

Untersuchungen zur Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Elektrofahrzeugen

Marco Hochgräf

kassel
university



press

Marco Hochgräf

Untersuchungen zur Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Elektrofahrzeugen

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. em. Dr.-Ing. Bernd Klein

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier

Tag der mündlichen Prüfung

10. Juli 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2015
ISBN 978-3-7376-0002-6 (print)
ISBN 978-3-7376-0003-3 (e-book)
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-400033>

© 2015, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de/

Printed in Germany

Meiner Familie gewidmet

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Ausarbeitung wird die Konzeption eines an die Entwicklung von Elektrofahrzeugen orientierten „Produkt-Entwicklungs-Prozesses“ (E-PEP) mit dem besonderen Fokus auf die Sicherung einer frühen Entwicklungsreife beschrieben.

Das Lösungskonzept orientiert sich an den Randbedingungen einer speziellen Aufgabenstellung und ist beim Bau eines Prototyps umgesetzt worden. Infolge des hohen Neuheitsgrades der Aufgabenstellung werden auch weitere Felder für neue Forschungsfragen aufgezeigt.

I. Aufgabenstellung

Eine innovative Fahrzeugentwicklung muss eine interdisziplinäre Projektarbeit sein, weil sie im Alleingang nicht erfolgreich umsetzbar ist. In dieser Arbeit wird auf Basis eines Forschungsprojektes mit mehreren universitären und industriellen Partnern ein neuartiges einachsiges Elektrofahrzeug entwickelt. Die Stabilisierung erfolgt ähnlich dem bekannten Segway und ermöglicht elektrisches Fahren.

Ausgehend von einer Rohidee /BRA 10/, werden auf Grundlage der im Projektverbund festgelegten Fahrzeuganforderungen ein neuartiges Konzept erarbeitet und der notwendige Entwicklungsprozess unter Berücksichtigung der Projektlaufzeit geplant und festgelegt.

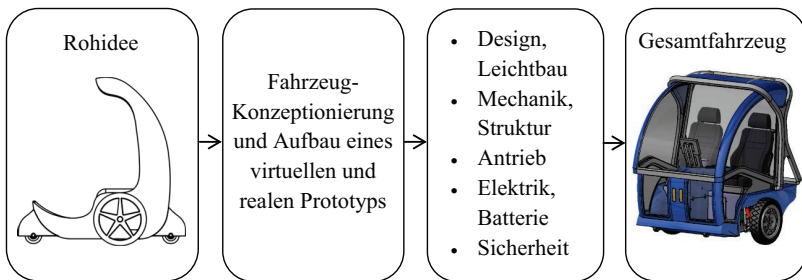


Abb. 0.1: Ablaufplan für die Fahrzeugentwicklung

Aus dieser Neuentwicklung ergeben sich potenzielle Forschungsfragen, beispielsweise in Bezug auf die Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen des Fahrzeuges, da nahezu alle mechanischen Teile und elektronischen Zukaufkomponenten Neuentwicklungen im Gesamtsystem darstellen und nur in begrenztem Umfang begleitende Versuche möglich sind. In dieser Arbeit gilt es insbesondere zu beantworten:

- Welche Test- und Prüfverfahren sollten in der Entwicklungsphase bis zum Fahrzeugaufbau theoretisch und praktisch geplant bzw. durchgeführt werden, um einen zuverlässigen Demonstrator für die erste Testphase bereitstellen und dessen Lebensdauer, ausgehend von den kritischen Komponenten, abschätzen zu können?
- Die Funktionsweise der mechanischen Schwerpunktverlagerung kann in der Praxis durch unberechenbare Effekte die ausreichend zuverlässige Funktionsweise beeinflussen. Mit welchen Prüfungen kann die Funktionssicherheit untersucht werden, sodass

zufällige Systemausfälle oder mechanische Störeffekte während der Inbetriebnahme höchstwahrscheinlich nicht auftreten?

Für wissenschaftliche Zuverlässigkeitsuntersuchungen im Entwicklungsprozess stehen viele unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Damit stellt sich die Frage:

- Welche Zuverlässigkeitsmethoden, die für vergleichbare Systeme zielführend sind, können für die Fahrzeuguntersuchungen genutzt werden?

Durch Untersuchungsszenarien können für verschiedene Fahrzeugsysteme jeweils andere Ausfallursachen abgeschätzt werden. Die Zuverlässigkeit und Lebensdauer eines komplexen Systems ist jedoch zeitlich begrenzt und sollte mithilfe eines Werkzeuges gemanagt werden, um einen Gesamtüberblick hinsichtlich der Themenstellung beizubehalten, insbesondere für den Fall, dass Bauteile zwischenzeitlich ausgetauscht werden. Bei einem Gesamtfahrzeug mit zahlreichen Komponenten aus interdisziplinären Wissensdomänen entsteht somit ein komplexes System. Daraus resultiert die Fragestellung:

- Mit welchen theoretischen Verfahren bzw. Methoden könnten die verschiedenen Ausfallursachen in jeweils unterschiedlichen Systemen gesamtheitlich modelliert, kontrolliert und ausgewertet werden?

Ein allgemeiner Entwicklungsprozess umfasst die Vorgehensweise von der Idee und Konzeptionierung bis hin zum Erprobungsträger oder Prototypen und letztlich bis zur Serienreife. In diesem Zusammenhang fehlt ein durchgängiger Prozess, in den die verwendeten Methoden für wichtige Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen integriert werden und im Rahmen dieser Arbeit zu erarbeiten ist. Diese methodische Vorgehensweise kann dann auf vergleichbare Fahrzeugentwicklungen übertragen werden.

II. Zielsetzung

Das primäre Ziel dieser Arbeit besteht darin, theoretische und praktische Untersuchungen während der Entwicklung neuartiger Fahrzeuge durchzuführen, um frühzeitig die mechanische Funktionalität und die Zuverlässigkeit kritischer Baugruppen in einem frühen Entwicklungsstadium sicherzustellen.

Durch die Erarbeitung von geeigneten Test- und Prüfscenarien können einerseits Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen und andererseits die dokumentierten Erkenntnisse für zukünftige Versuche bzw. Untersuchungen genutzt werden.

Die mechanische Funktionalität ist für die Fahrzeugstabilisierung elementar wichtig. Daher ist ebenfalls das Ziel zu verfolgen, grundlegende Berechnungsansätze in den Konstruktionsprozess zu integrieren. Die Vereinfachung und Reduzierung dieses Berechnungsaufwands kann mithilfe geeigneter Software erfolgen.

Weiterhin wird die Zielsetzung verfolgt, einen speziellen Entwicklungsprozess (s. PEP) zu erarbeiten und bereitzustellen, der einerseits die projektspezifische Vorgehensweise zeitlich beschreibt und andererseits die verwendeten Methoden bzw. Modelle innerhalb der Zeitspanne strukturiert anzuwenden hilft.

Auf dieser Grundlage kann ein Leitfaden formuliert werden, welcher der Beschreibung der frühen Entwicklung und des Aufbaus eines einachsigen Fahrzeuges dient.

Am Ende dieser Arbeit wird eine Software bereitgestellt, in der die Berechnungen und Abhängigkeiten implementiert sind, die im Rahmen eines Projekts zu einem idealisierten Fahrzeug angewandt und evaluiert werden können.

III. Vorgehensweise

Wie bei jeder Entwicklung steht am Anfang eine Konzeptphase, in der die unterschiedlichen Anforderungen sinnvoll aufeinander abgestimmt werden müssen.

Zunächst beginnt die Entwicklung des Fahrzeugs im Projektverbund. Währenddessen werden die fahrzeugrelevanten Funktionen und deren Abhängigkeiten eruiert und priorisiert, um das Fahren (nur auf einer Achse) zu ermöglichen. In diesem Kontext wurden unterschiedliche Test- und Prüf szenarien für Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen erarbeitet, um beispielsweise das Ausfallrisiko kritischer Baugruppen methodisch zu reduzieren.

Weiterhin werden analytische Berechnungsansätze zur mechanischen Funktionalität entwickelt, die in den Konstruktionsprozess eingebunden werden.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein Werkzeug programmiert, das für ähnliche Fahrzeuge während der konstruktiven Entwicklungsphase eingesetzt werden kann. Um dieses Vorgehen darzustellen, ist ein Referenzfahrzeug konzeptioniert worden, das letztendlich die mögliche Anwendung während des Konstruktionsprozesses für vergleichbare Fahrzeuge beschreibt.

IV. Ergebnisse

Für den strukturellen und mechanischen Fahrzeugaufbau ist ein Entwicklungsprozess erarbeitet worden, der auch für vergleichbare Projekte verwendet werden kann. Wichtige Methoden bzw. Modelle wurden in den zeitlichen Prozess integriert.

Bezüglich der mechanischen Funktionalität konnten der konstruktive Einfluss und die Rückwirkungen auf den Gesamtaufbau herauskristallisiert werden, um zu ermöglichen, Änderungen während des Entwicklungsprozesses gezielt vorzunehmen.

Kritische Bauteile bzw. Baugruppen können mit einer methodischen Filterung herauskristallisiert werden. Diesbezüglich lassen sich schnell Ergebnisse erzielen, die eine allgemeine Abschätzung der Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer ermöglichen. Weiterhin wurden Testplanungen erarbeitet, um Lebensdaueruntersuchungen in weiterführenden Arbeiten durchführen zu können.

Aufgrund der Berechnungen zur Mechanik konnten mathematische Zusammenhänge erarbeitet werden, die dazu dienen, bereits in der konstruktiven Phase die unterschiedlichen Positionierungen des Gesamtfahrzeugs unter Berücksichtigung verschiedener Abhängigkeiten von Subsystemen umzusetzen.

Mit dem Konzept ist ein Vorgehen erarbeitet worden, das zur Lebensdauerabschätzung genutzt werden kann, wenn die notwendigen Lebensdauerdaten vorhanden sind.

Durch die selbsterklärenden Eingabemasken innerhalb des Programms können neue Berechnungsansätze relativ zeitnah in den Entwicklungsprozess integriert werden, wodurch auch konstruktive Änderungen berücksichtigt werden können.

Die anwendungsorientierte Vorgehensweise wird anhand eines vergleichbaren Fahrzeugmodells beschrieben, in dem verschiedene Konzepte hinsichtlich der mechanischen Funktionalität untersucht bzw. bewertet wurden.

Die wichtigsten Ziele und Ergebnisse dieser Arbeit werden in der nachfolgenden Abbildung kurz und übersichtlich dargestellt.

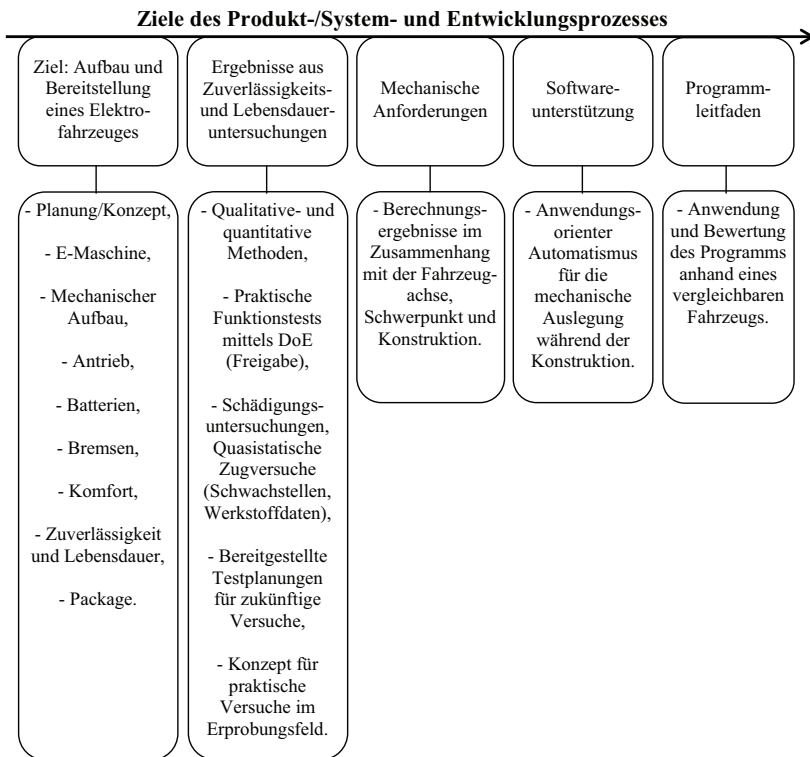


Abb. 0.2: Übersicht über die erarbeiteten Ergebnisse aus der Aufgabenstellung und der Zielsetzung dieser Arbeit

Die Entwicklung und der Aufbau eines Fahrzeuges bilden einen kontinuierlichen Prozess, der stets erweitert oder optimiert werden muss. Daher ergeben sich nachfolgend weitere Forschungsfragen zur Thematik.

V. Forschungsfragen für weiterführende Arbeiten

Die Entwicklung eines neuartigen Fahrzeuges ist eine komplexe Aufgabe, die sukzessiv in verschiedene Stadien eingeteilt wurde. Die bisher erfolgten Untersuchungen bezüglich der Zuverlässigkeit und der Lebensdauer wurden vor der Inbetriebnahme des Gesamtfahrzeuges vorgenommen. Daraus folgt, dass weiterführende Fahrzeuganalysen ratsam sind, da Zuverlässigkeits- bzw. Lebensdaueruntersuchungen im gesamten Entwicklungsprozess vorgenommen werden sollten.

Ergebnisse aus dem dynamischen Fahrprozess bezüglich der kritischen Baugruppen fehlen daher. Daraus resultieren folglich offene Fragestellungen.

- Die tatsächlich in den Testfahrten auf den Fahrzeugrahmen wirkenden Kräfte sind noch unbekannt. Daher stellt sich die Frage: Welche realen dynamischen Belastungen wirken gesamtheitlich unter Berücksichtigung von Steigungsfahrten, Schlechtwegstrecken und der elektromechanischen Fahrzeugstabilisierung auf den Fahrzeugrahmen?
Durch das Applizieren von Dehnungsmessstreifen an den zu untersuchenden Stellen des Gesamtfahrzeuges wäre die Auswertung unter realen Bedingungen möglich.
- Welchen Methoden zur Überprüfung von Zuverlässigkeit und Lebensdauer können im Rahmen der Erprobungsphase genutzt werden, um den erarbeiteten Ansatz dieser Arbeit zu erweitern?
- Inwieweit kann das Berechnungsprogramm in ein konventionelles Programm implementiert und erweitert werden, um die zu untersuchenden Funktionen für ein einachsiges Fahrzeug mitzubetrachten?
- Eine Regel der konstruktiven Prinzipien sagt aus, dass möglichst eine direkte Krafteinleitung in die Haupttragstruktur stattfinden soll /KLE 13/. Bezüglich der mechanischen Schwerpunktverschiebung des Fahrzeuges stellt sich die Frage, ob der Abstand zwischen dem Spindeltrieb und dem Führungssystem idealerweise aufgehoben werden kann. Der Abstand zwischen beiden Systemen wird in der aktuellen Konstruktion durch eine aufwendige mechanische Anbindung realisiert.
- Es ist ratsam, den erstellten Entwicklungsprozess möglichst bis zur Serienreife bzw. Serienproduktion (SoP) zu erweitern.

Abstract

The development of an innovative vehicle is an interdisciplinary project work. In this doctoral thesis, a new single-axle electric vehicle has been designed with several academic and industrial partners.

The aim of this thesis is to execute theoretical and practical researches for a new development on an electronic vehicle package. This was important to ensure the mechanical functionality and reliability for critical components during early development. The special kinematic development for the mechanical stabilization could be analyzed and calculated in dependency of the centre of gravity for the single-axle vehicle. Different design modifications in the construction could change the centre of gravity of the electric car with undesirable mechanical effects. Therefore, during the design modifications, the vehicle kinematic can be checked regularly with a self-programmed software, as the complex modifications have an influence on the centre of gravity of the vehicle. Finally, this software was evaluated on an idealized vehicle concept.

Additionally, mechanical components have been calculated with the finite-element-method to find out the material properties in comparison with quasi-static and dynamic practical experiments.

Throughout the whole construction of the entire vehicle a development process was executed, which could be used as a structure guideline for similar projects in the future. In this process important methods of analyses for the improvement of the reliability and durability for this electric car were integrated.

The construction of this new vehicle is a long and continuous development process. It was necessary to work out some new questions, which could be answered in further academic thesis. For example, lightweight and energy efficiency will be still relevant for further work as well as analysis of forces and stresses during the time it takes to drive the vehicle on the planned route. During these practice tests it could be possible for an electric or mechanical component fail. By using a concept, one can manage the integrated components and it will be possible to repair or replace any components, prematurely.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	PROBLEMSTELLUNG UND MOTIVATION.....	1
1.2	STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK.....	5
1.3	ZIELSETZUNG UND AUFBAU DER ARBEIT.....	8
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	10
2.1	ELEKTROMOBILITÄT.....	10
2.1.1	<i>Antriebstechnologien und Energiespeicher.....</i>	<i>11</i>
2.1.2	<i>Infrastruktur und Ladekonzepte.....</i>	<i>13</i>
2.1.3	<i>Leichtbau – Potenziale und Herausforderungen.....</i>	<i>14</i>
2.1.4	<i>Zukunftsperspektiven – Alternative Antriebe.....</i>	<i>19</i>
2.2	GESETZE, NORMEN UND REGULARIEN.....	21
2.2.1	<i>Gesetzgebung.....</i>	<i>21</i>
2.2.2	<i>ISO 26262 - Funktionale Sicherheitsstandard.....</i>	<i>22</i>
2.2.3	<i>Patentrecherche zur mechanischen Schwerpunkverlagerung.....</i>	<i>27</i>
2.3	STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG.....	29
2.3.1	<i>Qualitätsmerkmal.....</i>	<i>30</i>
2.3.2	<i>Versuchsmethoden.....</i>	<i>31</i>
2.4	METHODEN ZUR SYSTEMZUVERLÄSSIGKEIT.....	33
2.4.1	<i>Qualitative Methoden.....</i>	<i>35</i>
2.4.1.1	<i>FMEA und FMECA.....</i>	<i>35</i>
2.4.1.2	<i>FTA und ETA.....</i>	<i>38</i>
2.4.2	<i>Quantitative Methoden.....</i>	<i>40</i>
2.4.2.1	<i>FMEDA.....</i>	<i>40</i>
2.4.2.2	<i>Boolesches Modell.....</i>	<i>43</i>
2.4.2.3	<i>Markoff-Theorie.....</i>	<i>44</i>
2.4.3	<i>Zeitraffende Erprobung.....</i>	<i>46</i>
2.5	LEBENSDAUERVERTEILUNGEN ZUR ZUVERLÄSSIGKEITSABSCHÄTZUNG.....	48
2.5.1	<i>Normalverteilung.....</i>	<i>49</i>
2.5.2	<i>Lognormalverteilung.....</i>	<i>51</i>
2.5.3	<i>Exponentialverteilung.....</i>	<i>52</i>
2.5.4	<i>Weibull-Verteilung.....</i>	<i>54</i>
2.6	MATERIALERMÜDUNG UND SCHÄDIGUNGSMECHANISMEN.....	60
2.6.1	<i>Werkstoffkennwerte.....</i>	<i>61</i>
2.6.2	<i>Betriebslasten und Zählverfahren.....</i>	<i>63</i>
2.6.3	<i>Schädigungshypothesen zur Lebensdauerabschätzung im Fahrzeugbau.....</i>	<i>64</i>
3	ENTWICKLUNG EINES ELEKTROFAHRZEUGES.....	67
3.1	IDEENFINDUNG UND ENTWURF.....	67
3.2	FAHRZEUGPACKAGE.....	69
3.3	DESIGN UND MECHANIK.....	71
3.4	RAHMENKONSTRUKTION UND AUBENHAUT.....	74
3.5	FAHRWERKSENTWICKLUNG.....	76
3.6	GESAMTFAHRZEUG – ERGEBNISSE UND REIFEGRAD.....	77
3.7	FORSCHUNGSPOTENZIALE UND ZIELSETZUNG.....	80
4	ZUVERLÄSSIGKEITS- UND LEBENSDAUERUNTERSUCHUNGEN.....	83
4.1	QUALITATIVE UND QUANTITATIVE BETRACHTUNGEN.....	83
4.2	ZUVERLÄSSIGKEITSMODELLE.....	97
4.3	PRÜFAUFBAU ZUR MECHANISCHEN SCHWERPUNKTVERSCHIEBUNG.....	99
4.4	DYNAMISCHE PRÜFGLEICHUNGEN.....	100

4.5	PRAKTISCHE FUNKTIONSUNTERSUCHUNGEN.....	103
4.6	TESTPLANUNGEN FÜR DYNAMISCHE BELASTUNGSPRÜFUNGEN.....	107
4.7	EXPERIMENTELLE SCHÄDIGUNGSUNTERSUCHUNGEN.....	114
4.7.1	<i>Ermittlung der Werkstoffdaten AL 6063 T66.....</i>	<i>115</i>
4.7.2	<i>Mechanische Anbindung für die Schwerpunktverschiebung</i>	<i>118</i>
4.8	METHODEN IM ENTWICKLUNGSPROZESS.....	125
5	MECHANISCHE FAHRZEUGBERECHNUNGEN	127
5.1	MASSENSCHWERPUNKTLAGE	127
5.2	KONSTRUKTIVE STEIGUNGSFÄHIGKEIT	134
5.3	BERECHNUNGSANSATZ FÜR DIE MECHANISCHE SCHWERPUNKTVERSCHIEBUNG	138
5.4	ANSATZ ZUR BERECHNUNG DER SPINDELKRAFT	141
5.5	PROGRAMMAUFBAU FÜR DEN KONSTRUKTIONSPROZESS	142
6	ANWENDUNG UND EVALUIERUNG DES BERECHNUNGSABLAUFS.....	154
6.1	FAHRZEUGENTWURF UND ANFORDERUNGEN	154
6.2	EINTEILUNG DER FAHRZEUGBAUTEILE IN VERSCHIEDENE KLASSEN	156
6.3	INTEGRATION IN DAS PROGRAMMIERTE BERECHNUNGSVERFAHREN	160
6.4	ÄNDERUNGEN IM PROJEKT.....	163
6.5	LÖSUNGSVORSCHLÄGE FÜR DIE ZUKÜNFTIGE FAHRZEUGINTEGRATION	167
6.6	ERARBEITUNG EINES KONZEPTS ZUR LEBENSDAUERABSCHÄTZUNG	167
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	175
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	179
	TABELLENVERZEICHNIS	183
	NOMENKLATUR/ FORMELZEICHEN.....	185
	ABKÜRZUNGEN	188
	BEGRIFFE	190
	LITERATURVERZEICHNIS	192

1 Einleitung

Die Zuverlässigkeit von technischen Bauteilen und Systemen gewinnt besonders wegen Neuregelungen gesetzlicher Gewährleistungszeiten sowie aufgrund zunehmender rechtlicher Verantwortung des Herstellers für Personen-, Sach- oder Vermögensschäden eine überragende Bedeutung. Immer häufiger fordert insbesondere die Automobilindustrie von ihren Zulieferern Zuverlässigkeitsaussagen und Zuverlässigkeitsuntersuchungen noch vor dem geplanten Serienbeginn /WIL 04/.

1.1 Problemstellung und Motivation

Der Trend zu Elektroautos eröffnet neue Forschungsfelder, um den gleichen Stand bei der Sicherheit und Zuverlässigkeit zu erreichen wie bei konventionellen Fahrzeugen. Dass die Auseinandersetzung mit diesem Problemfeld dringend geworden ist, zeigen die Randbedingungen des Klimawandels, die natürliche Begrenzung des Erdöls sowie die strengen CO₂- und Umweltauflagen, die die Entwicklung alternativer Antriebe fördern /KIE 10/; /VDE 10/.

Somit ist der Trend zur Elektromobilität nicht mehr zu bremsen. Es gibt keinen Automobilhersteller, der nicht ein Elektroauto herausbringen möchte. Der Marktanteil reiner Elektrofahrzeuge wird laut einer Roland-Berger-Studie in Westeuropa bis 2020 circa 20 % erreichen /MAR 09/. Die Bundesregierung plant bis zum Jahr 2020 eine Million Elektroautos auf Deutschlands Straßen. Außerdem soll Deutschland zum Leitmarkt für umweltschonende Mobilität werden /DIE 09/; /MÖL 10/. Um die Marktakzeptanz von Elektrofahrzeugen sicherzustellen, müssen sie von Beginn an hohen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanforderungen genügen /BOH 11/; /MOR 08/. Welche kaufrelevante Bedeutung die technische Zuverlässigkeit in Deutschland für die Kunden hat, zeigt die folgende Statistik:

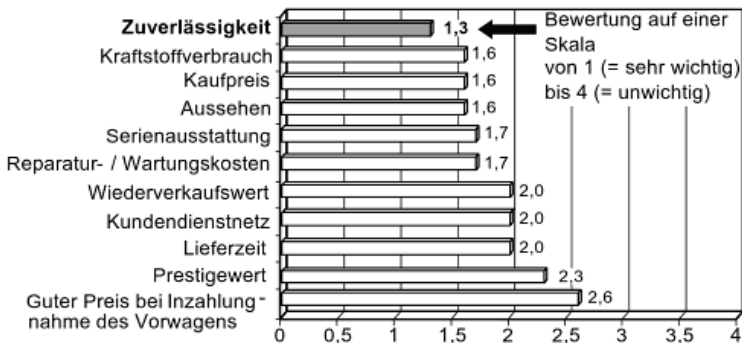


Abb. 1.1: Prioritäre Kriterien beim Kauf eines Autos nach /STA 13/

Aus Abb. 1.1 geht hervor, dass die Zuverlässigkeit von Autos für die Kunden äußerst relevant ist. Die Abschätzung der Zuverlässigkeit und der Lebensdauer sind daher essenzielle Anforderungen an neuartige Elektrofahrzeuge. Einschränkungen bei einem Elektrofahrzeug in typischen Komfortmerkmalen wie hoher Reichweite, guter Fahr-

leistungen, hoher Lebensdauer und angenehmem Langstreckenkomfort werden seitens der Kunden sicherlich keine Akzeptanz finden /WAL 10/.

Damit Systeme abgesichert werden können, sind konkrete Kenntnisse über die bestehenden Ausfallverursacher notwendig. Schon heute stellt die Elektronik eine Schwachstelle in Fahrzeugen da, was unter anderem die ADAC-Pannenstatistik zeigt.

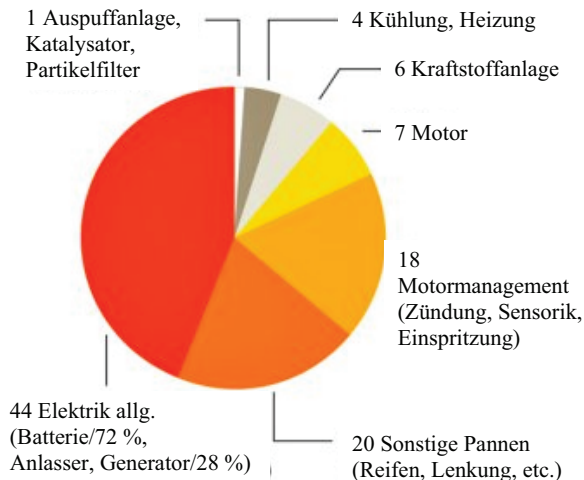


Abb. 1.2: ADAC Fahrzeug-Pannenstatistik 2012 nach /ADA 13b/

Ein Grund für die Anfälligkeit der Elektrik liegt in der zunehmenden Komplexität und Vernetzung elektronischer Baugruppen und dem damit zusammenhängenden immer stärker zunehmenden Anteil an Software /MEY 10a/.

In herkömmlichen Autos steigt der Anteil elektronischer Komponenten z. B. im Antriebsstrang, in zentralen Steuergeräten oder in der Karosserie- und Komfortelektronik. Gleichzeitig werden auch die eingebauten Systeme stets komplexer, sodass man immer wieder vor neuen Herausforderungen steht. Mit steigendem Elektronikanteil wird auch das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten komplizierter und fehleranfälliger /FOR 11a/.

Es ist offensichtlich, dass an elektronische Komponenten aufgrund ihrer wachsenden Komplexität und weiter steigenden Verbreitung bei Neufahrzeugen enorme Anforderungen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit gestellt werden müssen /MEY 10a/. Des Weiteren ist die Ausfallproblematik durch die drei mechatronischen Domänen Mechanik, Elektronik und Software bedingt. Mögliche Inkompatibilitäten zwischen den drei Domänen können aber erst bei der Systemintegration erkannt und beseitigt werden. Somit kann erst relativ spät eine optimale Gesamtlösung erarbeitet werden.

Weiterhin wird eine hohe Zuverlässigkeit nicht allein über die ausgereifte Konstruktion gewährleistet, sondern sie ist zudem nur mit Hilfe spezieller Zuverlässigkeitsmethoden zu erreichen /BER 09/, /VDI 2206/, /RUP 02/.

Diese werden in der Abb. 1.3 kurz und übersichtlich dargestellt.

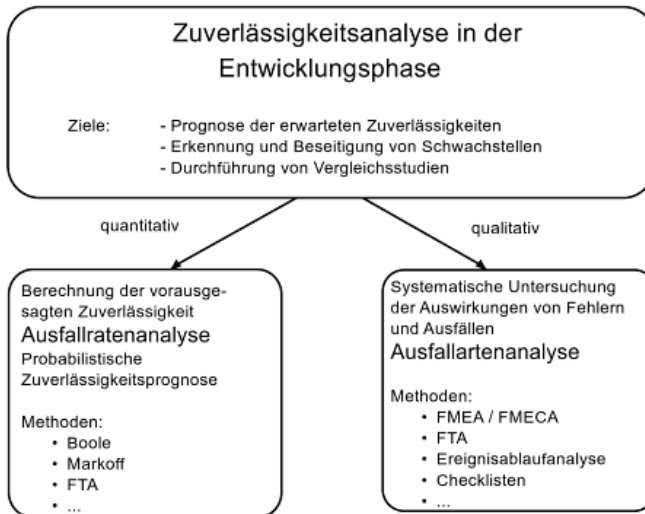


Abb. 1.3: Quantitative und qualitative Methoden zur Analyse der Zuverlässigkeit nach /BER 09/

Obwohl bereits qualitative und quantitative Methoden zur Analyse der Zuverlässigkeit verwendet werden, bestehen in den verschiedenen Domänen einige Defizite. Diese werden wie folgt nach /BER 09/ zusammengefasst.

- Die Zuverlässigkeit wird zurzeit isoliert in jeder Domäne betrachtet.
- Die Zuverlässigkeitsermittlung findet meist in späten Entwicklungsphasen statt.
- Wichtige Daten für die Zuverlässigkeitsberechnungen fehlen häufig.
- Es werden vorwiegend nur Bauteil- und Baugruppenzuverlässigkeiten ermittelt.

Die Entwicklung erfolgt bislang meist getrennt in den involvierten Domänen auf der Basis etablierter Entwicklungsmethoden, die durch eigene Denkweisen, Begriffswelten und Erfahrungen geprägt sind. Die Integration heterogener Komponenten zu mechatronischen Systemen erfordert eine domänenübergreifende Kooperation für eine gesamtoptimierte Lösung. Mechatronische Systeme sind aufgrund des vernetzten Zusammenspiels zwischen den Domänen durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet. Die Komplexität ergibt sich, weil die große Anzahl verkoppelter Elemente in verschiedenen Fachdisziplinen realisiert wird. Diese Problematik ist bereits in der frühen Phase des Entwurfs zu berücksichtigen, da die Wechselwirkungen von mechanischen, elektrotechnischen und informationsverarbeitenden Komponenten das Verhalten des Gesamtsystems beeinflussen. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Informationstechnik ist eine Vielzahl von IT-Werkzeugen entstanden, die den Entwurf unterstützen. Diese sind jedoch oft unzureichend integrierbar, und durchgängige Entwurfsumgebungen sind nur in Ansätzen vorhanden. Diese Werkzeuge ermöglichen eine frühzeitige modelltechnische Abbildung und Simulation mechatronischer Systeme, führen aber ebenfalls zu unterschiedlichen Arbeitsweisen und werfen neue Probleme wie Integration und Schnittstellenbildung auf /VDI 2206/.

Darüber hinaus kommen Defizite nicht nur zwischen den Domänen innerhalb der Produktebene vor, sondern auch auf Projektebene sowie zwischen Projektebene und Branchenebene. Um diese Defizite in Zukunft zu minimieren oder bestenfalls vollständig zu beseitigen, sollten die Daten und die Methoden zwischen den Domänen vernetzt werden, um die Zuverlässigkeit in gesamten Entwicklungsprozess zu steigern /BER 09;/PAU 09;/STR 08/.

Mit den Methoden der Zuverlässigkeitstechnik wie z. B. die Fehlerbaumanalyse, Zuverlässigkeitsblockdiagramm, Markov-Modelle usw. können zwar derzeit Zuverlässigkeitsanalysen für komplexe Systeme durchgeführt werden, doch bei vernetzten Prozessen stoßen diese Analysen schnell an ihre Aussagegrenzen /PAU 09/.

Die Zuverlässigkeitstheorie nutzt überwiegend wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze, die zur Beschreibung und Quantifizierung der Zuverlässigkeitseigenschaften nützlich sind. Die Problematik ist, dass es kein Verfahren gibt, das für alle Systeme oder Fragestellungen geeignet wäre. Die Wahl der geeigneten Methode hängt von den Eigenschaften des zu untersuchenden Systems bzw. Fahrzeugs, den Randbedingungen und den zu klärenden Fragestellungen ab /ABE 08/. Daneben werden Entwicklungszeiträume und Produktionszyklen in der Automobilindustrie wegen des starken Wettbewerbs immer kürzer, sodass für zeitintensive Analysen oft nur ein geringes Zeitkontingent vorhanden ist /MEY 10a/.

Aufgrund des beschriebenen Problemumfeldes ist es während der Entwicklung innovativer Elektrofahrzeuge wichtig, aussagefähige und softwareunterstützende Werkzeuge zur Optimierung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer zu entwickeln, die einerseits die Lücken sowohl in den Domänen als auch zwischen ihnen schließen und andererseits das vernetzte Zusammenspiel der Systemkomponenten darstellen, um die Systemzuverlässigkeit zu erhöhen. Der Einsatz von Netzplantechniken kann bei der Anwendung von quantitativen bzw. qualitativen Zuverlässigkeits- oder Lebensdaueranalysen einen wichtigen Lösungsansatz zur Vernetzung bieten.

Welchen Lösungsbeitrag die vernetzte Anwendung der Netzplantechnik mit der Lebensdauerbestimmung nach der VDA 3-Richtlinie hat, ist bisher wissenschaftlich noch nicht geklärt. Die vernetzte und gezielte Anwendung von aussagefähigen Zuverlässigkeitsanalysemethoden auf bestimmte Ereignisse wäre ein weiterer Schritt, um die Zuverlässigkeit von vernetzten Systemen zu verbessern. Mit der gegenwärtigen Programmier-technik ist es möglich, solche unterschiedlichen neuen Lösungsansätze zu analysieren und zu evaluieren.

Weiterhin entstehen während der Entwicklung von innovativen Produkten in vielen Fällen auch neue Fragestellungen, für die dann neue Lösungsansätze erarbeitet werden müssen. Besonders interessant ist hierbei, inwiefern diese neuen Lösungsansätze in den Entwicklungsprozess eingebunden werden können, damit auf Grundlage dieser Erkenntnisse ähnliche Produkte durch eine zeitnahe Bereitstellung im Projektablauf zuverlässiger und wirtschaftlicher entwickelt werden können.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit besteht darin, aufgrund des Entwicklungsprozesses eines innovativen Elektrofahrzeuges sich ergebende offene Fragen zu formulieren und nach geeigneten Lösungsansätzen zu suchen, die als Basis der Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer in zukünftigen vergleichbaren Produkten verwendet werden können. Da eine analytische Lösung meist komplex und zeitintensiv ist, wird nach einer automatischen Modellierungsmöglichkeit gesucht, um dem zukünftigen Anwender diesen Prozess, der

zum konventionellen Vorgehen in der Konstruktion hinzukommt, zu erleichtern. Das bedeutet, dass dieser neu entwickelte Ablauf zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer in das bisherige Vorgehen zu integrieren wäre, soweit vergleichbare Problematiken gelöst werden sollen.

Weiterhin soll ein erarbeitetes Konzept, das die Lebensdauerabschätzung gemäß der VDA 3-Richtlinie der Automobilindustrie und die Netzplantechnik umfasst, mögliche Einsatzgebiete des Fahrzeuges aufzeigen und einen Vorschlag zur Umsetzung mittels beispielhaften Szenarien darstellen.

1.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Zuverlässigkeitsanforderungen sind in zunehmendem Maße auch Kriterien zur Bewertung und Überwachung mechatronischer Systeme, wie sie in der Automobilindustrie und Medizintechnik existieren. Diese Entwicklung ist durch steigende Qualitätsmaßstäbe, gesetzliche Vorgaben sowie durch ökologische und ökonomische Anforderungen bedingt. Hochaktueller Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Bereitstellung von Werkzeugen, welche die Verknüpfung klassischer Zuverlässigkeitsmethoden (FTA, FMEA, Markov-Ketten, Redundanzen etc.) mit dem Vorgehen bei Entwicklungstätigkeiten effizient unterstützen /SÖF 13/.

Demgemäß soll nachfolgend der Forschungsstand beschrieben werden. Der Fokus liegt auf der Weiterentwicklung und Verknüpfung von Zuverlässigkeitsmethoden.

Die Entwicklung eines Leichtbaufahrzeuges in /GÄN 98/ hat gezeigt, dass neue Konzepte auch den Einsatz neuer Methoden erfordern. Diese Arbeit zeigt eine vollständige und strukturierte Vorgehensweise bis zur Bereitstellung eines Elektroautos, das für weitere Untersuchungszwecke genutzt werden kann. Die Lebensdauerabschätzung erfolgt für alle Komponenten mittels der einfachen linearen Hypothese nach Haibach, die eine Modifikation der Palmgren-Miner-Hypothese darstellt.

In /BER 05/ wird ein Konzept mit fünf Modulen wie Planung, Entwicklung, Anlauf, Serie und Einsatz erarbeitet. Berücksichtigt werden dabei drei Gestaltungsdimensionen wie Funktionen der Prüfplanung, Einsatz von QM-Methoden (QFD, FMEA, SVM, SPC) und die Expertise der Fachabteilungen. Wissenschaftlich zielt diese Arbeit damit auf eine stärkere Integration der Prüfplanung in den Produktentstehungsprozess.

In /MAH 00/ wird die Verbindung von Fehlerbaum- und Markov-Analyse zu einem verketteten Konzept vorgestellt, um die Vorteile beider Methoden gezielt nutzen zu können. Die Modellierung dieser neuen Methode erlaubt sowohl eine qualitative als auch quantitative Systemaussage mit vertretbarem Analyseaufwand.

In der Arbeit /RZE 11/ ist eine Konzeption erarbeitet worden, die während des Konstruktionsprozesses das vernetzte Wissen zwischen den verschiedenen Bereichen unter Berücksichtigung wichtiger Zuverlässigkeitsmethoden bereitstellt. Diese Informationen dienen als Entscheidungsgrundlage im Produkt- und Entwicklungsprozess. Die Ergebnisse zum Zuverlässigkeitsinformationssystem beziehen sich nur auf die Produktentwicklungsphase. Das Informationssystem zeigt den aktuellen Reifestand. Der gesamte Produktlebenszyklus wird allerdings mit diesem System nicht betrachtet.

In der Arbeit „CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und Optimierung“ /RUP 02/ ist ein Beitrag zur Integration der Zuverlässigkeitsermittlung und rechnerunterstützten Gestaltung (CAD) geleistet worden. Ein Schwerpunkt ist die CAD-Integration von qualitativen und

quantitativen Zuverlässigkeitsmethoden, um in der frühen Konstruktionsphase die Produktzuverlässigkeit früher und genauer zu erreichen als im „CAD-isolierten“ Einsatz der Zuverlässigkeitsmethoden.

Mithilfe der Arbeit „Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen“ /PIC 09/ wurde ein Methodenansatz erarbeitet, der neben der zuverlässigkeitsorientierten Auswahl des Konzepts auch die Verknüpfung zu anderen Methoden im Produktentwicklungsprozess erlaubt. Der Schwerpunkt des Lösungsvorschlages liegt darauf, alle Informationen und Bewertung so weiterzuverarbeiten, dass eine optimale Schnittstelle zu der FMEA generiert werden kann.

Bei der Neuproduktentwicklung besteht ein Hauptproblem darin, mittels einer ausreichenden Anzahl an Experimenten die technologische Konzeption des Produktes, das Zusammenwirken der einzelnen Teile bzw. Baugruppen und insbesondere das Erreichen der kundenbezogenen Anforderungen und unternehmensbezogenen Ergebnissen auf einem weitgehend fehlerfreien Niveau sicherzustellen. Diese Zielsetzung wird mit dem statistischen Verfahren „Design of Experiments“ angestrebt /TÖP 07/.

In der Arbeit „Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten“ /DEL 07/ wurde ein Zuverlässigkeitsmanagementsystem aufgebaut, das eine robuste Prognose der Lebensdauer sowie der zu erwartenden Garantiekosten eines reparierbaren Systems ermöglicht. Dabei wurden quantitative und qualitative Methoden zu verschiedenen Zeitpunkten im Produktentstehungsprozess eingesetzt und erweitert.

Nach /GER 81/ ist die FTA eine herausragende ingenieurwissenschaftliche Sicherheitsmethode. Diese wurde in Methoden der Softwaretechnik integriert, um die Hardwarekomponenten und deren Steuerungssoftware nicht getrennt betrachten zu müssen. Durch die Verknüpfung der Methoden, die sogenannte „formale FTA“, können Zusammenhänge verständlich dargestellt werden. Weiterhin wurden einige Methoden der Zuverlässigkeitstechnik (u. a. Zuverlässigkeitsblockdiagramme und Markov-Modelle) miteinander verglichen und auf ihre Eignung hinsichtlich komplexer Fertigungssysteme untersucht. Ein erkennbarer Ansatz zur Parameteranalyse vernetzter Prozesse fehlt jedoch.

Die Arbeit /REI 02/ richtet den Fokus der netzplantechnischen Analyse auf die zeitliche Optimierung von Produktionsabläufen durch Überlappung von Fertigungsvorgängen, wobei stochastische Parameter keine Anwendung finden.

Ergänzend befasst sich /NEU 05/ mit der Prozessanalyse unter Anwendung der deterministischen Netzplantechnik und berücksichtigt die Unsicherheit einzelner Prozessschritte, durch Anwendung der PERT-Methode.

Ein neuer Ansatz ist die in /RAB 91/ vorgenommene Kombination von Netzplantechnik und sogenannten Fuzzy-Sets, wodurch eine netzplantechnische Analyse hinsichtlich Zeit und Ablaufstruktur ermöglicht wird.

Das Ziel der Arbeit /PAU 09/ ist die Entwicklung einer Methodik, mit der vernetzte Prozesse zusätzlich zu den üblichen Parametern der Netzplantechnik (Zeit, Kapazität, Kosten) hinsichtlich der Ressourcenzuverlässigkeit analysiert werden können.

In der wissenschaftlichen Forschung gewinnen vernetzte Methoden an Bedeutung, weil das zuverlässige Zusammenwirken von Komponenten stets komplexer und unübersichtlicher wird.

Aus dem Forschungsstand ergeben sich bereits Ansätze für das Verknüpfen der Zuverlässigkeitsmethoden – gegenwärtig jedoch nicht im Zusammenhang mit Fahrzeugentwicklungen bzw. speziell anfälligeren Elektrofahrzeugen.

Methoden der stochastischen Netzplantechnik wären für diesen Anwendungszweck, bezogen auf probabilistische Methoden, geeignet. Trotz der vielfältigen Entwicklungen auf dem Gebiet der Netzplantechnik ist der Integration nützlicher Zuverlässigkeitsmethoden wenig berücksichtigt worden. Mit einer Vernetzung der einzelnen Systeme im Gesamtsystem könnte die Zuverlässigkeit vernetzt simuliert werden. Spezielle Methoden wie z. B. GERT (Graphical Evaluation and Review Technique) oder PERT (Program Evaluation and Review Technique) wurden entwickelt, um stochastische Ablaufstrukturen und stochastische Parameter berücksichtigen zu können. Mit Netzplänen können verschiedene Verteilungsarten für die Vorgangsdauer verwendet und Wahrscheinlichkeiten für die Ablauflogik angegeben werden. Folgende Probleme lassen sich gegenwärtig mit GERT nach /PAU 09/ analysieren.

- Reparaturprozesse (Markov-Prozesse).
- Warteschlangenprobleme.
- Prüfpläne im Rahmen statistischer Qualitätskontrollen.

Darüber hinaus kann die Verwendung von geeigneten Netzplänen im Hinblick auf die Darstellung und Analyse der Zuverlässigkeit vielversprechend sein. Besonders die Möglichkeit der Verwendung der Netzplanmethode in Zusammenhang mit der Lebensdaueranalyse kann für die zukünftige Lebensdauerbewertung im Untersuchungsterritorium nützlich sein.

Für die statistische Abschätzung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer verschiedener Baugruppen hat sich in der Automobilindustrie die VDA 3-Richtlinie etabliert, die eine umfassende Darstellung konventioneller Methoden bietet. Die Zuverlässigkeit und die Kenngrößen werden anhand der Statistik durch eine bestimmte Aussagewahrscheinlichkeit mit einem Vertrauensbereich beschrieben /VDA 00/.

Praktische Ergebnisse liegen im Zusammenhang mit den beiden Methoden der Netzwerktechnik und der Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer gegenwärtig nicht vor und sollen daher im Rahmen dieser Aufgabenstellung untersucht und bewertet werden.

Darüber hinaus fehlt ein wissenschaftlicher Ansatz, der sowohl die Zuverlässigkeitsmethoden zur gezielten Anwendung auf Elektrofahrzeuge bereitstellt und ggf. gleichzeitig eine Lösung zur Vernetzung mithilfe der Netzplantechnik für verschiedene Verfahren bietet, um z. B. Synergiemöglichkeiten ableiten zu können.

Das zu erarbeitende Konzept bezüglich der zu untersuchenden Methoden soll anschließend anhand verschiedener Szenarien modelliert und evaluiert werden. Das kann durchaus wichtig sein, um mit den verbauten Komponenten das jeweils abhängige Zusammenspiel zu verbessern und durch eine strukturierte Vorgehensweise und Diagnose die Zuverlässigkeit des Elektrofahrzeuges erhöhen. Ferner kann ein begleitendes Verfahren zur Absicherung der Zuverlässigkeit nützlich sein und das Entwicklungsrisiko minimieren.

1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine praxisorientierte Methode erarbeitet werden, die in der späteren Anwendung als Grundlage der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitssimulation bei neuartigen Elektrofahrzeugen herangezogen werden kann.

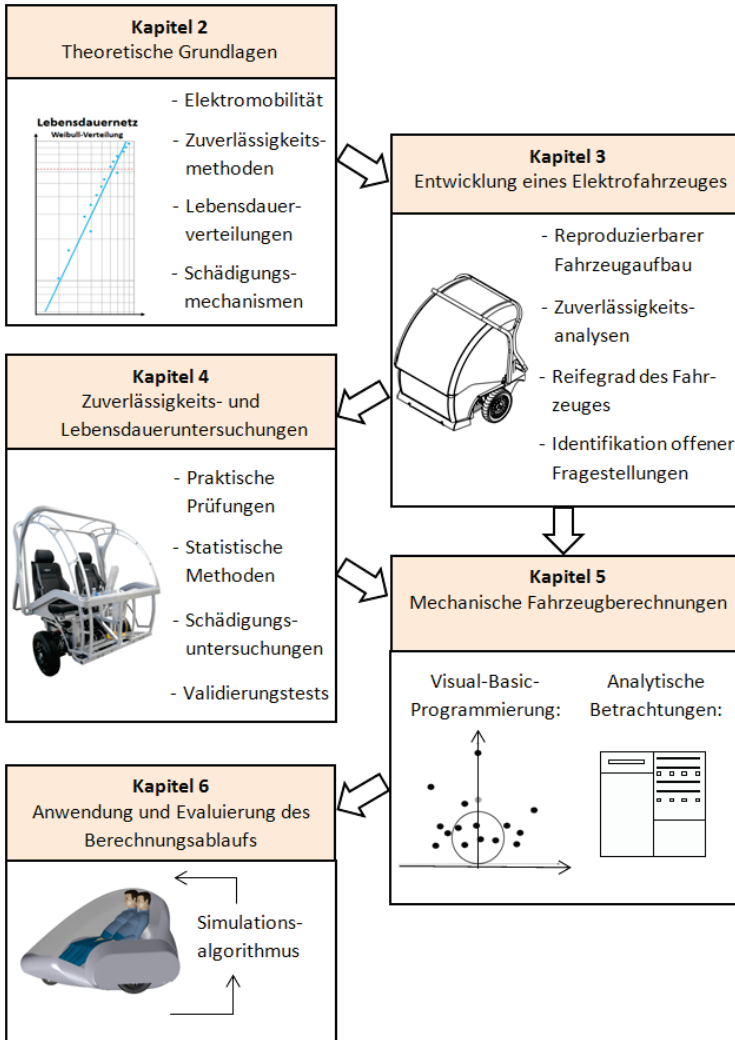


Abb. 1.4: Beschreibung der Vorgehensweise dieser Arbeit

Hierzu werden zunächst die theoretischen Grundlagen dargelegt, in denen hauptsächlich relevante Themengebiete einer fahrzeugbezogenen Zuverlässigkeits- und Lebensdauerab-

schätzung beinhaltet sind. Es werden sowohl qualitative als auch quantitative Zuverlässigkeitsmethoden beschrieben sowie unterschiedliche Lebensdauerverteilungen in Verbindung mit wichtigen Schädigungsmechanismen erörtert.

Offene Fragestellungen zur Methodenentwicklung priorisieren sich gewöhnlich vor und während der Entwicklungsphase eines innovativen Produktes. Diesbezüglich werden unterschiedliche Methoden zur Abschätzung der Zuverlässigkeit beschrieben und hinsichtlich der frühen Fahrzeugentwicklung bewertet, was unter Berücksichtigung nicht verfügbarer oder unsicherer Daten erfolgt, die meistens am Anfang einer neuen Systementwicklung nicht ausreichend zur Verfügung stehen.

Im Kapitel 4 werden theoretische und praktische Untersuchungen zur Thematik vorgenommen. Unterschiedliche Testmethoden unter Verwendung der statistischen Versuchsplanung werden durchgeführt und bezüglich ihrer Anwendung bewertet. Das Schädigungsverhalten wichtiger Bauteile wird analysiert und qualitativ verbessert. Letztendlich soll eine Testmethodik abgeleitet werden, die eine zuverlässige Vorhersage der Funktionsweise des Systems erlaubt. Durchgeführte Tests dienen zur Validierung und Modifizierung unterschiedlicher Untersuchungsszenarien.

Zeit und Entwicklungskosten sind in der Automobilindustrie meist ambitioniert definiert, und die interdisziplinären Anforderungen bei neuartigen Fahrzeugkonzepten werden oftmals größer. Am Anfang eines komplexen Fahrzeugaufbaus bildet die Funktionalität die Grundlage für die Zuverlässigkeit. Um ein einachsiges Fahrzeug funktional aufbauen zu können, sollten grundlegende Maßnahmen entwicklungsbegleitend erarbeitet und priorisiert werden. Bei konstruktiven bzw. mechanischen Änderungen sollte außerdem der Einfluss auf die jeweilige Funktionalität bekannt sein, damit beispielsweise die mechanische Fahrzeugstabilisierung in der Konstruktionsphase erhalten bleibt. Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass man einen konstruktiven Prozess gezielt und berechnend beeinflussen kann, wenn die konstruktiven Parameter und deren Auswirkungen untereinander definiert sind. Falls Änderungen vorgenommen werden müssen, stehen besonders im fortgeschrittenen Entwicklungsprozess bzw. während der Inbetriebnahme nur begrenzte Reserven zur Verfügung. Somit ist es wichtig, die Anforderungen aus der Konzeptphase mit einem Programm zu verbinden, um in der späteren Projektphase zeitnah auf Änderungen reagieren zu können, ohne die Funktionalität des Systems zu gefährden, die beispielsweise vom Schwerpunktbereich bzw. der Achsverstellung abhängen kann.

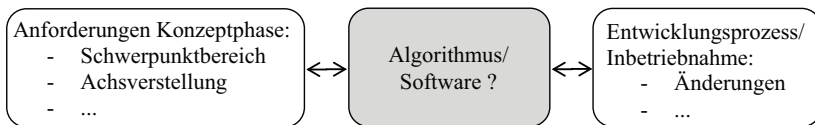


Abb. 1.5: Fehlender Algorithmus zwischen der Konzept- und Entwicklungsphase des Fahrzeuges

Der Schwerpunktbereich kann mit einer 2-D-Punkte-Wolke beschrieben und bewertet werden. Die Modellierung unterschiedlicher Positionierungen wird durch die Integration eines iterativen mathematischen Verschiebungssatzes realisiert. Diese beschriebenen Ziele werden im Kapitel 5 erarbeitet.

Um die verschiedenen Anforderungen auf Grundlage der analytischen Erkenntnisse aus der Konzeptphase zu simulieren, wird in Kapitel 6 ein vergleichbarer Fahrzeugtyp als Beispiel verwendet, um die Vorgehensweise des Programms evaluieren zu können.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt sollen die grundlegenden Themengebiete zur Elektromobilität, Zuverlässigkeit und Lebensdauer erläutert werden. Ergänzend wird eine kurze Zusammenfassung bezüglich der gesetzlichen Regularien und Normen in der Automobilindustrie beschrieben.

2.1 Elektromobilität

Die Elektromobilität umfasst diejenigen Fahrzeuge, die elektrisch oder mit Hybridanteilen betrieben werden. Die Fortbewegung des Fahrzeuges kann temporär sowohl durch einen Verbrennungsmotor als auch mittels eines Elektromotors erfolgen /YAY 12/. Ausgehend vom Elektrifikationsgrad des Antriebsstrangs wird zwischen hybriden und reinen Elektroantrieben unterschieden /SPA 10/.

Fahrzeuge mit Elektroantrieb sind keine neue technische Erfindung, sondern existierten bereits vor den Verbrennungsmotoren. Die Weichen zum Elektrofahrzeug wurden durch die Erfindungen der elektronischen Batterie durch Alessandro Volta und des Gleichstrommotors durch Thomas Davenport zu Beginn des 19. Jahrhunderts geschaffen. Das erste Elektrofahrzeug wurde auf der Messe in Paris von dem Franzosen Gustav Trouvre 1881 vorgestellt /HAS 11/.

Heutzutage wird die Entwicklung alternativer Antriebe hauptsächlich von drei Faktoren beeinflusst, welche die Randbedingungen für die Entwicklung bilden. Den ersten Faktor stellt der Gesetzgeber dar, der durch mögliche Reglementierungen direkten Einfluss auf die Forschungs- und Entwicklungsfelder der Automobilhersteller nimmt. Der zweite Faktor bezieht sich auf den Kunden, der stets neue Anforderungen an das Automobil entstehen lässt. Der dritte Veränderungstreiber sind die begrenzt verfügbaren Ressourcen fossiler Kraftstoffe /WAL 11a;/FRE 09/.

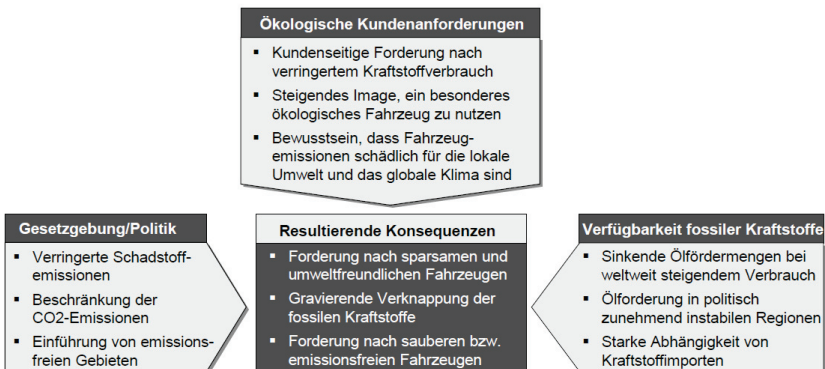


Abb. 2.1: Treiber für die zunehmende Elektrifizierung des Antriebstrangs nach /FRE 09/

Neben der stetigen Verbesserung der konventionellen Verbrennungsmotoren beschäftigt sich die Automobilindustrie mit Elektroantrieben, Brennstoffzellen und vor allem mit Hybridantrieben /REI 12b/.

2.1.1 Antriebstechnologien und Energiespeicher

Es besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Elektromobilität bzw. die Elektrifizierung des Antriebstrangs die automobile Zukunft bestimmen wird.

Die Hauptkomponenten der elektrifizierten Antriebstränge sind der Akkumulator als Energiespeicher, die Leistungselektronik und der Elektromotor mit entsprechendem Getriebe. Die Brennstoffzellen-Technologie ist ebenfalls eine Form der elektrischen Mobilität, die sich durch hohe Reichweiten und relativ kurze Betankungszeiten auszeichnet. Deshalb stehen die Lithium-Ionen-Batterie und die Brennstoffzelle als gleichberechtigte Systeme als Schlüsseltechnologie für das emissionsfreie Fahren zur Verfügung /SPA 10/.

Die unterschiedlichen Antriebstechnologien eignen sich je nach Fahrleistung und Gesamtgewicht bzw. nach der Anzahl der Passagiere. Eine Einteilung bzw. Übersicht der Technologien zeigt die folgende Abbildung.

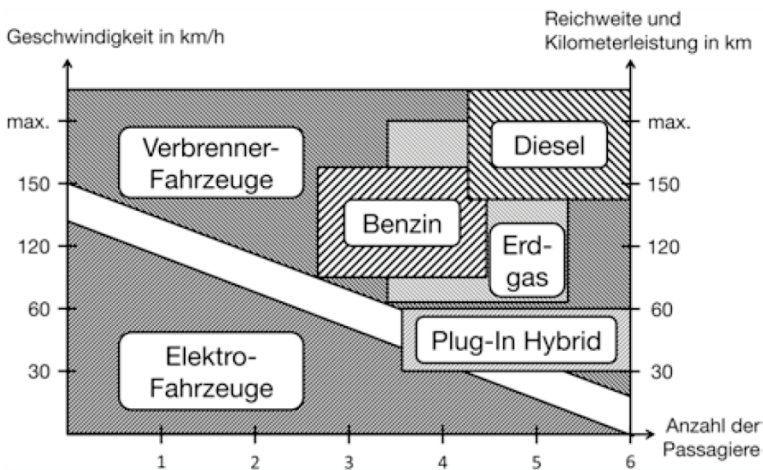


Abb. 2.2: Einteilung der Antriebstechnologien in Verbindung mit der Reichweite, Geschwindigkeit und Anzahl der Passagieren nach /LIE 12/

Da der durchschnittliche Pkw-Fahrer am Tag weniger als 40 km fährt /YAY 12/, könnte das Elektroauto derzeit einen limitierten Fahrbetrieb z. B. als Stadtauto abdecken.

Um einen Fahrbetrieb grundsätzlich zu ermöglichen, können Elektrofahrzeuge entweder aus einem oder mehreren elektrischen Antriebsmaschinen bestehen oder aus unterschiedlichen Antriebstechnologien, gekoppelt mit einem Verbrennungsmotor: kurz Hybridantrieb /LIE 12/. Hybrides Fahren bezeichnet alle Zustände, in denen sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor ein Antriebsmoment erzeugen /REI 10/.

Ein Fahrzeug mit einem hybriden Antrieb ist ein Fahrzeug, in dem unterschiedliche Energieformen durch elektronische Wandler in kinetische Energie zum Vortrieb umgesetzt werden /REI 12b/.

Dieser doppelte Antrieb kann wiederum in vier Hybridisierungsgrade nach /LIE 12/; /REI 12b/; /REI 10/; /GRU 08/; /SCH 14/; /RIE 14/ zusammenfassend klassifiziert werden.

- *Mikro-Hybrid*

Der Mikro-Hybrid stellt die niedrigste Hybridisierungsstufe in einem Fahrzeug dar. Bei diesem Auto wird die Lichtmaschine etwas verstärkt und beim Bremsen stärker belastet, wodurch die Batterie geladen wird. Der Anlasser wird verstärkt, um eine Start-Stopp-Funktionalität zu bieten, der im Stand den Motor ausschaltet und beim Einlegen eines Ganges bzw. Betätigen der Kupplung das Auto wieder anschaltet. Mit dem Start-Stopp-System können im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) zwischen 3,5 % und 4,5 % Kraftstoff eingespart werden.

- *Mild-Hybrid*

Bei den Mild-Hybrid-Fahrzeugen wird der Elektromotor leistungsstärker dimensioniert als beim Mikro-Hybrid. Neben dem konventionellen Verbrennungsmotor als Hauptantriebsaggregat werden weitere Systeme und Komponenten eingebaut. In diese Fahrzeuge wird eine Elektromaschine installiert, womit ein Großteil der Bremsenergie zurückgewonnen werden kann. Der Wirkungsgrad zur Rückgewinnung ist nicht sehr groß, aber immer noch besser, als die gesamte Bremsenergie ausschließlich in Wärme umzuwandeln. Nachteilig ist auch der Anteil an Mehrgewicht durch die zusätzlichen Bauteile. Die Kraftstoffeinsparung gemäß dem NEFZ kann bis zu 15 % betragen.

- *Voll-Hybrid*

Mit diesem Antrieb steht im Fahrzeug eine deutlich größere Leistung bereit als beim Mildhybrid. Dadurch kann mehr Bremsenergie rekuperiert werden. Wenige Kilometer können dadurch rein elektrisch gefahren werden. Die Kraftstoffersparung gemäß dem NEFZ kann beim Vollhybrid bis zu 30 % betragen.

- *Plug-in-Hybrid*

Bei Plug-in-Hybridfahrzeugen besteht die Möglichkeit, die Batterie über das Stromnetz aufzuladen – bevorzugt mit regenerativen Energiequellen. Mit einem vergrößerten Energiespeicher können Strecken elektrisch zurückgelegt werden. Anschließend wird mit einem Verbrennungsmotor weitergefahren. Durch den Einbau von zwei Antrieben und einen großen Energiespeicher ist das Gesamtgewicht derzeit noch ein großer Nachteil.

Der Hybridisierungsgrad gibt an, inwieweit die Aufteilung der Antriebsleistung zwischen Verbrennungs- und E-Motor variiert werden kann. Mit dem Einsatz von Mild- oder Vollhybrid lassen sich deutliche Kohlenstoffdioxid-Ersparnisse vor allem im Stadtverkehr generieren. Nachteilig bei der Einführung über alle Fahrzeugsegmente sind die anfallenden hohen Kosten. Ein Teil der Verbrauchsvorteile könnte auch mit der Mikro-Hybridisierung erfolgen, wenn die Start-Stopp-Funktionen einen hohen Marktanteil erlangen /REI 10/. Neben dieser Klassifizierung werden Hybridfahrzeuge auch nach der Schaltung der Antriebe unterschieden. Die wichtigsten Hybridvarianten sind parallele-, serielle- und Misch-Hybride /WÜS 10/.

- *Parallel-Hybrid*

Beim Parallel-Hybrid ist ein direkter mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor bis zum Rad möglich. Der elektrische Antrieb ist sozusagen parallel und kann nach

Wunsch zu- oder abgeschaltet werden. Beide Antriebe können daher gleichzeitig oder separat genutzt werden. Das Fahrzeug kann somit konventionell, rein elektrisch oder gemischt betrieben werden. Solche Konzepte besitzen neben den beiden Antriebsmotoren und Speichern ein oder auch mehrere Getriebe, Kupplungen oder Freiläufe /HOF 10/; /RIE 14/.

- *Serieller Hybrid*

Der serielle Hybrid besteht aus einem Verbrennungsmotor, der mit einem Generator gekoppelt ist und die mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt. Somit wird die Batterie des Fahrzeuges aufgeladen. Es besteht keine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und der Antriebsachse, sondern die Verbindung erfolgt nur elektrisch z. B. über einen Gleichrichter und einen Umrichter. Das bedeutet, der mechanische Antrieb der Räder erfolgt mithilfe eines Elektromotors und entsprechender Leistungselektronik /HOF 10/.

- *Misch-Hybrid*

Der Misch-Hybrid ist eine Kombination aus parallelem und seriellem Hybridantrieb, die im Betrieb je nach Leistungsbedarf und Ladezustand der Batterie unterschiedlich wirken können. Die Schaltung zwischen den Betriebszuständen erfolgt durch eine automatische Kupplung, die mittels elektronischer Spannung in den jeweiligen Modus wechselt. Gleichzeitig kann z. B. der Verbrennungsmotor die Antriebsarbeit leisten und die Batterie aufladen /WÜS 10/.

Zahlreiche Elektrofahrzeuge haben einen sogenannten Range-Extender. Ein kleiner abgekoppelter Verbrennungsmotor ist im Fahrzeug integriert, das Fahrzeug besitzt somit eine höhere Redundanz bezüglich eines Ausfalls im Vergleich zum reinen Elektrofahrzeug /LIE 12/.

2.1.2 Infrastruktur und Ladekonzepte

Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen für den Alltagsbetrieb individuelle Lade- und Wasserstoff-Infrastrukturen. Die Vollladung eines entladenen Akkumulators wird sich nicht in Minutenschnelle realisieren lassen, wie dies bei einer Betankung eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor oder bei einem Brennstoffzellenfahrzeug der Fall ist. Die Realisierung einer alltagstauglichen Lade-Infrastruktur wird durch die verschiedenen Standards der Hersteller erschwert. In Bezug auf batteriebetriebene Fahrzeuge stellen sich beispielsweise die offenen Fragen, auf welcher Spannungsebene diese betrieben werden und ob Gleich- oder Wechselstrom zur Verfügung steht /SPA 10/.

Eine wichtige Voraussetzung für die Marktchancen und die Nutzbarkeit der Elektromobilität im privaten Personenverkehr ist die Verfügbarkeit einer Lade-Infrastruktur. Der Aufbau einer elektrischen Ladeinfrastruktur wird derzeit beispielsweise mittels privater Ladepunkte sowie Ladepunkten bei Arbeitgebern und in Parkhäusern angestrebt. Der Vorteil dabei ist, dass die Standzeiten der Fahrzeuge für das Nachladen aus energetischen Gründen ausreichend lang sind.

Es müssen weitere Ladestationen im öffentlichen Raum geschaffen werden, trotz geringer Nutzungsfrequenzen und hoher Infrastrukturkosten. Besonders in dicht bewohnten Stadtvierteln ohne Abstellmöglichkeit für Pkw auf Privatflächen sind Konzepte für eine sinnvolle Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum erforderlich, da die dort lebenden

Menschen ein besonderes Nutzerpotenzial darstellen /KAM 13/. Für die Abschätzung der Lade-Infrastruktur ist relevant, wo ein Pkw geparkt wird. Dabei ist zu klären, wo im öffentlichen Raum bzw. auf Privatgrundstücken nachgeladen werden kann oder wo der Wunsch danach besteht /JOH 11/.

Die Erweiterung der Ladeinfrastruktur ist einerseits durch die Weiterentwicklung der induktiven Ladung über Modellversuche einschließlich des Tests der Alltagstauglichkeit und Nutzakzeptanz möglich und andererseits durch Schnellladestationen.

Weiterhin können Nachlade- und Batterietauschkonzepte die Marktdurchdringung und Akzeptanz positiv beeinflussen. Daneben können Fahrzeugtausch- und Leasingkonzepte als Teil umfassender Mobilitätskonzepte die auf mittlere Sicht begrenzten Einsatzfelder und höheren Kosten zumindest teilweise kompensieren /KAM 13/.

2.1.3 Leichtbau – Potenziale und Herausforderungen

Mit der Weiterentwicklung der Technik steht verstärkt die bessere Effizienz mechanischer Systeme im Vordergrund. Leichtbau gewinnt daher als Entwicklungsstrategie immer mehr an Bedeutung. Ziel ist es, unter gegebenen Randbedingungen eine optimale Struktur mit minimalem Eigengewicht sowie bestimmter Lebensdauer und Zuverlässigkeit zu realisieren. Wenn Leichtbau nur entsprechend der Orientierung am minimalen Eigengewicht charakterisiert wird, wird man der gesamten Komplexität der Aufgabenstellung (Steifigkeit, Eigenfrequenz, Körperschall, Lebensdauer) nur unzureichend gerecht. /KUR 11;/ /KLE 13/.

Die ersten relevanten Problemstellungen des Leichtbaus wurden im Luftfahrzeugbau systematisch bearbeitet. In diesem Bereich standen die Kosten nicht im Vordergrund, und daher ist der Leichtbau gerade durch die Freiheiten der Luftfahrtforschung entscheidend geprägt worden. Neben einer generellen Erweiterung der theoretischen Grundlagen bezieht sich dies auch auf die erprobten konstruktiven Prinzipien (siehe /ZIN 67/ und /KIR 56/).

Ein markanter Entwicklungsschub erfolgte mittels der Ablösung der Fachwerkbauweise durch die freitragende Bauweise unter Ausnutzung des Eigentragvermögens der Häute. Die darauf bezogenen Prinzipien der Vollwand- und Schalensysteme haben sich über den Luftfahrzeugbau hinaus verbreitet in den Eisenbahnwaggonbau, den Schiffbau, den Bau von Verarbeitungsmaschinen und den Fahrzeugkarosseriebau /KLE 13/.

Die Bemühungen des Leichtbaus sind vorwiegend darauf gerichtet, das Eigengewicht einer Struktur zu minimieren. Als Restriktion ist dabei zu berücksichtigen, dass hierdurch weder die Funktion noch die Sicherheit und die Langlebigkeit /s. DIN EN 1993/ beeinträchtigt werden dürfen. Mit den folgenden Maßnahmen /KLE 13/ wird diese Zielsetzung verfolgt.

- Umsetzung des Integrationsprinzips.
- Wahl leichter und hochfester Werkstoffe.
- Neue Herstelltechnologien.
- Analytische Beherrschung der Beanspruchungs- bzw. Instabilitätsfälle durch moderne Analysemethoden (FEM, BEM).

Während der Umsetzung dieser Prinzipien kommen bestimmte Entwurfsstrategien zum Tragen, deren Merkmale sich verkürzt mit den Begriffen Form- oder Funktionsleichtbau, Stoffleichtbau, Fertigungsleichtbau und Sparleichtbau klassifizieren lassen. Bei einem Form- und Funktionsleichtbau werden integrative Konstruktionslösungen, dünnwandige

Querschnittsgeometrien und eindeutige Kraftleitungs-pfade umgesetzt. Im Stoffleichtbau werden schwerere Werkstoffe durch leichtere Werkstoffe mit möglichst hohen Gütekennzahlen substituiert.

Im Fertigungsleichtbau werden alle technologischen Möglichkeiten ausgeschöpft, mit dem Ziel der Funktionsintegration bei geringstem Materialeinsatz und minimalem Fügeaufwand.

Mit dem sogenannten Sparleichtbau sollen durch eine gerade noch ausreichende Werkstoffqualität, minimalen Werkstoffeinsatz und vereinfachte Herstellung hohe Kosten vermieden werden /BLE 74/; /KLE 13/.

Jede gewählte Leichtbaustrategie ist stets mit Aufwand und Kosten verbunden. Die meisten Kosten zeigen folglich eine exponentielle Verlaufs-darstellung mit einem theoretischen Minimum als wirtschaftlicher Vernunftlösung /KLE 13/.

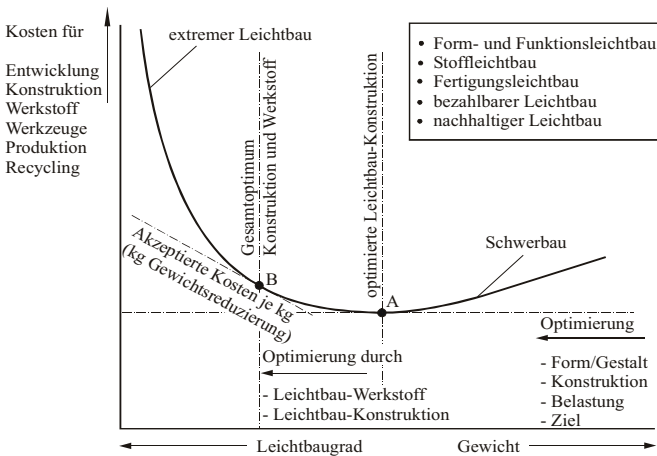


Abb. 2.3: Wirkung der jeweiligen Leichtbaustrategie auf Kosten und Gewicht nach /KLE 13/

Extremer Leichtbau ist meistens mit sehr hohen Kosten verbunden. Inwieweit man Leichtbau für einen Anwendungsbereich in der Industrie umsetzen und realisieren kann, ist abhängig von den akzeptierten Kosten je Kilogramm.

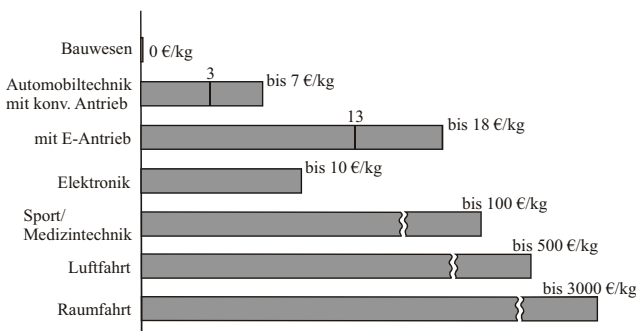


Abb. 2.4: Akzeptierter Mehraufwand für Leichtbau in € pro Kilogramm nach /KLE 13/

Leichtbaukonstruktionen dürfen nicht weniger sicher sein als vergleichbare Massivkonstruktionen. Dies setzt eine sorgfältige Auslegung auf Steifigkeit (Instabilitäten), Bruchfestigkeit sowie Zuverlässigkeit und Nutzungsdauer voraus. Unterschiedliche Nachweise greifen zunehmend auch in der Fahrzeugindustrie (s. Abb. 2.5).

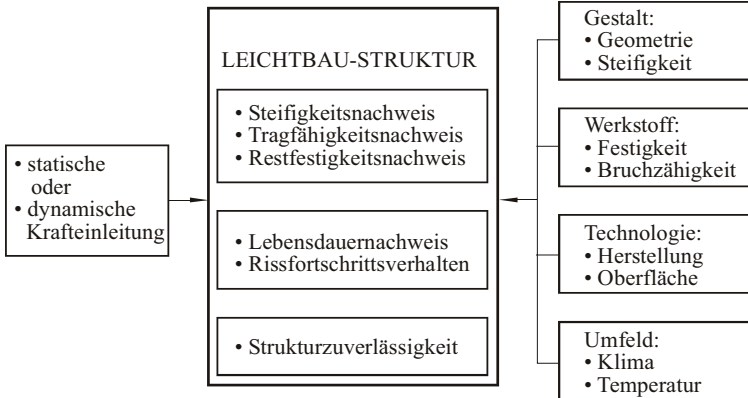


Abb. 2.5: Nachweisarten für Leichtbaustrukturen nach /AUT 92/

Innerhalb des Steifigkeitsnachweises geht es um die Begrenzung von Verformungen und beim Tragfähigkeitsnachweis um die Sicherheit gegen Fließen, Bruch oder Instabilität. Hierbei lässt der Leichtbau stets geringere Sicherheitsreserven als der klassische Fahrzeugbau zu, was eine aufwendige Berechnung erforderlich macht.

In der Verkehrstechnik wird beispielsweise nach /DIN EN 12663/ folgendes verlangt:

- Sicherheit gegen Fließen

$$\frac{R_{el} \text{ bzw. } R_{p0,2}}{\sigma_{x \text{ berechnet}}} \geq S_1 = 1,15, \quad (2.1)$$

- Sicherheit gegen Bruch

$$\frac{R_m}{\sigma_{x \text{ berechnet}}} \geq S_2 = 1,5 \text{ (bis 1,3)}, \quad (2.2)$$

- Sicherheit gegen Instabilität

$$\frac{\sigma_{\text{knicken/beulenkrit}}}{\sigma_{\text{berechnet}}} \geq S_3 = 1,5. \quad (2.3)$$

Für dynamische Beanspruchungen ist zusätzlich ein Zuverlässigkeitsnachweis (Überlebenswahrscheinlichkeit aller Komponenten $P_A \geq 95\%$) sowie ein Nutzungsnachweis (bzw. Dauer- oder Betriebsfestigkeitsnachweis) durchzuführen.

Verlangt wird oftmals /KLE 13/:

- eine Mindestanzahl von $2 \cdot 10^6$ Zyklen bei Stahlwerkstoffen mit konstanter Amplitude in Höhe der Dauerschwingfestigkeit

bzw.

- eine Mindestanzahl von $1 \cdot 10^7$ Zyklen bei Aluminiumwerkstoffen.

Anschließend kann ein statischer oder dynamischer Rissbruch- oder Rissfortschrittsnachweis erfolgen:

- Sicherheit gegen statischen Rissbruch

$$\frac{K_{I_{\text{crit}}}}{K_{Y_{\text{berechnet}}}} \geq S_4 = 1,7 \text{ (bis 2,0)}, \quad (2.4)$$

- Sicherheit gegen dynamischen Rissfortschrittsbruch

$$\frac{K_{Ic}(1-R)}{\Delta K_{\text{max berechnet}}} \geq S_5 = 2,0 \text{ (bis 2,5)} \text{ mit } R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}. \quad (2.5)$$

In Abhängigkeit vom Anwendungsfall haben sich dabei zwei Grundhaltungen etabliert. Die Philosophie der safe-life-quality, die absolute Schadensfreiheit für die ganze Lebensdauer verlangt, und die Philosophie der fail-safe-quality, die Schadenstoleranz und hinreichende Resttragfähigkeit voraussetzt. Dem Ziel nach sollten die erforderlichen Leichtbaumaßnahmen stets begründbar sein /KLE 13/.

Die Durchführung von Leichtbaumaßnahmen zur Reduzierung der Fahrzeugmasse ist bei konventionellen Fahrzeugen einerseits für die Senkung des Energieverbrauchs und andererseits zur Steigerung der Fahrdynamik notwendig.

Die Senkung des Energieverbrauchs durch Leichtbau gewinnt bei Elektrofahrzeugen sowohl für den Kunden als auch für die Hersteller größere Bedeutung. Durch eine geringere Fahrzeugmasse kann der Energiespeicher reduziert werden, wodurch eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit möglich ist.

Leichtbau wird insbesondere in Bereich des Antriebs, des Exterieurs und der Karosserie angewandt, da diese Baugruppen einen großen Einfluss auf die Gesamtfahrzeugmasse haben. Zur Identifikation der leichtbaupotenziellen Systeme im Fahrzeug bedarf es einer gezielten Betrachtung der Massenverteilung über alle Fahrzeugs subsysteme /ECK 10/; /KAM 13/.

In der folgenden Darstellung werden die unterschiedlichen Leichtbaupotenziale aufgezeigt.

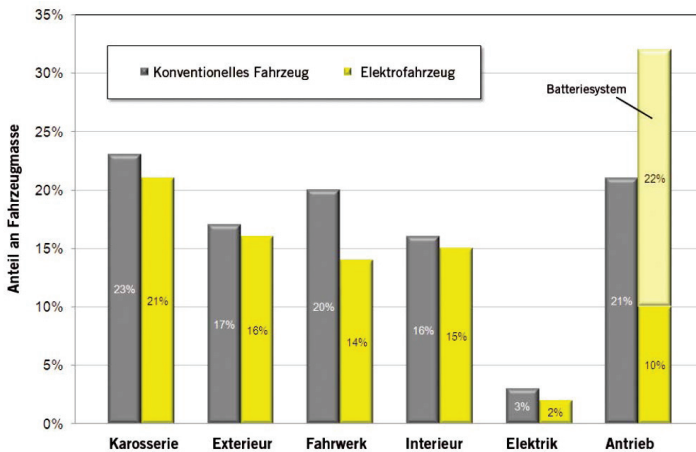


Abb. 2.6: Vergleich der Leichtbaupotenziale zwischen konventionellem Fahrzeug und Elektrofahrzeug nach /ECK 10/

Besonders im Bereich des Antriebs wird der große Einfluss auf die Fahrzeugmasse durch das Batteriesystem wirksam. Das Batteriesystem bietet sowohl auf Zell- als auch auf Systemebene ein großes Leichtbaupotenzial. Auf Zellebene gilt es, durch Selektion und adäquate Kombination der Materialien für Kathode, Anode, Separator und Elektrolyt die Energiedichte zu erhöhen, um somit einen Beitrag zur Reduzierung der Fahrzeugmasse zu leisten. Vollständigerweise zählt zum Batteriesystem auch die dazugehörige Peripherie, bestehend aus Zell- und Modulverbinder, Kühlsystem, Elektronik und Gehäuse. Die Peripherie ermöglicht erst einen sicheren und zuverlässigen Betrieb, erhöht aber die Masse des Systems /ECK 10/.

Das Verhältnis der Einzelbaugruppen der Fahrzeugsysteme zueinander ändert sich im Elektrofahrzeug nicht signifikant im Vergleich zu herkömmlichen Verteilungsschlüsseln. Die bereits erarbeiteten Leichtbaumaßnahmen für konventionelle Fahrzeuge (Karosserie, Exterieur und Fahrwerk) und deren bisherige Umsetzung sind möglicherweise an den Leichtbaumehrkosten gescheitert. Diese Maßnahmen können jetzt aber gezielt in Elektrofahrzeugen angewendet werden.

Nachdem heute bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen regelmäßig Leichtbau auf Komponentenebene umgesetzt wird, z. B. Türen in Form von Kunststoff- oder Aluminiumlösungen, gilt es weiterhin, die spezifischen Vorzüge von Leichtbauwerkstoffen konstruktiv auf Gesamtstrukturebene zu erschließen.

Eine Möglichkeit wäre ein werkstoffgerechter Integrationsansatz wie z. B. beim BMW E-Roller, indem das Motorgehäuse gleichzeitig als tragende Struktur dient. Als weiteres Beispiel sei eine Motorhaube aus einem geflochtenen, faserverstärkten Kunststoff angeführt, die zusätzliche Funktionen übernehmen könnte wie Fußgängerschutz bzw. Schall- und Wärmedämmung. Weiteres Potenzial kann auch systemübergreifend bestehen, wenn

Leichtbaumaßnahmen beispielsweise auch auf X-by-Wire, die Integration des Batteriegehäuses und die Karosseriestruktur angewandt werden /KAM 13/. Prinzipiell sind viele unterschiedliche Leichtbaumaßnahmen auf alle Ebenen anwendbar, angefangen von der Komponente bis hin zum Gesamtfahrzeug des Elektrofahrzeuges. Die folgende Matrix zeigt diesbezüglich eine gute Übersicht hinsichtlich der verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten /ECK 10/.



Abb. 2.7: Übersicht möglicher Leichtbaumaßnahmen am Elektrofahrzeug nach /ECK 10/

Zur Ausschöpfung des gesamten Potenzials des Leichtbaus sind gewöhnlich Maßnahmen auf der Gesamtfahrzeugebene notwendig. Dies ist nur durch neue Fahrzeugkonzepte erreichbar, die den Zielkonflikt zwischen Effizienz, Sicherheit und Fahrerlebnis auf eine andere Art und Weise lösen als bei konventionellen Fahrzeugen /ECK 10/.

Die Automobilhersteller nehmen zunehmend Abschied vom Konzept des Universalautos und stehen daher vor neuen technischen Herausforderungen. Leichtbauweise und effiziente Antriebstechniken sind hierbei sicherlich anspruchsvolle Technologiebereiche /SPA 10/. Zusätzlich eröffnen sich neben der Elektromobilität weitere neue Anwendungsgebiete bei Hochleistungswerkzeugmaschinen und großen Windkraftanlagen /KLE 13/.

2.1.4 Zukunftsperspektiven – Alternative Antriebe

Die Elektromobilität bietet wesentliche Potenziale zur Senkung lokaler Emissionen, zur Reduzierung des Primärenergieverbrauches sowie zur Integration erneuerbarer Energien. Die Frage, ob aufgrund der begrenzten Reichweite von Elektrofahrzeugen und der Mobilitätsmuster der Menschen Elektromobilität eine Zukunftstechnologie wird oder ein Nischenprodukt bleibt, ist differenziert zu bewerten und lässt sich derzeit noch nicht konkret beantworten /KAM 13/.

Die Nutzer/-innen haben bezüglich des Elektrofahrzeugs ein vorgeprägtes Bild. In der Regel sind sie weder bedingungslos begeistert noch stehen sie dem Elektroauto voll-

kommen ablehnend gegenüber. Die differenzierte Haltung schlägt sich auch in der Substitutions- und Innovationsperspektive nieder. Das Elektrofahrzeug soll dem konventionellen Verbrenner möglichst gleichwertig oder sogar besser sein. Bestehende Mobilitätsbedürfnisse sollen demnach äquivalent erfüllt werden.

Aus der Innovationsperspektive hingegen stellt das Elektroauto mehr als nur ein Substitut des Verbrenners dar. Es wird zu einer eigenständigen Neuerung mit spezifischer Produktidentität.

Gegenwärtig dominiert bei vielen Nutzer/-innen die Substitutionsperspektive. Sie setzen das Elektrofahrzeug in Referenz zu konventionellen Fahrzeugen und beurteilen die Leistungsfähigkeit hauptsächlich in Referenz mit deren Eigenschaften. Das Elektroauto wird hinsichtlich der „Reichweite“ und des „Ladens“ als weniger alltagstauglich eingestuft. Mit dem konventionellen Verbrennungsmotor können ohne aufwendige Vorbereitungen viele Orte erreicht werden. Zudem funktioniert dieses Fahrzeug technisch zuverlässig und gibt keine Veranlassung, Mobilitätsalternativen in Betracht zu ziehen. Das Elektrofahrzeug hat aus Sicht der Nutzer/innen die technische Zuverlässigkeit noch nicht bewiesen, und es verheißt keine Einsetzbarkeit für viele Zwecke und Situationen.

Doch die Nutzer/-innen registrieren die innovativen Momente des Elektrofahrzeuges. Es werden positive Aspekte wie die Lärm- und Emissionslosigkeit hervorgehoben, während die technischen Unzulänglichkeiten in den Hintergrund treten. Damit wird mit dem Elektrofahrzeug die Hoffnung verbunden, Mobilität in Zukunft neu denken zu können /KEI 13/.

Hybridkonzepte als ein Bereich der Elektrofahrzeuge werden zu der Einführung und dem Erreichen einer breiten Akzeptanz wesentlich beitragen. Wegen der geringeren Speicherkapazität der Batterien und der derzeit damit verbundenen unzureichenden rein elektrischen Reichweiten werden sich Elektrofahrzeugkonzepte mit zusätzlichem Verbrennungsmotor, die als Range Extender dienen, wahrscheinlich stärker etablieren.

Die Hybridtechnik wird oftmals als Brückentechnologie zu Brennstoffzellenantrieben angesehen, wobei voraussichtlich zu erwarten ist, dass Brennstoffzellenfahrzeuge zweckmäßigerweise mit elektrischen Energiespeichern ausgestattet werden und somit ebenfalls als Hybridfahrzeuge gelten.

Mit zunehmender Hybridisierung steigen ebenfalls die Herstellungskosten des Fahrzeuges an. Um langfristigen Erfolg zu haben, sollten sich die höheren Kosten entweder durch das Kraftstoffeinsparpotenzial amortisieren oder es sollte ein entsprechender Mehrwert in Form von Fahrfreude bzw. zusätzlicher Funktionalität gegeben sein.

Außerdem wird der Gesetzgeber zukünftig verstärkt durch Besteuerungs- und Mautsysteme sowie Fahr- und Einfahrverbote in bestimmte Zonen die Einführung von neuen Technologien beeinflussen /HOF 10/.

Vor diesem Hintergrund besteht ein weiteres mögliches Szenario im verstärkten Einsatz von erdgasbetriebenen Motoren, mit denen einerseits die Energieversorgung bei knapper werdendem Erdöl gesichert und der Einstieg in eine Gastechnologie mit Wasserstoff vorbereitet werden könnte /SCH 10/.

2.2 Gesetze, Normen und Regularien

Für die Entwicklung, Zulassung und Nutzung eines Elektrofahrzeuges ist eine Recherche zu den wichtigsten Gesetzen, Normen und Regularien notwendig, um einen grundlegenden Überblick über die zu erfüllenden Anforderungen zu erlangen.

2.2.1 Gesetzgebung

In der deutschen Rechtsprechung gibt es einige Gesetze, die das Thema „Sicherheit“ forcieren. Demnach müssen Gesetze für ein neues Produkt bereits vor dessen Markteinführung angewandt werden. Nach erstem Erkenntnisstand bilden den rechtlichen Rahmen für Elektrofahrzeuge beispielsweise das Grundgesetz /GG 10/, das Produkthaftungsgesetz /ProdHG02/ und das Produktsicherheitsgesetz /ProdSG11/.

Nach dem Produkthaftungsgesetz kann die Ersatzpflicht begrenzt werden, wenn *„der Fehler nach dem Stand der Wissenschaft und Technik in dem Zeitpunkt, in dem der Hersteller das Produkt in den Verkehr brachte, nicht erkannt werden konnte.“* (insb. siehe /ProdHG02/, § 1 Abs. 2).

Zusätzlich kann die EG-Maschinenrichtlinie /2006/42/EG/ wichtiger Bestandteil der Anwendung während der Entwicklungsphase sein. Diese Richtlinie wurde in Deutschland durch das /ProdSG11/ und die /9. ProdSV/ umgesetzt: *„Diese Richtlinie gilt für die folgenden Erzeugnisse: a) Maschinen, b) auswechselbare Ausrüstungen, c) Sicherheitsbauteile, d) Lastaufnahmemittel, e) Ketten, Seile und Gurte, f) abnehmbare Gelenkwellen und g) unvollständige Maschinen.“*

Werden die Anforderungen der Richtlinie umgesetzt, ist die Vergabe einer CE-Kennzeichnung für das Fahrzeug möglich, womit dem Nutzer die geprüfte und zertifizierte Sicherheit des Fahrzeuges kenntlich gemacht wird.

Elektrofahrzeuge mit abstrahlender Elektronik müssen der EU-Niederspannungsrichtlinie und der EU-EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit) genügen, sonst dürfen die Fahrzeuge nicht betrieben werden /LOE 09/. Fahrzeuge für den öffentlichen Straßenverkehr benötigen eine ABE und müssen den ECE-Richtlinien entsprechen. Diejenigen Fahrzeuge, die nicht für die Teilnahme am Straßenverkehr bestimmt sind, unterliegen der Maschinenrichtlinie, sofern sie nicht ausschließlich für sportliche Wettbewerbe entwickelt wurden. Gleiches gilt für Fahrzeuge, deren Höchstgeschwindigkeit 25 km/h nicht überschreitet /FRA 10/. Da E-Fahrzeuge in geschlossenen Räumen der EU-Maschinenrichtlinie unterliegen, wird eine Risikobeurteilung in drei logischen Schritten verlangt /EBE 12;/ /SCH 13/.

Risikobeurteilung = Risikoanalyse + Risikobewertung + Risikominderung

„Der Hersteller einer Maschine oder sein Bevollmächtigter hat dafür zu sorgen, dass eine Risikobeurteilung vorgenommen wird, um die für die Maschine geltenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen zu ermitteln. Die Maschine muss dann unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Risikobeurteilung konstruiert und gebaut werden.

Bei den vorgenannten iterativen Verfahren der Risikobeurteilung und Risikominderung hat der Hersteller oder sein Bevollmächtigter

- *die Grenzen der Maschine zu bestimmen, was ihre bestimmungsgemäße Verwendung und jede vernünftigerweise vorhersehbare Fehlanwendung einschließt;*
- *die Gefährdungen, die von der Maschine ausgehen können, und die damit verbundenen Gefährdungssituationen zu ermitteln;*
- *die Risiken abzuschätzen unter Berücksichtigung der Schwere möglicher Verletzungen oder Gesundheitsschäden und der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens;*
- *die Risiken zu bewerten, um zu ermitteln, ob eine Risikominderung gemäß dem Ziel dieser Richtlinie erforderlich ist;*
- *die Gefährdungen auszuschalten oder durch Anwendung von Schutzmaßnahmen die mit diesen Gefährdungen verbundenen Risiken ... zu mindern /2006/42/EG“.*

Zur Durchführung einer Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung für die Automobilindustrie ist in der /ISO 26262-3/ vorgesehen, wenn es um die Entwicklung sicherheitsrelevanter E/E-Systeme (Elektrik/Elektronik-Systeme) von Kraftfahrzeugen geht /NAG 12/.

2.2.2 ISO 26262 - Funktionale Sicherheitsstandard

Der Ursprung zur funktionalen Sicherheit begann in der Chemieindustrie der 70er Jahre. In Europa ist es häufig zu katastrophalen Chemieunfällen gekommen, die auf die rasante Industrialisierung und den erhöhten Gebrauch gefährlicher Stoffe zurückzuführen waren /CRA 09/.

Diese schweren Chemieunfälle waren ausschlaggebend dafür, dass sich die Politik mit der Sicherheit von Industrieanlagen befasste. In Deutschland wurde am 27. Juni 1980 die zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (12. BImSchV) verabschiedet, die am 1. September des gleichen Jahres in Kraft trat. Diese Verordnung zur Vermeidung von Störfällen in Industrieanlagen, die mit gefährlichen Stoffen arbeiten, regelt z. B. allgemeine Vorschriften, Grundpflichten der Betreiber, Behördenpflichten sowie Meldeverfahren /12. BImSchV/.

Auch die Europäische Wirtschaftsgemeinschaft (EWG) befasste sich ausgiebig mit dieser Thematik. Auf Basis der Richtlinie /82/501/EWG/ wurde die Verordnung /12. BImSchV/ über die „Gefahren schwerer Unfälle bei bestimmten Industrietätigkeiten“ des Rates der Europäischen Gemeinschaft verabschiedet, die am 24. Juni 1982 in Kraft trat. Diese Richtlinie soll schwere Unfälle vermeiden und Unfallfolgen begrenzen.

Die Weiterentwicklung dieser Richtlinie /82/501/EWG/ durch /96/82/EG/ trat im Februar 1997 in Kraft. Diese Verordnung enthält eine Liste mit gefährlichen Stoffen und Regeln, wie mit diesen Gefährdungen umzugehen ist. Es müssen z. B. regelmäßige Sicherheitsberichte erstellt werden, gefahrstoffverarbeitende Betriebe den öffentlichen Behörden gemeldet sein, Notfallpläne existieren und auch veröffentlicht werden sowie Unfälle gemeldet und Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Die Betriebe sind regelmäßig zu inspizieren.

Aufgrund weiterer Vorfälle (insb. s. /2003/105/EG/) wurde die Richtlinie verschärft, in der die Mengenschwellen von gefährlichen Stoffen sowie die Stoffliste überarbeitet wurden. Letztendlich wurde diese Richtlinie mit der Neubekanntmachung der /12. BImSchV/ ins deutsche Recht übertragen /BOL 08/.

Die meisten chemischen und verfahrenstechnischen Prozesse werden heutzutage elektronisch gesteuert und überwacht. Dieser technologische Fortschritt hat zur Folge, dass auch die Elektronik und Informationstechnik in die Verfahrenstechnik einfließt. Damit kam die Notwendigkeit, dass die elektrischen, elektronischen und informationstechnischen Komponenten gewisse sicherheitstechnische Anforderungen zu erfüllen haben. Dazu veröffentlichte die International Electrotechnical Commission (IEC) im Jahr 1998 die Norm /IEC 61508/ „Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 1: General requirements“. Dies ist die erste Norm, die die funktionale Sicherheit auf der Ebene von sicherheitsrelevanten elektronischen Systemen sicherstellt.

Da diese Norm eine Grundnorm ist, die allgemeingültige Anforderungen zur funktionalen Sicherheit bereitstellt und deren Gültigkeit auch den gesamten Maschinenbau einschließt, muss diese Norm für jeden einzelnen Anwendungsfall spezifisch abgeleitet werden /DIN EN 61508/; /NAG 12/; /LÖW 10/; /HEI 11/.

Dadurch entstanden unterschiedliche Normen aus verschiedenen Bereichen, wie die folgende Übersicht zeigt.

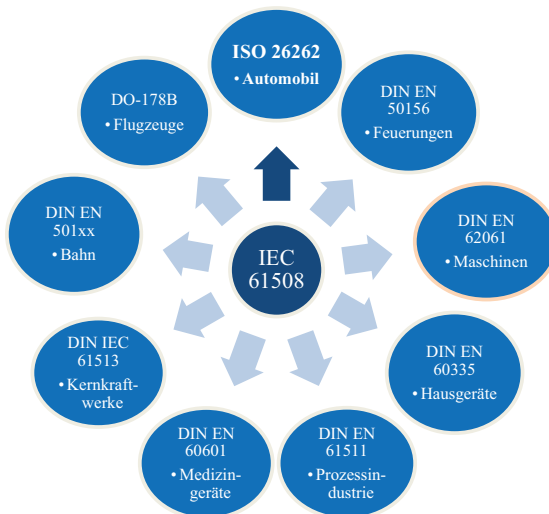


Abb. 2.8: Übersicht der abgeleiteten Normen aus der Grundnorm IEC 61508 nach /LÖW 10/; /NAG 12/

Mit der aktuellen ISO 26262 steht derzeit eine geltende Norm zur Anwendung und Umsetzung der funktionalen Sicherheit bei der Entwicklung sicherheitsrelevanter E/E-Systeme (Elektrik/Elektronik-Systeme) von Kraftfahrzeugen, die vorwiegend in Serienproduktionen hergestellt werden und ein zulässiges Gesamtgewicht von maximal 3500 kg aufweisen, zur Verfügung. Diese Norm ist somit eine Anpassung und Weiterentwicklung der Grundnorm IEC 61508 für Personenkraftfahrzeuge /LÖW 11/.

Die ISO 26262 besteht insgesamt aus zehn Teilen.

Tab. 2.1: Gesamtübersicht der einzelnen ISO-Normen nach /ISO 26262/

ISO 26262	Straßenfahrzeuge – funktionale Sicherheit
ISO 26262-1	Vokabular
ISO 26262-2	Management der funktionalen Sicherheit
ISO 26262-3	Konzeptphase
ISO 26262-4	Produktentwicklung-System-Ebene
ISO 26262-5	Produktentwicklung-Hardware-Ebene
ISO 26262-6	Produktentwicklung-Software-Ebene
ISO 26262-7	Produktion und Betrieb
ISO 26262-8	Unterstützende Prozesse
ISO 26262-9	ASIL-orientierte und sicherheitsorientierte Analyse
ISO 26262-10	Leitfaden für ISO 26262

Nach der Klärung wichtiger Begriffe im Teil 1 befasst sich Teil 2 mit dem Management der funktionalen Sicherheit über die gesamte Projektlaufzeit.

Die Konzeptphase beinhaltet einen sehr wichtigen Part, in der die Durchführung einer Gefährdungsanalyse und Risikoeinschätzung zu erfolgen hat.

Die Teile 4, 5 und 6 sind während der Produktentwicklung zu bearbeiten und beinhalten Angaben zu den Sicherheitsforderungen des gesamten sicherheitstechnischen Systems, der dazugehörigen Hardware und der Software.

Der siebte Teil enthält Vorgaben zu der Produktion und dem Betrieb des zu entwickelnden Objektes sowie auch dessen umweltgerechter Entsorgung.

Der achte Teil beschreibt weitere unterstützende Prozesse, z. B. Verifizierungsprozesse, die in den Teilen zuvor nur ansatzweise erwähnt werden.

Im Teil 9 werden sicherheitsorientierte Analysemethoden erläutert, die die Umsetzung der zuvor definierten Sicherheitsanforderungen unterstützen. Des Weiteren wird darin beschrieben, wie der ASIL (Automotive Safe-Integrity-Level) eines Systems in die ASIL der einzelnen Komponenten tabellarisch aufgeschlüsselt bzw. abgeschätzt wird. Somit wurde mit der Erweiterung der /DIN EN 61508/ auf den Automobilbereich /ISO 26262/ die SIL- auf die ASIL-Klassifizierung spezifisch angepasst.

Der letzte Teil zeigt einen Leitfaden, der die Norm anschaulich mit Praxisbeispielen /ISO 26262/; /NAG 12/ untermauert.

In der Entwicklungsphase des Fahrzeuges ist der dritte Teil /ISO 26262-3/ hauptsächlich relevant, der sich mit der Durchführung einer Gefährdungs- und Risikoanalyse befasst. Sind die Gefährdungen z. B. anhand einer Fehlerbaumanalyse bzw. nach dem PAAG-Verfahren (engl. HAZOP) identifiziert und vervollständigt, können die potenziellen Gefährdungen hinsichtlich ihrer Schwere (Severity), ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit (Exposure) und ihrer Kontrollierbarkeit (Controllability) abgeschätzt werden /ROS 14/.

Tab. 2.2: Drei Bewertungskriterien bei einer Risikoabschätzung zur Bestimmung des ASIL-Wertes nach /NAG 12/; /ISO 26262/

Abkürzung	Bewertungskriterium	Definition
S	Severity	Schwere des Schadens, falls eine Fehlfunktion eintritt und nicht kontrolliert werden kann.
E	Exposure	Wahrscheinlichkeit während der Fahr-situation, in der eine Fehlfunktion auftreten kann.
C	Controllability	Kontrollierbarkeit einer Fehlfunktion / Gefährdung

Der ASIL-Wert resultiert aus der Summe der drei Parameter.

$$[S] + [E] + [C] = [ASIL] \quad (2.6)$$

Gemäß der Norm /ISO 26262-3/ wird zwischen vier Arten der ASIL unterschieden:

1. Für ASIL = 7 gilt ASIL-A: Dieser Wert dient lediglich informativ,
2. Für ASIL = 8 gilt ASIL-B: Dieser Wert entspricht einer vorgeschlagenen Auslegung,
3. Für ASIL = 9 gilt ASIL-C: Resultierende Werte sind für die Auslegung bindend,
4. Für ASIL = 10 gilt ASIL-D: Resultierende Werte sind für die Auslegung bindend.

Ist die Summe kleiner als sieben, erfolgt die Einstufung für die Gefährdungen nach ASIL QM. In diesem Fall schlägt die ISO 26262 vor, die Maßnahmen zur Reduzierung der Risiken über das Qualitätsmanagement zu bestimmen. Die weiteren Maßnahmen über das QM hinaus gelten nach der ISO 26262 erst ab einer ASIL-A Klassifizierung.

Die ASIL-Klassifizierung ist ein Maß für die sicherheitsbezogene Leistungsfähigkeit oder Zuverlässigkeit eines elektronischen Systems bzw. eines Automobils.

Die entsprechende Grenze der Ausfallrate wird tabelliert festgelegt.

Tab. 2.3: Einzuhaltende Ausfallraten zufälliger Hardwarefehler nach /LÖW 10/;/ISO 26262-5/

ASIL	Ausfallrate	Bemerkung
A	$<10^{-6}/h$	Information
B	$<10^{-7}/h$	Empfehlung
C	$<10^{-7}/h$	Anforderung
D	$<10^{-8}/h$	Anforderung

Die quantitativen Zielwerte bzw. Ausfallraten stellen nach /ISO 26262-5/ durchschnittliche Wahrscheinlichkeiten in $\frac{1}{h}$ über die Lebensdauer der Hardware dar.

Da bei der Entwicklung eines innovativen Fahrzeuges meistens nicht alle elektronischen Komponenten selbst entwickelt werden können, wird auf sogenannte COTS-Teile (commercial off-the-shelf) zurückgegriffen. Die Bauannahmen können in dem Fall nicht auf die COTS-Teile verwendet werden, da die Lieferanten in der Regel den weiteren Gebrauch, sowie die potenziellen Sicherheitsauswirkungen ihrer Produkte bei der Verwendung im endgültigen System des Kunden nicht abschätzen können.

Grundlegende Daten wie z. B. die Ausfallraten, sollten dem Kunden vom Lieferanten mitgeteilt werden, damit eine Bewertung auf der ganzheitlichen Hardwarearchitektur-Ebene erfolgen kann /LÖW 10/; /NAG 12/.

2.2.3 Patentrecherche zur mechanischen Schwerpunktverlagerung

Das E-Fahrzeug P.U.M.A. (Personal Urban Mobility and Accessibility) ist das Vorläufermodell zu dem neu konzipierten E-Fahrzeug. Deshalb soll das Balance-Prinzip nach /SEG 09/ anhand dieses Vorbilds erläutert werden.

Um das Fahrzeug zu bewegen, müssen vom Fahrer einige intuitive mechanische Steuerungen vorgenommen werden, d. h. die Passagiere beeinflussen direkt das Fahrverhalten des Fortbewegungsmittels.

Zunächst ist es für die Fortbewegung des Fahrzeuges notwendig, dass der Gesamtschwerpunkt, der auf der Fahreinheit und den Passagieren beruht, verlagert werden kann. Die nachfolgenden Darstellungen zeigen einige grundsätzliche Prinzipien für eine Schwerpunktverlagerung des Fahrzeuges.

In Abb. 2.9 sind zwei Kabinen-Konzepte skizziert, wobei das Verlagerungsprinzip einmal im Ausbalancieren der Kabine gegenüber der Achse und ein anderes Mal im Ausbalancieren der Sitze gegenüber der Kabine besteht.

Die Verlagerungsbewegung entsteht durch die Relativverschiebung eines Gleiters (1316, 1416) auf einer Gleitschiene (1318, 1418). Der Gleiter muss hierbei an der Karosserie und die Gleitschiene am Rad befestigt sein.

Die Bewegungsrichtung wird hierbei durch die Lenkeinheit (1306, 1308; 1406, 1408) bestimmt, welche der Fahrer aktiv betätigt. Die Verbindungen zwischen den Elementen sind jeweils kompakte Einheiten und als solche hervorgehoben.

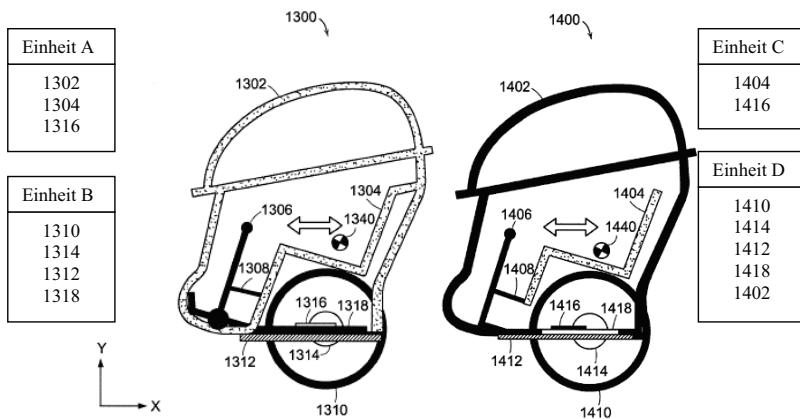


Abb. 2.9: Schwerpunktverlagerung zwischen Kabine (rechts) und Fahrwerk (links) durch Gleitschienen nach /SEG 09/

Im Gegensatz hierzu zeigt die nachfolgende Abb. 2.10 eine Schwerpunktverlagerung durch einen Schwenkvorgang der Einheiten (E, G), um ein „ortsfestes“ (mit dem Fahrwerk verbundenes) Gehäuse (1322, 1422). Dieses Pendelprinzip ist in der Physik zur Ausrichtung von Schwerpunktsystemen bekannt.

Es handelt sich hierbei um eine entkoppelte Schwingbewegung, die gegenüber dem Fahrwerk frei auspendeln kann und den absoluten Gleichgewichtszustand fixiert.

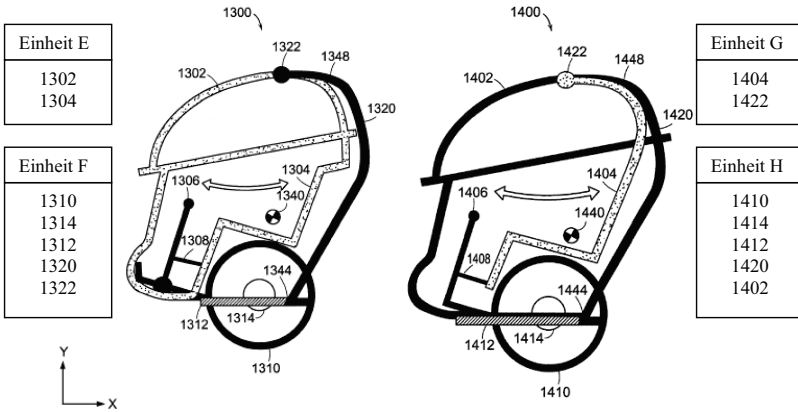


Abb. 2.10: Schwerpunktverlagerung zwischen Kabine und Fahrwerk durch ein Schwenkmechanismus nach /SEG 09/

In der folgenden Abb. 2.11 wird die Schwerpunktverlagerung durch das Schwenken um die Achse (1314, 1414) des Gesamtverbundes der einzelnen Einheiten (I, J, K und L, M, N) erreicht. Hierzu ist eine Viergelenkkette angedeutet. Dieses Prinzip ist ebenfalls aus der Getriebelehre bekannt und geeignet, eine Kabine gegenüber einem Sitz auszusteuern /SEG 09/.

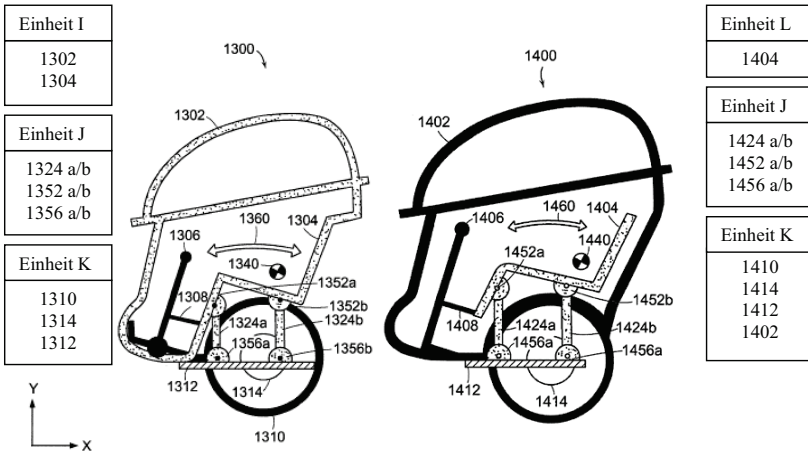


Abb. 2.11: Schwerpunktverlagerung durch Schwenken um die eigene Achse nach /SEG 09/

Zukünftige Themengebiete und weiterentwickelte Prototypen zum einachsigen Fahren sind in /BEI 14/; /BAZ 14/ und /MIT 10/ ausführlich beschrieben, wie beispielsweise auch das teilautonome bzw. autonome Fahren.

2.3 Statistische Versuchsplanung

Bei der Entwicklung von innovativen Produkten oder Technologien müssen meistens Bestätigungen verschiedenster Art durch begleitende Experimente erbracht werden. Dem Vorteil des Erkenntnisgewinns steht als Nachteil gegenüber, dass Experimente oftmals kostenaufwendig und langwierig sind. Schlecht geplante Experimente verzögern möglicherweise den geplanten Markteintritt und führen zu weiteren negativen Folgen. Viele Unternehmen haben deshalb neben einem Forschungs- und Entwicklungsbereich manchmal einen nicht viel kleineren Versuchsbereich eingerichtet. In vielen Fällen ist die Größe aber nicht mit Effizienz gleichzusetzen. Versuche werden meist zu unsystematisch geplant und wesentliche Erkenntnisse nicht ausgewertet.

Der Markt hat sich des Weiteren zum Anbietermarkt gewandelt, infolgedessen können heutzutage Abnehmer unter mehreren Lieferanten wählen. Für die Zulieferanten stellt sich somit das strategische Ausrichtungsproblem, seine Fähigkeiten gezielt umzusetzen, sodass eine langfristige Kundenbeziehung entsteht. Dafür ist es wichtig, den Qualitätsverlust (Unqualität) weitestgehend zu minimieren, da er einen Indikator für Zufriedenheit und Wirtschaftlichkeit darstellt /KLE 14b/.

Für Lieferanten gibt es deshalb verschiedene Verhaltensmuster nach /KLE 14b/, die unter Wettbewerbsgesichtspunkten oftmals von Erfolg gekrönt sind.

1. Die Herstellkosten werden systematisch minimiert, und es wird mit gleichbleibender Qualität, die derjenigen der Mitbewerber entspricht, geliefert.
2. Die Herstellkosten werden circa auf dem gleichen Niveau wie bei den Mitbewerbern gehalten, und der Qualitätsverlust wird systematisch minimiert.
3. Es werden gleichzeitig die Herstellkosten und der Qualitätsverlust minimiert. Dafür ist eine zielgerichtete methodische Vorgehensweise erforderlich, die letztendlich durch eine hohe Kundenzufriedenheit belohnt wird.

Besonders der letzte Punkt ist ein arttypischer Anwendungsfall für Design of Experiments (DoE – statistische Versuchsplanung). Dessen Prinzipien und Verfahren sind von hoher praktischer Relevanz. Viele Unternehmen haben sich durch die Anwendung dieser Methoden der Perfektion angenähert und konnten so die Empfindlichkeit von Produktleistungen gegenüber Störgrößen minimieren (Robustdesign). Hierdurch besteht die Möglichkeit, qualitativ hochwertige Produkte zu wirtschaftlichen Kosten herzustellen und so einen Wettbewerbsvorteil zu erlangen.

Die statische Versuchsplanung ist somit als Erfolg versprechendes Werkzeug anzusehen, mit dessen Anwendung Versuche zielgerecht geplant, analysiert und optimiert werden können. Mit Design of Experiments werden die eigentliche Versuchsplanung sowie die Durchführung und Auswertung unter Zuhilfenahme methodischer und statistischer Methoden umschrieben. Die statistische Versuchsplanung hat demgemäß das Ziel, mit minimalem Versuchsaufwand zahlreiche Einflüsse auf das Untersuchte zu qualifizieren und zu quantifizieren. Mithilfe der statistischen Versuchsplanung ist der Anwender in der Lage, die Haupteffekte und die wichtigsten Interaktionseffekte statistisch abgesichert zu lokalisieren und zu bewerten /KLE 14b/.

Aufgrund von DoE können mit wenigen Versuchen aussagekräftigere Informationen als mit der klassischen Versuchsplanung gewonnen werden, auch in Hinblick auf die Funktionalität und Zuverlässigkeit einer Einheit /GUN 04/.

2.3.1 Qualitätsmerkmal

Obwohl DoE eine universelle Methode ist, wird sie im Qualitätsmanagement sehr oft zur Optimierung von Zuverlässigkeitsproblemen herangezogen. DoE umfasst die Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen, in denen mithilfe eines geeigneten Versuchsplans mehrere zu messende Einflussgrößen mit den Leistungsparametern simultan so eingestellt werden, dass sie ein definiertes Qualitätsmerkmal y unter Einfluss von Störgrößen und Wechselwirkungen optimieren /LIN 11;/KLO 07;/NOL 10/. Diese Parameter und das daraus folgende Qualitätsmerkmal y werden in dem folgenden Wirkflussdiagramm bzw. P-Diagramm dargestellt.

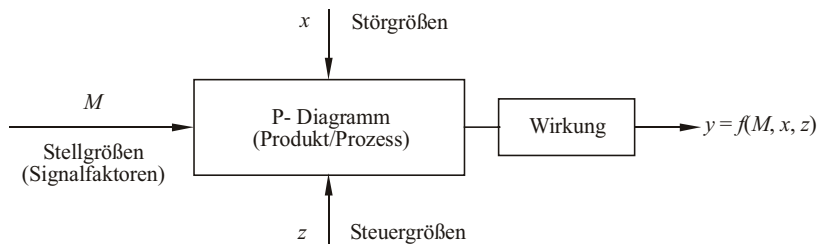


Abb. 2.12: P-Diagramm bzw. Wirkflussdiagramm der statistischen Versuchsplanung zur Bestimmung des Qualitätsmerkmals durch verschiedene Parameter nach /KLE 14b/

Diese verschiedenen Parameter im P-Diagramm können einen sehr unterschiedlichen Einfluss auf das Qualitätsmerkmal haben. Daher werden die Stell-, Steuer- und Störgrößen gemäß den folgenden drei Charakteristiken /KLE 14b/ gebildet.

1. Die Stellgrößen (M) werden vom Anwender eingestellt. Diese Parameter stellen den vorgegebenen Wert für die Wirkung eines Produktes ein. Die Einstellung dieser Werte erfolgt entsprechend dem entwicklungstechnischen Kenntnisstand zum Produkt bzw. sind sie optimal zu ermitteln.
2. Die Störgrößen (x) bewirken eine Abweichung (Versuchsstreuung) der Wirkungsgröße y von der durch M spezifizierten Sollzielgröße. Oftmals kann auf Störgrößen nur ein geringer oder kein Einfluss genommen werden.
3. Die Steuergrößen (z) können willkürlich spezifiziert werden. Aus ihrer Einstellung können optimale Werte für Produkte und Prozesse resultieren. Mit der Einstellung der Steuergrößen können sich die Herstellkosten ändern oder konstant bleiben. In vielen Fällen ist ihr Einfluss nicht direkt sichtbar.

Wenn die Parameter (Stell-, Steuer- und Störgrößen), die jeweils eine unterschiedliche Wirkung auf das Qualitätsmerkmal y haben können, identifiziert sind, erfolgt daraus die Festlegung der Zielfunktion in funktioneller Abhängigkeit vom Optimierungsziel /KLE 14b/.

2.3.2 Versuchsmethoden

In vielen technischen und naturwissenschaftlichen Fachdisziplinen werden Experimente durchgeführt, um mit Messungen, Beobachtungen und Analysen viele Informationen über Untersuchungsgegenstände zu erhalten. Dadurch soll der Reifegrad des zu untersuchenden Systems verbessert werden. Exaktheit, Wirtschaftlichkeit und die Qualität des Experimentierens können durch eine strukturierte Vorgehensweise sowie die Nutzung von statistischen Methoden gesteigert werden /KLE 14d/.

Unterschiedliche Methoden der Versuchsplanung sind für jeweils unterschiedliche Fragestellungen optimal /KLE 14b/. Die Auswahl der Methode richtet sich unter anderem nach der Anzahl der zu untersuchenden Einflussgrößen und auch danach, ob Voruntersuchungen möglich sind oder nicht /BER 04/.

In vielen Fällen kann ein Produkt auf mehrere verschiedene Arten konfiguriert bzw. unter vielen unterschiedlichen Einsatzbedingungen betrieben werden. Verschiedene Einsatzbedingungen können sich in ihren Auswirkungen gegenseitig beeinflussen, und die ungünstigste Kombination ist oftmals unklar. Meistens ist der Aufwand für den Test aller denkbaren Kombinationen nicht vertretbar.

Die fraktionellen, faktoriellen Versuchspläne bieten eine effiziente Möglichkeit für den Funktionstest. Mit relativ wenigen Einzelversuchen können alle Zwei-Faktor-Kombinationen und fast alle Drei- bzw. Vier-Faktor-Kombinationen erfasst werden /BER 04/.

Klassische-, Taguchi- und Shainin-Methoden finden am häufigsten Verwendung in den Versuchsphasen. Die klassische Methode verfolgt das Ziel, mit einer vollständigen Kombinatorik und meist großen Versuchsumfängen ein Problem zu lösen. Dabei kommen vollständige und unvollständige faktorielle Versuchspläne sowie D-optimale Versuchspläne zum Einsatz /GUN 04;/KLE 14b/.

- *Ein-faktorieller Versuch*

Um die Wirkung jeder Einflussgröße zu kennen, wird nach jedem Grundversuch stets nur eine Einflussgröße auf eine andere Wertstufe gesetzt und das Ergebnis mit dem Grundversuch verglichen. Wenn keine Wechselwirkung zwischen den Parametern erwartet wird, resultiert die optimale Lösung aus den unabhängig gefundenen Einzelergebnissen /BER 04;/KLE 08/.

- *Voll-faktorieller Versuch*

Die in der Praxis häufig benutzten vollständigen 2^n -Faktorenversuchspläne bezeichnet man als statistische Versuchspläne 1. Ordnung, weil durch zwei Einstellungen an den Grenzen des n-dimensionalen Versuchsraums nur ein lineares Verhalten abgebildet werden kann /KLE 14b/.

Hierbei werden alle Einflussgrößen auf jeder Stufe untersucht. Die Ergebnisse liefern Aussagen über die Wirkung der untersuchten Einflussgrößen auf die Zielgröße und über alle Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen /BER 04/.

Ein Versuchsplan wird deshalb als vollständig bezeichnet, weil alle denkbaren Kombinationen ohne Auslassungen durchvariiert werden /KLE 14b/. Bei zwei Stufen führt jede weitere Einflussgröße zu einer Verdoppelung des Versuchsumfangs. Auch jede weitere Stufe erhöht deutlich die Versuchsanzahl. Aus diesem Grund ist bezüglich der Wirtschaftlichkeit und des Zeitaufwands die Verwendung der Versuchspläne meist beschränkt, weil große Versuchsumfänge anfallen /BER 04;/KLE 08/.

- *Teil-faktorieller Versuch*

Bei den teil-faktoriellen Plänen nutzt man die Erkenntnis, dass gewöhnlich Dreifaktoren-Wechselwirkungen sehr klein sind und ein Ergebnis nur unwesentlich verfälschen, wenn diese Wechselwirkungsspalten mit weiteren Faktoren belegt werden. Ein teil-faktorieller Versuchsplan ist beispielsweise der Plan 2^{4-1} , der von einem voll-faktoriellen Plan abgeleitet werden kann. Hierbei werden die 3-Faktor-Wechselwirkungen „ABC“ durch den Faktor „D“ ersetzt /BER 04/;KLE 08/.

Tab. 2.4: Ableitung eines teil-faktoriellen Versuchsplans aus einem voll-faktoriellen Plan /KIE 14b/

Versuch	A	B	C	AB	AC	BC	ABC→D
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

Somit können 4 Faktoren (A, B, C, D) mit 8 Versuchen unter Berücksichtigung von 3 Kombinationen (AB, AC, BC) untersucht werden.

Zur Reduzierung der Streuung zugunsten der Prozessrobustheit kann die nachfolgend beschriebene Methode nach G. Taguchi benutzt werden (Minimierungsprobleme).

- *Taguchi-Methode*

Taguchi hat die Idee weiterentwickelt, nach den Einstellungen der Steuergrößen zu suchen, bei denen sich eine Veränderung dieser Störgrößen möglichst klein auswirkt. Dafür wird der Begriff „Robustheit“ verwendet. Man spricht vom robusten Produkt, wenn dessen Eigenschaften möglichst wenig von definierten Störgrößen wie Fertigungs- oder Einsatzbedingungen abhängen. Ziel ist es, die Steuergrößen so festzulegen, dass trotz zufälliger Streuung dieser Größen um den Sollwert die Werte der Zielgrößen nur gering streuen. Damit kann der Aufwand zur Begrenzung der Streuung reduziert und dennoch eine gute Qualität an den Kunden geliefert werden /KLE 14b/.

Bei vielen Störgrößen, die Probleme in der Fertigung bereiten können, sollten die wichtigsten Störgrößen identifiziert werden, wozu sich die Shainin-Methode anbietet, die gleichzeitig den Versuchsaufwand gering hält /BOT 90/.

- *Shainin-Methode*

Ziel dieser Methode ist es, mithilfe einer systematischen Beobachtung der Fertigung und mit einfachen Versuchen herauszufinden, welche Störgrößen besonders relevant sind. Dies ist zwar mit weiteren Kosten verbunden, dadurch kann aber der Versuchsaufwand reduziert werden /KLE 14b/.

2.4 Methoden zur Systemzuverlässigkeit

Falls ein System in der Lage ist, über einen definierten Zeitraum unter vorgegebenen Bedingungen seine Funktion zu erfüllen, bezeichnet man es als zuverlässig /vgl. DIN 40041/.

Die Entwicklung moderner Produkte ist heute konfrontiert mit steigenden Funktionsanforderungen, einer höheren Komplexität, der Vernetzung von Hardware, Software und Sensorik bei möglichst geringen Produkt- und Entwicklungskosten. Die relevantesten Rahmenbedingungen, die die Entwicklung von Produkten entscheidend beeinflussen, werden in der folgenden Übersicht dargestellt /BER 04;/ BEN 04/.

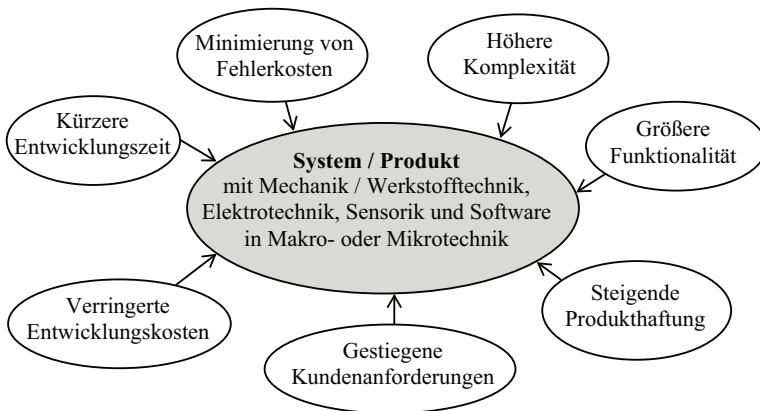


Abb. 2.13: Unterschiedliche Einflüsse auf das System und auf die Zuverlässigkeit nach /BER 04/

In diesem Umfeld kann die Systemzuverlässigkeit nur durch zusätzliche Maßnahmen sichergestellt werden /BER 04/. Die rechtzeitige Ermittlung der Zuverlässigkeit und der Schwachstellen sollte insbesondere in der Phase der Produktentwicklung methodisch durchgeführt werden, um durch eine gezielte Zuverlässigkeitsoptimierung auch eine hohe System- bzw. Produktzuverlässigkeit zu erreichen /WIL 04/.

Damit das Produkt letztendlich wirtschaftlich entwickelt werden kann, ist es wichtig, Methoden des Zuverlässigkeitswachstums /vgl. DIN EN 61164/ möglichst kosten- und zeitneutral mit maximalem Nutzen in den Entwicklungsprozess zu integrieren /PIC 09/.

Eine hohe Systemzuverlässigkeit kann nicht allein über geeignete Konstruktionsmethoden und -verfahren sichergestellt werden. Aus diesem Grund kommen unterschiedliche analytische qualitative und quantitative Zuverlässigkeitsmethoden zum Einsatz (s. Abb. 2.14).

Um die Erfüllung von strengen Zuverlässigkeitsanforderungen im Gebrauchsumfeld zu gewährleisten, ist eine qualitative Aussage über die Produktzuverlässigkeit alleine nicht ausreichend. Daher kommen vermehrt quantitative Methoden zur Beschreibung des Systemverhaltens zum Einsatz, z. B. die Fehlerbaum- bzw. Markovanalyse /BEN 04/.

In der folgenden Abbildung werden die wichtigsten unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit übersichtlich dargestellt.

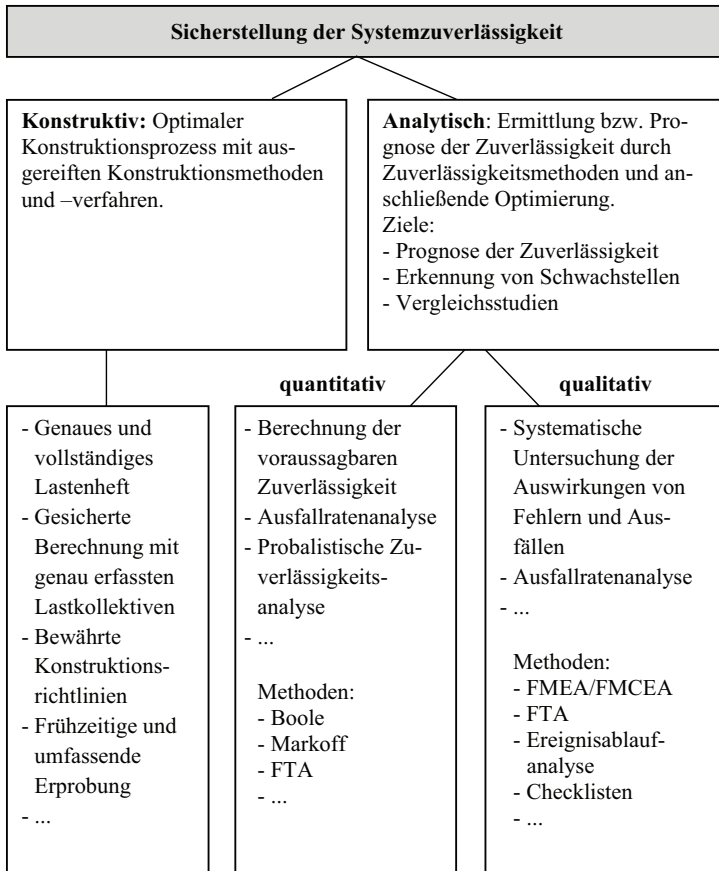


Abb. 2.14: Konstruktive bzw. analytische Sicherstellung der Systemzuverlässigkeit nach /BER 04/

Die quantitativen Methoden verwenden Verfahren aus der Statistik und der Wahrscheinlichkeitstheorie. Die bekannteste qualitative Zuverlässigkeitsmethode, die insbesondere in der Automobilindustrie vorkommt, ist die FMEA mit dem Ziel der systematischen Suche nach Schwachstellen und ihren Auswirkungen /BEN 04/.

Die Standardmethode für detaillierte Folgenanalysen ist die Ereignisablaufanalyse, in der, ausgehend von einem Ereignis, mögliche Folgeereignisse in einer Baumstruktur untersucht werden können.

Sowohl die Ereignisbaum- als auch die Fehlerbaumanalyse können neben den qualitativen Analysen auch zu probabilistischen Analysen genutzt werden /FEN 07/.

Die zur Ermittlung der Systemzuverlässigkeit üblichen Methoden zeigt die folgende Übersicht.

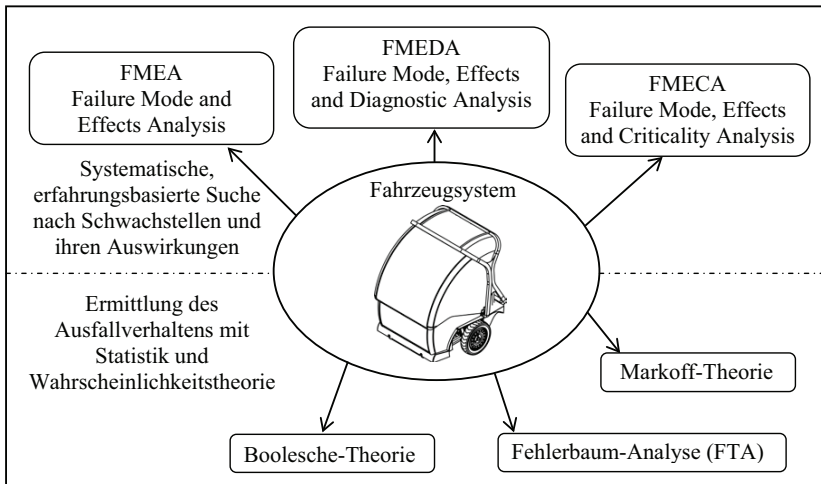


Abb. 2.15: Bewährte Methoden zur Systemanalyse bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen angelehnt an /SCH 01/

Diese Zuverlässigkeitsmethoden werden aufgrund ihrer Wichtigkeit im weiteren Verlauf dieses Kapitels erläutert.

2.4.1 Qualitative Methoden

Die qualitativen Methoden sollen die Qualität und Zuverlässigkeit der Systeme bzw. Produkte in den Entwicklungsphasen sichern. Es sind kritische Schwachstellen und Ausfallarten zu ermitteln.

Mit diesen Methoden erfolgt die Festlegung der Systemelemente, welche die Bauelemente nach ihrem Ausfallverhalten weiter unterteilen /WIL 04/.

2.4.1.1 FMEA und FMECA

Die FMEA „Failure Modes und Effects Analysis“ wurde Mitte der sechziger in den USA von der NASA für das sogenannte Apollo-Projekt entwickelt. Diese Methode besteht in einer strukturierten Analyse eines Systems, Subsystems oder einer Funktion mit dem Ziel, potenzielle Fehlermöglichkeiten, ihre Ursachen und die möglichen Folgen für das System bzw. Produkt frühzeitig zu analysieren. Diese Methode wird im Rahmen des Qualitäts- und Sicherheitsmanagements mit dem Ziel der präventiven Fehlervermeidung und zur Steigerung der Zuverlässigkeit eingesetzt /FOR 11b/. Wenn die FMEA um eine Bewertung der Kritikalität erweitert wird, also um eine Bewertung der Schwere einer Fehlerauswirkung und um die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers, dann wird diese Methode FMECA „Failure Modes, Effects and Criticality Analysis genannt“ /BER 04;/ /BEN 04;/ /BSI 91/.

Der Ablauf einer FMEA gliedert sich übersichtlich in die folgenden Schritte.

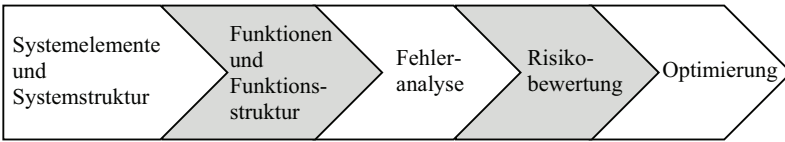


Abb. 2.16: Prinzipieller Ablaufplan einer FMEA-Analyse nach /REI 12a/

Diese Methode wird unterschieden in System-, Prozess- und Konstruktions-FMEA, die unterschiedliche Schwerpunkte verfolgen.

Die System-FMEA analysiert das funktionsgerechte Zusammenwirken einzelner Teilsysteme in einem übergeordneten Gesamtsystem. Dabei steht auch die Ermittlung potenzieller Schwachstellen an den Schnittstellen der Teilsysteme im Fokus.

Die Prozess-FMEA verfolgt das Ziel der Sicherstellung eines fehlerfreien Prozessablaufes in den Bereichen Fertigung, Montage und Prüfung.

Mit der Konstruktions-FMEA wird gezielt ein einzelnes Produkt betrachtet und auf mögliche Schwachstellen und Fehlerpotenziale untersucht. In diesem Zusammenhang wird das System bzw. Produkt besonders auf Faktoren wie z. B. Funktionalität, Zuverlässigkeit, Bauteilgeometrie und Werkstoffauswahl überprüft /GUT 11/.

Die Umsetzung der FMEA erfolgt nach /DIN 06/ anhand standardisierter Formblätter. Hierzu folgt ein Beispiel in der folgenden Darstellung /GUT 11/aus dem bearbeiteten Projekt.

Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse										FMEA-Nr.:	
<input type="checkbox"/> System-FMEA Produkt <input type="checkbox"/> System-FMEA Prozess											
Typ/Modell/Fertigung/Charge: E2V					Sach-Nr.:		Verantw.:		Abt.:		
System-Nr./Systemelement Fahrwerk und Rahmen					Änderungsstand:		Firma:		Datum:		
Funktion/Aufgabe: Aufnahme der Bauteile und Fortbewegung					Sach-Nr.:		Verantw.:		Abt.:		
Mögliche Fehlerfolgen					Änderungsstand:		Firma:		Datum:		
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	V/T		
Fahrwerk gewährleistet keine funktionsgerechte Fortbewegung und Rahmen dient nicht als Grundgerüst	8	Der Aluminiumrahmen gewährleistet keine funktionsgerechte Aufnahme der Bauteile	ungeeignetes Material gewählt	<u>Anfangszustand:</u> keine	3	keine	9	216			
	8		Toleranzen nicht eingehalten	<u>Änderungsstand:</u> Materialauswahl überprüfen	1	Materialprüfung	2	16			
	8			<u>Anfangszustand:</u> keine	4	keine	9	288			
	8			<u>Änderungsstand:</u> Fertigungsabläufe und Toleranzvorgaben überprüfen	1	Messungen durchführen	2	16			

Abb. 2.17: Teilübersicht einer FMEA aus dem Fahrzeugprojekt-E2V nach /GUT 11/

Als Kriterium werden zu jedem aufgelisteten Fehler die geplanten Kontrollmaßnahmen beschrieben. Jede dieser Maßnahmen wird mit einem Wert zwischen 1 und 10 bewertet. Die Bewertung 10 steht für einen schlecht erkennbaren Mangel infolge eines Fehlers /FOR 11b/.

Bei der praktischen Durchführung einer FMEA erfolgt zuerst die Zusammenstellung des gesamten FMEA-Teams sowie die Zusammenstellung aller Projektinformationen, die für die Durchführung erforderlich sind, beispielsweise in Form eines Blockdiagramms.

Des Weiteren erfolgt die Ermittlung der sogenannten Risikoprioritätszahl (RPZ). Diese setzt sich aus drei Bewertungsfaktoren nach /DIN 06/; /FOR 11b/ zusammen.

- Auftretenswahrscheinlichkeit (A).
- Bedeutung der Fehlerfolgen (B).
- Entdeckungsrate (E).

Die systematische Suche nach Fehlern sowie die Ermittlung von Ursachen und Folgen wird mit einer Risikoanalyse durchgeführt. Es werden Fehler methodisch analysiert und hinsichtlich der Auftretenswahrscheinlichkeit (A), der Bedeutung (B) und der Entdeckungsrate (E) bewertet.

Die Priorisierung der Fehler erfolgt durch Multiplikation dieser drei Faktoren /DIN 06/:

$$A \cdot B \cdot E = \text{RPZ.} \quad (2.7)$$

Mithilfe der RPZ können die einzelnen Fehler nach ihrer Bedeutung sortiert werden. In Abhängigkeit von dem RPZ-Wert sollten Verbesserungsmaßnahmen besonders für die kritischen Zustände ergriffen werden, die ein hohes Optimierungspotenzial besitzen, wodurch die RPZ reduziert werden kann /HEN 08/; /BER 04/.

Die Herausforderung für die Risikobewertung besteht darin, die wichtigsten Informationen aus einem technischen System zu filtern und die Auswahl der richtigen Entscheidungen zu treffen /FOR 11b/. Das Ergebnis einer durchgeführten FMEA ist die Grundlage zur konstruktiven Überarbeitung zum Einsatz von Gegenmaßnahmen /HEN 08/.

Die FMEA ist eine qualitative Analyse, bei der die Bewertungen ohne konkrete Messgrößen relativ zueinander abgeschätzt werden. Eine Erweiterung der FMEA um quantitative Kenngrößen stellt die FMEDA (Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis) dar, die beispielsweise die Zuverlässigkeit eines Systems in Abhängigkeit von der Zeit bewerten kann /WER 12/.

2.4.1.2 FTA und ETA

Die Fehlerbaumanalyse, FTA (Fault Tree Analysis), ist eine grafische Analyse-Methode zur frühzeitigen Erkennung und Beseitigung von Schwachstellen eines Systems bzw. Produktes.

Ziel ist es, die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von System- bzw. Produktausfällen und deren möglichen Folgen zu ermitteln.

Die FTA beginnt meistens mit einer detaillierten Systemanalyse, bei der eine modellhafte Unterteilung des Systems in einzelne Teilsysteme bzw. Komponenten erfolgt /JUN 04/.

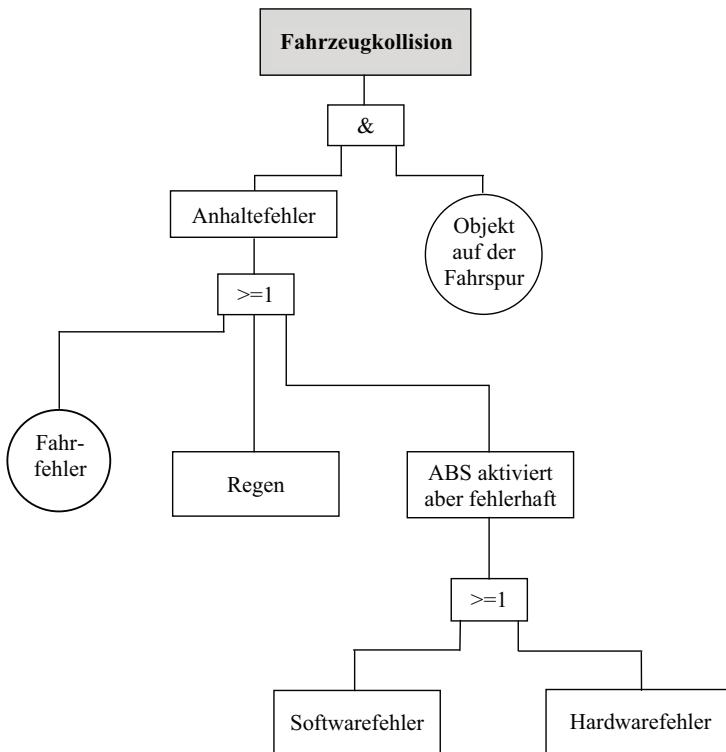


Abb. 2.18: Schematische Darstellung eines Fehlerbaums nach /REI 12a/

Von einem System- bzw. Produktereignis aus wird eine Ursachenanalyse entlang einer Baumstruktur durchgeführt. Mögliche Kombinationen von Ursachen werden durch logische Operatoren, z. B. durch UND (&) bzw. ODER (≥ 1), dargestellt. Die Vorgehensweise wird außerdem durch standardisierte Symbole unterstützt /BEN 04/.

Die Verknüpfungsoperatoren können in zwei verschiedene Symbolgruppen unterteilt werden. Eine Hauptgruppe stellen die Ereignisse dar, z. B. die Fahrzeugkollision, die sich

von dem sogenannten „Top-Event“ bis zum Objekt auf der Fahrspur, dem „Basic-Event“, weiter unterteilen lässt /REI 12a/.

Die De Morgan'sche Gesetze ermöglichen eine Umwandlung der UND-Verknüpfung in eine ODER-Verknüpfung und umgekehrt /ADA 13a/.

Tab. 2.5: Logische Gesetze nach de Morgan /ADA 13a/

Gesetz	Name
$\neg(A \vee B) = (\neg A) \wedge (\neg B)$	Regeln von de Morgan
$\neg(A \wedge B) = (\neg A) \vee (\neg B)$	

Mit den Gesetzen besteht die Möglichkeit, logische Gleichungen zu vereinfachen beispielsweise bei der Entwicklung von elektronischen Schaltungen /HER 05/.

In der Praxis werden die Fehlerereignisse nur so weit aufgegliedert, dass die zahlreichen Unterteilungen übersichtlich bleiben und den Nutzen des Fehlerbaums wahren. Die zweite Symbolgruppe umfasst die logischen Operatoren UND bzw. ODER.

Mit dem Fehlerbaum besteht die Möglichkeit, Wahrscheinlichkeiten für die Fehlerursachen zu ermitteln und daraus die Ausfallwahrscheinlichkeit für das Gesamtsystem abzuschätzen. Beim Überschreiten der Wahrscheinlichkeit sind neue Lösungsvorschläge zu erarbeiten, um die Eintrittswahrscheinlichkeit des Top-events zu verringern.

Aufgrund der Tatsache, dass beide Methoden unterschiedliche Ansätze verfolgen, kann durch den kombinierten Einsatz beider Verfahren die größtmögliche Zuverlässigkeit des Systems erzielt werden /BER 04;/MEY 04/.

Eine andere Analysemethode ist die Ereignisbaumanalyse, ETA (Event Tree Analysis). Dabei werden, ausgehend von den Elementarereignissen, mögliche Auswirkungen ermittelt, sodass der Fehlerbaum quasi von unten statt von oben aufgebaut wird. /BEN 04/.

2.4.2 Quantitative Methoden

Die quantitativen Methoden verwenden unterschiedliche Verfahren aus der Statistik und der Wahrscheinlichkeitstheorie. Dies ist erforderlich, weil die bei Lebensdauerversuchen oder aus Simulationen ermittelten Ausfallzeiten gewöhnlich stark streuen /BER 04/.

2.4.2.1 FMEDA

Mit steigender Komplexität und Sicherheitsrelevanz, insbesondere von innovativen Systemen (z. B. Elektrofahrzeuge), wird es zunehmend wichtiger, die Zuverlässigkeit bzw. die Abwesenheit von potenziellen Fehlern zu gewährleisten.

Die FMEDA (Fehler-, Möglichkeits-, Einfluss- und Diagnoseanalyse) ist eine systematische quantitative Analysetechnik, die die Zielsetzung verfolgt, technische Systeme oder Produkte auf die Erfüllung bestimmter Sicherheitslevel (SIL bzw. ASIL) zu überprüfen bzw. Vorgaben einzuhalten, die man in branchenspezifischen Unternormen (s. Abb. 2.8) zur Mutternorm IEC 61508 findet /WER 12/; /GRO 11/.

Die unterschiedlichen Ausfallarten, die aus einer FMEDA folgen, werden mittels der Kategorien „safe“ und „dangerous“ unterschieden. Des Weiteren können Werte wie „Diagnostic-Coverage“ (DC), „Safe-Failure-Fraction“ (SFF), „Probability of dangerous on“/on Demand“ (PFD) und „Probability of dangerous Failure per Hour“ (PFH) berechnet werden, um auf der Grundlage letztendlich eine Klassifizierung des Sicherheitslevels festzulegen.

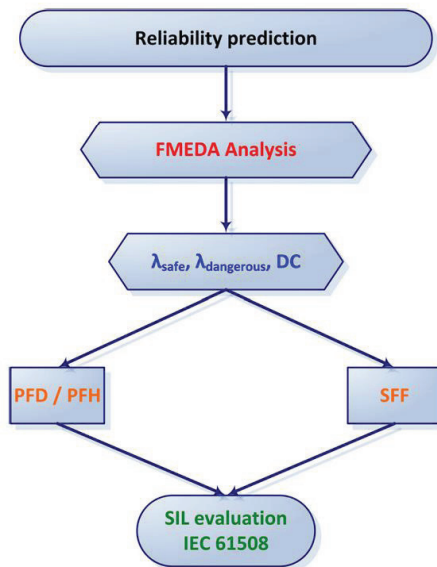


Abb. 2.19: Ergebnisorientierter Ablauf einer FMEDA-Analyse nach /CAT 10/

In /IEC 61508/ werden diese verschiedenen Metriken für die Evaluation von sicherheitskritischen Systemen definiert und beschrieben /WER 12/.

Tab. 2.6: Kurzbeschreibung der wichtigen Metriken für die FMEDA nach /IEC 61508/

Metrik	Kurzbeschreibung
SFF (Safe Failure Fraction)	Anteil ungefährlicher Ausfälle eines Teilsystems
DC (Diagnostic Coverage)	Anteil der gefährlichen Ausfälle, die durch Diagnosen erkannt werden können.
PFH (Probability of dangerous Failure per Hour)	Ausfallwahrscheinlichkeit Gefahr bringender Ausfälle der Sicherheitsfunktion pro Stunde
PFD (Probability of dangerous on demand)	Mittlere Versagenswahrscheinlichkeit eines Gefahr bringenden Ausfalls bei Anforderung der Sicherheitsfunktion

Mit einem DC-Wert von z. B. 90 % wird ausgesagt, dass 10 % der Fehler nicht erkannt werden. Diese möglichen Fehler können nicht in einen sicheren Zustand überführt werden, bevor sie zur Gefahr werden.

Ein SFF-Wert von beispielsweise 95 % bedeutet, dass nur 5 % der Fehler nicht erkannt werden können, die zu einem sicherheitskritischen Zustand führen.

Ist im Betrieb eine kontinuierliche Sicherheitsfunktion zu gewährleisten, wird die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Stunde betrachtet – beispielsweise sollte beim Abbremsen eines Elektrofahrzeuges im Bergpark bei unterschiedlichen Gefällen der PFH-Wert pro Stunde für diese Sicherheitsfunktion „Bremsen“ berücksichtigt werden.

Der PFD-Wert spezifiziert die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit, mit der ein System zu einem Zeitpunkt ausfällt, indem die Sicherheitsfunktion „Bremsen“ herangezogen wird. Aus einem berechneten PFD-Wert von z. B. 0,003 resultiert eine mittlere Wahrscheinlichkeit von 333 Jahren. Aufgrund der Wahrscheinlichkeitsrechnung ergibt sich aber nicht, dass die Funktion nun 333 Jahre ohne Ausfall bleibt, sondern der sicherheitskritische Ausfall könnte theoretisch bereits nach einem Jahr erfolgen und anschließend 332 Jahre zuverlässig sein /FRI 05/.

Als Grundlage zur Berechnung dieser Metriken dienen die vier verschiedenen Ausfallarten, die beispielsweise vom Hersteller vorgegeben werden können.

Die Ausfallrate eines Bauteils wird somit unterschiedlichen Stufen zwischen „sicher“ und „Gefahr bringend“ zugeordnet, in Abhängigkeit von deren Diagnosefähigkeit.

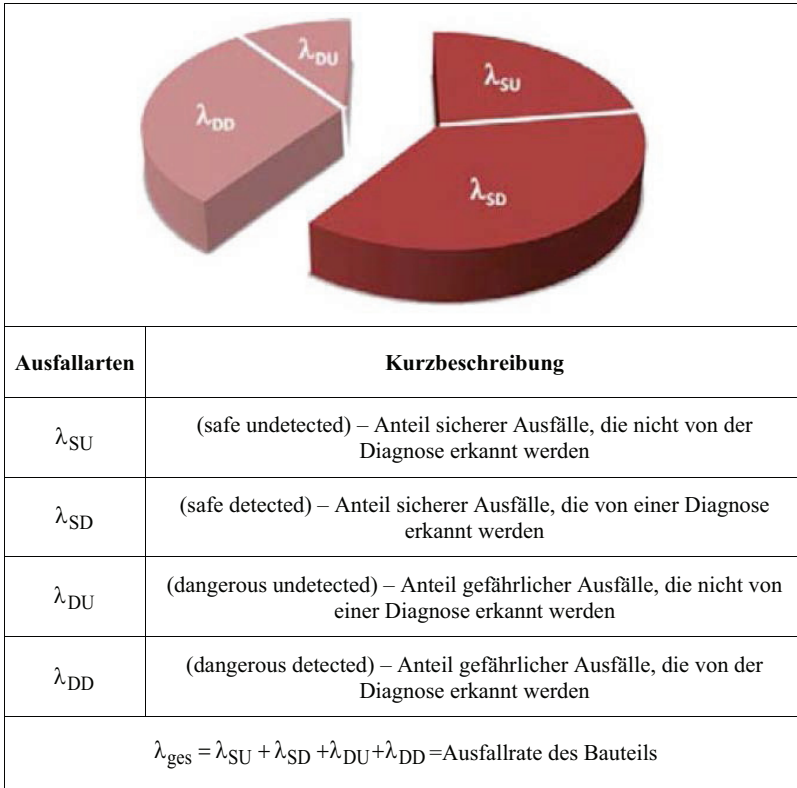


Abb. 2.20: Darstellung und Aufteilung der Fehler in sichere bzw. gefährliche Ausfälle in Abhängigkeit von der Diagnosefähigkeit nach /WER 12/

Sind die Ausfallraten zu den jeweiligen vier Ausfallarten bekannt, können die Metriken DC und SFF direkt berechnet werden /WER 12/.

$$DC = \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_{DD} + \lambda_{DU}} \quad (2.8)$$

bzw.

$$SFF = \frac{\lambda_{SU} + \lambda_{SD} + \lambda_{DD}}{\lambda_{SU} + \lambda_{SD} + \lambda_{DD} + \lambda_{DU}} \quad (2.9)$$

Die PFD-Berechnung ist abhängig von einer ein- oder mehrkanaligen Struktur und ist dementsprechend zu definieren. Liegt eine einkanalige Struktur (1001) vor, welche regelmäßig im Zeitintervall T_1 einer Überprüfung unterzogen wird, kann die nachfolgende Formel zur PFD-Berechnung herangezogen werden /PEP 07/.

$$PF\text{D}_{1001} = \lambda_{\text{DU}} \cdot \frac{T_1}{2} \tag{2.10}$$

Die Berechnung des PFH-Wertes erfolgt einerseits mit der mittleren Anzahl von Zyklen bis 10 % der Prüflinge gefährlich ausgefallen sind zu B_{10d} bzw. mit den Schaltzyklen pro Jahr n_{op} , oder andererseits mit der mittleren Zeit bis zum gefährlichen Ausfall MTTF_d /IEC 61508/:

$$PFH = n_{\text{op}} \cdot \frac{0,1}{B_{10d}} = \frac{1}{\text{MTTF}_d} \tag{2.11}$$

Mit den Ergebnissen für das System kann man den Sicherheitslevel SIL- bzw. ASIL mittels der jeweiligen Norm bestimmen. Es wird durch die nachfolgende tabellarische Übersicht sehr gut deutlich, dass beispielsweise SIL 3 nicht der Klassifizierung ASIL-C entspricht oder umgekehrt.

Tab. 2.7: SIL- und ASIL-Vergleich mit den unterschiedlichen Eingruppierungen der Wahrscheinlichkeiten nach /LIN 14/; /KAN 10/

IEC EN 61508				
Safety Integrity Level	mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefährbringenden Ausfalls bei Anforderung der Sicherheitsfunktion	Rate gefährbringender Ausfälle der Sicherheitsfunktion [Fehler/h]	IEC EN 61508	ISO CD 26262
	PFH	PFH	SIL	ASIL
	-	-	QM	QM
	$\geq 10^{-2}$ bis $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ bis $< 10^{-5}$ < 10.000 FIT	1	A
	$\geq 10^{-3}$ bis $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ bis $< 10^{-6}$ < 1.000 FIT	2	B
	$\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ bis $< 10^{-7}$ < 100 FIT	3	C
$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ bis $< 10^{-8}$ < 10 FIT	4	D	
			-	

Die resultierende Sicherheitsstufe stellt nun ein Maß für die einzuhaltende Zuverlässigkeit des Systems in Abhängigkeit von den Gefährdungen und der Diagnosefähigkeit dar.

2.4.2.2 Boolesches Modell

Nach dem Booleschen Modell kann während einer Konstruktion die Systemzuverlässigkeit berechnet werden. Dabei wird die logische Symbolik des Fehlerbaums mit Rechenregeln in Zahlenwerte umgesetzt /BER 07/. Wird davon ausgegangen, dass ein technisches System entweder funktionsfähig oder ausgefallen ist, nämlich in Abhängigkeit von den Komponenten, die sich jeweils ebenfalls im ausgefallenen bzw. funktionsfähigen Zustand befinden können, lässt sich dieses alternierende Verhalten mit der Booleschen Algebra

beschreiben. Die Beschreibung aller Verknüpfungen sind durch Negation, Disjunktion und Konjunktion möglich /MEY 03/.

- Negation

Besitzt eine Boolesche Variable den Wert 1, dann ist die negierte Variable 0 und umgekehrt /BER 07/,

$$y = \bar{x}. \quad (2.12)$$

- Disjunktion

Die Disjunktion steht für die Boolesche Funktion ODER und findet Anwendung in Fällen, bei denen es ausreicht, das Ereignis am Ausgang auszulösen /MEY 03/; für zwei binäre Variablen bedeutet das, dass eine Disjunktion gegeben ist, wenn x_1 oder x_2 gleich 1 sowie x_1 und x_2 gleich 1 ist. In diesen Fällen ist dann der Ausgang $y = 1$. Nur für den Fall, dass x_1 und x_2 gleich 0 sind, ist auch $y = 0$.

$$y = x_1 \vee x_2 = x_1 + x_2 \quad (2.13)$$

- Konjunktion

Die Konjunktion steht für die Boolesche Funktion UND. Daher müssen alle Ereignisse am Eingang vorliegen, damit das Ereignis am Ausgang eintritt. Eine Konjunktion für zwei binäre Variablen ist demnach gegeben, wenn x_1 und x_2 gleich 1 sind. Genau in dem Fall ergibt $y = 1$.

$$y = x_1 \wedge x_2 = x_1 \cdot x_2 \quad (2.14)$$

2.4.2.3 Markoff-Theorie

Mit der Markoff-Theorie können im Gegensatz zur Fehlerbaumanalyse bzw. booleschen Theorie auch mehrfach reparierbare Systeme berechnet werden /WIL 04/; /BIR 85/.

Die Markov-Analyse ist ein mathematisches Vorgehen zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für einen bestimmten Systemzustand, mit dem dynamische Vorgänge und reparierbare Systeme modelliert werden können /BEN 04/.

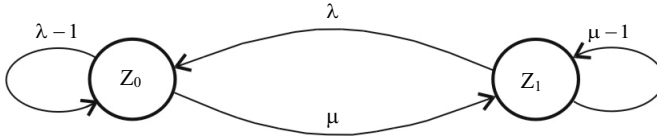
Ziel ist es, die Verfügbarkeit des technischen Systems bzw. eines Bauelements zu ermitteln. Folgende Voraussetzungen sind zur Vereinfachung der Modelle wichtig /BER 06/:

- die Betrachtungseinheit wechselt zwischen Arbeits- und Reparaturzustand,
- nach jeder Instandsetzung ist die reparierte Einheit in einem neuwertigen Zustand,
- die Arbeits- und die Reparaturzeiten jeder Betrachtungseinheit sind stetig und stochastisch unabhängig,

Das Markov-Verfahren basiert auf dem sogenannten Markov-Prozess, einem stochastischen Prozess $X(t)$ mit endlich vielen Zuständen Z_0, Z_1, \dots, Z_n . Die weitere Entwicklung der einzelnen Zustände ist zu jeden beliebigen Zeitpunkt t nur vom gegenwärtigen Zustand und der Zeit t abhängig. Dies bedeutet, dass mit dem Markov-

Modell nur Systeme angewendet werden können, deren Elemente konstante Ausfall- und Reparaturraten besitzen.

Die Methode basiert auf einer Bilanzierung verschiedener Zustandsänderungen in Form von Gleichgewichtsbeziehungen. Die Zustandsänderung eines Elements stellt anschaulich ein Markov-Graph dar /BER 04/.



λ, μ = Übergangswahrscheinlichkeit

Abb. 2.21: Markov-Graph zur Darstellung der Zustandsänderungen nach /BER 04/

In der Abbildung 2.21 wird gezeigt, dass das Element mit einer bestimmten Übergangswahrscheinlichkeit von einem Zustand Z_0 in einen anderen Zustand Z_1 übergeht. Im Zustand Z_0 ist das Element funktionsfähig und im Betriebszustand. Ist das Element ausgefallen, befindet sich das Element im Reparaturzustand Z_1 . Die möglichen Zustandsänderungen bilanziert man mit der Aufstellung der Zustandsdifferenzialgleichungen.

Wie diese Differenzialgleichungen anhand des Markov-Graphen mit den entsprechenden Anfangsbedingungen aufgebaut werden, wird in /BER 04/; /BEN 04/ aufgezeigt. Für die Beschreibung der zeitabhängigen Zustände wird dazu die Lösung zu den Differenzialgleichungen aufgestellt.

Aus der Multiplikation der Zustandswahrscheinlichkeit mit den jeweiligen Übergangsraten resultieren die zwei gesuchten Übergangswahrscheinlichkeiten.

$$\frac{\partial Z_0(t)}{\partial t} = -\lambda \cdot Z_0(t) + \mu \cdot Z_1(t) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial Z_1(t)}{\partial t} = -\mu \cdot Z_1(t) + \lambda \cdot Z_0(t) \quad (2.16)$$

Da sich das Element in einem Zustand befinden muss, ist die Summe aller Zustandswahrscheinlichkeiten zu jedem Zeitpunkt 1. Daher folgt:

$$Z_0(t) + Z_1(t) = 1. \quad (2.17)$$

Die Anfangsbedingung zeigt, in welchem Zustand sich das Element zu der Zeit $t = 0$ befindet. Am Anfang ist das Element gewöhnlich neuwertig und funktionsfähig. Die Anforderungen lauten somit:

$$Z_0(t=0) = 1 \quad \text{und} \quad Z_1(t=0) = 0. \quad (2.18)$$

Nach dem Lösen der Differenzialgleichungen und dem Einsetzen der Anfangsbedingungen erhält man,

$$Z_0(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}. \quad (2.19)$$

Die zweite Zustandswahrscheinlichkeit erhält man, indem die Normierungsbedingung nach $Z_1(t)$ umgestellt wird.

$$Z_1(t) = 1 - Z_0(t) \quad (2.20)$$

Mit diesen Wahrscheinlichkeiten können die Zustände zu unterschiedlichen Zeitpunkten bestimmt werden. Somit ergibt sich die Verfügbarkeit des Elements durch:

$$Z_0(t) = A(t). \quad (2.21)$$

Im Gegensatz dazu wird die Nicht-Verfügbarkeit mithilfe der folgenden Formel bzw. mittels $Z_{1(t)}$ berechnet.

$$U(t) = 1 - A(t) = Z_1(t) \quad (2.22)$$

Komplexere Systeme mit mehr Zuständen lassen sich ebenfalls auf diese Weise analysieren, allerdings muss ggfs. die Lösung der Differenzialgleichung numerisch erfolgen.

Trotz der genannten Einschränkungen kann diese Methode bei Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsstudien reparierbarer Systeme recht hilfreich sein /BER 04/.

2.4.3 Zeitraffende Erprobung

Eine Methode, die sowohl die Versuchskosten als auch die Versuchszeiten reduzieren kann, sind Prüfungen, bei denen die Prüflinge verschärften Beanspruchungen ausgesetzt werden. Mithilfe physikalisch begründbarer Modelle erfolgt der Bezug dabei auf die Lebensdauer unter normaler Belastung.

Es besteht bei solchen Prüfungen mit höheren Beanspruchungen allerdings die Gefahr, dass synthetische Fehler generiert werden. Als synthetische Fehler sind Ausfälle zu bezeichnen, welche im Labor auftreten können, jedoch im realen Einsatz nicht vorhanden sind /WIL 04/.

Bei einer zeitraffenden Erprobung muss unterschieden werden in Schwingbruch- und Temperaturwechselversagen sowie in parameteriell provozierendes Versagen, die mit einer höheren Belastung durchgeführt werden /KLE 14d/.

In der Praxis haben sich die in der umseitigen Tabelle 2.8 aufgeführten Prozeduren durchgesetzt.

Tab. 2.8: Methoden zur zeitraffenden Erprobung nach /KLE 14d/; /GER 05/

Methoden	Anwendung
Inverse Power Law	Mechanische Komponenten/Systeme bis zum Bruch (Lastwechsel/Frequenz, Temperaturwechsel) Elektronische Alterung (elektrische Beanspruchung (Feldstärke))
Step-Stress-Test	Mechanische Komponente bis zum Bruch (Laststufung/Lastwechsel)
HALT-Test	Elektrische, elektronische, elektromechanische Komponente (Spannung/Temperatur)
HAST- bzw. HASS-Test	

Für mechanische Bauteile, die mit statischen oder dynamischen Lasten beschwert werden, gilt die mathematische Beziehung des Inverse Power Law,

$$t \cdot B^k = \text{konst.} \quad (2.23)$$

Die Beziehung beinhaltet die Lebensdauer t und die Belastung B mit dem Lebensdauer- oder Beschleunigungsexponent k /KLE 14d/. Die elektrische Alterung eines Isolierstoffes ist beispielsweise auch ein zeitabhängiger Zerstörungsmechanismus, der ebenfalls durch das Inverse Power Law beschrieben werden kann /GER 05/.

Elektronische Komponenten zeigen im Betrieb meistens keine sichtbare Abnutzung, sodass Versagen infolge Alterung bzw. Spannungs- oder Temperaturschwankungen erfolgt. Um trotzdem im Labor reales Versagen zu erzeugen, wurden Prüfprozeduren wie HALT (Highly Accelerated Life Test) bzw. HAST (Highly Accelerated Stress Test) und HASS (Highly Accelerated Stress Screening) konzipiert. Diese Prüfungen beruhen auf den physikalischen Modellen von Eyring und Arrhenius /VDA 00/.

Weitere Beschreibungen zu den Tests sind in /MEY 03/; /MEY 10b/ bzw. /GOT 10/ enthalten.

2.5 Lebensdauerverteilungen zur Zuverlässigkeitsabschätzung

Die Zuverlässigkeitstheorie beschäftigt sich mit der Messung, Vorhersage, Erhaltung und Optimierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme. Die Aufgabe der Zuverlässigkeitsrechnung ist es, eine Zeitspanne für die Lebensdauer des zu untersuchenden Systems abzuschätzen /BEI 84/. In der folgenden Abb. 2.22 werden drei wichtige Verteilungsarten zur Beschreibung des Ausfallverhaltens dargestellt.

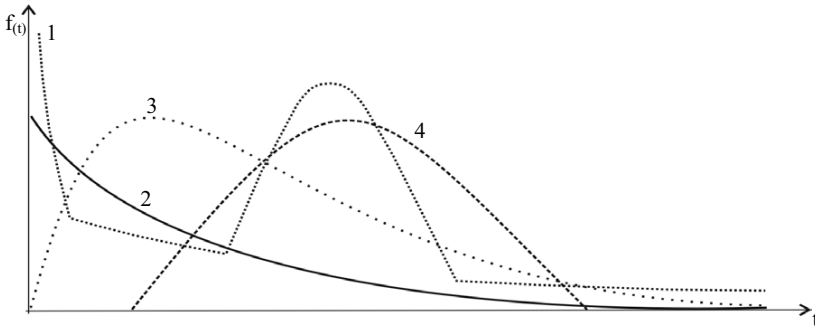


Abb. 2.22: Vier Verteilungsformen zur Beschreibung des Ausfallverhaltens in Anlehnung an /GOT 10/

Die Kurven bezeichnen:

1. Weibullverteilung mit unterschiedlichem Formparameter, wodurch sich die Verteilung ändern kann,
2. Exponential-Verteilung,
3. Lognormalverteilung,
4. Normalverteilung.

Die Exponential-Verteilung eignet sich zur Beschreibung von Bauteilen oder Systemen, deren Ausfallverhalten mit einer großen Ausfallhäufigkeit beginnt, die im weiteren Verlauf stets geringer wird und in eine konstante Ausfallhäufigkeit mündet.

Für Rissprobleme eignet sich die logarithmische Normal-Verteilung. Mit steigender Belastung werden die Risse länger, während die ertragbare Zyklenanzahl geringer wird. Mithilfe der Logarithmierung werden ursprünglich nicht normal verteilte Messwerte dann doch normal verteilt. Die Normalverteilung beschreibt das zufällige Ermüdungsversagen von Komponenten oder Sub-Systemen /KLE 14a/.

Mit der Weibullverteilung, die am häufigsten in der Zuverlässigkeitstechnik verwendet wird /GOT 10/, kann unterschiedliches Ausfallverhalten, das durch Anfangsfehler, Zufallsereignisse bzw. Übergang in einen Verschleiß- und Bruchbereich bedingt ist, beschrieben werden. Gewöhnlich beginnt das Ausfallverhalten mit einer höheren Ausfallhäufigkeit, die danach kontinuierlich abnimmt und in einen konstanten Ausfallhäufigkeitsbereich übergeht, um anschließend wieder in einen wachsenden Ausfallhäufigkeitsbereich überzugehen. Anschaulich wird dieser unterschiedliche Verlauf durch eine sogenannte Badewannenkurve dargestellt /KLE 14c/.

2.5.1 Normalverteilung

Die wichtige Bedeutung der Wahrscheinlichkeitsverteilung besteht darin, dass erfasste statistische Kennwerte von Stichproben nicht wahllos und beliebig sind, sondern mathematischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen unterliegen. Wenn theoretisch sehr viele Zufallsproben aus einer Grundgesamtheit gezogen werden, folgen die Mittelwerte der Stichproben der sogenannten Normalverteilung bzw. Gaußverteilung /KUC 10/.

Die Normalverteilung wurde erstmals von Abraham de Moivre (1667-1757) und Pierre-Simon Laplace (1749-1827) als Annäherung an die Binominalverteilung erarbeitet und angewandt. Häufig wird die Normalverteilung mit Carl Friedrich Gauß (1777-1855) in Verbindung gebracht, der die sogenannte Gaußverteilung z. B. in der Astronomie einsetzte /KUC 10/; /KLE 15/.

Die wichtigen Eigenschaften der Normalverteilung sind nach /KUC 10/ wie folgt definiert.

- Normalverteilungen sind symmetrisch.
- Mittelwert, Median und Modus sind identisch und liegen in der Verteilungsmitte. Die Parameter separieren die Verteilung in zwei gleich große Hälften.
- Die meisten Werte positionieren sich nah um den Mittelwert. Wird der Abstand zum Mittelwert größer, reduziert sich die Anzahl der Werte.
- Normalverteilungen approximieren sich zur x-Achse.

In Abhängigkeit vom Mittelwert und der Standardabweichung können viele unterschiedliche Normalverteilungen erzeugt werden.

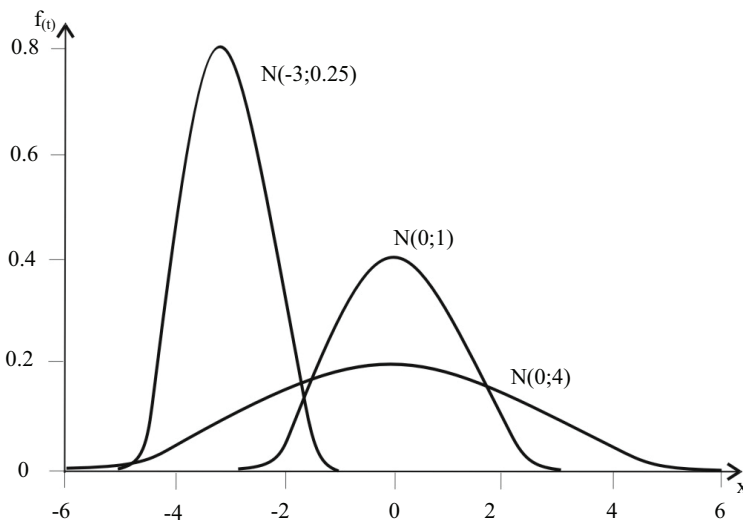


Abb. 2.23: Unterschiedliche Darstellungsformen der Normalverteilung nach /SCH 03/

Mit diesen Parametern kann z. B. der Streubereich unterschiedlicher Messwerte symmetrisch verkleinert oder vergrößert werden. Die Abschätzung der Lebensdauer erfolgt durch die Berechnung der Ausfallrate mit den folgenden Gleichungen /GOT 10/.

t Lebensdauervariable wie z. B. die Dauer der Beanspruchung, Wechsel von Belastungen, Anzahl der Schalterbetätigungen, Zyklen

μ Mittelwert

σ Maß der Streuung, Formparameter

Die Dichtefunktion bzw. Wahrscheinlichkeitsdichte für die Normalverteilung gibt Informationen darüber, wie viele Ausfälle zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. innerhalb einer Klasse vorhanden sind /WIL 04/.

Folglich resultiert die Dichtefunktion als Ableitung aus der Normalverteilungsfunktion.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.24)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit schätzt diejenige Zeit ab, zu der das System nach einer definierten Wahrscheinlichkeit ausfällt. Die Integration der Dichtefunktion ergibt folglich die Ausfallwahrscheinlichkeit.

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(\tau-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\tau \quad (2.25)$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeit ist das Komplement zur Ausfallwahrscheinlichkeit. Es beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass das System nach einer Betriebsdauer t noch funktionsfähig ist.

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(\tau-\mu)^2}{2\sigma^2}} d\tau \quad (2.26)$$

Beispielsweise sind für konventionelle Kfz-Systeme folgende Lebensdaueranforderungen, an Laufleistung (mehr als 150.000km), Einsatzzeitraum (mind. 17 Jahre) und 15.000 Betriebsstunden zu erfüllen.

Die Maßzahl für die Zuverlässigkeit einer „Menge“ erfolgt mit der sogenannten Ausfallrate $\lambda(t)$ und ergibt sich unter Berücksichtigung der Normalverteilung aus der Dichtefunktion und der Überlebenswahrscheinlichkeit /WAL 11b/.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.27)$$

2.5.2 Lognormalverteilung

Bei Datenerhebungen kann es auch vorkommen, dass eine Messreihe nicht normal verteilt vorliegt. In diesem Fall kann durch das Logarithmieren erreicht werden, dass die Verteilung der logarithmierten Parameter symmetrisch angenähert wird und gut an eine Normalverteilung angepasst ist. Solche Verteilungsformen sind z. B. Maßprobleme mit Werkzeugverschleiß, Wachstumsuntersuchungen, Konzentrations- und Empfindlichkeitsprobleme /KLE 13/.

Die Variable t wird folglich in logarithmischer Form in die Gleichungen eingesetzt, um die logarithmischen Ausfallzeiten nahezu in einer Normalverteilung zu erhalten /GOT 10;/WIL 04/.

Die Dichtefunktion für die logarithmische Normal-Verteilung lautet:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg t - \mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.28)$$

Die Integration ergibt die Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$F(t) = \frac{1}{\tau\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(\lg \tau - \mu)^2}{2\sigma^2}} d\tau. \quad (2.29)$$

bzw. das Komplement zur Überlebenswahrscheinlichkeit:

$$F(t) = 1 - R(t). \quad (2.30)$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeit lautet:

$$R(t) = \frac{1}{\tau\sigma\sqrt{2\pi}} \int_1^{\infty} e^{-\frac{(\lg \tau - \mu)^2}{2\sigma^2}} d\tau. \quad (2.31)$$

Beziehungweise lautet das Komplement zur Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$R(t) = 1 - F(t). \quad (2.32)$$

Die Ausfallrate ist zu berechnen mit:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (2.33)$$

2.5.3 Exponentialverteilung

Die Exponentialverteilung ist als Lebensdauermodell anwendbar, wenn mehrere unterschiedliche, voneinander unabhängige Ausfallursachen zufällig auftreten. Die Verteilung beinhaltet als Parameter, die Ausfallrate $\lambda(t)$, die stets als konstant in den Bereichen angenommen wird, in denen weder Verschleiß- noch Frühausfälle vorliegen.

Beispielsweise kommen hierfür elektronische Bauelemente in Betracht, die nicht in der Nähe von Grenzbeanspruchungen betrieben werden, oder Geräte, die aus mehreren Bauelementen mit verschiedenem Ausfallverhalten bestehen. Das zeitabhängige Ausfallverhalten kann mit der Ausfallfunktion beschrieben werden /GOT 10/.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.34)$$

Die Lebensdauer wird mithilfe der Dichtefunktion $f(t)$, der Verteilungsfunktion $F(t)$ und der Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ beschrieben. Die Ausfallrate $\lambda(t)$ verläuft immer konstant.

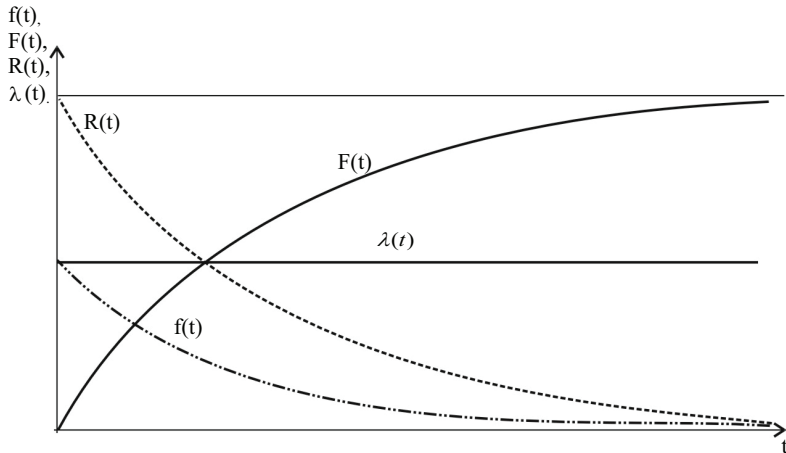


Abb. 2.24: Lebensdauerverteilungsformen nach /GOT 10/

Die Zuverlässigkeitsfunktion beschreibt die Wahrscheinlichkeit für ein Bauteil oder System, zu welchem Zeitpunkt ein Ausfall erfolgt /GOT 10/.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.35)$$

Durch die Abb. 2.24 ist ersichtlich, dass die Ausfallfunktion auch durch das Komplement der Zuverlässigkeitsfunktion beschrieben werden kann.

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2.36)$$

Die Dichtefunktion resultiert aus der Ableitung der Ausfallfunktion.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.37)$$

Die Veränderung der Ausfallrate hat einen Einfluss auf die Steigung und dem Verlauf der Dichtefunktion:

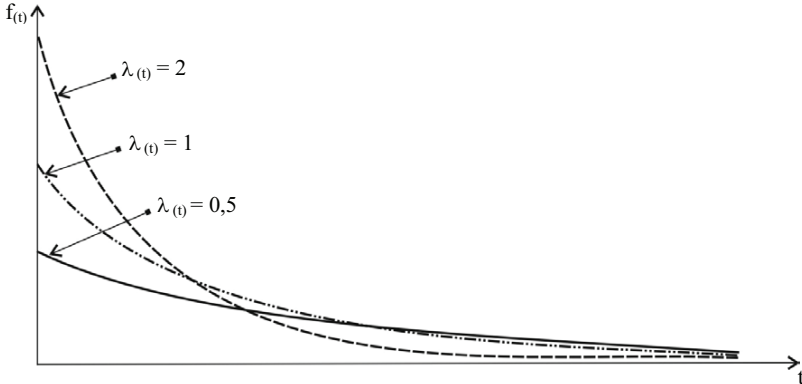


Abb. 2.25: Unterschiedliche Dichtefunktionen nach /GOT 10/

Zur Ausfallrate ist zusätzlich zu beachten, dass die weiteren Werte MTBF (*Mean Time Between Failures*) bzw. MTTF (*Mean Time To Failure*) berücksichtigt werden können.

MTBF ist der Mittelwert zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen für einen definierten Lebenszeitraum einer Einheit.

MTTF ist das Verhältnis der kumulierten Zeiten für eine Probe zur Gesamtzahl der beobachteten Ausfälle in der Probe während eines Zeitraums unter definierten Bedingungen für einen definierten Lebenszeitraum einer nicht reparierbaren Einheit /KLE 13/.

MTBF und MTTF sind jeweils als Kehrwert der Ausfallrate definiert.

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} \text{ bei } \lambda = \text{const.} \quad (2.38)$$

und

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTTF}} \text{ bei } \lambda = \text{const.} \quad (2.39)$$

Letztendlich ist die Ausfallrate definiert für $b=1$ ohne Verschleiß.

$$\lambda_t = -\frac{\partial R(t)}{\partial t} \cdot \frac{1}{R(t)} \text{ bei } \lambda = \text{const.} \quad (2.40)$$

2.5.4 Weibull-Verteilung

Die Weibull-Verteilung ist eine bei Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen besonders oft verwendete Verteilung, die unterschiedliche Ausfallursachen von technischen Systemen beschreiben kann. Der Entwickler, Waloddi Weibull (1887-1979), war ein schwedischer Ingenieur, der die sogenannte Weibull-Verteilung während einer Forschungsarbeit entwickelte. Mithilfe der variablen Dichtefunktion durch den Formparameter b kann das Ausfallverhalten von Bauteilen beschrieben werden. Mit der Weibull-Verteilung kann das unterschiedliche Ausfallverhalten in drei unterschiedliche Phasen unterteilt mittels der Badewannenkurve beschrieben werden. Aus diesem Grund hat diese Verteilungsform eine herausragende Bedeutung beispielsweise für den Fahrzeugbau /WIL 04/.

$$f(t) = \frac{b}{t} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad \text{(2-parametrig)} \quad (2.41)$$

$$f(t) = \frac{b}{t-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad \text{(3-parametrig)} \quad (2.42)$$

Die Parameter sind nach /VDA 00/ wie folgt definiert.

- b Formparameter ist ein Maß für die Streuung der Ausfallzeit t . Die ausgleichsgerade kann im Lebensdauernetz ansteigen.
- t Variable zur Lebensdauer (Fahrstrecke, Einsatzdauer, Lastwechsel...).
- T Charakteristische Lebensdauer definiert die Lebensdauer, ab wann 63,2 % der betrachteten Einheiten ausgefallen sind.
- t_0 Ausfallfreie „Zeit“, in der das Bauteil keinen Verschleiß zeigt, trotz der bisherigen Betriebszeit t_0

Die Exponential-, Lognormal- und Normalverteilung können mit der Weibull-Verteilung durch einen angepassten Formfaktor b approximiert werden.

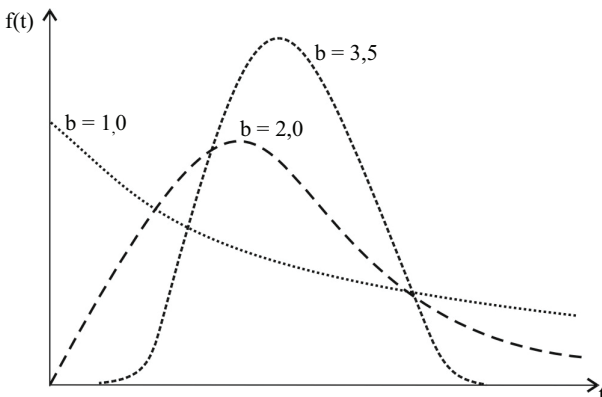


Abb. 2.26: Verteilungsformen mit jeweils unterschiedlichem Formparameter b nach /GOT 10/

Durch die Integration der Dichtefunktion entsteht die Ausfallfunktion.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} = 1 - R(t) \quad (2\text{-parametrig}) \quad (2.43)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (3\text{-parametrig}) \quad (2.44)$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeit der Weibullverteilung wird wie folgt definiert.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} = 1 - F(t) \quad (2\text{-parametrig}) \quad (2.45)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (3\text{-parametrig}) \quad (2.46)$$

Die Funktion der Ausfallrate lautet.

$$\lambda(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \quad \text{mit } b \geq 0 \text{ und } T > 0 \quad (2\text{-parametrig}) \quad (2.47)$$

$$\lambda(t) = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \quad \text{mit } b \geq 0 \text{ und } T > 0 \quad (3\text{-parametrig}) \quad (2.48)$$

Fallende, konstante sowie steigende Ausfallraten in Abhängigkeit von dem Formparameter b sind anhand einer Badewannenkurve gut darstellbar, die besonders in der Automobilindustrie eine herausragende Bedeutung hat /GOT 10/; /DEL 07/. Bezüglich der Systemzuverlässigkeit ist eine weitestgehend zutreffende Lebensdauervorhersage zu entwickeln. Dafür ist die Kenntnis unterschiedlicher Versagensursachen wichtig /RIE 12/.

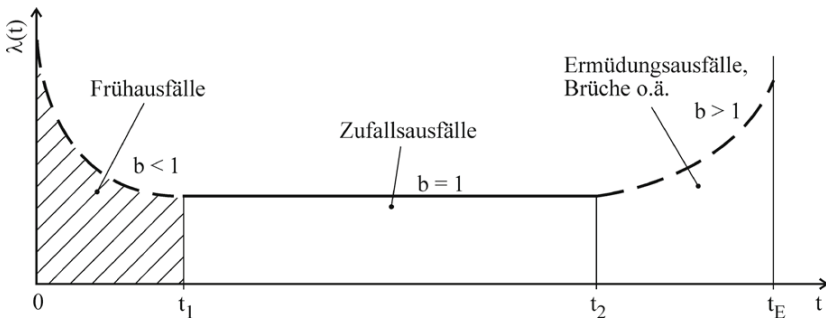


Abb. 2.27: Badewannenkurve zur Darstellung unterschiedlicher Ausfallmöglichkeiten nach /KLE 13/

Für die Analyse von technischen Bauteilen mit gewöhnlich komplexem Versagensverhalten infolge von Materialermüdungen, Fertigungsfehlern, Konstruktionsfehlern oder statistisch bedingten zufälligen Ausfällen ist eine universelle Verteilung ein hilfreiches Werkzeug.

Die Parameter b und T werden aus einer Stichprobe ermittelt. Diese Werte können nur abgeschätzt werden, da sie fehlerbehaftet sind /VDA 00/. Anschließend können beispielsweise die Ausfallrate, die Überlebens- und die Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet werden. Ausgehend von der Ausfallwahrscheinlichkeit, die einen s-förmigen Verlauf zeigt, ist es für die Darstellung im Wahrscheinlichkeitspapier notwendig, durch mehrfache Umformung die „Weibull-Gerade“ /WIL 04/ zu ermitteln.

Geradensteigung:	$m = b$
y-Achse:	$c = -b \ln T$
Abzissenskalierung:	$x = \ln t$
Ordinatenskalierung:	$y = \ln(-\ln(1-F(t)))$

Diese Form der Geradengleichung (s. 2.56) erhält man durch Umstellen und Logarithmieren, ausgehend von der Ausfallwahrscheinlichkeit (2.49) in 6 iterativen Schritten /VDA 00/:

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit:} \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}, \quad (2.49)$$

$$1. \quad 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}, \quad (2.50)$$

$$2. \quad \frac{1}{1 - F(t)} = e^{\left(\frac{t}{T}\right)^b}, \quad (2.51)$$

$$3. \quad \ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right) = \left(\frac{t}{T}\right)^b, \quad (2.52)$$

$$4. \quad \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right) = b \ln\left(\frac{t}{T}\right), \quad (2.53)$$

$$5. \quad \ln(-\ln(1 - F(t))) = b (\ln t - \ln T), \quad (2.54)$$

$$6. \quad \ln(-\ln(1 - F(t))) = b \ln t - b \ln T. \quad (2.55)$$

$$\text{Dies entspricht:} \quad y = m \cdot x + c. \quad (2.56)$$

Damit lässt sich die Weibull-Verteilung schematisch im doppellogarithmischen Lebensdauernetz als Ausgleichsgerade darstellen.

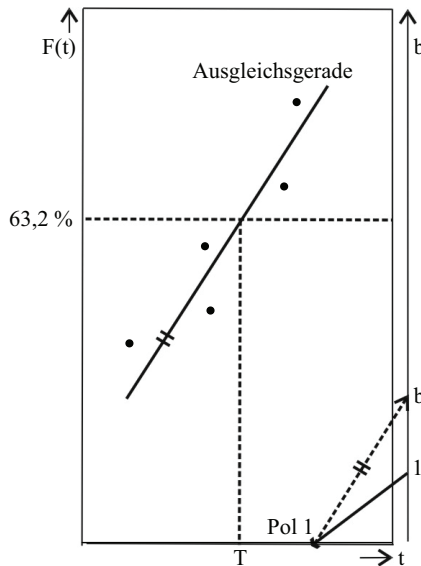


Abb. 2.28: Bestimmung der Parameter (b, T) im Weibullnetz nach /KLE 14a/

Die charakteristische Lebensdauer $F(T) = 63,2\%$ ist der Lageparameter der Weibull-Verteilung und kann somit als eine Art Mittelwert der Verteilung angesehen werden. Ausgehend von der Ausfallwahrscheinlichkeit von $63,2\%$ wird eine horizontale Linie bis zum Schnittpunkt der Ausgleichsgerade gezogen. Von dem Punkt aus wird eine vertikale Linie gezeichnet, bis die charakteristische Lebensdauer T abgelesen werden kann. Zum Ablesen des Formparameters b wird die Ausgleichsgerade parallel bis zum Pol 1 verschoben. Danach kann auf der b -Achse der Formparameter abgelesen werden /KLE 14a/. Anhand des bestimmten Formfaktors lässt sich die Art des Ausfalls charakterisieren.

Tab. 2.9: Charakterisierung des Formparameters b nach /NAU 11/

Bereich	Ausfallverhalten
$b < 1$	Frühhausfälle
$b = 1$	Zufallsausfälle
$b > 1$	Verschleiß- und Ermüdungsausfälle
$b > 5$	Brüche

Die Badewannenkurve stellt den Verlauf der verschiedenen Ausfälle anschaulich dar.

Neben diesen bestimmten Parametern b und T können auch Größen, wie B_q -Werte bestimmt werden. Die q -prozentuale Lebensdauer t_q kann zur Charakterisierung des Ausfallverhaltens eingesetzt werden. Diese Angabe steht für die Lebensdauer, bis zu der q -Prozent der Einheiten ausgefallen bzw. andererseits noch intakt sind /WIL 04/. Beispielsweise werden im Automobilbau B_{10} -, B_{10} -, bzw. B_{50} -Lebensdauerwerte als Maß zur Bestimmung der Zuverlässigkeit herangezogen /VDA 00/.

Mithilfe des Weibull-Netztes werden standardgemäß die folgenden Schätzwerte bestimmt /KLE 14a/:

1. 10 %-Lebensdauer t_{10}
2. 50 %-Lebensdauer t_{50}

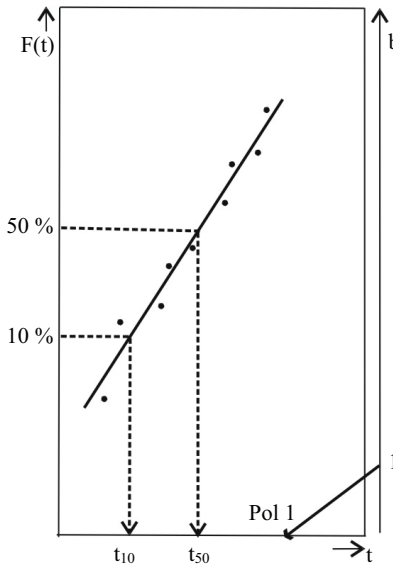


Abb. 2.29: Lebensdauerwerte bestimmen nach /KLE 14a/

Mit dem Lebensdauernetz lassen sich die t_q -Werte ablesen, indem man auf der y -Achse der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ die gegebenen prozentualen Werte aufrägt und horizontal bis zur Ausgleichsgeraden verbindet.

Anschließend wird senkrecht ein Lot bis zum Schnittpunkt der Lebensdauerachse t gezeichnet, um die t_q -Werte abzulesen.

In verschiedenen Regelwerken werden B_x -, N_x - oder L_x -Lebensdauerwerte definiert bzw. können diese in den unterschiedlichen Branchen gefordert werden. Im Maschinenbau benutzt man z. B. N_x - oder L_x -Lebensdauern mit $x = 10$, $x = 50$ und $x = 90$ % als Grenzwerte /VDA 00/; KLE 14a/.

In vielen Fällen ist die Weibull-Funktion nicht symmetrisch, d. h., es kann einen Unterschied zwischen der t_{50} -Lebensdauer und dem mathematischen Mittelwert als μ -

Lebensdauer bestehen. Sowohl diese Werte als auch die Standardabweichung können mit dem Weibull-Lebensdauernetz abgelesen werden /KLE 14a/.

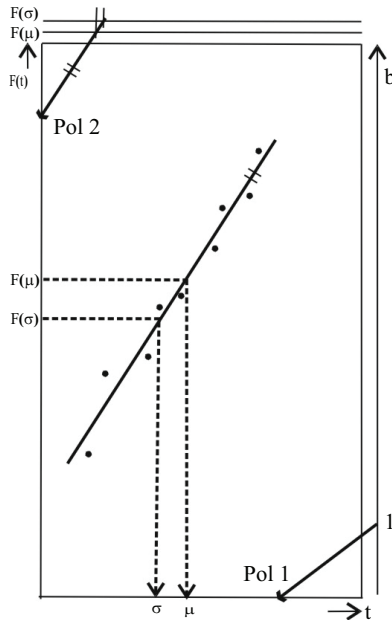


Abb. 2.30: Bestimmung des Erwartungswertes und Streuung der Lebensdauer nach /KLE 14a/

Die Ausgleichsgerade ist parallel in den Pol 2 zu verschieben. Anschließend können anhand der Randskalen die Größen $F(\mu)$ und $F(\sigma)$ abgelesen werden. Mit diesen Werten erhält man durch Loten des Schnittpunktes $F(\mu)$ bzw. $F(\sigma)$ mit der Ausgleichsgeraden den Schätzwert μ bzw. σ .

Die Standardabweichung der Weibull-Verteilung kann auch mit der Gammafunktion berechnet werden /WIL 04/.

$$\sigma = T \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \quad (2\text{-parametrig}) \quad (2.57)$$

$$\sigma = (T - t_0) \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \quad (3\text{-parametrig}) \quad (2.58)$$

Bei unterschiedlichen Stichproben kann sich die Lage der Weibullgeraden ändern. Je mehr Proben ausgewertet werden, desto weniger streuen die Wertepaare um die Ausgleichsgerade. Um eine statistische Abschätzung über den Bereich der Grundgesamtheit machen zu können, also über den Bezug der vorhandenen Stichprobe auf die Grundgesamtheit, wird ein sogenannter Vertrauensbereich eingeführt /WIL 04/. Die

Ausgleichsgerade mit den vorhandenen Vertrauensgrenzen und einer Aussagewahrscheinlichkeit von $P_a = 90\%$ ist in der Abb. 2.31 dargestellt. Die Wahrscheinlichkeit beträgt 10% , dass die Werte außerhalb des dargestellten Vertrauensbereiches liegen.

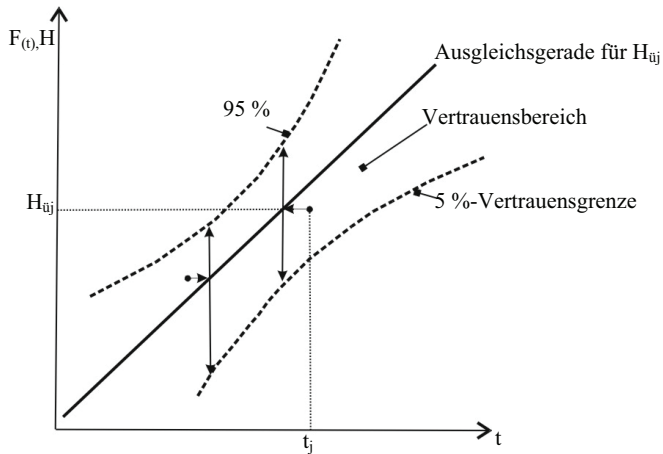


Abb. 2.31: Bestimmung des Vertrauensbereiches nach /KLE 14a/

Da der Vertrauensbereich oft symmetrisch zum Median liegt, besitzt der 90% -Vertrauensbereich eine 5% - sowie eine 95% -Vertrauensgrenze /STR 12/. Die obere- bzw. untere Vertrauensgrenze ergibt sich wie folgt /WIL 04/.

$$0,05 = \sum_{k=j}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} F(t)^k (1-F(t))^{n-k} \quad (2.59)$$

$$0,95 = \sum_{k=j}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} F(t)^k (1-F(t))^{n-k} \quad (2.60)$$

Die 5% - und 95% -Werte des Vertrauensbereiches sind stets von der Ausgangsgeraden abzuleiten und nicht von den t_j -Werten. Die Grenzwerte sind aus entsprechenden Grenzkurven-Tabellen zu entnehmen. Liegen über den gesamten Testbereich die Versuchswerte innerhalb der Grenzlinien, so ist der Schluss zulässig, dass auch die kleine Stichprobe weibullverteilt ist /KLE 14a/.

Sind mehr als 50 Stichprobenumfänge ausgewertet, wird der Vertrauensbereich immer enger und kann oftmals vernachlässigt werden /WIL 04/.

2.6 Materialermüdung und Schädigungsmechanismen

Die meisten Fahrzeugteile sind einer schwingenden Belastung ausgesetzt und beeinflussen damit die Lebensdauer und somit auch die Zuverlässigkeit des Autos. Die dabei wirkenden Spannungen auf die Komponenten oder Baugruppen ändern sich zeitlich. In der Praxis

ändern sich die Spannungen nur selten gleichmäßig, sodass daraus eine instationäre stochastische Schwingbeanspruchung resultiert, z. B. bei Fahrzeugachsen. Diejenigen Teile, die schwingend belastet werden, können unter Betriebsspannungen zu Bruch gehen, die weit unter der im Zugversuch ermittelten Festigkeit liegen. Die Ursache für die niedrige Festigkeit ist eine durch die zyklische Belastung resultierende Werkstoffschädigung, die mit Rissbildung und Bruch enden kann. Dieser Vorgang wird als Ermüdung bezeichnet, die stets auf sehr kleinen plastischen Verformungen beruht. Die Versetzungen werden durch die zyklische Beanspruchung wechselnd bewegt. Die Wechselwirkung der Versetzungen untereinander bzw. mit anderen Hindernissen, wie Korngrenzen oder Teilchen, führt zur dauerhaften Schädigung des Materials /SEI 14/.

2.6.1 Werkstoffkennwerte

Die Bauteile, die nur mit geringen Lastwechseln belastet werden, können quasi-statisch ausgelegt werden. Hierfür ist der Zugversuch /s. DIN EN 10002/ das wichtigste mechanische Prüfverfahren. In einem Zugversuch werden Festigkeits- und Verformungskennwerte auf Universalprüfmaschinen ermittelt. Die gewonnenen Kennwerte können zur Auslegung gegen Fließen oder Bruch, zum Vergleich verschiedener oder zur Erstellung eines Smith-Diagramms herangezogen werden.

Beim Zugversuch wird entweder ein zylindrischer Probestab oder eine Flachzugprobe in eine Prüfmaschine eingespannt und mit konstanter Dehnungsgeschwindigkeit in axialer Richtung bis zum Bruch belastet. Um die Werkstoffkennwerte zu ermitteln, werden während des Versuches die Zugkräfte in Längsrichtung und die Verlängerung der Probe gemessen /SEI 14/. Die Ergebnisse können grafisch in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt werden, beispielsweise für einen weichen Stahl und einer hochfesten Al-Legierung.

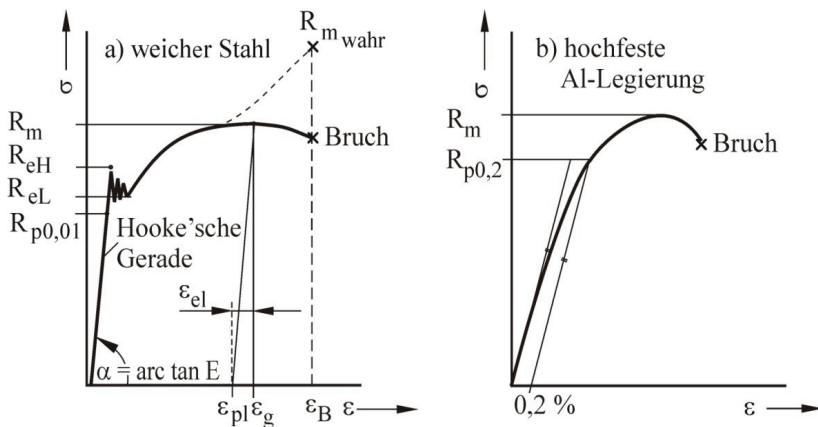


Abb. 2.32: Spannungs-Dehnungs-Diagramme vom weichen Stahl und von einer Al-Legierung nach /KLE 13/

Bis zur Proportionalitätsgrenze R_p liegt das bekannte Hooke'sche Gesetz vor, somit ein linearer Zusammenhang zwischen der Spannung und der elastischen Dehnung.

Die Steigung der Hooke'schen Geraden wird als Elastizitätsmodul bezeichnet /KLE 13/.

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = \tan \alpha = E \quad (2.61)$$

Ab den Streckgrenzen R_{eL} bzw. R_{eH} beginnt ein Werkstoff, überproportional zu fließen. Liegt ein nichtlineares Werkstoffverhalten vor, muss für die technische Elastizitätsgrenze $R_{p0,01}$ für 0,01 % eine Referenzdehnung definiert werden.

Ferner ist die Zugfestigkeit R_m wichtig für die maximale Aufnahme der Spannung, bezogen auf den Ausgangsquerschnitt der Probe A_0 . Genauso wichtig ist die wahre ausnutzbare Spannung $R_{m \text{ wahr}}$, bis zu der ein Bauteil örtlich beansprucht werden kann, die mit

$$\sigma_{\text{wahr}}(\varepsilon) = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.62)$$

und

$$\varepsilon_{\text{wahr}} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.63)$$

umgerechnet werden kann /KLE 13/.

In der Umformtechnik führen die gewollten Verformungen zu sehr großen Querschnittsänderungen, sodass die wahren Spannungen größer als die technischen Spannungen sind, da der Probenquerschnitt im Zugversuch stetig abnimmt.

Bei der Betrachtung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms wird deutlich, dass die aus der elastischen Verformung resultierende Querschnittsänderung bis zum Erreichen der Streckgrenze R_e vernachlässigbar klein ist. Daher reicht das technische Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die konstruktive Auslegung von Bauteilen meistens aus, da hier die Streckgrenze R_e bzw. $R_{p0,2}$ benötigt wird /SEI 14/.

Das im vorliegenden Fahrzeugprojekt zu beachtende Problem besteht darin, dass sich wiederholende Beanspruchungen auftreten, hervorgerufen von möglichen unterschiedlichen Bodenunebenheiten. Die daraus wirkenden Spannungen ändern sich zeitlich. Die durch Schwingungen belasteten Bauteile können bereits weit unter der im Zugversuch ermittelten Festigkeit liegen und folglich zum Bruch bzw. zum Fahrzeugausfall führen. Die Ursache für die niedrige Festigkeit ist eine durch die zyklische Belastung entstandene Werkstoffschädigung, die mit einer wachsenden Rissbildung zu einem Bruch führen kann. Etwa 90 % aller Schäden an Maschinen und Fahrzeugen werden durch Dauerbrüche verursacht, wobei die Bruchbilder meistens zweigeteilt aussehen – zwischen Ermüdungsbruch und Gewaltbruch /SEI 14/. Mehr als ein Drittel aller bekannten Werkstoffschäden gehen auf Kosten der Materialermüdung /LÄP 11/.

Aus diesen Untersuchungsmöglichkeiten ist die Lebensdauer zum einen durch Überschreitung der Zugfestigkeit bei monotoner Belastung und zum anderen vom dauerhaft ertragbaren Fall mit über 10 Millionen Schwingspielen begrenzt. Der gesamte Verlauf kann mittels Grenzlinien (Zeitfestigkeits- und Dauerfestigkeitsast) dargestellt werden.

Zur Darstellung schwingend beanspruchter Bauteile und ihrer linearen Schädigung ist das Wöhler-Diagramm im Ingenieurwesen die wichtigste Darstellungsart zur Lebensdauerabschätzung /KAU 05/, wenn die Betriebslasten bekannt sind.

2.6.2 Betriebslasten und Zählverfahren

Die Betriebslasten umfassen den Gebrauch des Fahrzeuges. Die charakteristischen Betriebszustände des Fahrzeuges werden in der Regel in Stadt-, Land-, und Autobahnfahrt eingeteilt. Weiterhin werden Schlechtwegstrecken und Bergfahrten, die für diese Fahrzeugentwicklung wichtig sind, berücksichtigt. Die Betriebslasten können in Feldversuchen ermittelt werden bzw. sollte bei einer Neuentwicklung zumindest eine simulative Abschätzung der Lasten mittels einer Mehrkörpersimulation (MKS) /MAC 09/ auf einer idealen Fahrbahn erfolgen.

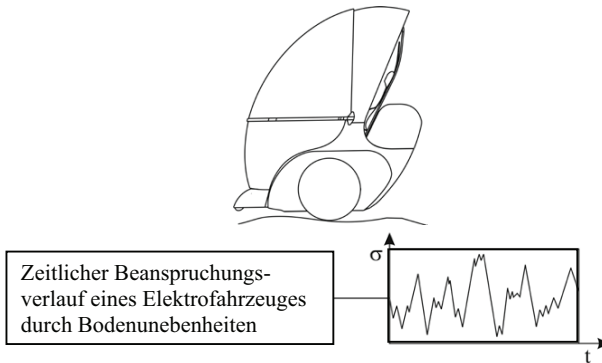


Abb. 2.33: Ermittlung der dynamischen Betriebslasten im Feldversuch eines Elektrofahrzeuges

Dynamische Effekte, die sich möglicherweise durch die Fahrbahnanregung ergeben, können mittels Dynamik-Faktoren berücksichtigt werden. Der Faktor richtet sich je nach Manöver, Fahrzeugparametern und Charakteristik der Fahrbahnanregung und kann die dynamische Lastüberhöhung in der Größenordnung von Faktor 3 über der Last bei stationären Fahrmanövern erfassen /ZEN 12/.

Um die lineare Schädigung für die Lebensdauerabschätzung berechnen zu können, muss aus dem Beanspruchungsverlauf zunächst ein Treppen- bzw. Amplitudenkollektiv mittels geeignetem Zählverfahren klassifiziert und erstellt werden. Die Bereichspaarzählung (BPZ) oder die Rainflow-Zählung (RFZ) wird häufig für diese Art der Lasterfassung verwendet /ZEN 12/.

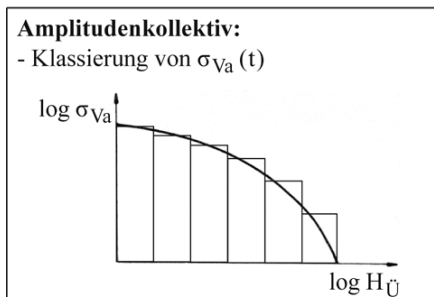


Abb. 2.34: Getreptes Amplitudenkollektiv aus den Betriebslasten gebildet zur Lebensdauerabschätzung

2.6.3 Schädigungshypothesen zur Lebensdauerabschätzung im Fahrzeugbau

Die versuchstechnische Ermittlung von Lebensdauerlinien ist relativ aufwendig, da die Schwingspielzahlen auf allen Beanspruchungsstufen erfasst werden müssen. Außerdem sind für komplexere Beanspruchungsfolgen servohydraulische Prüfmaschinen einzusetzen /HAI 06/. Für die Durchführung einer Lebensdauerberechnung ist das Amplitudenkollektiv (s. Abb. 2.34) zweckmäßig, das durch die klassifizierte Treppenkurve ersetzt wird /BRU 09/.

Die Abschätzung erfolgt in der Regel über Schädigungshypothesen. Nach der Schadensakkumulationshypothese wird jedem Schwingspiel eine Teilschädigung zugeordnet, deren zur Gesamtschädigung aufsummierter Betrag bei Erreichen eines definierten Wertes auf ein mögliches Versagen hinweist.

Je nach Zusammenhang zwischen der Schädigung und dem Schwingspielzahlverhältnis wird zwischen den Hypothesen der linearen und nichtlinearen Schadenakkumulation unterschieden. Die nichtlineare Schädigung ist der Regelfall bei technischen Werkstoffen und Bauteilen, dies wird in /SIE 06/; /HAI 06/ ausführlich erläutert. Die Hypothese der linearen Akkumulation nach Palmgren /PAL 24/, Langer /LAN 37/ und Miner /MIN 45/ hat in verschiedenster Form große praktische Bedeutung erlangt /HAI 06/, sie wird auch als Miner-Regel bezeichnet /HEN 13/, obwohl sie zu ungenauen und unsicheren Ergebnissen führen kann und in der originalen Form auf Fälle mit wenig veränderlicher Mittelspannung sowie Beanspruchungsamplituden oberhalb der Dauerfestigkeit zu beschränken ist /HAI 06/; /DAN 11/; /BRU 09/.

Nach dem Verfahren nach Palmgren-Miner werden in einem gemeinsamen Diagramm (s. Abb. 2.35) die Belastung und die Belastbarkeit /KLE 14c/ zusammengeführt bzw. wird die Last an der Belastbarkeitsgrenze bewertet.

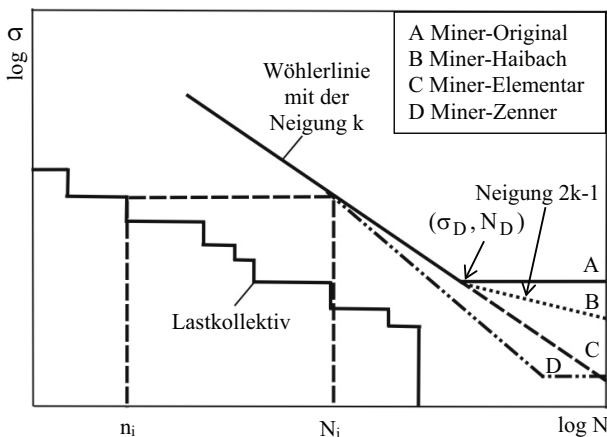


Abb. 2.35: Wöhler-Diagramm mit Varianten der linearen Schadensakkumulationsrechnung nach /KLE 14c/

Mit dem Verfahren der linearen Akkumulation kann eine „Rest-Lebensdauer“ für eine bekannte zu erwartende Belastung berechnet werden. Durch die Einführung eines Schädigungsparameters D (Damage) kann der Schädigungszustand beschrieben werden.

$$D = \frac{n_i}{N_i} \quad (2.64)$$

Der Zustand $D = 0$ charakterisiert ein Material ohne Schädigung, wobei $D = 1$ die vollständige Zerstörung durch einen Bruch theoretisch annimmt /HAI 06/. Der Parameter N_i beschreibt die erwartete Lastspielzahl im Betrieb bei Laststufe i , und der n_i -Wert die Bruchlastspielzahl bei σ_i hinsichtlich der Wöhler-Linie. Die Anwendung erfordert eine konstante Mittellast und ein konstantes Lastverhältnis. Zu dieser Lebensdauerabschätzung existieren verschiedene Auswertungen für die Palmgren-Miner-Regel bzw. die Miner-Regel /SIE 06/.

In das Miner-Original werden nur diejenigen Laststufen als schädigend angenommen, die sich oberhalb der Dauerfestigkeitsgrenze befinden. Die ertragbare Lastzyklenzahl zur Original Miner-Regel /HAI 06/ ergibt

$$N_{MO} = \frac{\left(\sum_{i=1}^j n_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^{k-1} \frac{n_i}{N_i} \right)} \quad (2.65)$$

Die Geradengleichung der Wöhler-Linie im Bereich der Zeitfestigkeit ist ebenfalls mittels der werkstoffabhängigen Wöhler-Exponente k zu berücksichtigen.

$$N_i = N_D \left(\frac{\sigma_D}{\sigma_i} \right)^k \quad (2.66)$$

Durch Einsetzen der Formel (2.66) in Formel (2.65) kann die Miner-Original-Regel /HEI 04/ in Abhängigkeit von den Spannungen bestimmt werden.

$$N_{MO} = \frac{\left(N_D \sigma_D^k \sum_{i=1}^j n_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^{k-1} n_i \sigma_i^k \right)} \quad (2.67)$$

Die Vernachlässigung aller Kollektivanteile unterhalb der Dauerfestigkeit kann eine Überschätzung der Lebensdauer bewirken. Die Dauerfestigkeitsgrenze wird hierbei nach $D = 0$ ermittelt, was aber nicht auf vorgeschädigtes Material nach n -Lastzyklen anwendbar ist. Eine fortschreitende Schädigung unterhalb der Dauerfestigkeit wird in diesem Ansatz nicht erfasst /HEI 04/.

Tieferegehende Versuche mit Spannungsamplituden unterhalb der Dauerfestigkeit von Gassner zeigen, dass diese ebenfalls Auswirkungen auf die Lebensdauer haben können. Um diese Auswirkungen approximativ zu berücksichtigen, wurden unterschiedliche Modifikationen an der Miner-Regel vorgenommen. Die bekanntesten Modifikationen sind die nach Corten-Dolan (Miner-Elementar) und Haibach (Miner-Modifiziert). Bei den beiden Verfahren wird die Zeitfestigkeitsgerade im Wöhler-Diagramm verlängert. Nach Miner-Elementar erfolgt die Verlängerung geradlinig, nach Haibach wird die Wöhlerlinie

mit einer abgeminderten Neigung, $2k-1$, fortgeführt. Die Vorgehensweise zur Berechnung der Schädigung im Langzeitfestigkeitsbereich erfolgt analog dem Zeitfestigkeitsbereich mit der Wöhler-Linie /DEG 09/. Beide Miner-Regeln werden nach /HOL 10/ hinsichtlich der elementaren Form zu

$$N_{EMR} = \frac{\left(\sum_{i=1}^j n_i \right)}{\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_D} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^k}, \quad (2.68)$$

und bezüglich der Haibach-Form zu

$$N_H = \frac{\left(\sum_{i=1}^j n_i \right)}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_D} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^k + \sum_{i=m+1}^j \frac{n_i}{N_D} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_D} \right)^{2k-1}}. \quad (2.69)$$

Der Laufindex m bezieht sich in diesem Fall auf die Lastkollektive unter σ_D . Diese Form der Miner-Regel nach Haibach stellt einen Kompromiss zwischen der originalen und der elementaren Miner-Regel dar /HEI 04/.

Bei der Zenner-Modifikation wird eine Drehung der Zeitfestigkeitsgeraden in Höhe des Kollektivwertes vorgenommen. Diese steilere Neigung wird als Mittelwert zwischen der Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden und der Rissfortschritts-Wöhler-Linie m angenommen. Die Neigung der Rissfortschritts-Wöhler-Linie stellt die steilste mögliche Wöhler-Linie dar. Die Dauerfestigkeit wird weiterhin auf 50 % abgesenkt /ZEN 12/, weil die Schädigungen darunter klein sind.

In der Praxis erweist sich die rechnerische Lebensdauerabschätzung als relativ unsicher. Der Grund ist unter anderem die starke Streuung der Schädigungssumme D beim Versagen. Eine Verbesserung der Qualität bezüglich der Vorhersage kann in der Regel durch begleitende Versuche erfolgen.

Bei der Auslegung von Bauteilen im Fahrzeug- und Flugzeugbau wird daher oftmals die Relativ-Palmgren-Miner-Regel verwendet /LEC 94/; /NAU 07/.

$$D_{tat} = \frac{N_{exper}}{N_{theor}} = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i}}{\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i}} \quad (2.70)$$

Wurde z. B. unter Berücksichtigung von Referenzversuchen eine Schädigungssumme von 1,3 erzielt, so erfolgt die Neuauslegung unter diesem gleichen Schädigungswert /DEG 09/.

3 Entwicklung eines Elektrofahrzeuges

Auf Grundlage der entwickelten Idee für ein neues Elektrofahrzeug sollen zusätzlich die wesentlichen Stufen des Entwicklungsprozesses dargestellt werden, wobei frühzeitig der Fokus auf die Sicherstellung der Funktionalität, Zuverlässigkeit und Lebensdauer gerichtet ist.

3.1 Ideenfindung und Entwurf

Ausgehend von der Idee, den hügeligen Kasseler Bergpark befahrbar zu machen, ist ein einachsiges zweirädriges Fahrzeugkonzept für zwei Personen geplant. Mittels elektrisch angetriebener Räder soll das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit zwischen 6 km/h und 20 km/h fortbewegt werden. Für die notwendige Schwerpunktverlagerung ist eine spezifische Verstellkinematik vorgesehen, sodass die Nutzer ohne jegliche Verlagerung des Körpers fahren können. Damit können ein geringer Platzbedarf bei sehr hoher Wendig- und Steigungsfähigkeit realisiert und die Voraussetzungen für teilautonomes Fahren geschaffen werden.

Der begrenzte Nutzungsbereich und die niedrigen Geschwindigkeiten erlauben kleine Batteriekapazitäten, einfache Wechselkonzepte und aufgrund des geringen Fahrzeuggewichtes eine hohe Energieeffizienz. Insofern können die inhärenten Vorteile des elektrischen Antriebes genutzt werden, ohne dass seine Nachteile, z. B. begrenzte Reichweite, zum Tragen kommen /BRA 10/.

Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Schwerpunktverlagerung, z. B. während der Beschleunigung oder beim Bremsen, werden in der folgenden Darstellung kurz erläutert.

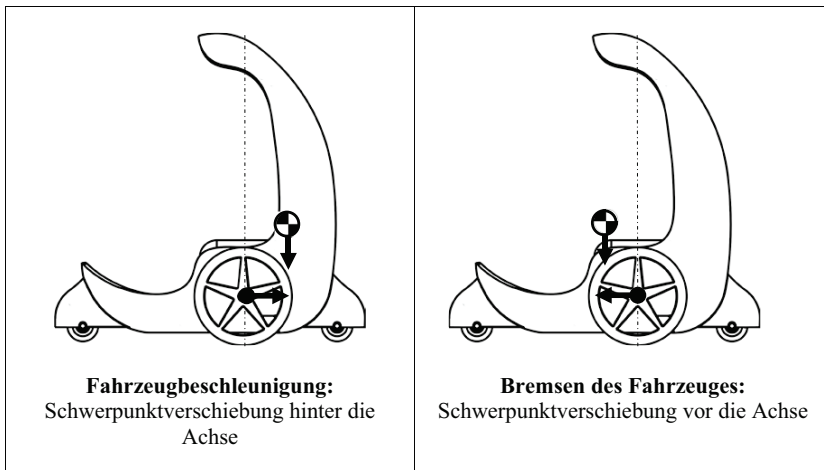


Abb. 3.1: Bremsen und Beschleunigung des Fahrzeuges nach /BRA 10/

Nach der Beschleunigung des einachsigen Fahrzeuges fährt es mit konstanter Geschwindigkeit. Dabei ist es wichtig, dass der Schwerpunkt über der Fahrzeugachse liegt.

Beide Antriebsräder fahren jeweils mit dergleichen Drehzahl.

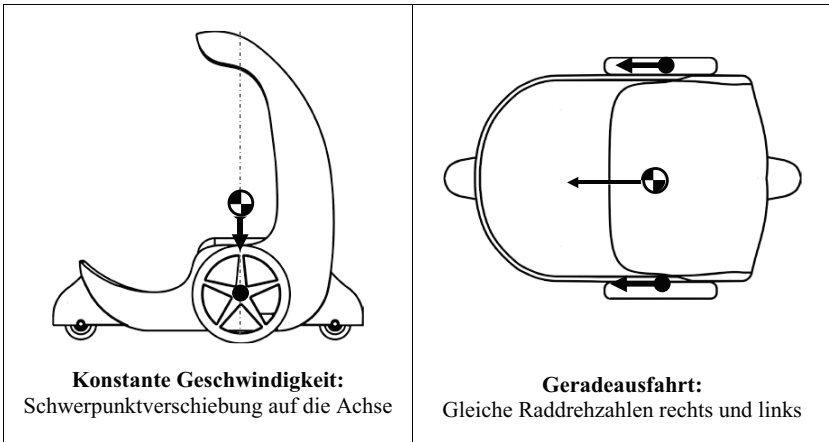


Abb. 3.2: Konstante Fahrzeuggeschwindigkeit des Fahrzeuges nach /BRA 10/

Das Kurvenfahren bzw. Wenden des Gesamtfahrzeuges soll ausschließlich über die unterschiedliche Drehzahl-Regulierung der beiden Antriebsräder erfolgen.

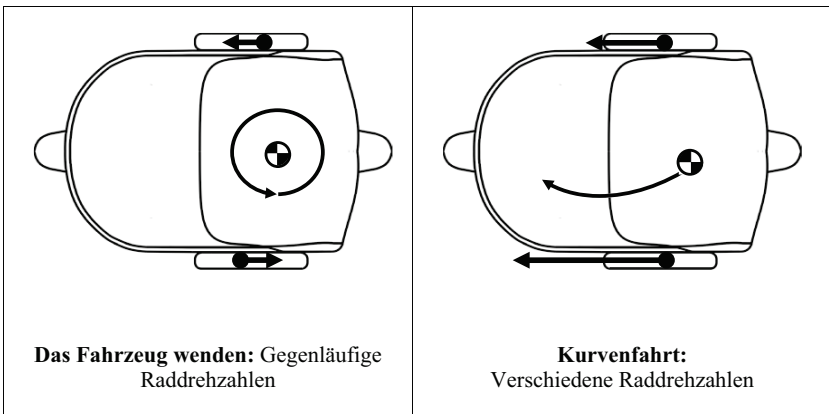


Abb. 3.3: Drehen des Fahrzeuges durch unterschiedliche Raddrehzahlen nach /BRA 10/

Auf der Grundlage dieses Konzeptes wird nachfolgend ein CAD-Fahrzeugmodell konstruiert, wobei innovative mechanische Lösungen notwendig sind, um den Kinematik-Ablauf des Fahrzeuges umzusetzen.

3.2 Fahrzeugpackage

Die Realisierung eines neuen E-Fahrzeuges stellt eine komplexe Aufgabenstellung dar, die interdisziplinäres Fachwissen erfordert, um die in Abb. 3.4 aufgeführten Teilaufgaben lösen zu können.

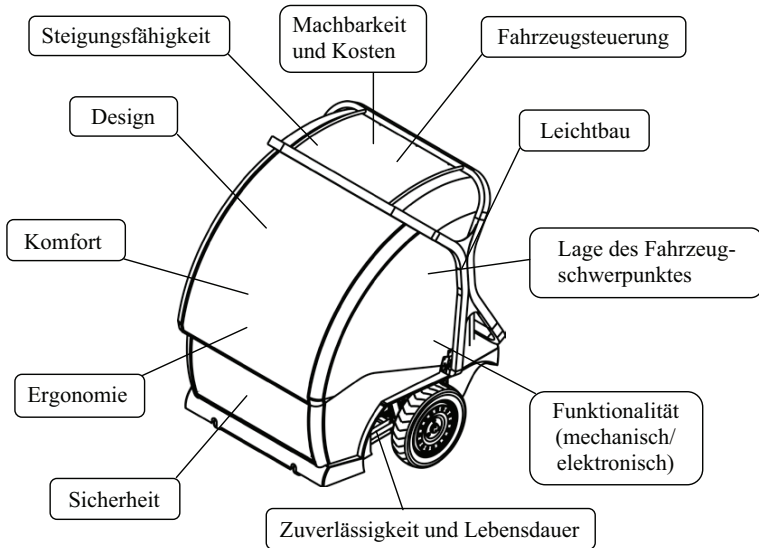


Abb. 3.4: Wichtige Entwicklungsziele für das Elektrofahrzeug

In der Stufe der Planung gilt es zunächst, ein grobes Fahrzeugkonzept zu entwerfen, von dem im Weiteren erste Lösungsansätze abgeleitet werden können.

Dazu werden vorerst neue Potenziale im Vergleich zum Stand der Technik analysiert, um Entwicklungsziele priorisieren zu können.

- **Elektronik:** Die elektronischen Bauteile sollen größtenteils Zukaufteile sein, diese weisen in ihrer Zusammenstellung bzw. ihrem Zusammenspiel einen großen Neuigkeitsgrad auf, z. B. hinsichtlich des Ausbalancierens zur mechanischen Stabilisierung des Fahrzeugs.
Durch kompaktere und geometrisch vielfältigere Bauformen des Batteriepacks können neue Fahrzeugkonzepte entwickelt werden /KAM 13/.
- **Mechanik:** Die Subsysteme für Antrieb, Schwerpunktverlagerung und Struktur stellen eine komplexe Kombination aus Zukaufteilen und konstruktiven Neuentwicklungen dar, die hinsichtlich ihrer Funktionalität und Zuverlässigkeit ein breites Untersuchungspotenzial zum Gesamtfahrzeug bieten. Die mechanische Schwerpunktverschiebung unterscheidet sich vom Stand der Technik hauptsächlich dadurch, dass ein neues mechanisches Fahrwerk integriert werden kann, das der Erhöhung des Fahrkomforts bzw. der Fahrsicherheit dient.

- Eine Besonderheit des Fahrzeugkonzeptes besteht darin, dass beide Antriebsräder nicht nur symmetrisch, sondern auch unterschiedlich zueinander positioniert werden können für eine mögliche Winkelverstellung der Fahrzeugachse.

Hinsichtlich der mechanischen Stabilität des Fahrzeuges ist auch der Einfluss eines Böschungswinkels von etwa 20 % zu berücksichtigen.

- Türsystem: Ein behindertengerechter vorderer und seitlicher Einstieg ist ebenso vorgesehen wie offenes Fahren, was eine Segmentierung der Struktur erfordert.
- Leichtbauahmen/Chassis: Als Struktur soll eine Space-Frame-Lösung aus Aluminium-Standardprofilen entwickelt werden, wobei auf das Produktprogramm eines Projektpartners Rücksicht zu nehmen ist.
Der Rahmen muss hinsichtlich der mechanischen und elektronischen Bauteile sowie der Steigungsanforderungen neu ausgelegt werden. Ein Türmechanismus und ein Lösungsansatz für den Überrollschutz sind ebenfalls zu berücksichtigen.
- Außenhaut: Um ein gefälliges Design zu gestalten, soll die Verkleidung aus großflächigen Kunststoffteilen aufgebaut werden. Ein Projektpartner stellt hierfür das „Twin-Sheet-Verfahren“ zur Verfügung. Damit ist es möglich, die komplexe Fahrzeuggeometrie unter Berücksichtigung der Leichtbauweisen zu realisieren.

Aus diesen Rahmenbedingungen sind Stufen eines Entwicklungsprozesses abzuleiten, um das Fahrzeug zunächst als CAD-Modell aufbauen zu können. Ziel ist es, neue Lösungsansätze für das einachsige Fahrzeug zu erarbeiten, um diese als Simultaneous Engineering-Projekt umsetzen zu können. Nachfolgend wird die Vorgehensweise des Entwicklungsprozesses dargestellt.

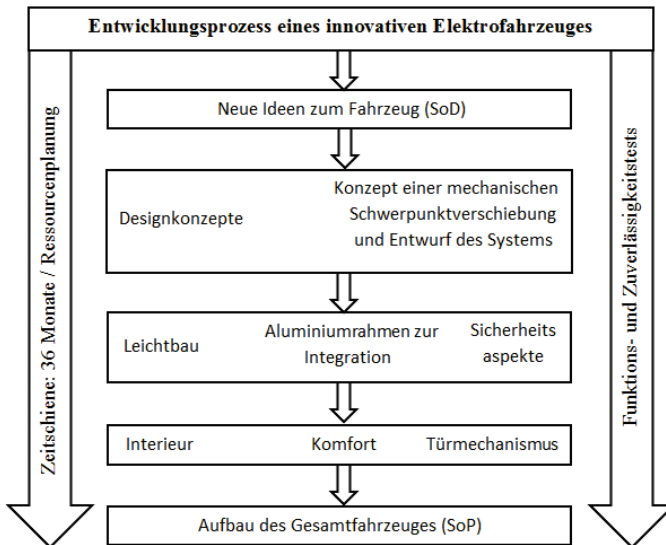


Abb. 3.5: Stufen eines Entwicklungsprozesses für ein innovatives Elektrofahrzeug

Zu Beginn sind die Umsetzungsmöglichkeiten zu erarbeiten und zu dokumentieren /BRA 10/. Mit diesen Informationen sollen zunächst die beiden folgenden Themengebiete „Design“ und „Mechanik“ für das Gesamtfahrzeug erarbeitet werden.

3.3 Design und Mechanik

Wie bei vielen Fahrzeugentwicklungen hat sich das Design an den Geltungs- und Gebrauchsabsichten zu orientieren. Aus der ursprünglichen skizzierten Idee /BRA 10/ sind weitere Fahrzeugdesigns in /FUC 12a/ und /BOJ 13/ entworfen worden. Dabei wurden unterschiedliche Designrichtungen hinsichtlich der Anforderungen des Fahrzeuges und der Umgebung untersucht und mithilfe einer Matrix bewertet. Aus diesen Erkenntnissen resultiert die Entwicklung des nachfolgenden Designkonzepts.

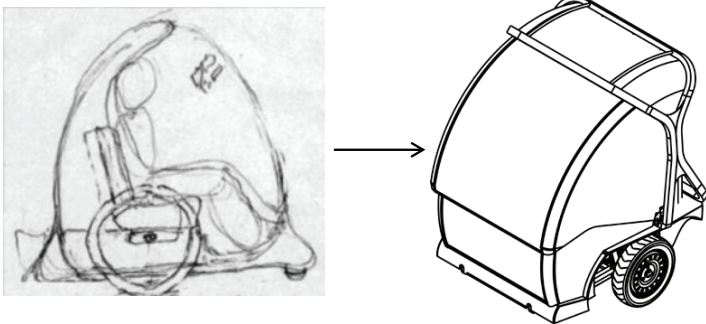


Abb. 3.6: Designentwicklung, ausgehend von der linken Skizze nach /BRA 10/ zum finalen Design nach /FUC 12a/; /BOJ 13/

Eine große funktionale und damit auch gestalterische Bedeutung kommt dem Türkonzept zu, da dieses mehrere Funktionen zu erfüllen hat. Hauptforderung ist es, das seitliche und vordere Einsteigen sowie Cabriofahren zu ermöglichen.



Abb. 3.7: Öffnungsmöglichkeiten der zweigeteilten Scheibe für den Ein- und Ausstieg nach /FUC 12a/

Das zu realisierende Design muss eine Steigungsfähigkeit von 10-11° zulassen, ohne dass ein Bodenkontakt erfolgt.

Eine weitere Randbedingung ist die Realisierung der translatorischen Schwerpunktverschiebung (s. Abb. 3.1). Der mechanische Aufbau der Schwerpunktverschiebung kann durch verschiedene Linearbewegungen erfolgen, und zwar durch:

- Spindeltriebe bzw. Linearmotoren,
- Pneumatikantriebe,
- Hydraulikantriebe,
- Zahnstangenantriebe,
- Zahnriemenantriebe,
- Scotch Yoke Antriebe.

Die konstruktive Lösung sollte dafür möglichst kompakt sein, um den Bauraum für ein einachsiges Fahrzeug möglichst klein zu halten. Die Anzahl der elektronischen Energieversorger ist ebenfalls möglichst gering zu halten, um die Ausfallwahrscheinlichkeit zumindest qualitativ zu reduzieren. Je mehr Energieversorger bzw. Bauteile ohne Redundanzen beispielsweise für den Linearantrieb benötigt werden, desto früher kann ein elektronischer oder mechanischer Ausfall auftreten.

Die gewählte Antriebsart ist außerdem so auszuwählen, dass die resultierende Last zuverlässig verschoben werden kann. Ein ausgewählter Spindeltrieb für das Fahrzeug überzeugt in der Konzeptphase mit geeigneten Beschleunigungs- und Belastungskennwerten. Außerdem ist er relativ geräuscharm und durch Kunststoffbälge weitestgehend unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen, da sie den Spindeltrieb vollständig umhüllen und isolieren.

Ein weiteres elektromechanisches Bauteil in Form einer Federkraftbremse ist zusätzlich notwendig, um den Spindeltrieb vor unberechenbaren Verstellwegen zu schützen /RIE 11/.

Weiterhin werden keine weiteren mechanischen Anbauten am Fahrzeug benötigt, wodurch sowohl das Gewicht als auch die Ausfallwahrscheinlichkeit reduziert werden können.

Die Abschätzung der Spindelspezifizierung für das Fahrzeug und der Lebensdauer erfolgt in den folgenden 5 Schritten.

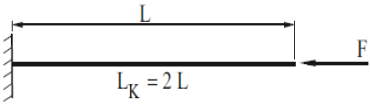
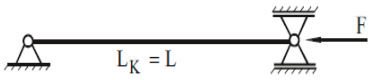
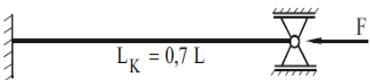
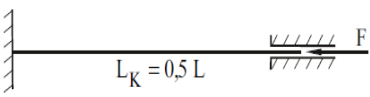
1. Abschätzung der maximalen Vorschubgeschwindigkeit v_t für die Stabilisierung und die Drehzahl n
2. Anschließend ist eine geeignete Steigung zu bestimmen.

$$p = \frac{v_t}{n} \tag{3.1}$$

3. Die Spindel wird in axialer Verfahrrichtung durch Druckspannung auf Knickung beansprucht. Diese ist nach Euler nachzurechnen /NEU 12/.

Zu bestimmen ist die allgemeine kritische axiale Kraft F_{krit} unter Berücksichtigung der Knickung, der Lagerung bzw. der Einbauart. Dazu kann der Euler-Fall auf der nächsten Seite tabellarisch herangezogen werden.

Tab. 3.1: EULER Knickfälle nach /KLE 15/

Euler-Fall	mech. System	kritische Last
1		$F_{\text{krit}} = \frac{\pi^2 E \cdot J_{y,z}}{4 L^2}$
2		$F_{\text{krit}} = \pi^2 \frac{E \cdot J_{y,z}}{L^2}$
3		$F_{\text{krit}} = 2,046\pi^2 \frac{E \cdot J_{y,z}}{L^2}$
4		$F_{\text{krit}} = 4\pi^2 \frac{E \cdot J_{y,z}}{L^2}$

Dem Spindeleinbau in ein Fahrzeug mit einer Fest- bzw. Loslagerung entspricht dem Euler-Fall 2.

$$F_{\text{krit}} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot J}{L_k} \quad (3.2)$$

4. Um die notwendige Stabilität gewährleisten zu können, sollte die maximal resultierende Axialkraft F_a vom Fahrzeug kleiner sein als F_{krit} .

$$F_a < F_{\text{krit}} \quad (3.3)$$

5. Zur Abschätzung der Lebensdauer ist weiterhin die mittlere Spindeldrehzahl gemäß den Herstellerangaben zu berechnen.

$$n_m = \frac{t_1}{100} \cdot n_1 + \dots + \frac{t_x}{100} \cdot n_x \quad (1/\text{min}) \quad (3.4)$$

Die mittlere Belastung auf dem Spindeltrieb ist beispielsweise vom Hersteller wie folgt definiert:

$$F_m = \sqrt[3]{F_1^3 \cdot \frac{n_1}{n_m} \cdot \frac{t_1}{100} + \dots + F_x^3 \cdot \frac{n_x}{n_m} \cdot \frac{t_x}{100}} \quad (N). \quad (3.5)$$

Die nominelle Lebensdauer in Stunden L_h errechnet sich gemäß dem Hersteller mit der mittleren Belastung auf den Spindelantrieb, der dynamischen Tragzahl und der mittleren Spindeldrehzahl.

$$L_h = \frac{\left[\frac{C}{F_m} \right]^3 \cdot 10^6}{n_m \cdot 60} \quad (\text{h}) \quad (3.6)$$

Um die Dynamik der Bewegung zu berücksichtigen, beispielsweise bei Bewegungen mit Stößen und Schwingungen, die auf einer Schlechtwegstrecke sehr wahrscheinlich auftreten, kann zur Berechnung der nominellen Lebensdauer der Belastungsfaktor f_B nach /NEU 12/ hinzugezogen werden.

$$L = \left[\frac{C}{f_B \cdot F_a} \right] \cdot 10^6 \quad \text{Umdrehungen} \quad (3.7)$$

Mithilfe dieses Ansatzes lässt sich die Lebensdauer für das neuartige mechanische Verstellsystem für das Fahrzeug abschätzen.

3.4 Rahmenkonstruktion und Außenhaut

Auf Grundlage des erarbeiteten CAD-Designs /FUC 12a/, erfolgt die konstruktive Bereitstellung des Leichtbaurahmens aus Aluminium unter Berücksichtigung der praktischen Machbarkeit in /RIE 13;/ /BOJ 13/.

Die Fahrzeugintegration und Auslegung des mechanischen Verstellsystems sowie erste praktische Funktionsprüfungen werden an einem Prüfaufbau ohne begleitende Versuchsplanung in /MÜL 13b;/ /BAD 13/ durchgeführt.

Begleitend wurden am Fahrzeugrahmen lineare Festigkeitsberechnungen unter definierten Randbedingungen und unter Einfluss einer veränderlichen Massenverteilung durchgeführt. Dies ermöglicht, das Leichtbaupotenzial zu bewerten und optimal auszuschöpfen /BEN 12;/ /SUH 14/.

Die simulative Abschätzung der Ergebnisse auf Basis der ermittelten Werkstoffkenndaten zeigt, dass der Rahmen für moderate Testfahrten zuverlässig ausgelegt ist /SUH 14/, solange die Bedingungen bezüglich des Gesamtfahrzeuges nicht verändert werden.

Im nächsten Schritt ist es wichtig, die Belastungen während der Testfahrten neu aufzunehmen und mit den FEM-Eingangsdaten zu vergleichen und ggfs. anzupassen. Dazu ist das Applizieren von Dehnungsmessstreifen an den kritischen Stellen des Fahrzeugrahmens ratsam, um die Spannungen zu ermitteln. In /SUH 14/ sind auf Grundlage der FEM-Ergebnisse und der visuellen Begutachtung des Fahrzeugrahmens lokale Positionen für das Applizieren der Dehnungsmessstreifen ermittelt worden.

Danach erfolgten die Fertigung und Bereitstellung des Fahrzeugrahmens mit dem Türmechanismus /GUN 13/ durch den industriellen Projektpartner auf Basis der CAD-Daten.



Abb. 3.8: Rahmenbereitstellung nach dem entwickelten CAD-Modell

Das Design der Außenhaut ist in mehreren iterativen Schritten /BOJ 13/ bezüglich der praktischen Machbarkeit modifiziert und evaluiert worden. Die Schnittstellen zwischen dem Rahmen und der Außenhaut sind gemäß dem praktischen Aufbau stets konform zu halten, insbesondere bei konstruktiven Änderungen.



Abb. 3.9: Darstellung der blauen Außenhaut am Fahrzeugrahmen

Der Packageprozess kann nun an diesem Fahrzeug mit den mechanischen- und elektronischen Bauteilen erfolgen.

3.5 Fahrwerksentwicklung

Um den abgesteckten Zeitrahmen einhalten zu können, wurde immer möglichst simultan entwickelt. So konnte das Fahrwerk parallel zum Fahrzeugaufbau konstruiert und ausgelegt werden. Zu Beginn ist das Fahrwerk konzeptionell zu erarbeiten gemäß den Fahrzeuganforderungen. Die folgende Auflistung spezifiziert relevante Fahrwerkeigenschaften bezüglich des geplanten Fahrstreckenprofils unter Berücksichtigung der mechanischen Kollisionsfreiheit, die optimal umgesetzt und verifiziert wurden /MÜL 12/.

- *Rollzentrum*
Die Höhe des Rollzentrums entscheidet über den Hebelarm des Aufbauwankens. Wird das Rollzentrum ungünstig gelegt, kann der Hebelarm zum Schwerpunkt unnötig groß werden, was zu ungünstigen Einflüssen des Aufbaus bei Kurvenfahrten führen kann.
- *Lenkrollradius*
Die Größe des Lenkrollradius soll möglichst klein gehalten werden, um ungewollte Lenkmomente im Fahrwerk zu minimieren.
- *Spurbreite*
Die Spurbreite soll konstruktiv auf einen gewünschten Wert festgelegt werden. Durch kinematische Veränderungen sollte sich die Spurbreite möglichst wenig verändern.
- *Spur*
Das Ziel ist, dass sich die Spur während des Federvorgangs möglichst nicht verändert. Dies bedeutet, dass das Bauteil, das den Freiheitsgrad um die Hochachse sperren soll, möglichst steif ausgelegt werden muss.
- *Sturz*
Der Sturzwinkel darf sich während des Federvorgangs nur möglichst wenig verändern, sodass der in der Konstruktionslage eingestellte Sturz möglichst unverändert bleibt.
- *Wankpol und -moment*
Beabsichtigt ist, dass der Wankpol möglichst nahe am Schwerpunkt liegt. Dies reduziert den Hebelarm der Kräfte im Schwerpunkt um den Wankpol und somit die Wankbewegung des Aufbaus.

Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen ist bei dieser Entwicklung mit nur einer Fahrzeugachse wichtig, dass das Fahrwerk sowohl den Anforderungen an eine Hinter- als auch an eine Vorderachse entsprechend dem dynamischen Fahrkomfort gerecht wird. Das Fahrwerk ist demnach direkt an das mechanische Verstellsystem angebunden und verschiebt sich dadurch relativ zur Fahrzeugkabine. Bei ähnlichen Fahrzeugen (P.U.M.A.) erfolgt dieser Zustand im Stand der Technik ohne Fahrwerk. Die Integration des Verstellsystems in Abhängigkeit vom Fahrwerk ist anfänglich eine sehr große Herausforderung, da viele resultierende Effekte aus der Praxis in Verbindung mit der Schwerpunktverschiebung gänzlich unbekannt sind aufgrund des Neuheitsgrades.

Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaften konnte letztendlich die Fahrwerkgeometrie einschließlich der entsprechenden Gelenken und Freiheitsgraden ermittelt werden, sodass hauptsächlich Zug- und Druckkräfte über die Quer- bzw. Trapezlenker wirken /MÜL 12/ und anschließend die Integration in den Fahrzeugrahmen erfolgen kann.

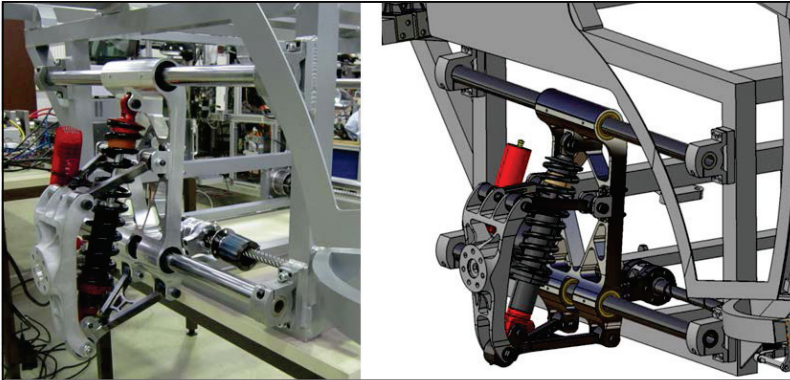


Abb. 3.10: Integration der entwickelten Bauteile am Finalrahmen

Das Fahrwerk überträgt im Fahrbetrieb die nicht absorbierten bzw. resultierenden Kräfte zwischen Bodenkontakt und Rahmenaufbau. Um die Verläufe der Kräfte während der zukünftigen Testfahrten für Lebensdauerberechnungen verwenden zu können, sollte in der Untersuchungsphase ein wirtschaftlicher Abgleich zwischen Praxis und Simulation durchgeführt und analysiert werden.

3.6 Gesamtfahrzeug – Ergebnisse und Reifegrad

Nach Abschluss der Konzeptions- und Auslegungsphase sowie des Packageprozesses sollte möglichst zeitnah ein Gesamtfahrzeug aufgebaut werden. Dieser Realisierungsstand hilft, weitere potenzielle Fragestellungen zum Themenkreis „Lebensdauer und Zuverlässigkeit“ einzugrenzen und zu bearbeiten.

Die mechanischen Hauptbereiche, die für den ersten realitätsnahen Fahrversuch wichtig sind, gliedern sich wie folgt.

- Leichtbaurahmen und Außenhaut nach /BOJ 13/; /SUH 14/; /RIE 13/,
- Mechanische Schwerpunktverstellung nach /MÜL 13b/,
- Fahrwerk- und Stützradentwicklung nach /MÜL 12/; MÜL 13a/; /FUC 12b/,
- Mechanische bzw. hydraulische Bremsen /HOP 13/.

Im Fahrzeugbau ist es üblich, mit den Hauptkomponenten einen Erprobungsträger aufzubauen, der für die Integration des Interieurs, des Antriebs, der Elektronik und des Batteriesystems genutzt werden kann.



Abb. 3.11: Gesamtaufbau des einachsigen Elektrofahrzeuges

Wichtige sich ergebende Eckwerte des Gesamtfahrzeuges sind in der nachfolgenden Tabelle 3.2 aufgelistet, sie wurden auf Grundlage der vorliegenden Bauteile geschätzt. Die Höhe des Fahrzeugs resultiert aus dem mechanischen Türkonzept, das den Öffnungsradius und die erforderliche Beinfreiheit der Personen berücksichtigt. Problematisch dabei ist: Je größer beispielsweise die Beinfreiheit ausgelegt wird, desto höher und länger wird das Gesamtfahrzeug aufgrund des resultierenden Öffnungsradius.

Tab. 3.2: Auflistung tabellarischer Ergebnisse des Fahrzeuges aus CATIA V5

Grundlegende CAD-Fahrzeugergebnisse	
Fahrzeugmaße (m)	1,65 x 1,60 x 1,95
Fahrzeuggewicht (kg) ohne Personen	398,5
Schwerpunktkoordinaten (m), ausgehend vom Momentanpol in der mittleren Lage des mechanischen Verstellsystems	X = 0/ Y = 0,80/ Z = 0,68
Steigungsfähigkeit	Zwischen 10° und 11°

Zur Abschätzung des Reifegrades des derzeitigen Fahrzeugstands wird zur Orientierung eine s-förmige Lebenslinie für technische Systeme genutzt, die die Systemeffektivität über die Zeit darstellt. Auf der Lebenslinie sind charakteristische Abschnitte vorhanden, die

verschiedene Niveaus der Höherentwicklung beinhalten und für alle Systeme ähnlich sind /KLE 13/.

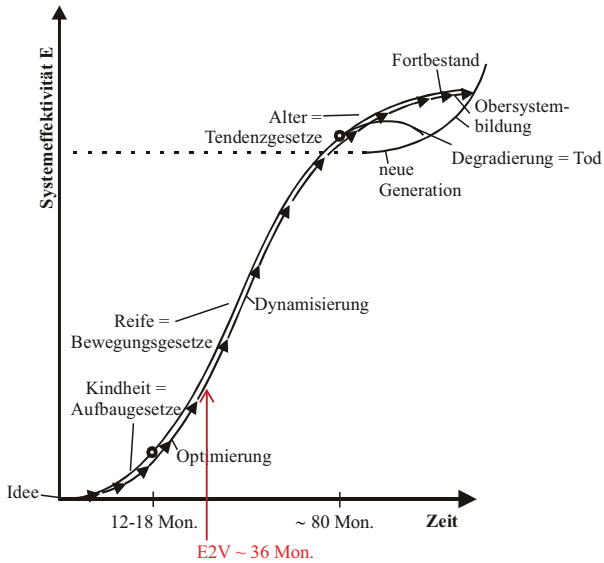


Abb. 3.12: Lebenslinie technischer Systeme zur Abschätzung des Reifegrads nach /LIN 93/

Um den Reifegrad der neu entwickelten Baugruppen des Fahrzeuges detaillierter einschätzen zu können, dient die folgende Tabelle.

Tab. 3.3: Abschätzung des Reifegrads des Fahrzeuges im Entwicklungsstadium nach 36 Monaten

Demonstrator: (Entwicklungsphase)	CAD-Modell	Praktische Machbarkeit	Funktions-erfüllung	Leichtbau	Design
Fahrzeugrahmen	100 %	75 %	75 %	50 %	25 %
Mechanische Schwerpunkt-verstellung	100 %	100 %	75 %	75 %	-
Fahrwerk	100 %	100 %	75 %	100 %	-
Türmechanismus	100 %	100 %	90 %	75 %	25 %
Außenhaut	100 %	100 %	100 %	75 %	50 %

Der Überrollbügel am Fahrzeug ist als Konzeptlösung zu bewerten und muss für eine ausreichende Sicherheit mittels geeigneter Methoden und Testverfahren mit dynamischen

Berechnungen ausgelegt und validiert werden. Verschiedene Crashuntersuchungen können beispielsweise mit Abaqus auf Basis dynamischer Werkstoffdaten durchgeführt werden.

Auch die Verbindungstechnik besitzt noch Optimierungsbedarf, da beispielsweise die Schrauben- bzw. Schweißverbindungen noch nicht vollständig dimensioniert sind. Für die Schraubenberechnungen können die Kräfte mit der FEM ermittelt werden. Da zu Beginn der Fahrzeugentwicklung die tatsächlichen Lasten unbekannt waren, wurden die abgeschätzten Fahrzeugdaten mit einem Sicherheitsfaktor versehen. Aus diesem Grund ist der Faktor „Leichtbau“ nicht genutzt worden.

Die realen Kräfte, die im Testgelände auftreten können, sind nicht bekannt. Beispielsweise besteht durch das Applizieren von Dehnungsmessstreifen an definierten Stellen die Möglichkeit, die tatsächlichen Kräfte an den zu untersuchenden Stellen zu ermitteln. Grundlage dieser Erkenntnisse können möglicherweise die verwendeten Leichtbauwerkstoffe aus Stahl und Aluminium erneut hinterfragt und z. B. durch Magnesium oder Kunststoffe ersetzt werden.

Die Neuentwicklung des Fahrwerks bietet im Zusammenhang mit verschiedenem Testfahren beispielsweise auf unterschiedlichen Schlechtwegstrecken weiteres Untersuchungspotenzial, um das Fahrverhalten unter realen Bedingungen zu evaluieren.

An dem komplexen Türsystem sind die beim Öffnen bzw. Schließen resultierenden Kräfte hinreichend zu untersuchen, damit kraftunterstützende Komponenten ausgelegt und an definierten Rahmenpositionen integriert werden können. Mithilfe eines Mehrkörpersimulationsprogramms kann der Öffnungsmechanismus bzw. der Kräfteverlauf für die Auslegung dargestellt werden.

Wenn die am Fahrzeugrahmen wirkenden Kräfte bekannt sind, besteht die Möglichkeit, den Rahmen geometrisch und werkstofftechnisch bezüglich einer Gewichtsreduzierung zu optimieren.

3.7 Forschungspotenziale und Zielsetzung

In dem projektbezogenen Entwicklungsprozess des einachsigen Elektrofahrzeuges werden verschiedene offene Fragestellungen zum Thema „Zuverlässigkeit und Lebensdauer“ erkannt, die im Rahmen dieser Arbeit bearbeitet werden sollen. In diesem Zusammenhang werden fünf Aufgabenfelder eingegrenzt und auf Grundlage der Fahrzeugkomponenten und Methoden beschrieben.

1. Mechanische Schwerpunktverschiebung und Steigungsfähigkeit

Die Schwerpunktlage des Fahrzeuges ist für die Funktionalität sehr wichtig und daher im gesamten Entwicklungsprozess zu priorisieren, um das Fahrzeug für einachsiges Fahren stabilisieren zu können. Der fortlaufende Entwicklungsprozess wird stets von Änderungen beeinflusst, die auch einen Einfluss auf die Schwerpunktlage haben können. Hinsichtlich der Lebensdauer ist es ratsam, idealerweise die Lage des Schwerpunktes auf die Fahrzeugachse zu referenzieren. Falls die Lage des Schwerpunktes mit den Anforderungen im Fahrbetrieb nicht übereinstimmt, ist möglicherweise eine axiale Verstellung der Spindel notwendig. Je zahlreicher die mechanischen Verstellungen sind, desto häufiger muss das Spindelssystem seine Funktion erfüllen und desto früher könnte ein Ausfall der Schwerpunktverstellung und somit des Gesamtfahrzeuges erfolgen. Demzufolge ist es wichtig,

den idealen Schwerpunkt während des Aufbaus bzw. bei konstruktiven Änderungsprozessen stets im Fokus zu halten.

Die Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges stellt ebenfalls ein relevantes Hauptkriterium dar, um das Fahren im hügeligen Bergpark Kassel zu ermöglichen. Aufgrund der einen Achse können theoretisch unterschiedliche Fahrsituationen in Betracht gezogen werden. Im Vergleich zum herkömmlichen Fahrzeug kann der einachsige mechanische Aufbau während einer Steigungsfahrt entweder parallel zur Fahrzeugachse oder waagrecht positioniert werden. Dazu ist es relevant, welche konstruktiven Änderungen am Fahrzeug Einfluss auf den Böschungswinkel haben, damit die Steigungsfähigkeit nicht zufällig verändert werden kann. Der variable Einfluss zwischen der Schwerpunktlage und dem Böschungswinkel in Verbindung mit unterschiedlichen Fahrzeugszenarien ist unbekannt und sollte anhand eines möglichen Ansatzes während der Entwicklung berechenbar bzw. abschätzbar sein.

2. Lebensdauerabschätzung

Aufgrund der Wartungsintervalle und der entstehenden Kosten bei zufälligen Ausfällen ist es wichtig, die Bauteile im Fahrzeug vernetzt gemäß der Lebensdauer abzuschätzen und darzustellen. Da das Zusammenspiel der Komponenten gänzlich unbekannt ist, stellt sich die Frage, wie die Abschätzung bzw. die Darstellung der Lebensdauer zusammen mit der modernen Netzplantechnik im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Ausfalldaten möglich sein könnte. Der Austausch unterschiedlicher Systeme beispielsweise während der Wartung kann die Lebensdauer verändern und sollte ebenfalls berücksichtigt werden. Für die Ergebnisse ist letztendlich eine Auswertungsmöglichkeit zu erarbeiten, die bei praktischen Tests genutzt werden kann.

3. Verschiedene Test- und Prüfverfahren

Um Neuentwicklungen am System reproduktiv prüfen und testen zu können, sind unterschiedliche Test- und Prüfverfahren unter möglichst realen Bedingungen durchzuführen. Die Ergebnisse können mit der statistischen Versuchplanung bezüglich der Funktionalität ausgewertet werden. Somit werden die Ziele verfolgt, die praktische Funktionalität der mechanischen Schwerpunktstabilisierung zu ermöglichen und hinsichtlich der Zuverlässigkeit ein qualitatives Ergebnis abzuschätzen. Daraus stellt sich die Frage, welche Prüfverfahren sind unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Ressourcen nötig, um eine mechanische Schwerpunktverstellung zuverlässig zu ermöglichen?

4. Abschätzung des Schädigungsverhaltens

Um die statische und dynamische Festigkeit der Werkstoffe eines Systems abschätzen zu können, sind praktische Untersuchungen an den Bauteilen nötig. So kann beispielsweise eine Materialkarte mit vergleichbaren Simulationsergebnissen validiert und bereitgestellt werden.

Die mechanische Anbindung ist das Bindeglied für die Schwerpunktverstellung. Damit frühzeitig Ergebnisse über dieses mechanische System bezüglich der Belastbarkeit bis zum Bruch vorliegen, wird das System getestet. Hiermit sollen die folgenden Fragen beantwortet werden.

Mit welchen Materialdaten können entweder quasi-statische oder dynamische Berechnungen durchgeführt werden? Mit welcher Belastung kann schätzungsweise die mechanische Anbindung beansprucht werden?

5. Methoden für Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen

Während des Entwicklungsprozesses werden verschiedene Methoden für Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen angewendet und bewertet. Daraus resultiert ein methodischer Ansatz, der als Leitfaden bzw. als Konzept für vergleichbare Fahrzeuge im ersten Entwicklungsschritt genutzt werden kann.

Um die Akzeptanz der Nutzer/innen von E-Fahrzeugen zu fördern, haben Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsziele hohe Priorität im Entwicklungsprozess /s. VDI 4007/. OEMs fokussieren sich heute auf PdM (Predictive Maintenance) und entwickeln hierfür Methoden, Strategien und Maßnahmen für eine hohe Verfügbarkeit und Nutzungsdauer. Insofern gilt es, hier zu klären, welche Tests bzw. Methoden während der Entwicklungsphase zur Anwendung kommen sollen und welche Folgen daraus resultieren.

6. Programm für Funktions- und Untersuchungsszenarien

Damit die erarbeiteten Untersuchungsszenarien für das einachsige Fahrzeug zukünftig vereinfacht und zeitnah durchgeführt werden können, sollen weitestgehend selbsterklärende Eingabemasken in Excel erstellt werden, in denen ein programmierter Algorithmus hinterlegt ist, damit die Berechnungsschritte automatisch und ergebnisorientiert ablaufen können. Diese Lösung ist im ersten Entwicklungsschritt ausreichend, um die praktische Anwendung des Programms auf das Fahrzeug zu evaluieren. Damit ergibt sich folgender Hinweis: Welches Programm kann parallel zur herkömmlichen Zuverlässigkeitssoftware (z. B. Reliability Workbench, Visual Xsel) genutzt werden, damit auch die speziellen Untersuchungen für das einachsige Fahrzeug möglich sind?

4 Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen

Im folgenden Kapitel werden Untersuchungen zur Zuverlässigkeit und Lebensdauer diskutiert und auf verschiedene Fahrzeugsysteme bzw. Bauteile angewandt. Das Ziel ist, mit Hilfe von Methoden, Tests bzw. Prüfungen verschiedene Systeme oder Komponenten des Fahrzeuges zu analysieren und hinsichtlich der Praxistauglichkeit zu bewerten.

4.1 Qualitative und quantitative Betrachtungen

In diesem Abschnitt soll die Basis für die praktischen Untersuchungen gelegt werden. Ein komplexes und neuartiges Elektrofahrzeug mit vielen unterschiedlichen Baugruppen sollte auf ein mögliches Untersuchungsumfeld priorisiert werden. Dies berücksichtigend sind die Faktoren Zeit, Kosten und Prüfaufwand mit höchstem Nutzen an die Projektbedingungen und den jeweiligen Zuständigkeitsbereich anzupassen.

Zunächst ist es ratsam, die jeweiligen Systemgrenzen mit einem Top-Down-Verfahren zu markieren und somit für die Untersuchungen festzulegen.

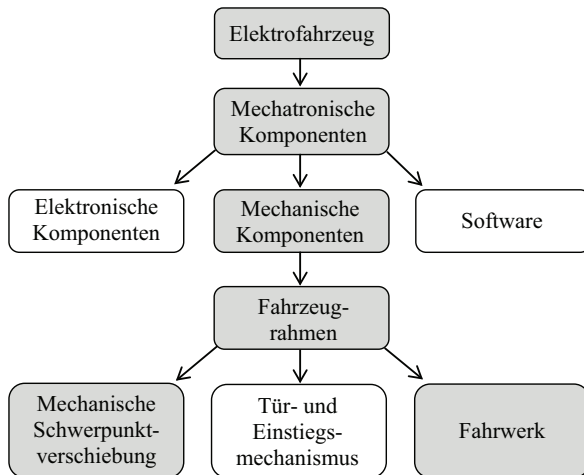


Abb. 4.1: Priorisierung der Systemgrenzen dieser Arbeit

Die höchste Priorität bezüglich des Zuständigkeitsbereiches hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Lebensdauer kommt dem Fahrzeugrahmen, dem Fahrwerk und der mechanischen Schwerpunktverschiebung zu. Der Fahrzeugrahmen nimmt in den Testfahrten die Belastungen und Beanspruchungen auf, da dieser Rahmen mittels Radaufhängung und Fahrwerk die Verbindung zum Boden und damit den Bodenkontakt herstellt und auf diesen reagiert.

Zusätzlich können weitere Kräfte und Momente von der mechanischen Schwerpunktverschiebung auf dem Rahmen und Fahrwerk rückwirken, da dieser dynamische Verstellmechanismus zwischen dem Leichtbaurahmen und dem Fahrwerk positioniert ist.

Kommt es zum mechanischen Ausfall des Fahrwerks, der mechanischen Anbindung bzw. einer anderen kritischen Stelle am Fahrzeugrahmen, ist eine Weiterfahrt nicht möglich. Einen Überblick über diese zusammenhängenden Randbedingungen der verschiedenen Baugruppen zeigt die nächste Abbildung.

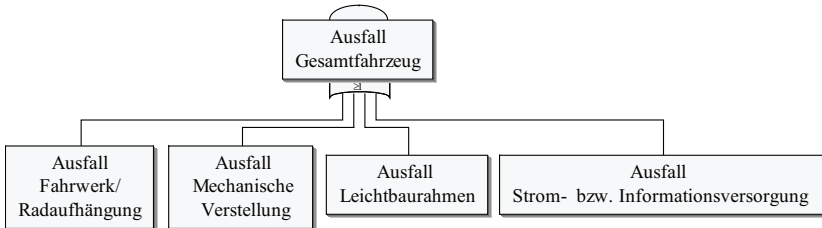


Abb. 4.2: Wichtige zu vermeidende Systemausfälle am Gesamtfahrzeug

Die Boolesche Gleichung als „Oder-Verknüpfung“ hierfür ergibt sich zu

$$y_{ges} = x_{1g} \vee x_{2g} \vee x_{3g} \vee x_{4g} \quad (4.1)$$

Die Zuverlässigkeitsfunktion ergibt sich durch die nachfolgende Systemgleichung.

$$R_G = R_{SP} \cdot R_F \cdot R_L \cdot R_{SI} \quad (4.2)$$

Das Fahrwerk und der Fahrzeugrahmen sind in diesem ersten Entwicklungsschritt zur Erprobung der mechanischen Stabilisierung, aufgrund der nicht vorhandenen Betriebslasten, mit Sicherheitsbeiwerten während einer ersten Festigkeitsberechnung überdimensioniert worden /SUH 14/; /BEN 12/. Zunächst wird ein FTA-Baum für die mechanische Schwerpunktverschiebung aufgebaut.

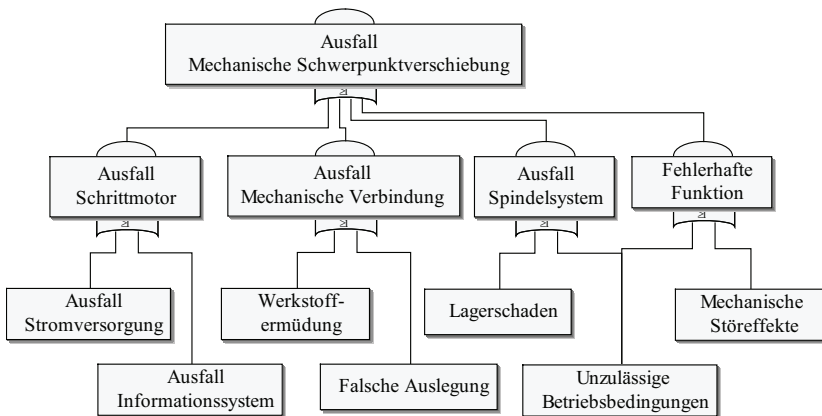


Abb. 4.3: FTA zur mechanischen Schwerpunktverschiebung

Die boolesche Gleichung führt daher zu:

$$y_{SP} = (x_{1SP} \vee x_{2SP}) \vee (x_{3SP} \vee x_{4SP}) \vee (x_{5SP} \vee x_{6SP}) \vee (x_{6SP} \vee x_{7SP}). \quad (4.3)$$

Die Zuverlässigkeitsfunktion lautet entsprechend:

$$R_{SP} = x_{1SP} \cdot x_{2SP} \cdot x_{3SP} \cdot x_{4SP} \cdot x_{5SP} \cdot x_{6SP}^2 \cdot x_{7SP}. \quad (4.4)$$

Als Ausfallfunktion ergibt sich daraus zu:

$$F_{SP} = 1 - R_{SP}. \quad (4.5)$$

Um die Zuverlässigkeits- bzw. Ausfallfunktion bezüglich des Fahrwerks zu bestimmen, werden mögliche Hauptausfallursachen in die FTA-Methode integriert.

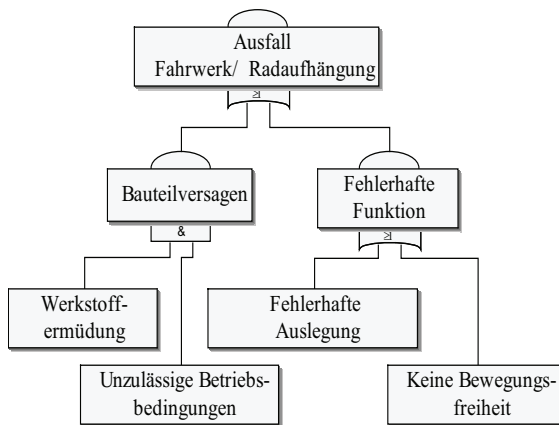


Abb. 4.4: FTA zur Fahrwerksentwicklung

Daraus entsteht die boolesche Gleichung:

$$y_F = (x_{1F} \wedge x_{2F}) \vee (x_{3F} \vee x_{4F}). \quad (4.6)$$

Und die Zuverlässigkeitsfunktion lautet:

$$R_F = (1 - (1 - x_{1F}) \cdot (1 - x_{2F})) \cdot (x_{3F} \cdot x_{4F}). \quad (4.7)$$

Für die Ausfallfunktion gilt:

$$F_F = 1 - R_F. \quad (4.8)$$

Der FTA-Baum für den Leichtbaurahmen ergibt die folgende Verknüpfung.

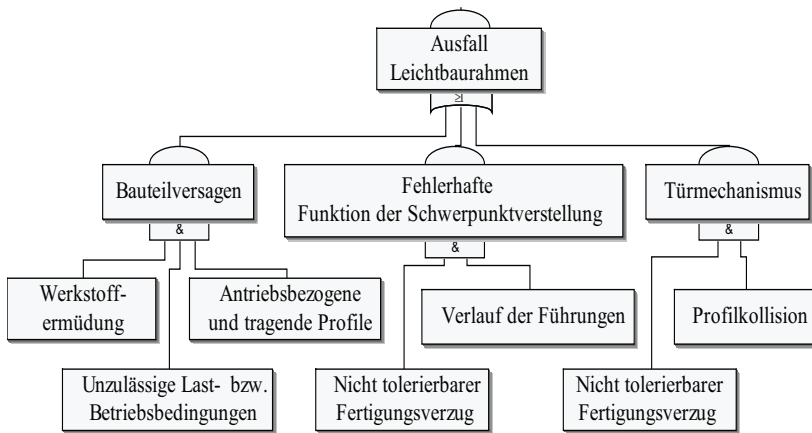


Abb. 4.5: FTA zum Leichtbaurahmen

Aus der Gesamtbetrachtung resultiert die boolesche Gleichung:

$$y_L = (x_{1L} \wedge x_{2L} \wedge x_{3L}) \vee (x_{4L} \wedge x_{5L}) \vee (x_{6L} \wedge x_{7L}). \quad (4.9)$$

Insofern ergibt sich die Zuverlässigkeitsfunktion:

$$R_L = (1 - (1 - x_{1L}) \cdot (1 - x_{2L}) \cdot (1 - x_{3L})) \cdot (1 - (1 - x_{4L}) \cdot (1 - x_{5L})) \cdot (1 - (1 - x_{6L}) \cdot (1 - x_{7L})). \quad (4.10)$$

Die komplementäre Ausfallfunktion lautet demnach:

$$F_L = 1 - R_L. \quad (4.11)$$

Falls eine Fehlerbaumanalyse (FTA) mangels entsprechender Daten nicht quantitativ durchgeführt werden kann, so kann sie dennoch ein wertvolles Werkzeug bei der Systemanalyse sein /BEN 04/.

Neben der Aufstellung der Gleichungen aus den Fehlerbaumanalysen ist es wichtig, eine FMEA für die kritischen Systeme durchzuführen, um einzelne Schwachstellen bewerten zu können. Mit der FMEA-Methode entsteht somit eine systematische Erfassung und Bewertung zuverlässigkeitsrelevanter Informationen für die entsprechenden Systeme /PFE 10/.

Die ermittelten potenziellen Merkmale werden anschließend auf die Prüfnotwendigkeit hin mittels der Bewertung der Risikoprioritätszahlen kurz RPZ analysiert.

Die zu untersuchenden Baugruppen aus dem Gesamtfahrzeug werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit hinsichtlich ihrer Fehlerursachen mittels einer FMEA bewertet. Zu den Fehlermöglichkeiten bzw. -ursachen werden erste Gegenmaßnahmen vorgeschlagen.

Aus der durchgeführten FMEA ergibt sich das nachfolgende Ergebnis.

Tab. 4.1: FMEA zum Gesamtfahrzeug – Die Risikoprioritätszahl (RPZ) wird nach drei Kriterien beurteilt: Auftretenswahrscheinlichkeit des Fehlers (A), Bedeutung der Fehlerfolgen (B) und die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers (E)

FMEA-Gesamtfahrzeug						
Fehlermöglichkeiten	Fehlerursachen	A	B	E	RPZ	Gegenmaßnahmen
Ausfall: Fahrwerk / Radaufhängung	• Bauteilversagen	2	8	1	16	Berechnung/Prüfung
	• Funktionsfehler	1	5	2	10	Funktionsprüfung Kollisionsprüfung
Ausfall: Mechanische Verstellung	• Schrittmotor funktioniert nicht	2	5	3	30	Verfahrtests
	• Mechanische Verbindung hält den Belastungen nicht stand	2	7	1	14	Verfahr- und Belastungstests
	• Spindelsystem defekt	2	8	2	32	Funktionsprüfung
	• Fehlerhaft Funktion	3	4	3	21	Funktionsprüfung
Ausfall: Leichtbaurahmen	• Bauteilversagen	2	8	1	16	Festigkeitsberechnung
	• Funktionsfehler während der Schwerpunkt- verschiebung	3	6	5	90	Toleranzen/Prüfung
	• Türmechanismus funktioniert nicht	3	6	1	18	Toleranzen/Prüfung

Der besseren Darstellung der Ergebnisse und einer besseren Übersicht dient das folgende Diagramm.

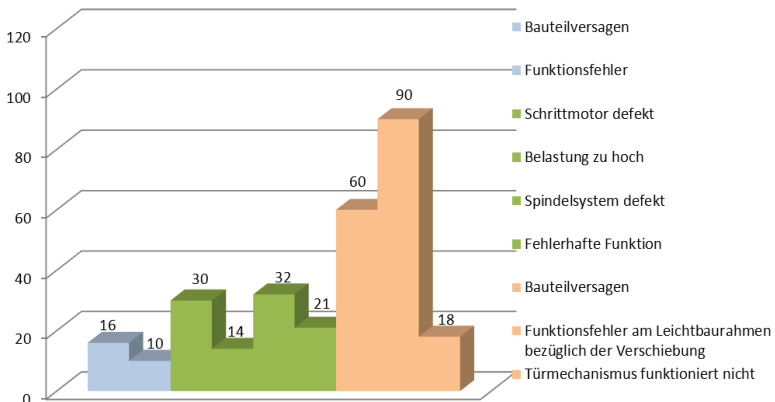


Abb. 4.6: RPZ-Ergebnisse der FMEA

Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass neben dem Bauteilversagen die mechanische Verschiebung in Zusammenhang mit der Befestigung am Fahrzeugrahmen zu untersuchen ist.

Die Bestimmung der ASIL-Klasse für dieses sicherheitskritische System kann durch die Formel (2.6) bzw. mithilfe des Risikographen erfolgen, nachdem die drei Faktoren *Severity (S)*, *Exposure (E)* und *Controllability (C)* definiert sind (Kapitel 2.2.2). Denn die /ISO 26262/ fordert, dass die aus verschiedenen Betriebszuständen resultierenden Gefahren und deren mögliche Folgen auf Grundlage des Ausmaßes des Schadens (S), der Eintrittswahrscheinlichkeit der Situation (E) und der Beherrschbarkeit seitens der betroffenen Personen (C) als Sicherheitsstufe für jedes Gefahrenpotenzial definiert werden.

Für die Gefahrenanalyse und Risikobewertung gilt die Annahme, dass ein Ausfallen des Systems bei den betroffenen Personen schwere Verletzungen verursachen kann, da die mechanische Verstellung einen Beitrag zur Fahrzeugstabilisierung leistet.

Tab. 4.2: Klassifizierung für das Ausmaß des Schadens (S) nach /ISO 26262-3/

Ausmaß des Schadens (Severity)	
Klasse	Kurzbeschreibung
S0	Keine Verletzungen
S1	Leichte bis moderate Verletzungen
S2	Schwere und lebensbedrohliche Verletzungen (Überleben wahrscheinlich)
S3	Lebensbedrohliche Verletzungen (Überleben unsicher), tödliche Verletzungen

Aus Voruntersuchungen wird eine mittlere Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer sicherheitskritischen Fehlfunktion angenommen. Daraus folgt die Klasse E3.

Tab. 4.3: Klassifizierung für die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Fehlfunktion (E) nach /ISO 26262-3/

Eintrittswahrscheinlichkeit einer Fehlfunktion (Exposure)	
Klasse:	Kurzbeschreibung:
E0	Nicht wahrscheinlich
E1	Sehr geringe Wahrscheinlichkeit
E2	Geringe Wahrscheinlichkeit (weniger als 1 % der Betriebszeit)
E3	Mittlere Wahrscheinlichkeit (zwischen 1 % und 10 % der Betriebszeit)
E4	Hohe Wahrscheinlichkeit (mehr als 10 % der Betriebszeit)

Die Beherrschbarkeit einer Fehlfunktion und die damit verbundene Abwendung der Folgen werden in diesem Beispiel als schwer eingestuft. Es resultiert die Klasse C3.

Tab. 4.4: Klassifizierung der Beherrschbarkeit (C) des Schadens, ausgehend vom Fahrer nach /ISO 26262-3/

Beherrschbarkeit – Möglichkeit den Schaden abzuwenden (Controllability)	
Klasse:	Kurzbeschreibung:
C0	Beherrschbar
C1	Einfach beherrschbar, Fahrer können mindestens zu 99 % die Situation kontrollieren
C2	Moderat beherrschbar, Fahrer können mindestens zu 90 % die Situation kontrollieren
C3	Schwer beherrschbar, Fahrer können weniger als 90 % die Situation kontrollieren

Mithilfe der einzelnen Klassifizierungen kann aus dem nachfolgenden Risikographen ASIL-B bestimmt werden.

Tab. 4.5: Risikograph zur ASIL-Klassifizierung mit dem Ergebnis ASIL-B nach /ISO 26262-3/

Severity (S)	Exposure class (E)	Controllability (C)		
		C1	C2	C3
S1	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	QM
	E3	QM	QM	A
	E4	QM	A	B
S2	E1	QM	QM	QM
	E2	QM	QM	A
	E3	QM	A	B
	E4	A	B	C
S3	E1	QM	QM	A
	E2	QM	A	B
	E3	A	B	C
	E4	B	C	D

Aus der abgeleiteten Klassifizierung ASIL-B werden in /ISO 26262/; /IEC 61508/ einzuhaltende Toleranzwerte für die Ausfallwahrscheinlichkeiten tabelliert (s. Tab. 2.3 bzw. Tab. 2.7) vorgegeben. Dieser Toleranzbereich gibt den Sollwert für die Systemkomponenten vor, die miteinander verglichen werden. Falls die Werte voneinander abweichen, sind entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Aus diesen Ergebnissen sind entsprechende Maßnahmen abzuleiten, um das Risiko so weit wie möglich zu reduzieren. In /HEN 08/ wurde eine Methode entwickelt, die hiermit erstmalig auf ein Elektrofahrzeug angewandt wird. Sie gibt aufgrund der Kommunikation und Dokumentation einen tieferen Hintergrund zur Lösungsfindung und zeigt ent-

sprechende Maßnahmen auf. Sie liefert damit einen wesentlichen Beitrag zur Suche nach potenziellen Schwachstellen in der Konstruktion.

Die erste Anwendung beginnt mit dem Fahrzeugrahmen. Es werden neue Fragestellungen formuliert, wofür Lösungen gefunden werden müssen.

Tab. 4.6: Checklisten-Methode /HEN 08/ für den Fahrzeugrahmen

		Fragestellung	Antwort	Maßnahmen zur Fehlervermeidung?
		Fragestellungen zum Leichtbaurahmen	Konstruktive Anforderungen zur Zuverlässigkeit	Auf den neuartigen Rahmen-aufbau wirken unbekannte Lastfälle, möglicherweise auch kombiniert durch Antriebsmotoren, Schwerpunktverschiebung, Schlechtwegstrecken etc. Mit welchen Methoden wird der Testrahmen ausgelegt, damit der innovative Demonstrator zuverlässig in Erstbetrieb genommen werden kann?
Der Öffnungsmechanismus der Haube verschachtelt sich ineinander für den Ein- und Ausstieg. Der Öffnungsradius ist relativ groß, sodass kleine Toleranzschwankungen zwischen Praxis und Theorie Kollisionen hervorrufen. Wie wird die Funktion in der Praxis zuverlässig, d. h. ohne Kollision erfolgen?	Die Machbarkeit kritischer Baugruppen wird mit den industriellen Partnern hinsichtlich der Fertigungstoleranzen abgesprochen. Dementsprechend wird das CAD-Modell kollisionsfrei ausgelegt.			CATIA V5 DMU-Analyse Absprachen im Team

Die Antworten fließen in den aktuellen Konstruktionsprozess mit ein und werden präventiv verfolgt. Somit können die Funktion und die Zuverlässigkeit in der Konstruktion, bezogen auf den neuartigen Tür- und Einstiegsmechanismus, durch die intensive Verfolgung der Präventivmaßnahmen erhöht werden.

Analog gilt dieses Vorgehen für den innovativen Leichtbaurahmen. Einerseits werden Lösungen generiert, andererseits auch Maßnahmen, mit denen ein erster Ansatz zur Zielerreichung entwickelt werden kann.

Die mechanische Verschiebung ist eines der wichtigsten Systeme im Fahrzeug. Ohne dieses System ließe sich der Schwerpunkt nicht verschieben, sondern wäre nur über den Nickwinkel zu beeinflussen.

Neue Systeme werfen neue Fragestellungen auf, mit denen man Antworten generiert, die im Rahmen der zur Verfügung stehenden Ressourcen möglich sind.

Tab. 4.7: Checklisten-Methode /HEN 08/ für die mechanische Verstellung

Fragestellungen zur mechanischen Schwerpunktverschiebung	Fragestellung		Antwort	Maßnahmen zur Fehlervermeidung?
	Konstruktive Anforderungen zur Zuverlässigkeit	Die mechanische Verbindung ist essenziell für die Fahrzeugstabilisierung. Wie erfolgt die Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsabschätzung? Das Spindelsystem kann durch äußere Einflüsse oder Abnutzungserscheinungen die Stabilisierung erschweren oder zum Ausfall bringen. Wie kann dies weitestgehend vermieden werden? Nicht eingehaltene Fertigungstoleranzen oder eine falsch ausgelegte mechanische Anbindung können mechanische Störeffekte wie Klemmungen hervorrufen. Wie kann dies hinreichend untersucht bzw. vermieden werden?	Die Mechanik wird mit zyklischen Beanspruchungen beaufschlagt. Die Ergebnisse werden statistisch ausgewertet. Damit wird eine Prognose zur Zuverlässigkeit und Lebensdauer ermöglicht. Das Spindelsystem wird mit einer Abdeckung versehen. Praxisversuche zur Ermittlung der übertragbaren Lasten verschiedener Anbindungen und zur Aufdeckung mech. Störeffekte.	Praktische Untersuchungen Methodische Tests (Success-Run) CATIA V5 ABAQUS FEMFAT

Mithilfe der Antworten auf diese Fragen ist im nächsten Schritt für die experimentellen Versuche eine Vorgehensweise zu erarbeiten, die die Funktionalität hinreichend beschreibt und bewertet.

Es ist ratsam, die statistische Versuchsmethodik mit einzubeziehen, um zufällige Streuungen weitmöglichst zu berücksichtigen. Für die Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsabschätzung ist ein konzeptionelles Prüfkonzept zu erarbeiten, das im Prüflabor als Orientierungshilfe dienen kann.

Somit ist es möglich, eine systematische Vorgehensweise für die unterschiedlichen Untersuchungen zu ermöglichen.

Das Fahrwerk auf einer Achse muss mechanisch – im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen – als Hinter- und Vorderachse fungieren und die gesamte Kabinenlast aufnehmen.

Außerdem können theoretisch die Räder unabhängig voneinander verstellt werden, wobei die entsprechende Mechanik und deren Vor- oder Nachteile bisher noch nicht erforscht sind. Für das zu entwickelnde Fahrwerk stellen sich die nachfolgenden Fragen.

Tab. 4.8: Checklisten-Methode /HEN 08/ für das Fahrwerk

	Fragestellung	Antwort	Maßnahmen zur Fehlervermeidung?	
Fragestellungen zum Fahrwerk/ Radaufhängung	Konstruktive Anforderungen zur Zuverlässigkeit	Das Fahrwerk überträgt die Kräfte und Momente, die aufgrund des Bodenkontakts auf die Rahmenanbindung wirken. Bei einem innovativen Fahrzeug stehen keinerlei Lastdaten zur Verfügung. Wie kann trotzdem eine zuverlässige Funktionsweise für den Demonstrator erfolgen, und wie können unzulässige Betriebsdaten weitestgehend vermieden werden, um die Lebensdauer nicht zu gefährden?	Der mechanische Fahrwerksaufbau wird im ersten Entwicklungsschritt, nachdem die Kollisionsfreiheit sichergestellt ist, mit der Simulation validiert. Ist die Übereinstimmung approximativ in Ordnung, werden Fahrversuche ermöglichen, die Betriebslasten abzuschätzen. Diese werden für weitere Berechnungen eingesetzt. Zum Schluss wird das Fahrwerk zyklischen Belastungen unterzogen. Sicherheitswerte werden verwendet.	Praktische Untersuchungen Verfahren nach Bobillier Methodische Tests MSC-ADAMS CATIA V5 ABAQUS FEMFAT

Aus dieser Analyse weitere erforderliche Arbeiten abgeleitet, die diese Ziele verfolgen und erfüllen müssen.

Die mechanische Verstellung und ihre Auslegung sind grundlegend relevant für das erfolgreiche Erreichen der Projektziele. Aus einer möglichen Fehlfunktion kann gleichzeitig ein Ausfall des Systems resultieren, was zum Liegenbleiben führt.

Im ersten Ansatz wird eine Methodik gesucht, um unterschiedliche Zustände in Abhängigkeit von den verschiedenen Komponenten modellieren und analysieren zu können. Die Recherche zu Zuverlässigkeitsuntersuchungen hat letztendlich ergeben, dass die sogenannte Markov-Analyse für diese Untersuchungsform am geeignetsten ist.

Falls im weiteren Verlauf der Entwicklungsphase die Übergangswahrscheinlichkeiten bereitstehen z. B. durch entsprechende Versuche oder durch Herstellerangaben, können unterschiedliche Zustandsänderungen mittels des nachfolgenden Markov-Modells unter-

sucht und berechnet werden. Um dazu ein Beispiel zu erarbeiten, werden zunächst hypothetische Übergangswahrscheinlichkeiten angenommen.

Um ein Markov-Diagramm erstellen zu können, muss das Zusammenspiel aller Bauteile definiert und zugewiesen werden können, z. B. in der folgenden Weise:

- Punkt 1: Batterie,
- Punkt 2: Batterie,
- Punkt 3: Schrittmotor,
- Punkt 4: Federkraftbremse,
- Punkt 5: Spindelsystem mit mechanischer Anbindung,
- Punkt 6: Ausfall.

Diese Punkte werden mit den jeweiligen Übertragungswahrscheinlichkeiten (ÜW) in das Markov-Modell eingebettet.

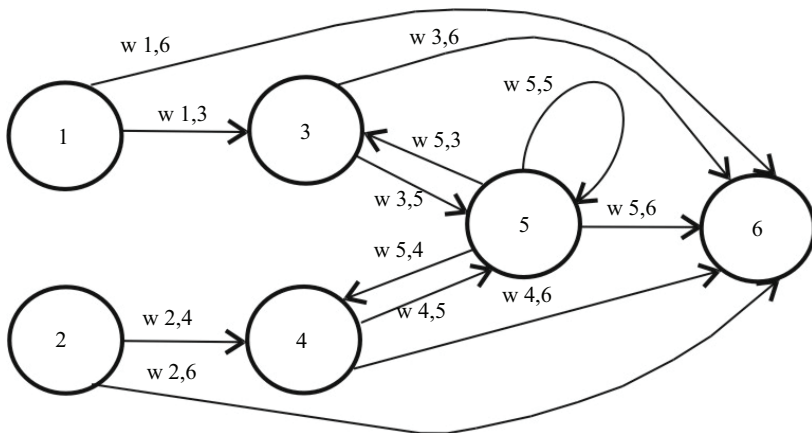


Abb. 4.7: Markov-Diagramm der mechanischen Schwerpunktverstellung zur Modellierung unterschiedlicher Zustände mit verschiedenen Übertragungswahrscheinlichkeiten.

Die Batterien werden in diesem Szenario redundant mit der gleichen Übergangswahrscheinlichkeit (ÜW) zum Schrittmotor bzw. der Federkraftbremse ausgelegt. Zu Beginn des ersten Zeitintervalls wird die Annahme getroffen, dass das System mit den vorgegebenen Übergangswahrscheinlichkeiten funktioniert.

Die Federkraftbremse wird durch Stromzufuhr geöffnet und bei möglichem Stromausfall geschlossen, sodass mit keiner unberechenbaren Verschiebung der Mechanik bis zum Grenzmoment der funktionierenden Bremse weitestgehend möglich ist. Der Schrittmotor kann über das Spindelsystem die axiale Verstellung des Schwerpunktes ermöglichen. Die Federkraftbremse hindert beim stromlosen Parken mit einem Steigungswinkel die selbständige mechanische Verstellung, weil das Spindelsystem und der Schrittmotor durch die Federkraftbremse gegen willkürliches Drehen gesperrt werden. Die Komponenten können mit einer abgeschätzten Wahrscheinlichkeit das System zum Ausfall bringen. Die

jeweils angenommenen Übertragungswerte ($w_{x,y}$) sind hypothetisch in Tab. 4.9 aufgeführt.

Tab. 4.9: Zuordnung der Übertragungswahrscheinlichkeiten zum Markovdiagramm

Übertragungswert	Übergangswahrscheinlichkeiten
$w_{4,5} / w_{3,5}$	0,98
$w_{1,3} / w_{2,4}$	0,96
$w_{5,5}$	0,94
$w_{1,6} / w_{2,5} / w_{2,6}$	0,04
$w_{5,4} / w_{5,3} / w_{5,6} / w_{4,6} / w_{3,6}$	0,02

Weiterhin erfolgen auf Grundlage der nachfolgenden Parameter die Aufstellung und Abschätzung von Häufigkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit, Inbetriebnahme und Mindestlebensdauer der Komponenten. Um eine erste Berechnung durchführen zu können, werden die Zeiteinheiten (ZE) für dieses Beispiel angenommen.

Tab. 4.10: Verschiedene Wertschätzungen für die beispielhafte Durchführung der Markov-Analyse

Mindestlebensdauer	Bauteile	Inbetriebnahme (8 Std. von 24 Std.)	Nicht Inbetriebnahme (16 Std. von 24 Std.)
3 ZE	Federkraftbremse	1/3	2/3
3 ZE	Schrittmotor	1/3	2/3
2 ZE	Batterien	1/2,5	1,5/2,5
4 ZE	Spindelsystem mit mechanischer Anbindung	1/3	2/3

Die Federkraftbremse benötigt während des gesamten Fahrbetriebes Strom, damit die Spindelbewegung bremsfrei funktioniert. Der Schrittmotor benötigt Strom für die mechanische Verstellung bzw. zum Einleiten eines Gegenmomentes bei konstanter Fahrt, damit äußere Kräfte die Spindelverstellung bzw. den Schwerpunkt nicht störend beeinflussen. Beim Parken bzw. bei möglichem Stromausfall werden beide Komponenten nicht gestromt und erhalten daher die gleiche Zeiteinheit für die Inbetriebnahme.

Die Batterien haben möglicherweise weitere elektronische Komponenten, die Strom vielleicht auch im Stillstand benötigen, sodass der Batteriestrombedarf somit höher eingeschätzt wird als für die anderen Komponenten. Da das verstellbare Spindelsystem im direkten Zusammenhang mit dem Schrittmotor bzw. Federkraftbremse steht, bekommt es ebenfalls den gleichen Wert.

Die Garanzzeit T_G setzt sich aus der Mindestlebensdauer L_{\min} und einem Sicherheitswert S zusammen.

$$L_{\min} \cdot \frac{1}{3} \cdot S = T_G \quad (4.12)$$

Somit lassen sich mit der Auflösung nach L_{\min} unterschiedliche Zeiteinheiten bestimmen. Mit einer Garanzzeit von beispielsweise 2 Jahren und einem Sicherheitsfaktor von 3 kann die ZE für den Schrittmotor und der Federkraftbremse abgeschätzt werden.

$$L_{\min} = \frac{3 \cdot T_G}{S} \quad (4.13)$$

An dieser Stelle sind alle Parameter bekannt, um die erste Übergangsmatrix für weitere Zustandsabschätzungen zu anderen Zeiteinheiten aufzustellen.

Die Matrix der n-stufigen Übergangswahrscheinlichkeit ergibt sich durch n-malige Multiplikation der Matrix mit den Übergangswahrscheinlichkeiten P mit sich selbst. Dafür lautet die Formel von Chapman-Kolmogorov in Matrixschreibweise /MON 03/:

$$P^{(n)} = P^{(r)} \cdot P^{(m-r)} \quad (4.14)$$

Demzufolge lautet die erste Matrix $P^{(t)}$ für die ZE 1 nach dem Markov-Modell:

Tab. 4.11: Übertragungswerte zur Zeiteinheit 1

Nr.	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0,96	0	0	0,04
2	0	0	0	0,96	0	0,04
3	0	0	0	0	0,98	0,02
4	0	0	0	0	0,98	0,02
5	0	0	0,02	0,02	0,94	0,02
6	0	0	0	0	0	1

Der Aufwand für das Ausrechnen dieser Matrix kann relativ hoch sein, je nachdem welche Größe die Matrix auf Basis des Markov-Modells annimmt.

Um diese Matrix zeitnah ausrechnen zu können und gleichzeitig die Ergebnisse übersichtlich darzustellen, wurde ein Berechnungsprogramm geschrieben. Dieses kann bei weiteren Versuchen in der Entwicklungsphase genutzt werden. Die Vorgehensweise wird nachfolgend beschrieben, um die Anwendung zu erleichtern.

Im ersten Schritt gibt man die „Kenndaten“ ein, die mithilfe der Markov-Analyse untersucht werden sollen.

The image shows two overlapping windows from a software application. The left window, titled 'Kenndaten', contains a list of six states with corresponding input fields: 1 Batterie 1, 2 Batterie 2, 3 Schrittmotor, 4 Federkraftbremse, 5 Spindelsystem, and 6 Ausfall. Below the list is a button labeled 'Übernehmen und Schließen'. The right window, titled 'Übergangswahrscheinlichkeiten mit entsprechender ZE', has a table with columns 'Zustand (Anfang)', 'Zustand (Ende)', 'ÜW:', and 'ZE:'. Below the table are buttons for 'Matrix', 'Berechnen', 'Beenden', and 'Kenndaten'. An arrow points from the 'Kenndaten' button in the right window to the 'Kenndaten' window on the left.

Abb. 4.8: Eingabefenster für die Kenndaten des Systems

Die Einstellungen beziehen sich in diesem Untersuchungsszenario auf eine 6x6-Matrix und 4 ZE, die analog zu dieser Programmierung entweder erweitert oder gesenkt werden können.

Als Nächstes wird die zu untersuchende Matrix mit den Schätzwerten eingegeben.

The image shows a window titled 'Matrix eingeben:' containing a 6x6 grid of input fields for transition probabilities. The columns are labeled 1 through 6 at the top. The rows are labeled 1 through 6 on the left. The values entered in the fields are as follows:

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0,96	0	0	0,04
2	0	0	0	0,96	0	0,04
3	0	0	0	0	0,98	0,02
4	0	0	0	0	0,98	0,02
5	0	0	0,02	0,02	0,94	0,02
6	0	0	0	0	0	1

At the bottom of the window is a button labeled 'Übernehmen und Schließen'.

Abb. 4.9: Eingabe der Übergangswahrscheinlichkeiten für die Berechnung

Mit „Berechnung“ können bis zu 4 ZE und die dazugehörigen Übergangswahrscheinlichkeiten mit der Chapman-Kolmogorov-Gleichung direkt bestimmt und abgelesen werden.

Zustand (Anfang)	Zustand (Ende)	ÜW:	ZE:
Schrittmotor	Spindelsystem	0,98	t1
Matrix	Berechnen	0,92	t2
		0,90	t3
Kenndaten	Beenden	0,89	t4

Abb. 4.10: Ergebnisse der Übergangswahrscheinlichkeiten ($\ddot{U}W$) zu verschiedenen ZE t1 bis t4

Aus den Ergebnissen resultiert z. B. für die ZE 4 nur noch eine Übergangswahrscheinlichkeit von 89 %. Die Abnahme dieser Wahrscheinlichkeiten zu steigenden ZE ist deutlich erkennbar. Mit weiteren Iterationen kann das Markov-Modell direkt und übersichtlich ohne Ablesefehler aus der Matrix bestimmt werden. In einer Matrix muss man zwei Zustände jeweils einem Wert zuordnen. Dieses Prozedere entfällt durch dieses Programm aufgrund der automatischen Berechnung.

Aus diesen Untersuchungen folgt die Erkenntnis, dass im experimentellen Versuch besonders das Zusammenspiel von Schrittmotor und Spindelsystem zu berücksichtigen ist. Die beiden Bauteile sind direkt miteinander verbunden und leiten die Schwerpunktverstellung ein, die elementar für das Funktionieren des Fahrzeuges ist.

Aus diesen Erkenntnissen werden unterschiedliche Verfahrenszenarien für den Praxisversuch abgeleitet, um ein eventuelles Ausfallen der Komponenten nicht statisch abhängig zu machen, sondern dynamisch, da die Übergangswahrscheinlichkeit für dieses erarbeitete Modell systematisch abnimmt.

4.2 Zuverlässigkeitsmodelle

Zuverlässigkeitsmodelle verfolgen das Ziel, dass nach jedem Versagen die Fehlerursache ermittelt, beseitigt und verbessert wird. Die Prognose der zukünftig zu erwartenden Zuverlässigkeit eines Systems erfolgt dabei aufgrund der Daten der Vergangenheit. Aus den bekannten Versagenszeiten $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ wird auf die zukünftige Versagensrate bzw. auf ihren zeitlichen Verlauf geschlossen /GRA 08/.

Die wichtigsten Zuverlässigkeitswachstumsmodelle sind in /VDI 4009/ enthalten. Welche Ziele diese einzelnen Modelle verfolgen und welche Bedingungen dazu notwendig sind, wird kurz und übersichtlich in der nachfolgenden Tabelle 4.12 nach /VDI 4009/ beschrieben, um einen Einblick in die Anwendbarkeit dieser Modelle – z. B. auf die Fahrzeugentwicklung – bekommen zu können. Weitere Modelle werden in der Literatur /FEV 98/ charakterisiert.

Tab. 4.12: Beschreibung der wichtigen Modelle für das Zuverlässigkeitswachstum nach /VDI 4009/

Modell	Ziel	Definition	Bedingung
Duane	Duane definiert eine ansteigende bzw. wachsende Geradengleichung, die ein Zuverlässigkeitswachstum mit empirischen Daten ermöglicht.	$y = \alpha \ln t - \ln \lambda$	Ausfallrate des Systems ist bekannt in Verbindung mit Erfahrungswerten, die ein Zuverlässigkeitswachstum ermöglichen.
AMSAA	Ausfallraten sind in der Praxis selten gleich. Daher ist dieses Modell eine Erweiterung des Duane-Modells, in dem die Parameter für das Zuverlässigkeitswachstum mit wechselnden Weibull-Ausfallraten geschätzt werden. Mit wachsenden $r(t)$ reduziert sich die Zuverlässigkeit.	$r(t) = \lambda \beta t^{\beta-1}$	Gilt für komplexe Systeme, nicht für Tests an Komponenten solcher Systeme.
Gompertz	Für die Steigung der Zuverlässigkeit ist eine obere Grenze festzulegen. Anhand der daraus resultierenden Steigungsgeraden können die Schätzparameter b, c grafisch aus dem Weibull-Netz abgelesen werden.	$R = ab^{c^t}$	Obere Grenze a der Zuverlässigkeit muss bekannt sein. Dieses Modell könnte sich eignen, wenn die obere Zuverlässigkeitsgrenze des Systems definiert ist, z. B. auf Grundlage von Projektzielen.
Weiß	Steigerung und Berechnung der durchschnittlichen Zeit bis zum Ausfall (MTTF).	$MTTF_i = Ae^{C_i}$ mit $i=1,2,3...$	Schätzung der Parameter A und C erfolgt z. B. mit der Maximum-Likelihood-Methode.
Wolmann Chernoff und Woods	Berechnung der Wahrscheinlichkeit des ausfallfreien Arbeitens des Systems nach einer bestimmten Anzahl von Ausfällen.	$P_n = 1 - r - q_0 \beta^{n-1}$ $P_n =$ Wahrscheinlichkeit für das ausfallfreie Arbeiten eines Systems nach n beobachteten Ausfällen. $q_i =$ Wahrscheinlichkeit eines behebbaren Fehlers, wenn i Fehler korrigiert wurden.	Zwei unterschiedliche Ausfallarten müssen bekannt sein, sowohl systembedingt als auch nicht systembedingt.

4.3 Prüfaufbau zur mechanischen Schwerpunktverschiebung

Der CAD-Prüfaufbau stellt die Basis für die nachfolgenden Untersuchungen dar. Um die mechanische Verstellung erstmalig untersuchen zu können, wird ein provisorischer Rahmenaufbau verwendet, der für die Verstelleinheit die gleichen Größenverhältnisse wie zukünftig im Fahrzeug vorsieht.

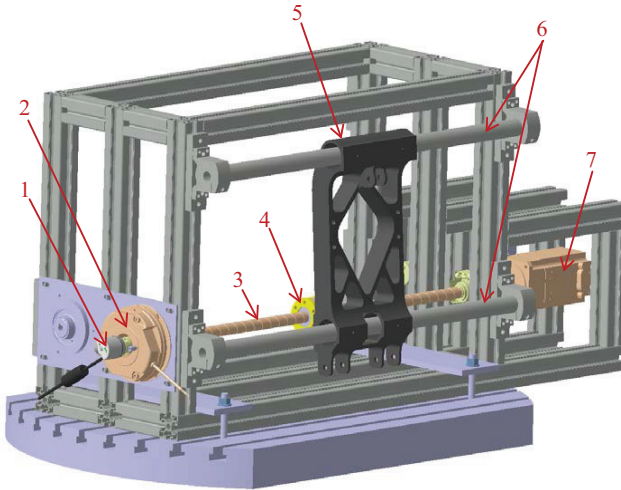


Abb. 4.11: CAD-Modell des mechanischen Prüfaufbaus, modifiziert nach /MÜL 13b/

Nachfolgend werden die abgebildeten Bauteile einschließlich ihrer Funktionsweise aufgelistet.

1. *Drehgeber*, zur Beschreibung der Positionierung.
2. *Federkraftbremse* zur Fixierung der mechanischen Verstellung in einer Parksituation oder bei einem möglichen elektronischen Ausfall.
3. *Spindel*, zur Schwerpunktverstellung.
4. *Mechanische Anbindung*, Übertragung der axialen Kräfte zur Lenkstütze bzw. zum Fahrwerk.
5. *Lenkstütze*, Anbindungselement für das Fahrwerk.
6. *Führungsschienen*, zur Schwerpunktverschiebung.
7. *Schrittmotor*, zum Antrieb der Spindel.

Hiermit sind die Komponenten konzeptionell für die Erstinbetriebnahme definiert. Anschließend können die Komponenten für die mechanische Verstellung bereitgestellt und zusammgebaut werden.



Abb. 4.12: Mechanischer Prüfaufbau für die ersten Funktionsuntersuchungen eines neuartigen Systems

Der praktische Aufbau ist für den ersten Test abgeschlossen. Weiterhin ist ein Verfahren zur Funktionsprüfung zu definieren, wie der experimentelle Versuchsablauf erfolgen soll.

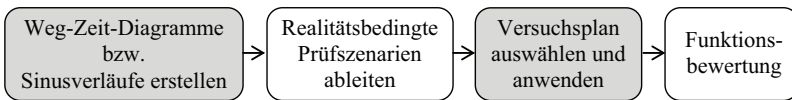


Abb. 4.13: Ablaufverfahren für den Funktionstest der mechanischen Schwerpunktverschiebung

Damit die Verschiebung im Versuchsablauf verstellt werden kann, werden unterschiedliche Prüfgleichungen in Form eines Sinusverlaufes bzw. eines Geschwindigkeit-Zeit-Verlaufes erarbeitet.

Die Erkenntnis und Umsetzung der dynamischen Verfahrensfunktionen ist im ersten Ansatz aus der Zuverlässigkeitsuntersuchung mit der Markov-Modellierung entstanden. Weiterhin ist zu erwarten, dass aufgrund der Schlechtwegstrecke und der unterschiedlichen Steigungen im Feldversuch die mechanischen Verfahrenswege zeitlich wechseln. Das dynamische Brems- und Anfahrverhalten führt ebenfalls dazu, dynamische Zeitverläufe bereits für die Erstinbetriebnahme der mechanischen Verstellung zu realisieren. Die Herausforderung dabei ist, einen geeigneten Versuchsplan aufzustellen und die Verfahrensfunktionen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund sind für die Prüfgleichungen jeweils zwei Verfahrensfunktionen aufzustellen.

4.4 Dynamische Prüfgleichungen

Für die dynamische Prüfung werden zwei unterschiedliche Sinusverläufe mit jeweils unterschiedlicher Amplitude bzw. verschiedenem Verfahrenweg simuliert. Auf Basis dieser

Verläufe werden die praktischen Verfahrenuntersuchungen in den nachfolgenden Abschnitten durchgeführt.

Zunächst werden Parameter für die Sinusverläufe bestimmt. Dafür ist es wichtig, dass die Parametergrößen konform mit dem praktischen Aufbau sind. Beispielsweise beschreibt der Wert in der Einheit „Grad“ den Verfahrenweg, der nicht größer als die maximal verfügbare Spindellänge. Daneben ist zur Initialisierung des Verfahrens ein Wert anzugeben, der die Anfangsbedingung definiert. Die mittlere Position der Spindel liegt circa bei 4000 Grad, um diesen Wert schwingt der erste Sinusverlauf mit einer Amplitude von 360 Grad und der zweite mit einer Amplitude von 720 Grad, jeweils mit einer Frequenz von 0,25 Hz. Die Umrechnung ergibt einen Zeitabstand von 4 Sekunden. Damit wird die Amplitude bei 4360 Grad bzw. 4720 Grad maximal und bei 3640 Grad bzw. 3280 Grad minimal.

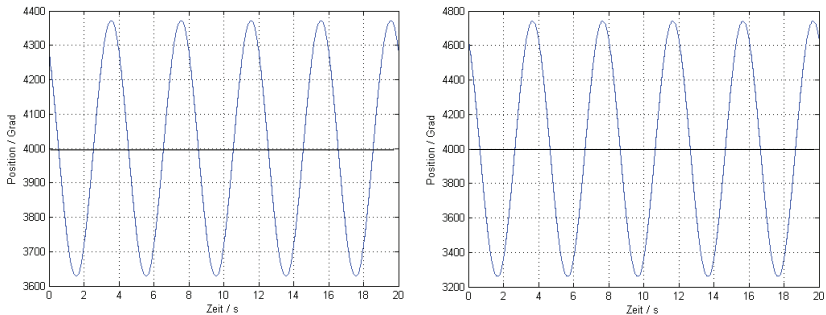


Abb. 4.14: Verschiedene Sinusverläufe für die Untersuchungen zur mechanischen Schwerpunktverschiebung

Damit während des Verfahrens temporär unterschiedliche Geschwindigkeiten realisiert werden können, sind zwei verschiedene Funktionsverläufe zu erstellen, die über der Zeit jeweils andere Geschwindigkeiten besitzen und somit den Verfahrensweg verändern können.

Tab. 4.13: Parameter für den Funktionsverlauf 1

Zeit (t)	Geschwindigkeit (v)	Weg (s)
0	0	0
0,1	0,33	0,033
0,5	0,33	0,165
0,6	0,033	0,198
0,7	0,033	0,0231
1,3	0,15	0,995
1,8	0,123	0,2214
2,1	0,033	0,0693

Der erste Funktionsverlauf resultiert auf Basis dieser tabellierten Werte. Auf der y-Achse ist sowohl der Weg als auch die Geschwindigkeit aufgetragen, um beide Verläufe darzustellen. Auf der x-Achse ist die dazugehörige Zeit dargestellt.

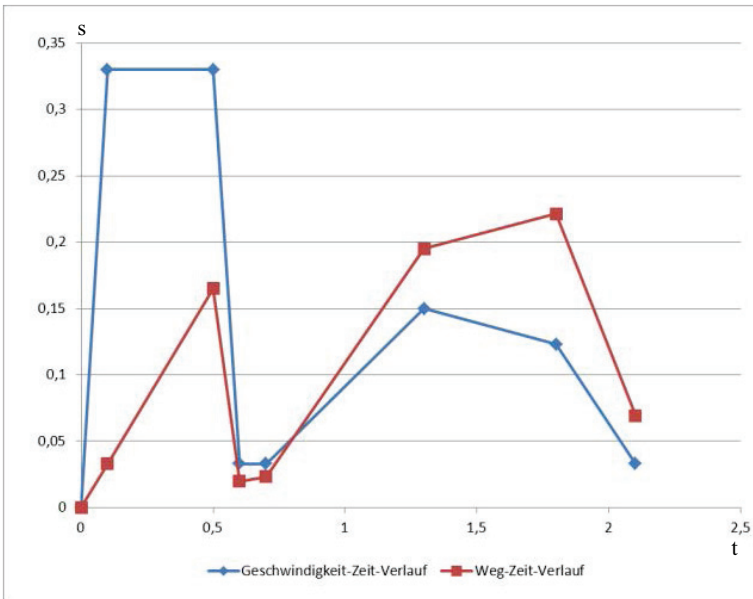


Abb. 4.15: Funktionsverlauf 1 für die mechanische Schwerpunktverschiebung

Für den zweiten Funktionsverlauf werden Daten in der Tabelle 4.14 eingetragen, die anschließend für das praktische Verfahren verwendet werden.

Tab. 4.14: Parameter für den Funktionsverlauf 2

Zeit (t)	Geschwindigkeit (v)	Weg (s)
0	0	0
0,1	0,33	0,033
0,5	0,33	0,165
0,6	0,033	0,198
0,7	0,033	0,0231
1,3	0,165	0,2145
1,8	0,165	0,297
2,1	0,033	0,0693

Der zweite Funktionsverlauf zu den vorherigen tabellierten Parametern wird im nachfolgenden Diagramm dargestellt.

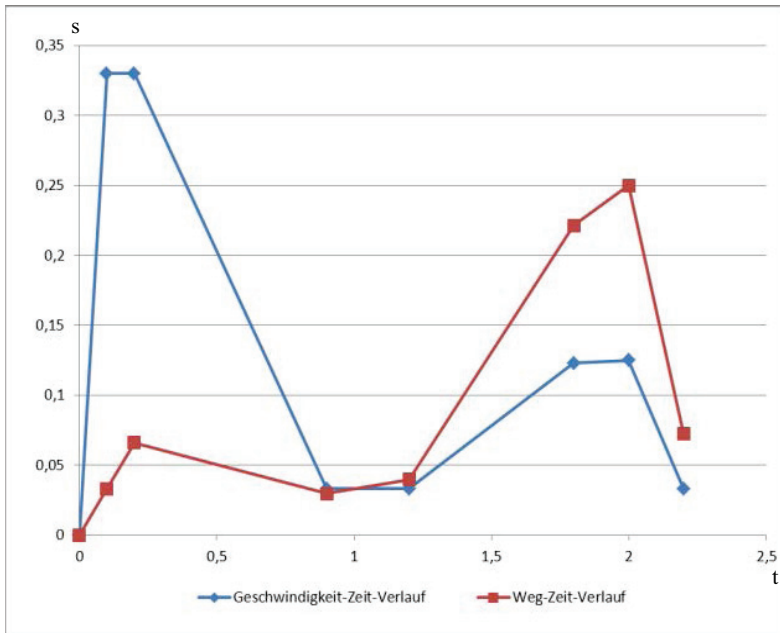


Abb. 4.16: Funktionsverlauf 2 für die mechanische Schwerpunktverschiebung

Diese Verläufe werden für die praktischen Versuche verwendet und in den Versuchsplan integriert. Damit steht die Basis für den Start der experimentellen Prüfungen bereit. Weiterhin sind die zu variierenden Faktoren für die Funktionsuntersuchung festzulegen.

4.5 Praktische Funktionsuntersuchungen

Mit DoE (Design of Experiments) wird ein zielführendes Verfahren ausgewählt, das mit möglichst geringem Aufwand aussagekräftige Informationen über die Funktion und Zuverlässigkeit generiert /WAL 11b/.

Um eine gute Abschätzung für die Funktionsuntersuchung der verschiedenen Bauteile mit einem wirtschaftlich vertretbaren Prüfaufwand zu erlangen, erfolgt die praktische Untersuchung unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten mithilfe eines ausgewählten Versuchsplans.

Für den Aufbau des Versuchsplans werden zunächst die zu untersuchenden Faktoren definiert, und der Sinusverlauf wird um die Frequenz 0,85 Hz erweitert.

Tab. 4.15: Faktoren für den Funktionstest auf zwei Stufen

Faktoren		Stufe 1 (+)	Stufe 2 (-)
X ₁	Spindelsteigung	20 mm	50 mm
X ₂	Mechanische Anbindung	A	B
X ₃	Masse	Lenkstütze (L)	Lenkstütze + 10 Kg (L + 10 kg)
X ₄	Federkraftbremse	mit	ohne
X ₅	Verfahrweg (Sinus: Amplitude)	360°	720°
X ₆	Verfahrgeschwindigkeit (Sinus: Frequenz)	0,25 Hz	0,85 Hz
X ₇	Böschungswinkel / Steigung	0°	8°

Derzeit ist eine Auswahl bezüglich der Spindelsteigung für die Ausbalancierung des Fahrzeuges nicht exakt definiert. Aus diesem Grund werden auf dem Prüfstand unterschiedliche Spindelsteigungen von 50 mm und 20 mm getestet, um dessen Funktionalität im Zusammenhang mit den anderen Bauteilen zu untersuchen.

Für die mechanische Verbindung zwischen Lenkstütze und Spindeltrieb gibt es zwei verschiedene Lösungsmöglichkeiten. Diese dienen der Übertragung der axialen Kraft-richtung zwischen dem Spindeltrieb und dem Fahrwerk. Um während der Untersuchung der mechanischen Verstellung auch die Differenz unterschiedlicher Massen zu berücksichtigen, werden entsprechende Gewichte an der Lenkstütze befestigt.

Die Federkraftbremse übernimmt die sicherheitstechnische Funktion, den Spindeltrieb bei einem elektronischen Ausfall gegen unkontrollierbares Verfahren der Spindel ohne Selbsthemmung zu sichern. Deshalb wird die Bremse in das Testverfahren integriert. Der gesamte Mechanismus muss auch bei wechselnder Schrittmotordrehzahl einwandfrei funktionieren.

Im zukünftigen Einsatzgebiet des Fahrzeuges ist mit großen Böschungswinkeln bis circa 10° zu rechnen. Somit ist es zur Stabilisierung des Fahrzeuges essenziell, dass die gesamte Verstellung ohne Störungen jeglicher Art zuverlässig funktioniert.

Zur Durchführung eines Funktionstests gibt es mehrere mögliche Versuchspläne. Besonders geeignet für insgesamt 7 Faktoren ohne Zufallsstreuung und zur vollständigen Erfassung potenziell kritischer Kombinationen wird nach /KLE 08/ folgender fraktioneller faktorieller Versuchsplan herausgefiltert und verwendet.

Tab. 4.16: Versuchsplan 2^{7-4} modifiziert nach /KLE 14b/ 2^{7-4} -Plan

Exp. Nr.	I	Spalten-Nr.						
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+

Dieser 2^{7-4} -Plan mit insgesamt 8 Faktorstufenkombinationen kann eine Testabdeckung von 90 % der Drei-Faktor-Kombinationen und 50 % der Vier-Faktor-Kombinationen erfassen /KLE 08/.

Mithilfe des Versuchsplans (s. Tab. 4.16) und der identifizierten Parameter mit ihren jeweiligen Einstellungen (s. Tab. 4.17) konnte der praktische Funktionstest mit der mechanischen Anbindung A erfolgreich durchgeführt werden, da das Ergebnis $y \geq 7$ für diese Versuchsreihen erfüllt ist. Alle Versuchsreihen wurden hinsichtlich Funktionalität in einer Skala zwischen 1-10 qualitativ bewertet.

Tab. 4.17: Versuchsplan für die Funktionsuntersuchung des Prüfaufbaus mit dem Ergebnis y .

Nr.	Spindelsteigung	Mechanische Anbindung	Masse	Federkraftbremse	Amplitude	Frequenz	Steigung	Funktion
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	y
1	50	B	L + 10 kg	mit	720	0,25	8	3
2	20	B	L + 10 kg	ohne	320	0,25	0	5
3	50	A	L + 10 kg	ohne	720	0,85	0	9
4	20	A	L + 10 kg	mit	320	0,85	8	8
5	50	B	L	mit	320	0,85	0	5
6	20	B	L	ohne	720	0,85	8	2
7	50	A	L	ohne	320	0,25	8	8
8	20	A	L	mit	720	0,25	0	9

Die vorherigen Untersuchungen konnten erfolgreich beendet werden. Weitere Untersuchungen zur mechanischen Schwerpunktverschiebung werden nachfolgend mit der

Anbindung A geplant und durchgeführt. Wegen des dynamischen Fahrverhaltens des Fahrzeuges, z. B. beim Anfahren, Bremsen und bei Steigungsfahrten, werden Weg-Zeit-Diagramme (s. Abb.: 4.15 und Abb.: 4.16) erarbeitet, um unterschiedliche Verfahrwege in verschiedenen Zeiten axial zu verstellen, was der Realität nahekommt.

Im nächsten Ansatz ist zu untersuchen, inwieweit die Steigung und der Einsatz einer zusätzlichen Masse das Fahrverhalten funktional beeinflussen. Dazu ist es wichtig, unterschiedliche Massen und Steigungen zu verfahren, zusätzlich im Zusammenhang mit verschiedenen zeitabhängigen Verfahrwegen.

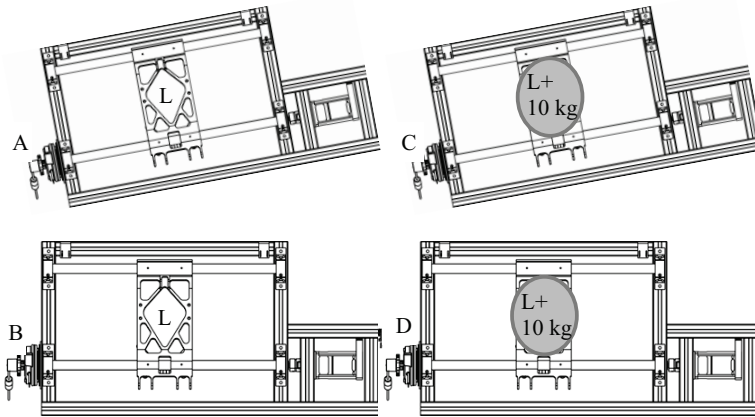


Abb. 4.17: Vier Untersuchungsszenarien in der Erstinbetriebnahme des Prüfstands

Bezüglich der Faktoren und der Variation der Versuche ist ein Versuchsplan unter Berücksichtigung der verschiedenen Funktionsverläufe aufzustellen.

Tab. 4.18: 2^3 -Versuchsplan für die Funktionsanalyse der Untersuchungsszenarien, erfüllt ab Funktion ≥ 7

Nr.	Steigung	Masse	Funktionsverlauf (Weg-Zeit-Diagramme)	Funktion
1	Bild B (ohne)	L	1	9
2	Bild D (ohne)	L+ 10 kg	2	8
3	Bild A (mit)	L	2	8
4	Bild C (mit)	L + 10 kg	1	7

Das mechanische System hat die Untersuchungen funktional erfüllt, sodass der Einbau in das Fahrzeug erfolgen kann.

4.6 Testplanungen für dynamische Belastungsprüfungen

In diesem Abschnitt werden die zu untersuchenden Prüfscenarien für die zukünftigen Prototypen erarbeitet. Die wichtigsten mechanischen Systeme im Fahrzeug sind das Fahrwerk und die mechanische Schwerpunktverschiebung, die die Kräfte und Momente auf den Leichtbaurahmen dynamisch oder quasistatisch aufgrund der geringen Geschwindigkeiten übertragen.

Die resultierenden Kräfte aus der mechanischen Schwerpunktverschiebung für die Fahrzeugstabilisierung können bestenfalls in Feldversuchen untersucht werden. Für die ersten Fahrversuche ist zu diesem Zeitpunkt wichtig, dass die tragenden Bauteile und Systeme zuverlässig halten und nicht frühzeitig ausfallen. Um dieses Ziel zu erreichen, wird ein Prüfplan bereitgestellt, der für die Untersuchungen im Labor zur Verfügung steht. Um den Versuchsablauf optimal vorzubereiten, wird mithilfe der FEM-Analyse eine Festigkeits- und Schwachstellenanalyse durchgeführt und bewertet. Daraus resultiert die Erkenntnis, dass die Anbindung zwischen Lenkstütze und Spindelmutter ein wesentliches kritisches Bauteil darstellt. Die Verschiebung des Schwerpunktes erfolgt dabei auf einer Seite über insgesamt vier Stifte, die die axiale Kraft des Schrittmotors für die Schwerpunktverschiebung übertragen. Ein Bruch eines solchen Stiftes führt zum Ausfall des Gesamtsystems.

Die Prüfbedingungen sollten als „Success-Run“ geplant werden, sodass mehrere mechanische Anbindungen gefertigt werden und stichprobenartig im Labor auf eine definierte Zuverlässigkeit untersucht werden – möglichst ohne Ausfall, damit die Erkenntnisse im Rahmen der Projektlaufzeit übernommen werden können.

Wenn z. B. ein End-of-Life-Test durchgeführt wird, könnte die Versuchsdauer bis zu mehreren Monaten andauern. Daher ist für den ersten Ansatz zur Zuverlässigkeitsuntersuchung eine Methode gefragt, mit der zeitnah brauchbare Ergebnisse ermittelt werden können.

Um den praktischen Versuch wirtschaftlich und bezüglich des zeitlichen Aufwandes für die Erstinbetriebnahme des Fahrzeuges überschaubar zu halten, stehen für den praktischen Versuch maximal 3 Prüflinge zur Verfügung.

Vorab ist die maximale axiale Kraft vom Interesse, die mit dem Schrittmotor erreicht werden kann. Es ist bekannt, dass der Motor ein maximales Moment von 10 Nm aufbringen kann. Demnach lässt sich die axiale Kraft nach Herstellerspezifikationen in Abhängigkeit von der Steigung P der Spindel wie folgt berechnen.

$$F_a = \frac{M \cdot 2\pi \cdot 1000}{P} \quad (4.15)$$

Es stehen zwei verschiedene Steigungsalternativen zur Verfügung. Nutzt man die Spindel mit der 50er-Steigung, kann eine hohe Beschleunigung erfolgen, aber mit $F_a = 1,3$ KN nur eine relativ kleine Kraft übertragen werden. Die Spindel mit der 20er-Steigung überträgt hingegen eine größere axiale Kraft mit $F_a = 3,1$ KN, aber auf Kosten einer geringeren Beschleunigung.

Der Fall der maximalen Beschleunigung tritt auf, wenn das Fahrwerk verschoben wird, also die kleinste bewegliche Masse am Fahrzeug. Das gesamte Fahrwerk mit Reifen und Felge wiegt zusammen mit dem wassergekühlten Antriebsmotor circa 49 kg. Daraus ergibt sich die lineare Beschleunigung.

$$a = \frac{F_a}{m} \quad (4.16)$$

Somit erhält man mit der 20er-Steigung eine Beschleunigung von circa 63 m/s^2 und mit der 50er-Steigung eine Beschleunigung von circa 26 m/s^2 .

Bekannt ist weiterhin, dass die Lager der Spindel maximal 1,75 kN ertragen können. Das bedeutet: Wenn der Spindelantrieb mit der 20er-Steigung in Zusammenhang mit dem aktuellen Schrittmotor eingesetzt wird, dann könnte das Lager das schwächste Glied im System der mechanischen Verschiebung sein.

Nutzt man hingegen den Spindelantrieb mit der 50er-Steigung, werden maximal 1,3 kN in axialer Richtung beansprucht. Somit ist die maximal aufnehmende Kraft der Lager kleiner. Vorteilhaft ist es daher, die 50er-Spindel im ersten Demonstrator zu verbauen. Die daraus resultierende axiale Kraft wird zur weiteren Auslegung verwendet.

Damit die Zuverlässigkeit auf Basis einer vorgegebenen Lebensdauer abgeschätzt werden kann, erfolgt die weitere Vorgehensweise aufgrund der Formeln nach /VDA 00/; /MEY 03/.

$$R(t) = e^{-\alpha \cdot t^b} = (1 - P_A)^{\frac{1}{n}} \quad (4.17)$$

Um die Mindestanzahl an Prüflingen n zu bestimmen, wird die sog. Bayes-Formel entsprechend umgestellt.

$$n = \frac{\ln(1 - P_A)}{\ln R(t)} \quad (4.18)$$

In diesem Fall besteht weiterhin die Anforderung, die Testdauer im Laborbetrieb zu verkürzen, ohne Abstriche an der Mindestzuverlässigkeit bzw. beim Vertrauensbereich hinzunehmen. Dieses Ziel lässt sich über die Formeln

$$R(t)_{\text{Labor}} = R(t) \cdot \left(\frac{t_{\text{Labor}}}{t} \right)^b = e^{-\alpha \cdot t^b \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{Labor}}} \right)^b} \quad (4.19)$$

erreichen.

Bei dem bekannten Weibull-Parameter b kann die Testdauer unter Berücksichtigung der Prüfanzahl im Labor über

$$\frac{t_{\text{Labor}}}{t} = \left(\frac{n}{n_{\text{Labor}}} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (4.20)$$

berechnet werden.

Damit der Stichprobenumfang über die geforderte Lebensdauer mit einer definierten Überlebenswahrscheinlichkeit und dem Vertrauensintervall berechnet werden kann, folgt aus der Formel (4.18):

$$n = \frac{\ln(1 - P_A)}{\ln R(t)} = \frac{\ln(1 - 0,90)}{\ln(0,46)} = 2,97 \quad (4.21)$$

Bei 3 Stichproben konnte in diesem Test eine Zuverlässigkeit von 46 % erreicht werden, bei einer hohen Aussagewahrscheinlichkeit von 90 %.

Diese Stichprobenanzahl ist aufgrund des Ergebnisses nicht empfehlenswert, da die Abweichung von der konkreten Lösung erst bei steigendem Stichprobenumfang n geringer wird. Dieser Ansatz liefert konservative Abschätzungen, mit denen man hinsichtlich der praktischen Anwendung auf der sicheren Seite liegt /MEY 03/.

Auch mithilfe des sogenannten Larson-Nomogramms kann die erwartete Zuverlässigkeit in Bezug auf die maximale Verfügbarkeit von $x = 3$ Proben abgelesen werden. Fällt eine der drei Proben aus, reduziert sich die Zuverlässigkeit. Das folgende Diagramm zur Bestimmung der Zuverlässigkeit im Success Run liefert approximativ eine ähnliche Mindestzuverlässigkeit mit 48 % bei 3 Stichproben.

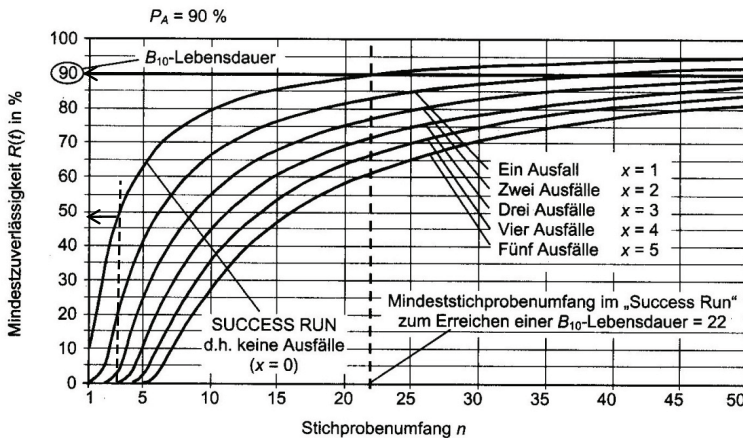


Abb. 4.18: Mindestzuverlässigkeit im Lebensdauerversuch modifiziert nach /KLE 14/

Bei einer vordefinierten Zuverlässigkeit von 90 % ergibt sich für die Lebensdauer folgender Stichprobenumfang.

$$n = \frac{\ln(1 - P_A)}{\ln R(t)} = \frac{\ln(0,1)}{\ln(0,90)} = 21,85 \quad (4.22)$$

Es sind nach dieser Berechnung 22 Proben notwendig, um eine Mindestzuverlässigkeit von 90 % abzusichern. Letztendlich ist zu entscheiden, ob z. B. die Stichprobenzahl erhöht wird, um die Prüfdauer zu reduzieren.

Das konzipierte Elektrofahrzeug ist für Langstrecken nicht vorgesehen, daher wird eine Lebensdauer von 50.000 km angenommen. Die Mindestzuverlässigkeit soll 90 % betragen. Aus der Badewannenkurve resultiert der Wert 1,6 für den Weibull-Parameter b .

Die Frage, die sich stellt, lautet, wie hoch die Lebensdauer im Laborversuch sein muss, um mit 3 Proben die Mindestzuverlässigkeit ohne Ausfall zu erreichen, und zwar mit einer maximalen Last von 1,3 KN, die an der mechanischen Verstellung während des Testvorgangs nach Möglichkeit wirken soll.

Dazu resultiert der Zusammenhang:

$$\left(\frac{t_{\text{Labor}}}{t}\right)^b = \frac{\ln(1 - P_A)}{n_{\text{Labor}} \cdot \ln R(t)}. \quad (4.23)$$

Umstellen nach t_{Labor} ergibt:

$$t_{\text{Labor}} = b \sqrt[b]{\frac{\ln(1 - P_A)}{n \cdot \ln R(t)}} \cdot t = 1,6 \sqrt[3]{\frac{\ln(0,1)}{3 \cdot \ln(0,9)}} \cdot 50.000 \text{ km} = 172.974 \text{ km}. \quad (4.24)$$

Daraus resultiert, dass im Testversuch die mechanische Anbindung mit 3 Proben 172.974 km ohne Ausfall getestet werden muss, um eine Zuverlässigkeit von 90 % zu erzielen. Daraus resultiert eine Prüfzeit von 314 Tagen bei einer Geschwindigkeit von 23 km/h.

Auf Grundlage der Annahme, dass die mechanische Anbindung ausschließlich für den Demonstrator, also nur für die nicht serienreifen Testfahrten, mit derselben Zuverlässigkeit halten soll, kann z. B. eine Mindestlebensdauer von 300 km statt 50.000 km für die Fahrversuche abgeschätzt werden. Für diesen Fall ergibt sich eine Testdauer t_{Labor} ohne Ausfall mit den gleichen Randbedingungen von 46 Stunden mit einer Teststrecke von 1.038 km. Mit dieser Reduzierung der Lebensdauer für den Demonstrator kann die Prüfdauer deutlich verkürzt werden.

Ein weiterer Vorteil bestünde darin, dass diese Zuverlässigkeit wahrscheinlich völlig ausreicht, um die tatsächlichen Kräfte im Feldversuch ermitteln zu können, sodass anschließend mit diesen validierten Lastannahmen die Lebensdauer der mechanischen Anbindung beispielsweise auf 50.000 km – z. B. für den Serienanlauf – erhöht werden kann.

Für diesen nächsten Entwicklungsschritt soll beispielsweise aus wirtschaftlichen Gründen eine Zuverlässigkeit von 80 % bei einer Kilometerlaufleistung von 50.000 km erzielt werden.

$$n = \frac{\ln(1 - P_A)}{\ln R(t)} = \frac{\ln(0,2)}{\ln(0,8)} = 7,21 \quad (4.25)$$

Somit sind 8 Proben nötig, um die Zuverlässigkeitsbedingungen zu erfüllen. Um die Prüfzeit im Labor mit den Felddaten zu verkürzen, wird die Anzahl der Proben auf 25 erhöht.

$$\frac{t_{\text{Labor}}}{t} = \left(\frac{n}{n_{\text{Labor}}}\right)^{\frac{1}{b}} = \left(\frac{8}{25}\right)^{\frac{1}{1,6}} = 0,49 \quad (4.26)$$

Das bedeutet, die Prüfzeit kann durch die Erhöhung der Prüfteile um 51 % verkürzt werden.

$$t \cdot 0,49 = 24.500 \text{ km} \quad (4.27)$$

Für die Fahrwerksentwicklung wird ebenfalls ein durchführbares Prüfzenario zur Lebensdauerabschätzung vorgeschlagen.

Nach der Auslegung und Funktionsweise des Fahrwerks /MÜL 12/, wird die Kräfteübertragung im ersten Ansatz zwischen einem realen Versuch und einem Simulationsmodell verglichen. Dazu wird ein Prüfstand mit dem entwickelten Fahrwerk aufgebaut und eine Sinusschwingung initiiert. Die resultierenden dynamischen Kräfte in den Bauteilen werden mit Kraftmessdosen aufgenommen und gespeichert. Nach der vergleichenden Auswertung der Simulations- und der realen Prüfstandergebnisse konnte das Fahrwerk mit einer akzeptablen Abweichung von circa 10 % validiert werden /MÜL 13a/.

Auf Basis dieser validierten Erkenntnisse kann das Fahrzeug weiter aufgebaut werden. Sobald der endgültige Gesamtschwerpunkt mit den entsprechenden Lasten und Trägheitsmomenten abgeschätzt werden kann, ist es möglich, simulative Test- und Steigungsfahrten durchzuführen. Um über die Lebensdauer des Fahrwerkes erste Abschätzungen zu ermitteln, sind aus den Fahrergebnissen sogenannte Kraft-Zeit-Verläufe zu speichern und auszuwerten.

Wenn diese Verläufe als Amplitudenkollektiv dargestellt werden, ist es möglich, die Ergebnisse in das FEM-Programm CATIA für die lineare Berechnung des Fahrwerks einzulesen.

Die daraus resultierenden Spannungsergebnisse werden in das Lebensdauerprogramm FEMFAT integriert, woraus mittels Schädigungsrechnung nach Miner die erste Lebensdauerabschätzung resultiert, da eine nichtlineare Schädigung des Werkstoffes nicht bekannt ist.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse sollte nach Möglichkeit ein wirtschaftliches Prüfzenario erarbeitet werden, mit dem ein erster Ansatz zur Validierung erfolgen kann. Aufgrund der verfügbaren Ressourcen steht allerdings nur ein Fahrwerk für den Lebensdauerertest zur Verfügung.

Für das Fahrwerk soll die Lebensdauer ebenfalls 300 km betragen für deren Erstinbetriebnahme des Fahrzeuges im Feld. Die Zuverlässigkeit bzw. Überlebenswahrscheinlichkeit beträgt 80 % bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 80 %. Um dieses Ziel zu erreichen, sind insgesamt 8 Systeme ohne Ausfall zu prüfen. Bezüglich eines Fahrwerksystems stellt sich die Frage nach der notwendigen Prüfzeit ohne Ausfall, die dadurch erhöht werden muss, ohne die Zuverlässigkeit von 80 % zu mindern. Die Formel dazu lautet modifiziert nach /RON 12/:

$$n = \frac{1}{\left(\frac{t_{\text{Labor}}}{t}\right)^b} \cdot \left[\frac{\ln(1 - P_A)}{\ln R(t)} \right] \quad (4.28)$$

Umgestellt nach t_{Labor} ergibt sich für $n = 1$,

$$t_{\text{Labor}} = \left[\frac{1}{n} \cdot \frac{\ln(1 - P_A)}{\ln R_t} \right]^{\frac{1}{b}} \cdot t = \left[\frac{\ln(0,2)}{\ln(0,8)} \right]^{1,6} \cdot 300 \text{ km} = 1,031 \text{ km}. \quad (4.29)$$

Falls die Prüfung mit dem Fahrwerk ausfällt und mindestens eine Fahrstrecke von 1.031 km übersteht, können die Zuverlässigkeitsabschätzungen vorerst angenommen werden für 1 Prüfling.

Ist die zu prüfende Zeit in Stunden relevant, kann mithilfe der maximalen Geschwindigkeit des Fahrzeuges mit 20 km/h umgerechnet werden, sodass eine zu prüfende Lebensdauer von 52 Stunden resultiert.

Sollte das Fahrwerk unerwartet vorher ausfallen, wird die Lebensdauer entsprechend kürzer, wenn die Zuverlässigkeitsanforderungen konstant bleiben. Fällt das Fahrwerksystem beispielsweise bereits bei einer Prüfstrecke von 700 km statt bei 1.031 km aus, resultiert nach der Rückrechnung mit der Formel 4.29 eine Lebensdauer von 10,2 Stunden.

Aufgrund von Fahrversuchen im Feld mit dem Demonstrator können durch das Applizieren von Dehnungsmessstreifen an den kritischen Stellen reale Daten ermittelt werden. Mit diesen Ergebnissen können Lebensdauerersuche des Fahrwerks beispielsweise für 50.000 km erfolgen. Aus wirtschaftlichen Gründen kann eine Lebensdauer von 45.000 km mit 10 Prüflingen geprüft werden. Die Zuverlässigkeit beträgt 80 % mit dem Formparameter 3,50.

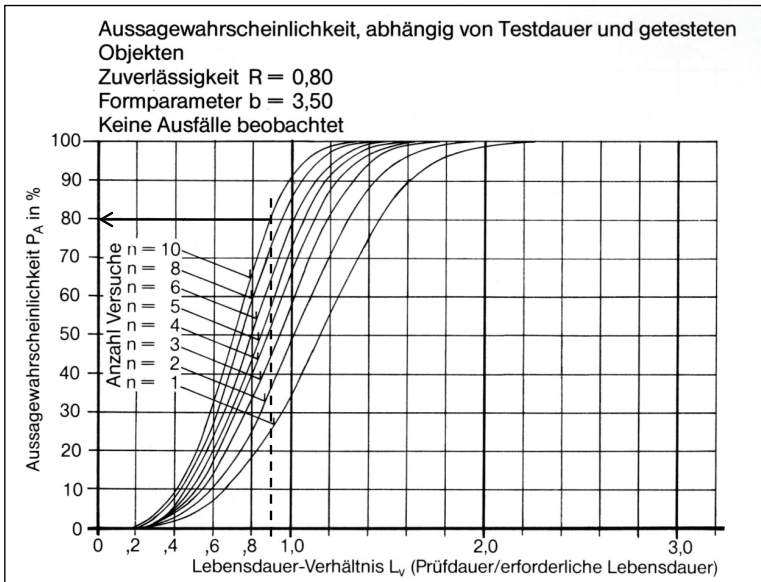


Abb. 4.19: Abschätzung der Aussagewahrscheinlichkeit, modifiziert nach /KLE 14/

Mit diesen Werten lässt sich eine Aussagewahrscheinlichkeit von 81 % ablesen. Ist allerdings das Bestreben, die Aussagewahrscheinlichkeit mindestens auf 90 % zu erhöhen, muss entweder die geplante Lebensdauer von 50.000 km auf 45.000 reduziert oder die Prüfdauer, in der keine Ausfälle erfolgen sollten, auf 50.000 km verlängert werden, um das Lebensdauerverhältnis auf 1,0 zu erhöhen.

Das Larson-Nomogramm kann verwendet werden, wenn mindestens zwei Prüflinge bereitstehen und das Ausfallverhalten einer Binominalverteilung entspricht. Sind

beispielsweise 20 Proben vorhanden und es würden im Testverlauf 2 Proben ausfallen, könnte eine Zuverlässigkeit von 75 % mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von nahezu 90 % erzielt werden /KLE 14/.

Damit für das Fahrwerk in etwa eine Zuverlässigkeit von 52 % erzielt werden kann, sollten mindestens 2 Proben ohne Ausfall geprüft werden. Die Aussagewahrscheinlichkeit liegt dann bei 71 %.

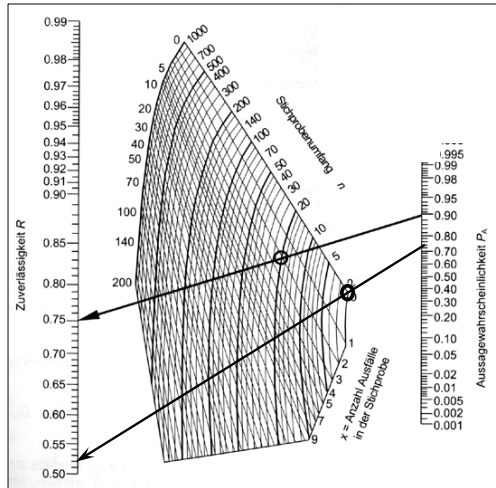


Abb. 4.20: Larson-Nomogramm zur Abschätzung der Zuverlässigkeit bzw. der Aussagewahrscheinlichkeit modifiziert nach /KLE 14/

Das Fahrwerk ist mit der Entwicklung und der Funktionsprüfung abgeschlossen. Mithilfe der Lebensdauerabschätzung mittels FEMFAT ist zu untersuchen, welches Prüfzenario für eine Probe aus den Erkenntnissen abgeleitet werden kann, um zumindest im ersten Ansatz zu untersuchen, ob die simulativen Ergebnisse mit den praktisch erzielten Ergebnissen übereinstimmen.

Das Besondere an FEMFAT ist, dass die Berechnungsergebnisse integriert werden können und dass durch die Eingabe von Werkstoffdaten und Belastungskollektive die Zeitfestigkeit abgeschätzt werden kann. Somit erhält man eine simulative Lebensdauerabschätzung bezüglich des Fahrwerks mit einer ersten praktischen Validierung zur Plausibilität dieser Ergebnisse.

Weiterhin ist es während der Inbetriebnahme des Fahrzeuges ratsam, an den ermittelten Schwachstellen sogenannte Dehnungsmessstreifen zu applizieren. Somit kann man die resultierenden Beanspruchungen untersuchen und auswerten. Dazu ist es ratsam zu prüfen, wie groß die Abweichung aus dem Laborversuch zu den in der Realität gewonnenen Messdaten ist, damit diese Ergebnisse aus dem Laborversuch eventuell weiter genutzt werden können. Andernfalls sind die Daten den realen Testfahrten zu entnehmen, um somit die Lebensdauerergebnisse entsprechend zu modifizieren.

Dazu sollten das Testgelände und die tatsächlich geforderte Zuverlässigkeit bereits während der Projektplanung definiert werden, um die Ziele möglichst zeitnah zu erreichen.

4.7 Experimentelle Schädigungsuntersuchungen

Die praktischen und simulativen Untersuchungen sind wichtig, um erste Erkenntnisse bezüglich der Werkstoffkenndaten und des Schädigungsverhaltens abzuschätzen. Die Untersuchungen beruhen auf unterschiedlichen Bauteilen, die für den Fahrzeugrahmen vorgesehen sind.

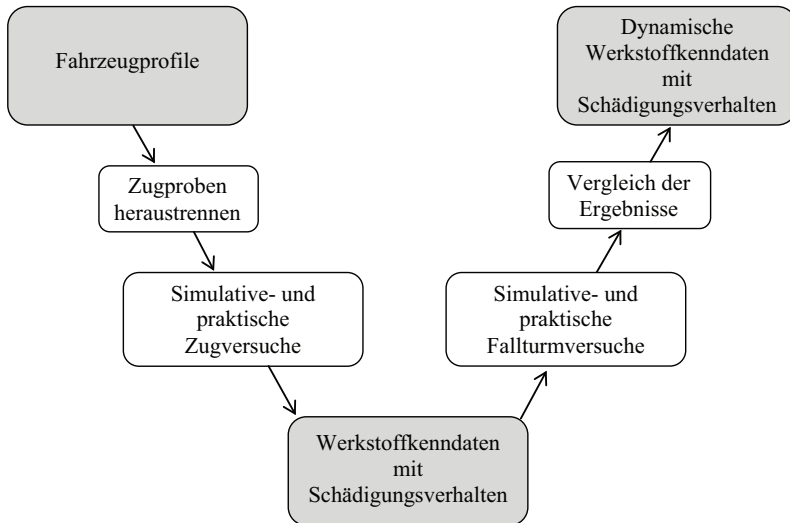


Abb. 4.21: Verfahren zur Abschätzung der Werkstoffkenndaten mit Schädigung

Zuerst werden Fahrzeugprofile (d. h. Strangpressprofile) bereitgestellt, aus denen die Zugproben herausgetrennt werden. Mit diesen Proben werden Zugversuche zur Ermittlung der Werkstoffkenndaten durchgeführt. Anschließend werden diese Kenndaten in die Simulation integriert und mit den physischen Zugproben qualitativ verglichen. Um den Probenbruch in der Simulation zu realisieren, wird die Schädigung abgeschätzt.

Mit ergänzenden Fallturnversuchen wird das Werkstoffverhalten der Fahrzeugprofile untersucht. Auf Basis dieser Prüfungen werden die Ergebnisse mit der Simulation verglichen, um auch dynamische Werkstoffparameter abzuschätzen.

Andererseits wird eine neuartige mechanische Anbindung auf Schädigung untersucht. Diese Baugruppe ist für die mechanische Stabilisierung des Fahrzeuges höchst relevant, da sie auch einen sicherheitsrelevanten Beitrag besitzt. Besonders aus diesem Grund wird im ersten Ansatz untersucht, an welcher kritischen Stelle Schädigungen vorkommen können.

Diese neuen Erkenntnisse fließen in den Entwicklungsprozess mit ein, um die Schwachstellen noch vor der erneuten Fertigstellung der mechanischen Anbindung soweit wie möglich zu berücksichtigen.

4.7.1 Ermittlung der Werkstoffdaten AL 6063 T66

Die Werkstoffkenndaten sind für weitere Untersuchungen bzw. Berechnungen hinsichtlich der Festigkeit und Steifigkeit des Fahrzeugrahmens elementar. Um die Geometrie des Fahrzeugrahmens zu berücksichtigen, werden DIN-gerechte Proben gemäß Form H aus zwei Profilen entnommen und quasi-statisch bis zum Bruch untersucht.

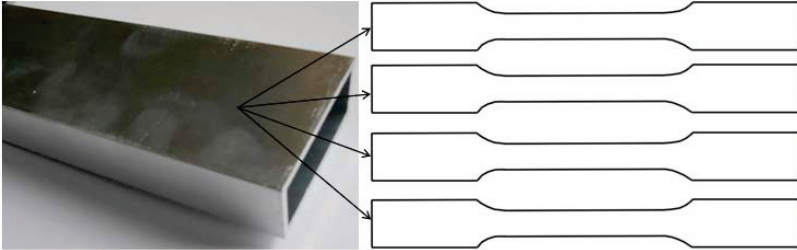


Abb. 4.22: Proben aus der Profilgeometrie nach /DIN 50125/

Mit der Zugprüfmaschine werden diese Proben mit einer Kraft-Weg-Messung sukzessiv bis zum Versagen belastet. Mit diesen Kenndaten wurde die Probe auch simulativ gebrochen. Die folgende Darstellung zeigt die Gegenüberstellung der simulativen und praktischen Zugproben.

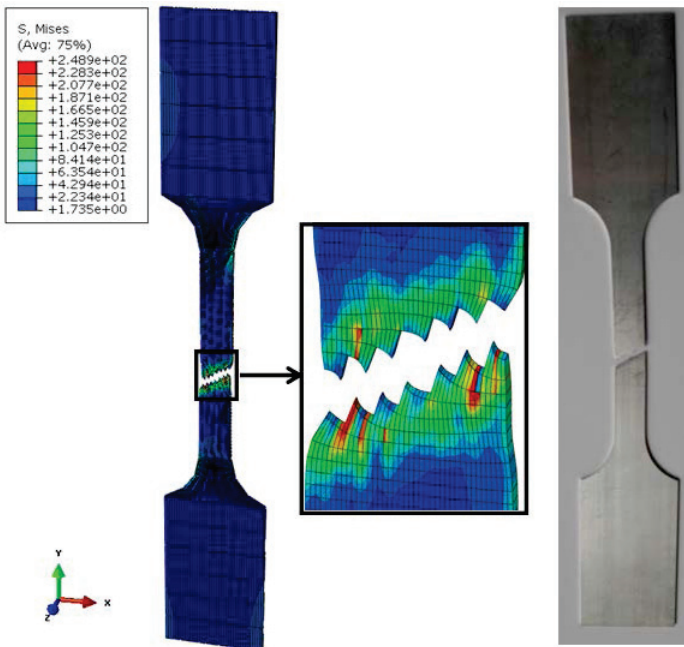


Abb. 4.23: Vergleich zwischen realen und simulativen Zugversuch

Danach werden beide Spannungs-Dehnungs-Verläufe gegenübergestellt, um die Streuung der Versuche hinsichtlich der Verwendbarkeit der Daten darstellen zu können.

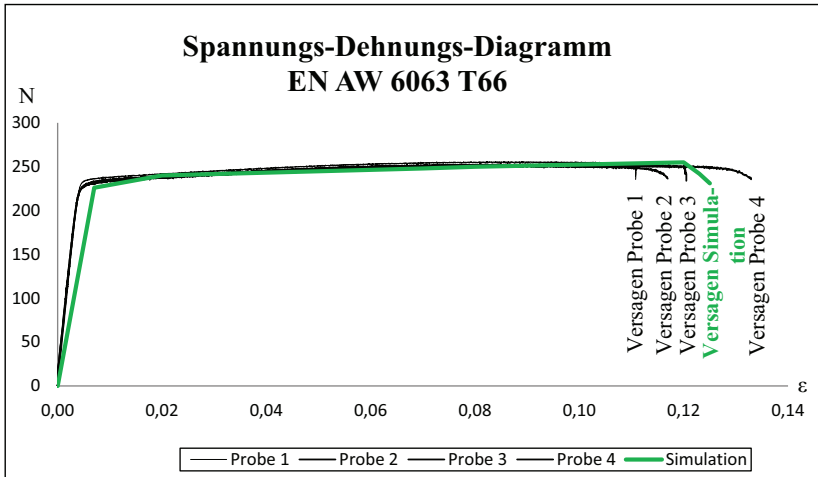


Abb. 4.24: Validierung der Zugversuche mit 4 Zugproben und der Simulation

Die Unterschiede zwischen der numerischen Simulation und der experimentellen Zugversuche werden besonders im Verlauf der hookeschen Geraden und beim Versagen der Proben bzw. der Simulation verdeutlicht.

Für weitere Berechnungen werden diese Spannungen umgerechnet, sodass man sowohl die wahre Dehnung als auch die wahre Spannung erhält. Daraus folgen die nachfolgend aufgeführten Werte.

Tab. 4.19: Materialdaten EN AW 6063 T66 für Berechnungen mit Abaqus

Wahre Dehnung	Wahre Spannung (MPa)
0	0
0,0069	227,6
0,0198	244,8
0,0676	265,4
0,0769	270,0
0,1133	285,6

Mit diesen Ergebnissen können erste Annahmen abgeschätzt werden, inwieweit die dynamische Simulation mit den praktischen Fallturmversuchen übereinstimmt. Um die anfänglich Abweichung zwischen dem praktischen und simulativen dynamischen Fallturm-

versuch zu verringern bzw. qualitativ anzupassen, wurden in /RÜT 13/ weitere dynamischen Untersuchungen durchgeführt.

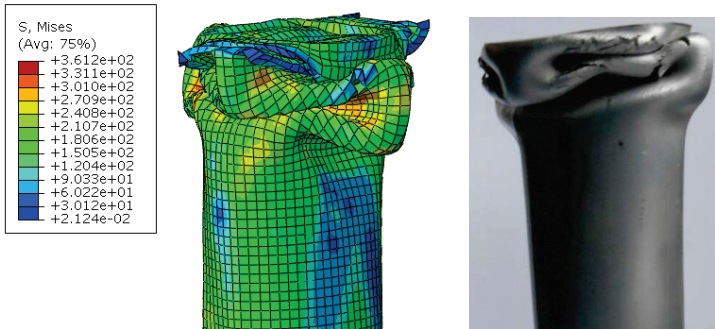


Abb. 4.25: Abgleich der Stauchversuche und der numerischen Simulation

Aus den Erkenntnissen des Zugversuches sind die entstandenen Werkstoffdaten bei einer relativ geringen Dehnrate aufgenommen worden. Bei einem Fallturmversuch hingegen existiert eine höhere Dehnrate, die zusätzlich abgeschätzt werden sollte. In /RÜT 13/ wurden weitere Profile simulativ hinsichtlich der Abschätzung der Dehnrate und mit dem Schätzwert 1,3 erweitert untersucht, ausgehend von der wahren Spannung, um die Ergebnisse der Simulation dem praktischen Versuch anzugleichen. Aus den Versuchen folgte die modifizierte Materialkarte.

Tab. 4.20: Erhöhung der wahren Spannung mit einem Schätzwert 1,3 nach /RÜT 13/

Wahre Dehnung	Wahre Spannung (MPa)	Wahre Spannung mit Dehnratenabhängigkeit (MPa)
0	237,007	308,11
0,002	242,898	315,767
0,004	247,164	321,313
0,006	248,164	332,289
0,008	251,16	326,508
0,01	251,987	327,584
0,02	263,516	342,571
0,06	280,881	365,145
0,09	290,137	377,179
0,095	293,436	381,468
1,2	296	390

Weitere Schädigungsuntersuchungen erfolgen anhand eines dynamischen Drei-Punkt-Biegeversuchs.

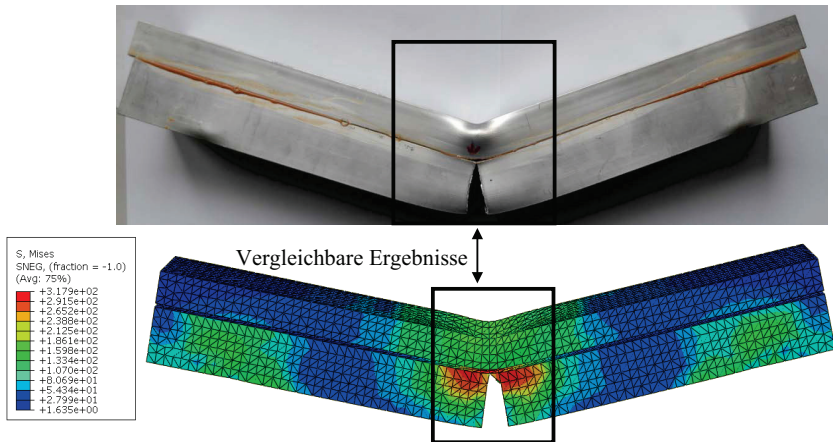


Abb. 4.26: Vergleich der Schädigung an Profilkombination A

Die qualitative Bewertung beider Ergebnisse bezüglich des Risses und der Deformation zeigt eine ausreichend gute Übereinstimmung. In diesem Fall liegen gesicherte Werkstoffdaten für die verwendeten Aluminiumlegierungen vor, sowohl für die dynamischen als auch für die quasi-statischen Berechnungen. Weitere Berechnungen sind stets auf Plausibilität zu prüfen bzw. ggfs. unter realen Bedingungen zu validieren.

4.7.2 Mechanische Anbindung für die Schwerpunktverschiebung

Bauteile müssen häufig in Fahrzeugen, Maschinen oder Anlagen statische und dynamische Belastungen aufnehmen können. Um dabei das Risiko eines Materialversagens zu minimieren, sollten die kritischen Komponenten getestet und bezüglich des Bruchverhaltens bewertet werden.

An einem Bauteil kann im schlimmsten Fall ein unerwarteter Bruch auftreten, der zum Versagen der Funktionalität führen kann und dadurch ein großes Risikopotenzial beinhaltet. Aus diesem Grunde ist fallweise die Theorie der Bruchmechanik zu verwenden, die sich im Allgemeinen in zwei Bereiche aufteilen lässt /MIK 05/:

- *Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM)*

Damit werden Rissprobleme untersucht, bei denen das Verformungsverhalten im gesamten Gebiet entsprechend dem verallgemeinerten Hookeschen Gesetz als linear-elastisch angenommen wird. Abgesehen von sehr spröden Werkstoffen gibt es in fast allen Strukturen materialspezifische und geometrische Nichtlinearitäten, besonders im Bereich von Kerben und Risspitzen. In vielen Fällen sind die nichtlinearen Effekte auf kleine Bereiche begrenzt, sodass sie im Vergleich zur Rissgröße oder den Bauteilabmessungen vernachlässigt werden dürfen /KUN 08/.

- *Fließbruchmechanik (FBM)*

Die Methoden der Fließbruchmechanik werden eingesetzt, wenn die plastische Zone vor der Rissspitze im Vergleich zu den Proben- oder Rissabmessungen nicht ausreichend klein ist, um die linear-elastische Bruchmechanik anwenden zu können /RÖS 12/.

Die linear-elastische Bruchmechanik kann über das Spannungsintensitäts-(K-)Konzept beschrieben werden, und bei elastisch-plastischem Werkstoffverhalten kommt das Konzept der Fließbruchmechanik in Form des CTOD- (Crack-Tip-Opening-Displacement) oder J-Integral-Konzeptes zur Anwendung /PUS 08/.

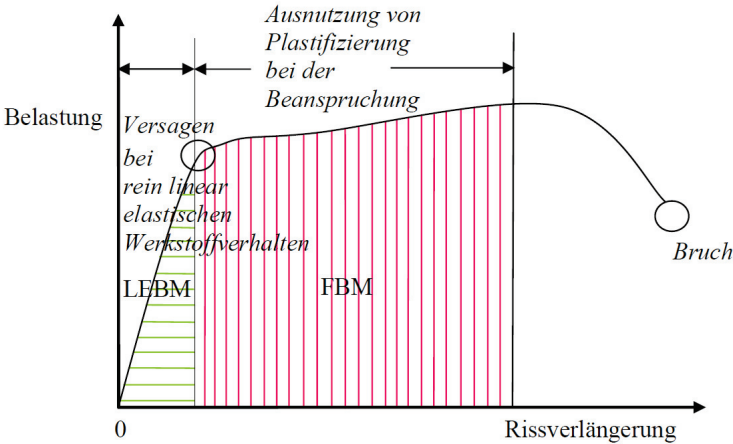


Abb. 4.27: Bruchverhalten in Bezug auf die Belastung und Rissverlängerung nach /ROS 82/; /MIK 05/

Um das Bruchverhalten der mechanischen Anbindung für die Schwerpunktverschiebung des Fahrzeuges untersuchen zu können, wird die Baugruppe entsprechend dem zeitlichen Belastungsablauf getestet.

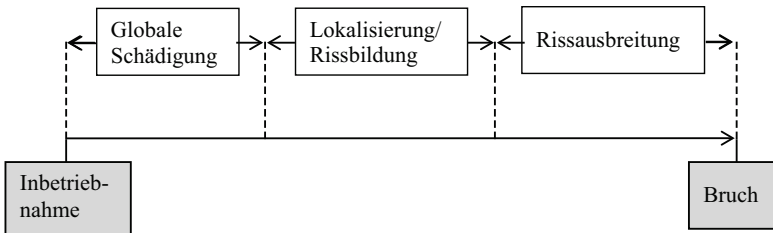


Abb. 4.28: Allgemeiner Zeitlicher Verlauf des Bruchs eines Bauteils nach /SCH 02/

In der ersten Phase ist die Materialschädigung durch die Umgebungsbedingungen bzw. Beanspruchungen noch global, beispielsweise die globale Materialermüdung. Diese Schädigungsprozesse tendieren nach einem definierten Schädigungsgrad zur Lokalisierung, d. h., sie konzentrieren sich auf die Zonen, die bereits am stärksten geschädigt sind. Damit beginnt die Rissbildung, und im weiteren Verlauf bilden sich Risskeime als Hauptriss

heraus, an deren Spitze eine weitere Schädigung des Bauteils beschleunigt stattfinden kann. Ab einer gewissen Risslänge ist die kritische mechanische Rissbeanspruchung erreicht und der Riss breitet sich nun alleine infolge der mechanisch lokalen Beanspruchung aus. Dabei können Spannungen oder plastische Dehnungen maßgeblich sein. Die Ausbreitung des Risses kann überkritisch-stabil oder überkritisch-instabil erfolgen. Überkritisch-instabile Risse breiten sich unkontrolliert aus und führen zum plötzlichen Versagen des Bauteils, während sich überkritisch-stabile Risse nur bei einer weiteren Laststeigerung ausbreiten /SCH 02/.

Ausgehend von der Abb. 4.12 werden zwei mechanische Anbindungen auf Schädigung untersucht. Die Anbindung A erhielt nach einer Belastung ab 790 N eine Anrissfläche und führte schließlich bei 840 N zum Bruch.

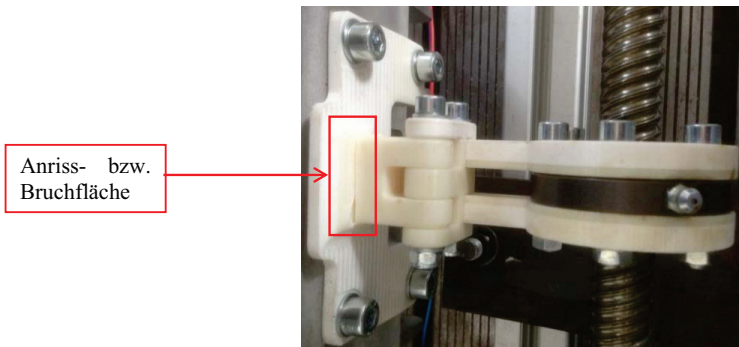


Abb. 4.29: Anrissfläche der mechanischen Anbindung A

Die Anbindung 2 erhielt einen Anriss an den Führungsstiften, die den axialen Spielgleich zwischen der Spindel und der Lenkstütze realisieren soll.

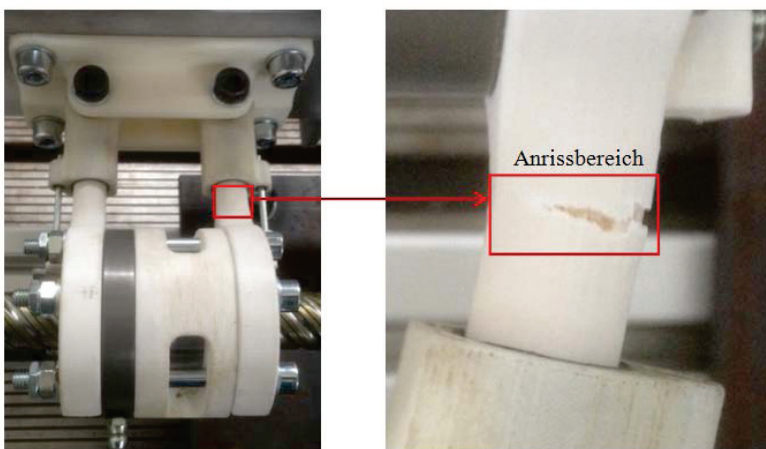


Abb. 4.30: Ursprungszustand der Anbindung B bis zum Anriss

Bis zur Schädigung erfüllt die Anbindung B die mechanische Verstellung am besten. Es traten kaum ersichtliche mechanische Klemmungen auf, und somit konnte der minimale Spielausgleich problemlos erfolgen. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse ist die Anbindung B als die geeignete mechanische Verstellung zu sehen, sie wurde mit der Spindelsteigung 50 mm insgesamt dreimal bis zum Bruch getestet.

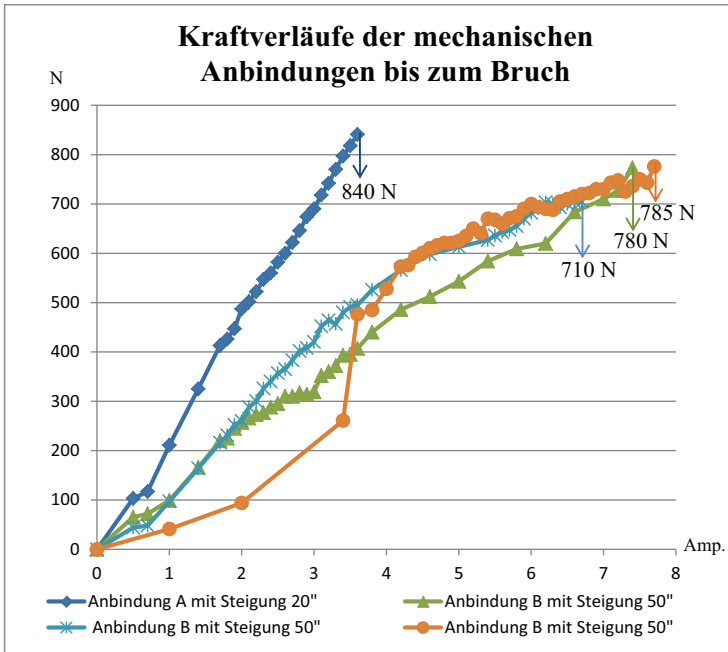


Abb. 4.31: Kraftverläufe der mechanischen Anbindungen bis zum Bruch

Die Anbindung A hat im Versuch mit 840 N die höchste Belastung bis zum Bruch ausgehalten, allerdings ist zu beachten, dass diese Aussage nur auf einer Untersuchung beruht und somit nicht aussagesicher ist. In den Versuchsabläufen mit dieser Anbindung wurde aufgrund der unterschiedlichen Hebelarmverhältnisse und der geringen Steifigkeit des Materials eine mechanische Klemmung festgestellt, die einen möglichen axialen Spielausgleich zwischen der Spindel und der Lenkstütze erschweren könnte.

Um dieser Schädigung entgegenzuwirken, werden die Führungsstifte für die Fertigung und Inbetriebnahme am Fahrzeug verdoppelt, damit die Belastung sicherheitshalber auf vier statt auf zwei Führungsstiften verteilt wird. Um auch höhere Kräfte mittels einer ausreichenden Dehngrenze aushalten zu können, wird für die ersten Fahrtests eine Stahlanbindung mit vier Führungseinheiten gefertigt und getestet, da die real auftretenden Kräfte noch nicht bekannt sind.

Des Weiteren ist die Gewinnung und Anwendung von Näherungslösungen für den Spannungsintensitätsfaktor SIP von hoher Bedeutung für die Beurteilung der Bruchsicherheit.

Für ein beliebiges ebenes Rissproblem kann man diesen Faktor allgemein in der Form

$$K = \sigma \sqrt{\pi a_r} Y \quad (4.30)$$

beschreiben /BRO 12/; /FIN 05/; mit σ in MPa als der Spannung im rissfreien Querschnitt, a_r in m der Risslänge und Y als Korrekturfunktion, die von der Art der Belastung und der jeweiligen Geometrie abhängt. Für unterschiedliche Materialien können die entsprechenden kritischen K_{I0} -Werte tabelliert abgelesen werden.

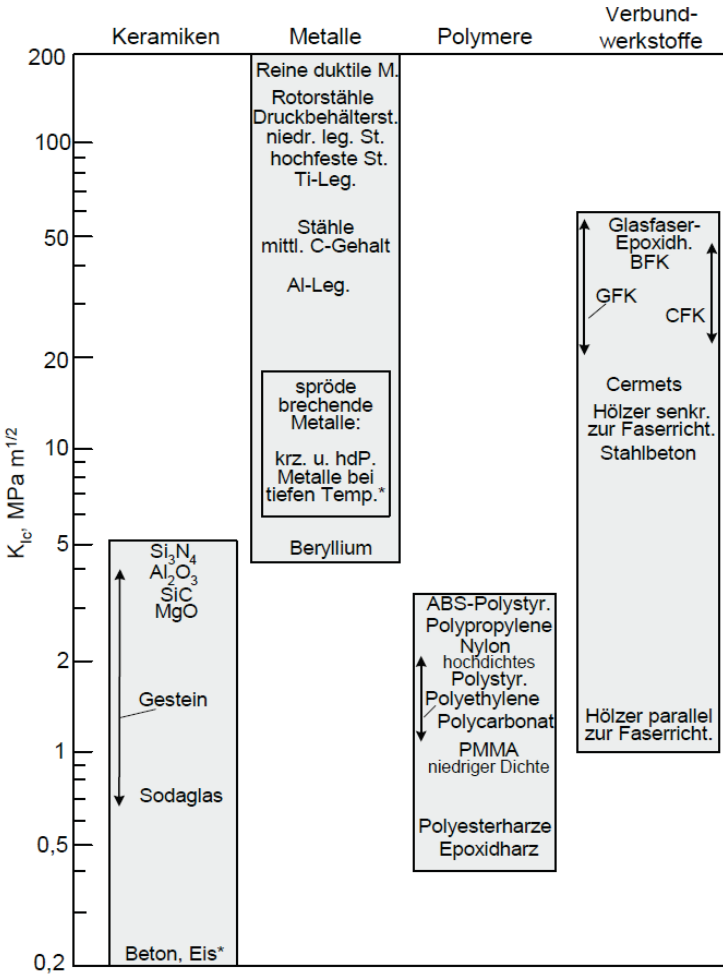


Abb. 4.32: Kritische Bruchzähigkeit für unterschiedliche Werkstoffe nach /BÜR 14/

Das Bruchverhalten eines Bauteils mit einem Riss wird unter statischer Belastung hauptsächlich durch den Werkstoff, die Temperatur, den Spannungszustand sowie die Art

und die Geschwindigkeit der Belastung beeinflusst. Aus diesem Grund erfolgt die Ermittlung der Bruchzähigkeit experimentell gemäß der Norm ASTM E 399-05 an einer standardisierten Probe /AST 05/. Mindestabmessung, Anrisserzeugung, Belastungsgeschwindigkeit und die Versuchsauswertung sind hierbei vorgeschrieben /RIC 89/.

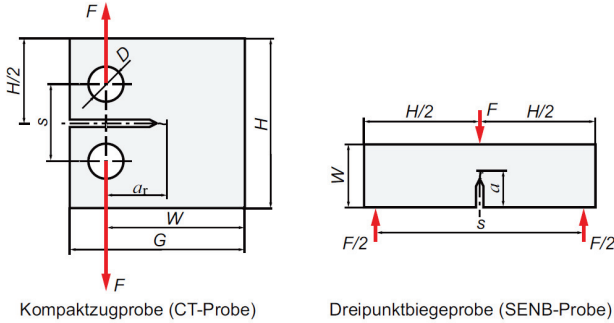


Abb. 4.33: Proben zur experimentellen Ermittlung der Bruchzähigkeit nach /BER 06/

Bei der experimentellen Bruchzähigkeit an Proben sollte zudem sichergestellt sein, dass ein überwiegend ebener Dehnungszustand (EDZ) vorliegt. Um dieses Kriterium zu erfüllen, muss folgender Zusammenhang zutreffen.

$$B, W - a_r > 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (4.31)$$

Sind die vorgegebenen Anforderungen erfüllt, kann statt der vorläufigen Bruchzähigkeit K_Q die kritische Bruchzähigkeit K_{Ic} verwendet werden, wenn der Verlauf der Bruchzähigkeit in Abhängigkeit von der Probenbreite B approximativ eine Gerade im Bereich des elastischen Dehnungszustandes (EDZ) ergibt. Bei sehr dünnen Proben überwiegt der ebene Spannungszustand (ESZ), und bei sehr breiten Proben wird das Verhalten vom ebenen Dehnungszustand im Probeninneren bestimmt. Beide Belastungszustände sind im gemischten Bereich vorhanden /RÖS 12/.

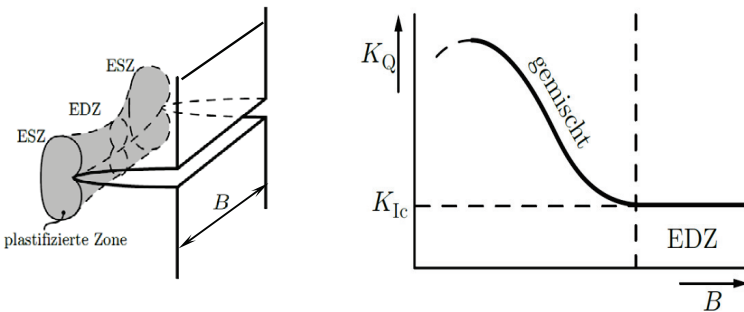


Abb. 4.34: Darstellung der Belastungszustände in Abhängigkeit der Probenbreite nach /RÖS 12/

Die plastische Zone an der Risspitze beeinflusst das Bruchverhalten erheblich. Daher muss die Größe der plastischen Zone im geeigneten Verhältnis zur Bauteilbreite stehen, um weiterhin ein linear-elastisches Bruchverhalten zu ermöglichen. Das bedeutet, die plastische Zone muss im Verhältnis zu den Bauteilabmessungen so klein sein, dass sich die Gesamtstruktur, global betrachtet, noch linear-elastisch verhält /BER 06/.

Die erstmalige Funktionsprüfung der mechanischen Anbindung für das Fahrzeug ist anhand des Kunststoffes ABS durchgeführt worden. Die Bruchzähigkeit beträgt dafür circa $3,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ nach Abb. 4.32. Aus den Versuchen resultiert die Erkenntnis, dass dieser Werkstoff nicht widerstandsfähig genug ist, um ein Anriss bzw. Bruch zu vermeiden. Daher werden Werkstoffe für die mechanische Anbindung ausgewählt, die einen höheren K_{IC} -Wert besitzen. Um ein plötzliches schlagartiges Versagen der Stifte zu vermeiden, wird ein Werkstoff aus Stahl mit einer Bruchzähigkeit zwischen $50\text{-}154 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ bevorzugt. Andere Bauteile der mechanischen Anbindung werden aus Aluminium hergestellt. Je nach Legierung beträgt die Bruchzähigkeit zwischen $23\text{-}45 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Um das Bruchverhalten des realen Bauteils bestmöglich abzuschätzen, sollte zunächst der Risswiderstand experimentell an standardisierten Proben durchgeführt werden, falls die Bruchzähigkeit bzw. der Parameter zur Beschreibung des Risswiderstands unbekannt ist. Um eine Aussage über das Bruchverhalten des Bauteils zu bekommen, sollte anschließend ein Vergleich zwischen der ermittelten Risspitzenbeanspruchung im realen Bauteil unter Berücksichtigung der Eigenspannungen und dem Risswiderstand aus den Laborversuchen durchgeführt werden.

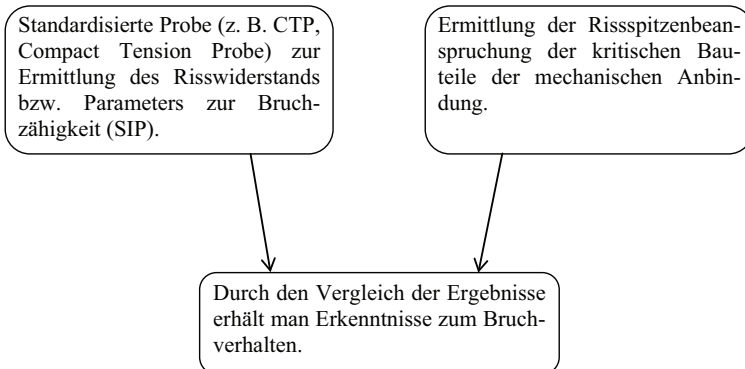


Abb. 4.35: Ablauf zur bruchmechanischen Bauteilbewertung

Kontrolliert wird das Bruchverhalten eines rissbehafteten Bauteils durch den Risswiderstand des Werkstoffes, die Bauteil- und Rissgeometrie sowie die Belastung /FUH 08/. Damit wird letztendlich ein bruchmechanischer Ansatz für weiterführende Untersuchungen bereitgestellt, der die Bewertung bezüglich des Bruchverhaltens der mechanischen Anbindung für die Schwerpunktverschiebung des Fahrzeuges ermöglicht.

4.8 Methoden im Entwicklungsprozess

Auf Grundlage der vorherigen praktischen und theoretischen Untersuchungen sollen die verschiedenen Methoden nachfolgend in den erarbeiteten Entwicklungsprozess des Fahrzeuges integriert werden. Dieser erarbeitete Ansatz kann zukünftig als Basis für vergleichbare Fahrzeuge im frühen Entwicklungsstadium dienen. In oberen Bereich werden die jeweiligen Phasen für eine Laufzeit von 36 Monaten unter Berücksichtigung ergebnisorientierter Meilensteine dargestellt. Parallel dazu werden unter diesen Phasen die wichtigen Methoden und Modelle dieses Kapitels in den Entwicklungsprozess integriert.

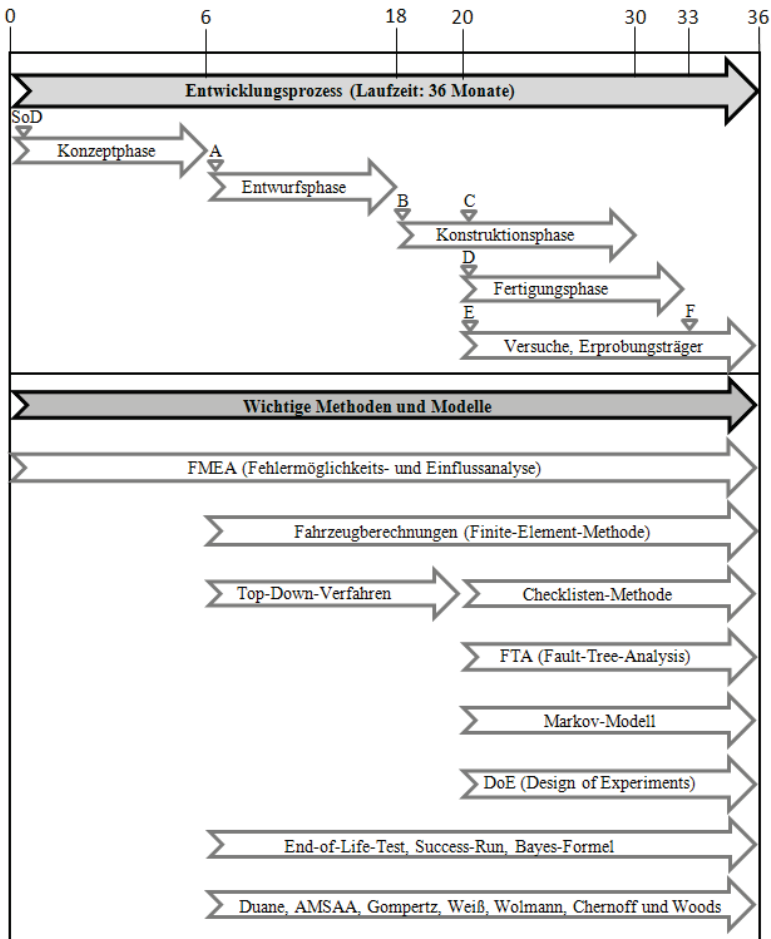


Abb. 4.36: Methodenintegration für den Entwicklungsprozess des Fahrzeuges

Mit dem Start of Design (SoD) beginnt die konzeptionelle Erarbeitung des Gesamtfahrzeuges mit mechanischen Lösungsansätzen für das einachsige Fahren. Ab diesem

Zeitpunkt empfiehlt sich ebenfalls die Durchführung der FMEA im gesamten Entwicklungsprozess, besonders bei Neuentwicklungen oder Produktänderungen, damit deren Schwachstellen frühzeitig identifiziert, analysiert und bewertet werden können /NOE 06/; /BAH 12/. Durch die Anwendung dieser präventiven Qualitätssicherungsmethodik und der damit verbundenen Risikoanalyse ist eine Verbesserung der Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit des zu betrachtenden Systems möglich /WER 12/.

Das Gesamtfahrzeug besteht nach der Konzeptphase zum Zeitpunkt A aus vielen unterschiedlichen Bauteilen und Systemen. Um für den konstruktiven Bereich den Untersuchungsbereich festzulegen, werden die Systeme mithilfe des Top-Down-Verfahrens priorisiert. Parallel dazu können zudem eine Recherche und ggfs. eine Auswahl der möglichen Methoden und Modelle begonnen werden. Bis zum Punkt B sollte die praktische Machbarkeit der erarbeitenden Lösungen abschließend überprüft sein.

Ab dem Punkt C bzw. D haben die Teilergebnisse eine bestimmte Reife erreicht, sodass sie an die Fertigung bzw. den eingebundenen Lieferanten übergeben werden können. Mit dem Abschluss der konstruktiven Ergebnisse ist auch der Zeitpunkt erreicht, dass die methodischen Untersuchungen zur Zuverlässigkeit erweitert werden können. Mit der FTA erfolgt die Systemanalyse mittels eines definierten Top-Ereignisses. Hierfür wird ein Fehlerbaum erstellt und ausgewertet. Der kombinierte Einsatz von FMEA und FTA haben zur Steigerung der Zuverlässigkeit bei komplexen Systemen eine große Bedeutung /SOU 08/. Die Konstruktion ist beispielsweise abhängig von den Möglichkeiten der mechanischen Fertigung und den zur Verfügung stehenden Ressourcen. Um diese Schnittstellen optimal zusammenhängend zu berücksichtigen, wurde die Checklisten-Methode verwendet, die in /HEN 08/ neu entwickelt wurde.

Damit möglichst im frühen Stadium des Entwicklungsprozesses ein System mit unterschiedlichen Zuständen untersucht werden kann, wird anhand eines Beispiels ein Markov-Modell erarbeitet. Weiterhin können verschiedene Testplanungen die frühzeitigen Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses konzeptionell zeitlich und anwendungsorientiert unterstützen. Dazu werden unterschiedliche Methoden diskutiert, die für Zuverlässigkeits- bzw. Lebensdaueruntersuchungen genutzt werden können.

Ab dem Punkt E erfolgt auch die Planung und Durchführung der praktischen Versuche. Um diese Experimente effizient planen und auszuwerten zu können, erfolgt die Festlegung und Durchführung mittels der DoE-Methode /SIE 10/. Zusätzlich werden ab dem Zeitpunkt A praktische und theoretische Schädigungsuntersuchungen an verschiedenen Bauteilen vorgenommen, um Werkstoffkenndaten für weiterführende Berechnungen mittels der Finite-Elemente-Methode zu erhalten.

Bei praktischen Prüfungen kann es vorkommen, dass kritische Komponenten während des Versuchs versagen. Damit auf Grundlage der Erkenntnisse die Zuverlässigkeit dieser Komponenten verbessert werden kann, ist eine Rückführung der Ergebnisse vorgesehen. Die hierfür wichtigen Modelle zum Zuverlässigkeitswachstum sind in der Tab. 4.12 aufgeführt.

Bis zum Zeitpunkt F erfolgen sowohl die Einbindung der Methoden in den Entwicklungsprozess als auch der mechanische Zusammenbau des Erprobungsträgers. Die Weiterführung des Prozesses bis zum Beginn der Serienproduktion (SoP) ist ratsam in Verbindung mit realitätsnahen Fahrtests, gesetzlichen Regularien und weiteren Qualitätsmethoden.

5 Mechanische Fahrzeugberechnungen

Das konzipierte einachsige Fahrzeug stellt besondere physikalische Anforderungen an das Zusammenwirken von Fahrzeugachse und Schwerpunktlage, um verschiedene Fahrpositionen zu ermöglichen, was bereits während des Konstruktionsprozesses berücksichtigt werden muss. Damit das Fahren auf einer Achse funktionieren kann, sind kinematische Fahrzeugberechnungen grundlegend wichtig, sie stellen die Basis für eine zuverlässige Funktionserfüllung dar.

5.1 Massenschwerpunktlage

Zur Berechnung des Gesamtschwerpunktes müssen die jeweiligen Positionen aller Einzelmassen im Fahrzeug bekannt sein. Die Richtungen werden von einem definierten Nullpunkt aus anhand eines Koordinatensystems beschrieben.

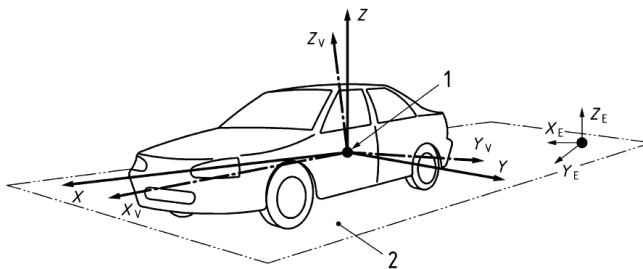


Abb. 5.1: Fahrzeugkoordinatensystem, 1 Referenzpunkt, 2 Horizontalebene nach /ISO 8855/

In Bezug auf das einachsige Fahrzeug werden die einzelnen Schwerpunkte (SP_i) vom Drehpunkt bzw. Momentanpol des Antriebrades aus bestimmt, weil die Schwerpunkte einen direkten Einfluss auf diese Drehachse haben.

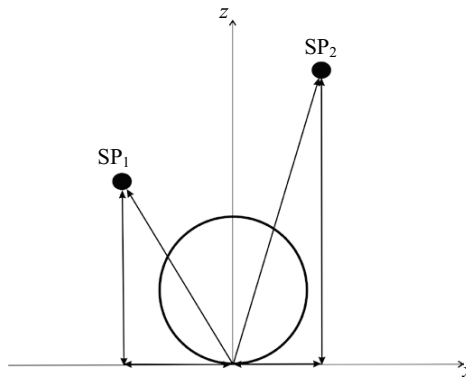


Abb. 5.2: Freikörperbild zur Bestimmung der Schwerpunkte

Als Schwerpunktlage ergibt sich damit Folgendes.

$$\vec{X} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n (\vec{x}_i \cdot m_i), \vec{Y} = 0, \quad (5.1)$$

$$\vec{Z} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n (\vec{z}_i \cdot m_i) \quad (5.2)$$

Für allgemeine Dimensionen wird \vec{I} verwendet.

$$\vec{I} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n (\vec{I}_i \cdot m_i) \quad (5.3)$$

Die Massenanteile können mit der Dichte ρ und dem Volumen V berechnet werden.

$$m = \rho \cdot V \quad (5.4)$$

Für diejenigen Bauteile, die sich während der Fahrzeugstabilisierung relativ zum Aufbau verschieben sollen, müssen sogenannte Verschiebungsparameter $\Delta\vec{X}$ in der Kalkulation berücksichtigt werden.

Somit gilt zur Bestimmung der Schwerpunktlage unter Berücksichtigung der axialen Achsverstellung $\Delta\vec{X}$ folgender Zusammenhang.

$$\vec{X}_V = \frac{1}{m} \sum_{k=i}^n ((\vec{x}_i + \Delta\vec{X}) \cdot m_i) \quad (5.5)$$

Daneben ist in dieser technischen Anwendung ebenfalls die Berechnung der Flächenträgheitsmomente relevant. Damit der Steiner-Anteil berücksichtigt wird, gilt zunächst folgender Zusammenhang für den Abstand vom Gesamtschwerpunkt zum Einzelschwerpunkt für die jeweilige Koordinatenrichtung.

$$\Delta\vec{X} = \vec{X}_{GS} - \vec{X}_{ES} \quad (5.6)$$

$$\Delta\vec{Y} = \vec{Y}_{GS} - \vec{Y}_{ES} \quad (5.7)$$

$$\Delta\vec{Z} = \vec{Z}_{GS} - \vec{Z}_{ES} \quad (5.8)$$

Aus diesen Daten kann mit der nachfolgenden Formel das jeweilige Flächenträgheitsmoment bezüglich des Gesamtschwerpunktes berechnet werden.

$$J_{GP} = J_0 + m \cdot \begin{bmatrix} \Delta Y^2 + \Delta Z^2 & -\Delta X \cdot \Delta Y & -\Delta X \cdot \Delta Z \\ -\Delta X \cdot \Delta Y & \Delta Z^2 + \Delta X^2 & -\Delta Y \cdot \Delta Z \\ -\Delta X \cdot \Delta Z & -\Delta Y \cdot \Delta Z & \Delta X^2 + \Delta Y^2 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Aus dieser Formel sind die Flächenträgheitsmomente um den Fahrzeugschwerpunkt wie folgt zu berechnen.

$$J_x = J_{0,x} + m \cdot (\Delta Y^2 + \Delta Z^2) \quad (5.10)$$

$$J_y = J_{0,y} + m \cdot (\Delta Z^2 + \Delta X^2) \quad (5.11)$$

$$J_z = J_{0,z} + m \cdot (\Delta X^2 + \Delta Y^2) \quad (5.12)$$

$$J_{xy} = J_{0,xy} - m \cdot (\Delta X + \Delta Y) \quad (5.14)$$

$$J_{xz} = J_{0,xz} - m \cdot (\Delta X + \Delta Z) \quad (5.15)$$

$$J_{yz} = J_{0,yz} - m \cdot (\Delta Y + \Delta Z) \quad (5.16)$$

Die Schwerpunkte des Fahrzeuges und somit der Gesamtschwerpunkt können somit eindeutig bestimmt werden. Für ein bezüglich des Fahrzeugs funktionierendes mechanisches Modell ist es ratsam, als Zielpunkt einen idealisierten Gesamtschwerpunkt \vec{Z}_{Ideal} zu definieren, der bei dem Zusammenbau aller Komponenten stets für die Übersicht bzw. Kontrolle im Konstruktionsprozess im Fokus bleibt. Der idealisierte Schwerpunkt sollte möglichst mit dem gegebenen Schwerpunkt, der aus der Berechnung resultiert, gleich sein. Bei starken Komponentenveränderungen kann allerdings folgende Bedingung gelten.

$$\vec{Z}_{Ideal} \neq \vec{Z}_{Geg} \quad (5.17)$$

In dem Fall ist zu prüfen, inwieweit eine Abweichung beider Schwerpunkte für die Stabilisierung des Fahrzeuges toleriert werden kann. Die grafische Darstellung zeigt zu der Bedingung (5.17) exemplarisch drei verschiedene Schwerpunkte. Der ideale Schwerpunkt dient der Orientierung. Der berechnete bzw. gegebene Schwerpunkt resultiert aus den drei Punkten.

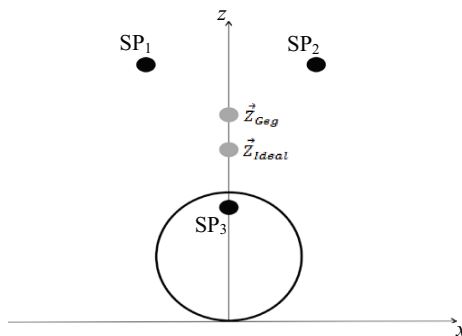


Abb. 5.3: Schwerpunktanpassung, SP_2 in Z-Richtung wird vertikal verschoben um die Beziehung $Z_{Geg} = Z_{Ideal}$ der Gesamtschwerpunkte zu erzielen. SP_1 wird nicht verändert und als Z_{min} definiert

Aufgrund der gegebenen Schwerpunktberechnung \vec{Z}_{Geg} ohne SP_3 gilt:

$$\vec{Z}_{Geg} = \frac{\vec{Z}_1 \cdot m_1 + \vec{Z}_2 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \quad (5.18)$$

Daraus folgt unter Berücksichtigung des idealen Schwerpunktes:

$$\vec{Z}_{Ideal} = \frac{\vec{Z}_{1min} \cdot m_1 + \vec{Z}_{2Ideal} \cdot m_2}{m_1 + m_2} \quad (5.19)$$

Damit der idealisierte Punkt vorgeschlagen bzw. berechnet werden kann, wird folglich nach dem unbekanntem Wert \vec{Z}_{2Ideal} umgestellt.

$$\vec{Z}_{2Ideal} = \frac{\vec{Z}_{Ideal} \cdot (m_1 + m_2) - \vec{Z}_{1min} \cdot m_1}{m_2} \quad (5.20)$$

Analog gilt dies auch für die X-Richtung:

$$\vec{X}_{2Ideal} = \frac{\vec{X}_{Ideal} \cdot (m_1 + m_2) - \vec{X}_{1min} \cdot m_1}{m_2} \quad (5.21)$$

Daraus resultiert die allgemeine Formel für weitere Punkte.

$$\vec{I}_x = \frac{\sum_{k=i}^n (m_k) \cdot \vec{I}_{Ideal} - \sum_{k=i, i \neq x}^n (\vec{I}_i \cdot m_i)}{m_x} \quad (5.22)$$

Im nächsten Schritt ist es wichtig, definierte Schwerpunkte miteinander zu vernetzen, um nicht nur einzelne Schwerpunkte, sondern mehrere Schwerpunkte gleichzeitig im System zu verschieben.

Um Gruppen spezifizieren zu können, ist vorerst festzulegen, in welchem Verhältnis bzw. mit welchem Anteil sich diese dem idealisierten Schwerpunkt annähern sollen. SP_1 und SP_2 sollen sich jeweils um den gleichen Anteil (z. B. 50 %) in der Lage verändern, um den gewünschten Gesamtschwerpunkt zu erreichen.

Der SP_3 soll sich relativ zu den beiden anderen Schwerpunkten nicht verändern, da dieser Punkt in diesem Fall aus konstruktiven Gründen nicht verändert werden kann. Für dieses Szenario kann eine Matrix hilfreich sein.

Tab. 5.1: Herabsetzen der oberen Schwerpunkte 1 und 2 mit jeweils 50 %

Matrix	1	2	3
1		50	
2	50		
3	0	0	

Um einen bestimmten Anteil A_S für den Schwerpunkt zu berücksichtigen, gilt:

$$\vec{I}_{\text{Anteil}} = (\vec{I}_{\text{Geg}} + \vec{I}_{\text{Ideal}}) \cdot A_S. \quad (5.23)$$

Sinngemäß sollte $A_S < 1$ sein für diesen Fall 0,5 bzw. 50 %. Der Gesamtschwerpunkt des Fahrzeuges errechnet sich aus:

$$\vec{I} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n (\vec{I}_i \cdot m_i). \quad (5.24)$$

Daraus resultiert ein allgemeiner Zusammenhang, wenn die Gleichungen gleichgesetzt werden.

$$(\vec{I}_{\text{Geg}} + \vec{I}_{\text{Ideal}}) \cdot A_S = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n (\vec{I}_i \cdot m_i) \quad (5.25)$$

Als Beispiel für die berücksichtigten zwei Punkte gilt in Bezug auf die Hälfte des Offsets:

$$\vec{I}_{\text{Anteil}} = (\vec{I}_{\text{Geg}} + \vec{I}_{\text{Ideal}}) \cdot 50\%. \quad (5.26)$$

Ziel ist es, zunächst den Schwerpunkt 1 (SP₁) in Richtung des idealisierten Schwerpunktes anteilig zu verschieben.

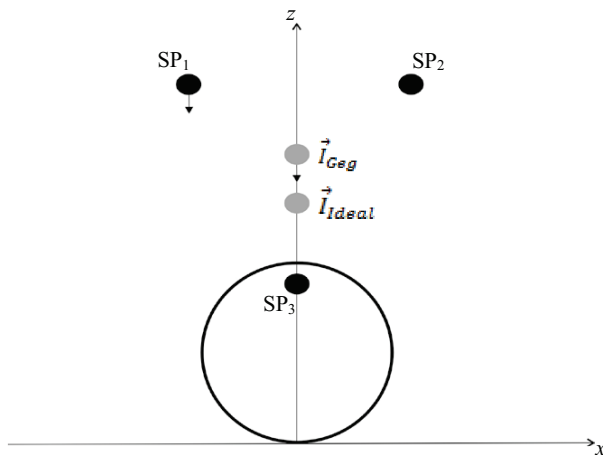


Abb. 5.4: Iterative Schwerpunktanpassung des SP₁

Dazu erfolgt das Einsetzen in Gleichung (5.25).

$$(\vec{I}_{\text{Geg}} + \vec{I}_{\text{Ideal}}) \cdot 50\% = \frac{\vec{I}_1 \cdot m_1 + \vec{I}_2 \cdot m_2 + \vec{I}_3 \cdot m_3}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (5.27)$$

Das Auflösen nach \vec{I}_1 ergibt den iterativen Verschiebungssatz unter Berücksichtigung der 50 %.

$$\vec{I}_1 = \frac{(\vec{I}_{Geg} + \vec{I}_{Ideal}) \cdot 50\% \cdot (m_1 + m_2 + m_3) - \vec{I}_2 \cdot m_2 - \vec{I}_3 \cdot m_3}{m_1} \quad (5.28)$$

In diesem Fall wird der SP₁ im halben Verhältnis in Richtung des idealisierten Schwerpunktes verschoben.

Analog dazu wird der restliche Anteil \vec{I}_2 durch das Einsetzen von \vec{I}_1 errechnet, um dessen Position und die verwendeten 50 % zu berücksichtigen.

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{I}_{Ideal} \cdot (m_1 + m_2 + m_3) - \vec{I}_1 \cdot m_1 - \vec{I}_3 \cdot m_3}{m_2} \quad (5.29)$$

Anschließend wird der Schwerpunkt 2 ebenfalls verschoben.

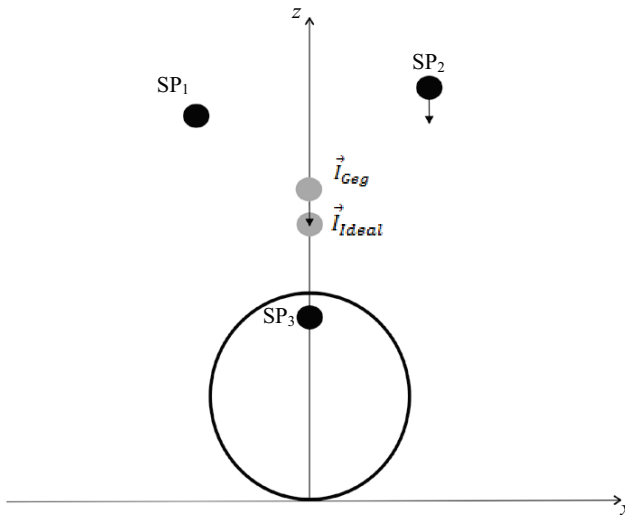


Abb. 5.5: Schwerpunktanspassung zum idealen Schwerpunkt durch die Verschiebung des SP₂

Gemäß dem Aufbau des Fahrzeuges sind meist mehrere Schwerpunkte vorhanden. Wenn im nachfolgenden Fall nur drei Schwerpunkte verschoben werden können, ist eine Verschiebung mittels einer Matrix möglich.

Das bedeutet, diese iterative Berechnungsmöglichkeit ermöglicht eine gruppierte Verschiebung definierter Schwerpunkte in Richtung des idealisierten Gesamtschwerpunktes.

Innerhalb eines bestimmten Verschiebungsbereichs (VB) sollen die ausgewählten Schwerpunkte im unterschiedlichen Verhältnis in Richtung des idealisierten Gesamtschwerpunktes verschoben werden.

Tab. 5.2: Anteilige Positionierung der Schwerpunkte im VB zum Gesamtschwerpunkt

VB-Matrix	1	2	3
1		60	
2			30
3	10		

Beispielsweise wird im linken Bild der nachfolgenden Abbildung der Verschiebungsbereich (VB) ausgewählter Punkte dargestellt. Nachdem der Verschiebungssatz mit unterschiedlichen Anteilen angewandt wurde, positioniert sich der Gesamtschwerpunkt auf die z-Achse, sodass der gegebene bzw. errechnete Schwerpunkt zum idealen Schwerpunkt hin verschoben wird.

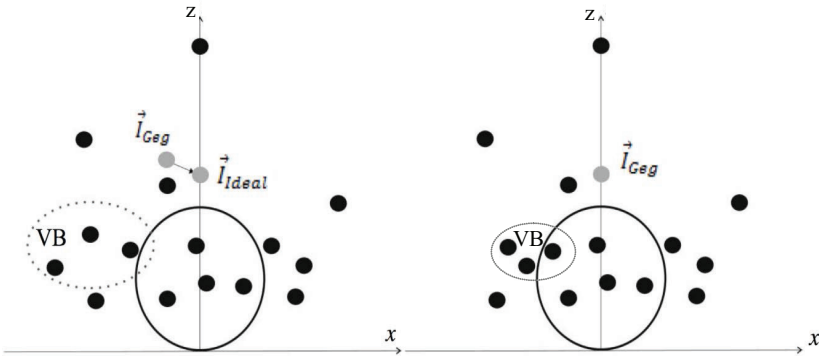


Abb. 5.6: Beispiel: Verschiebung von drei Schwerpunkten im Verschiebungsbereich (VB) zum idealen Gesamtschwerpunkt

Dieses Szenario zeigt, dass nur die im Verschiebungsbereich (VB) dargestellten Punkte verschoben wurden. Diese Lösungsmöglichkeit ist für die Konstruktion eines Fahrzeuges wichtig, wenn bereits viele Bauteile nicht mehr verändert werden dürfen und dennoch der gegebene Schwerpunkt zur idealisierten Lage hin verschoben werden muss. Die jeweiligen Anteile können beispielsweise mit den möglichen Toleranzen verknüpft werden, um Kollisionen im CAD-System zu vermeiden.

Im umgekehrten Fall wäre es möglich, diejenigen Punkte, die nicht verschoben werden sollen, zu fixieren.

Tab. 5.3: Vorschlag zur Fixierung der Schwerpunkte

Matrix	1	2	3	4	...	n
I_{ideal}	x	x	x	x		

Somit befindet sich der Verschiebungsbereich außerhalb der fixierten Punkte in der Matrix. SP_1 bis SP_4 bleiben auf ihren Positionen stehen, und die restlichen Schwerpunkte im Verschiebungsbereich werden anteilmäßig verschoben, bis der idealisierte Gesamtschwerpunkt erreicht wird.

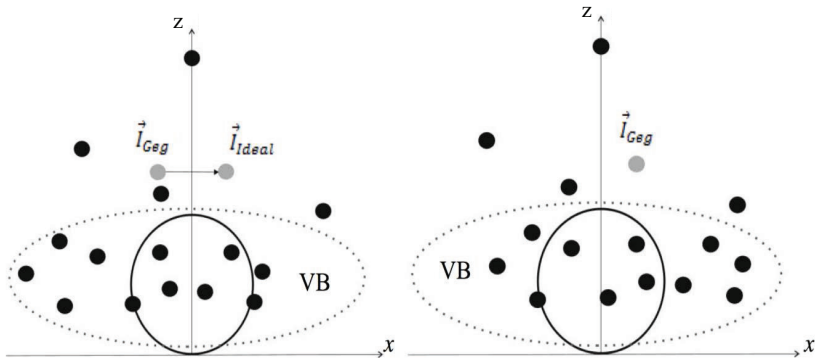


Abb. 5.7: Baugruppenverschiebung zum idealen Schwerpunkt

Diese mathematischen Ansätze haben während der frühen Konstruktionsphase des einachsigen Fahrzeuges, in dem viele verschiedene Bauteile eingebaut wurden, einen wichtigen Beitrag zum Aufbau im CAD-System geleistet, damit der gewünschte Schwerpunkt für die Stabilisierung approximativ auch bei möglichen Änderungen einflussreicher Bauteile erhalten geblieben ist.

5.2 Konstruktive Steigungsfähigkeit

Bei einem einachsigen Fahrzeug ist die Steigungsfähigkeit je nach Anwendungsfall von großer Bedeutung. Bereits in der Entwurfsphase sollte die Steigungsfähigkeit abgeschätzt und während des gesamten Konstruktionsprozesses überwacht werden. Dies ist wichtig, damit während des gesamten Konstruktionsprozesses die Steigungsfähigkeit und somit die fehlerfreie Funktion für das jeweilige Anwendungsfeld bestehen bleibt.

Für das derzeitige Fahrzeug sind jedoch die Einflussparameter bezüglich der Steigungsfähigkeit unbekannt und müssen folglich bereits an dem bestehenden Fahrzeugaufbau definiert sein.

1. Axialer Weg zur Verstellung der mechanischen Schwerpunktverschiebung der Kabine.
2. Nickwinkel des Fahrzeuges.
3. Bodenfreiheit aus Sicht des Fahrzeuges und mögliche Beeinträchtigung durch die Fahrbahn.
4. Radius des Antriebrades und der Stützräder.

Für die geometrische Beschreibung der Steigungsfähigkeit ist zuerst ein Freikörperbild notwendig, in dem die verschiedenen Einflussparameter zur Berechnung des Steigungswinkels definiert sind bzw. integriert werden können.

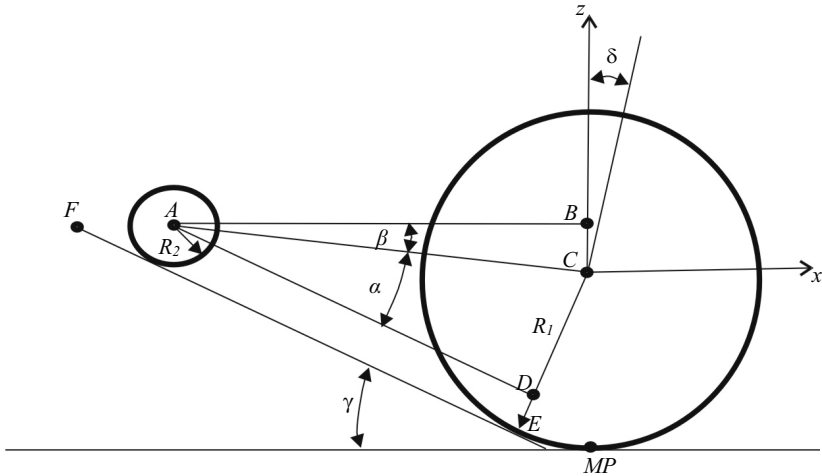


Abb. 5.8: Freikörperbild zur Beschreibung des Steigungswinkels

Es gilt die geometrische Abhängigkeit:

$$\gamma = \beta + \alpha \pm \delta. \quad (5.30)$$

Folgende trigonometrische Funktionen sind wie folgt für die Winkel zu bilden.

$$\beta = \arctan\left(\frac{\overrightarrow{BC}}{\overrightarrow{AB}}\right) \quad (5.31)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{(R_1 - R_2)}{\sqrt{\overrightarrow{AB}^2 + \overrightarrow{BC}^2}}\right) \quad (5.32)$$

Daraus folgt:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\overrightarrow{BC}}{\overrightarrow{AB}}\right) + \arcsin\left(\frac{(R_1 - R_2)}{\sqrt{\overrightarrow{AB}^2 + \overrightarrow{BC}^2}}\right) \pm \delta. \quad (5.33)$$

Dieser mathematische Zusammenhang ist wichtig, um die konstruktiven Abhängigkeiten und deren Einfluss auf den Böschungswinkel stets im Fokus zu haben.

Der jeweilige Einfluss der verschiedenen Parameter auf den Steigungswinkel wird prozentual bestimmt. Ausgehend von den rot dargestellten Basiswerten in der ersten Zeile, werden die Parameter jeweils in der zweiten Zeile um den Faktor 10 verändert.

Wird der Nickwinkel des Fahrzeuges um 10° verändert, ergibt sich eine Winkelsteigerung von 41 %. Die Parameter R1, R2, BC und AB werden ebenfalls um den Wert 10 jeweils in Richtung der Erhöhung der Steigerung verändert.

Tab. 5.4: Einstellparameter zur Berechnung des prozentualen Einflusses auf die Steigungsfähigkeit mit der Veränderung des Nickwinkels um den Faktor 10

Nickwinkel (°)	R1: Antriebsrad (cm)	R2: Stützrad (cm)	z-Achse: Achsabstand (BC)	x-Achse: Achsabstand (AB)
0	30	10	10	70
10	40	0	20	60
41 %	35 %	35 %	30 %	17 %

Verändert sich der Achsabstand auf der x-Achse um denselben Faktor, ergibt sich im Vergleich zu den rot markierten Basiswerten nur eine Winkeländerung von 17 %

Tab. 5.5: Einstellparameter zur Berechnung des prozentualen Einflusses auf die Steigungsfähigkeit mit der Veränderung der x-Achse um den Faktor 10

Nickwinkel (°)	R1: Antriebsrad (cm)	R2: Stützrad (cm)	z-Achse: Achsabstand (BC)	x-Achse: Achsabstand (AB)
0	30	10	10	70
10	40	0	20	60
41 %	35 %	35 %	30 %	17 %

Übersichtlich zeigt das umseitige Diagramm den jeweiligen Einfluss aller Parameter.

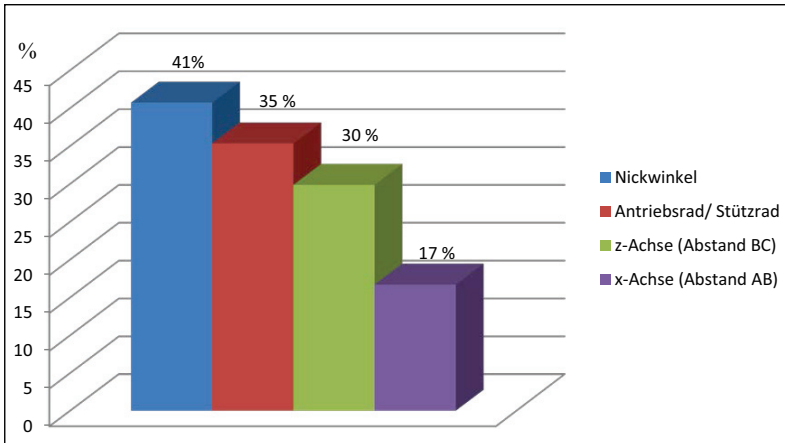


Abb. 5.9: Parametereinfluss auf die Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges

Mit diesen Ergebnissen kann die Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges über die verstellbare x-Achse mit dem geringstmöglichen Einfluss modifiziert werden, beispielsweise im Fahrbetrieb. Aus der Verstellung des Nickwinkels resultiert die höchste Winkeländerung von 41 %. Die Veränderung der z-Achse hat im Vergleich zu derjenigen der x-Achse einen wesentlichen größeren Einfluss auf die Steigung.

Sollte sich dieser Winkel aus unterschiedlichsten Gründen ändern, wäre es sinnvoll, zeitnah entsprechende neue Parameter direkt vorgeschlagen bzw. berechnet zu bekommen, und zwar auf Basis der bereits verwendeten Fahrzeuggeometrie.

Dazu ist es notwendig, die Formel nach der entsprechenden Unbekannten, z. B. nach dem Stützrad R_2 bzw. dem Antriebsrad R_1 , umzustellen und den gewünschten Steigungswinkel γ_{neu} zu integrieren.

$$R_1 = R_2 - \sin\left(\delta - \gamma_{\text{neu}} + \arctan\left(\frac{\overline{BC}}{\overline{AB}}\right)\right) \cdot \sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{BC}^2} \quad (5.34)$$

$$R_2 = R_1 + \sin\left(\delta - \gamma_{\text{neu}} + \arctan\left(\frac{\overline{BC}}{\overline{AB}}\right)\right) \cdot \sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{BC}^2} \quad (5.35)$$

Wenn es möglich ist, beispielsweise die Werte der Stützräder entsprechend den berechneten Ergebnissen zu ändern, kann der integrierte Steigungswinkel des Fahrzeuges berücksichtigt werden.

5.3 Berechnungsansatz für die mechanische Schwerpunktverschiebung

Der mechanische Verstellmechanismus ist elementar für das Aufrichten des Fahrzeuges aus der sogenannten Parksituation bis zur horizontalen Fahrt. Dieses Verhalten gleicht einer Wippe, das bedeutet, der Schwerpunkt muss sich mindestens mit dem Verstellmechanismus kreuzen, um zu kippen. Dieses Verhalten ist eine Grundvoraussetzung für das Aufrichten des Fahrzeuges. Als Drehpunkt wird der Momentanpol MP angenommen und nicht die Radachse. Mögliche nicht berechenbare mechanische Effekte könnten das Kippen und somit auf Aufrichten behindern. Der Momentanpol MP ist somit der „sichere“ Drehpunkt. Falls der Drehpunkt nicht erreicht wird, bleibt das Fahrzeug in der Parksituation, falls es keinen zusätzlichen Impuls bekommt.

Um das Gesamtfahrzeug auf einer Achse physikalisch aufrecht zu positionieren, muss der Vektor G des Fahrzeugschwerpunktes SP die Fahrzeugachse X_2 erreichen.

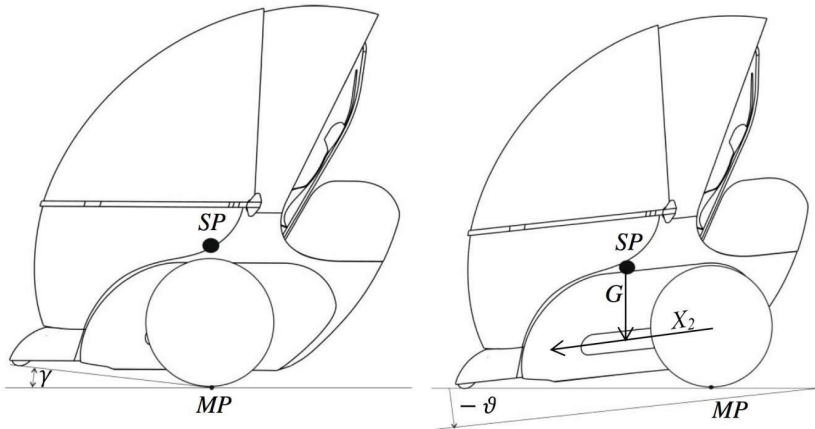


Abb. 5.10: Horizontale Position und Parkposition des Fahrzeuges

Diese kinematischen Bewegungen sind von mehreren Einflüssen abhängig.

- In welcher Steigung parkt das Fahrzeug bzw. in welchem Winkel γ bzw. ϑ relativ zur Fahrbahn sollen die Stützaufstandspunkte angeordnet werden?
- Die Steigungsfähigkeit γ des Fahrzeuges muss bekannt sein.
- In welchem Bereich kann der Gesamtschwerpunkt in Abhängigkeit von möglichen statischen Zusatzbelastungen liegen?

Um dieses Phänomen hinreichend zu untersuchen und ein horizontales Aufrichten des Fahrzeuges zu gewährleisten, sollte eine mathematische Gesetzmäßigkeit definiert werden. Das mechanische Hauptproblem lässt sich wie folgt beschreiben:

Reicht die mechanische axiale Verstellung nicht aus, ist ein Aufrichten des Gesamtfahrzeuges nicht möglich, sodass es nicht losfahren kann.

Zur Berechnung dieses Phänomens ist folgendes Freikörperbild nützlich.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{G_1}{x}\right) - \arctan\left(\frac{R - \overline{BC} - \frac{d}{2}}{L}\right) \pm \vartheta \quad (5.41)$$

Um aus den konstruktiven Daten die Verstelllänge L_{ver} zu bestimmen, gilt in Abhängigkeit vom Schwerpunkt SP_2 nachfolgender Zusammenhang.

$$\cos \alpha = \frac{L_{\text{ver}}}{\sqrt{G_1^2 + x^2}} \quad (5.42)$$

Das Einsetzen und Auslösen nach L_{ver} ergibt:

$$L_{\text{ver}} = \cos\left(\arctan\left(\frac{G_1}{x}\right) - \arctan\left(\frac{R - \overline{BC} - \frac{d}{2}}{L}\right) \pm \vartheta\right) \cdot \sqrt{G_1^2 + x^2}. \quad (5.43)$$

Der Zusammenhang zwischen dem Neigungswinkel beim Parken und der tatsächlichen Spindellänge wird berücksichtigt durch:

$$X_2 = \frac{X_1}{\cos \gamma}. \quad (5.44)$$

Damit kann der konstruktive Zusammenhang für das mechanische Aufrichten des Fahrzeuges durch die nachfolgende Formel angenähert werden.

$$\cos\left(\arctan\left(\frac{G_1}{x}\right) - \arctan\left(\frac{R - \overline{BC} - \frac{d}{2}}{L}\right) \pm \vartheta\right) \cdot \sqrt{G_1^2 + x^2} < \frac{X_1}{\cos \gamma} \quad (5.45)$$

Diese Gleichung kann bereits in der Konzeptphase angewandt werden, um die möglichen Einflüsse präventiv bezüglich der verschiedenen Bauteile im Fahrzeug und deren Auswirkung auf das horizontale Aufrichten analysieren zu können. Es ist ratsam, den Schnittpunkt der beiden Variablen SP_2 und L_{ver} bei Fahrzeugänderungen zu bewerten.

$$L_{\text{ver}} \geq \frac{X_1}{\cos \gamma}. \quad (5.46)$$

In diesem Zustand wäre ein weiterer Impuls notwendig, um das Fahrzeug mechanisch aufzustellen. Rein mechanisch wäre das Aufstellen bereits ab

$$L_{\text{ver}} = \frac{X_1}{\cos \gamma}. \quad (5.47)$$

kritisch bzw. nicht möglich.

5.4 Ansatz zur Berechnung der Spindelkraft

Damit im ersten Berechnungsansatz das Ergebnis für die maximale Spindelkraft für das Fahrzeug vorliegt, ist es wichtig, die beeinflussenden Kräfte darzustellen. Eine Achsverstellung ist nur möglich, wenn die Spindelkraft den resultierenden Kräften bzw. Beschleunigungen entgegenwirken kann.

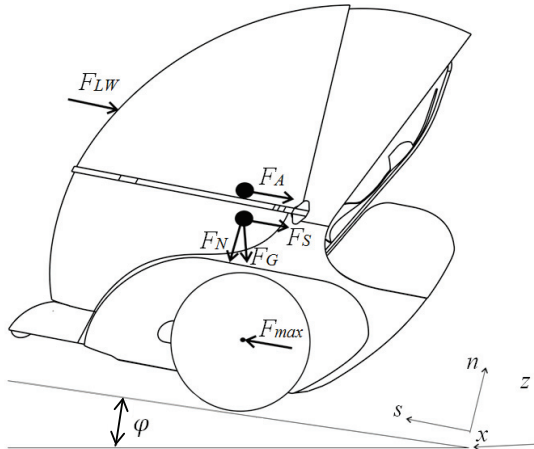


Abb. 5.12: Freikörperbild zur Berechnung der axialen Spindelkraft

Die Berechnung der Beschleunigungskraft des gesamten Fahrzeuges kann nach d'Alembert angegeben werden zu

$$F_A = -m_G \cdot a_G. \quad (5.48)$$

Zusätzlich wirken der Luftwiderstand F_{LW} , die Hangabtriebskraft F_S und die Trägheitskräfte aus der Spindelbeschleunigung a_s mit den beweglichen Bauteilen der Fahrerkabine m_{BT} , so dass die Verschiebung der beweglichen Massen trotz der Gegenkräfte möglich ist.

$$F_{max} - F_A - F_S - F_{LW} - m_{BT} \cdot a_s = 0 \quad (5.49)$$

Die Formel wird nach F_{max} umgestellt.

$$F_{max} = F_A + F_S + F_{LW} + (m_{BT} \cdot a_s) \quad (5.50)$$

Daraus folgt das Auslegungskriterium der Spindel im Gesamtfahrzeug unter Berücksichtigung der Spindelanzahl n .

$$\frac{F_{max}}{n} \leq \text{Spindelauslegung} \quad (5.51)$$

5.5 Programmaufbau für den Konstruktionsprozess

Aufgrund der besonderen Notwendigkeit des Fahrzeugaufbaus ist es für die praktische Anwendung während der Entwicklungsphase wichtig, ein entsprechendes Werkzeug zur Verfügung zu stellen, damit unterschiedliche Schwerpunktszenarien, die stets durch Änderungen im Projekt möglich sind, zeitnah berechnet und bezüglich des mechanischen Fahrzeugverhaltens bewertet werden können. Dafür sind nachfolgende drei Punkte zu erarbeiten.

1. Bauteil- bzw. Schwerpunktdaten zur Berechnung und Klassifizierung.
2. Mechanische Parameter zur Berechnung und Bewertung des mechanischen Aufbaus.
3. Konstruktive Werte zur Bestimmung der Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges.

Das Gesamtfahrzeug besteht aus einer Vielzahl von Einzelschwerpunkten. Um den Aufwand für die Überprüfung der einzelnen Schwerpunkte hinsichtlich des mechanischen Verhaltens zu reduzieren, sind zum Beginn der Schwerpunktberechnung alle Bauteile in verschiedene Klassen A, B, C, D, E und F zu spezifizieren, und zwar dann, wenn nahezu alle Komponenten für den Gesamtaufbau des Fahrzeuges bereitstehen, wodurch ein besserer Überblick gewonnen werden kann.

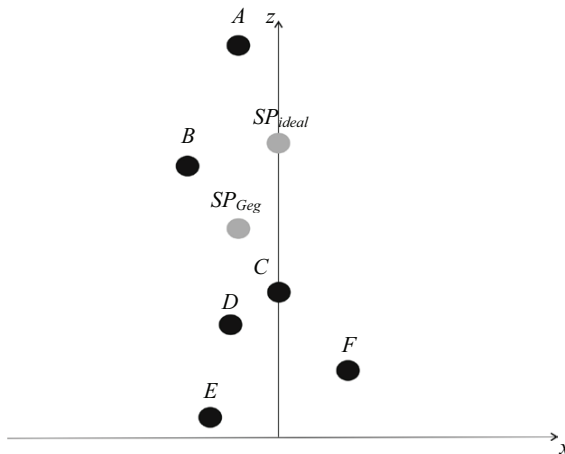


Abb. 5.13: Einteilung der Schwerpunkte in verschiedene Klassen

In den einzelnen sechs Klassen werden die jeweiligen Einzelschwerpunkte spezifiziert und eingeteilt. Des Weiteren ist es relevant, einen sogenannten idealen Schwerpunkt zu definieren bzw. abzuschätzen, der für die mechanische Verstellung des Fahrzeugsystems von großer Bedeutung ist. Dieser Schwerpunkt kann aus unterschiedlichen Erkenntnissen oder aus Erfahrungswissen resultieren. Da zu diesem Entwicklungszeitpunkt noch kein Erfahrungswissen aus der Praxis bekannt ist, geht man im ersten Entwicklungsschritt davon aus, dass der ideale und somit der berechnete Schwerpunkt auf der Symmetrieachse liegt. In dieser Position ist das Fahrzeug annäherungsweise im statischen Gleichgewicht, und aus diesem Grund wird die Symmetrieachse als Zielwert angenommen.

Für die Berechnung des mechanischen Aufbaus, wie er für die Parksituation und die Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges erforderlich ist, wurden aufgrund der neuen Erkenntnisse der Berechnung wichtige Parameter und Einstellgrößen definiert.

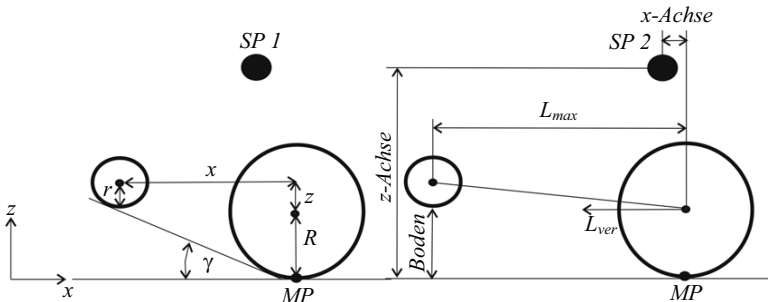


Abb. 5.14: Berechnungsparameter für die Eingabemasken Steigung und Parken

Mit der statistischen Versuchsplanung wird häufig untersucht, welchen Einfluss die Parameter auf den Zielwert haben. Durch diese Untersuchung ist es möglich, bei Änderungen einen signifikanten Parameter herauszukristallisieren, der z. B. den höchsten Einfluss besitzt.

In diesem Fall können die Parameter aus einer ANOVA (Analysis of variance) direkt berechnet werden. Dabei wird für jeden Parameter ein definierter Ausgangswert angegeben, der jeweils mit 30 % verändert wird. Aus beiden Ergebnissen lässt sich der Einfluss prozentual berechnen.

Tab. 5.6: Berechnung der Einflussanalyse verschiedener Parkparameter

Parameter	Ausgangswerte	30 % Änderung	Ergebnis L	Einfluss
Boden	300	210	409	9 %
L_{max}	1000	700	496	11 %
z-Achse	600	420	367	18 %
x-Achse	200	140	395	12 %
Böschungswinkel	10	7	424	5 %

Die ausgewählten Parameter beziehen sich hauptsächlich auf die Fahrzeugkonstruktion in Abhängigkeit von der berechneten Schwerpunktlage.

Die Analyse der Parameter ergibt, dass für diesen Berechnungsansatz die Schwerpunktlage den höchsten Einfluss besitzt. Anschließend ist der maximale Abstand zwischen Antriebsrad- und Stützradachse relevant. Die Bodenfreiheit hat einen mäßigen Einfluss auf den mechanischen Aufstehprozess des Fahrzeuges, gefolgt letztendlich durch den Böschungswinkel.

Die Ergebnisse der Parameteranalyse werden ergebnisorientiert dargestellt.

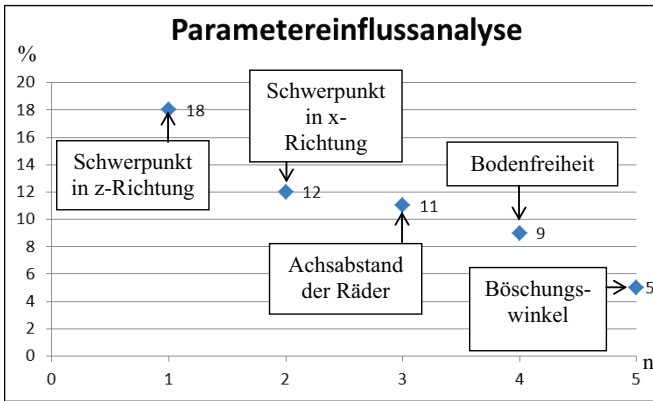


Abb. 5.15: Ergebnisse der fünf Parkparameter mit dem jeweiligen Einfluss auf Änderungen

Mit diesen Erkenntnissen wird die These bestätigt, dass die Schwerpunktage mithilfe eines idealen Schwerpunktes und der Klassifizierung der einzelnen Schwerpunkte gemäß der mechanischen Fahrzeuganforderungen berechnet, bewertet und gegebenenfalls modifiziert werden kann.

Für das Programm, das der Berechnung der Fahrzeugschwerpunktdaten dient, wird als Erstes ein Ablaufprozess erarbeitet. Nach dem Aufrufen der Eingabemaske sind die Bauteildaten einzugeben, die Konstruktionslage zu definieren und mit der Klassifizierung zu spezifizieren. Andernfalls können mithilfe eines adäquaten Suchbegriffs vorhandene Daten eingelesen bzw. geändert werden. Anschließend ist es möglich, die Eingaben und die Schwerpunktberechnungen zu speichern und anzuzeigen.

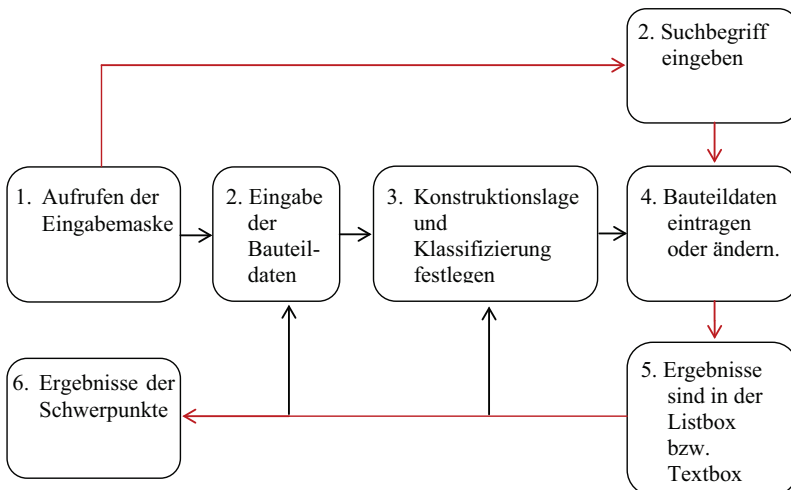


Abb. 5.16: Ablaufprozess für die Bauteileingabe und Schwerpunktberechnung

Der Quellcode definiert sich zu dem Ablaufprozess wie folgt.

```

Private Sub CommandButton1_Click()

' Variable deklarieren und Dateityp zuweisen:
Dim intlbk As Integer
Dim search, find As Range
Dim lbk As Range
Dim KS As String
Dim test() As Long

'Suchbereich definieren:
Set search = Sheets("Schwerpunkt").Range("A1:A" & _
Sheets("Schwerpunkt").Range("A65536").End(xlUp).Row)
If find.Text = TextBox1.Text Then
    intlbk = find.Row
End If
TextBox13.SetFocus

If Len(Trim(TextBox13)) = 0 Then Exit Sub
ListBox1.Clear

' Einlesebereich definieren für die ListBox1:
For lbkK = 1 To 10
Next
ReDim test(0)
With Sheets("Schwerpunkt")
Set lbk = .Range("A:H").find(What:=TextBox13, Lookat:=xlPart)
If Not lbk Is Nothing Then
    KS = lbk.Address

    Do
    If Not (IsNumeric(Application.Match(lbk.Row, test, 0))) Then
        ReDim Preserve test(UBound(test) + 1)
        test(UBound(test)) = lbk.Row
        ListBox1.AddItem .Cells(lbk.Row, 1)
        ListBox1.List(ListBox1.ListCount - 1, 1) = .Cells(lbk.Row, 2)
        ListBox1.List(ListBox1.ListCount - 1, 2) = .Cells(lbk.Row, 3)
        ListBox1.List(ListBox1.ListCount - 1, 3) = .Cells(lbk.Row, 4)
        ListBox1.List(ListBox1.ListCount - 1, 4) = lbk.Row
    End If
    Set lbk = .Range("A:H").FindNext(lbk)

    Loop While Not lbk Is Nothing And lbk.Address <> KS
    End If
End With

'Bedingung ob Bauteile vorhanden sind:
If ListBox1.ListCount > 0 Then
    ListBox1.ListIndex = 0
Else
    ListBox1.AddItem "Keine Bauteile gefunden!"
End If

Set lbk = Nothing

TextBox43 = Tabelle1.Cells(10, 41)
TextBox15 = Tabelle1.Cells(10, 40)
End Sub

```

Abb. 5.17: Programmcode für die Bauteiliste

Um die Schwerpunkte einzutragen und zu klassifizieren, wird eine Eingabemaske bzw. Userform erarbeitet, die eine Eingabe der notwendigen Werte aus dem Ablaufprozess ermöglicht. Als Suchbegriff wurde z. B. „1“ eingeben, worunter der „Aluminiumrahmen 1“ einschließlich der entsprechenden Daten gefunden wurde. In der Liste werden weitere gefundene Bauteile aufgelistet. Das aktuell eingelesene Bauteil ist darin blau markiert.

Konstruktion und Entwicklung

Bauteilliste | Ergebnisse der Schwerpunkte | Park- und Fahrsituation | Steigungsfähigkeit

Suchbegriff: Suchen

Bauteil-Nr:

Bauteil:

Anzahl: Gesamtanzahl:

Masse (kg): Gesamtmasse:

X-Achse (MP):

Y-Achse:

Z-Achse (MP): Änderung speichern

Klassifizierung: Bauteil neu eintragen

Gefundene Bauteilliste:

1	Aluminiumrahmen 1	1	10,1
2	Batterien oben	2	15,8

Abb. 5.18: Eingabefenster zur Festlegung und Speicherung der Klassifizierung wichtiger Bauteile

Diese eingegebenen Daten sind jetzt in einer Tabelle zu speichern. Um einen Zeilensprung unterhalb einer gefüllten Zelle zu ermöglichen, wird im Quellcode „+1“ hinzugefügt. Sechs Textboxen werden mit CDbI als Zahleneingaben definiert und zwei Textboxen als Text.

```
Private Sub CommandButton_Click()
Dim intlbk As Long
intlbk = Tabelle.Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row + 1
Tabelle.Cells(intlbk, 1) = CDbI(Textbox1)
Tabelle.Cells(intlbk, 2) = Textbox2.Text
Tabelle.Cells(intlbk, 3) = CDbI(Textbox3)
Tabelle.Cells(intlbk, 4) = CDbI(Textbox4)
Tabelle.Cells(intlbk, 5) = CDbI(Textbox5)
Tabelle.Cells(intlbk, 6) = CDbI(Textbox6)
Tabelle.Cells(intlbk, 7) = CDbI(Textbox7)
Tabelle.Cells(intlbk, 8) = Textbox8.Text
End Sub
```

Abb. 5.19: Programmcode für das Eintragen der Bauteile ins Dokument

Wechselt man zu dem Fenster „Ergebnisse der Schwerpunkte“, werden die errechneten Schwerpunktdaten, bezogen auf die jeweilige Klassifizierung mit dem Gesamtschwerpunkt des Fahrzeuges angegeben. Als Beispiel und Erarbeitung der Eingabemaske wird die Schwerpunktklasse A berechnet. Da zunächst keine anderen Klassen definiert sind, ist der Gesamtschwerpunkt gleich dem Schwerpunkt A. Die Richtungskoordinaten sind an die Berechnungen im vorherigen Kapitel angelehnt.

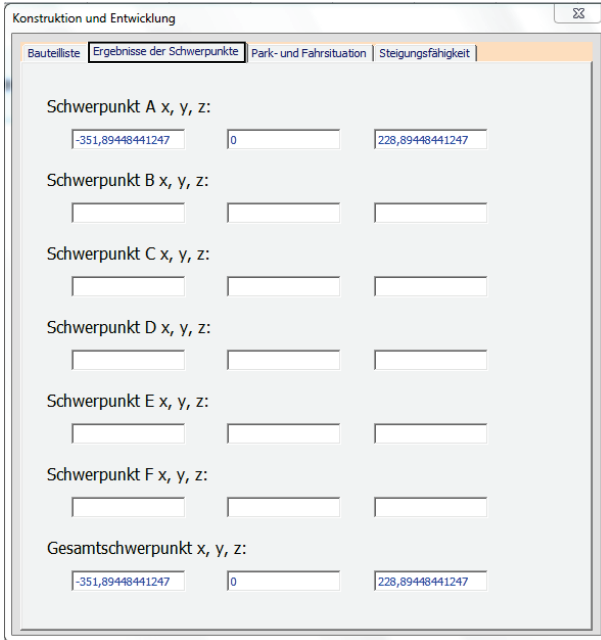


Abb. 5.20: Ergebnisse der Schwerpunkte

Berechnet werden die jeweiligen Punkte in einer Excel-Tabelle, beispielsweise für Schwerpunkt A.

$$\bar{X}_A = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^n (\bar{X}_i \cdot m_i) \quad (5.52)$$

Für die anderen Richtungsachsen y und z erfolgt die Berechnung analog.

Im Prinzip werden hiermit die Grundlagen für die Schwerpunktverschiebung gelegt. Alle Schwerpunkte werden klassenspezifisch ausgerechnet und sortiert, sodass die Übersicht und die Schwerpunktverschiebung einfacher berechnet werden können. Gleichzeitig ist es möglich, die Klassen zu erweitern oder zu reduzieren, obwohl das Erweitern auch den Berechnungsaufwand schnell erhöhen kann. Aus diesem Grund sollte die Grenze von 6 Klassen möglichst nicht überschritten werden.

Der mechanische Prozess des Übergangs von der Parksituation des Fahrzeuges zur horizontalen Fahrsituation erfordert eine mechanische Stimmigkeit bereits während des Konstruktions- bzw. Entwicklungsprozesses. Bei einer möglichen Fehlauselegung kann die Situation eintreten, dass das Fahrzeug mechanisch nicht in den horizontalen Fahrmodus wechseln kann.

Der Berechnung dieser mechanischen Fahrzeugdaten dient eine Eingabemaske, in welche die Erkenntnisse der Einflussanalyse der Parameter mit einfließen.

Auf Grundlage ihres Einflusses auf den Zielwert der Verstellung werden die Parameter priorisierend absteigend sortiert, somit hat der Anwender direkt den Überblick über den jeweiligen Einfluss eines Parameters. Dabei wird deutlich, dass die Verstelllänge der Mechanik und die Gesamtschwerpunktlage den höchsten Einfluss auf den Aufstehprozess des Fahrzeuges haben.

Abb. 5.21: Berechnungsmaske für die Parkparameter zur Bewertung des Verstellwegs

Die aktuellen Daten können in die Eingabemaske eingegeben werden, und nach der Berechnung stehen die Ergebnisse zur Verfügung. Die „0“ signalisiert anschließend direkt, dass in diesem Fall das Fahrzeug statisch wahrscheinlich nicht die horizontale Fahrsituation erreichen kann. Der Verstellweg (SOLL), der dazu notwendig ist, ist größer als derjenige der tatsächlich vorhandenen Verstellkinematik.

Dieses Resultat zeigt, dass es bei den veränderlichen Parametern stets sinnvoll ist, die Ergebnisse im Entwicklungsprozess zu beobachten und hinsichtlich der horizontalen Fahr-

zeuglage zu bewerten. In diesem Fall wäre abzuschätzen, inwieweit sich einer dieser Parameter verändern könnte, um das Ergebnis mit einer „1“ zu erfüllen.

Ändert man beispielsweise die Bodenfreiheit, ist darauf zu achten, dass sich ebenfalls die Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges ändern kann.

Nach der Analyse des Einflusses der Parameter wurden diese bezüglich des Zielwertes bzw. Steigungswinkel (IST) ebenfalls absteigend sortiert. Als Erstes ist die vorgesehene Anforderung bezüglich der Fahrzeugsteigung vom Interesse. Diese beträgt in diesem Fall 10° und dient als Ausgangsposition für die anderen Werte, die vollständig einzutragen sind.

Abb. 5.22: Berechnungsmaske zur Bewertung der Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges

Die Ergebnisse zeigen nach dem Berechnungsprozess an, ob der tatsächliche Steigungswinkel mit dem geplanten Winkel übereinstimmt. Für diesen Fall ist die Steigungsfähigkeit unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren des Fahrzeuges erfüllt.

Die Achsabstandswerte sind in derjenigen Position des Fahrzeuges einzutragen, in der das Fahrzeug horizontal eine Steigung anfährt. In diesem Fall liegt der Gesamtschwerpunkt in der Mitte des Verstellmechanismus.

Wenn die Bauteile und die Schwerpunkte eingetragen und klassifiziert worden sind, kann man diese Punkte mithilfe eines Programms modellieren. Dazu ist es zunächst notwendig, die aktuellen Schwerpunktdaten zu kennen.

Weiterhin ist es an dieser Stelle von Vorteil, einen sogenannten Idealschwerpunkt zu definieren, der approximativ bestimmt werden soll, falls beide Schwerpunkte voneinander abweichen. Dies hat – ähnlich wie im Projektmanagement – den großen Vorteil, stets den Zielpunkt vom aktuellen Schwerpunkt aus bewerten und gegebenenfalls Korrekturen vornehmen zu können.

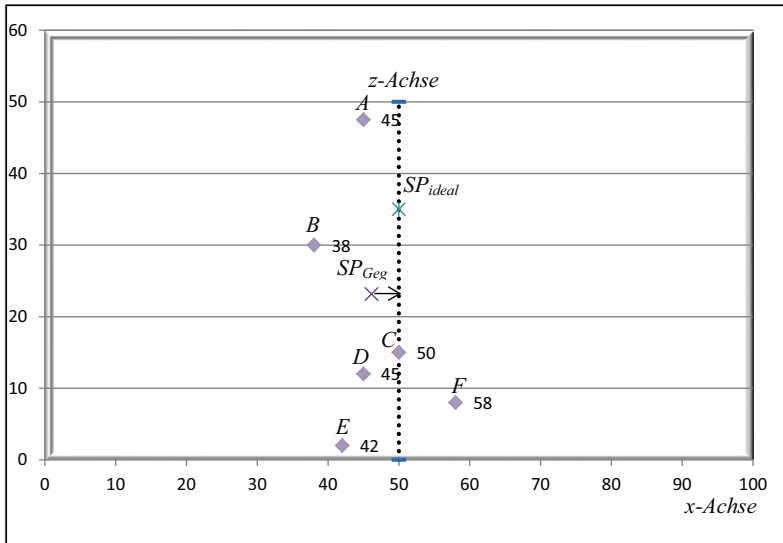


Abb. 5.23: Analyse der Schwerpunktlage zum idealen Schwerpunkt im Konstruktionsprozess

In diesem Beispiel ist zu erkennen, dass der berechnete Gesamtschwerpunkt SP_{Geg} von dem Orientierungsschwerpunkt SP_{ideal} abweicht. Dementsprechend ist zu untersuchen, in welche Richtung der berechnete Schwerpunkt verschoben werden soll, um die mechanische Machbarkeit zu verbessern. Da die aktuelle Schwerpunktlage von der gewünschten Funktion des mechanischen Systems abhängt, ist an dieser Stelle ebenfalls zu analysieren, mit welcher Berechnungsmöglichkeit die Schwerpunkte zeitnah verschoben werden können.

Für den mechanischen Verstellprozess vom Parken bis zur horizontalen Fahrt wurde festgestellt, dass er von der x-Achse abhängt. Die z-Achse stellt die Linie dar, in der sich das Fahrzeug nahezu im statischen Gleichgewicht befindet.

Aus diesem Grund wird in diesem konkreten Fall der berechnete Schwerpunkt auf die y-Achse verschoben. Somit ist zu überlegen, welche Schwerpunktklassen dafür infrage kommen könnten. Voraussetzung dafür ist, dass die Einzelschwerpunkte innerhalb des Fahrzeuges noch lokal variabel sind, sodass dieses Ziel erreicht werden kann.

In Abb. 5.13 wurden diese Einzelschwerpunkte bestimmten Klassen zugeordnet. Dabei hat man die Klassen definiert, in denen eine Verschiebung durchaus funktionieren kann. Die Klassen B und D sind potenzielle Schwerpunkte, die das Verschieben des Gesamtschwerpunktes ermöglichen.

Falls diese beiden Klassen nicht ausreichen und weitere Klassenkombinationen in die x-Richtung verschoben werden müssen, in denen eine Verstellung der Komponenten nicht mehr oder nur bedingt möglich ist, ist vorab eine Absprache mit den betroffenen Ansprechpartnern notwendig.

Zunächst sollten jedoch diejenigen Klassen verstellt werden, in denen die Bauteile idealerweise noch problemlos verstellbar sind. Dazu ist es vorerst wichtig, einen Überblick über die aktuellen Lagen der Schwerpunkte zu bekommen.

The screenshot shows a window titled "Schwerpunktverschiebung" with a close button in the top right corner. The window contains a grid of input fields for the x and z coordinates of six different center of gravity points (A through F) and the overall center of gravity. The data is as follows:

Schwerpunkt A:	Schwerpunkt B:	Gesamtschwerpunkt:
x: 45	x: 38	x: 50
z: 47,5	z: 30	z: 14
Schwerpunkt C:	Schwerpunkt D:	Schwerpunkt zur Orientierung:
x: 50	x: 45	x: 50
z: 15	z: 12	z: 22
Schwerpunkt E:	Schwerpunkt F:	
x: 58	x: 42	
z: 8	z: 2	

At the bottom right of the window, there are two buttons: "Schwerpunktvorschläge" and "Schließen".

Abb. 5.24: Darstellung aller Fahrzeugschwerpunkte für eine mögliche Schwerpunktverschiebung

Für die mögliche Verschiebung werden in dieser Eingabemaske alle wichtigen Schwerpunktpositionen aufgelistet, nachdem sie berechnet wurden. Diese Werte werden automatisch aus dem Diagramm eingelesen, sodass diese Verschiebung zusammen mit dem Diagramm direkt und zeitnah modelliert werden kann.

Aus den Anforderungen und Schwerpunktklassifizierungen wird angenommen, dass die beiden potenziellen Punkte B und D in Richtung der x-Achse verschoben werden können. Die Berechnung erfolgt so, dass auch Koordinaten bezüglich des idealen Schwerpunktes ausgerechnet werden und das Offset zwischen den beiden Gesamtschwerpunkten berücksichtigt wird.

Dieser intensive Zeit- und Berechnungsaufwand ist mit einem Programm zu automatisieren, da solche Änderungen im Projekt ebenfalls sehr zeitnah geschehen sollten. Dafür wäre es ideal und vorteilhaft, wenn der Anwender eine Eingabemaske hätte, in der die möglichen Verstellwerte automatisch vorgeschlagen werden, sodass sie bei Bedarf einfach und zeitnah übernommen werden können. Dennoch empfiehlt es sich stets, diese

Änderungen mit der Konstruktion abzustimmen, damit die Verstellung der Komponenten reibungslos umgesetzt werden kann. Mithilfe der Schaltfläche „Schwerpunktvorschläge“ kann die Eingabemaske aufgerufen werden, in dem die möglichen Schwerpunkte vorgeschlagen werden.

The dialog box 'Schwerpunktvorschläge' contains the following data:

Schwerpunkt	Value 1	Value 2	x-Übernehmen	z-Übernehmen
Schwerpunkt A:	56	37,5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwerpunkt B:	60	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwerpunkt C:	55	58	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwerpunkt D:	50	55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwerpunkt E:	58	68	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwerpunkt F:	42	62	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Button: Übernehmen/ Schließen

Abb. 5.25: Automatisch generierte Schwerpunktorschläge in Abhängigkeit vom SP_{Ideal}

Damit diese Schwerpunkte automatisch modelliert werden können, ist ein programmierter Algorithmus notwendig. Er sorgt für die Übertragung der Tabellenwerte in die Userform.

```

Tabelle.Cells(i, j) = UserForm2.TextBox1.Text
UserForm1.TextBox2.Text = Tabelle.Cells(i, j)
UserForm1.TextBox3.Text = Tabelle.Cells(i, j)
    
```

Abb. 5.26: Programmcode für die Schwerpunktübernahme

Mit diesem Quellcode werden die Daten übernommen, wenn die zu übernehmenden Daten aktiviert werden.

Die beiden Punkte B und D sollen jeweils in x-Richtung verschoben werden, damit der ideale Schwerpunkt und der berechnete Schwerpunkt übereinstimmen bzw. auf der z-Achse liegen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die aktivierten Richtungen.

Abb. 5.27: Modellierung der Schwerpunktdaten B und D in x-Richtung

Das nachfolgende Ergebnis nach der Übernahme zeigt, dass das Ziel, den berechneten und den idealen Schwerpunkt auf die z-Achse zu übertragen, erreicht ist.

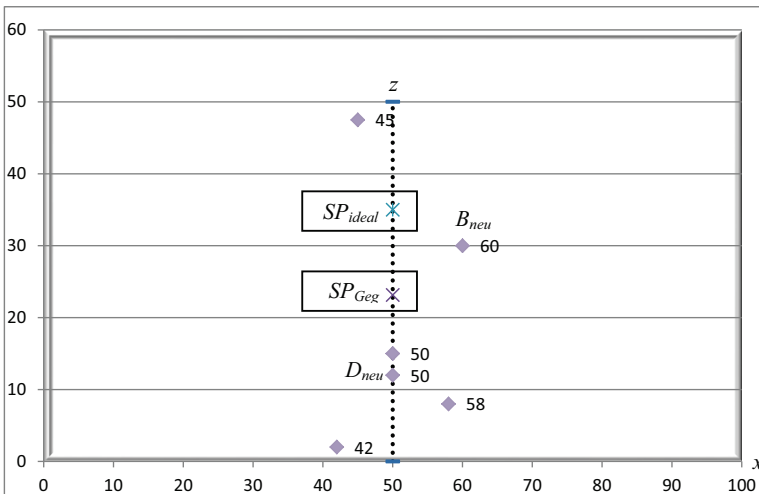


Abb. 5.28: Darstellung der Verstell-Ergebnisse B_{neu} , D_{neu} und SP_{geg} in x-Richtung

6 Anwendung und Evaluierung des Berechnungsablaufs

Neuartige und komplexe Elektrofahrzeuge erfordern in vielen Fällen neue Berechnungsansätze und Verfahren, die für Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen eingesetzt werden können, um neue Effekte praktisch bzw. wissenschaftlich zu analysieren und zu bewerten.

Meistens sind neue Berechnungsansätze neben ihrer Entwicklung auch in der Durchführung zeitlich aufwendig und selten einfach, besonders wenn Änderungen in der Entwicklungsphase auftreten. Damit ein solcher Prozess in den Konstruktionsprozess integriert werden kann, empfiehlt es sich, den Ablauf in der Entwicklungsphase anhand eines vergleichbaren Fahrzeuges zu demonstrieren und somit gleichzeitig den automatischen Berechnungsprozess zu testen und zu evaluieren. Anschließend werden Lösungsmöglichkeiten konzeptionell dargestellt, wie der entwickelte Berechnungsablauf in die zukünftige Betriebsphase integriert werden kann und welchen Nutzen er den Anwendern bietet.

Die steigende Komplexität innovativer Fahrzeuge einerseits und die kurzen Entwicklungszeiten andererseits erfordern neu zu entwickelnde Möglichkeiten für Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen, die vielfach bereits parallel zum bisherigen Entwicklungsprozess stattfinden sollen. Kompliziert wird diese Thematik zudem dadurch, dass unterschiedliche Abhängigkeiten, z. B. mittlere Reparaturzeiten, auf verschiedene Testszenarien wirken und zufällige Ausfälle der elektronischen oder mechanischen Bauteile eintreten. Vor diesen Effekten gibt es keinen absoluten Schutz, aber es können Untersuchungsszenarien erarbeitet werden, die präventiv die Zuverlässigkeit bzw. die Lebensdauer verbessern, was erforderlich ist, da ein Systemausfall hohe Kosten verursachen kann. Wenn man z. B. die plötzlich auftretenden Fehler im Praxisversuch dokumentiert und modelliert, besteht folglich auf Grundlage dieser neuen Erkenntnisse die Möglichkeit, Abhilfen zu erarbeiten.

Um dies in der Praxis zu ermöglichen, wird ein Konzept für ein neuartiges Elektrofahrzeug erarbeitet, das die Ausfallmöglichkeiten bzw. Wartungs- und Reparaturzeiten reproduzierbar in der Entwicklungszeit bzw. während der Inbetriebnahme dokumentiert und vernetzte Abhängigkeiten berücksichtigt, um auch komplexe Zusammenhänge abbilden und hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Lebensdauer untersuchen zu können.

6.1 Fahrzeugentwurf und Anforderungen

Das erarbeitete Berechnungsverfahren ist im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Erweiterung wichtiger Zuverlässigkeitsuntersuchungen entwickelt worden und kann folglich mit einem vergleichbaren Fahrzeug vereinfacht eingesetzt und evaluiert werden. Somit ist es möglich, neue abgeleitete Erkenntnisse auf ähnliche Untersuchungsfelder zu übertragen.

Die Beschreibung und Durchführung dieser Fahrzeugentwicklung ist auf die Vorgehensweise des Berechnungsverfahrens reduziert und beschreibt somit, wie diese Anwendung in zukünftigen ähnlichen Fahrzeugentwicklungen integriert werden kann. Zunächst sind die mechanischen Anforderungen für das einachsige Fahrzeug zu definieren.

Da die Parksituation von der Lage des Gesamtschwerpunktes abhängt, müssen alle Fahrzeugbauteile zur Bestimmung des Fahrzeugschwerpunktes definiert und klassifiziert werden. Im Schritt 3 werden die Parksituation und die Steigungsfähigkeit des einachsigen Fahrzeuges auf Basis der eingegebenen Fahrzeugdaten und des errechneten Fahrzeugschwerpunktes automatisch berechnet und gemäß den Anforderungen direkt bewertet. Sind beide Funktionen möglich, können die Daten im Schritt 5 an die Konstruktion weitergegeben werden, ansonsten sind Bauteil- oder Schwerpunktänderungen nötig.

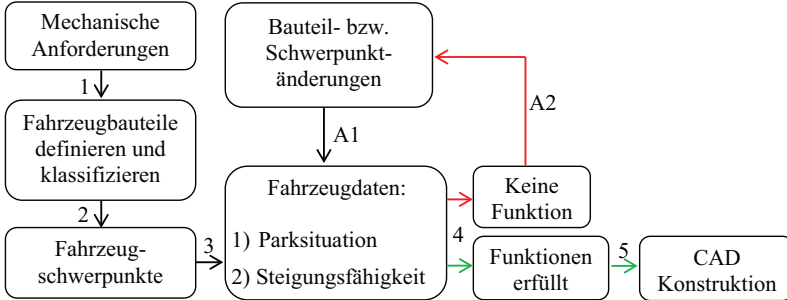


Abb. 6.1: Ablauf zum Berechnungsverfahren der Parksituation und der Steigungsfähigkeit des Fahrzeugs

Der Entwurf des Fahrzeuges soll einem Liegefahrrad ähneln. Im ersten Entwicklungsschritt wird das Design skizziert.

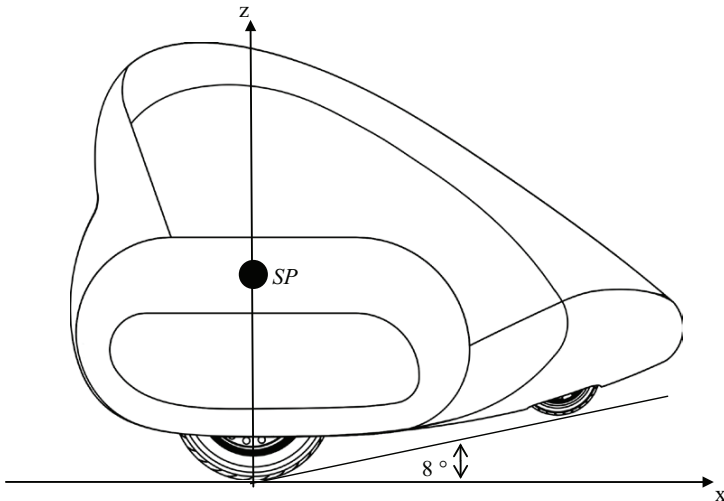


Abb. 6.2: Skizzierung eines neuen Fahrzeugkonzepts

Das Fahrzeug wird in der Konzeptphase mit nachfolgenden Anforderungen angenommen und festgelegt, die für den Berechnungsprozess wichtig sind.

Tab. 6.1: Anforderungstabelle für das Fahrzeug aus dem Pflichtenheft

Anforderung:	Anzahl Personen	Steigungsfähigkeit	Orientierungsschwerpunkt	Max. Zulässig
Ziele:	2	8°	Schnittpunkt mit der z-Achse (Abweichung 10 %)	170 kg

Aufgrund der neuen Erkenntnisse im Entwicklungsprozess wird empfohlen, den Orientierungsschwerpunkt möglichst frühzeitig gemeinsam mit den betroffenen Projektpartnern zu definieren. Der berechnete Gesamtschwerpunkt hat somit einen Leitpunkt, an dem er sich orientieren kann. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Lage des Gesamtschwerpunktes im Gesamtaufbau außer Kontrolle gerät, sodass die Kinematik der fertiggestellten Mechanik nicht funktionieren kann.

Zu Beginn des Fahrzeugprojektes sind die einzelnen Bauteile und zumindest deren zweidimensionale Orientierung im Fahrzeug bestmöglich abzuschätzen. Währenddessen sollte der Fokus des Orientierungsschwerpunktes präventiv nicht vernachlässigt werden. Zusätzlich ist dabei zu berücksichtigen, dass zu favorisierende Positionen in der Praxis bestimmt werden.

Aus Wartungsgründen sind definierte Bauteile in der Nähe der Wartungsklappe zu positionieren. Im Idealfall kann man die Position dieser Teile durch die gezielte Anordnung der Wartungsklappe in Hinblick auf den geplanten Gesamtschwerpunkt positiv beeinflussen. Andernfalls ist darauf zu achten, dass andere Bauteile die Lage des Gesamtschwerpunktes ausgleichen.

6.2 Einteilung der Fahrzeugbauteile in verschiedene Klassen

Die Bauteile für das Fahrzeug sind entsprechend zu dokumentieren, um beispielsweise das Gesamtgewicht stets ermitteln oder den aktuellen Schwerpunkt des Fahrzeuges abschätzen zu können.

Tab. 6.2: Bauteilauflistung in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern

	Bauteil	Anzahl	Masse (kg)	Gesamtmasse	X	Z
1	Antriebsmotoren	2	29	58	0	280
2	Fahrwerk	2	17	34	0	290
3	Sitze	2	14	28	300	420
4	Spindel	2	2	4	0	180
5	Batterien	4	16	64	-350	320
6	Rechner	3	3	9	280	370
...
82	Wechselrichter	2	4	8	150	200

Der Aufwand der einzelnen Berechnung der Schwerpunkte bzw. die mögliche Änderung der Schwerpunktlage wird mit der Vielzahl an Bauteilen sehr unübersichtlich, da die Punktelcke aus mindestens 82 Teilen besteht.

Spätestens nach dem Design-Freeze sollte sich eine Strategie überlegt werden, wie alle Punkte übersichtlich angeordnet werden können. In dieser Arbeit wurde eine Möglichkeit erarbeitet, alle Schwerpunkte in unterschiedliche Klassen einzuteilen. Für jedes zukünftige Fahrzeugkonzept können sich damit neue Gruppen ergeben, die subjektiv festgelegt werden sollten. Dazu werden 6 Klassen (A bis F) spezifiziert.

Tab. 6.3: Gruppierung und Klassifizierung (Kl) der Bauteile für die Schwerpunktverschiebung

Kl:	A	B	C	D	E	F
Gr:	Mechanischer Verstellmechanismus	Komponenten mit Verschiebung	Bauteile beliebig positionierbar	Komponenten fest positioniert	Variabler Schwerpunkt	Sonstiges
1	Antriebsmotoren	Stützräder	Steuergerät	Leichtbau-rahmen	Person 1	Steigungswinkel
2	Anbindung	Sitze	Batterien	Scheiben	Person 2	
3	Fahrwerk	Außenhaut	Rechner	Spindel	Gepäck	
4	Felge	Schrittmotoren	Bordnetzwandler	Mittelkonsole	Scheibenöffnung	
5	Reifen	Monitore	Kühler	Wechselrichter		
...

Die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt werden dabei übernommen. Bei einem einachsigen Fahrzeug wird ein Teil des Fahrzeuges verschoben, um in bestimmten Fahrsituationen im Gleichgewicht bleiben zu können. Der andere Teil des Fahrzeuges bleibt relativ dazu in einer festen Position. Somit gibt es einen Bereich mit verschiedenen Bauteilen des Fahrzeuges, der den Schwerpunkt verschieben kann. In diesem Fall macht es Sinn die Komponenten zu trennen. Die Klasse A beschreibt diejenige Gruppe, die direkt mit der mechanischen Verstellkinematik gekoppelt ist.

Diejenigen Komponenten, die den Schwerpunkt bei der Verstellung beeinflussen, werden in der Klasse B festgelegt. Im Prinzip sind es die Komponenten der Fahrzeugkabine bis zur Verstellung. Andererseits ist mir den Projektpartnern festzulegen, welche Komponenten möglichst frei im Fahrzeug positionierbar sein sollen, um für die spätere Modellierung einen Puffer zu besitzen, falls der Gesamtschwerpunkt nicht tolerierbar von dem Orientierungsschwerpunkt abweicht.

Im Gegenzug ist die Klasse D mit den festen Positionen der Bauteile ausgestattet, für die ohne großen Aufwand keine Änderung mehr möglich ist. Personen haben einen stark variablen Einfluss auf den Schwerpunkt. In dem Fall ist es vom Vorteil, wenn diese

variablen Parameter in eine extra Klasse kommen und in diesem Zusammenhang der Toleranzbereich des Schwerpunktes abgeschätzt wird.

Der Steigungswinkel kann die Lage des Schwerpunktes verändern. Je größer der Steigungswinkel ist, desto größer ist der Winkel, der sich beim Parken des Fahrzeuges einstellt. Dies kann wiederum den mechanischen Prozess zum horizontalen Positionieren des Fahrzeuges hinsichtlich des Verstellbereiches beeinflussen. Aus diesem Grund wird der Steigungswinkel unter „Sonstiges“ eingeordnet. In dieser Klasse F kann alles eingeordnet werden, was einerseits einen Einfluss auf die Schwerpunktlage besitzt und andererseits in die anderen Klassen nicht passt. Dadurch kann jede Maßnahme bei der Modellierung der Schwerpunktlage berücksichtigt werden.

Aus diesen Bereichen kann der jeweilige Schwerpunkt berechnet werden, sodass in einer entsprechenden Tabelle 6.2 unterschiedliche Schwerpunktkoordinaten berücksichtigt sind.

In der Praxis ist es nicht unüblich, dass einige Komponenten, für die man im ersten Ansatz keine ideale Idee zur Positionierung und Befestigung hat, an der erstbesten Stelle positioniert werden. Nach dieser Umsetzung der Idee stellt man anhand der Punktwolke fest, dass der Gesamtschwerpunkt von dem ursprünglich geplanten Schwerpunkt abweicht. Um dieses Szenario genauer untersuchen zu können und den möglichen Folgen einer nicht funktionalen Mechanik vorzubeugen, werden die fünf Schwerpunktkoordinaten zweidimensional dargestellt. Der Steigungsschwerpunkt ändert sich in diesem Fall nicht und wird daher vernachlässigt.

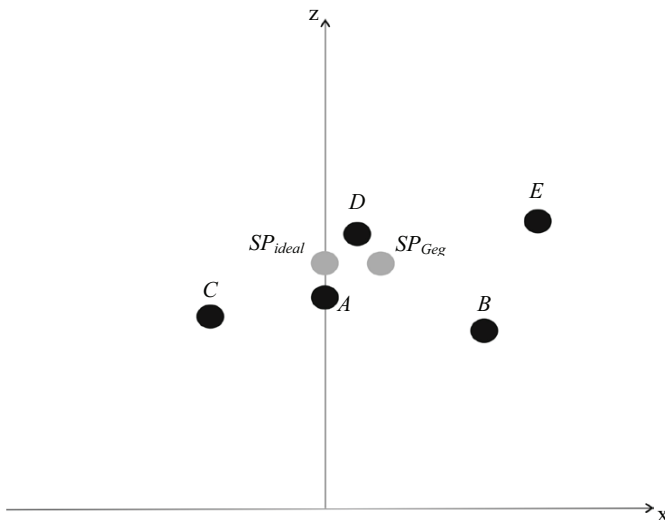


Abb. 6.3: Punktwolke der klassifizierten Schwerpunkte

Zwei Personen im Fahrzeug verschieben in diesem Beispiel den Schwerpunkt relativ weit nach vorne. Je weiter sich der Schwerpunkt nach vorne in x-Richtung bewegt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Gesamtschwerpunkt ebenfalls in die x-Richtung wandert.

Die Baugruppen der mechanischen Verstellung sind auf der z-Achse angeordnet, da diese Komponenten symmetrisch zur Achse positioniert sind. Teile wie Monitore und Sitze befinden sich im Fahrzeug aufgrund der Verstellung und des Gewichtes relativ weit vorne in der Klasse B.

Leichtbaurahmen, Mittelkonsole und die Frontscheibe können nicht mehr ohne großen Aufwand bezüglich des Gesamtschwerpunktes verändert werden und sind in Klasse D integriert. Aus der Tabelle 6.3, in der die Klassifizierung definiert ist, wird die Annahme vorausgesetzt, dass sich die Bauteile in der Klasse B und C noch bei Bedarf relativ einfach umpositionieren lassen.

Bei Fahrzeugprojekten mit vielen Bauteilen ist es ratsam, ein entsprechendes Programm zu verwenden, um während des Änderungsmanagements möglichst zeitnah reagieren zu können.

6.3 Integration in das programmierte Berechnungsverfahren

Im ersten Schritt werden die 82 Komponenten in die Eingabemaske neu eingetragen. Damit kann der Eintrag in die Tabelle 6.2 eingespart werden, da die Bauteile automatisch untereinander eingetragen und sortiert werden.

Die Bauteile, die bereits eingetragen sind, werden in der Liste unter „Gefundene Bauteilliste“ dargestellt. Der Vorteil ist, dass die Klassifizierung direkt eingetragen werden kann und die Sortierung somit automatisch erfolgt.

Im Verlauf des Forschungsprojekts hat sich gezeigt, dass die Angabe des Gesamtgewichts stets wichtig ist. Mit diesem Programm besteht die Möglichkeit, wenn die elektronischen Auslegungen der Bauteile nur ein bestimmtes Gesamtgewicht zulassen, einen Grenzwert zu definieren. Wird dieser Wert z. B. überstiegen, erscheint eine Information.

Mittels der Maske können entweder neue Bauteile eingetragen bzw. verändert werden oder es erfolgt die Auflistung mithilfe eines vorhandenen Suchbegriffs.

The screenshot shows a software window titled 'Konstruktion und Entwicklung' with a search and data entry interface. The interface includes a search bar with the label 'Suchbegriff:' and a 'Suchen' button. Below this are several input fields for component details: 'Bauteil-Nr:' (value: 1), 'Bauteil:' (value: Antriebsmotoren), 'Anzahl:' (value: 2) and 'Gesamtanzahl:' (value: 82), 'Masse (kg):' (value: 19) and 'Gesamtmasse:' (value: 389), 'X-Achse (MP):' (value: 0), 'Y-Achse:' (value: 0), and 'Z-Achse (MP):' (value: 280). There are buttons for 'Änderung speichern' and 'Bauteil neu eintragen'. At the bottom, a table titled 'Gefundene Bauteilliste:' displays a list of components with their respective counts and masses.

Gefundene Bauteilliste:			
1	Antriebsmotoren	2	19
2	Fahrwerk	2	17
3	Sitze	2	14
4	Spindel	2	2
5	Batterien	4	16

Abb. 6.4: Eintragung und Speicherung der Fahrzeugbauteile für weitere Fahrzeugberechnungen

Die Liste hat den Vorteil, dass weitere Bauteile angezeigt werden können. Durch das systematische Auswählen einer dieser Komponenten erfolgt direkt das Einlesen in die Textfelder. Somit ist es möglich, die Koordinaten zu prüfen oder z. B. die Bauteilanzahl zu

ändern. Mit der Schaltfläche „Änderung speichern“ wird der alte Eintrag mit dem geänderten Eintrag überschrieben. In dem Fall hingegen, dass ein Bauteil neu eingetragen wird, erfolgt diese Maßnahme in einer neuen Zeile.

Die Ergebnisse der Schwerpunkte sind in Bezug auf die mechanische Funktionalität von großer Bedeutung. Für die Parksituation ist es relevant, die Klasse A so weit wie möglich entgegen der x-Achse zu verschieben, bis der maximale Abstand L_{\max} der Achsen zwischen Stütz- und Antriebsräder erreicht ist. Dieser Position ist die aktuelle Schwerpunktlage zu entnehmen und einzutragen. Die Verstelllänge, die aufgrund der Spindellänge oder eines anderen Mechanismus praktisch maximal möglich ist, beträgt in diesem Fahrzeugkonzept beispielsweise 380 mm.

Idealerweise erfolgt die Parksituation auf einer horizontalen Ebene, sodass der Böschungswinkel für diesen Fall irrelevant ist. Andernfalls ist dieser Winkel mit zu berücksichtigen. Es ist sinnvoll, zu testen, ab welchem Böschungswinkel der Verstellmechanismus seine Funktion nicht mehr erfüllt, um für die Testfahrten einen entsprechenden Grenzwert abzuschätzen, bei dem das Parken des Fahrzeuges kritisch wird.

Konstruktion und Entwicklung

Bauteilliste | Ergebnisse der Schwerpunkte | **Park- und Fahrsituation** | Steigungsfähigkeit

Parameter für die Parksituation:

1. Verstelllänge (mm): 3. L max (mm):

2. Z - Schwerpunkt (mm): 4. Bodenfreiheit (mm):

2. X - Schwerpunkt (mm) 5. Böschungswinkel (°):

Berechnen

Ergebnisse:

erfüllt = 1:
nicht erfüllt = 0:

SOLL - Verstellweg (mm):

IST - Verstellweg (mm):

Abb. 6.5: Berechnung und Bewertung des Verstellweges für die Parksituation

In diesem Szenario ist der Verstellweg mit der ausgelegten Mechanik erfüllt. Der Offset zwischen den beiden Abständen ist allerdings nicht sehr groß, sodass bei Änderungen, die

den Verstellweg (SOLL) aufgrund möglicher Parameteränderungen vergrößern, stets zu beobachten ist, ob diese Funktion erfüllt bleibt.

Des Weiteren wurde in den Anforderungen zu Beginn eine Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges definiert. Dieser Wert stellt für die Berechnung der Steigungsfähigkeit den elementaren Wert dar. Nur so kann man feststellen, ob das Ziel erreicht worden ist. Es wird davon ausgegangen, dass der Steigungswinkel auf Grundlage der horizontalen Ebene berechnet wird. Der Radius der Räder, die jeweils den Einfluss auf die Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges haben, kann direkt aus den Spezifikationen abgelesen werden. Anders als im vorherigen Eingabefenster ist an dieser Stelle derjenige Schwerpunktabstand vom Interesse, mit dem das Fahrzeug auf eine mögliche Steigung zufährt. Die Geometriedaten sind der CAD-Konstruktion zu entnehmen. Unabhängig von dieser Berechnung kann zur Verifizierung der Ergebnisse die aktuelle Fahrzeugkonstruktion verwendet werden, um zu prüfen, ob die Daten übereinstimmen.

Nachdem der Schalter „Berechnen“ gedrückt wurde, kann das Ergebnis direkt abgelesen werden. Da der berechnete Steigungswinkel des Fahrzeuges größer ist als die ursprünglich geplante Steigung, ist die Bedingung erfüllt.

Konstruktion und Entwicklung

Bautelliste | Ergebnisse der Schwerpunkte | Park- und Fahrsituation | **Steigungsfähigkeit**

Parameter zur Steigungsberechnung:

1. Steigungswinkel (SOLL in °):

2. Böschungswinkel (°):

3. Radius Stützrad (mm):

4. Radius Antriebsrad (mm):

5. z - Achsabstand (mm):

6. x - Achsabstand (mm):

Ergebnisse:

erfüllt = 1:
nicht erfüllt = 0:

Steigungswinkel (IST in °):

Abb. 6.6: Berechnung und Prüfung der Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges

Im weiteren Prozessverlauf erfolgt der Blick auf die unterschiedlichen Schwerpunkte, die bewertet und in dieser Hinsicht klassifiziert wurden. Priorität hat in diesem Beispiel die x-Achse, da dieser Wert für das Fahrzeug hinsichtlich der Parksituation kritisch sein kann. Bezüglich der Steigungsfähigkeit ist für den Fall, dass dieser Wert nicht erfüllt werden kann, praktisch zu prüfen, welcher tatsächliche Wert maßgeblich ist. Dafür ist es notwendig, die Fahrrouete zu vermessen und mit dem berechneten Steigungswert zu vergleichen. Aufgrund der Tatsache, dass bestimmte elektronische Bauteile im Fahrzeug

zu befestigen sind, sollte dafür eine erste Idee für die Positionierung erarbeitet werden. Praktisch ist es von Vorteil, eine akzeptable Abweichung der Schwerpunktlage zu definieren, da nicht immer alle Toleranzen und Fertigungsmöglichkeiten eingehalten werden können.

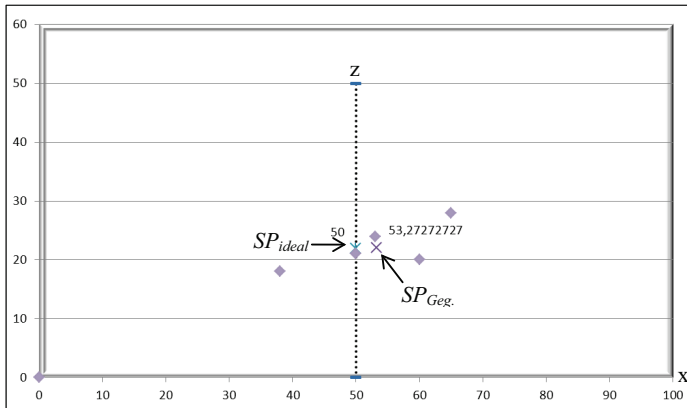


Abb. 6.7: Klassifizierte Schwerpunktkoordinaten

Die Daten in x-Richtung zeigen, dass eine Abweichung zwischen den beiden Gesamtschwerpunkten vorhanden ist, doch sie liegt innerhalb der akzeptablen Toleranz von 10 %.

6.4 Änderungen im Projekt

Im Projektverlauf kann es durchaus vorkommen, dass Änderungen vorgenommen werden müssen, z. B., um die ergonomischen Fahrzeugbedingungen zu verbessern, die aber auch im gleichen Moment einen negativen Einfluss auf den Gesamtschwerpunkt haben können. Da aus diesen Gründen die Baugruppen in x-Richtung umpositioniert werden mussten – z. B. die Mittelkonsole, die Sitze und somit logischerweise auch die Positionslage der Personen –, sind von den Richtungsveränderungen die Schwerpunktklassen A, B und E betroffen.

Die Geometrie des Fahrzeuges bleibt jedoch bestehen, sodass die Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges in diesem Beispiel dieselbe bleibt. Falls die Geometrie verändert werden würde, sodass die Steigungsfähigkeit größer wird, kann sich gleichzeitig ebenfalls der Einstiegswinkel verändern, in dem das Fahrzeug parkt. Je größer dieser Parkwinkel wird, desto kritischer wird die mechanische Funktion hinsichtlich der horizontalen Fahrzeugpositionierung.

Die Schwerpunktlage hat einen relativ großen Einfluss auf die mechanische Mimik, die notwendig ist, um das Fahrzeug aus der Parkposition in den horizontalen Fahrmodus zu verstellen. Diese Schwerpunktwerte haben sich aufgrund der Projektänderungen verändert und sind im weiteren Schritt bezüglich der Toleranz zu untersuchen. Die Auswertung des umseitigen Diagramms zeigt, dass die akzeptable Abweichung in diesem Fall zu groß ist,

da die Grenze bei einer möglichen Abweichung von 10 % höchstens 55 cm betragen darf. Der tatsächliche Wert liegt fast bei 56,7 cm. Es resultiert ein Offset von circa 1,7 cm.

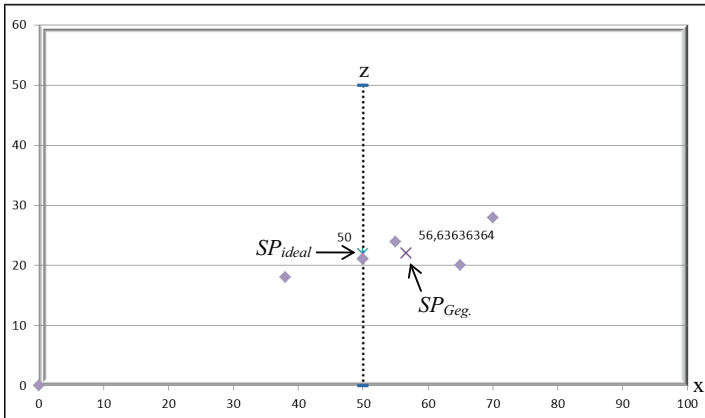


Abb. 6.8: Neuer Fahrzeugschwerpunkt nach einer konstruktiven Änderung

Die neue Berechnung zeigt, dass die Bedingung nicht erfüllt ist, da die Soll-Verstellung nicht mit der Ist-Verstellung erzielt werden kann.

Konstruktion und Entwicklung ☰

Bautelliste | Ergebnisse der Schwerpunkte | **Park- und Fahrsituation** | Steigungsfähigkeit

Parameter für die Parksituation:

1. Verstelllänge (mm): <input style="width: 50px;" type="text" value="380"/>	3. L max (mm): <input style="width: 50px;" type="text" value="1300"/>
2. Z - Schwerpunkt (mm): <input style="width: 50px;" type="text" value="500"/>	4. Bodenfreiheit (mm): <input style="width: 50px;" type="text" value="180"/>
2. X - Schwerpunkt (mm): <input style="width: 50px;" type="text" value="330"/>	5. Böschungswinkel (°): <input style="width: 50px;" type="text" value="0"/>

Ergebnisse:

erfüllt = 1:
 nicht erfüllt = 0:

SOLL - Verstellweg (mm):
 IST - Verstellweg (mm):

Abb. 6.9: Berechnung und Bewertung des neuen Verstellweges in Abhängigkeit der Parksituation

Aus der Tab. 6.3 wird angenommen, dass sich die Schwerpunktklassen B und C am einfachsten mit überschaubarem Aufwand verändern lassen.

The image shows two software windows side-by-side. The left window, titled 'Schwerpunktverschlage', contains six sections for 'Schwerpunkt A' through 'F'. Each section has input fields for 'x' and 'z' values and checkboxes for 'x-Übernehmen' and 'z-Übernehmen'. For example, Schwerpunkt A has x=50 and z=20. The right window, titled 'Schwerpunktverschiebung', displays the calculated 'Gesamtschwerpunkt' with x=54,545 and z=22. It also shows the 'Schwerpunkt zur Orientierung' with x=50 and z=22. Buttons for 'Übernehmen/Schließen' and 'Schließen' are visible at the bottom of each window.

Abb. 6.10: Neue Modellierungsvorschläge für den Gesamtschwerpunkt – Übernahme B und C in x-Richtung

Nach der Übernahme der vorgeschlagenen Schwerpunktparameter wird der neu ermittelte x-Wert von 54,55 cm angezeigt. Die akzeptable Abweichung von 10 % wurde dadurch erzielt.

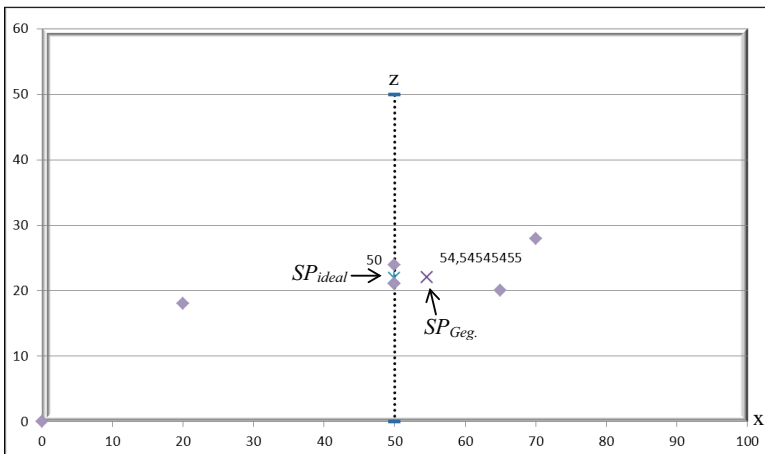


Abb. 6.11: Neue Schwerpunktkoordinaten für die Konstruktion

Bevor die Mechanik bezüglich der Parkposition in der Eingabemaske überprüft und wieder bewertet wird, sollten vorab diese möglichen Änderungen mit der Konstruktion besprochen und freigegeben werden.

Die Schwerpunktveränderung von 56,64 cm nach 54,55 cm hat eine Differenz abgerundet von 20 mm, d. h. statt 330 mm, in x-Richtung wird nun 310 mm eingetragen und neu berechnet.

The screenshot shows a software window titled "Konstruktion und Entwicklung" with a tab "Park- und Fahrsituation". The interface is divided into several sections:

- Parameter für die Parksituation:**
 - 1. Verstelllänge (mm):
 - 2. Z - Schwerpunkt (mm):
 - 2. X - Schwerpunkt (mm):
 - 3. L max (mm):
 - 4. Bodenfreiheit (mm):
 - 5. Böschungswinkel (°):
- Ergebnisse:**
 - erfüllt = 1:
 - nicht erfüllt = 0:
 - SOLL - Verstellweg (mm):
 - IST - Verstellweg (mm):

A "Berechnen" button is located between the parameter and result sections.

Abb. 6.12: Neue Berechnung des Verstellweges in Abhängigkeit der Parksituation

Das Ergebnis zeigt, dass die Bedingung knapp erfüllt ist. Hinsichtlich der konstruktiven Verantwortung für diesen Mechanismus ist es ratsam, die weiteren Änderungen als kritisch einzustufen und Bauteiländerungen möglichst nur in der Richtung zuzulassen, in der der x-Wert und somit der tatsächliche Verstellweg verkleinert wird.

Dieses Szenario stammt aus dem praktischen Forschungsprojekt, das auf ein neues vergleichbares Fahrzeugkonzept übertragen wurde. Es zeigt, wie wichtig ein Orientierungsschwerpunkt für die Untersuchung der Funktionalität der mechanischen Verstellung sein kann. Ohne diesen unterstützenden Punkt kann diese Änderung aufgrund der gesamten Komplexität des Fahrzeuges in Vergessenheit geraten und die neuartig ausgelegte Mechanik nutzlos machen. Im Forschungsprojekt ist temporär dieses Problem aufgetreten, wodurch dieser Ansatz der Schwerpunkt klassifizierung und Orientierungsschwerpunkt entstanden ist.

Aus diesen Gründen ist es sinnvoll, dieses entwickelte Werkzeug für innovative Fahrzeuge über den gesamten Entwicklungszeitraum zu verwenden.

6.5 Lösungsvorschläge für die zukünftige Fahrzeugintegration

Wenn in unterschiedlichen Szenarien ähnliche Fahrzeuge eingesetzt werden, macht es Sinn einen Fahrhinweis bezüglich des Gesamtschwerpunktes in Abhängigkeit von den Fahrparametern zu berechnen und anzuzeigen, besonders wenn sich die Schwerpunktbereiche während des Betriebs, z. B. an Flughäfen, durch unterschiedliche Lasten wie Gepäck jederzeit ändern können. Dazu sind zunächst im Konstruktionsprozess eine Lastanalyse und die nachfolgende Bewertung notwendig.

Bei Einsätzen auf Flughäfen oder in Freizeitparks, bei denen sich der Lastzustand, z. B. aufgrund des Gepäcks, stets verändern kann, aber die konstruktive Grenzen des Fahrzeugs dennoch nicht überschritten werden sollen, könnte folgender Prozessablauf hilfreich sein, der in das Programm implementiert werden könnte.

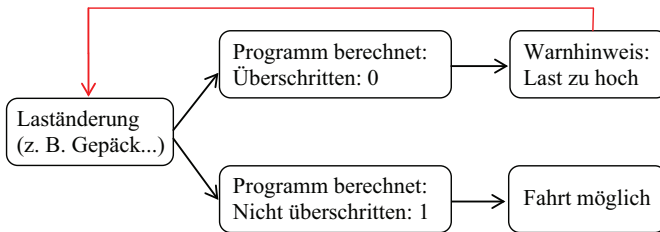


Abb. 6.13: Prozess bei Laständerung am Fahrzeug beispielsweise durch Gepäck

Andernfalls ergibt sich ein weiterer Vorschlag, die Laständerung nicht nur vom zulässigen Gesamtgewicht des Fahrzeuges abhängig zu machen, sondern gleichzeitig auch vom Fahrzeugschwerpunkt.

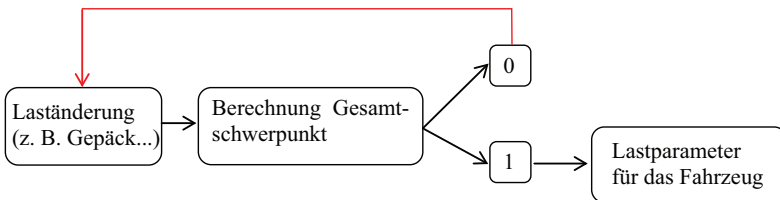


Abb. 6.14: Prozess bei Laständerung abhängig vom Fahrzeugschwerpunkt

Die Integration eines solchen Verfahrens kann beispielsweise mit einer Art Ampelfunktion erfolgen, wobei der Fahrer stets über die aktuelle Situation bei wechselnden Lasten informiert wird.

6.6 Erarbeitung eines Konzepts zur Lebensdauerabschätzung

Die Ergebnisse der praktischen Prüfung und der tatsächlichen Feldversuche können sich häufig voneinander unterscheiden. Prüfbedingungen wie Temperatur, Lastwechsel und Prüfzeit werden in vielen Fällen aus zeitlichen bzw. wirtschaftlichen Gründen allenfalls ausreichend berücksichtigt.

Besonders bei innovativen Produkten, bei denen keinerlei Erfahrungswissen aus vergleichbaren Vorgängerprojekten vorhanden ist, könnte eine Informationsbasis auf Grundlage eines Vergleichs von Prüfung und Feldversuch interessant sein. In diesem Fall analysiert man die kritischen Bauteile des Systems, die zu untersuchen sind, und verfolgt das nachfolgende Vorgehen.

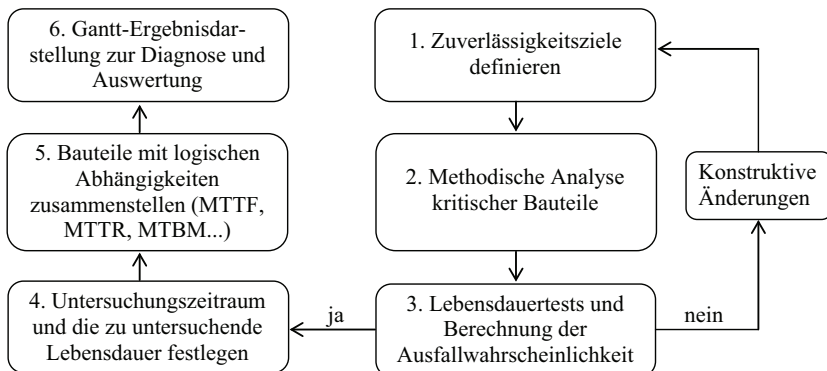


Abb. 6.15: Verfahren zum Lebensdauerkonzept für die Betriebsphase

Die Automobilbranche nutzt häufig die B_q -Lebensdauer, demnach wären z. B. nach bestimmten statistischen Zyklen für $q=10$ noch 90 % intakt. Unter dieser Zuverlässigkeits- bzw. Lebensdauerannahme sind die Ausfallwahrscheinlichkeiten für die jeweiligen kritischen Bauteile bzw. Systeme zu ermitteln.

Tab. 6.4: Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten eines Fahrwerks

Ordnungszahl j	Lebensdauerdaten (t)	Ausfallwahrscheinlichkeit $F_{(t)}$
1	20000	8,33
2	29000	20,24
3	49000	32,14
4	54000	44,05
5	79000	55,95
6	98000	67,86
7	110000	79,76
8	135000	91,67

Für das Berechnen der Ausfallwahrscheinlichkeit /VDA 00/ wurde mithilfe der Formel

$$F_t = \frac{j - 0,3}{n + 0,4} \cdot 100 \% \quad (6.1)$$

berechnet.

Aus diesen Werten kann eine Lebensdauerkurve erstellt werden, indem weitere relevante Parameter wie die charakteristische Lebensdauer T , die B_q -Lebensdauer und der Formparameter b bestimmt werden können.

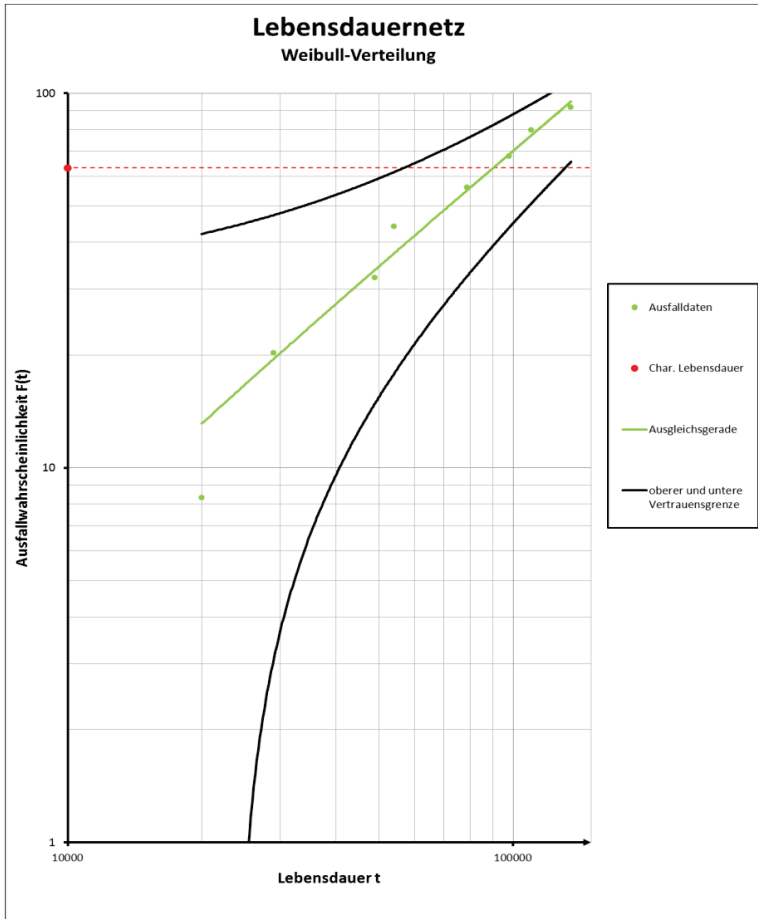


Abb. 6.16: Ergebnisse im Lebensdaueretz für das Fahrwerk

Dieses Prozedere wird für jedes zu untersuchende Bauteil wiederholt, sodass die erstellten Weibullkurven bzw. Ergebnisse bezüglich der zu untersuchenden Lebensdauer für die weiteren Analysen zur Verfügung stehen.

In diesem Beispiel wird eine B_{10} -Lebensdauer für die kritischen Systeme definiert. Die B_{10} -Lebensdauer wird zunächst für das Fahrwerk aus den angenommenen Daten der Tab. 6.4 berechnet.

Für die anderen Systeme, so für den Rahmen und die Anbindung, werden diese B_{10} -Parameter für das weitere Vorgehen in Tab. 6.5 hypothetisch abgeschätzt.

Tab. 6.5: B_q -Lebensdauer kritischer Teile

Bauteil	B_q -Lebensdauer	Zeit (Std.)	Tage
Fahrwerk	B_{10}	20670	861
Rahmen	B_{10}	28465	1186
Anbindung	B_{10}	30241	1260

Die resultierenden Zeiten werden zur besseren Darstellung im Gantt-Diagramm in Tage umgerechnet. Ziel ist es, in den Funktionsprozess der jeweiligen Systeme beispielsweise wahrscheinliche Reparatur- bzw. Ausfallzeiten zu integrieren und diese Abhängigkeiten mit einem Netzplan zu implementieren, damit ein komplexes System zur Diagnose und für weitere Untersuchungen in der Betriebsphase genutzt werden kann. Des Weiteren besteht möglicherweise Leichtbaupotenzial aufgrund des Vergleichs der Ergebnisse während der tatsächlichen Inbetriebnahme mit denjenigen der vorherigen abgeschätzten Lebensdauerkurve, die beispielsweise aus Laboruntersuchungen stammt. Falls sich die beiden Ergebnisse sich über 10 % unterscheiden, sollte die Lebensdauerkurve dem Betriebsverhalten angepasst werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist es sinnvoll, zunächst den Untersuchungszeitraum zu definieren, in dem die unterschiedlichen Zustände (Funktionalität, Ausfall, Mittlere Reparaturzeit...) analysiert werden sollen.

Tab. 6.6: Untersuchungszeitraum definieren

Untersuchungszeitraum		
Betriebsdauer (pro Tag)	Start	Ende
8 Std.	08.09.2014	16.09.2020

Für das erste Szenarium werden Bauteile wie das Fahrwerk, die Antriebsmotoren, der Rahmen, die Anbindung und der Aufbau des Fahrzeuges, indem das Fahrzeug zumindest statisch temporär belastet wird, nachfolgend aufgelistet.

Tab. 6.7: Für die Verwendung eines Netzplans sind die Bauteile mit verschiedenen Abhängigkeiten zu definieren

Nr.	Bauteil / Maßnahme	Nachfolger	Vorgänger	Wartung	BP	Freigabe
1	Antriebsmotoren	-	2,3,4,5	-	-	-
2	Fahrwerk	1	-	ja	ja	ja
3	Rahmen	1	-	-	-	-
4	Anbindung	1	-	-	-	-
5	Aufbau	1	-	-	-	-

Um diesen Anfangszustand und dessen Abhängigkeiten zu definieren, werden sowohl der Vorgänger als auch der Nachfolger bestimmt. Diese Art der Vernetzung wird aus der

Netzplantechnik hergeleitet. Für das Fahrwerk wird eine Wartung definiert mit der Möglichkeit eines Systemausfalls. Dargestellt wird dies mit einem Blockingpoint (BP). Eine Freigabe ist weiterhin erforderlich, um das System anschließend nach der Reparatur bzw. dem Austausch in Betrieb zu nehmen.

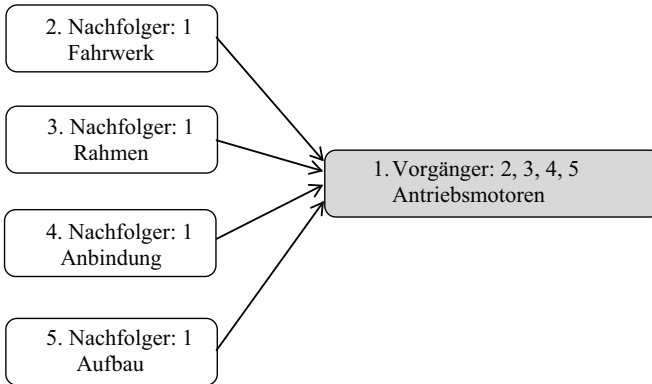


Abb. 6.17: Festlegung der Netzplanstruktur – Szenario 1

Die Punkte 2 bis 5 unterliegen schon während des Aufbaus einer statischen Vorbelastung, die bereits berücksichtigt wird. Die Antriebsmotoren werden erst im Fahrbetrieb belastet, wenn das Fahrzeug aufgebaut ist. Daraus folgt die Initialisierung im Balkendiagramm.

Tab. 6.8: Anfangsbedingungen mit Abhängigkeiten definiert

1	Objekt:	Fahrzeugprojekt					08.09.14	17.12.14	27.03.15	05.07.15	13.10.15	21.01.16	30.04.16	08.08.16	16.11.16	24.02.17	04.06.17	12.09.17	21.12.17	31.03.18	09.07.18	17.10.18	25.01.19	05.05.19	13.08.19
2	Produktstart:	08.09.2014		Skalierung:		100																			
3	Bauteile	Tag	Beginn	Tag	Ende	Art	E	L-Dauer																	
4	Antriebsmotoren	Di	07.10.14	Mi	22.02.17		1	869																	
5	Fahrwerk	Mo	08.09.14	Do	08.02.18		1	1249																	
6	Rahmen	Mo	08.09.14	Fr	31.05.19		1	1726																	
7	Anbindung	Mo	08.09.14	Mo	16.09.19		1	1834																	
8	Aufbau	Mo	08.09.14	Mo	06.10.14		1	28																	

In diesem Szenario musste das Fahrwerk frühzeitig ausgetauscht und gewartet werden. Anschließend geht man davon aus, dass die bereits abgeschätzte Lebensdauer wieder dem vollen Zeitumfang entspricht.

Dazu ist es wichtig, einen weiteren Punkt namens „Austausch/Wartung Fahrwerk“ dem Diagramm hinzuzufügen. Weiterhin wird der Zustand „Wartung“ sicherheitshalber auch bei den Antriebsmotoren berücksichtigt.

Das Fahrwerk wird in Tab. 6.9 mit dem neuen Punkt 6 verknüpft, sodass beide Zeiträume für die Wartung bzw. den Austausch und für die Lebensdauer des Fahrwerks zur Untersuchung berücksichtigt werden können.

In diesem Fall erfolgt die Festlegung der Vorgänger bzw. Nachfolger wie folgt:

Tab. 6.9: Neue Abhängigkeit wird für den Austausch bzw. die Wartung des Fahrwerks integriert

Nr.	Bauteil / Maßnahme	Nachfolger	Vorgänger	Wartung	BP	Freigabe
1	Antriebsmotoren	-	5	ja	ja	ja
2	Fahrwerk	-	6	ja	ja	ja
3	Rahmen	-	-	-	-	-
4	Anbindung	-	-	-	-	-
5	Aufbau	1	-	-	-	-
6	Austausch / Wartung Fahrwerk	2	-	-	-	-

Die Lebensdauerzeit des Fahrwerks beginnt nun erst nach dem Austausch.

Tab. 6.10: Ergebnisdarstellung des Nachfolgers unter Berücksichtigung eines Wartungsintervalls des Fahrwerks – 2 Abhängigkeit zwischen Austausch/ Wartung und dem Fahrwerk.

1	Objekt:		Fahrzeugprojekt					08.09.14	17.12.14	27.03.15	05.07.15	13.10.15	21.01.16	30.04.16	08.08.16	16.11.16	24.02.17	04.06.17	12.09.17	21.12.17	31.03.18	09.07.18	17.10.18	25.01.19	05.05.19	13.08.19
	2	Produktstart:	08.09.2014		Skalierung:		100																			
3	Bauteile	Tag	Beginn	Tag	Ende	Art	E	L-Dauer																		
4	Antriebsmotoren	Di	07.10.14	Mi	22.02.17		1	869																		
5	Fahrwerk	Di	03.02.15	Fr	06.07.18		1	1249																		
6	Rahmen	Mo	08.09.14	Fr	31.05.19		1	1726																		
7	Anbindung	Mo	08.09.14	Mo	16.09.19		1	1834																		
8	Aufbau	Mo	08.09.14	Mo	06.10.14		1	28																		
9	Austausch/ Wartung Fahrwerk	Mo	08.09.14	Mo	02.02.15		1	147																		

In dieses Szenario kann man entweder weitere Ausfälle integrieren, die im Labor nicht aufgedeckt werden konnten, oder man kann berechnete Ergebnisse mit der Praxis vergleichen.

Wichtig sind realistische Plausibilitäten für den Vergleich der Ergebnisse der Betriebsphase und derjenigen der Laborprüfung. Stellt sich beispielsweise für dieses Szenario heraus, dass das Fahrwerk schneller verschleißt aufgrund eines Montagefehlers während des Fahrzeugaufbaus, kann die ermittelte Lebensdauer aus dem Prüflabor weiterhin genutzt werden. Bei einem vergleichbaren Ausfall ist zu prüfen, ob die Randbedingungen mit dem Laborversuch tatsächlich übereinstimmen oder ob vielleicht eine mögliche Vorschädigung des Materials während des Versuchs vernachlässigt wurde und für eine signifikante Aussage vielleicht zu wenige Proben genutzt wurden.

Sowohl der mechanische Verstellmechanismus als auch die Antriebsmotoren sind für das Fahrverhalten bzw. für die Stabilisierung des Fahrzeuges grundlegend und deshalb sehr wichtig. Aus diesem Grund ist ein Untersuchungs- und Diagnosesystem zu entwerfen, das diese Bauteile bzw. Systeme über den Untersuchungszeitraum abbilden kann.

Aufgrund dieser Annahme wird ein neuer Anfangszustand festgelegt. Die Systeme werden nicht nur aufgelistet, sondern abgeschätzte Reparaturzeiten wie MTTR werden den

Systemen weiterhin zugeordnet. Bezüglich des Schrittmotors und der Antriebsräder ist anzunehmen, dass diese einen Fahrzeugausfall erzeugen können, bei dem keine Reparatur möglich ist.

Tab. 6.11: Anfangsbedingung definiert mit MTTR und Ausfall

1 Objekt:		Fahrzeugprojekt						06.09.14	17.12.14	27.03.15	06.07.15	13.10.15	21.01.16	30.04.16	06.08.16	16.11.16	24.02.17	04.06.17	12.09.17	21.12.17
2 Produktstart:		08.09.2014			Skalierung:			100												
3	Bauteile	Tag	Beginn	Tag	Ende	Art	L-Dauer													
4	Antriebsmotoren	Mo	08.09.14	Mi	25.01.17		1	870												
5	Schrittmotoren	Mo	08.09.14	Fr	29.12.17		1	1208												
6	Rahmen	Mo	08.09.14	Di	22.11.16		1	806												
7	Anbindung	Mo	08.09.14	Di	05.07.16		1	666												
8	Verstellsystem	Mo	08.09.14	Fr	29.04.16		1	599												
9	Rahmen (MTTR)	Mo	08.09.14	Mo	20.10.14		1	42												
10	Anbindung (MTTR)	Mo	08.09.14	Mo	06.10.14		1	28												
11	Verstellsystem (MTTR)	Mo	08.09.14	Mo	13.10.14		1	35												
12	Ausfall (Antriebsmotor)	Mo	08.09.14	Mo	05.01.15		1	119												
13	Ausfall (Schrittmotor)	Mo	08.09.14	Mo	05.01.15		1	119												

Bei diesem Szenario wird die Erkenntnis angenommen, dass zunächst die Antriebsmotoren ausfallen. Nach dem Austausch bricht die Anbindung für die mechanische Verstellung. In diesem Zeitraum wird festgestellt, dass das Verstellsystem gleichzeitig ebenfalls gewartet werden sollte. Beim Funktionstest der Anbindung fällt zufällig (b=1) der Schrittmotor aus. Diese Zustände werden tabellarisch definiert.

Tab. 6.12: MTTR und Ausfall Abhängigkeiten im Funktionsbetrieb werden im Netzplan integriert

Nr.	Bauteil / Maßnahme	Nachfolger	Vorgänger	Wartung	BP	Freigabe
1	Antriebsmotoren	-	9	-	ja	ja
2	Schrittmotoren	-	10	-	ja	ja
3	Rahmen	-	-	ja	-	-
4	Anbindung	-	7	ja	-	-
5	Verstellsystem	-	8	ja	-	-
6	Rahmen (MTTR)	-	-	-	-	-
7	Anbindung (MTTR)	4	-	-	-	-
8	Verstellsystem (MTTR)	5	-	-	-	-
9	Ausfall (Antriebsmotor)	1	-	-	-	-
10	Ausfall (Schrittmotor)	2	-	-	-	-

Im Gantt-Diagramm können diese Ausfall- und Reparaturzustände übersichtlich integriert werden. Die Systeme werden stets so erneuert, sodass die Lebensdauerzeiten übernommen

werden können. Die jeweiligen Nachfolger aus der Tab. 6.12 werden in der Tab. 6.13 dargestellt.

Tab. 6.13: Ergebnisdarstellung mit dem jeweiligen Nachfolger – Beispiel: 1 – Abhängigkeit zwischen Ausfall und Antriebsmotoren, 4 – Abhängigkeit zwischen MTTR und Anbindung, 5 – Abhängigkeit zwischen MTTR und Verstellsystem, 2 – Abhängigkeit zwischen Ausfall und Schrittmotoren.

Fahrzeugprojekt							08.09.14	17.12.14	27.05.15	15.07.15	21.07.15	30.04.16	09.09.16	16.11.16	23.02.17	05.04.17	12.06.17	21.12.17	31.03.18	09.07.18	17.10.18	25.01.19	02.04.19	10.06.19	19.09.19	27.11.19	29.02.20	08.06.20	16.09.20	24.12.20	02.04.21	10.07.21	21.10.21	29.01.22	06.05.22	14.08.22	21.11.22	29.02.23	06.05.23	13.08.23	21.09.23
1	Objekt:						Skalierung:	100																																	
2	Produktstart:	08.09.2014																																							
3	Bauteile	Tag	Beginn	Tag	Ende	Art	L-Dauer																																		
4	Antriebsmotoren	Mo	27.07.15	Mi	06.12.17	1	863																																		
5	Schrittmotoren	Di	29.11.16	Do	26.03.20	1	1213																																		
6	Rahmen	Mo	08.09.14	Di	22.11.16	1	806																																		
7	Anbindung	Mi	13.07.16	Mi	02.05.18	1	658																																		
8	Verstellsystem	Mo	15.08.16	Fr	15.12.23	1	2678																																		
9	Rahmen (MTTR)	Mo	08.09.14	Mo	20.10.14	1	42																																		
10	Anbindung (MTTR)	Sa	30.04.16	Di	12.07.16	1	73																																		
11	Verstellsystem (MTTR)	Fr	20.05.16	Fr	12.08.16	1	84																																		
12	Ausfall (Antriebsmotor)	Fr	27.03.15	Fr	24.07.15	1	119																																		
13	Ausfall (Schrittmotor)	Mo	08.08.16	Mo	28.11.16	1	112																																		

Der Ausfall des Schrittmotors wird jedoch dokumentiert und gespeichert. Wenn signifikante Informationen über dessen Ausfallverhalten bereitstehen und diese plausibel sind, kann die Lebensdauerzeit des Schrittmotors nach Weibull neu abgeschätzt und in das Verfahren implementiert werden.

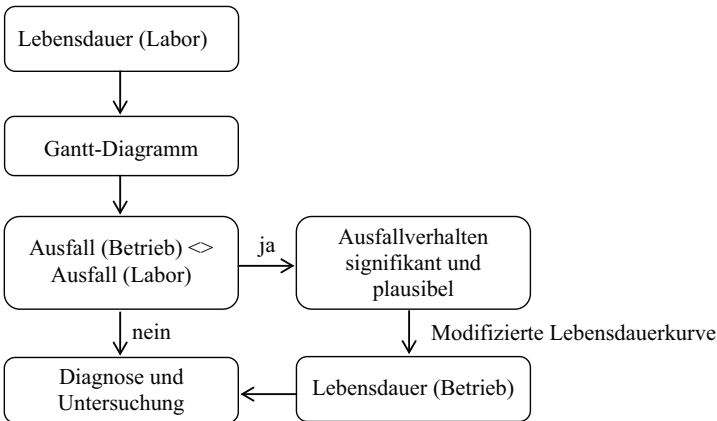


Abb. 6.18: Prozessablauf zur Diagnose und Nutzung des Ausfallverhaltens

Prinzipiell werden zu Beginn der Betriebsphase, wenn keine weiteren Ergebnisse vorliegen, die ermittelten Ausfallwerte aus den Laborversuchen für die Diagnose und die Untersuchung übernommen. Findet zufällig ein vorzeitiger Ausfall des Bauteils statt, ist dieser auf Plausibilität zu prüfen und entsprechend zu dokumentieren. Ist das Ausfallverhalten im Betrieb mit den Laborversuchen vergleichbar, können diese weiterhin genutzt werden. Zeigt das Ausfallverhalten mit der Zeit und der höheren Anzahl der vergleichbaren Systeme ein abweichendes Ausfallverhalten, ist die Lebensdauerkurve aus den Laborversuchen entsprechend zu modifizieren bzw. anzupassen. In diesem Fall könnte die Betriebslebensdauer beispielsweise für die Diagnose genutzt werden. Somit hätte man das Ausfallverhalten aus den Laborversuchen ersetzt durch das Ausfallverhalten während der Betriebsphase.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein innovatives Elektrofahrzeug entwickelt worden. Da keine Vorkenntnisse aus vergleichbaren Entwicklungen vorhanden waren, wurde zunächst ein Prozessablauf erarbeitet, um die Ziele unter Berücksichtigung der bereitstehenden Ressourcen zu erreichen.

Das Fahrzeug konnte mithilfe eines angepassten Ablaufplans und eines Expertenteams gebaut werden, wobei der Entwicklungsprozess allgemein gestaltet wurde, sodass er auch der Entwicklung vergleichbarer Produkte dienen kann.

Auf Basis der gewonnenen konstruktiven Erkenntnisse bezüglich des mechanischen Fahr- und Verstellsystems des Fahrwerks bzw. Fahrzeugrahmens konnten im Rahmen der Machbarkeitsprüfung Prüfzenarien geplant und durchgeführt werden, die der Untersuchung dieser Hauptbaugruppe hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Lebensdauer dienen.

Ziel war es, geeignete Methoden für die Untersuchungen zu erlernen, Daten zu gewinnen und Auslegungsstrategien zu kreieren, um zukünftig ähnliche Projekte in einem bestimmten Zeitfenster zum Erfolg führen zu können.

Mit Methoden der Zuverlässigkeitstheorie wie z. B. der FTA konnten sowohl Boolesche Gleichungen als auch Zuverlässigkeitgleichungen aufgestellt werden, sodass mit geeigneten Daten aus dem zukünftigen Feldversuch erste zeitnahe Abschätzungen generiert und Ausfallkombinationen aufgedeckt werden konnten. Mit diesen ersten Erkenntnissen ist das Risikopotenzial noch nicht ausreichend erfasst, daher wird weiterhin eine abgestimmte FMEA-Analyse angewandt, um geeignete Gegenmaßnahmen für eventuell auftretende Fehler zu erarbeiten.

Zusätzlich wurde die Checklisten-Methode zum Aufdecken potenzieller Fehler im Konstruktionsprozess erstmalig für ein Elektrofahrzeug genutzt, mit der Resonanz, dass die erarbeiteten Lösungsmöglichkeiten für die eruierten Fragestellungen präzise und reproduzierbar im Zusammenhang mit den zu verwendenden Maßnahmen formuliert werden sollten. Somit besteht beispielsweise die Möglichkeit, die Ressourcen für die Durchführung der beschriebenen Maßnahmen frühzeitig bereit- bzw. sicherzustellen.

Während der Entwicklungszeit sind praktische Tests wichtig, um beispielsweise zu untersuchen, ob die gewünschten Funktionen tatsächlich den praktischen Anforderungen entsprechen. Durch die kombinierte Durchführung unterschiedlicher Methoden wie FTA, FMEA oder der Checklisten-Methode konnten letztendlich die verschiedenen Systeme für einen Funktionstest priorisiert, geplant und mithilfe eines DoE-Versuchsplans durchgeführt werden.

Weiterhin wurde ein vereinfachtes Markov-Modell erstellt, das die Übergangszustände des neuartigen elektromechanischen Verstellsystems beschreibt. Mithilfe eines computerunterstützten Werkzeuges besteht die Möglichkeit, verschiedene Ausfallszenarien zeitnah abzuschätzen, wenn die Übergangswahrscheinlichkeiten bekannt sind. Somit konnten unterschiedliche Zustände bereits im Vorfeld simuliert werden, um einen tieferen Einblick in die praktische Funktionsprüfung zu bekommen. Auch wenn zu diesem Zeitpunkt noch keine Übergangswahrscheinlichkeiten bekannt sind, erhält man durch diese Methode eine tiefere Erkenntnis über die Modellierung der verschiedenen möglichen Zustände.

Mit Unterstützung eines geeigneten DoE-Versuchsplans und einer möglichst realitätsnahen Prüfung des mechanischen Verstellsystems konnte zielgerichtet die Freigabe für die Fahrzeugintegration erfolgen. Die ausgesuchten Faktoren resultierten einerseits aus den neuen Erkenntnissen, die aufgrund der Zuverlässigkeitsmethoden ermittelt wurden, und andererseits aus der Sicht, welche Faktoren für die Praxis wahrscheinlich am relevantesten sind.

Für verschiedene Simulationen wurde ein Prüfstand konzipiert, der im Anschluss dazu genutzt wurde, erste Schädigungsversuche bezüglich der mechanischen Anbindung mit unterschiedlichen Spindelsteigungen durchzuführen. Dadurch konnten an dem ausgewählten ABS-Kunststoff erste Schwachstellen aufgedeckt werden, da die Anbindung eine Rissbildung aufzeigte. Aus diesen Erkenntnissen resultierten die Ergebnisse, dass die kritische Anbindung am Fahrzeug zumindest teilweise aus Stahl gefertigt werden muss, um die Bruchdehnung sicherheitshalber zu erhöhen. Die wesentliche Erkenntnis war, dass bei dieser mechanischen Baugruppe ein Multi-Material-Design aus Kunststoff, Aluminium und Stahl für die geeignete Anwendung zum Ziel führt.

Aufgrund der quasi-statischen und dynamischen Werkstoffergebnisse aus unterschiedlichen Versuchen und Berechnungen an Aluminiumprofilen konnten mithilfe der ermittelten Werkstoffdaten weiterführende FEM-Festigkeitsberechnungen für die Rahmenstruktur vorgenommen werden.

Das Fahren auf einer Achse fordert stets die Bezugnahme auf den Gesamtschwerpunkt, um verschiedene Fahrsituationen grundlegend zu ermöglichen. Der mechanische bzw. geometrische Zusammenhang des Fahrzeugaufbaus ist bezüglich der mechanischen Stabilisierung äußerst kritisch zu betrachten, da die unterschiedlichen neuen Zustände des Fahrzeuges, wie Parken und horizontales Fahren definierte physikalische Voraussetzungen erfüllen müssen. Um diese Parameter herauszufiltern, wurden analytische Berechnungen durchgeführt, woraus anschließend ebenfalls der jeweilige Einfluss auf die Zielgröße berechnet werden konnte. Parallel dazu war es ebenfalls relevant, die geometrischen Parameter für die Steigungsfähigkeit zu analysieren und deren unterschiedlichen Einfluss auf die Zielgröße zu bestimmen. Diese neuen Erkenntnisse waren für die Programmimplementierung wichtig, damit diese Berechnung während des Entwicklungsprozesses zeitnah durchgeführt werden konnte.

Aufgrund dieser Parallelisierung von Theorie und Praxis sind neue Ansätze erarbeitet worden, die in den konstruktiven Entwicklungsprozess eingebettet wurden, um für das Fahrzeug eine grundlegend neue funktionale Auslegung zu entwickeln. Neue Produkte besitzen meist neue Potenziale für die Forschung. Wenn jedoch diese Potenziale nicht aufgedeckt und genutzt werden, besteht die Gefahr, dass durch das Übersehen dieser neuen Auslegungsarten das Fahrzeug im schlimmsten Fall nicht in den Fahrmodus versetzen werden kann. Aus diesem Grund sind diese Ansätze im Rahmen der Entwicklungsphase begleitend zu verwenden, damit die physikalischen Anforderungen des einachsigen Fahrzeugs frühzeitig berücksichtigt und kontrolliert werden können.

Ein weiteres Problem ist, dass Detailänderungen oft Folgeprobleme hervorrufen beispielsweise aufgrund neuer schwerer Bauteile. In diesem Fall besteht durch die erneute Schwerpunktlage die Gefahr, dass das Fahrzeug unter Umständen die physikalische Stimmigkeit ebenfalls nicht mehr erfüllt. In der Folge kann dies die mechanische Funktion eines einachsigen Fahrzeuges stark beeinträchtigen. In diesem Zusammenhang kam die Idee, einen sogenannten idealisierten Gesamtschwerpunkt bereits zu Beginn für das

Fahrzeug abzuschätzen, der im Idealfall mit dem sukzessiv berechneten Schwerpunkt übereinstimmt. Somit entstehen während des Fahrzeugaufbaus eine nachhaltige Orientierung sowie eine Kontrolle des Gesamtschwerpunktes im gesamten Entwicklungsprozess. Dies hat den Vorteil, dass bei nicht akzeptablen Abweichungen gezielte Änderungen an den Einzelschwerpunkten vorgenommen werden können. Da dies meistens sehr viele Punkte sind, kam während des Entwicklungsprozesses die weitere Idee, die Schwerpunkte in verschiedene Klassen mit einer Anzahl von maximal sechs einzuteilen, um somit die Übersicht zu bewahren und die Punkte aufgrund der Bewertung zu strukturieren. Der Nachteil ist, dass dieses Verfahren sehr zeitintensiv in der Anwendung ist, da stets viele Zusammenhänge bezüglich des Gesamtfahrzeuges berücksichtigt werden müssen.

Aus diesem Grund wurde ein Programm entwickelt, das die mögliche Verschiebung der Klassen im Konstruktionsprozess automatisch modellieren kann. Zukünftig könnte man z. B. erst die Klassen festlegen, um auf der Grundlage einen idealisierten Schwerpunkt abzuschätzen. Der Vorteil ist: Falls zu Beginn der Konzeptphase ein idealisierter Schwerpunkt definiert werden kann, können alle anderen Bauteile bzw. Einzelschwerpunkte sich vorzeitig an diesem Punkt orientieren.

Dieses Verfahren ist während des Forschungsvorhabens entstanden, da die Änderungen in der Konstruktion immer unübersichtlicher wurden und die Zeit dafür stets kürzer wurde. Gleichfalls fehlte die Übersicht, welche Auswirkungen eine Verschiebung der Bauteile nach sich zieht, da die Fahrzeugzustände zwischen dem Parken und der horizontalen Fahrt ebenfalls vom berechneten Schwerpunkt abhängen.

Mit diesem Programm kann die physikalische und mechanische Stimmigkeit eines einachsigen Fahrzeuges grundlegend vereinfacht und beschleunigt für den Konstruktionsprozess abgeschätzt werden. Zudem kann zeitnah eine schwerpunktabhängige Änderung unter Berücksichtigung der funktionalen Folgen in anderen mechanischen Fahrzeugzuständen erfolgen.

Die im VDA-Band 3 ausgeführten Methoden haben sich in der Automobilindustrie langjährig bewährt. Aus diesem Grund werden diese Berechnungsmöglichkeiten zur Abschätzung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit genutzt. Um diese Ergebnisse in Zukunft, z. B. in Feldversuchen, weiter nutzen zu können, wurde für die Auswertung ein Netzplan integriert, wodurch auch zusätzliche weitere Abhängigkeiten festgelegt werden können, z. B. einzuhaltende Reparaturzyklen oder Austauschintervalle für bestimmte Systeme, um das Risiko eines vorzeitigen Ausfalls in der Testphase zu reduzieren. Dieses Werkzeug entstand im Zusammenhang mit der Frage, inwieweit in einem folgenden Projekt die ermittelten Erkenntnisse weiterhin genutzt und überprüft werden können. Gleichzeitig besteht der Vorteil, mögliche Änderungen in Feldversuche mit einfließen zu lassen und Wartungsintervalle dementsprechend anzupassen. Ohne dieses Werkzeug wäre eine solche Ergebnisdarstellung hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Lebensdauer für weitere Untersuchungszwecke nicht möglich.

In der frühen Phase der Markteinführung sind Fragen zur Darstellung der Zuverlässigkeit, Funktionalität und Wirtschaftlichkeit besonders relevant /KAM 13/. Daher eröffnet vorliegende Arbeit mit Blick auf die Zukunft weiteres Forschungspotenzial. Die Erkenntnisse aufgrund der neuen mathematischen Ansätze sind im Entwicklungsprozess des Fahrzeugs entstanden und dienen ausschließlich dem statischen physikalischen Zustand. Weitere Erfahrungswerte aus dem auf die Dynamik bezogenen Forschungsteil liegen in dem Verfahren noch nicht vor. Eventuell könnten neue Erfahrungen, die aus dyna-

mischen Fahrversuchen resultieren, in die zukünftigen Feldversuche und die Entwicklung mit einfließen, um den frühen Entwicklungsprozess vergleichbarer Fahrzeuge zu erweitern. Aus diesem Grund ist das Programm so konzipiert, dass weitere Änderungen bzw. Erweiterungen möglich sind.

Ebenso sind die tatsächlichen in den Fahrversuchen im Feld auftretenden Kräfte unbekannt, die auf den Fahrzeugrahmen wirken. Deshalb sollten an den kritischen Stellen der Systeme Dehnungsmessstreifen appliziert werden, um die Spannungsdaten in den Feldversuchen zu ermitteln. Dadurch besteht die Möglichkeit, den Fahrzeugrahmen in Richtung der Leichtbauweise weiterhin zu optimieren und das Fahrzeug gegebenenfalls für andere Einsatzgebiete zu verkleinern. Dazu wurden in /SUH 14/ erste Vorschläge bezüglich des Fahrzeugrahmens erarbeitet, sodass in einem zukünftigen Bearbeitungsschritt Dehnungsmessstreifen appliziert werden könnten.

Wahrscheinlich bietet dies weiteres Potenzial zum Leichtbau z. B. neue Werkstoffe und neue Zusammensetzungen zu nutzen, da aus realen Praxisversuchen anschließend tatsächliche Daten bekannt sind in Kombination der zukünftigen elektronischen Fahrzeugregelung, mit der weitere Belastungen auftreten können. Darüber hinaus wäre es interessant, inwieweit das erarbeitete Konzept zur Lebensdauerabschätzung zu erweitern wäre aus den weiteren Erkenntnissen, die aus den Feldversuchen resultieren.

Diese neuen Erkenntnisse auf Basis eines innovativen Elektrofahrzeugs, das parallel zu vorliegender Arbeit entwickelt und aufgebaut wurde, bietet einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag zu den Themen der Zuverlässigkeit und der Lebensdauer, da neue Untersuchungsansätze erarbeitet worden sind, die bei vergleichbaren Fahrzeugen Verwendung finden können, um zeitnah und wirtschaftlich ein ähnliches Produkt entwickeln zu können.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Prioritäre Kriterien beim Kauf eines Autos nach /STA 13/	1
Abb. 1.2: ADAC Fahrzeug-Pannenstatistik 2012 nach /ADA 13b/	2
Abb. 1.3: Quantitative und qualitative Methoden zur Analyse der Zuverlässigkeit nach /BER 09/	3
Abb. 1.4: Beschreibung der Vorgehensweise dieser Arbeit	8
Abb. 1.5: Fehlender Algorithmus zwischen der Konzept- und Entwicklungsphase des Fahrzeuges	9
Abb. 2.1: Treiber für die zunehmende Elektrifizierung des Antriebstranges nach /FRE 09/	10
Abb. 2.2: Einteilung der Antriebstechnologien in Verbindung mit der Reichweite, Geschwindigkeit und Anzahl der Passagieren nach /LIE 12/	11
Abb. 2.3: Wirkung der jeweiligen Leichtbaustrategie auf Kosten und Gewicht nach /KLE 13/	15
Abb. 2.4: Akzeptierter Mehraufwand für Leichtbau in € pro Kilogramm nach /KLE 13/	15
Abb. 2.5: Nachweisarten für Leichtbaustrukturen nach /AUT 92/	16
Abb. 2.6: Vergleich der Leichtbaupotenziale zwischen konventionellem Fahrzeug und Elektrofahrzeug nach /ECK 10/	18
Abb. 2.7: Übersicht möglicher Leichtbaumaßnahmen am Elektrofahrzeug nach /ECK 10/	19
Abb. 2.8: Übersicht der abgeleiteten Normen aus der Grundnorm IEC 61508 nach /LÖW 10;/NAG 12/	23
Abb. 2.9: Schwerpunktverlagerung zwischen Kabine (rechts) und Fahrwerk (links) durch Gleitschienen nach /SEG 09/	27
Abb. 2.10: Schwerpunktverlagerung zwischen Kabine und Fahrwerk durch ein Schwenkmechanismus nach /SEG 09/	28
Abb. 2.11: Schwerpunktverlagerung durch Schwenken um die eigene Achse nach /SEG 09/	28
Abb. 2.12: P-Diagramm bzw. Wirkflussdiagramm der statistischen Versuchsplanung zur Bestimmung des Qualitätsmerkmals durch verschiedene Parameter nach /KLE 14b/	30
Abb. 2.13: Unterschiedliche Einflüsse auf das System und auf die Zuverlässigkeit nach /BER 04/	33
Abb. 2.14: Konstruktive bzw. analytische Sicherstellung der Systemzuverlässigkeit nach /BER 04/	34
Abb. 2.15: Bewährte Methoden zur Systemanalyse bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen angelehnt an /SCH 01/	35
Abb. 2.16: Prinzipieller Ablaufplan einer FMEA-Analyse nach /REI 12a/	36
Abb. 2.17: Teilübersicht einer FMEA aus dem Fahrzeugprojekt-E2V nach /GUT 11/	36
Abb. 2.18: Schematische Darstellung eines Fehlerbaums nach /REI 12a/	38
Abb. 2.19: Ergebnisorientierter Ablauf einer FMEDA-Analyse nach /CAT 10/	40
Abb. 2.20: Darstellung und Aufteilung der Fehler in sichere bzw. gefährliche Ausfälle in Abhängigkeit von der Diagnosefähigkeit nach /WER 12/	42
Abb. 2.21: Markov-Graph zur Darstellung der Zustandsänderungen nach /BER 04/	45
Abb. 2.22: Vier Verteilungsformen zur Beschreibung des Ausfallverhaltens in Anlehnung an /GOT 10/	48
Abb. 2.23: Unterschiedliche Darstellungsformen der Normalverteilung nach /SCH 03/	49
Abb. 2.24: Lebensdauerverteilungsformen nach /GOT 10/	52
Abb. 2.25: Unterschiedliche Dichtefunktionen nach /GOT 10/	53

Abb. 2.26: Verteilungsformen mit jeweils unterschiedlichem Formparameter b nach /GOT 10/.....	54
Abb. 2.27: Badewannenkurve zur Darstellung unterschiedlicher Ausfallmöglichkeiten nach /KLE 13/.....	55
Abb. 2.28: Bestimmung der Parameter (b,T) im Weibullnetz nach /KLE 14a/.....	57
Abb. 2.29: Lebensdauer Grenzwerte bestimmen nach /KLE 14a/.....	58
Abb. 2.30: Bestimmung des Erwartungswertes und Streuung der Lebensdauer nach /KLE 14a/.....	59
Abb. 2.31: Bestimmung des Vertrauensbereiches nach /KLE 14a/.....	60
Abb. 2.32: Spannungs-Dehnungs-Diagramme vom weichen Stahl und von einer Al-Legierung nach /KLE 13/.....	61
Abb. 2.33: Ermittlung der dynamischen Betriebslasten im Feldversuch eines Elektrofahrzeuges.....	63
Abb. 2.34: Getrepptes Amplitudenkollektiv aus den Betriebslasten gebildet zur Lebensdauerabschätzung.....	63
Abb. 2.35: Wöhler-Diagramm mit Varianten der linearen Schadensakkumulationsrechnung nach /KLE 14c/.....	64
Abb. 3.1: Bremsen und Beschleunigung des Fahrzeuges nach /BRA 10/.....	67
Abb. 3.2: Konstante Fahrzeuggeschwindigkeit des Fahrzeuges nach /BRA 10/.....	68
Abb. 3.3: Drehen des Fahrzeuges durch unterschiedliche Raddrehzahlen nach /BRA 10/.....	68
Abb. 3.4: Wichtige Entwicklungsziele für das Elektrofahrzeug.....	69
Abb. 3.5: Stufen eines Entwicklungsprozesses für ein innovatives Elektrofahrzeug.....	70
Abb. 3.6: Designentwicklung, ausgehend von der linken Skizze nach /BRA 10/ zum finalen Design nach /FUC 12a/; /BOJ 13/.....	71
Abb. 3.7: Öffnungsmöglichkeiten der zweigeteilten Scheibe für den Ein- und Ausstieg nach /FUC 12a/.....	71
Abb. 3.8: Rahmenbereitstellung nach dem entwickelten CAD-Modell.....	75
Abb. 3.9: Darstellung der blauen Außenhaut am Fahrzeugrahmen.....	75
Abb. 3.10: Integration der entwickelten Bauteile am Finalrahmen.....	77
Abb. 3.11: Gesamtaufbau des einachsigen Elektrofahrzeuges.....	78
Abb. 3.12: Lebenslinie technischer Systeme zur Abschätzung des Reifegrads nach /LIN 93/.....	79
Abb. 4.1: Priorisierung der Systemgrenzen dieser Arbeit.....	83
Abb. 4.2: Wichtige zu vermeidende Systemausfälle am Gesamtfahrzeug.....	84
Abb. 4.3: FTA zur mechanischen Schwerpunktverschiebung.....	84
Abb. 4.4: FTA zur Fahrwerksentwicklung.....	85
Abb. 4.5: FTA zum Leichtbaurahmen.....	86
Abb. 4.6: RPZ-Ergebnisse der FMEA.....	87
Abb. 4.7: Markov-Diagramm der mechanischen Schwerpunktverstellung zur Modellierung unterschiedlicher Zustände mit verschiedenen Übertragungswahrscheinlichkeiten.....	93
Abb. 4.8: Eingabefenster für die Kenndaten des Systems.....	96
Abb. 4.9: Eingabe der Übergangswahrscheinlichkeiten für die Berechnung.....	96
Abb. 4.10: Ergebnisse der Übergangswahrscheinlichkeiten (ÜW) zu verschiedenen ZE t1 bis t4.....	97
Abb. 4.11: CAD-Modell des mechanischen Prüfaufbaus, modifiziert nach /MÜL 13b/.....	99
Abb. 4.12: Mechanischer Prüfaufbau für die ersten Funktionsuntersuchungen eines neuartigen Systems.....	100

Abb. 4.13: Ablaufverfahren für den Funktionstest der mechanischen Schwerpunktverschiebung	100
Abb. 4.14: Verschiedene Sinusverläufe für die Untersuchungen zur mechanischen Schwerpunktverschiebung	101
Abb. 4.15: Funktionsverlauf 1 für die mechanische Schwerpunktverschiebung.....	102
Abb. 4.16: Funktionsverlauf 2 für die mechanische Schwerpunktverschiebung.....	103
Abb. 4.17: Vier Untersuchungsszenarien in der Erstinbetriebnahme des Prüfstands.....	106
Abb. 4.18: Mindestzuverlässigkeit im Lebensdauerversuch modifiziert nach /KLE 14/	109
Abb. 4.19: Abschätzung der Aussagewahrscheinlichkeit, modifiziert nach /KLE 14/	112
Abb. 4.20: Larson-Nomogramm zur Abschätzung der Zuverlässigkeit bzw. der Aussagewahrscheinlichkeit modifiziert nach /KLE 14/.....	113
Abb. 4.21: Verfahren zur Abschätzung der Werkstoffkenndaten mit Schädigung.....	114
Abb. 4.22: Proben aus der Profilgeometrie nach /DIN 50125/	115
Abb. 4.23: Vergleich zwischen realen und simulativen Zugversuch.....	115
Abb. 4.24: Validierung der Zugversuche mit 4 Zugproben und der Simulation	116
Abb. 4.25: Abgleich der Stauchversuche und der numerischen Simulation.....	117
Abb. 4.26: Vergleich der Schädigung an Profilkombination A	118
Abb. 4.27: Bruchverhalten in Bezug auf die Belastung und Rissverlängerung nach /ROS 82/; /MIK 05/	119
Abb. 4.28: Allgemeiner Zeitlicher Verlauf des Bruchs eines Bauteils nach /SCH 02/ ...	119
Abb. 4.29: Anrissfläche der mechanischen Anbindung A	120
Abb. 4.30: Ursprungszustand der Anbindung B bis zum Anriss	120
Abb. 4.31: Kraftverläufe der mechanischen Anbindungen bis zum Bruch	121
Abb. 4.32: Kritische Bruchzähigkeit für unterschiedliche Werkstoffe nach /BÜR 14/...	122
Abb. 4.33: Proben zur experimentellen Ermittlung der Bruchzähigkeit nach /BER 06/	123
Abb. 4.34: Darstellung der Belastungszustände in Abhängigkeit der Probenbreite nach /RÖS 12/	123
Abb. 4.35: Ablauf zur bruchmechanischen Bauteilbewertung	124
Abb. 4.36: Methodenintegration für den Entwicklungsprozess des Fahrzeuges	125
Abb. 5.1: Fahrzeugkoordinatensystem, 1 Referenzpunkt, 2 Horizontalebene nach /ISO 8855/	127
Abb. 5.2: Freikörperbild zur Bestimmung der Schwerpunkte	127
Abb. 5.3: Schwerpunktanpassung, SP_2 in Z-Richtung wird vertikal verschoben um die Beziehung $Z_{Geg} = Z_{Ideal}$ der Gesamtschwerpunkte zu erzielen. SP_1 wird nicht verändert und als Z_{min} definiert.....	129
Abb. 5.4: Iterative Schwerpunktanpassung des SP_1	131
Abb. 5.5: Schwerpunktanpassung zum idealen Schwerpunkt durch die Verschiebung des SP_2	132
Abb. 5.6: Beispiel: Verschiebung von drei Schwerpunkten im Verschiebungsbereich (VB) zum idealen Gesamtschwerpunkt	133
Abb. 5.7: Baugruppenverschiebung zum idealen Schwerpunkt	134
Abb. 5.8: Freikörperbild zur Beschreibung des Steigungswinkels.....	135
Abb. 5.9: Parametereinfluss auf die Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges	137
Abb. 5.10: Horizontale Position und Parkposition des Fahrzeugs.....	138
Abb. 5.11: Geometrische Abhängigkeiten zur Beschreibung der Schwerpunktlage	139
Abb. 5.12: Freikörperbild zur Berechnung der axialen Spindelkraft.....	141
Abb. 5.13: Einteilung der Schwerpunkte in verschiedene Klassen	142
Abb. 5.14: Berechnungsparameter für die Eingabemasken Steigung und Parken.....	143

Abb. 5.15: Ergebnisse der fünf Parkparameter mit dem jeweiligen Einfluss auf Änderungen	144
Abb. 5.16: Ablaufprozess für die Bauteileingabe und Schwerpunktberechnung	144
Abb. 5.17: Programmcode für die Bauteilliste	145
Abb. 5.18: Eingabefenster zur Festlegung und Speicherung der Klassifizierung wichtiger Bauteile	146
Abb. 5.19: Programmcode für das Eintragen der Bauteile ins Dokument	146
Abb. 5.20: Ergebnisse der Schwerpunkte	147
Abb. 5.21: Berechnungsmaske für die Parkparameter zur Bewertung des Verstellwegs	148
Abb. 5.22: Berechnungsmaske zur Bewertung der Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges	149
Abb. 5.23: Analyse der Schwerpunktlage zum idealen Schwerpunkt im Konstruktionsprozess	150
Abb. 5.24: Darstellung aller Fahrzeugschwerpunkte für eine mögliche Schwerpunkverschiebung	151
Abb. 5.25: Automatisch generierte Schwerpunktvorschläge in Abhängigkeit vom SP_{Ideal}	152
Abb. 5.26: Programmcode für die Schwerpunktübernahme	152
Abb. 5.27: Modellierung der Schwerpunktdaten B und D in x-Richtung	153
Abb. 5.28: Darstellung der Verstell-Ergebnisse B_{neu} , D_{neu} und SP_{geg} in x-Richtung	153
Abb. 6.1: Ablauf zum Berechnungsverfahren der Parksituation und der Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges	155
Abb. 6.2: Skizzierung eines neuen Fahrzeugkonzepts	155
Abb. 6.3: Punktwolke der klassifizierten Schwerpunkte	158
Abb. 6.4: Eintragung und Speicherung der Fahrzeugbauteile für weitere Fahrzeugberechnungen	160
Abb. 6.5: Berechnung und Bewertung des Verstellweges für die Parksituation	161
Abb. 6.6: Berechnung und Prüfung der Steigungsfähigkeit des Fahrzeuges	162
Abb. 6.7: Klassifizierte Schwerpunktkoordinaten	163
Abb. 6.8: Neuer Fahrzeugschwerpunkt nach einer konstruktiven Änderung	164
Abb. 6.9: Berechnung und Bewertung des neuen Verstellweges in Abhängigkeit der Parksituation	164
Abb. 6.10: Neue Modellierungsvorschläge für den Gesamtschwerpunkt – Übernahme B und C in x-Richtung	165
Abb. 6.11: Neue Schwerpunktkoordinaten für die Konstruktion	165
Abb. 6.12: Neue Berechnung des Verstellweges in Abhängigkeit der Parksituation	166
Abb. 6.13: Prozess bei Laständerung am Fahrzeug beispielsweise durch Gepäck	167
Abb. 6.14: Prozess bei Laständerung abhängig vom Fahrzeugschwerpunkt	167
Abb. 6.15: Verfahren zum Lebensdauerkonzept für die Betriebsphase	168
Abb. 6.16: Ergebnisse im Lebensdaueretz für das Fahrwerk	169
Abb. 6.17: Festlegung der Netzplanstruktur – Szenario 1	171
Abb. 6.18: Prozessablauf zur Diagnose und Nutzung des Ausfallverhaltens	174

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Gesamtübersicht der einzelnen ISO-Normen nach /ISO 26262/.....	24
Tab. 2.2:	Drei Bewertungskriterien bei einer Risikoabschätzung zur Bestimmung des ASIL-Wertes nach /NAG 12/; /ISO 26262/.....	25
Tab. 2.3:	Einzuhaltende Ausfallraten zufälliger Hardwarefehler nach /LÖW 10/; /ISO 26262-5/.....	26
Tab. 2.4:	Ableitung eines teil-faktoriellen Versuchsplans aus einem voll-faktoriellen Plan /KIE 14b/.....	32
Tab. 2.5:	Logische Gesetze nach de Morgan /ADA 13a/.....	39
Tab. 2.6:	Kurzbeschreibung der wichtigen Metriken für die FMEDA nach /IEC 61508/.....	41
Tab. 2.7:	SIL- und ASIL-Vergleich mit den unterschiedlichen Eingruppierungen der Wahrscheinlichkeiten nach /LIN 14/; /KAN 10/.....	43
Tab. 2.8:	Methoden zur zeitraffenden Erprobung nach /KLE 14d/; /GER 05/.....	47
Tab. 2.9:	Charakterisierung des Formparameters b nach /NAU 11/.....	57
Tab. 3.1:	EULER Knickfälle nach /KLE 15/.....	73
Tab. 3.2:	Auflistung tabellarischer Ergebnisse des Fahrzeuges aus CATIA V5.....	78
Tab. 3.3:	Abschätzung des Reifegrads des Fahrzeuges im Entwicklungsstadium nach 36 Monaten.....	79
Tab. 4.1:	FMEA zum Gesamtfahrzeug – Die Risikoprioritätszahl (RPZ) wird nach drei Kriterien beurteilt: Auftretenswahrscheinlichkeit des Fehlers (A), Bedeutung der Fehlerfolgen (B) und die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers (E).....	87
Tab. 4.2:	Klassifizierung für das Ausmaß des Schadens (S) nach /ISO 26262-3/.....	88
Tab. 4.3:	Klassifizierung für die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Fehlfunktion (E) nach /ISO 26262-3/.....	88
Tab. 4.4:	Klassifizierung der Beherrschbarkeit (C) des Schadens, ausgehend vom Fahrer nach /ISO 26262-3/.....	89
Tab. 4.5:	Risikograph zur ASIL-Klassifizierung mit dem Ergebnis ASIL-B nach /ISO 26262-3/.....	89
Tab. 4.6:	Checklisten-Methode /HEN 08/ für den Fahrzeuguhrahmen.....	90
Tab. 4.7:	Checklisten-Methode /HEN 08/ für die mechanische Verstellung.....	91
Tab. 4.8:	Checklisten-Methode /HEN 08/ für das Fahrwerk.....	92
Tab. 4.9:	Zuordnung der Übertragungswahrscheinlichkeiten zum Markovdiagramm.....	94
Tab. 4.10:	Verschiedene Wertschätzungen für die beispielhafte Durchführung der Markov-Analyse.....	94
Tab. 4.11:	Übertragungswerte zur Zeiteinheit 1.....	95
Tab. 4.12:	Beschreibung der wichtigen Modelle für das Zuverlässigkeitswachstum nach /VDI 4009/.....	98
Tab. 4.13:	Parameter für den Funktionsverlauf 1.....	101
Tab. 4.14:	Parameter für den Funktionsverlauf 2.....	102
Tab. 4.15:	Faktoren für den Funktionstest auf zwei Stufen.....	104
Tab. 4.16:	Versuchsplan 2^{7-4} modifiziert nach /KLE 14b/.....	105
Tab. 4.17:	Versuchsplan für die Funktionsuntersuchung des Prüfaufbaus mit dem Ergebnis y.....	105
Tab. 4.18:	2^3 -Versuchsplan für die Funktionsanalyse der Untersuchungsszenarien.....	106
Tab. 4.19:	Materialdaten EN AW 6063 T66 für Berechnungen mit Abaqus.....	116
Tab. 4.20:	Erhöhung der wahren Spannung mit einem Schätzwert 1,3 nach /RÜT 13/.....	117
Tab. 5.1:	Herabsetzen der oberen Schwerpunkte 1 und 2 mit jeweils 50 %.....	130

Tab. 5.2:	Anteilige Positionierung der Schwerpunkte im VB zum Gesamtschwerpunkt.....	133
Tab. 5.3:	Vorschlag zur Fixierung der Schwerpunkte.....	133
Tab. 5.4:	Einstellparameter zur Berechnung des prozentualen Einflusses auf die Steigungsfähigkeit mit der Veränderung des Nickwinkels um den Faktor 10	136
Tab. 5.5:	Einstellparameter zur Berechnung des prozentualen Einflusses auf die Steigungsfähigkeit mit der Veränderung der x-Achse um den Faktor 10.....	136
Tab. 5.6:	Berechnung der Einflussanalyse verschiedener Parkparameter.....	143
Tab. 6.1:	Anforderungstabelle für das Fahrzeug aus dem Pflichtenheft	156
Tab. 6.2:	Bauteilauflistung in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern	156
Tab. 6.3:	Gruppierung und Klassifizierung (KI) der Bauteile für die Schwerpunktverschiebung	157
Tab. 6.4:	Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten eines Fahrwerks	168
Tab. 6.5:	B_q -Lebensdauer kritischer Teile	170
Tab. 6.6:	Untersuchungszeitraum definieren	170
Tab. 6.7:	Für die Verwendung eines Netzplans sind die Bauteile mit verschiedenen Abhängigkeiten zu definieren	170
Tab. 6.8:	Anfangsbedingungen mit Abhängigkeiten definiert.....	171
Tab. 6.9:	Neue Abhängigkeit wird für den Austausch bzw. die Wartung des Fahrwerks integriert	172
Tab. 6.10:	Ergebnisdarstellung des Nachfolgers unter Berücksichtigung eines Wartungsintervalls des Fahrwerks – 2 Abhängigkeit zwischen Austausch/ Wartung und dem Fahrwerk	172
Tab. 6.11:	Anfangsbedingung definiert mit MTTR und Ausfall	173
Tab. 6.12:	MTTR und Ausfall Abhängigkeiten im Funktionsbetrieb werden im Netzplan integriert.....	173
Tab. 6.13:	Ergebnisdarstellung mit dem jeweiligen Nachfolger – Beispiel: 1 – Abhängigkeit zwischen Ausfall und Antriebsmotoren, 4 – Abhängigkeit zwischen MTTR und Anbindung, 5 – Abhängigkeit zwischen MTTR und Verstellsystem, 2 – Abhängigkeit zwischen Ausfall und Schrittmotoren.....	174

Nomenklatur/ Formelzeichen

Formelzeichen	Benennung	Einheit
\overline{AB}	Vertikaler Achsabstand der Räder	m
a	Beschleunigung	m/s ²
A(t)	Zustandsmatrix	-
a _G	Antriebsbeschleunigung des Fahrzeuges	m/s ²
A _S	Anteil einer Schwerpunktverschiebung	%
a _s	Antriebsbeschleunigung des Spindel systems	m/s ²
a _s	Risslänge	mm
b	Formparameter	-
B _{10d}	Zyklen bis 10 % der Proben ausfallen	%
B ^k	Belastung mit Beschleunigungsexponent	N
$\overline{B_q}$	q-prozentuale Lebensdauer	%
\overline{BC}	Horizontaler Achsabstand der Räder	m
C	Dynamische Tragzahl	N
D	Schädigungssumme	-
d	Stützraddurchmesser	m
D _M	Flankendurchmesser	m
D _{tat}	Tatsächliche Schädigungssumme	-
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
F	Kraftamplitude	N
F(t)	Ausfallwahrscheinlichkeit	%
f(t)	Dichtefunktion	-
F _a	Axialkraft	N
f _B	Belastungsfaktor	N
F _F	Ausfallwahrscheinlichkeit-Fahrwerk	%
F _{krit}	Kritische Last	N
F _L	Ausfallwahrscheinlichkeit-Rahmen	%
F _{LW}	Luftwiderstand	N
F _m	Mittelkraft	N
F _{max}	Spindelkraft	N
F _S	Hangabtriebskraft	N
F _{SP}	Ausfallwahrscheinlichkeit-Schwerpunkt	%
G	Gewichtskraft	N

Formelzeichen	Benennung	Einheit
G_1	Vertikaler Abstand (SP zum MP)	m
H	Bodenabstand zum Stützrad	m
\bar{i}	Allgemeine Schwerpunktlage	m
J	Trägheitsmoment	kg m^2
K	Spannungsintensitätsfaktor	$\text{N/mm}^2 \sqrt{\text{m}}$
L	Achsabstand	m
L_h	Nominelle Lebensdauer	h
L_{\max}	Maximale axiale Verstelllänge	m
L_{\min}	Mindestlebensdauer	h
L_{ver}	Berechnete axiale Verstelllänge	m
M	Drehmoment	Nm
m	Masse	kg
m_{BT}	Masse der beweglichen Teile	kg
m_G	Masse des Fahrzeuges	kg
N_D	Ecklastspielzahl der Wöhlerlinie	LW
N_{EMR}	Lastzyklenzahl-Elementar-Miner-Regel	LW
N_H	Lastzyklenzahl-Haibach	LW
N_i	Lastzyklenzahl im Zeitfestigkeitsbereich	LW
n_m	Mittlere Spindeldrehzahl	1/min
N_{MO}	Lastzyklenzahl zur Original-Miner-Regel	LW
n_{op}	Schaltzyklen pro Jahr	Anzahl/Jahr
P	Spindelsteigung	mm
P_A	Aussagewahrscheinlichkeit	%
$R(t)$	Zuverlässigkeit	%
R_1	Radius Antriebsrad	m
R_2	Radius Stützrad	m
Reh	Obere Streckgrenze	N/mm^2
R_{eL}	Untere Streckgrenze	N/mm^2
R_F	Zuverlässigkeit – Fahrwerk	%
R_G	Zuverlässigkeit – Gesamtfahrzeug	%
R_m	Zugfestigkeit	N/mm^2
R_{SI}	Zuverlässigkeit – Strom und Informationssystem	%
R_{SP}	Zuverlässigkeit – Mechanische Verbindung	%
S	Sicherheitswert	-
T	Charakteristische Lebensdauer	h

Formelzeichen	Benennung	Einheit
t	Lebensdauer	h
t_0	Ausfallfreie Zeit	h
T_1	Zeitintervall	s
T_G	Garantiezeit	h
$U(t)$	Nicht Verfügbarkeit eines Systems	%
V	Volumen	m ³
v_t	Vorschubgeschwindigkeit	m/s
w	Übergangswert	-
X_1	Erste Fahrzeugachse	m
X_2	Zweite Fahrzeugachse	m
\bar{X}_v	Verstellbare Schwerpunktlage	m
\bar{X}_A	Einzelschwerpunkte in Klasse A integriert	m
\bar{X}_{GS}	Lage des Gesamtschwerpunktes	m
$\Delta\bar{x}$	Linearverschiebung der Schwerpunkte	m
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert	-
Y	Korrekturfunktion	-
Z	Gesamtschwerpunktlage	m
Z_i	Zustand eines Systems	-
Z_{Geg}	Berechnete (gegebene) Schwerpunkte	m
Z_{Ideal}	Geplante (idealisierte) Schwerpunkte	m
λ_{ges}	Ausfallrate (Bauteilausfallrate)	FIT
λ_{DD}	Ausfallrate (dangerous-detected)	FIT
λ_{DU}	Ausfallrate (dangerous-undetected)	FIT
λ_{SD}	Ausfallrate (safe-detected)	FIT
λ_{SU}	Ausfallrate (safe-undetected)	FIT
λ	Ausfallrate	FIT
ϑ	Böschungswinkel der Fahrstrecke	°
σ_D	Dauerfestigkeit	N/mm ²
ε	Dehnung	%
ρ	Dichte	kg/m ³
μ	Mittelwert	N/mm ²
\bar{i}	Schwerpunktlage in allgemeiner Richtung	m
σ	Spannung	N/mm ²
δ	Nickwinkel des Fahrzeuges	°

Abkürzungen

<i>Abb.</i>	<i>Abbildung</i>
<i>ABS</i>	<i>Acrylnitril-Butadien-Styrol</i>
<i>ADAMS</i>	<i>Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems</i>
<i>ADAC</i>	<i>Allgemeine Deutsche Automobil-Club e.V.</i>
<i>ANOVA</i>	<i>Analysis of variance</i>
<i>Amp</i>	<i>Ampere</i>
<i>ASIL</i>	<i>Automotive Safe-Integrity-Level</i>
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>BEM</i>	<i>Boundary Element Method</i>
<i>BPZ</i>	<i>Bereichspaarzählung</i>
<i>BP</i>	<i>Blocking Point (Abbruchmeilenstein)</i>
<i>bzw.</i>	<i>beziehungsweise</i>
<i>C</i>	<i>Controllability</i>
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CATIA</i>	<i>Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application</i>
<i>CE</i>	<i>Communauté Européenne</i>
<i>CO₂</i>	<i>Kohlenstoffdioxid</i>
<i>COTS</i>	<i>Commercial off the shelf</i>
<i>CTOD</i>	<i>Crack-Tip-Opening-Displacement</i>
<i>CTP</i>	<i>Contact Tension Probe</i>
<i>DC</i>	<i>Diagnostic-Coverage</i>
<i>DIN</i>	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
<i>DMU</i>	<i>Digital Mock-Up</i>
<i>DoE</i>	<i>Design of Experiments</i>
<i>E</i>	<i>Exposure</i>
<i>EU-EMV</i>	<i>Europäische Union-Niederspannungsrichtlinie</i>
<i>E2V</i>	<i>Electrical Explorer Vehicle</i>
<i>erf.</i>	<i>erfüllt</i>
<i>ECE</i>	<i>Economic Commission for Europe</i>
<i>EDZ</i>	<i>Ebener Dehnungszustand</i>
<i>EMV</i>	<i>Elektromagnetische Verträglichkeit</i>
<i>E-PEP</i>	<i>Elektrofahrzeuge – Produkt-Entwicklungs-Prozess</i>
<i>ESZ</i>	<i>Ebener Spannungszustand</i>
<i>ETA</i>	<i>Event Tree Analysis</i>
<i>EU</i>	<i>Europäische Union</i>
<i>EWG</i>	<i>Europäische Wirtschaftsgemeinschaft</i>
<i>FBM</i>	<i>Fließbruchmechanik</i>
<i>FEM</i>	<i>Finite Element Methode</i>
<i>FTA</i>	<i>Fault tree analysis</i>
<i>FEMFAT</i>	<i>Finite Element Method Fatigue</i>
<i>FMECA</i>	<i>Failure Mode Effects and Criticality Analysis</i>
<i>FMEA</i>	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>

<i>FMEDA</i>	<i>Failure Modes, Effects and Diagnostic Coverage Analysis</i>
<i>GERT</i>	<i>Graphical Evaluation and Review Technique</i>
<i>HALT</i>	<i>Highly Accelerated Life Test</i>
<i>HASS</i>	<i>Highly Accelerated Stress Screening</i>
<i>HAST</i>	<i>Highly Accelerated Stress Test</i>
<i>HAZOP</i>	<i>Hazard and operability study</i>
<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>LEBM</i>	<i>Linear-elastische Bruchmechanik</i>
<i>LW</i>	<i>Lastwechsel</i>
<i>MKS</i>	<i>Mehrkörpersimulation</i>
<i>MP</i>	<i>Momentanpol</i>
<i>MTBF</i>	<i>Mean Time Between Failures</i>
<i>MTBM</i>	<i>Mean Time Between Maintenance</i>
<i>MTTF</i>	<i>Mean Time To Failure</i>
<i>MTTR</i>	<i>Mean Time To Repair</i>
<i>NEFZ</i>	<i>Neuen Europäischen Fahrzyklus</i>
<i>P.U.M.A</i>	<i>Personal Urban Mobility and Accessibility</i>
<i>PAAG</i>	<i>Prognose, Auffinden, Abschätzen, Gegenmaßnahmen</i>
<i>Pkw</i>	<i>Personenkraftwagen</i>
<i>PERT</i>	<i>Programm Evaluation and Review Technique</i>
<i>PDF</i>	<i>Probability of dangerous on Demand</i>
<i>PFH</i>	<i>Probability of dangerous Failure per Hour</i>
<i>QFD</i>	<i>Quality-Function-Deployment</i>
<i>QM</i>	<i>Qualitätsmanagement</i>
<i>RFZ</i>	<i>Rainflow-Zählung</i>
<i>RPZ</i>	<i>Risikoprioritätszahl</i>
<i>S</i>	<i>Severity</i>
<i>SIL</i>	<i>Safety Integrity Level</i>
<i>SIP</i>	<i>Spannungsintensitätsfaktor</i>
<i>SoD</i>	<i>Start of Design</i>
<i>SoP</i>	<i>Start of Production</i>
<i>SP</i>	<i>Schwerpunkt</i>
<i>SPC</i>	<i>Statistical Prozess Controll</i>
<i>SFF</i>	<i>Safe-Failure-Fraction</i>
<i>Std</i>	<i>Stunde</i>
<i>SVM</i>	<i>Support Vector Machine</i>
<i>Tab</i>	<i>Tabelle</i>
<i>VDA</i>	<i>Verband der Automobilindustrie e. V.</i>
<i>VB</i>	<i>Verschiebungsbereich ausgewählter Schwerpunkte</i>
<i>w</i>	<i>Übergangswert</i>
<i>z. B.</i>	<i>zum Beispiel</i>
<i>ZE</i>	<i>Zeiteinheit</i>

Begriffe

Zuverlässigkeit und Lebensdauer:	Definition:
Ausfall	Ende der Fähigkeit einer Einheit, die geforderte Funktion auszuführen.
Ausfall(wahrscheinlichkeits-)verteilung	Ausfallhäufigkeit bis zu einer bestimmten Lebensdauer oder Fehlerzahl pro Einheit für eine definierte Einsatzdauer. Beispiel: 0,5 Fehler pro Elektrofahrzeug in 12 Monaten.
Ausfallquote	Ist die relative Bestandsänderung in einem Zeitintervall. Die Ausfallquote wird oftmals als Schätzwert für die Ausfallrate verwendet.
Ausfallrate	Die Ausfallrate beschreibt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls in einem Zeitintervall dt , bezogen auf die zum Zeitpunkt t intakten Einheiten. Die Ausfallrate ist somit von der Ausfalldichte und der Zuverlässigkeit abhängig.
Ausfallwahrscheinlichkeit	Beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Betrachtungseinheit zum Zeitpunkt t einen Ausfall zeigt.
Aussagewahrscheinlichkeit	Eine Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % bedeutet, dass bei 100 Messungen 95 richtig sind. Die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt bei 5 Messungen.
B_q -Lebensdauer	Lebensdauer bis zu einer q -Prozent der Einheit ausgefallen sind.
Lebenslaufkosten	Umfassen alle Kosten, die durch Anschaffung und Betrieb bis zum Ersatz der Einheit anfallen.
Meantime to failure (MTTF)	Die mittlere Dauer bis zum Ausfall.

Zuverlässigkeit und Lebensdauer:	Definition:
Meantime to repair (MTTR)	Mittlere Reparaturdauer.
Mittlere kumulative Ausfallanzahl $M_{(t)}$	Dieser Wert sagt aus, wie viel reparierbare Ausfälle inkl. Wiederholungsausfälle in einer Periode im Mittel von der Grundgesamtheit nicht überschritten werden sollen. Beispiel: 6,4 Ausfälle pro Elektrofahrzeug in 2 Jahren: $M(2) = 6,4$.
Redundanz	Mehr als eine Möglichkeit zur Ausführung einer gegebenen Funktion. Die Möglichkeiten müssen nicht zwingend identisch sein.
Verfügbarkeit	Verfügbarkeit ist die Wahrscheinlichkeit, eine Betrachtungseinheit zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen.
Vertrauensbereich	Gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass sich die wahre Zuverlässigkeit der Grundgesamtheit innerhalb des Vertrauensbereiches befindet. Beispiel: Mit 97,5 Prozent Vertrauen müssen 90 Prozent der Einheiten 4000 h Betriebszeit erreichen: $B_{10}=5000h$ mit einem Vertrauen von 95 % und einem Risiko von 5 %.
Zuverlässigkeit oder Überlebenswahrscheinlichkeit	Die Fähigkeit einer Einheit oder Systems, eine geforderte Funktion unter bestimmten Bedingungen über einen definierten Zeitraum auszuführen.
Zuverlässigkeitsmanagement	Das Zuverlässigkeitsmanagement stellt dar, wie gut ein Produkt oder System im Entwicklungsprozess seine Funktion erfüllen kann.
Zuverlässigkeitsprogramm	Darin sind neben den Bestandteilen der Überwachung (z. B. Fahrzeuge, Systeme, Bauteile) auch die Parameter (z. B. Fehlermeldungen, Ausfälle) und die Kontrollintensitäten (fortlaufend, wöchentlich) festgelegt.

Tab.: Begriffe zur Zuverlässigkeit und Lebensdauer nach /BRU 13;/HIN 13;/VDI 4003;/DIN 40041/

Literaturverzeichnis

- /2003/105/EG/* **2003/105/EG:** Richtlinie 2003/105/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16.12.2003 zur Änderung der Richtlinie 96/82/EG des Rates zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen, veröffentlicht und in Kraft getreten durch Amtsblatt Nr. L 345 vom 31.12.2003.
- /2006/42/EG/* **2006/42/EG:** Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17.05.2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 96/16/EG, veröffentlicht in ABl. L. 157 vom 09.06.2006, in Kraft getreten am 29.06.2006.
- /82/501/EWG/* **82/501/EWG:** Richtlinie 82/501/EWG des Rates vom 24. Juni 1982 über die Gefahren schwerer Unfälle bei bestimmten Industrietätigkeiten, veröffentlicht im Amtsblatt Nr. L 230 vom 05.08.1982, diese Richtlinie wurde durch die */96/82/EG/* aufgehoben.
- /9.ProdSV/* **9.ProdSV:** Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) vom 12. Mai 1993, die zuletzt durch Artikel 19 des Gesetzes vom 8. 11. 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist.
- /12.BlmSchV/* **12.BlmSchV:** Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung – 12.BlmSchV) in der Fassung der Bekanntmachung von 08. Juni 2005, die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 14.08.2013 geändert worden ist.
- /96/82/EG/* **96/82/EG:** Richtlinie 96/82/EG des Rates vom 09.12.1996 zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen, die zuletzt durch die Verordnung (EG) Nr. 1137/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2008 geändert worden ist.
- /ABE 08/* **Abele, M.:** Modellierung und Bewertung hochzuverlässiger Energiebordnetz-Architekturen für sicherheitsrelevante Verbraucher in Kraftfahrzeugen, Dissertation, Universität Kassel, 2008.
- /ADA 13a/* **Adams, G.; Sippel, D.; Kruse, H.J.; Pfeiffer, U.:** Mathematik zum Studieneinstieg; Grundwissen der Analysis für Wirtschaftsingenieure, Ingenieure, Naturwissenschaftler und Informatiker, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
- /ADA 13b/* **N. N.: ADAC Pannenstatistik 2012:**
<http://www.auto4e.de/allgemein/adac-pannenstatistik-2012-ursachen>,
Publiziert: 7.02.2013, Abrufdatum: 07.09.2014.
- /AST 05/* **ASTM-Standard E 399-05:** Standard Test Method for Linear-Elastic Plain-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials.
- /AUT 92/* **Autorenkollektiv:** Handbuch Struktur-Berechnung (HSB), Industrie Ausschuß – Struktur-Berechnungsunterlagen, 1992.

- /BAD 13/ **Badak, H.:** Aufbau, Inbetriebnahme und Evaluierung eines mechanischen Verstellmechanismus zur Schwerpunktverschiebung eines einachsigen Elektrofahrzeuges, Diplomarbeit 1, Universität Kassel, 2013.
- /BAH 12/ **Bahrami, M.; Bazzaz, D.H.; Sajjadi, S.M.:** Innovation and improvements in projekt implementation and management; Using FMEA Technique, ScienceDirect, Procedia-Social and Behavioral Sciences 41, pp. 418-425, 2012.
- /BAZ 14/ **Bazzan Ana, L. C.; Klügl, F.:** Introduction to Intelligent Systems in Traffic and Transportation, Morgan & Claypool Publishers, 2014.
- /BEI 14/ **Beiker, S.; Meyer, G.:** Road Vehicle Automation, Lecture Notes in Mobility, Springer International Publishing, Switzerland, 2014.
- /BEI 84/ **Beichelt, F.; Franken, P.:** Zuverlässigkeit und Instandhaltung, Carl Hanser Verlag München Wien, 1984.
- /BEN 04/ **Benz, S.:** Eine Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2004.
- /BEN 12/ **Benz, H.:** Untersuchungen zum Leichtbaupotential eines einachsigen Elektrofahrzeuges mittels FEM-Berechnungen, Diplomarbeit, Universität Kassel, 2013.
- /BER 04/ **Bertsche, B.; Lechner, G.:** Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin 2004.
- /BER 05/ **Bernards, M.:** Modulare Prüfplanung, Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 2005.
- /BER 06/ **Bergmannshoff, D.:** Das Instabilitätsverhalten zug-/schwerbeanspruchter Risse bei Variation des Belastungspfad, Dissertation, Ruhr Universität Bochum, 2006.
- /BER 07/ **Bertsche, B.:** Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – rapid-Prototyping, Grundlagen, Rahmenbedingungen und Realisierung, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- /BER 09/ **Bertsche, B.; Göhner, P.; Jensen, U.; Schinköthe, W.; Wunderlich, H.:** Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme; Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2009.
- /BIR 85/ **Birolini, A.:** Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme, Springer-Verlag Berlin, 1985.
- /BRA 10/ **Brabetz, L.:** Für spezifische Nutzergruppen adaptierbares teilautonomes Fahrzeug für die Erkundung von Kulturräumen, Teilvorhabensbeschreibung, Universität Kassel, 2010.

- /BLE 74/ **Bleicher, W.:** Konstruieren mit Aluminium, Aluminium-Taschenbuch, Düsseldorf, 1974.
- /BOH 11/ **Bohr, Bernd.:** Auf dem Weg zum Nullemissions-Auto; ATZ-Fachartikel, Ausgabe: 2011-03.
- /BOJ 13/ **Bojdow, A.:** Verifizierung und Bereitstellung einer fertigungsgerechten Kunststoffverkleidung am Leichtbaurahmen eines Elektrofahrzeuges, Diplomarbeit, Universität Kassel, 2013.
- /BOL 08/ **Bolt, H.M.:** Europäische Chemikalien-Gesetzgebung – Historische Entwicklung, Springer Medizin Verlag, Gesundheitsschutz 2008.
- /BOT 90/ **Bhote, Keki R.:** Qualität – Der Weg zur Weltspitze, IQM-Institut, Großbottwar, 1990.
- /BRO 12/ **Brocks, W.:** Plastizität und Bruchmechanik, Manuskript, TU Berlin, 2012.
- /BRU 09/ **Brucksch, R.:** Betriebsfestigkeits- und Ermüdungsausbreitungsuntersuchungen an einer hochfesten Aluminiumknetlegierung aus der Luftfahrt, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2009.
- /BRU 13/ **Brunner, F.J.; Kohnhauser, V.; Pollhamer, M.:** Entwicklungsqualität, Hanser Verlag, 2013.
- /BSI 91/ **BSI:** BS5760-Reliability of systems, equipment and component, Part 5, Guide of failure modes and effect analysis (FMEA and FMECA), British Standard, 1991.
- /BÜR 14/ **Bürgel, R.; Richard, H.A.; Riemer, A.:** Werkstoffmechanik, Springer Vieweg Wiesbaden, 2014.
- /CRA 09/ **Cramer-Kellers, C.; Seppi, M.; Wiegand, H.J.:** Spezielle Rechtskunde für Chemiker, Skript, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2009.
- /CAT 10/ **Catelani, M.; Ciani, L.; Luongo, V.:** The FMEDA approach to improve the safety assessment according to the IEC 61508, Microelectronics Reliability 50, S. 1230-1235, 2010.
- /DAN 11/ **Dankert, H.; Dankert, J.:** Technische Mechanik, Statik – Festigkeitslehre – Kinematik/ Kinetik, 6. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- /DEG 09/ **Degischer, H.P.; Lüftl, S.:** Leichtbau, Prinzipien – Werkstoffwahl – Fertigungsvarianten, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2009.
- /DEL 07/ **Delonga, M.:** Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten; Dissertation, Universität Stuttgart, 2007.

- /DIE 09/ **Die Bundesregierung:** Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung, Broschüre, 2009.
- /DIN 06/ **DIN EN 60812:** Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und Auswirkungsanalyse (FMEA), Beuth-Verlag Berlin, 2006.
- /DIN 40041/ **DIN 40041:** Zuverlässigkeit, Begriffe, Ausgabe 1990-12.
- /DIN EN 61508/ **DIN EN 61508:** Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- /DIN EN 61164/ **DIN EN 61164:2004-11:** Zuverlässigkeitswachstum – Statistische Prüf- und Schätzverfahren (IEC 61164:2004); Deutsche Fassung EN 61164:2004.
- /DIN EN 12663/ **DIN EN 12663-1:** Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen – Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge und alternative Verfahren für Güterwagen, 2010.
- /DIN 50125/ **DIN 50125:** Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben, Berlin: Beuth, 2004.
- /DIN EN 10002/ **DIN EN 10002:** Metallische Werkstoffe – Zugversuch, Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, 2001.
- /DIN ISO 8855/ **DIN ISO 8855:** Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe, 2011.
- /EBE 12/ **Eberhardt, O.:** Die EU-Maschinenrichtlinie: Praktische Anleitung zur Anwendung der europäischen Richtlinien zur Maschinensicherheit – Mit allen Richtlinientexten, 5. Auflage, Expert-Verlag, 2012.
- /ECK 10/ **Eckstein, L.; Schmitt, F.; Hartmann, B.:** Elektrofahrzeuge, Leichtbau bei Elektrofahrzeugen, ATZ, 11/2010.
- /FEN 07/ **Fendrich, L.:** Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- /FEV 98/ **Fevzi, B.; Grochtmann M.; Jack O.:** Erprobte Modelle zur Qualifizierung der Software-Zuverlässigkeit, Springer-Verlag, 1998.
- /FIN 05/ **Finis, F.:** Druckbehälter aus thermoplastischen Werkstoffsystemen für komplexe Beanspruchungskollektive, Dissertation, Universität Kassel, 2005.
- /FOR 11a/ **Forschungszentrum Informatik (FZI):** „RESCAR 2.0 verbessert Robustheit elektronischer Fahrzeugkomponenten“; Presseinformation, Neubiberg, Veröffentlichung: 14. April 2011.

- /FOR 11b/ **Forchert, Th.:** Anwendung der technischen Risikoanalyse für die Planung von Tests, Prüfungen und Wartungsmaßnahmen, mechatronik mobil, 3. Jahrgang, 01/2011.
- /FRA 10/ **Fraser, I.:** Leitfaden für die Anwendung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, 2. Auflage, Europäische Kommission Unternehmen und Industrie, 2010.
- /FRE 09/ **Freialdenhoven, A.:** Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Automobilindustrie durch Vernetzung von Wissenschaft und Industrie, Dissertation, Aachen, 2009.
- /SUH 14/ **Suh Fru, V.:** Statische- und dynamische FEM-Berechnungen eines Leichtbaurahmens zur Untersuchung der Festigkeit und Crashverhalten, Masterarbeit, Universität Kassel, 2014.
- /FUC 12a/ **Fuchs, M.:** Konzeption und Entwurf eines Karosseriedesigns für ein einachsiges Elektrofahrzeug, Diplomarbeit 1, Universität Kassel, 2012.
- /FUC 12b/ **Fuchs, M.:** Stützradentwicklung zur Steigerung der Kippsicherheit eines einachsigen Elektrofahrzeuges, Studienarbeit, Universität Kassel, 2012.
- /FUH 08/ **Fuhrmann, E.:** Einführung in die Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, II – Werkstoff- und Werkstückprüfung auf Qualität, Fehler, Dimension und Zuverlässigkeit, Expert-Verlag GmbH, 2008.
- /FRI 05/ **Fritsch, A.:** Funktionale Sicherheit und Explosionsschutz, Grundlagen der funktionalen Sicherheit nach IEC 61508 und ihre Verbindung zu Anwendungen in explosionsgefährdeten Bereichen, Recht – Normen und Technik, Ex-Zeitschrift, 2005.
- /GÄN 98/ **Gänsicke, Th.:** Entwicklung und Bau eines Leichtbaufahrzeugs, Dissertation, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1998.
- /GER 05/ **Gerdinand, F.:** Verbundoptimierung mineralisch gefüllter Epoxidharzformstoffe mittels Plasmaaktivierung, Cuvillier Verlag, 2005.
- /GER 81/ **Gericke, E.:** Verfügbarkeitsberechnungen für komplexe Fertigungseinrichtungen; Springer-Verlag, Heidelberg, 1981.
- /GG 10/ **GG:** Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 100-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Juli 2010 (BGBl. I S. 944) geändert worden ist.
- /GOT 10/ **Gottschalk, A.:** Qualitäts- und Zuverlässigkeitssicherung elektronischer Bauelemente und Systeme, Methoden – Vorgehensweisen – Voraussage, 2. Auflage, Expert Verlag, 2010.

- /GRA 08/ **Grams, T.:** Grundlagen des Qualitäts- und Risikomanagements; Zuverlässigkeit, Sicherheit, Bedienbarkeit, Heftausgabe 18.04.2008.
- /GRU 08/ **Grudan, D.:** Umweltschutz in der Automobilindustrie, Motor – Kraftstoffe – Recycling, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.
- /GUN 04/ **Gundlach, C.:** Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung, Dissertation, Kassel university press, Universität Kassel, 2004.
- /GUN 13/ **Gundlach, D.:** Praxisorientierte Entwicklung und Auslegung eines Türsystems für ein einachsiges Elektrofahrzeug, Diplomarbeit 1, Universität Kassel, 2013.
- /GRO 11/ **Grote, K.-H.; Feldhausen, J.:** Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, 23. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2011.
- /GUT 11/ **Guthof, Ch.; Schmidt M.:** Bereitstellung eines Leitfadenskonzeptes zur Zuverlässigkeitsbewertung modellbasierter Elektrofahrzeuge, Studienarbeit, Universität-Kassel, 2011.
- /HAS 11/ **Hassanzada, T.:** Marktübersicht Elektroautos, Technologische Herausforderung im Elektromarkt-Segment, Diplomica Verlag GmbH, Hamburg, 2011.
- /HAI 06/ **Haibach, E.:** Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- /HER 05/ **Hering, F.; Martin, R.; Stohrer, M.:** Taschenbuch der Mathematik und Physik, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.
- /HEI 11/ **Heinsohn, J.M. (u. a.):** Einführung in die ISO 26262, Road vehicles-Functional safety, Arbeitspapiere der Nordakademie ISSN 1860-0360 Nr.: 2011-07, Elmshorn, 2011.
- /HEN 08/ **Henze, L.:** Entwicklung einer Methode zum Aufdecken von potentiellen Fehlern in der Konstruktion, Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2008.
- /HEN 13/ **Henger, M.:** Zur Betriebsfestigkeit elektrischer Maschinen in Elektro- und Hybridfahrzeugen, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2013.
- /HIN 13/ **Hinsch, M.; Olthoff, J.:** Impulsgeber Luftfahrt, Industrial Leadership durch luftfahrtspezifische Aufbau- und Ablaufkonzepte, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg 2013.
- /HOF 10/ **Hofmann, P.:** Hybridfahrzeuge, Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft, Springer-Verlag, Wien, 2010.

- /HOL 10/ **Holzmüller, H.H.; Bandow, G.:** „Das ist gar kein Modell!“, Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2010.
- /HOP 13/ **Hoppe, M.:** Entwicklung einer mechanischen und hydraulischen Bremseinheit für ein Elektrofahrzeug, Bachelorarbeit, Universität Kassel, 2013.
- /IEC 61508/ **IEC 61508:** Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- /ISO 26262/ **ISO 26262:** Road vehicles – Functional safety, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- /ISO 26262-3/ **ISO 26262-3:** Road vehicles – Functional safety – Part 3: Concept phase, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- /ISO 26262-5/ **ISO 26262-3:** Road vehicles – Functional safety – Part 5: Product development at the hardware level, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- /ISO 26262-5/ **ISO 26262-3:** Road vehicles – Functional safety – Part 5: Product development at the hardware level, Beuth Verlag, Berlin, 2011.
- /JUN 04/ **Junginger, M.:** Wertorientierte Steuerung von Risiken im Informationsmanagement, Dissertation, Universität Hohenheim, Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, 2004.
- /JOH 11/ **Johanning, K.; Vallee, D.:** Nutzerpotentiale und Infrastrukturbedarf für Elektro-Pkw, Deutscher Verkehrsverlag, Internationales Verkehrswesen Heft 04/2011.
- /KAN 10/ **Kandl, S.:** A Requirement-Based Systematic Test-Case Generation Method for Safety-Critical Embedded Systems, Ph.D. thesis, Technische Universität Wien, 2010.
- /KAM 13/ **Kamper, A.; Vallee, D.; Schnettler, A.:** Elektromobilität, Grundlagen einer Zukunftstechnologie, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- /KAU 05/ **Kautz, M.:** Lebensdauer und mikrostrukturelle Ermüdungsprozesse dauerschwingbeanspruchter ultrafeinkörniger metallischer Werkstoffe, Dissertation, Technische Universität Erlangen Nürnberg, 2005.
- /KEI 13/ **Keichel, M., Schwedes, O.:** Das Elektroauto, Mobilität im Umbruch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- /KLE 08/ **Kleppmann, W.:** Taschenbuch Versuchsplanung, Produkte und Prozesse optimieren, 5., überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 2008.

- /KIE 10/ **Kiermasch, C.:** Better Place – Bewertung des Geschäftsmodells zur Nutzung der Elektromobilität; Studienarbeit, GRIN Verlag für akademische Texte, 2010.
- /KIR 56/ **Kirst, L.:** Konstruktive Grundlagen des Leichtbaus: Werkstoff - Berechnung – Gestaltung. VDI-Z 98 (1956) 23, S. 1373-1380.
- /KLE 13/ **Klein, B.:** Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- /KLE 14a/ **Klein, B.:** Weibull-Analysen im Maschinen- und Fahrzeugbau, Manuskript, Universität Kassel, 2014.
- /KLE 14b/ **Klein, B.:** Versuchsplanung – DoE, Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik, 4. Auflage, De Gruyter Oldenbourg, 2014.
- /KLE 14c/ **Klein, B.:** Betriebsfestigkeit und Zuverlässigkeit von Maschinen, Kfz-Komponenten und Systemen, Manuskript, Universität Kassel, 2014.
- /KLE 14d/ **Klein, B.:** DfT-Versuchstechnik und Teststrategien, Manuskript, Universität Kassel, 2014.
- /KLE 15/ **Klein, B.:** Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 10. Auflage, Springer-Vieweg Verlag, Wiesbaden 2015.
- /KLO 07/ **Klostermann, T.:** Optimierung kooperativer Dienstleistungen im Technischen Kundendienst des Maschinenbaus, GWV Fachverlage GmbH, 2007.
- /KUC 10/ **Kuckartz, U.; Rädiker, St.; Ebert, Th.; Schehl, J.:** Statistik, Eine verständliche Einführung, VS Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010.
- /KUN 08/ **Kuna, M.:** Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen, 1. Auflage, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.
- /KUR 11/ **Kurek, R.:** Karosserie-Leichtbau in der Automobilindustrie, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2011.
- /LAN 37/ **Langer, B.F.:** Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude, Journal of Applied Mechanics 59, S. 160-162, 1937.
- /LÄP 11/ **Läpple, V.:** Einführung in die Festigkeitslehre, 3. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- /LEC 94/ **Lechner, G.; Nauenheimer, H.:** Fahrzeuggetriebe, Grundlagen-Auswahl – Auslegung und Konstruktion, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
- /LIE 12/ **Lienkamp, M.:** Elektromobilität – Hype oder Revolution? ,Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.

-
- /LIN 14/ **Lindenberg, U.:** www.uwe-lindenberg.de/files/sll_asil-tabelle.pdf
Abrufdatum: 13.10.2014.
- /LIN 11/ **Linß, G.:** Qualitätsmanagement für Ingenieure, Fachbuchverlag Leipzig, 3. Auflage, Carl-Hanser-Verlag, 2011.
- /LIN 93/ **Linde, H.; Hill, B.:** Erfolgreich erfinden, Hoppenstedt Verlag, Darmstadt 1993.
- /LOE 09/ **Loerzer, M.:** EMV und Niederspannungsrichtlinie, Sicherheitsanforderungen für den Maschinenbau im globalen Markt, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- /LÖW 10/ **Löw, P.; Pabst, R.; Petry, E.:** Funktionale Sicherheit in der Praxis: Anwendung von DIN EN 61508 und ISO/DIS 26262 bei der Entwicklung von Serienprodukten, Dpunkt.Verlag GmbH, 2010.
- /MAH 00/ **Mahmoud, R.:** Sicherheits- und Verfügbarkeitsanalyse komplexer Kfz-Systeme; Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, 2000.
- /MAR 09/ **Marktforschungsinstitut Puls:** „Welche Chancen haben Elektrofahrzeuge in Deutschland?“; 20. Juli 2009, <http://www.pulsnavigation.de/files/studien/elektrofahrzeuge.pdf>.
- /MEY 03/ **Meyna, A.; Pauli B.:** Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik, Quantitative Bewertungsverfahren, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2003.
- /MEY 10a/ **Meyna, A.:** Zuverlässigkeit elektronischer Systeme im Kraftfahrzeug; BUW OUTPUT, Forschungsmagazin, Universität Wuppertal, 2010.
- /MEY 10b/ **Meyna, A., Pauli, B.:** Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik, 2. Ausgabe, Hanser Verlag, 2010.
- /MIK 05/ **Mikulova, L.:** Bruchmechanische Untersuchungen an Werkstoffen für Dampfkraftwerke mit Frischdampftemperaturen von 500 bis 600 °C, Dissertation, Technische Universität Aachen, 2005.
- /MIN 45/ **Miner, M.A.:** Cumulative damage in fatigue, Journal of Applied Mechanics 12, Nr. 3, S. 159-164, 1945.
- /MIT 10/ **Mitchell, W.J.; Borroni-Bird, Ch. E.; Burns, L. D.:** Reinventing the Automobil, Personal Urban Mobility fort he 21st Century, The MIT Press, Cambridge, 2010.
- /MÖL 10/ **Möller, A.; Pape, J.:** „Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann“; Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2010.
- /MON 03/ **Montgomery, D.C.; Beichelt, F.:** Taschenbuch der Stochastik, Wahrscheinlichkeitstheorie – Stochastische Prozesse – Mathematische Statistik, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2003.
-

- /MOR 08/ **Mora, M.:** VDE Studie sieht für Elektroautos noch Hürden bis zum Massenmarkt; Aachen, Shaker-Verlag, 2008.
- /MÜL 12/ **Müller, J.:** Auslegung und Berechnung eines Fahrwerks für ein einachsiges Elektrofahrzeug, Diplomarbeit 1, Universität Kassel, 2012.
- /MÜL 13a/ **Müller, J.:** Verifikation eines Fahrwerkmodells in ADAMS mittels Versuchsmessungen am realen Prüfstand, Diplomarbeit 2, Universität Kassel, 2013.
- /MÜL 13b/ **Müller, L.:** Aufbau, Inbetriebnahme und Evaluierung eines mechanischen Linearsystems zur Schwerpunktverschiebung eines einachsigen Elektrofahrzeuges, Diplomarbeit 1, Universität Kassel, 2013.
- /NAG 12/ **Nagel, F.:** Gefährdungsanalyse und Risikoeinschätzung eines einachsigen Elektrofahrzeuges gemäß der ISO-Norm 26262, Diplomarbeit, Universität Kassel, 2012.
- /NAU 07/ **Nauanheimer, H.; Bertsche, B.; Lechner, G.:** Fahrzeuggetriebe, Grundlagen-Auswahl – Auslegung und Konstruktion, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- /NAU 11/ **Nauanheimer, H.; Bertsche, B.; Ryborz, J.; Novak, W.:** Automotive Transmissions, Fundamentals – Selection – Design and Application, Second Edition, Springer-Verlag Heidelberg Dordrecht London New York, 2011.
- /NEU 05/ **Neumann, F.:** Prozessmanagement in der Computertomographie unter Anwendung der Netzplantechnik, Dissertation, Universität Berlin, 2005.
- /NEU 12/ **Neugebauer, R.:** Werkzeugmaschinen, Aufbau – Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen, Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- /NOE 06/ **Noe, M.:** Projektbegleitendes Qualitätsmanagement, Der Weg zum besserem Projekterfolg, Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2006.
- /NOL 10/ **Nollau, H.G. Neumeier, M.:** Logistikfallstudien und Risikomanagement, Band 15, Josef Eul Verlag GmbH, Lohmar-Köln, 2010.
- /PAL 24/ **Palmgren, A.:** Die Lebensdauer von Kugellagern, Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 68, Nr. 14, S. 339-341, 1924.
- /PAU 09/ **Paul, Th.:** Netzplantechnik und Zuverlässigkeitsanalyse, IGEL-Verlag, Hamburg, 2009.
- /PEP 07/ **Pepperl+Fuchs:** Safety Integrity Level, SIL IEC 61508/ 61511 Handbuch, 2007.

- /PFE 10/ **Pfeifer, T.:** Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken – 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2010.
- /PIC 09/ **Pickard, K.:** Erweiterte quantitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen; Dissertation, Universität Stuttgart, 2009.
- /ProdHG02/ **ProdHG02:** Produkthaftungsgesetz vom 15.12.1989, das zuletzt durch Artikel 9 Absatz 3 des Gesetzes vom 19. Juli 2002 (BGBl. I S. 2674) geändert worden ist.
- /ProdSG11/ **ProdSG11:** Produktsicherheitsgesetz vom 08.11.2011, (BGBl. I S. 2179; 2012 I S. 131), in Kraft getreten am 01.12.2011.
- /PUS 08/ **Pusch, G.:** Bruchmechanische Kennwerte von Gusseisenwerkstoffen, Heft Nr. 4 Konstruieren + Gießen, Freiberg, 2008.
- /RAB 91/ **Rabetge, Ch.:** Fuzzi Sets in der Netzplantechnik, Dissertation, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 1991.
- /REI 02/ **Reis, H.:** Umfassende Analyse der Produktionssteuerung überlappender Fertigung mit Hilfe der Netzplantechnik, Verlag Dr. Kovac, Hamburg, 2002.
- /REI 10/ **Reif, K.:** Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe mit Brennstoffzellen und alternativen Kraftstoffen, Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.
- /REI 12a/ **Reif, K.:** Automobilelektronik, Eine Einführung für Ingenieure, 4. Auflage, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- /REI 12b/ **Reif, K.; Noreikat, K.E.; Borgeest, K.:** Kraftfahrzeug-Hybridantriebe, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Springer Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2012.
- /RIC 89/ **Richard, H.A.:** Grundlagen und Anwendungen der Bruchmechanik, Manuskript, Universität Paderborn, 1989.
- /RIE 11/ **Rieb, A.:** Konzeption eines Leichtbaurahmens für ein einachsiges Elektrofahrzeug, Diplomarbeit 1, Universität Kassel, 2011.
- /RIE 13/ **Rieb, A.:** Algorithmus zur automatischen Auslegung und Berechnung unterschiedlicher Fahrzeugrahmen in Catia V5, Diplomarbeit 2, Universität Kassel, 2013.
- /RIE 12/ **Rieg, F.; Steinhilper, R.:** Handbuch Konstruktion, Hanser-Verlag, 2012.
- /RIE 14/ **Ried, M.:** Lösungsraumanalyse für Plug-In-Hybridfahrzeuge hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Bauraumkonzept, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2014.

- /RÖS 12/ **Rösler, J., Harders, H., Bäker, M.:** Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, 4. Auflage, Springer Vieweg, 2012.
- /RON 12/ **Ronniger, C.:** Reliability Analyses with Weibull, www.crgraph.com/Weibull.pdf, Abrufdatum: 12.09.2014, 2012.
- /ROS 14/ **Ross, H.-L.:** Funktionale Sicherheit im Automobil, ISO 26262 – Systemengineering auf Basis eines Sicherheitszyklus und bewährten Managementsystemen, Carl Hanser Verlag München Wien, 2014.
- /ROS 82/ **Rossmannith, H.P.:** Finite Elemente in der Bruchmechanik, Springer-Verlag, Wien-New York, 1982.
- /RUP 02/ **Ruppert, H.:** CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung; Dissertation, Universität Stuttgart, 2002.
- /RÜT 13/ **Rützel, K.:** Dynamische Untersuchungen unterschiedlicher Profilgeometrien in ABAQUS, Studienarbeit, Universität Kassel, 2013.
- /RZE 11/ **Rzepka, B.:** Konzeption eines aktiven semantischen Zuverlässigkeitsinformationssystems; Dissertation, Universität Stuttgart, 2011.
- /SCH 01/ **Schlick, Gerhard H.:** Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Maschinen, Geräten und Anlagen mit Ventilen, Expert-Verlag, 2001.
- /SCH 02/ **Schindler, H.J.:** Mechanische Werkstoffprüfung – klassische Verfahren und neue Entwicklungen, Teil 1, Technische Hochschule Zürich, 2002.
- /SCH 03/ **Schlittgen, R.:** Einführung in die Statistik, Analyse und Modellierung von Daten, 10. Auflage, Oldenburg Verlag, 2003.
- /SCH 06/ **Schneider-Obermann, H.:** Basiswissen der Elektro-, Digital- und Informationstechnik, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006.
- /SCH 09/ **Schott, G.:** Werkstoffermüdung - Ermüdungsfestigkeit, 4. Auflage, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2009.
- /SCH 10/ **Schäfer, F.; Van Basshuysen, R.:** Handbuch Verbrennungsmotor, Grundlagen – Komponenten – Systeme – Perspektiven, 5. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.
- /SCH 13/ **Schlagowski, H.:** Technische Dokumentation im Maschinenbau, Anforderungen, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013.
- /SCH 14/ **Schade, W.; Zanker, Ch.; Kühn, A.:** Sieben Herausforderungen für die deutsche Automobilindustrie, Strategische Antworten im Spannungsfeld von Globalisierung, Produkt- und Dienstleistungsinnovationen bis 2030, edition sigma, 1. Auflage, 2014.

- /SEI 14/ **Seidel, W.W.; Hahn, F.; Thoden, B.:** Werkstofftechnik, Werkstoffe – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung, 10. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2014.
- /SEG 09/ **Segway, Inc.:** Apparatus and method for control of a dynamically Self-balancing vehicle; Patent, Nr: WO002010053740A1, 2009.
- /SIE 06/ **Simon, A.:** Qualitative und quantitative Analysen der linearen und nichtlinearen Schadensakkumulationshypothesen unter Einbeziehung der statistischen Versuchsplanung, Kassel university press GmbH, 2006.
- /SIE 10/ **Siebertz, K.; Bebber, D.; Hochkirchen, Th.:** Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- /SÖF 11/ **Söffker, D.:** http://www.uni-due.de/srs/Forschung3_de.php, Universität Duesburg-Essen, 2011.
- /SOU 08/ **Souza, R.Q.; Alvares, A.J.:** FMEA and FTA Analysis for Application of the Reliability – Centered Maintenance Methodology: Case Study on hydraulic Turbines, ABCM Symposium series in mechatronics, pp. 803-812, 2008.
- /SPA 10/ **Spath, D.; Pischetsrieder, B.; Hüttl, R.F.:** Elektromobilität, Potentiale und Wissenschaftlich – Technische Herausforderungen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- /STE 04/ **Steinke, P.:** Rechnergestützte Einführung, Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- /STA 13/ **N. N.:** Statista;
<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/175848/umfrage/wichtige-kriterien-beim-autokauf/>, Veröffentlichung: 2007-11.
- /STR 08/ **Strickmann, J.:** Analysemethoden zur Bewertung von Entwicklungsprojekten, GITO-Verlag Berlin, 2008.
- /STR 12/ **Strunz, M.:** Instandhaltung, Grundlagen - Strategie - Werkstätten, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- /TÖP 07/ **Töpfer, A.:** Six Sigma, Konzeption und Erfolgsbeispiele für praktizierte Null-Fehler-Qualität, 4. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- /VDA 00/ **Verband der Automobilindustrie (VDA):** Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie Band 3; Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten; 3. Auflage, Frankfurt a. M., 2000.

-
- /VDE 10/ **N. N.:** Elektrofahrzeuge, Bedeutung - Stand der Technik – Handlungsbedarf, VDE-Studie, Frankfurt am Main, 2010.
- /VDI 2206/ **VDI-Richtlinie 2206:** Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Düsseldorf, 2004.
- /VDI 4007/ **VDI-Richtlinie 4007:** Zuverlässigkeitsziele (Ermittlung, Überprüfung, Feststellung, Nachweis), Düsseldorf, 2012.
- /VDI 4003/ **VDI-Richtlinie 4003:** Zuverlässigkeitsmanagement, VDI-Richtlinien, 2012.
- /VDI 4009/ **VDI-Richtlinie 4009:** Zuverlässigkeitswachstum bei Systemen, VDI-Richtlinie, 1985.
- /WAL 10/ **Waller, J.-F.:** Bewertung und Akzeptanz elektrisch betriebener Personenkraftwagen – Eine empirische Untersuchung; Bachelorarbeit, Universität St. Gallen, 2010.
- /WAL 11a/ **Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.:** Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges, Technologien, Märkte und Implikationen, GWV-Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2011.
- /WAL 11b/ **Wallentowitz, H.; Reif, K.:** Handbuch Kraftfahrzeugelektronik, Grundlagen – Komponenten – Systeme - Anwendungen , 2. Auflage, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- /WER 12/ **Werdich, M.:** FMEA-Einführung und Moderation, Durch systematische Entwicklung zur Übersichtlichen Risikominimierung, 2.Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2012.
- /WIL 04/ **Wilker, H.:** Weibull-Statistik in der Praxis, Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Produkte, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2004.
- /WÜS 10/ **Wüste, M.:** Innovations- und Nachhaltigkeitsstrategien in der Automobilindustrie, Der Einfluss des Marktes auf die Entwicklung alternativer Antriebe, Diplomica Verlag, Hamburg, 2010.
- /YAY 12/ **Yay, M.:** Elektromobilität, Theoretische Grundlagen, Herausforderungen, sowie Chancen und Risiken der Elektromobilität, diskutiert an den Umsetzungsmöglichkeiten in der Praxis, 2. Auflage, Peter Lang GmbH, 2012.
- /ZIN 67/ **Zindel, E.:** Die Probleme und Möglichkeiten des Leichtbaues und seine Entwicklung vom Luftfahrzeugbau zur allgemeinen Technik, 1. Teil, Nr. 10/1967, S. 458-462.
- /ZEN 12/ **Zenner, H.; Pötter, K.; Jenne, S.; Köhler, M.:** Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
-

In dieser vorliegenden Dissertation wird auf Basis eines BMBF-Projektes mit mehreren universitären und industriellen Partnern ein neuartiges einachsiges Elektrofahrzeug entwickelt. Um frühzeitig die mechanische Funktionalität und die Zuverlässigkeit kritischer Baugruppen sicherzustellen, werden sowohl theoretische als auch praktische Lebensdauer- bzw. Zuverlässigkeitsuntersuchungen innerhalb verschiedener Prüfszenarien durchgeführt. Aufgrund der Berechnungen zur Mechanik eines einachsigen Fahrzeuges entstehen neue mathematische Zusammenhänge, die dazu dienen, bereits in der konstruktiven Phase die unterschiedlichen Positionierungen des Gesamtfahrzeugs unter Berücksichtigung verschiedener Abhängigkeiten von Subsystemen umzusetzen. Weiterhin wird die Zielsetzung verfolgt, einen Entwicklungsprozess für Referenzfahrzeuge zu erarbeiten und bereitzustellen, der einerseits die projektspezifische Vorgehensweise zeitlich beschreibt und andererseits die verwendeten Methoden bzw. Modelle innerhalb der Zeitspanne strukturiert. Auf dieser Grundlage besteht ein Leitfaden, welcher der Beschreibung der frühen Entwicklung und des Aufbaus eines einachsigen Fahrzeuges dienen kann.

ISBN 978-3-7376-0002-6



9 783737 600026 >