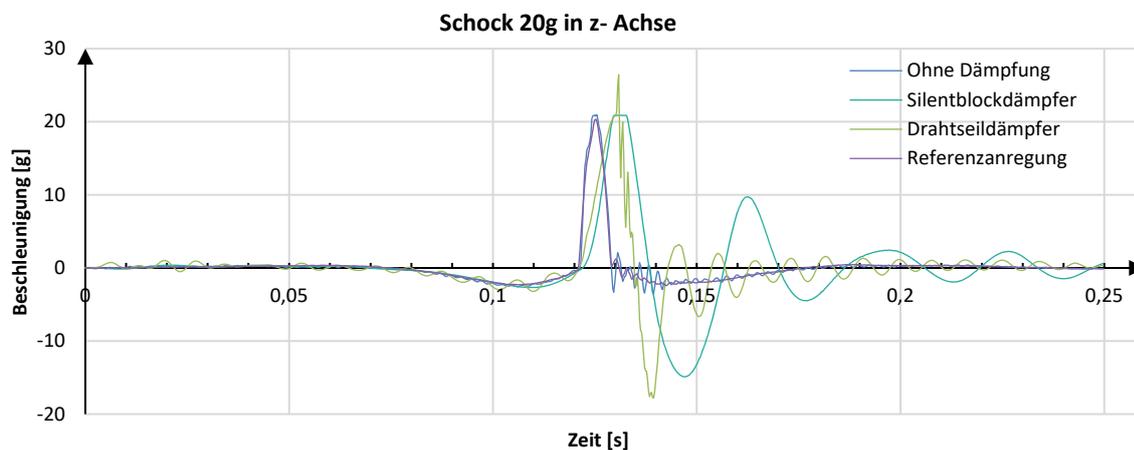
Im realen Fahrbetrieb wirken vor allem Schwingungseinflüsse, welche als Rauschen gemessen werden. Gemessene Rauschsignale können auch mittels einer geeigneten Prüfstandsoftware direkt auf Prüfstände und darauf befindliche Prüfkörper übertragen werden. Auffällig ist, dass im Zuge einer Rauschbeanspruchung bzw. einer Sinusanregung auf den Prüfkörper sowie beim Drahtseildämpfer als auch beim Silentblockdämpfer eine messbare Verstärkung der Anregung bereits ab Prüfbeginn bei 5Hz auftritt. Die Versuche bestätigen die Vermutung, dass die Dämpfungselemente aufgrund ihrer höheren Elastizität bereits bei niedrigen Frequenzen eine ausgeprägte Resonanztendenz aufweisen.

Das Ergebnis der Untersuchung lautet daher, dass beide Dämpfer in dieser Einbaukonfiguration nicht geeignet sind Resonanzbereiche bzw. Eintrag von Schwingungsenergie nachhaltig zu mindern, da die energiereichen Schwingungen in den niederfrequenten Bereich verschoben werden und ein höherer Energieeintrag in die Batterie stattfindet (Vgl. Abb. 2-12 und Abb. 2-13). Das höchste Potential für alternative Dämpfungselemente hätten den Messungen zufolge Dämpfer mit höherer Steifigkeit als jene des Drahtseildämpfers welche zusätzlich nicht eindimensional, sondern dreidimensional an das Batteriemodul angebracht werden, um diese von drei Seiten gleichzeitig zu stabilisieren.

2.3.3.1 Verhalten bei mechanischem Schock

Neben Schwingungs- und Vibrationsbelastungen im Zuge einer Produktlebensdauer tragen vor allem auch mechanische Schocks zur Materialermüdung und Zellschädigung bei. Die Einflüsse von Schocks werden in Anlehnung an die Prüfvorschrift der LV-124 [3] mit 20g über 6 Millisekunden in Halbsinusform durchgeführt und untersucht. Eine höhere Schockdauer würde an der eingestellten Beschleunigung nichts ändern, lediglich der zurückgelegte Weg wird dadurch verlängert. Die Beschleunigungsgröße ist der einflussreichere Parameter.

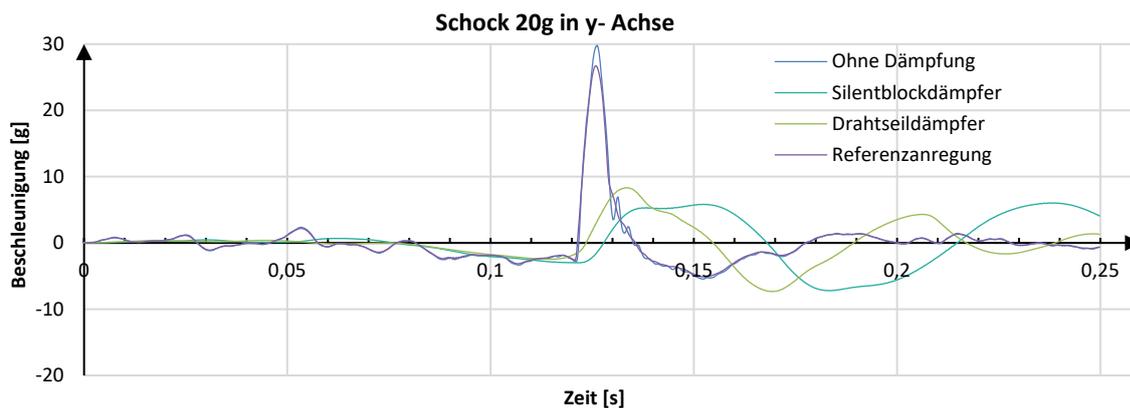
Aus den Messergebnissen, zu sehen in Abbildung 2-17 bis Abbildung 2-19, geht folgendes hervor: In z-Richtung erfolgt eine Verzögerung des Referenzschocks, jedoch keine Minderung des Schocks. Das Nachschwingen ist beim Silentblockdämpfer deutlicher ausgeprägt als beim Drahtseildämpfer.



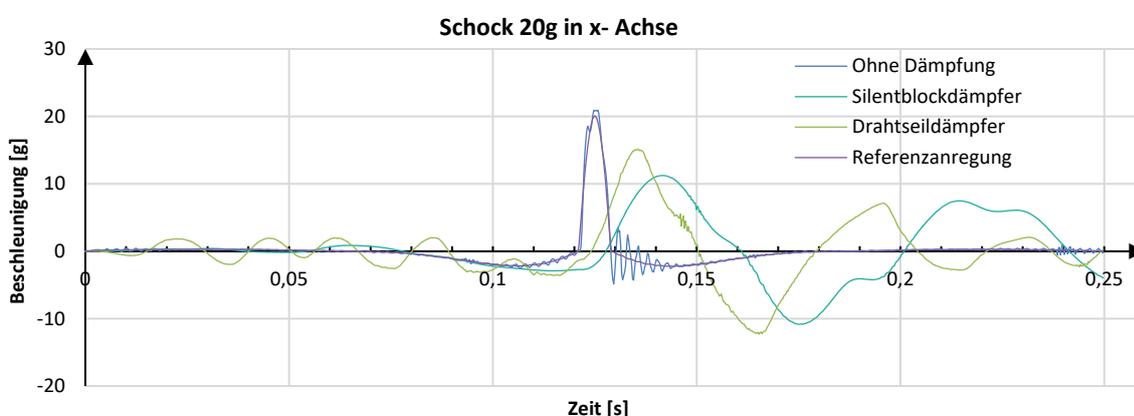
2-17: Wirkung der Dämpfer in z- Achse bei 20g Schockbeanspruchung, Position G Hollowblock

In y- Richtung wird der Referenzschock stärker verzögert und um mehr als 60% (Silentblock) bzw. 70% (Drahtseildämpfer) gemindert. Die Erklärung dafür liegt darin, dass beide Dämpfer in y- Richtung verminderte Steifigkeit aufweisen und somit Querbeanspruchungen besser in Verformungsenergie umgewandelt wird. Das Abschwingen benötigt in beiden Achsen länger als im ungedämpften Zustand, wobei in y- Richtung die Abschwingungsamplituden höher als in x ausfallen. Dieses Verhalten impliziert, dass die Elastizität in x- Achse weniger ausgeprägt ist als in y- Achse.

Messungen



2-18: Wirkung der Dämpfer in y- Achse bei 20g Schockbeanspruchung, Position K Sammelkontakt



2-19: Wirkung der Dämpfer in x- Achse bei 20g Schockbeanspruchung, Position R Seite links unten

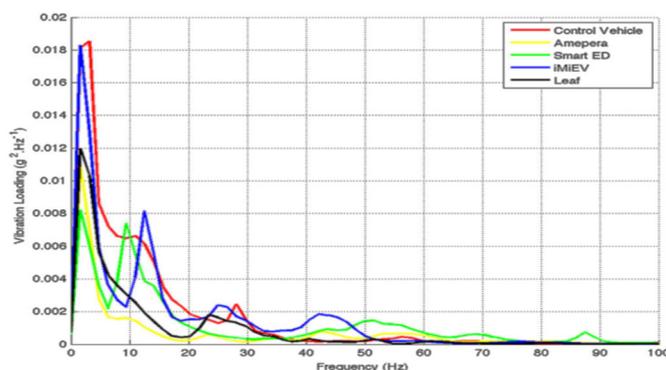
Die (mit derzeitigem Entwicklungsstand) unbefestigte Endplatte erfährt bei diesem Schock in z- Richtung einen Schwingungsweg von 2mm. Aufgrund dieses Ergebnisses werden konstruktive Änderungen bei zukünftigen Modulen einfließen.

Der Versuch zeigt, dass die Dämpfungselemente zur Minderung von Schockbeanspruchungen nicht geeignet sind, da die Dämpfung sich nur in einer Achse erfolgreich äußert und das längere Nachschwingen mit höheren Wechselbeanspruchungen verbunden ist welches sich negativ auf die mechanische Dauerhaltbarkeit auswirkt.

Die Untersuchungen der Schockdämpfungseigenschaften der Dämpfer führt zu folgendem Schluss: Einseitig angebrachte Dämpfer führen zu unterschiedlichen Dämpfungseffekten in allen Achsen. Weichere Dämpfer führen nur bedingt zu einer Reduzierung der einwirkenden Schockbelastung und zu einem deutlich längeren Nachschwingen, während hingegen steifere Dämpfer Schockbelastungen kaum reduzieren. Die in diesem Fall besser scheinenden, weichen Dämpfer stehen allerdings im Gegensatz zu den Vibrationsmessungen, bei denen die Resonanzfähigkeit durch weiche Dämpfer in den niederfrequenten Bereich verschoben werden. Aus diesen Feststellungen heraus wird der Schluss gezogen, dass die verwendeten Dämpfungselemente keinen positiven Einfluss auf die Batteriemodule ausüben und sogar schlechter für diese sein können.

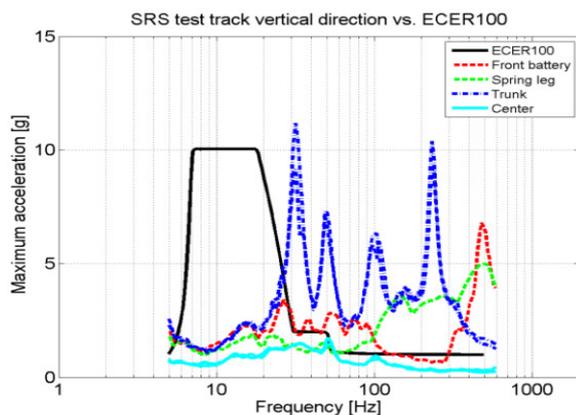
2.4 Messung realer Schwingungen an Traktionsbatterie

Die Grundlage für das Erstellen eines Schwingungsprofils zur Lebensdauerprüfung basiert auf der Messung von tatsächlich auftretenden Schwingungseinflüssen im realen Fahrbetrieb. Ohne diese Messungen würde ein Prüfprofil kaum Aussagekraft besitzen und nicht zweckvolle Ergebnisse liefern. Zu diesem Thema werden die Ergebnisse zweier wissenschaftlicher Veröffentlichungen zur Argumentation herangezogen. An der University of Warwick wurden 2011 Schwingungsmessungen an diversen elektrischen Fahrzeugen durchgeführt. Diese Messungen (Abbildung 2-20) zeigen, dass die Vibrationsbelastung auf die Traktionsbatterie hauptsächlich im unter 100Hz Bereich zu Tragen kommt [18]. Die Ausprägung unterscheidet sich je nach Fahrzeugtyp in diesem Bereich zwar stärker, jedoch lässt sich aus den Messungen ein Grenzbereich ableiten, welcher von den Schwingungsgrößen nicht überschritten wird.



2-20: Vibrationsmessungen an verschiedenen BEV in z- Richtung [18]

Das SP Technical Research Institute of Sweden führte ähnliche Messungen durch und untersuchte unter anderem die Vibrationseinflüsse an verschiedenen Fahrzeugpositionen, siehe Abbildung 2-21.



2-21: Schwingungsmessung an verschiedenen Fahrzeugpositionen [19]

Ein Ergebnis, welches sich aus dieser Untersuchung unter anderem ableiten lässt, ist, dass Schwingungsspitzen am stärksten am Fahrzeugheck bzw. im Kofferraum auftreten [19]. Traktionsbatterien, welche im Fahrzeugboden integriert sind, erfahren demzufolge die geringste Schwingungsbelastung, da sich hier ein Mittelwert aus der Dämpfung zwischen Vorder- und

Hinterradaufhängung ergeben. Die im Fahrzeugheck auftretenden Beschleunigungen ergeben sich jedoch fast ausschließlich durch die Hinterradaufhängung. In Kombination mit dem geringeren Abstand zu den Krafteinleitungspunkten an den heckseitigen Domlagern fallen die Beschleunigungen hier sehr hoch aus. Auf Basis der genannten Publikation des SP Technical Research Institute of Sweden [19] wurde die Annahme getroffen, dass ein E-Fahrzeug mit heckseitig liegender Traktionsbatterie für Vibrationsmessungen am geeignetsten ist, da an dieser Position die Beschleunigungen höher ausfallen als im Fahrzeugboden. Das Übertragen der Messergebnisse eines solchen Fahrzeuges auf BEVs mit im Fahrzeugboden angeordneten Batterien sollte prinzipiell möglich sein, ist aber nicht repräsentativ und unter Umständen fehlerbehaftet. Die Messwerte einer heckseitig gelegenen Batterie liegen laut der Publikation des SP Technical Research Institute of Sweden [19] über jene der anderen Fahrzeugpositionen. Wird also aus einer Messung eines BEV mit heckseitig liegender Batterie ein Vibrationslebensdauerprofil abgeleitet, so bedeutet dies, dass die Batterien anders strukturierter BEVs mit dem selben Profil höheren Belastungen ausgesetzt sind. Um konkrete Lebensdauerprofile Fahrzeug-spezifisch zu erstellen, ist eine Vibrationsmessung des betreffenden BEV notwendig.

Die derzeit (2018) meist verbreitetste Einbaulage von Traktionsbatterien ist im Fahrzeugboden zwischen Vorder- und Hinterradaufhängung (Tesla Model S, Tesla Model X, Nissan Leaf, Hyundai Ioniq, VW E-Golf, Renault Zoe und BMW i3). Die Schwingungsbelastung in der Mitte einer solchen Batterie ist aufgrund des hohen Abstands zu den Domlagern weit niedriger als an Positionen mit knapper Nähe zu den Domlagern. Es ist naheliegend Messungen an höher belasteten Positionen geringer belasteten Positionen vorzuziehen. Deshalb wird im Rahmen dieser Masterarbeit schlussgefolgert Schwingungsmessungen mit Nähe zum Domlager durchzuführen. Dies trifft auf das hintere Ende von im Fahrzeugboden liegenden Batterien zu oder für im Fahrzeugheck integrierte Batterien.

2.4.1 Elektrisches Testfahrzeug

Ein elektrisches Fahrzeug, welches für die Messung von Schwingungseinflüssen auf die Traktionsbatterie geeignet ist, ist ein auf Elektroantrieb umgebauter Audi A2 von der Firma Kreisel Electric Baujahr 2004. Die Traktionsbatterie befindet sich im Boden des Kofferraumes, genau zwischen den Domlagern der hinteren Radaufhängung. In diesem Bereich ist der Schwingungseintrag, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, am höchsten. Der Elektroantrieb wurde so implementiert, dass das manuelle 5-Gang Schaltgetriebe und die manuelle Kupplung erhalten blieb. Servolenkungspumpe, Bremskraftverstärker und Klimakompressor wurden zusätzlich eingebaut und sind elektrisch betrieben. Die Fahrzeugspezifikationen sind in Tabelle 3 angeführt.



2-22: Testfahrzeug: Elektrischer Audi A2

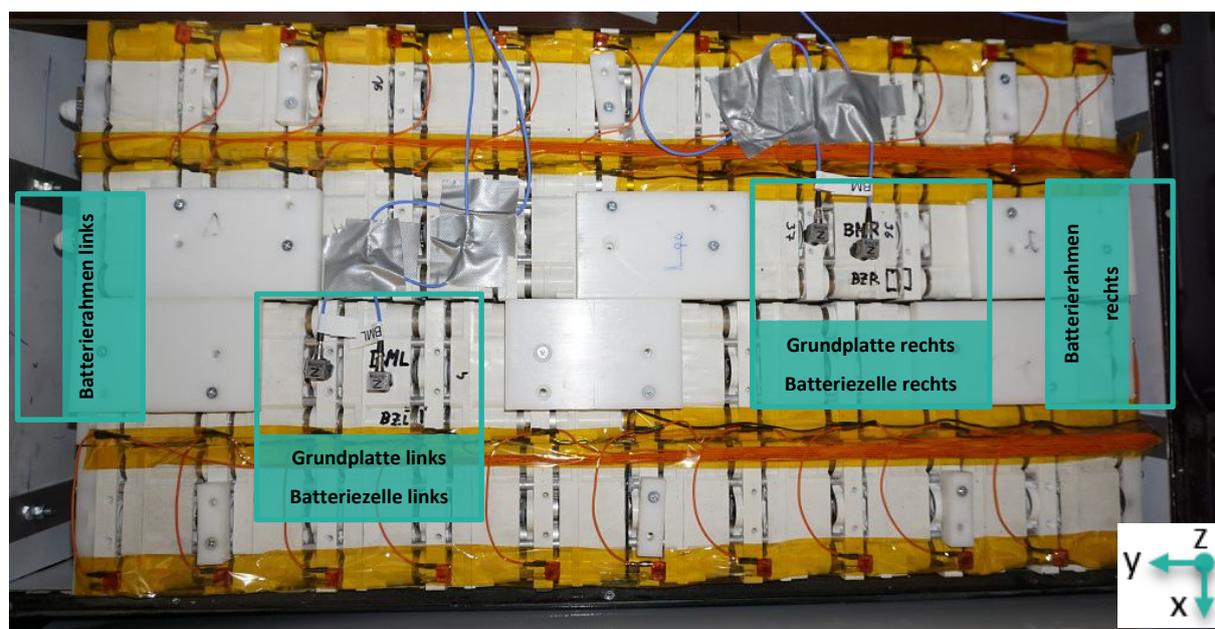
Tabelle 3: Fahrzeugspezifikationen des Testfahrzeuges

Audi A2 Spezifikationen		Traktionsbatterie Spezifikationen	
Baujahr	2004	Zelltyp	Samsung 29E
Motorotyp	Asynchronmotor	Zelltyp	18650
Motorleistung	40kW	Systemspannung	100V
bei Drehzahl	3225 U/min	Energieinhalt	20kWh
Eigengewicht	1200kg	Zellenanzahl	2576
Zulässiges Gesamtgewicht	1535kg	Modul	28s92p
Höchstgeschwindigkeit	135km/h	Kühlung	Umgebungsluft

Bei der Batteriekonfiguration handelt es sich um zwei parallel geschaltete 28s46p Batteriestrings auf 1s46p Basis. Die Batteriekapazität entspricht ungefähr jener des BMW i3 (60Ah) aus 2014.

2.4.2 Sensorpositionen am Fahrzeug

Das Testfahrzeug wurde in Zusammenarbeit mit dem ViF (Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug Forschungs- GmbH Graz) mit Messequipment ausgestattet. Dabei wurden sieben triaxiale Beschleunigungssensoren in Kombination mit einem Siemens LMS Scadas Datenlogger appliziert. Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 2.3.2 (Spektralanalyse eines 2s46p Moduls ohne Dämpfung) wurden die Sensorpositionen gewählt. Die Traktionsbatterie wurde mit vier Sensoren, je zwei in Mitte der Grundplatte und zwei in Mitte der Kühlkörper, versehen (Abb. 2-23). Die Schwingungen an der Gehäuseaufnahme der Traktionsbatterie wurde durch zwei Sensoren aufgenommen, als Referenz zur Eingangsschwingung befindet sich der siebte Sensor direkt am Domlager am rechten hinteren Rad.



2-23: Mit Beschleunigungssensoren bestückte Traktionsbatterie des Testfahrzeuges

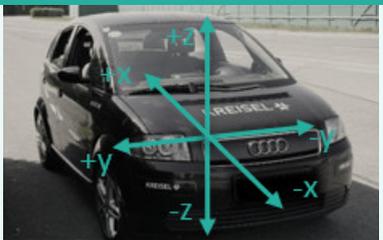
Messungen

In Tabelle 4 sind die Sensorpositionen und Sensorbezeichnungen ersichtlich. Der Sensor DLR sitzt direkt am rechten Domlager (nicht auf dem Bild zu sehen) und erfasst jene Schwingungen, welche direkt in die Karosserie einwirken. Wird eine Schwingung in einen elastischen Körper eingeleitet, so baut sich diese mit fortschreitendem Weg aufgrund der Energieaufnahme in das Material ab.

Die Sensoren sollten bei Annahme einer elastischen Karosserie eine verminderte Schwingung aufweisen, da auf dem Weg vom Domlager zu den einzelnen Positionen eine Dämpfung eintreten sollte. Tritt dieser Fall nicht ein, so können Resonanzpunkte entstehen, welche die Anregung des Domlagers sogar verstärken. Dies ist kann dann der Fall sein, wenn die Karosserie besonders steif ausgeführt ist und Schwingungsenergie anstatt aufgenommen, weitergeleitet wird.

Tabelle 4: Sensorbezeichnungen und Positionen

Nr	Bezeichnung	Beschreibung
1	DLR	Domlager rechts hinten
2	BRR	Batterierahmen rechts
3	BRL	Batterierahmen links
4	BMR	Batteriemodul Grundplatte rechts
5	BML	Batteriemodul Grundplatte links
6	BZR	Batteriezelle Kühlkörper rechts
7	BZL	Batteriezelle Kühlkörper links



2.4.3 Messfahrten auf Testgelände

Um reale Vibrationsdaten von Traktionsbatterien zu messen und mit diesen ein Fahrzeug-spezifisches Lebensdauerprofil zu erstellen, sind definierte Messfahrten notwendig. Auf dem Fahrzeugtestgelände der Magna Steyr GmbH fanden am 8.11.2017 diese Messfahrten statt. Gemessen wurden am Fahrzeug und Traktionsbatterie auftretende Beschleunigungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten (20, 30, 50, 70 und 90km/h) auf diversen Fahrbahnprofilen wie feiner und grober Asphalt, feines und grobes Kopfsteinpflaster sowie belgisches Kopfsteinpflaster bei hohem und niedrigen Batterieladezustand, näheres dazu siehe Tabelle 5. Batteriezellen auf Lithium-Ion Basis weisen die Eigenschaft auf, dass sie sich mit zunehmenden Ladezustand ausdehnen. Zuvor im Labor durchgeführte Messungen zeigen, dass sich 18650er Zellen um max. 0,1mm am Durchmesser bei 100% SOC ausdehnen. Um einen dadurch entstehenden möglichen Effekt auf die Batteriemodule auszuschließen wurden die Messfahrten mit verschiedenen Ladezustände durchgeführt. Die angeführten SOC Bereiche „high“ und „low“ geben den Batterieladezustand an, dabei bedeutet „high“ ein SOC Bereich von 80% - 90% und „low“ einen SOC Bereich von 20% - 30%.

Tabelle 5: Testfahrten bei unterschiedlichen Fahrprofilen

Nr	Time	Velocity	Ground	SOC	Nr	Time	Velocity	Ground	SOC
1	08:24h	50km/h	fine asphalt	high	15	10:56h	30km/h	rough asphalt	low
2	08:26h	50km/h	fine cobblestone	high	16	10:57h	30km/h	fine asphalt	low
3	08:27h	50km/h	rough asphalt	high	17	10:58h	30km/h	fine cobblestone	low
4	08:35h	30km/h	fine asphalt	high	18	11:00h	50km/h	fine asphalt	low
5	08:37h	30km/h	rough asphalt	high	19	11:01h	50km/h	rough asphalt	low
6	08:40h	30km/h	fine cobblestone	high	20	11:02h	50km/h	fine cobblestone	low
7	08:42h	30km/h	rough cobblestone	high	21	11:03h	70km/h	fine cobblestone	low
8	08:45h	70km/h	rough asphalt	high	22	11:04h	70km/h	fine asphalt	low
9	08:46h	50km/h	rough cobblestone	high	23	11:05h	70km/h	rough asphalt	low
10	08:47h	70km/h	fine cobblestone	high	24	11:06h	90km/h	fine asphalt	low
11	08:48h	90km/h	fine cobblestone	high	25	11:07h	90km/h	fine cobblestone	low
12	08:50h	90km/h	fine asphalt	high	26	11:08h	90km/h	rough asphalt	low
13	08:52h	90km/h	rough asphalt	high	27	11:09h	30km/h	rough cobblestone	low
14	08:56h	20km/h	belgian block	high	28	11:10h	50km/h	rough cobblestone	low

2.5 Messdatenauswertung

Die Messdatenauswertung erfolgte mittels Siemens LMS Test.Lab 16A Software. Die Messrohdaten umfassen 28 Messfahrten auf fünf verschiedenen Fahrbahnprofilen und vier Geschwindigkeitsniveaus. Dabei wurden sieben triaxiale Beschleunigungsaufnehmer appliziert, insgesamt also 980 aufgezeichnete Signale welche in Rohform als Beschleunigung über Zeit aufgezeichnet wurden.

Die Messdaten können durch verschiedene Herangehensweisen analysiert werden, die wichtigsten Methoden folgen in den nächsten Kapiteln.

Die verschiedenen Analysen geben Antworten auf folgende Fragen:

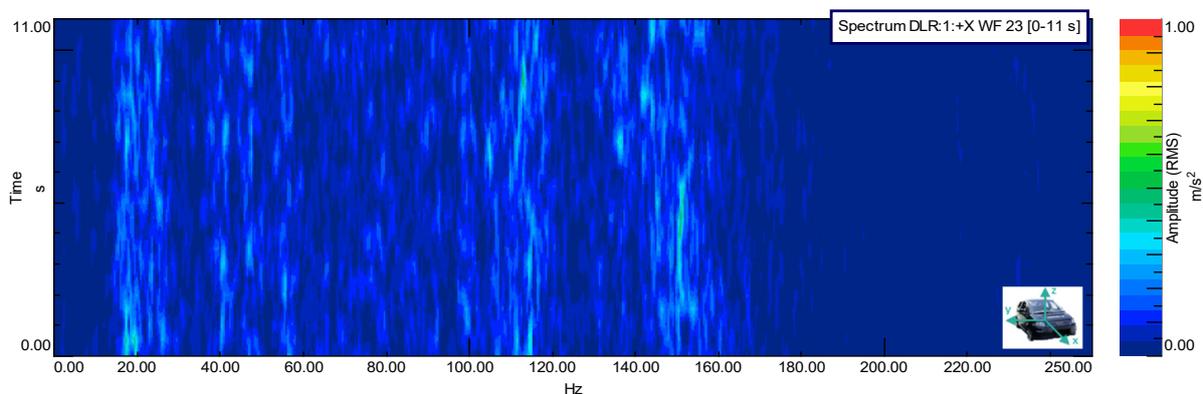
- Welche Amplituden treten wo bei welcher Frequenz, abhängig von Geschwindigkeit, Fahrbahn und Dimension auf?
- Wie elastisch bzw. steif ist die Karosserie? Tritt eine Dämpfung oder Verstärkung bis zur Batterie auf?
- Wo sind kritische Positionen, welche Position ist geeignet um den Schwingungseintrag auf die Batterie z beschreiben?

Ein Ergebnis vorweg: Der Ladezustand der Batterie zeigte keinen Einfluss auf die Messergebnisse, die Änderung am Durchmesser der Zelle ist zu klein, um eine Festigkeitsänderung und ein anderes Schwingverhalten herbeizuführen, welches von den Beschleunigungssensoren erfasst werden konnte.

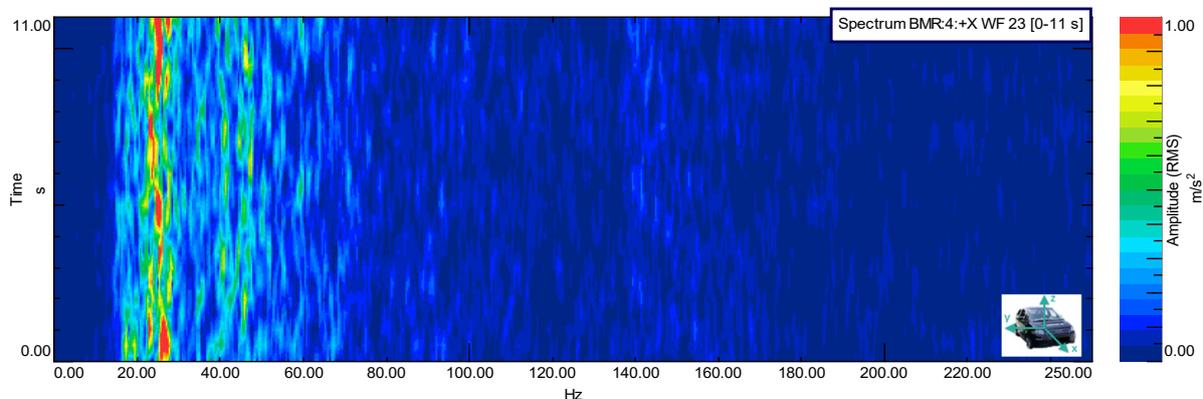
2.5.1 Analyse der Rohdaten im Zeitbereich

Die Testfahrten dauern im Durchschnitt 30 Sekunden. Beginnend nach 10 Sekunden nach Messstart wurden je 11 Sekunden Segmente gewählt, um einen eingeschwungenen Zustand darzustellen und über diesen Zeitraum Frequenz und Beschleunigung grafisch darzustellen. Aus den folgenden Campbell Diagrammen sieht man auf den ersten Blick anhand der farblichen Unterschiede welche Frequenzbereiche zu welcher Zeit angeregt werden und welche Bereiche energetisch betrachtet weniger interessant sind. Die Campbell Diagramme werden je Achse in x, y und z gegenübergestellt, so vergleicht sich das Anregungsspektrum am Domlager mit der gemessenen Anregung am Batteriemodul.

In x- Achse ist erkennbar, dass bei geringer Anregung des Domlagers und Übertragung zum Batteriemodul zu einer Verstärkung der Anregung kommt. Das Batteriemodul bewegt sich im Bereich 18Hz bis 50Hz im resonanten Bereich. Es wird hier mehr Energie umgesetzt als am Domlager(!). Aus den zuvor durchgeführten Spektralanalysen und Untersuchungen mit Dämpfungselementen lässt sich schließen, dass in Fahrzeughängsrichtung wenig Energie entlang des Lastpfades aufgenommen wird d.h. Schwingungen werden gut weitergeleitet. Die Schwingungen werden wie bei einer Silentblockdämpfung zu einem Resonanzpunkt in den niederfrequenten Bereich verlagert.

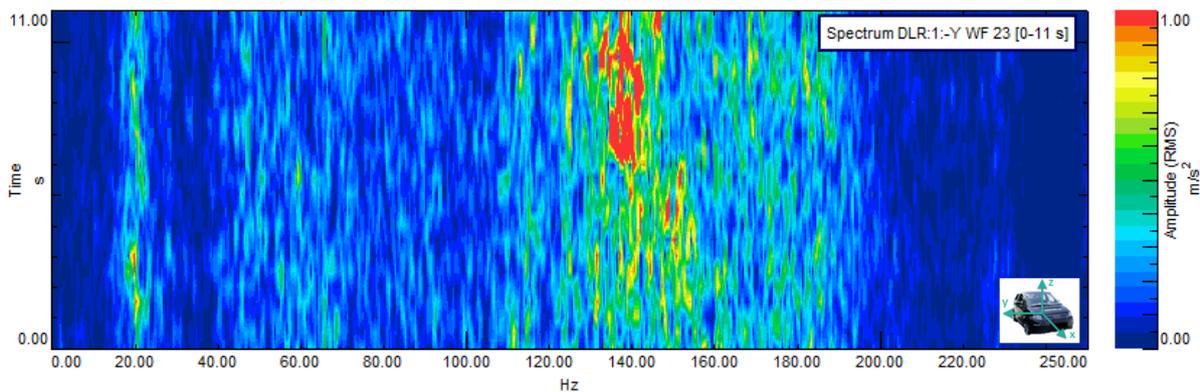


2-24: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Domlager in x

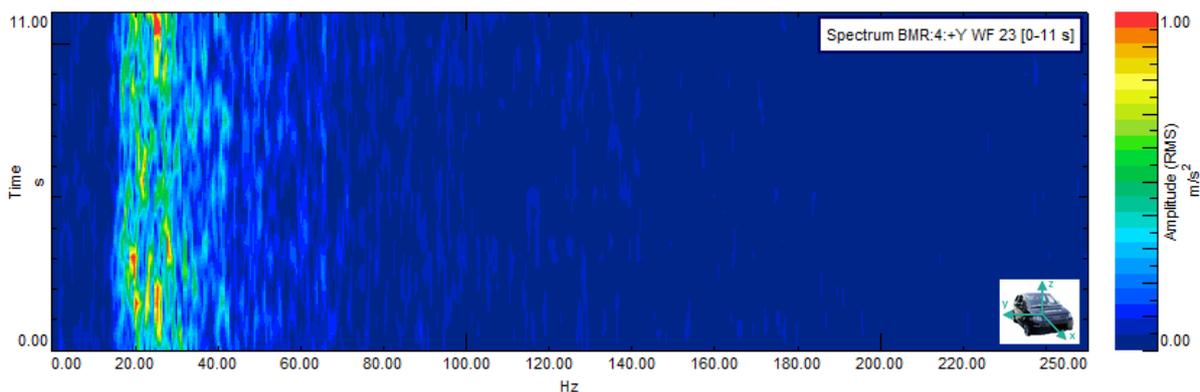


2-25: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Batteriemodul in x

Auch in y- Achse ist ein Resonanzbereich innerhalb der gleichen Frequenzgrenzen wie in x feststellbar, die Verstärkung ist jedoch nicht sehr stark ausgeprägt. Dies ist ein Indiz dafür, dass in Fahrzeugquerrichtung mehr Energie aufgenommen wird als in Fahrzeuginnenrichtung. Der hohe Energieeintrag am Domlager bei 140Hz setzt sich aus den Querbelastungen vom Rad kommend über Stoßdämpfer und Feder zusammen und wird bis zur Batterie fast zur Gänze gemindert.

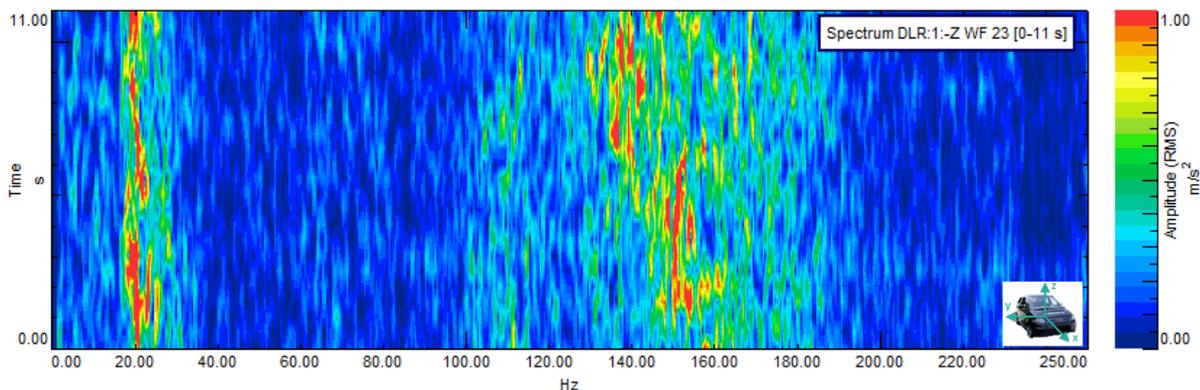


2-26: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Domlager in y



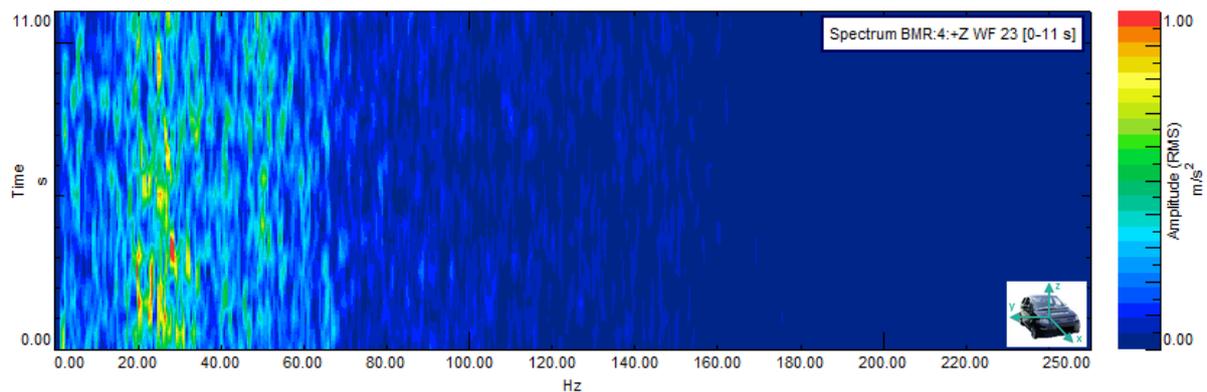
2-27: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Batteriemodul in y

In z- Achse werden Schwingungen über alle Frequenzbereiche gedämpft, in diesem Bereich treten an den gemessenen Positionen keine Resonanzfälle auf. Die Karosserie nimmt entlang des Lastpfades die eingetragene Schwingungsenergie bis hin zur Batterie zu einem Großteil auf.



2-28: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Domlager in z

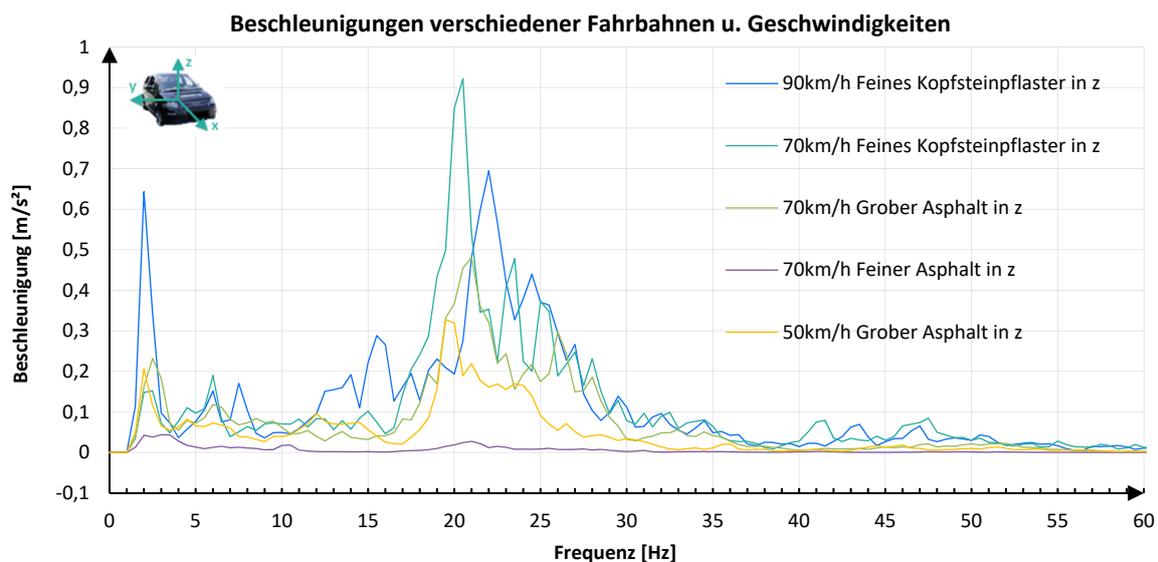
Messungen



2-29: Angeregte Frequenzbereiche bei 70km/h u. feinem Kopfsteinpflaster, Batteriemodul in z

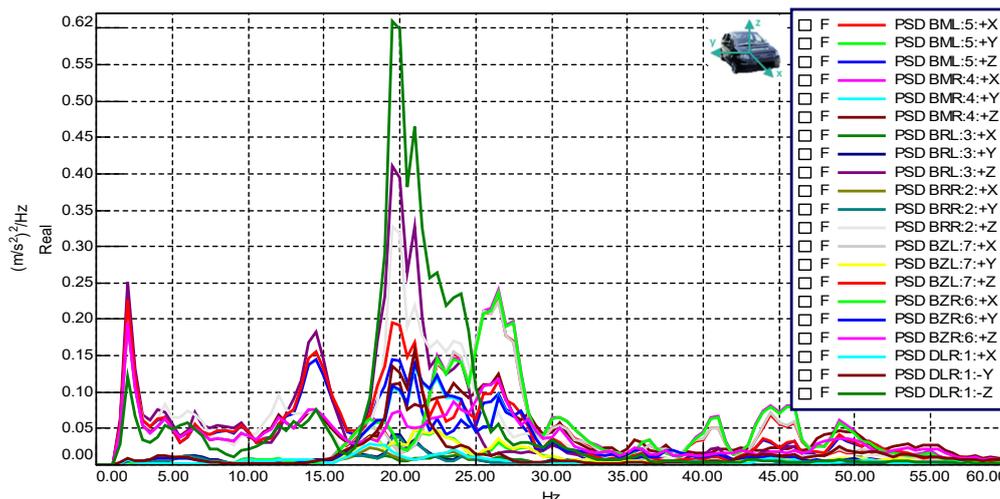
2.5.2 Analyse der signifikanten Frequenzbereiche

Da die Messrohdaten im Zeitbereich vorliegen, müssen diese zuerst mit Hilfe der Fourier Transformation in den Frequenzbereich umgerechnet werden. Wird diese Umrechnung grafisch als Diagramm dargestellt, so sind daraus die signifikanten Frequenzbereiche schnell ablesbar. Nachdem die Resonanzbereiche von der Fahrzeuggeschwindigkeit sowie von der Fahrbahnbeschaffenheit abhängig sind, weisen die Messfahrten verschiedene Resonanzspektren auf. In Abbildung 2-30 werden die Sensorsignale des rechten Batterierahmensensors in z verglichen. Die Resonanzpunkte bewegen sich zwischen 15 und 30Hz, eine Änderung der Geschwindigkeit oder der Fahrbahn führt zu einer Änderung der Faktoren für Schwingungsverstärkung bzw. Schwingungsdämpfung. Hohe Geschwindigkeiten verlagern den Eigenfrequenzpunkt Richtung 30Hz



2-30: Vergleich: Beschleunigungsmessungen am Batterierahmen rechts (BRR) in z- Richtung

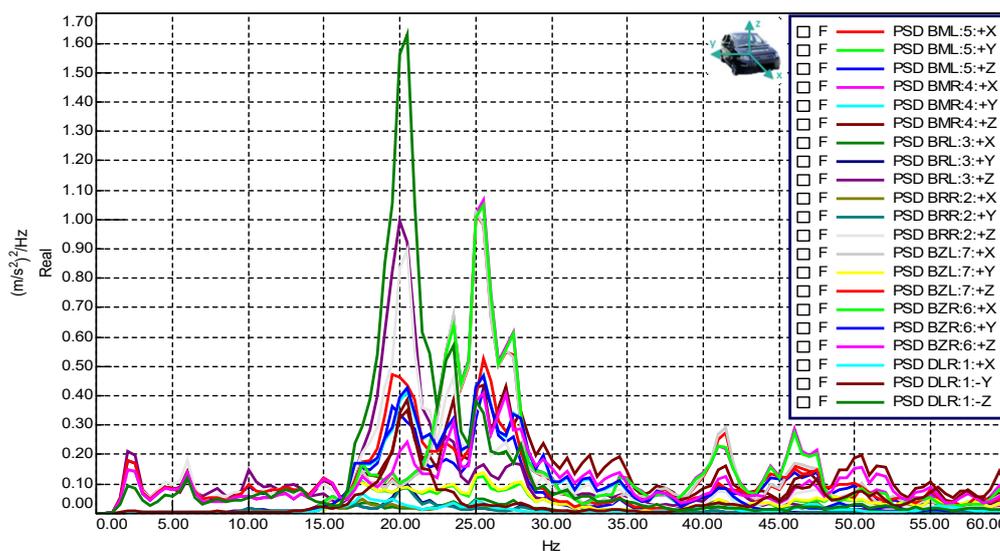
Einen guten Schnitt aller Fahrprofile stellt eine Fahrt bei 50km/h auf groben Asphalt dar, siehe Abbildung 2-31, in welchem die Signale als PSD Größen (Power Spectral Density) dargestellt sind.



2-31: PSD Verteilung bei 50km/h auf groben Asphalt

Bei durchschnittlichen Fahrten mit 50km/h bedeutet das, dass bis 60Hz die empfindlichsten Bereiche liegen in welchen die Schwingungsenergie am höchsten umgesetzt werden kann.

Die nächste Abbildung zeigt Messwerte bei 70km/h auf feinem Kopfsteinpflaster sehr detailliert im Bereich bis 60Hz um die Auswirkungen der Schwingungsenergieabnahme vom Domlager bis hin zur Batteriezelle frequenzabhängig nachzuvollziehen. Die Detailauswertung bestätigt die Schlussfolgerungen der zuvor auf dem Schwingungsprüfstand durchgeführten Spektralanalysen: Die Batteriezellen verhalten sich schwingungstechnisch gleich wie die Batteriemodule und liegen hinsichtlich Beschleunigungswerte fast gleich, jedoch tendenziell etwas unterhalb der der Batteriemodule auf. Auch ist erkennbar, dass die Batteriemodule in zwischen 22Hz bis 27Hz einen ausgeprägten Resonanzbereich in x- Achse aufweisen, gleich wie bei 50km/h auf grobem Kopfsteinpflaster.



2-32: PSD Verteilung bei 70km/h auf feinem Kopfsteinpflaster

2.5.3 Analyse mittels RMS Absolutwerten im Frequenzbereich

Aus Spektralanalysen erfährt man bereits wichtige Informationen wie Resonanzbereiche und die Höhe der auftretenden Amplituden. Um die Messfahrten hinsichtlich Gesamtenergieeintrag und nicht nach Amplitudenhöhe einzuteilen und zu vergleichen, bietet es sich an einen repräsentativen Parameter zu definieren. Dafür eignet sich der RMS Wert (root mean square) der Messfahrten. Die Rohdaten müssen dafür zuerst mittels FFT Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich transformiert werden. Daraus werden die frequenzabhängigen Ergebnisse über den ausgewählten Frequenzbereich (z.B. 2 bis 1000Hz) quadriert, aufsummiert, gemittelt und die Quadratwurzel gebildet (Formel 2.1).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{p+1} \sum_{i=0}^p (y_i)^2} \quad (2.1)$$

Das Ergebnis ist ein positiver Beschleunigungswert, welcher den Energieeintrag über den ausgewählten Frequenzbereich einer Fahrt wiedergibt. In Tabelle 6 sind diese auftretenden Schwingungsenergien je nach Fahrt aufgelistet. Die x-Achse liegt in Fahrtrichtung, y-Achse in Fahrzeugquerachse und die z-Achse in Fahrzeughochachse. Es ist eindeutig feststellbar, dass die akkumulierte Schwingungsenergie mit steigender Fahrbahnrauheit und höherer Fahrzeuggeschwindigkeit in allen Fahrzeugachsen zunimmt. Der Energieeintrag in Fahrzeuglängsrichtung (x) ist deutlich geringer als in Querrichtung (y) und Fahrzeughochachse (z). Der Grund dafür liegt in der Radaufhängung: Aufgrund des in der y-z Ebene schräg eingebauten Stoßdämpfers wird die Energie in y und z aufgeteilt, wodurch der y- Anteil relativ groß ausfällt.

Tabelle 6: Auftretende PSD Größen am rechten Domlager DLR in x, y und z

Test-Drive	Ground	Velocity [km/h]	DLR_X	DLR_Y	DLR_Z	$\sqrt{y^2 + z^2 + x^2}$
			RMS 2-1000Hz [m/s ²]			
1	fine asphalt "fa"	30	0.16	0.32	0.42	0.55
2	fine asphalt "fa"	50	0.18	0.43	0.59	0.75
3	fine asphalt "fa"	70	0.24	0.52	0.77	0.96
4	fine asphalt "fa"	90	0.31	0.65	0.94	1.18
9	rough asphalt "ga"	30	0.43	0.86	1.2	1.54
10	rough asphalt "ga"	50	0.63	1.38	2.13	2.61
11	rough asphalt "ga"	70	0.78	1.75	2.77	3.37
12	rough asphalt "ga"	90	0.91	2.14	3.39	4.11
5	fine cobblestone "fcp"	30	1.07	2.23	2.22	3.32
6	fine cobblestone "fcp"	50	1.35	3.49	3.86	5.38
7	fine cobblestone "fcp"	70	1.64	5.44	6.01	8.27
8	fine cobblestone "fcp"	90	1.82	5.94	6.96	9.33
13	rough cobblestone "gcp"	30	1.04	2.15	2.53	3.48
14	rough cobblestone "gcp"	50	1.2	3.22	3.52	4.92
15	belgian block "bb"	20	1.28	2.46	2.92	4.03

Aus den Schwingungseintragungswerten wird die Messung bei 70km/h auf feinem Kopfsteinpflaster genauer untersucht. Im Vergleich zu anderen Fahrsituationen stellt diese Messfahrt noch eine realistisch mögliche Fahrsituation dar, bei welcher die höchsten Schwingungsbelastungen auftreten. In Tabelle 7 werden nun repräsentativ auch für andere Messungen die PSD Werte gegenübergestellt. Theoretisch sollte entlang des Lasteinleitungspfades vom Domlager auf den Batterierahmen und auf das Batteriemodul bis zur Zelle eine Dämpfung stattfinden. Der Dämpfungsfaktor ist das Verhältnis bezogen auf die DLR Eingangsgröße je Achse auf die jeweilige Sensorposition. Ist dieser Faktor kleiner als eins, findet eine Dämpfung statt, wenn er größer eins ist, tritt eine Verstärkung der Ausgangsschwingung wegen Resonanz auf. Die Resonanzen sind geprägt durch die Eigenfrequenzen verschiedener Materialien sowie deren Massen, Geometrien und Positionen entlang des Lastpfades.

Tabelle 7: PSD Werte an allen Sensoren und Dämpfungsfaktor bei 70km/h auf feinem Kopfsteinpflaster

Pos.	RMS	Dämpfung	Pos.	RMS	Dämpfung	Pos.	RMS	Dämpfung
DLR_X	1,64		DLR_Y	5,44		DLR_Z	6,01	
BRR_X	1,46	0,89	BRR_Y	1,35	0,25	BRR_Z	3,19	0,53
BRL_X	1,48	0,90	BRL_Y	1,24	0,23	BRL_Z	3,25	0,54
BMR_X	3,08	1,88	BMR_Y	2,3	0,42	BMR_Z	2,92	0,49
BZR_X	3,07	1,87	BZR_Y	2,37	0,44	BZR_Z	2,66	0,44
BML_X	3,07	1,87	BML_Y	1,65	0,30	BML_Z	2,51	0,42
BZL_X	3,13	1,91	BZL_Y	1,87	0,34	BZL_Z	2,73	0,45

Mithilfe des Dämpfungsfaktors lässt sich sehr einfach zeigen wie gut die Schwingungsdämpfung bzw. Anregungsverstärkung tatsächlich ist. Es zeigt sich, dass in Fahrzeughochachse z eine durchgehende Dämpfung bis zur Zelle erfolgt.

In Fahrzeuginnenrichtung x erfolgt nur minimale Dämpfung auf den Batterierahmen. Die Batteriemodule selbst werden hier in einem Resonanzpunkt angeregt und verstärken die Anregungsfrequenz nahezu um das Doppelte in Relation zum rechtsgelegenen Domlagersensor.

In Fahrzeugaußenrichtung y findet die effektivste Dämpfung statt, allerdings ist auch hier eine Resonanzverstärkung der Batteriemodule feststellbar: Die Dämpfung des zum Domlager näher gelegenen rechten Batteriemoduls fällt schwächer aus als zum weiter weg gelegenen linken Batteriemodul. Würde das linke Batteriemodul mit dem linken Domlager verglichen werden, sollte sich theoretisch der gleiche Wert wie rechts einstellen.

Als Referenz zum feinem Kopfsteinpflaster sieht man in Tabelle 8, dass bei feinem Asphalt dieselben Resonanzpunkte auftreten. Weiters ist ersichtlich, dass die Dämpfung durch die Karosserie in Fahrzeughochachse bei geringerer Anregung auch verhältnismäßig gering ausfällt. In Fahrzeuginnenrichtung findet unabhängig von der Geschwindigkeit eine starke Verstärkung auf

Messungen

Rahmen und Batterie statt. Dieser Effekt lässt auf eine verlustfreie Weiterleitung von Schwingungen schließen, der Übertragungsweg ist demnach besonders steif.

Tabelle 8: PSD Werte an allen Sensoren und Dämpfungsfaktor bei 70km/h und feinem Asphalt

Pos.	RMS	Dämpfung	Pos.	RMS	Dämpfung	Pos.	RMS	Dämpfung
DLR_X	0,24		DLR_Y	0,52		DLR_Z	0,77	
BRR_X	0,2	0,83	BRR_Y	0,24	0,46	BRR_Z	0,67	0,87
BRL_X	0,21	0,88	BRL_Y	0,23	0,44	BRL_Z	0,69	0,90
BMR_X	0,57	2,38	BMR_Y	0,36	0,69	BMR_Z	0,61	0,79
BZR_X	0,56	2,33	BZR_Y	0,36	0,69	BZR_Z	0,59	0,77
BML_X	0,53	2,21	BML_Y	0,26	0,50	BML_Z	0,61	0,79
BZL_X	0,54	2,25	BZL_Y	0,28	0,54	BZL_Z	0,64	0,83

Die Resonanzpunkte sind auch abhängig von der Geschwindigkeit. Tabelle 9 zeigt, dass es bei niedrigen Geschwindigkeiten in Fahrzeuginnenrichtung zu einer größeren Verstärkung als bei höheren Geschwindigkeiten kommt. Auch in Fahrzeughochachse fällt die Dämpfung nur schwach aus, d.h. dass entlang des Lastpfades ein Teil der Schwingungsenergie in Verformungsenergie gewandelt wird.

Tabelle 9: PSD Werte an allen Sensoren und Dämpfungsfaktor bei 30km/h und feinem Kopfsteinpflaster

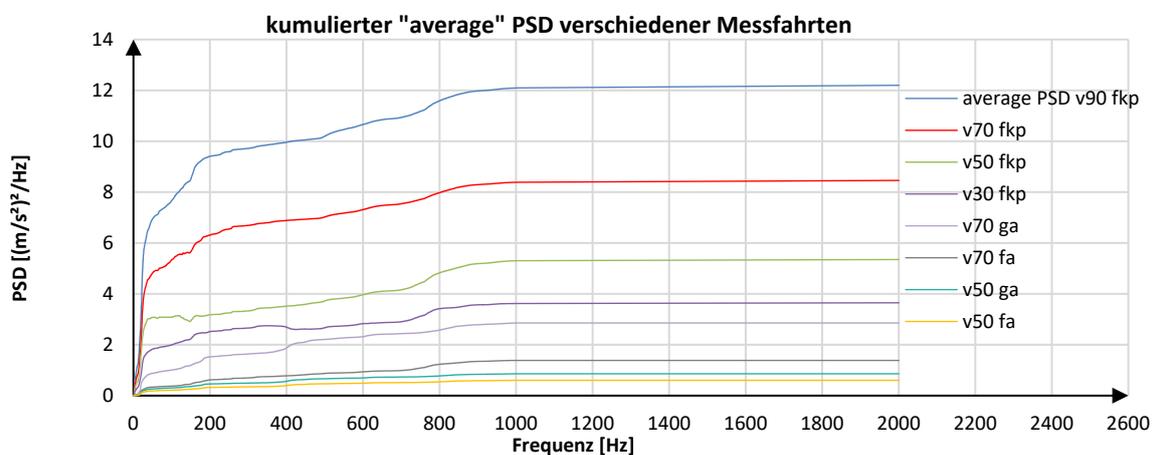
Pos.	RMS	Dämpfung	Pos.	RMS	Dämpfung	Pos.	RMS	Dämpfung
DLR_X	1,07		DLR_Y	2,23		DLR_Z	2,22	
BRR_X	1,05	0,98	BRR_Y	0,83	0,37	BRR_Z	1,84	0,83
BRL_X	1,19	1,11	BRL_Y	0,82	0,37	BRL_Z	1,83	0,82
BMR_X	3,41	3,19	BMR_Y	1,66	0,74	BMR_Z	2,06	0,93
BZR_X	3,38	3,16	BZR_Y	1,67	0,75	BZR_Z	2,06	0,93
BML_X	3,07	2,87	BML_Y	1,42	0,64	BML_Z	2,3	1,04
BZL_X	3,15	2,94	BZL_Y	1,55	0,70	BZL_Z	2,46	1,11

Aus den Berechnungen und Auswertungen durch RMS Werte können folgende Schlüsse gezogen werden: Entlang der Lasteinleitungspfade bleiben Verstärkungs- und Dämpfungseffekte je Achse erhalten, eine Verstärkung kehrt sich nicht in eine Dämpfung um oder umgekehrt. Höhere Geschwindigkeiten und grobe Fahrbahnprofile führen zu höheren Dämpfungs- bzw. Verstärkungsfaktoren.

2.5.4 Auswertung des kumulierten Energieeintrages

Um herauszufinden wie viel Energie in welchem Frequenzbereich umgesetzt wird, eignet es sich die spektrale Leistungsdichte über die Frequenzen zu summieren bzw. kumulieren. Konkret wurde dieser Vorgang folgenderweise durchgeführt: Die relevanten Schwingungsgrößen wurden im Frequenzbereich von 5 bis 2000Hz als „.mat“- File exportiert. In Matlab 2016 wurde ein Skript mit

einem Berechnungsalgorithmus erstellt, der in der Lage ist die Schwingungsgrößen über den Frequenzbereich zu kumulieren. Der Vorgang ist ähnlich zu einem Berechnungsprozess mittels Integration, allerdings lässt sich die umgesetzte Energie zur Frequenz besser darstellen und auswerten. Ziel ist es, ein repräsentatives Schwingungsprofil für spätere Prüfstandtests zu generieren. Für dieses Vorhaben wurden sämtliche PSD Werte und Messprofile jeder Messfahrt untersucht. Es stellt sich heraus, dass die Messungen der Sensoren am Batterierahmen bei 90km/h auf feinem Kopfsteinpflaster am geeignetsten sind. Das ist auch der Punkt, wo der Schwingungseintrag auf das Modul eingeleitet wird. Potentiell könnte auch das Domlagersignal dafür verwendet werden, es scheidet aber aus. Die Begründung dafür liegt darin, dass die Schwingungsenergie vom Domlager bis zum Batterierahmen stark gedämpft wird. Würde bei einem Prüfaufbau das Domlagersignal eingesetzt werden, so müsste auch die Batteriehalterung vom Domlager bis zur Batterie genau wie im Fahrzeug nachgebildet sein. Sensoren an den Batteriemodulen bzw. auf den Kühlkörpern weisen sehr unterschiedliche Resonanzbereiche auf und sind deshalb nur bedingt geeignet, um ein aussagefähiges Profil zu erhalten. Das Fahrprofil bei 90km/h auf feinem Kopfsteinpflaster wurde als Berechnungsgrundlage gewählt, da bei dieser Fahrt die höchsten Amplituden gemessen wurden und eine Extrembelastung im Realfall am besten widergegeben wird. Die gemessenen Beschleunigungen schließen die Ergebnisse der anderen Testfahrten in den Resonanzbereichen ein und decken somit einen Großteil der Fahrbahn- und Geschwindigkeitsprofile sehr gut ab. In der folgenden Abbildung ist dies besonders gut erkennbar:



2-33: Kumulierter Energieeintrag bei verschiedenen Messfahrten

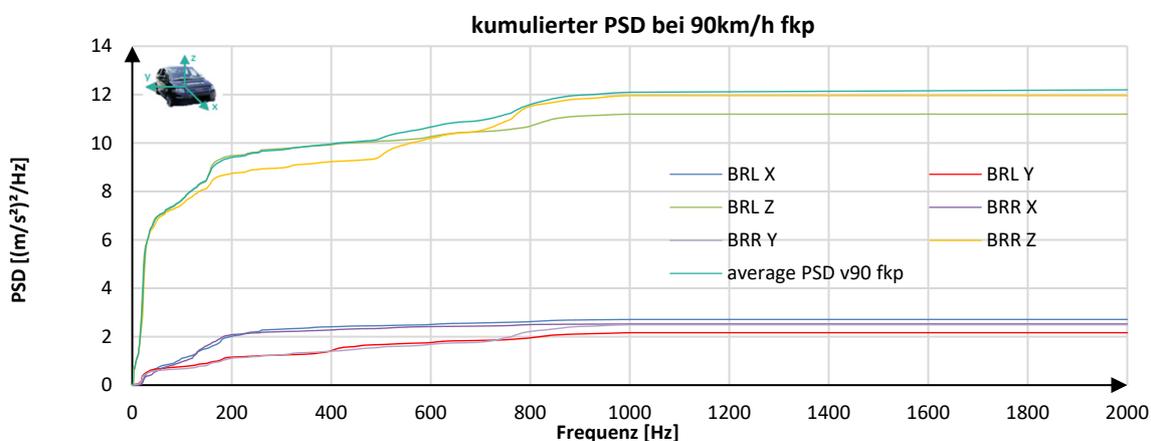
Für die Kumulierung wurden die einzelnen Achsen der Batterierahmensensoren in Matlab ausgewertet. An beiden Sensoren wurde der 3-dimensionale Satz des Pythagoras angewandt, um die Schwingungsenergie in x, y und z zu kombinieren. Der Mittelwert dieser Berechnung bildet die Grundlage für weitere Untersuchungen, der Berechnungsweg für 90km/h auf feinem Kopfsteinpflaster ist in Tabelle 10 dargestellt.

Messungen

Tabelle 10: Kumulierte PSD Werte am Batterierahmen

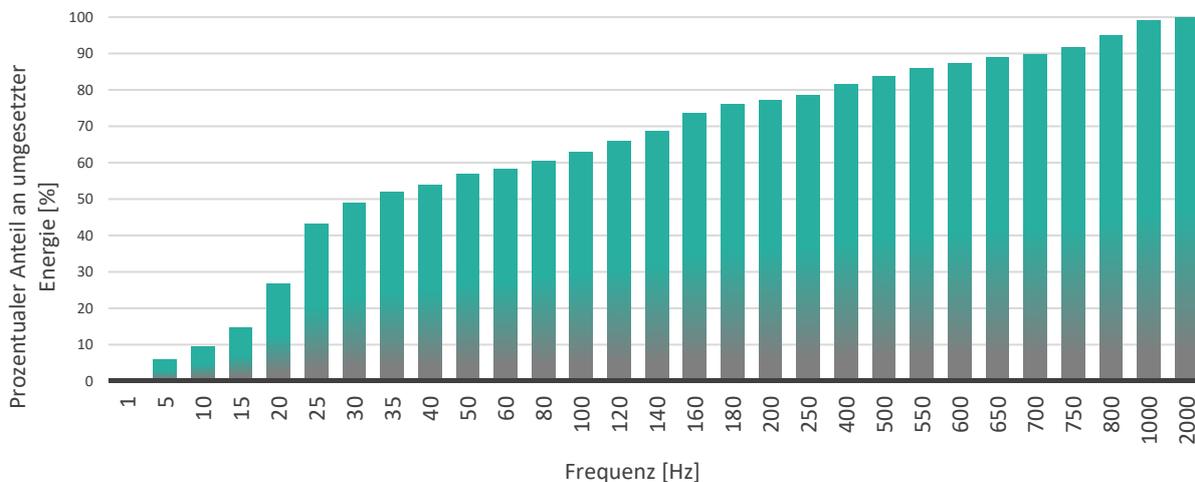
Sensorpos.	Ground	Velocity [km/h]	PSD 2-2000Hz [(m/s ²) ² /Hz]					$\sqrt{y^2 + z^2 + x^2}$
			X	Y	Z			
BRR	fine cobblestone	90	2,5	2,5	12,1	12,6		
BRL	fine cobblestone	90	2,7	2,2	11,3	11,8		
Mean	fine cobblestone	90	2,6	2,4	11,7	12,2		

Eine detailliertere Auswertung des kumulierten PSD zeigt Abbildung 2-34. Die Kurven geben den kumulierten PSD Verlauf an. Aus steilen Anstiegen kann auf hohen Energieeintrag zurückgeschlossen werden. Zu sehen sind hier die Zusammensetzung des average PSD aus den kumulierten Kurven von x, y und z.



2-34: Kumulierter PSD Verlauf am Batterierahmen bei 90km/h und feinem Kopfsteinpflaster

Konkret bedeutet das, dass bis 30Hz rund 50% der Schwingungsenergie umgesetzt werden, weitere 20% bis 150Hz, 10% bis 250Hz, die restlichen Anteile verteilen sich stark abfallend bis zu 2000Hz. Abbildung 2-35 gibt die Energieverteilung in detaillierteren Frequenzschritten wieder.



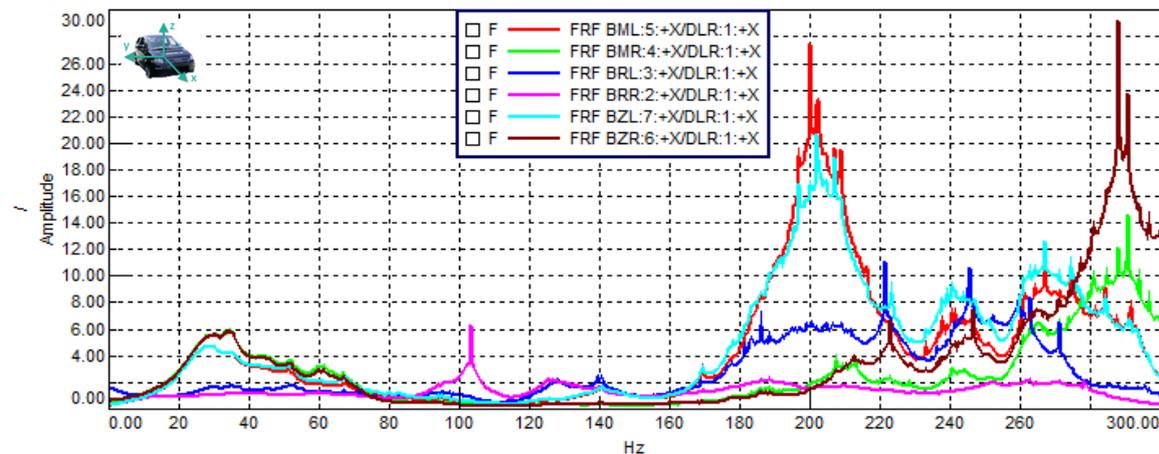
2-35: Prozentualer Anteil an umgesetzter Energie auf Frequenzen bezogen

Der hohe Energieeintrag bis 200Hz begründet auch, warum viele Normvibrationsprofile die Obergrenze bei 250Hz ziehen. Nachdem aber Eigenfrequenzen auch oberhalb 200Hz auftreten können, sollte der Bereich bis 2000Hz nicht außer Acht gelassen werden.

2.5.5 Analyse der Übertragungsfunktionen

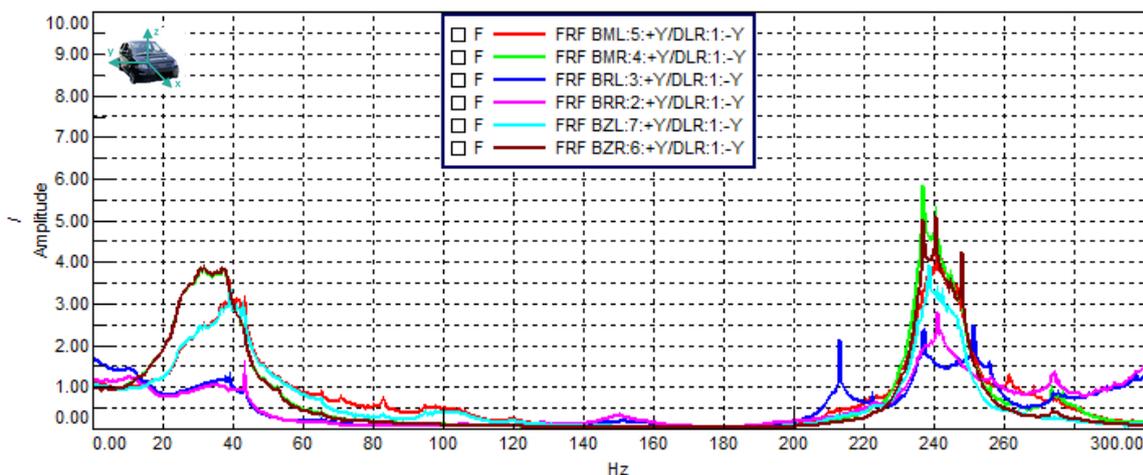
Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Analysen und Ergebnisse beschreiben die Verstärkung und Dämpfung als Absolutwerte. Um diese noch detaillierter zu untersuchen, werden die einzelnen Sensoren abhängig von deren Positionen zueinander betrachtet. Dabei wird jeder Sensor zum Domlagersensor, also der Anregungsquelle, ins Verhältnis gesetzt. Dieser Vorgang findet im Frequenzbereich statt, da ein Vergleich im Zeitbereich zu Ungenauigkeiten führen würde. Zwei Messprofile zum gleichen Zeitpunkt können sich aufgrund der Dynamik während der Fahrt anders zueinander verhalten wie selbige an einem darauffolgenden Zeitpunkt. Das Verhältnis aus Anregung zu Anregungsantwort wird auch als Übertragungsfunktion bezeichnet und ist ähnlich dem Dämpfungsfaktor. Da im Frequenzbereich gerechnet wird, hat man hier den Vorteil, die Übertragung eindeutig nach Frequenz und Amplitude von jedem Sensor zu berechnen und darzustellen. Aus Abbildung 2-36 geht hervor, dass in x die rechte Seite eine etwas größere Verstärkung als die linke Seite des Batteriemoduls im Bereich 27Hz bis 36Hz zur Anregungsquelle am rechten Domlager aufweist. Dies mag unter anderem darin begründet liegen, dass die linke Seite den längsten Weg zum Domlager besitzt und Schwingungen mit weiterem Weg besser in x abgebaut werden. Dieses Phänomen ist auch auf den Bereich 150 bis 350Hz übertragbar: der längere und weichere Weg zum linken Batteriemodul verlagert die Resonanzen jener in einen niederfrequenten Bereich als es bei dem zum Domlager nähergelegenen rechten Batteriemodul der Fall ist. Aufgrund der zuvor durchgeführten kumulierten Energieeintragsberechnung ist zu beachten, dass 70% des Energieeintrages im Bereich bis 150Hz stattfinden. Resonanzpunkte im Bereich darüber werden deswegen oft nicht genau beachtet, da, obwohl im Resonanzfall die Amplituden größer als im niedrigen Frequenzbereich ausfallen, die energetische Zufuhr gering ausfällt. Die Resonanzbereiche über 150Hz tragen aber in Summe dazu bei 30% der Restenergie bis 2000Hz darzustellen, eine Dämpfung bis 150Hz zeigt jedoch die größte Wirkung und wird daher primär angestrebt.

Messungen



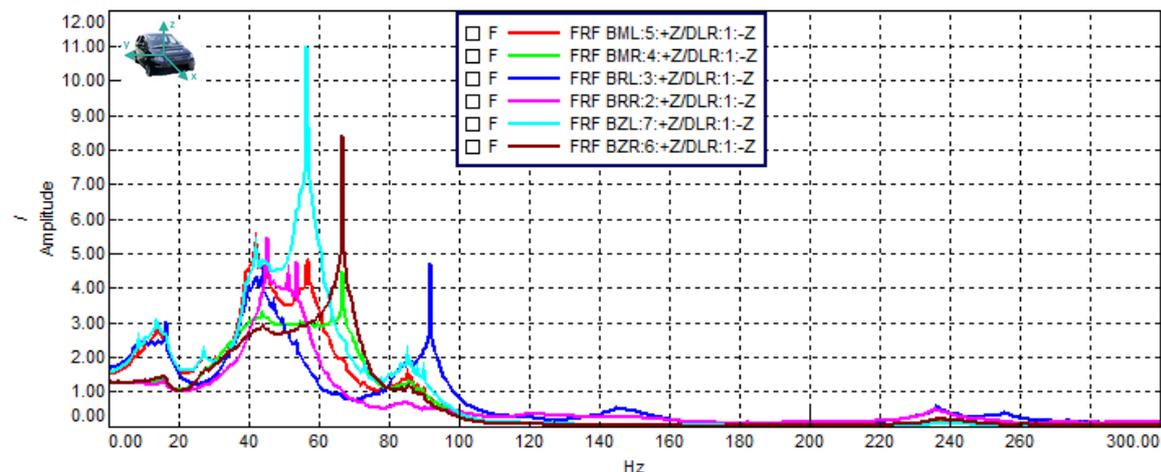
2-36: Übertragungsfunktionen bei 70km/h und feinem Kopfsteinpflaster bezogen auf Domlager in x

In y- Achse (Abb. 2-37) liegen die Resonanzpunkte ähnlich bei 30Hz bis 39Hz. Bei 240Hz tritt eine zwischen linkem und rechtem Modul gleichverteilte, auftretende Resonanz auf.



2-37: Übertragungsfunktionen bei 70km/h und feinem Kopfsteinpflaster bezogen auf Domlager in y

In z- Achse (Abbildung 2-38) gibt es mehrere Eigenfrequenzpunkte an verschiedenen Positionen welche auffälliges Verhalten aufweisen. Über 100Hz wird in z alles gedämpft, d.h. dass die Verstärkung im Bereich bis 100Hz wesentlich auf die mechanische Bauteilalterung durch Schwingungen Einfluss nimmt. Der hohe Resonanzpunkt der linken Batteriezeile bei 57Hz bedarf genauerer Erklärung: Durch den Vergleich zum rechten Domlager scheint die Belastung hier größer zu sein als auf das rechte Batteriemodul. Würde das linke Batteriemodul in Relation zum linken Domlager gesetzt werden, müsste dieses theoretisch gleich ausfallen wie das rechte Batteriemodul zum rechten Domlager. Da eine Messung am linken Domlager jedoch nicht existiert, bleibt dies eine Annahme welche es bei zukünftigen Messfahrten zu berücksichtigen gilt.



2-38: Übertragungsfunktionen bei 70km/h und feinem Kopfsteinpflaster bezogen auf Domlager in z

Besonders gut erkennbar ist die Verlagerung des Resonanzpunktes des rechten Batterierahmens bei 92Hz auf 64Hz des rechten Batteriemodules durch elastische Transformierung. Das Prinzip dahinter wurde bereits bei der Untersuchung von Dämpfungselementen zuvor erläutert.

2.5.6 Auswertung mittels Terzbandfilter

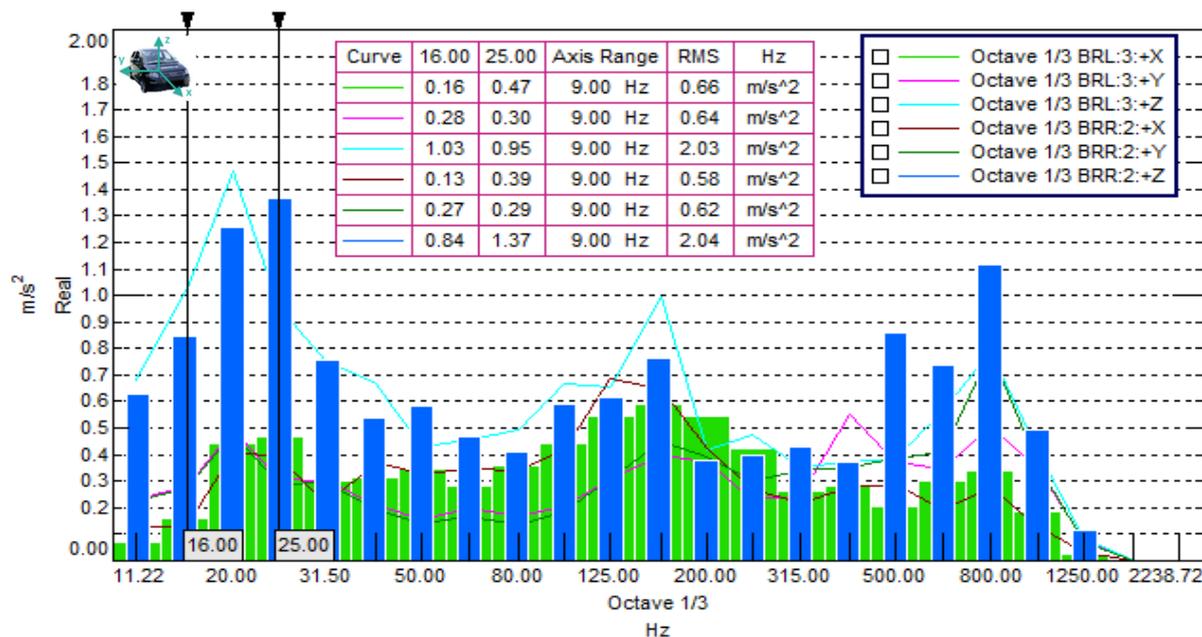
Die gemessenen Beschleunigungen können mittels Terzbandfilter, auch als 1/3 Oktavfilter bezeichnet, analysiert werden, dies hilft dabei aus den Messsignalen Prüfprofile zu erstellen. Bei Bandfilter werden die Frequenzbereiche außerhalb der definierten Grenzfrequenzen f_o (obere Grenzfrequenz) und f_u (untere Grenzfrequenz) gefiltert und durch die Mittenfrequenz f_m dargestellt. Eine Oktav bezeichnet das doppelte vom Bezugswert, eine Terz bezieht sich auf ein Drittel dieser Oktav. Da der Anstieg und die Energieverteilung im Frequenzbereich nicht linear ist, sind die Terzbänder nicht äquivalent zueinander. Bei gegebener unteren Grenzfrequenz f_u errechnet sich f_o und die Mittenfrequenz f_m wie folgt in Formel 2.2 und Formel 2.3:

$$f_o = \sqrt[3]{2} * f_u \quad (2.2)$$

$$f_m = \sqrt[2]{f_u * f_o} \quad (2.3)$$

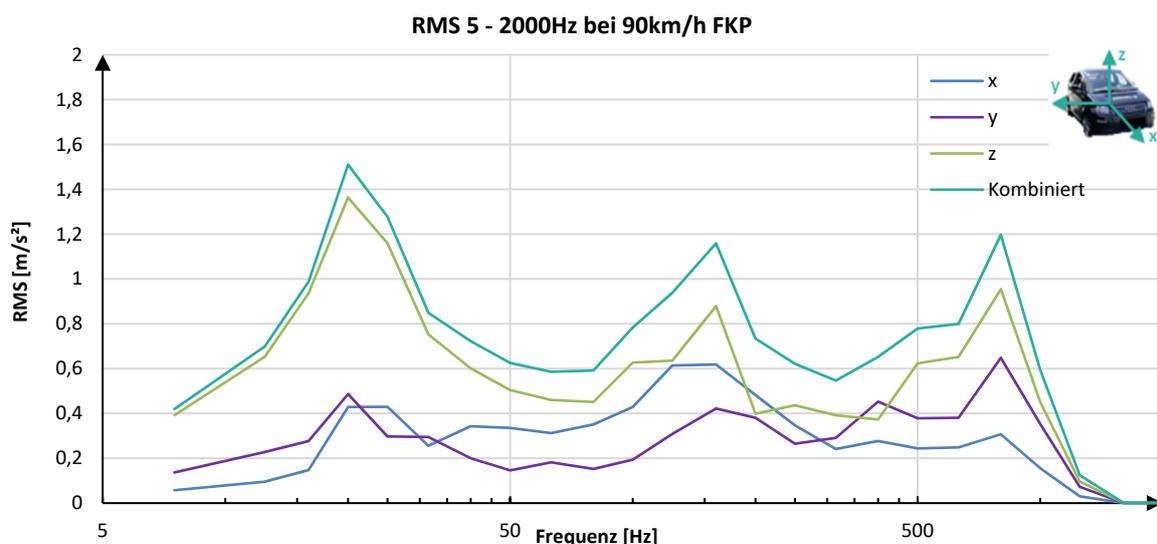
Mittels Terzbandfilterung können nun die Messsignale in Frequenzbereiche aufgesplittet werden. Diese Einteilung ist wichtig, um daraus die Werte auf einen Schwingungsprüfstand zu übertragen. Abbildung 2-39 zeigt die Auswertung mittels Terzbandfilter am Batterierahmen bei 90km/h und feinem Kopfsteinpflaster. Bei der Darstellung handelt es sich um einen automatisch generierten Plot der LMS Test.Lab 16A Software. Blaue Balken stehen für den Batterierahmen rechts in z, grüne Balken für den Batterierahmen links in x. Die Software bietet die Möglichkeit RMS Werte zwischen zwei Frequenzen zu berechnen (Berechnungstabelle innerhalb der Darstellung), als Beispiel wurde dies zwischen 16 und 25Hz vorgeführt.

Messungen



2-39: Auswertung mittels Terzbandfilter am Batterierahmen bei 90km/h und feinem Kopfsteinpflaster

Aus der Terzbandfilterung wurden die RMS-Werte in x, y und z Achsen vom linken und rechten Batterierahmensensor gemittelt. Werden die Kurven wie in obigen Diagramm gemeinsam dargestellt, stellt man ähnliche Proportionen zueinander fest: in x- Achse haben die linken und rechten Messsignale gleichartige Ausprägungen bei fast gleichem Signalverlauf, selbiges gilt auch für y und z. Daraus lässt sich schließen, dass sich die Kurven energiemäßig kombinieren (pythagoreischer Mittelwert) lassen können. Die Profile liegen in der Form RMS (root mean square) als Beschleunigungsgröße vor, Abbildung 2-40 gibt dies wieder. Hier wurden die Beschleunigungssignale des linken und rechten Batterierahmensensors, wie soeben beschrieben, kombiniert.

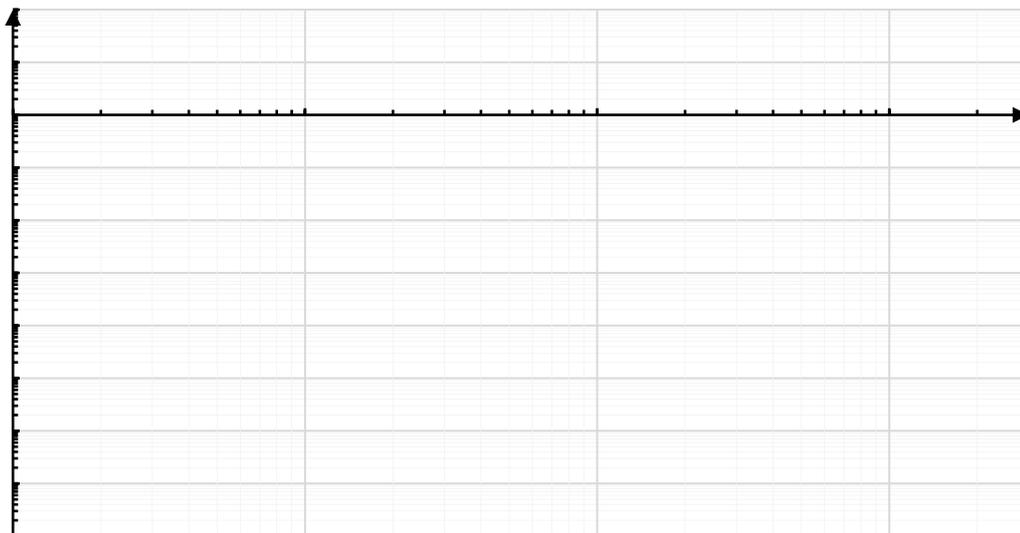


2-40: RMS Profile aus Terzbandfilterung in einzelne Achsen und kombiniert bei 90km/ FKP

Die RMS Werte sind wenig aussagefähig, da Beschleunigungen bei hohen Frequenzen nicht direkt proportional mit der Schwingungsenergie einhergehen. Sie sind jedoch notwendig, um das spektrale Leistungsdichtespektrum in Abhängigkeit der Frequenzbereiche zu berechnen. Dazu wird der RMS Wert je Frequenz quadriert und durch den jeweiligen Frequenzbereich dividiert, siehe Formel 2.4.

$$PSD_f = \frac{RMS_f^2}{(f_o - f_u)/2} \quad (2.4)$$

Mit dieser Berechnung ergibt sich folgendes Profil, welches in Abbildung 2-41 zu sehen ist. Daraus erkennt man, dass die RMS Werte über 200Hz überproportional reduziert werden. Würde das Diagramm nicht logarithmisch dargestellt werden, schiene es für den Leser so, als wäre alles über 200 Hz gleich Null. Die kombinierte Kurve orientiert sich energiemäßig stark an der z-Achse, da diese den höchsten Energieeintrag aufweist. Die errechneten Punkte könnten nun direkt für die Prüfstandssimulation übertragen werden.



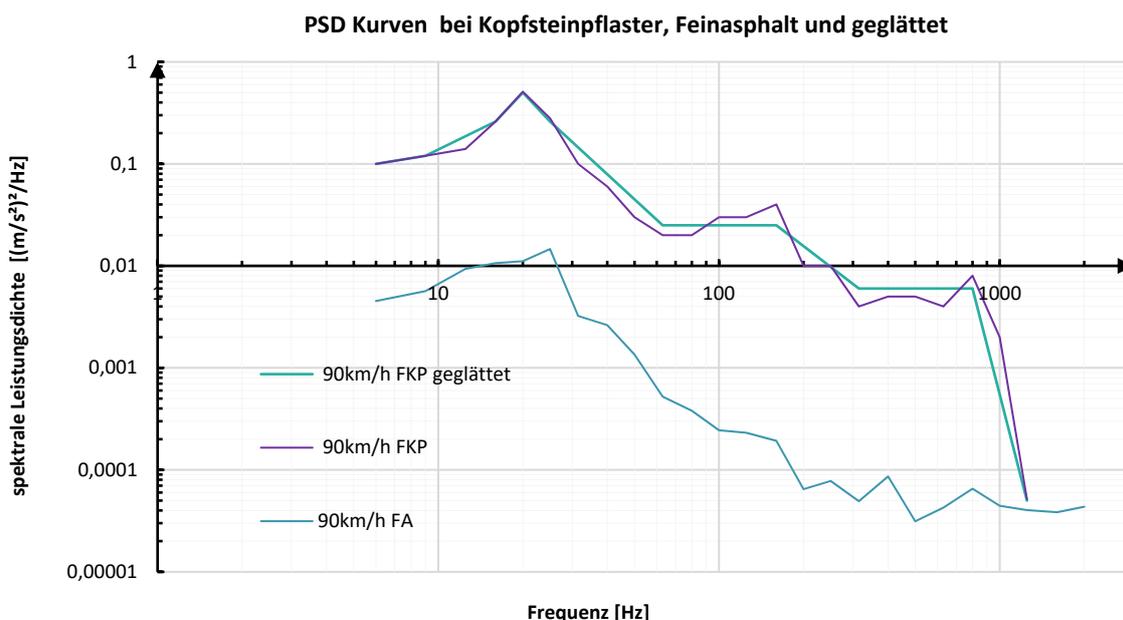
2-41: PSD Profil von 5-2000Hz des Batterierahmensensors bei 90km/h auf feinem Kopfsteinpflaster

In der Elektroakustik sowie in der Messtechnik wurden diese Frequenzreihen einheitlich nach DIN EN 61260 genormt. In Anlehnung an diese Norm wurden auch die Mittenfrequenzpunkte für das Erstellen des Profils für den Schwingungsprüfstand deklariert, die absoluten Werte sind in Tabelle 11 auffindbar. Dargestellt sind darin die Normfrequenzen und die errechneten PSD Werte der Batterierahmensensoren bei 90km/h Kopfsteinpflaster und 90km/h Feinasphalt.

Tabelle 11: Terzbandfilterung: Spektrale Leistungsdichten

Terzbandreihe nach DIN EN 61260			Terzbandreihe nach DIN EN 61260		
Hz	90km/h FKP (m/s ²) ² /Hz	90km/h FA (m/s ²) ² /Hz	Hz	90km/h FKP (m/s ²) ² /Hz	90km/h FA (m/s ²) ² /Hz
6	0.10000	0.00452	125	0.03000	0.00023
9	0.12000	0.00565	160	0.04000	0.00019
12.5	0.14000	0.00935	200	0.01000	0.00006
16	0.26000	0.01065	250	0.01000	0.00008
20	0.51000	0.01111	315	0.00400	0.00005
25	0.28000	0.01462	400	0.00500	0.00009
31.5	0.10000	0.00323	500	0.00500	0.00003
40	0.06000	0.00262	630	0.00400	0.00004
50	0.03000	0.00135	800	0.00800	0.00007
63	0.02000	0.00052	1000	0.00200	0.00004
80	0.02000	0.00038	1250	0.00005	0.00004
100	0.03000	0.00024	1600	0.00000	0.00004
			2000	0.00000	0.00004

Die vorliegende Terzbandreihe umfasst in Summe 25 Mittenfrequenzen. Diese Werte in ein Diagramm übertragen (Abbildung 2-42) zeigen, dass diese Mittenfrequenzen auf wenige Frequenzpunkte reduziert werden können. Durch die Reduktion auf 12 Punkte bleibt der prinzipielle Verlauf erhalten und es ergibt sich ein „geglätteter“ Verlauf der Kurve. Die Frequenzpunkte dienen auch zugleich als programmierbare Frequenzpunkte für den Schwingungsprüfstand, die Absolutwerte werden in Kapitel 3 genauer behandelt. Interessant ist, dass die Energie, welche bei 90km/h auf Feinasphalt auftritt, um Faktor 3 kleiner ist als auf Kopfsteinpflaster.



2-42: Kombinierte PSD Kurven bei 90km/h auf Kopfsteinpflaster in z, Feinasphalt und geglättet

Eine Auswertung der Messfahrten zeigt folgendes auf: Hohe Geschwindigkeiten verlagern den höchsten Eigenfrequenzpunkt, welcher sich je nach Fahrprofil zwischen 15 bis 30 Hz bewegt, in Richtung 30Hz, niedrige Geschwindigkeiten in Richtung 15Hz (Verweis auf Abbildung 2-30).

Eine weitere Erkenntnis ist, dass dieser Eigenfrequenzpunkt mit der Rauheit der Fahrbahn zusammenhängt. Auf feinem Asphalt fällt der Eigenfrequenzpunkt im Verhältnis sehr flach aus. Wird der Energieinhalt und das PSD-Profil der 50km/h Fahrt auf grobem Asphalt verdoppelt, erhält man ein zur 90km/h Kopfsteinpflasterfahrt vergleichsweise sehr ähnliches Profil, selbiges gilt auch für andere Fahrprofile auf groben Asphalt und feinem Kopfsteinpflaster. Diese wichtige Erkenntnis führt zu der Feststellung, dass Fahrprofile faktorisiert werden können, um auf Energieniveaus anderer Fahrprofile zu gelangen.

Fahrten auf feinem Asphalt bei hoher Geschwindigkeit zu skalieren stellt sich jedoch als ungeeignet heraus, da bei diesen Fahrten der Eigenfrequenzpeak nur schwach ausgeprägt ist. Dies führt dazu, dass im Falle einer Faktorisierung die Energie im höher frequenten Bereich unverhältnismäßig groß ausfällt und nicht in Relation zu real erwartenden Belastungen stehen würde.

3 VIBRATIONSLEBENSDAUER BERECHNUNG

Für die Erstellung eines Rauschprofils für den Schwingungsprüfstand zum Zwecke der Lebensdauersimulation hinsichtlich Vibrationen wurde folgender Ansatz verfolgt: Das Prüfobjekt am Prüfstand so belasten, dass dieses eine Schwingungsenergie aufnimmt, welche über eine definierte Fahrzeuglebensdauer aufgenommen wird.

Bereits durchgeführte wissenschaftliche Veröffentlichungen mit ähnlichem Vorhaben versuchen dies mit der kommerziellen Simulationssoftware „nCode“ [20] oder durch die Anwendung verschiedener Zählverfahren für Schwingungsprofile [21]. Solche Berechnungswege bergen im Allgemeinen, wie jede andere mech. Lebensdauersimulation, dieselben Unsicherheitsfaktoren. Es fehlen Materialkennwerte und Simulationsalgorithmen für den Einfluss von:

- Krafteinwirkungen bei verschiedenen Temperaturen
- Alterung des Materials durch Temperatur und Expositionsdauer
- (Elektro-) Chemische Reaktionen mit Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern
- Auswirkung von Spitzenlasten und deren mögliche Vorschädigung

Diese Parameter können nur durch statistische Tests ausgewertet werden, welches einen hohen (finanziellen und zeitlichen) Aufwand bedeutet. D.h. Lebensdauerprognosen bleiben so lange Prognosen, bis eine ausreichende Anzahl an Prüfläufen durchgeführt worden ist, welche statistisch betrachtet die berechnete und simulierte Lebensdauer nicht widerlegen.

Da es sich um ein Prüfprofil für eine Traktionsbatterie handelt, wurde die durchschnittlich einwirkende Schwingungsenergie über eine Fahrleistung von 200.000 Kilometer berechnet, dies entspricht dem Mittelwert einer Batterielebensdauer zwischen 7,5 und 15 Jahren [2].

3.1 Durchschnittliche Fahrzeugnutzung

Um zu bestimmen wie viel Schwingungsenergie über eine Fahrzeuglebensdauer in einem Fahrzeug umgesetzt wird, ist es sinnvoll auf Flottenmessdaten zurückzugreifen. Für die Definition einer durchschnittlichen Fahrzeugnutzung über Fahrzeuglebensdauer gilt es hinsichtlich Geschwindigkeitsanteil und Fahrbahnanteil zu unterscheiden.

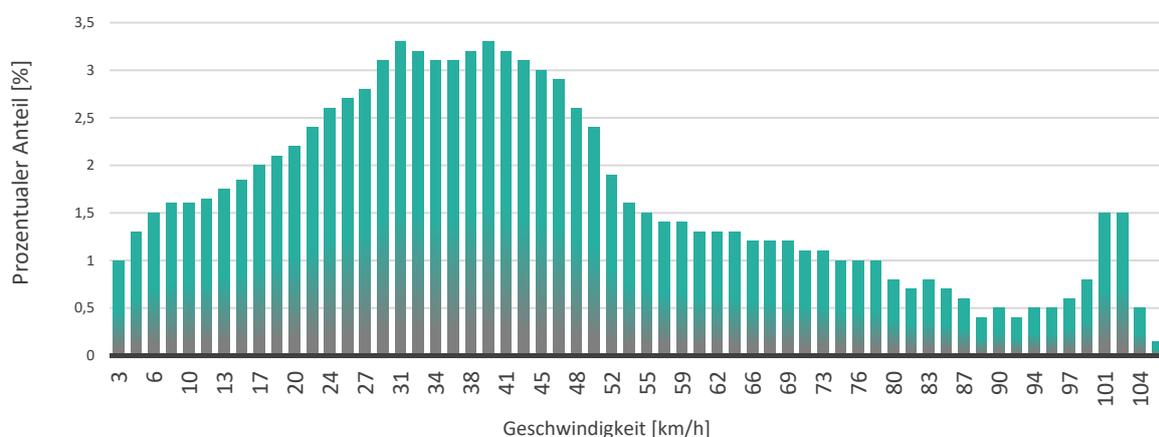
Die Fahrzeugnutzung hängt stark von dem Fahrzeug, dem Fahrzeugbenutzer und dessen Fahrgewohnheiten (Stadtfahrer, Autobahnfahrer, Landstraßenfahrer) ab. Hierbei spielen auch die örtlichen Gegebenheiten eine wichtige Rolle, vor allem in Bezug auf die Straßenbeschaffenheit. Großteils hängt die Straßenbeschaffenheit von den Umwelteinflüssen und der finanziellen Lage des

betreffenden Staates ab, zusätzlich beschließt die Politik auch die gesetzlichen Vorschriften für Geschwindigkeitsgrenzen.

Somit ist eine durchschnittlich-qualitative Aussage betreffend einer repräsentativen Fahrzeugnutzung kaum gegeben. Fahrzeughersteller arbeiten daher mit Flottenmessergebnissen und werten diese statistisch für verschiedene Fahrzeugtypen aus [22].

3.1.1 Geschwindigkeitsanteile

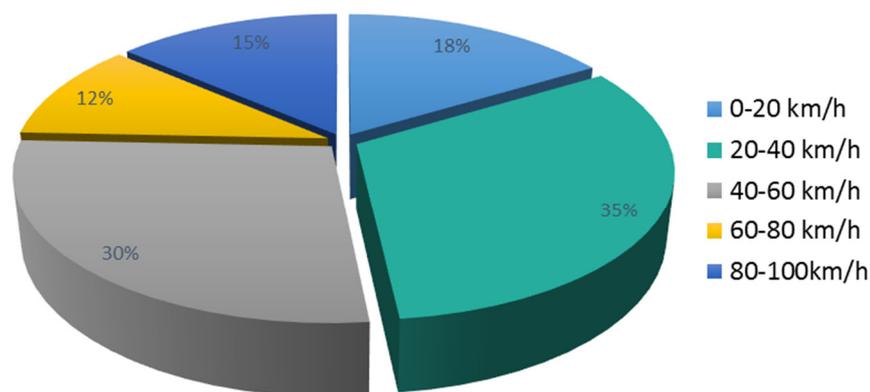
Für die Definition durchschnittlicher Geschwindigkeitsanteile über Fahrzeuglebensdauer wurde im Rahmen dieser Masterarbeit wie folgt vorgegangen: Basis dafür bildet die Publikation des Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) von 2014 „Selected Results from a Large-Scale Field Operational Test with Electric Vehicle in Germany and France“ [22]. Der Flottenversuch mit ca. 100 Elektrofahrzeugen (vier verschiedenen Elektrofahrzeugtypen) wurde über einen Zeitraum von 18 Monaten im Deutsch-Französischem Grenzgebiet durchgeführt. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge war mit 100km/h limitiert. Straßenbahnabschnitte, bei denen höhere Geschwindigkeiten als 100km/h erlaubt sind, sind jedoch prozentual in dem 100km/h Anteil inkludiert. Daraus ergab sich die in Abbildung 3-1 ersichtliche prozentuale Aufteilung der Geschwindigkeitsanteile.



3-1: Prozentualer Geschwindigkeitsanteil aus E-Fahrzeug Flottenversuchen des Karlsruhe Institut für Technologie 2014 [22]

Darauf aufbauend wurden die Flottengeschwindigkeitsanteile klassifiziert und die Messergebnisse aus der Fahrzeugmessung zugeordnet. Der entsprechenden Vibrationsbelastung wurde der Bereich 0 – 40km/h KIT Verteilung der 30km/h Testfahrt, 40-60km/h der 50km/h Testfahrt, 60 – 80 km/h der 70km/h Testfahrt und der KIT Anteil über 80km/h der 90 km/h Testfahrt zugeordnet. Dies führt zu einer rechnerisch höherwertigen Beanspruchung, welche als höhere Sicherheit für die Fahrzeuglebensdauer auslegung interpretiert werden kann.

In Abbildung 3-2 wurden die Flottenversuche des KIT für die später folgenden Berechnungen nach Geschwindigkeitsanteilen ausgewertet.



3-2: Aufteilung der Geschwindigkeitsanteile bei durchschnittlicher Fahrzeuglebensdauer

3.1.2 Fahrbahnanteile

Nachdem die Vielzahl an verschiedenen Fahrbahnoberflächen und deren Nutzungsanteile eine extreme Streubreite aufweisen, wurde in dieser Masterarbeit versucht einen passenden Durchschnitt zu generieren. Öffentliche Literatur zu diesem Thema ist rar und oft länderspezifisch. Eine wissenschaftliche Publikation der University of Warwick veröffentlichte eine repräsentative britische Fahrbahnverteilung über 100 000 Meilen [23]. Diese wurde als Grundlage einer durchschnittlichen Fahrbahnverteilung für die Lebensdauerberechnung herangezogen. Folgende Tabelle zeigt diese Fahrbahnanteile, die beiden rechten Spalten wurden hinzugefügt, um die Anteile auf Kopfsteinpflaster und Asphalt aufzuteilen.

Tabelle 12: Britische Fahrbahnanteile über 100 000 Meilen [23]

EV Study Surface Relating to Module	Surface in km	Classification of Surface	Repeats of Surface Required to Simulate 100,000 Miles of BEV weightings	Total Distance in km	Kopfsteinpflaster Anteil in %	Asphalt Anteil in %
Belgian Pave	1.45	Urban	3395	4923	3.1	0.0
Pot Holes	0.16	Urban	306	49	0.03	0.0
Random Waves	0.64	Urban	6791	4346	2.7	0.0
Sine Wave	0.16	Urban	6813	1090	0.7	0.0
Twist Humps	0.16	Urban	10186	1630	1.0	0.0
Cats Eyes 30mph	0.16	Rural	5295	847	0.5	0.0
Cats Eyes 50mph	0.16	Rural	5295	847	0.5	0.0
Handling Circuit	4.51	Rural	1933	8719	0.0	5.4
Hill route (Loop 1)	1.77	Rural	29695	52560	0.0	32.7
HSC	5.95	Motorway	2851	16961	0.0	10.5
Mile Straight (PT)	1.29	Motorway	8141	10502	0.0	6.5
Mile Straight (WOT)	1.29	Motorway	8141	10502	0.0	6.5
City course	1.29	Urban	37177	47958	0.0	29.8
SUM				160934	8.5	91.5

Die 8,5% Kopfsteinpflasteranteil werden im folgenden Kapitel auf verschiedene Geschwindigkeiten aufgeteilt. Dieser Anteil reduziert sich mit zunehmender Geschwindigkeit, da davon ausgegangen werden kann, dass grobe Fahrbahnen mit geringerer Geschwindigkeit befahren werden. Der Asphaltanteil von 91,5% wird zusätzlich in Fein- und Grobasphalt unterteilt, wobei der

Feinasphaltanteil mit zunehmender Geschwindigkeit zunimmt. Auch hier wird angenommen, dass Bundesstraßen und Autobahnen tendenziell höheren Feinasphaltanteil aufweisen.

3.2 Profilerstellung für Schwingungsprüfstand

Grundlage für die energetische Berechnung bildet der gemittelte, akkumulierte PSD Wert aus den Messsignalen des linken und rechten Batterierahmensensors in x, y und z. Für die Berechnung des Vibrationslebensdauerprofiles (VILEP) wurden zuerst die Anteile der Fahrbahn je Geschwindigkeitsprofil definiert (siehe vorhergehendes Kapitel). In einem zweiten Schritt wurden die Geschwindigkeitsanteile repräsentativ aus der KIT Studie [22] prozentual verteilt.

Der Berechnungsprozess basiert auf den gemessenen PSD Anteilen der Messfahrten bei 30, 50, 70 und 90km/h auf feinem Asphalt, groben Asphalt und feinem Kopfsteinpflaster mit Rücksichtnahme auf unterschiedliche Energieeinträge in x, y und z. Diese werden prozentual durch die Fahrbahnanteile aufgeteilt, jede Achse separat. Danach wird für jeden Geschwindigkeitsbereich die Summe der aufgeteilten PSD Werte gebildet. Damit erhält man einen durchschnittlichen energetischen Schwingungseintrag in $(m/s^2)^2/Hz$ bzw. $J/(s*kg)$ pro Geschwindigkeitsbereich.

Die aus Kapitel 3.1.2. kommenden Ergebnisse wurden den Geschwindigkeitsanteilen zugeordnet und verteilt. Diese Werte beeinflussen den VILEP jedoch nicht gravierend, werden die Anteile um +/- 20% variiert, so ändert sich das Endergebnis um +/- 5% welches in etwa 20 Minuten Prüfzeit mehr oder weniger entspricht. Nachdem die Änderung relativ gering ausfällt, kann davon ausgegangen werden, dass die getroffenen Anteile hinreichend genau verteilt sind.

Tabelle 13: Berechnung und Verteilung des energetischen Schwingungseintrages nach Fahrbahnanteile

km/h	Fahrbahn	Messwerte $[(m/s^2)^2/Hz]$			Anteil über	Anteil über Lebensdauer		
		PSD X	PSD Y	PSD Z	Lebensdauer [%]	PSD X	PSD Y	PSD Z
30	Feiner Asphalt	0.02	0.01	0.13	55%	0.01	0.01	0.07
30	Grober Asphalt	0.14	0.18	1.08	40%	0.06	0.07	0.43
30	Feines Kopfsteinpflaster	1.26	0.70	3.39	5%	0.06	0.03	0.17
	Summe				100%	0.13	0.12	0.67
50	Feiner Asphalt	0.03	0.03	0.28	55%	0.01	0.02	0.15
50	Grober Asphalt	0.33	0.36	3.17	43%	0.14	0.15	1.36
50	Feines Kopfsteinpflaster	1.90	0.97	6.66	2%	0.04	0.02	0.13
	Summe				100%	0.19	0.19	1.65
70	Feiner Asphalt	0.04	0.06	0.46	70%	0.03	0.04	0.32
70	Grober Asphalt	0.49	0.58	4.97	29%	0.14	0.17	1.44
70	Feines Kopfsteinpflaster	2.16	1.68	10.37	1%	0.02	0.02	0.10
	Summe				100%	0.19	0.22	1.87
90	Feiner Asphalt	0.06	0.09	0.66	85%	0.05	0.07	0.56
90	Grober Asphalt	0.64	0.91	7.18	15%	0.10	0.14	1.08
90	Feines Kopfsteinpflaster	2.63	2.33	11.60	0.5%	0.01	0.01	0.06
	Summe				100%	0.16	0.22	1.70

Vibrationslebensdauer Berechnung

Die zu den Geschwindigkeitsbereichen zugeordneten Fahrbahnanteile können nun mit Hilfe der ausgewerteten Geschwindigkeitsverteilung der KIT Flottenmessungen (Kapitel 3.1.1) nochmals aufgeteilt werden. Aus deren Summe ergibt sich in jede Achse ein PSD Wert in der Einheit $(J/(s \cdot kg))$. Diese Ergebnisse stehen für den durchschnittlichen Schwingungsenergieeintrag eines Fahrzeuges, sie sind nicht abhängig von Kilometer, Masse oder Zeit.

Tabelle 14: Berechnung und Verteilung des energetischen Schwingungseintrages nach Geschwindigkeit

Geschwindigkeitsanteil aus Messung	Ø Geschwindigkeitsanteile über Fahrzeuglebensdauer aus KIT Studie		Anteil über Lebensdauer $[(J/(s \cdot kg))]$		
			PSD X	PSD Y	PSD Z
30km/h	0-30 km/h	32%	0.04	0.04	0.21
50km/h	30-50 km/h	36%	0.07	0.07	0.59
70km/h	50-70km/h	17%	0.03	0.04	0.32
90km/h	70-110km/h	15%	0.02	0.03	0.26
Summe (durchschnittlicher Energieeintrag)		100%	0.17	0.18	1.39

Der durchschnittliche Energieeintrag kann nun zur Berechnung und Umrechnung von zeitlich abhängigen Energieumsätzen eingesetzt werden. 200.000 Kilometer entsprechen bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 54km/h (Referenz siehe Kapitel 3.1.1: EV-Flottenaufzeichnung des Karlsruhe Institut für Technologie KIT [22]) in etwa 3700 Betriebsstunden. Auf diese 3700 Betriebsstunden verteilen sich die durchschnittlichen Energieeinträge. Hiermit wurde die Vibrationsenergie über 200.000 Kilometer berechnet.

Mittels der bekannten Energie bei 90km/h auf feinem Kopfsteinpflaster in x, y und z kann die Zeit bis zur Energieäquivalenz berechnet werden. 200.000 „durchschnittlich“ gefahrene Kilometer entsprechen energetisch betrachtet 24.000 Kilometer bzw. 442,1 Stunden Fahrt auf feinem Kopfsteinpflaster mit 90km/h. Diese 442,1 Stunden können nun direkt mit den ermittelten Profilen der Terzbandfilterung bei 90km/h Kopfsteinpflaster auf einem Schwingungsprüfstand getestet werden.

Tabelle 15: Reduzierte Fahrzeuglebensdauer bei Dauerfahrt mit 90km/h auf Kopfsteinpflaster

Energieeintrag über 200.000km und Äquivalenz		PSD X	PSD Y	PSD Z	
	Durchschnittlicher Energieeintrag	0.17	0.18	1.39	$J/(s \cdot kg)$
	Energie nach 200.000km (= 3700h*PSD)	2255	2362	18458	kJ/kg
	Gemessene PSD Wert auf Kopfsteinpflaster bei 90km/h	2.63	2.33	11.60	$J/(s \cdot kg)$
	PSD Profil Skaliert mit Faktor	1	2.63	2.33	11.60
Prüfprofildauer für Energieäquivalenz		238.6	281.8	442.1	h

Auf diesem Prinzip wird die Prüfprofildauer des Vibrationslebensdauerprofils berechnet. Zur Verkürzung der Lebensdauersimulation wird die Amplitude der 90km/h Kopfsteinpflasterfahrt faktorisiert, die Schwingungsenergie steigt damit direkt proportional an und die Prüfdauer nimmt direkt proportional ab. Bei der Faktorisierung wurde darauf geachtet bereits existierende Normprofile nicht über deren Amplituden zu überschreiten. Existierende Normprofile geben durch eine Vielzahl statistischer Auswertungen in der Regel ein offizielles Vibrationsprofil vor, siehe Kapitel 1.4. Damit ist

sichergestellt, dass keine zu hohen Faktoren gewählt werden. Zu hohe Faktoren könnten zu schockartigen Spitzenbelastungen führen. Dabei könnten Materialien hohe Energien gar nicht aufnehmen, da es noch davor Festigkeitsgrenzen erreicht und es vorzeitig zum Bruch käme.

Um die Prüfzeit zu verkürzen, wird nun die Amplitude des Profils mit Faktor 50 multipliziert. In x, y und z wird das gleiche PSD Profil aus der kumulierten Terzbandfilterung der 90km/h Kopfsteinpflasterfahrt eingesetzt. Mit diesen beiden Maßnahmen verkürzt sich die Prüfzeit in z- Richtung auf 8,4 Stunden, in x und y auf ca. 1 Stunde wobei sich die Amplituden im Bereich von Normprofilen bewegen. Der detaillierte Berechnungsvorgang ist in Tabelle 16 ersichtlich.

Tabelle 16: Berechnung eines Schwingungsprüfprofils für Traktionsbatterielebensdauer

Energieeintrag über 200.000km für VILEP		PSD X	PSD Y	PSD Z		
	Durchschnittlicher Energieeintrag	0.17	0.18	1.39	J/(s*kg)	
	Energie nach 200.000km (= 3700h*PSD)	3700h	2255	2362	18458	kJ/kg
	Gemessene PSD Wert auf Kopfsteinpflaster bei 90km/h		12.22	12.22	12.22	J/(s*kg)
	PSD Profil Skaliert mit Faktor	50	611.00	611.00	611.00	J/(s*kg)
	Prüfprofildauer für Energieäquivalenz		1.0	1.1	8.4	h

Aus der Lebensdauerberechnung lässt sich nun das VILEP Profil durch Faktorisierung ableiten und wie folgt definieren:

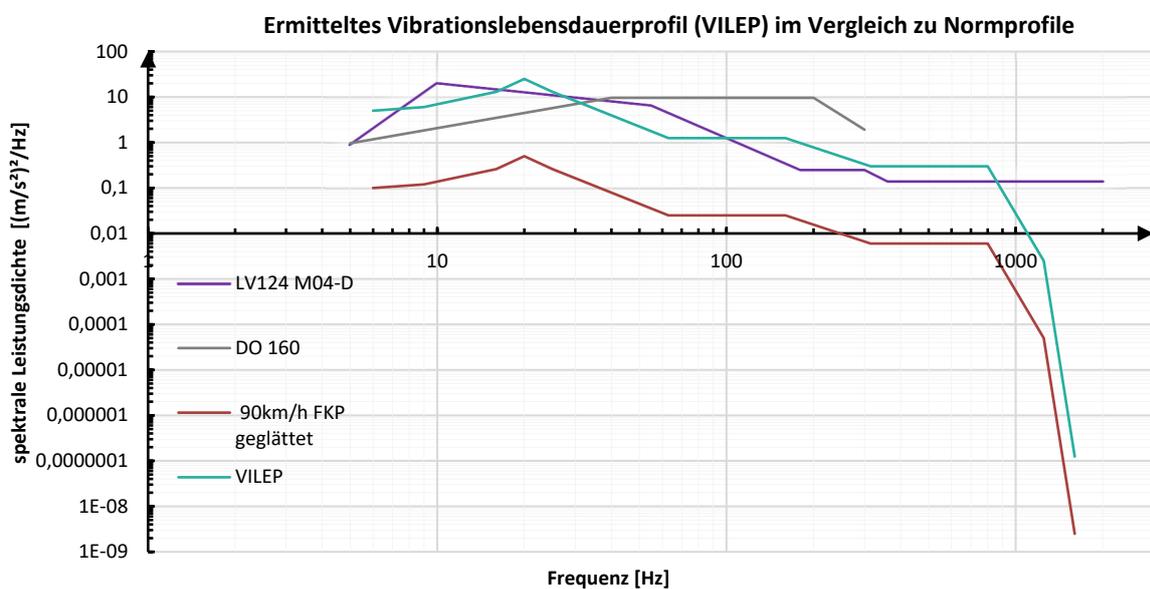
Tabelle 17: VILEP- PSD Profil für Schwingungsprüfstand

Schwingungsprofil für Prüfstand			
	v90FKP aus Messung	v90FKP geglättet	v90FKP Faktor 50 = VILEP Profil
Hz	(m/s ²) ² /Hz	(m/s ²) ² /Hz	(m/s ²) ² /Hz
6	0.1	0.1	5
9	0.14	0.12	6
16	0.26	0.26	13
20	0.51	0.5	25
25	0.28	0.26	13
63	0.02	0.025	1.25
160	0.04	0.025	1.25
315	0.004	0.006	0.3
800	0.008	0.006	0.3
1250	0.0000518	0.00005	0.0025
1600	2.5E-09	2.5E-09	0.000000125
2000	2.5E-09	2.5E-09	0.000000125

Die Frequenzpunkte der ursprünglichen Messpunkte wurden auf die markantesten Punkte reduziert und energetisch „geglättet“, so erhält man ein Prüfprofil welches die meisten Schwingungsprüfstände wiedergeben können (aufgrund reduzierter Anzahl von Frequenzpunkte und der daraus resultierenden besseren Regelmöglichkeit des Schwingungsprüfstand) sowie gute Vergleichbarkeit mit bestehenden Normprofilen.

Vibrationslebensdauer Berechnung

Setzt man dieses Profil unskaliert und skaliert mit Faktor 50 in Relation zu bestehenden Normen, so wird sichtbar, dass das faktorisierte Profil bestehenden Normen ähnelt, jedoch im Frequenzbereich von 300 bis 1000Hz etwas energieintensiver ausfällt. Es ist nicht bekannt auf welchen Messungen, Annahmen und Berechnungen das Normprofil der LV124 entstanden ist. Der Amplitudenpeak des VILEP Profil liegt bei 20Hz und nicht bei 10Hz wie bei dem Normprofil der LV124 (Abbildung 3-3). Im Bereich ab 1200Hz fällt der Schwingungseintrag auf quasi Null. Der Grund, weshalb die LV124 in diesem Bereich größer ausfällt, ist prüftechnischer Natur: Der Großteil an Schwingungsprüfständen kann nur mit einer Mindestleistung im hochfrequenten Bereich betrieben werden, zu kleine Leistungen können hier nicht simuliert werden.



3-3: Vibrationslebensdauerprofil (VILEP) im Vergleich

Aus Sicht der frequenzabhängigen spektralen Leistungsdichte überdeckt es sich mit bestehenden Normprofilen. Der Unterschied liegt vor allem in der Simulationsdauer (vgl. Kapitel 1.2). Die LV-124 M04-D [3] schreibt z.B. 8 Stunden je Achse vor. Würde man dieses Prüfprofil energieäquivalent betrachten entspräche dies einem Eintrag von Schwingungsenergie von ca. 500 000 durchschnittlich gefahrenen Kilometern. Die LV124 zielt beachtenswerter Weise auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor ab. Fahrzeuge mit VKM weisen gerade in Motornähe höheren Schwingungsenergieeintrag auf.

Dieses Rechenbeispiel zeigt auch die Möglichkeit auf, dass Normprofile mithilfe des durchschnittlichen Energieeintrages eines PKW energetisch beurteilt werden können. Aus Normprofilen und deren Dauer ist eine Berechnung der äquivalenten, durchschnittlichen Fahrleistung möglich.

3.3 Erprobung des VILEP Profils

Eine Erprobung eines Lebensdauerprofils gestaltet sich im Allgemeinen als äußerst aufwändig, zeitintensiv und statistisch fehlerbehaftet. Einflussgrößen wie Temperatur, mech. Schocks und Wirkung von Vorschädigungen sowie die Erhöhung von Amplituden sind Parameter, welche sich gegenseitig beeinflussen. Das bedeutet jahrelang dauernde Versuche und eine Vielzahl an Prüfobjekten und Forschungskosten. Bei speziell für bestimmte Komponenten generierten Prüfprofilen ist zusätzlich darauf zu achten, dass solche Profile nicht für andere beliebige Komponenten verwendet werden dürfen, da diese unter Umständen anderen Schwingungen ausgesetzt sind. Das VILEP Profil ist nur für Traktionsbatterien von PKWs berechnet worden. Es darf also nicht für andere Fahrzeuge (LKWs, Motorräder) oder andere Fahrzeugkomponenten (Elektromotor, Leistungselektronik, Klimakompressor, Servopumpe, ...) angewendet werden. Daher kann man nicht auf eine Äquivalenz zu anderen Prüfobjekten schließen. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde festgelegt den Prüfumfang überschaubar zu halten und sich auf das derzeitige 1s46p Modul der Firma Kreisel Electric zu fokussieren.

3.3.1 Vorgehen

Ziel der Erprobung ist es festzustellen, ob durch das Einwirken der Schwingungsenergie von 200.000km Fahrleistung mechanische Schäden in Form von Rissen oder Brüchen auftreten und ob/wie sich der Innenwiderstand der Zellen ändert. Halten die Module den Belastungen stand, könnte die Prüfdauer bis zu einem mechanischen Bruch eines Moduls verlängert werden, umso die theoretisch mögliche Lebensdauer in Form von Fahrleistung zu ermitteln. Im Falle eines Bruches oder Risses vor Erreichen der vorgeschriebenen Prüfzeit sind konstruktive Änderungen am Batteriemodul notwendig, um die Lebensdauer von 200.00 Kilometern zu erreichen.

Das VILEP Profil wird anhand 3 Stück 1s46P Modulen durchgeführt, welche mit Samsung 29E7 Zellen bestückt sind. Im Vergleich zu den Spektralanalysen des 2s46p Moduls, bei welchem zwei 1s46p Module hintereinander in Serie verschalten sind, entspricht die 1s46p Konfiguration dem selben Aufbau in reduzierter Form. Hinsichtlich Verschraubung und Befestigung zu in Serie verschalteten Modulen unterscheiden sich einzelne Module kaum. Auch bei maximaler Serienschaltung 12s46p entsteht durch die Länge des Batteriestrings kein zusätzlicher negativer Einfluss, da jedes der Module unabhängig zueinander mit dem Gehäuse verschraubt ist und der elektrische Kontakt zwischen den Modulen durch elastische Federkontakte gegeben ist. Die Masse der Module wird durch die Prüfstands- Software berücksichtigt, um ein vergleichbares Ergebnis zu generieren.

Die Verwendung von Modulen der 28s92p Batterie (welche aus den baugleichen 1s46p Modulen besteht) des Versuchsfahrzeuges ist wenig sinnvoll, da diese bereits Vorschädigungen des bisherigen Gebrauchs beinhalten. Der Prüfaufbau mit drei Stück werksneuer 1s46p Module bietet den Vorteil der

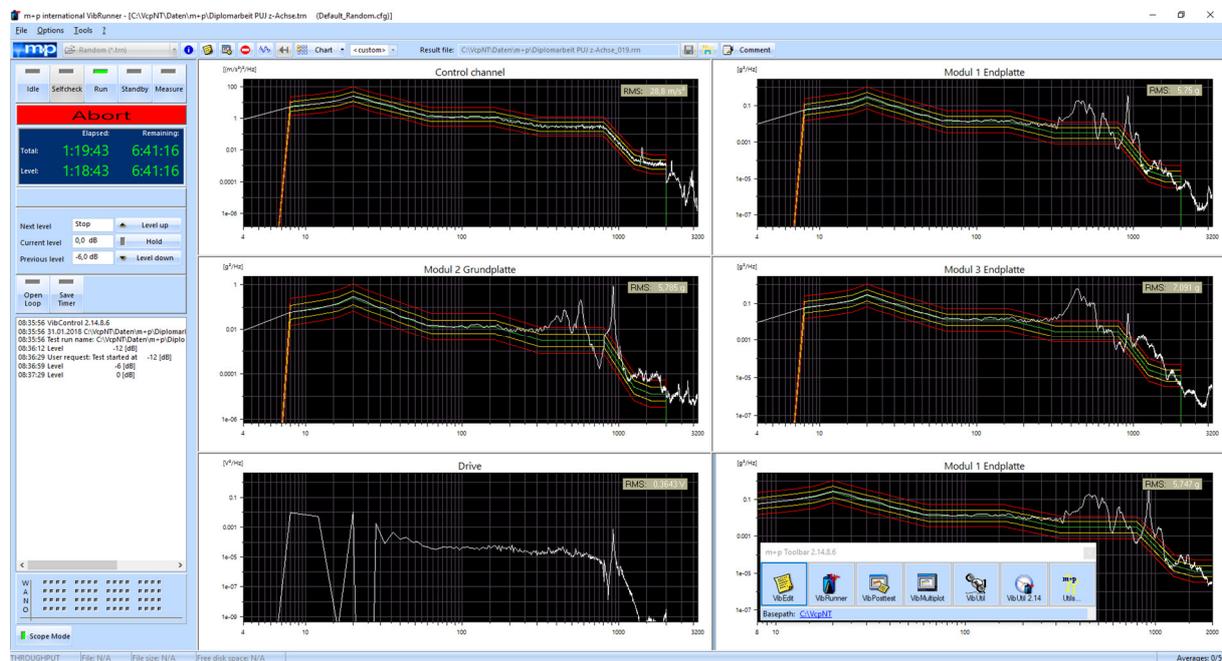
Vibrationslebensdauer Berechnung

einfachen Reproduzierbarkeit bei gleichzeitiger Vermeidung hoher Kosten. Bei einer Traktionsbatterie mit 4416 Stück 18650 Zellen kostet nur die Anschaffung der Zellen (bei einem geschätzten Stückpreis von 2,5€/Zelle) durchschnittlich 11 000 €, ohne Gehäuse, Zellhalter, BMS, etc.

Als Schädigungsgröße auf Zellebene wird der DC- Innenwiderstand der Zellen vor und nach dem Prüflauf gemessen und untersucht.

3.3.2 Schwingungsprüfstand

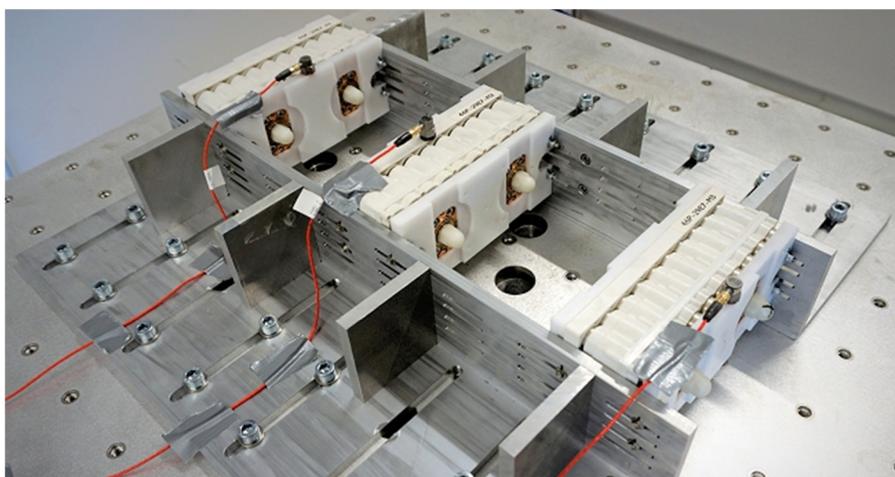
Die Validierungsprüfung findet auf einem leistungsfähigeren Schwingungsprüfstand statt. Es handelt sich um den Schwingungserreger: SW9112-80-LS3 der Firma RMS mit einer Spitzenleistung von 80kN. Der Schwingungsprüfstand, mit welchem die Spektralmessungen durchgeführt wurden, besitzt zum Vergleich nur 10kN Spitzenleistung. Der 80kN Prüfstand kann bis zu 500kg in Schwingung versetzen und bietet die Möglichkeit das Prüfobjekt mittels Klimahaube zu temperieren. Die detaillierten Leistungsdaten sind in Anhang A.2 auffindbar. Das VILEP Profil wird mit der Software „m+p acoustics“ programmiert. Das komplette Prüfprogramm wird durch diese Software programmiert, gestartet, überwacht, aufgezeichnet und ausgewertet. Abbildung 3-4 zeigt einen Screenshot der Programmoberfläche.



3-4: m+p Schwingungserreger Software, Prüflauf Durchführung und Überwachung

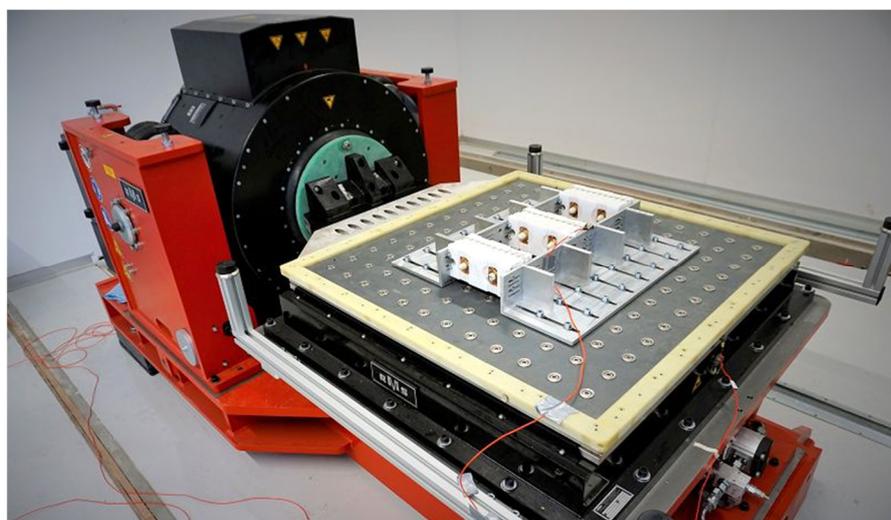
3.3.3 Prüfaufbau und Durchführung

Für den Versuch wurden spezielle Halterungen aus Aluminium Profilen angefertigt, um parallel drei 1s46p Module testen zu können. Die Profile wurden mit Rippen versehen, um die Resonanzanfälligkeit dieser zu minimieren und somit das Anregungssignal möglichst unverändert auf die Prüfobjekte zu übertragen. Der Versuch wird bei 22°C Raumtemperatur auf dem 80kN-fähigen Schwingungserreger durchgeführt. Gestartet wird die Prüfung mit dem VILEP Profil aus Tabelle 13 in x-Achse (1h), danach folgt y mit 1,1h und abschließend die z-Achse für 8,4h. Die Module werden durch einen Beschleunigungssensor überwacht für den Fall, dass es während der Anregung zu einem Bruch kommen könnte und um Schäden am Prüfstand oder Labor zu vermeiden. Abbildung 3-5 zeigt den Aufbau der Prüfkörper.



3-5: Prüfkörper Aufbau: 3x 1s46p Module mit verstärkter Halterung

In Abbildung 3-6 ist der Schwingungsprüfstand mit gekoppeltem Schwingtisch zu sehen. Der Prüfkörper wird in dieser Ebene horizontal in x oder bei Drehung des Prüfkörpers in y belastet. Für den Test in z-Achse wird der Schwingungserreger vom Schwingtisch entkoppelt und um 90° gedreht.



3-6: Prüfstands Aufbau mit gekoppeltem Schwingtisch, Module ausgerichtet in x- Richtung

Die Module werden seitlich durch je vier Stück M4 Schrauben befestigt, diese sind zusätzlich beim Einschrauben mit Cyanoacrylat-Klebstoff benetzt worden. Dies verhindert ein Lösen der Schrauben im Normalbetrieb und wird auch in der Batterieproduktion so angewandt. Zusätzlich werden die Schrauben noch in der eingedrehten Position markiert um ein mögliches Lösen der Schrauben während oder nach dem Betrieb zu erkennen.

Die Zellen werden vor und nach dem Prüflauf auf eine Veränderung des Innenwiderstandes vermessen. Dabei werden je sechs Zellen vom Rand bis zur Mitte und drei weitere mittig liegende Zellen untersucht. So wird zusätzlich festgestellt, ob die Zellen vom Rand bis zur Mitte unterschiedliche, zellinterne Veränderungen unterlaufen.

Der Innenwiderstand der Zellen kann nur nach vollständigem Prüflauf in x, y und z gemessen werden. Da die Schrauben in den Modulen zusätzlich geklebt sind, würde bei einem wiederholten Öffnen während oder zwischen den Testläufen Gewinde zerstört werden und damit wäre eine Aussage über mechanische Schäden durch das VILEP nicht mehr gegeben. Um die reine Zellschädigung abhängig von der Einbaulage und Prüfprofildauer zu ermitteln, müssen daher gesonderte Tests erfolgen.

Der Versuch wird nicht mit Dämpfungselementen durchgeführt, die Erkenntnisse aus den Untersuchungen mit Schwingungsdämpfern führten zur Schlussfolgerung, dass höhere Schädigungen auftreten würden.

3.3.4 Testergebnis der Erprobung

Nach der Prüfung wurden die Module eingehend auf etwaige Schäden untersucht. Es konnten keine Materialbrüche festgestellt werden, Risse blieben ebenfalls aus. Die markierten Schraubenpositionen veränderten sich nicht. Dies führt zu dem Schluss, dass jene 46P Module für den Einsatz in E-Fahrzeugen für 200.000km grundsätzlich geeignet sind.

Tiefere Erkenntnis erhält man aus der Messung des Innenwiderstandes, dieser stieg im Durchschnitt um 3,7% (von 36,6mOhm auf 38mOhm). Eine Studie von 2015 [5] hat festgestellt, dass sich Vibrationen bei 18650er Zellen je nach Vibrationsdauer, Einbaulage und auch Zelltyp- abhängig unterschiedlich auswirken. Pouchzellen zeigten nach gleicher Vibrationsbelastung laut dieser Studie keine negativen Effekte. Es wird schlussgefolgert, dass Vibrationsschäden bei Rundzellen hauptsächlich durch Deformationen von Elektroden- und Separatorenlayer am Wickelrand stammen. Dabei vergrößert sich die auf der Anodenseite befindliche SEI Schicht (Elektrolyt verbindet sich irreversibel mit der Graphitelektrode) wodurch der Innenwiderstand steigt. Es wird betont, dass Ergebnisse von Vibrationsversuchen mit 18650er Zellen nicht verallgemeinert werden dürfen, da jeder 18650 Zelltyp anders auf Vibrationen reagiert. Es wird auch festgestellt, dass die Vibrationsrichtung der Zellen entscheidend für das Maß an Schädigung verantwortlich ist: 18650er Zellen sind in axialer Richtung empfindlicher auf Vibrationen als in radialer Richtung.

Der Anteil des VILEP Profils in jene kritische Achse beträgt in der derzeit bei Kreisel Electric gewählten Einbaulage nur eine Stunde, in radialer Richtung 8,5 Stunden. Um die Effekte zwischen beiden Einbauarten der Kreisel- Batteriemodule zu vergleichen, ist es notwendig einen weiteren Versuch durchzuführen.

Zur Verteilung des Innenwiderstandes über die Zellposition:

Die in der Mitte liegenden Zellen verzeichneten trotz der höheren Resonanzfähigkeit des Batteriemodules in diesem Bereich weniger Anstieg des Innenwiderstands als die am Rand liegenden Zellen. Zellen an den oberen, schmalseitigen Rändern der Module verzeichnen einen höheren Anstieg als mittig liegende Zellen. Die Begründung für diesen Effekt liegt darin, dass der Schwingungseintrag am Rand mit geringster Dämpfung auftritt und daher maximal auf die randgelegenen Zellen wirkt. Pro Modul wurden neun Zellen hinsichtlich Innenwiderstand untersucht. Die detaillierten Messergebnisse, sowie die Zellpositionen sind in Tabelle 14 zu finden.

Zusätzlich wurde ein Spannungsabfall in den Modulen von durchschnittlich 0,0014% (von 3,571V auf 3,566V bei einer Messtoleranz von 0,1mV +/- 1%) gemessen. Dieser geringe Spannungsverlust schließt somit aus, dass der Innenwiderstand, welcher auch von dem Ladezustand der Zelle abhängt, durch einen Spannungsabfall entsteht.

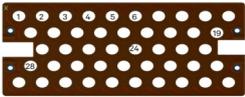
Um den Anstieg des Innenwiderstandes in Relation zu setzen, sei hier folgendes Beispiel genannt: Bei rein zyklischer Belastung unter Laborbedingungen beträgt der Anstieg des Innenwiderstandes nach 1000 Zyklen Laden und Entladen bei 100% DoD (entspricht einer durchschnittlichen Fahrleistung größer als 200 000km) je nach Zelltyp, Belastung und Temperatur mindestens 15% bis 30% [12]. Dieser Effekt wird als zyklische Alterung beschrieben.

Bezugnehmend auf Literaturangaben und den Messergebnissen wird festgestellt, dass die vibratorische Alterung beim Zelltyp 18650 Samsung 29E7 durchschnittlich 3,7% zusätzlich zur zyklischen Alterung am Anstieg des Innenwiderstands beitragen. Die vibratorische Alterung ist damit im Vergleich zur zyklischen Alterung gering, jedoch sollte diese für eine Vorberechnung des Innenwiderstandes für eine Fahrleistung von größer als 100 000km berücksichtigt werden.

Der relativ gering ausfallende Anstieg des Innenwiderstands gibt auch Anlass zur Diskussion darüber, ob zusätzliche schwingungsdämpfende Maßnahmen zielführend sind. Dabei muss der Aufwand einer besseren Schwingungsdämpfung gegenüber der Minderung des Innenwiderstandsanstiegs über 200 000km gerechtfertigt werden. Wichtige Parameter zur Entscheidungsfindung sind Vorabtests mit den betreffenden Zellen und dem VILEP Profil.

Vibrationslebensdauer Berechnung

Tabelle 18: Innenwiderstandsänderung durch VILEP Profil

Messtabelle Innenwiderstand						
Datum	12.01.2018	02.02.2018				
Temp.	22,1°C	22,1°C				
Strompuls	50%	50%				
	vor Prüflauf	nach Prüflauf	Änderung	Ø Änderung	min. Tol.	max. Tol.
46p_29E7_M1						
Zelle Nr.	mOhm	mOhm	[%]	[%]	[%]	[%]
1	36.8	38.2	+ 3.7%	+ 3.6%	- 0.7%	+ 0.7%
2	36.5	37.8	+ 3.4%			
3	36.6	37.9	+ 3.6%			
4	36.4	37.7	+ 3.7%			
5	36.3	37.9	+ 4.3%			
6	36.3	37.5	+ 3.3%			
19	36.5	38.1	+ 4.3%			
24	36.2	37.3	+ 2.9%			
28	36.2	37.4	+ 3.2%			
46p_29E7_M2						
1	36.6	38.0	+ 3.7%	+ 4.1%	- 0.9%	+ 1.2%
2	36.7	38.3	+ 4.3%			
3	36.8	38.1	+ 3.4%			
4	37.0	38.6	+ 4.3%			
5	36.7	38.4	+ 4.6%			
6	36.8	38.6	+ 4.8%			
19	36.3	38.3	+ 5.4%			
24	36.7	38.0	+ 3.5%			
28	36.7	37.9	+ 3.2%			
46p_29E7_M3						
1	36.9	38.2	+ 3.6%	+ 3.4%	- 0.7%	+ 0.6%
2	36.6	37.8	+ 3.2%			
3	36.7	37.8	+ 2.9%			
4	36.9	38.2	+ 3.5%			
5	36.8	38.0	+ 3.2%			
6	36.4	37.9	+ 3.9%			
19	36.9	38.4	+ 3.8%			
24	36.6	38.1	+ 4.1%			
28	36.6	37.6	+ 2.7%			
Durchschnitt der Module						
1	36.8	38.1	+ 3.7%	+ 3.7%	- 0.7%	+ 0.8%
2	36.6	37.9	+ 3.6%			
3	36.7	37.9	+ 3.3%			
4	36.7	38.2	+ 3.8%			
5	36.6	38.1	+ 4.0%			
6	36.5	38.0	+ 4.0%			
19	36.6	38.2	+ 4.5%			
24	36.5	37.8	+ 3.5%			
28	36.5	37.6	+ 3.0%			

4 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Berechnungstool entworfen, mit welchem fahrzeugspezifische Schwingungsprofile so modelliert werden können, damit eine gewünschte Lebensdauer stark verkürzt auf einem Schwingungsprüfstand simuliert werden kann. Diese Berechnung basiert auf Energieäquivalenz und bezieht Spitzenbelastungen sowie Temperaturbereiche nur bedingt mit ein (Vgl. Kapitel 3.2). Das erzeugte Vibrationslebensdauerprofil (VILEP), welches auf realen Messungen an der Traktionsbatterie basiert, ist prinzipiell geeignet um Materialermüdungen sowie Zellschädigungen von Traktionsbatterien festzustellen, da genau jene Schwingungsbereiche angeregt werden, welche auch tatsächlich gemessen wurden. Des Weiteren kann das Profil für intensivere Bauteilprüfungen zeitmäßig verlängert werden.

Die Amplituden des VILEP Profil basieren auf Schwingungsmessungen an der Traktionsbatterie eines Elektrofahrzeuges (Vgl. Kapitel 2.4) mit heckseitig eingebauter Batterie. Diese Schwingungen wurden während der Fahrt auf normierten Fahrbahnprofilen gemessen und anschließend analysiert und ausgewertet.

Daraus wurde das Vibrationslebensdauerprofil durch Erhöhung der Amplitude auf Basis von Energieäquivalenz berechnet. Das VILEP Profil wurde mit aktuellen Normprofilen in Relation gesetzt und gibt Aufschluss über die eingebrachte Energie sowie deren Resonanzpunkte.

Drei 1s46p Batteriemodule der Firma Kreisel Electric wurden mit diesem Profil getestet. Es traten keine mechanischen Schäden auf, jedoch fand ein Anstieg des Innenwiderstandes statt. Die Module wurden zuvor einer Spektralanalyse mittels sinusförmiger Anregung unterzogen, um jene auf Resonanzpunkte zu untersuchen. Weiters wurde die Wirkung zweier unterschiedlicher Schwingungsdämpfer auf Kautschuk- und Drahtseilbasis untersucht.

4.1 Zusammenfassung aller Kapitel

An dieser Stelle werden die Erkenntnisse der Untersuchungen im Laufe der Masterarbeit zusammengefasst.

4.1.1 Ergebnis Literaturrecherche

- Internationale Normen schreiben, je nach Zweck und Produkt, unterschiedliche Vibrationsprofile vor. Aus diesen Profilen geht nicht hervor in wie weit eine Schädigung an den Prüfobjekten auftritt bzw. wie hoch der energetische Eintrag ist. Auch fehlt ein plausibler Zusammenhang zwischen Normprofil und tatsächlich auftretenden Vibrationen

- Wissenschaftliche Veröffentlichungen [6] weisen auf Zellschäden und ein Ansteigen des Innenwiderstands durch Vibrationen und Schocks hin

4.1.2 Ergebnis Spektraluntersuchung eines 2s46p Modules

- Ein 2s46p Modul wurde auf einem Schwingungsprüfstand in drei Achsen Sinusschwingungen und Rauschanregungen unterzogen. Das Modul wird über 100Hz resonanzanfällig, bei 350 bis 400Hz ergeben sich Resonanzpunkte welche die Anregungsfrequenz bis zu 8-fach verstärken. Auch über 1000Hz finden sich Resonanzpunkte
- Schwingungsmessungen an der Zelle zeigen, dass zwischen Zellhalterungen bzw. Modul und der Zelle selbst kaum Unterschiede bestehen
- Messpositionen, welche von der Modulhalterung weiter entfernt liegen, erfahren höhere Beschleunigungen aufgrund des längeren Weges zum Schwingungseinleitungspunkt (Hebelgesetz)

4.1.3 Ergebnis Schwingungsdämpfer

- Die Dämpfungseigenschaften von einem Kautschuk- und Drahtseildämpfer wurden untersucht. Beide Dämpfer mindern Schwingungen über einen großen Frequenzbereich, allerdings verlagern sie den Resonanzpunkt der Module in den niederfrequenten Bereich: Kautschuk auf 40Hz und Drahtseil auf 100Hz
- Beides führt nicht zu einer zwangsläufigen Minderung von Bauteilschädigungen und wird daher als „bedingt-geeignet“ eingestuft, da sich der niederfrequenter Resonanzpunkt noch negativer auf das Batteriemodul auswirken könnte als ohne Dämpfung.
- Durch die Dämpfung wird Schwingungsenergie vom gesamten Frequenzbereich auf einen neuen, niederfrequenteren Resonanzpunkt umgewandelt und dort konzentriert
- Ziel sollte es sein durch Dämpfer den Resonanzpunkt in Bereiche außerhalb der im Fahrzeug angeregten energiereichen Resonanzen zu verlagern

4.1.4 Ergebnis Schwingungsmessung an einem BEV

- Die Traktionsbatterie eines auf E-Antrieb umgebauten Audi A2 wurde mit Schwingungsaufnehmer bestückt, um die realen Schwingungen definierter Fahrbahnprofile zu messen
- Die Vibrationsbelastung auf die Traktionsbatterie nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit direkt proportional zu, mit zunehmender und Rauheit progressiv
- Bis 250Hz wird 80% der Schwingungsenergie aufgenommen, die restlichen 20% verteilen sich auf darüberliegende Frequenzbereiche

- Die Eingangsschwingungen am Domlager des Fahrzeuges werden entlang eine Lastpfades bis zur Position des Messensors je nach Position und Achse gedämpft oder sogar um Faktor 2 verstärkt
- Das Domlager ist im Bereich 120 bis 160Hz stark resonant in alle drei Achsen, in diesem Bereich wird die meiste Energie übertragen
- In Fahrzeugquer- und längsrichtung fällt eine Resonanzverstärkung der Traktionsbatterie gegenüber dem Domlager bei 20Hz auf
- Die Fahrprofile zeigen abhängig von Fahrbahn und Geschwindigkeit proportional-anmutende Ausprägungen
- Das Fahrbahnprofil bei 90km/h auf feinem Kopfsteinpflaster wurde einer Terzbandanalyse unterzogen und dient als VILEP Profil Grundlage

4.1.5 Ergebnis VILEP Profil Berechnung

- Auf Basis von Literatur [13] wurden Geschwindigkeitsanteile analysiert und in Kombination mit Fahrbahnanteile [23] eine durchschnittliche Fahrzeugbelastung definiert. Die im Testfahrzeug gemessenen Energieeinträge bei verschiedenen Geschwindigkeiten und verschiedenen Fahrbahnprofilen in x, y und z wurden mit der durchschnittlichen Fahrzeugbelastung kombiniert. Damit ergibt sich eine durchschnittliche Schwingungsbelastung eines Fahrzeuges mit Einheit $J/(kg*s)$. Durch Definition einer Durchschnittsgeschwindigkeit wurde die zu erwartende Fahrzeit für 200 000km berechnet (3700h), um daraus auf den gesamten energetischen Schwingungseintrag zu schließen
- Der Schwingungseintrag wurde auf eine faktorisierte Form des pythagoreisch- gemittelten Fahrprofils bei 90km/h auf feinem Kopfsteinpflaster umgerechnet, um das VILEP Profil zu generieren. Damit lässt sich die Amplitude und somit die Prüfzeitdauer für eine gewünschte Fahrleistung berechnen, der Vorgang kann für andere Messungen und je nach Prüfanforderung variiert werden
- Das errechnete Profil deckt sich zum Großteil mit dem bestehenden Normprofil aus LV-124 [3], unterscheidet sich jedoch in der Prüfdauer. Das VILEP Profil dauert in x- und y- Achse um je 7 Stunden weniger. D.h. das LV124 Profil bringt mehr Schwingungsenergie in Prüfkörper ein

4.1.6 Ergebnis des Lebensdauertests mit VILEP

- Der VILEP Test an drei 1s46p Modulen wurde in drei Achsrichtung (y: 1,1h, x: 1h, z: 8,4h) bei 22°C durchgeführt und verlief positiv, es traten keine mechanischen Schäden auf und Schraubenpositionen veränderten sich nicht
- Der Innenwiderstand der Batteriezellen stieg im Durchschnitt um 3,7%. Dies ist auf Deformation der Elektrodenlayer und der damit einhergehenden Vergrößerung der SEI (Solid Electrolyte Interface) Schicht zurückzuführen, dabei reagiert ein Teil des Elektrolyts irreversibel mit der Graphitanode
- Die Batteriemodule sind für eine Fahrleistung von 200tsd Kilometer grundsätzlich geeignet

4.2 Ausblick

Mit dieser Masterarbeit wurde für die Traktionsbatterieentwicklung eine Methode entwickelt, um die mech. Lebensdauer hinsichtlich Schwingungseinflüsse zu simulieren. Damit ist es möglich auf Basis von Messfahrten ein bauteilspezifisches Prüfprofil zu erstellen. Dieses ist durch Anpassen der Parameter Prüfzeitdauer, Prüfamplitude und Temperatur genau auf die spezifischen Prüfanforderungen einstellbar.

Bestehende Normprofile können damit auf deren Energieinhalt ausreichend genau bestimmt werden. Die Erstellung des VILEP Profil und des Berechnungstools dienen als Ausgangslage für weitere Untersuchungen, welche Temperatur und mech. Spitzenbelastungen miteinbeziehen. Das Miteinbeziehen dieser Parameter führt zu einer notwendigen statistischen Bewertung mehrerer Prüfkörper, da die Reihenfolge des Aufbringens von Spitzenbelastungen und Temperatur eine vorschädigende Wirkung besitzen können.

Die bisherigen Untersuchungen bilden eine gute Basis für das Design von Batteriemodulen im Entwicklungsstadium. Speziell für die Prototypenentwicklung stellt dieses Tool eine wertvolle Hilfestellung dar, da damit spätere Einsatzzwecke eines Prüfkörpers in einem frühen Entwicklungsstadium getestet werden können.

5 REFERENZEN

- [1] statista.com, „statista.com,“ 30 05 2017. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168350/umfrage/bestandsentwicklung-von-elektrofahrzeugen/>. [Zugriff am 30 05 2017].
- [2] D. Fritz , H. Heinfellner, G. Lichtblau, W. Pölz und B. Schodl, *Ökobilanz Alternativer Antriebe*, Wien: Umweltbundesamt, 2016.
- [3] Mercedes-Benz, „MBN LV124-2,“ in *Elektrische und elektronische Komponenten in PKW bis 3,5t- Allgemeine Anforderungen, Prüfbedingungen und Prüfungen Teil 2*, 2013.
- [4] Amtsblatt der Europäischen Union, *Regelung Nr. 100 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb [2015/505]*, 2014.
- [5] Journal of Power Sources 288, „Effects of vibrations and shocks on lithium-ion cells,“ in *Journal of Power Sources*, ScienceDirect, 2015, pp. 62-69.
- [6] UN 38, *Transport of dangerous goods, Version: ST/SG/AC.10/Rev.6*, 2015.
- [7] L. R. v. Stockert, *Eisenbahnunfälle. Ein Beitrag zur Eisenbahnbetriebslehre*, Leipzig, 1913.
- [8] „wikipedia.org,“ wikipedia.org, 15 2 2018. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/August_W%C3%B6hler#Weblinks. [Zugriff am 15 2 2018].
- [9] E. Haibach, *Betriebsfestigkeit*, Wiesbaden: Springer, 2005.
- [10] M. Sander, *Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen: Konzepte und Methoden zur Lebensdauervorhersage*, Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [11] Liu, Zhirong, Wang, Gong, Liu, Guo und Wang, *Experimental Study of Thermal Runaway Process of 18650 Lithium-Ion Battery*, Nanjing: MDPI, 2017.
- [12] Ecker, Nieto, Käbitz, Schmalstieg, Blanke, Warnecke und Sauer, *Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O₂-based 18650 lithium ion batteries*, Bd. 248, S. Direct, Hrsg., Aachen: Journal of Power Sources, 2013.
- [13] R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2103.
- [14] P. Lima, „<http://pushevs.com>,“ 29 3 2017. [Online]. Available: <http://pushevs.com/2017/02/20/details-samsung-sdi-94-ah-battery-cell/>. [Zugriff am 19 7 2017].
- [15] RTCA, *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*, Washington, 2010.

Referenzen

- [16] Moore, *UN38.3 Lithium-ion Battery Testing Vibration and Shock Testing Requirements, unpublished presentation*, U. I. W. G. Meeting, Hrsg., Washington DC: Delphi Corporation, 2008.
- [17] J. M. Hooper, J. Marco, G. H. Chouchelamane und C. Lyness, *Vibration Durability Testing of Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) Lithium-Ion 18,650 Battery Cells*, U. o. Warwick, Hrsg., Warwick: MDPI, 2016, p. 27.
- [18] J. M. Hooper und J. Marco, *Understanding Vibration Frequencies Experienced by Electric Vehicle Batteries*, Warwick, Coventry: University of Warwick, 2011.
- [19] Gunnar Kjell und Jenny Frodelius Lang, *Comparing different vibration tests proposed for li-ion batteries with vibration measurement in an electric vehicle*, Barcelona: EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, 2013.
- [20] J. M. Hooper und J. Marco, *Characterising the in-vehicle vibration inputs to the high voltage battery of an electric vehicle*, Warwick,, Coventry CV4 7AL: Elsevier B.V., 2013.
- [21] Forschungsvereinigung Antriebstechnik, *Zählverfahren zur Bildung von Kollektiven und Matrizen, FVA 131 IV, FVA Richtlinie*, 2010.
- [22] M. Pfriem, F. Gauterin und T. Meyer, *Selected Results from a Large-Scale Field Operational Test with Electric Vehicles in Germany and France*, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2014.
- [23] J. M. Hooper und J. Marco, *Defining a Representative Vibration Durability Test for Electric Vehicle (EV) Rechargeable Energy Storage Systems (RESS)*, Montréal, Québec, Canada,: EVS29 Symposium, 2016.
- [24] P. Kurzweil und O. K. Dietlmeier, *Elektrochemische Energiespeicher*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [25] J. Dr. Harmel und K.-U. Schult, *Entwicklung einer Prüfwelle zur sicherheitstechnischen Prüfung elektrischer Energiespeicher mit umweltverträglicher Wirkungsweise*, Hartmannsdorf: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2011.
- [26] A. W. Golubkov, S. Scheikl, R. Planteu, G. Voitic, H. Wiltsche, C. Stangl, G. Fauler, A. Thaler und V. Hacker, *Thermal runaway of commercial 18650 Li-ion batteries with LFP and NCA cathodes - impact of state of charge and overcharge*, Graz, Steiermark: RSC Advances, 2015.
- [27] M. Brand, S. Schuster, T. Bach, E. Fleder, M. Stelz, S. Glaser, J. Muller, G. Sextl und Jossen, *Effects of vibrations and shocks on lithium-ion cells*, J. Power Sources, 2015 288.
- [28] J. Chapin, W. Alvin und W. Carl, *Study of Aging Effects on Safety of 18650-Type Licoox Cells*, USA: Underwriters Laboratory Inc.: Northbrook, IL, 2011.

APPENDIX

Abbildung A-1: Schwingungsprüfstand 10kN Leistungsdaten 1

Abbildung A-2: Schwingungsprüfstand 80kN Leistungsdaten 2

16.3 Schwingungserreger, *Shaker*

16.3.1 Leistungsdaten, *Performance data*

Ausführung / <i>Model (Type)</i>		SW2-1240APP
Max. Vektorkraft / <i>Max. sine vector force</i>	(kN)	10
Max. Vektorkraft / <i>Max. random vector force</i>	(kN _{eff})	10
Max. Vektorkraft / <i>Max. shock vector force</i>	(kN)	20
Frequenzbereich / <i>Frequency range</i>	(Hz)	3000
Masse des schwingenden Systems (dynamisch) ohne zusätzliche Aufbauteile, <i>Mass of vibrating system (dynamic) excl. attachments</i>	(kg)	13 (+1 bei langen Gewindeeinsätzen / <i>at long inserts</i>)
1. Hauptresonanz (unbelastet), <i>1st main resonance (unloaded)</i>	(Hz)	2400
Max. Schwingamplitude Sinus <i>Max. amplitude sine</i>	(mm)	± 18
Max. Schwingamplitude Rauschen Schock <i>Max. amplitude random, shock</i>	(mm)	± 25
Max. Geschwindigkeit Sinus <i>Max. sine speed, unloaded</i>	(m/s)	2
Max. Geschwindigkeit, Rauschen Schock <i>Max. random speed, shock speed, unloaded</i>	(m/s)	2,5
Max. Beschleunigung Sinus, unbelastet <i>Max. sine acceleration, unloaded</i>	(m/s ²)	770
Max. Beschleunigung, Schock, unbelastet <i>Max. shock acceleration, unloaded</i>	(m/s ²)	1540

Abbildung A-1: Schwingungsprüfstand 10kN Leistungsdaten

Schwingungserreger: SW9112-80-LS3

Vektorkraft Sinus [kN] spitze	80
Vektorkraft Rauschen [kN] rms (entspr. ISO534)	80
Vektorkraft Schock [kN] spitze (Halbsinus)	160
Frequenzbereich [Hz] *1	5 - 2500
Hauptresonanz [Hz] *1	2300
Beschleunigung[m/s ²] Spitze(Schock/Sinus)*1	1800 / 1100
Geschwindigkeit [m/s] Spitze (Schock/Sinus) *2	3 / 2
Amplitude [mm] Spitze-Spitze (Schock/Sinus) *	76 / 51
Masse Schwingendes-System [kg] (dyn.) *4	53
Maximale Zuladung [kg] (max)	500
Durchmesser Aufspannfläche [mm]	435
Anzahl der Gewindeinsätze	19
Größe der Gewindeinsätze [mm]	10
Gesamtgewicht [kg] *5	3700
Maße (HxBxT) [mm] *5	1250 x 1450 x 1150
Schalldruck [dBA](max) *6	120

Verstärker: TGE13-8

Anzahl der Schränke	3
Anzahl der Leistungsmodule	8
Ausgangsleistung [KVA]	104
Ausgangsstrom [A] eff.	1040
Ausgangsstrom [A] spitze	4000
Ausgangsspannung [V] eff/spitze	100 / 240
Wirkungsgrad [%]	>90
Taktfrequenz [kHz]	110
Signaleingang [V]rms (für Nennspannung)	3
Rauschabstand [dB]	68
Bandbreite [Hz] (-3dB)	3000
Maße (HxBxT) [mm]	2000 x 1830 x820
Gewicht [kg]	1550
Gesamt-Anschlussleistung [KVA]	129,0
ECO-Stufen	3
Energie-Einsparung [kW]	45 @ 20% max force 30 @ 50% max force 12 @ 85% max force

Notes: + add. Water Cooling Cabinet 1980x610x800

*1: leerer Tisch, wird durch Prüfmassen eingeschränkt

*3 Wegamplitude bei großen Prüfmassen durch Gegenbewegung eingeschränkt

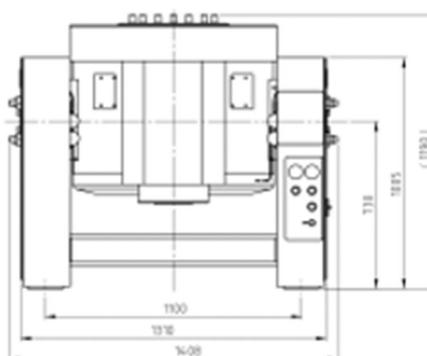
*5 Standard Vertikalsystem ohne Gleitlisch

Kühleinheit: SWG771

Motorleistung [KW]	3
Maße (HxBxT)[mm]	980 x 610 x 820
Wassermenge ext. [l/min]*5	75

Option Schock 11ms / 100g

Max. Kraft [kN] spitze	160
------------------------	-----



*2 erweiterte Geschwindigkeit bei Option 100g/11ms

*4 mit Standard-Gewindeinsätzen

*6 gemessen in 1m Abstand ohne Schalldämpfer



Regelungs- und Messtechnik • *Dynamic Test Systems*
 GUTENBERGSTRASSE 27 • D-21465 REINBEK / HAMBURG • GERMANY
 TEL. 040 / 727 603 -0 • FAX 040 / 722 30 66 • email: info@RMS-TestSystems.de

Abbildung A-2: Schwingungsprüfstand 80kN Leistungsdaten