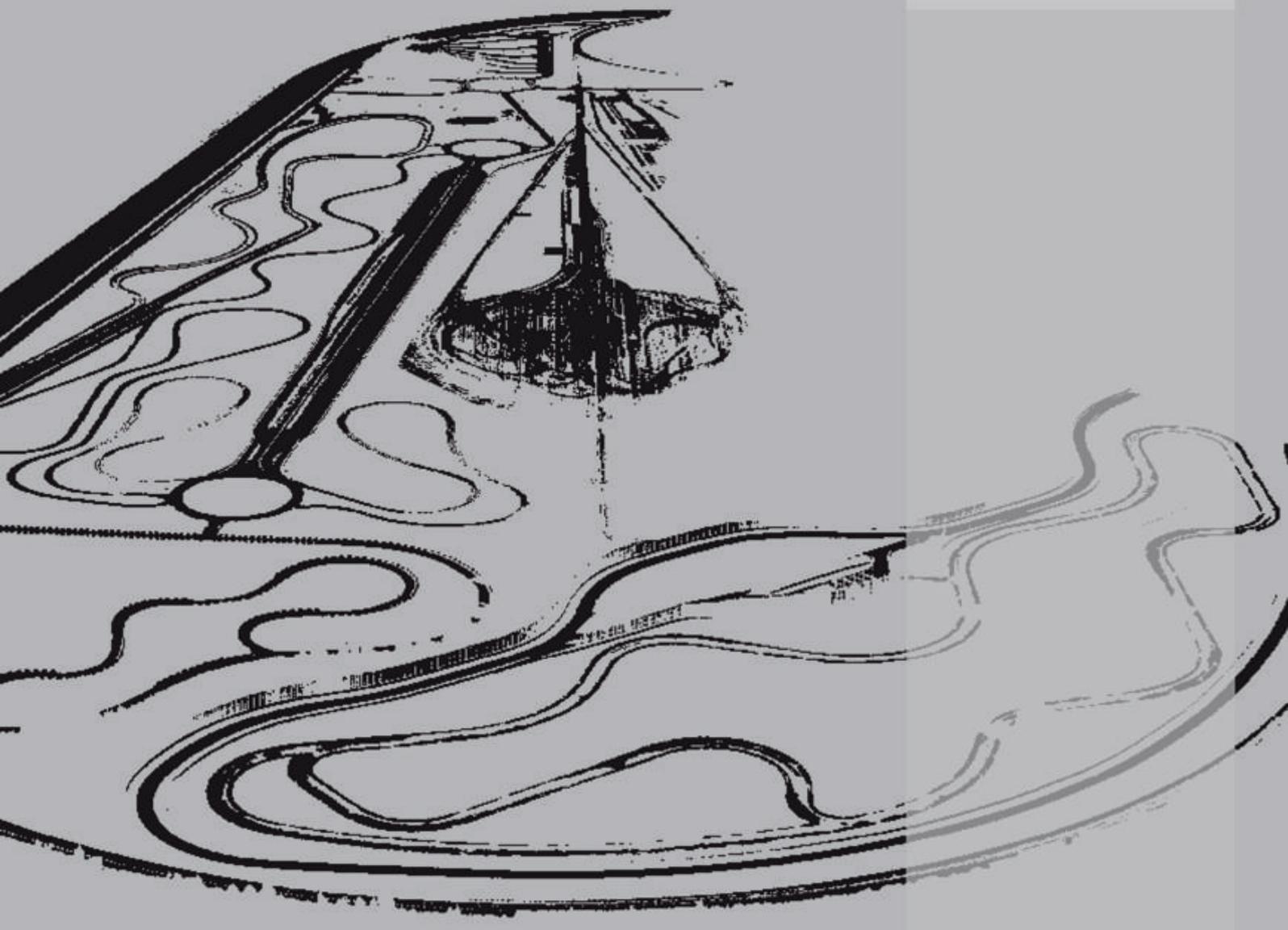




# Zuverlässigkeitsnachweis und Zuverlässigkeits- entwicklung in der Gesamtfahrzeugerprobung

---

Jochen Ungermann



Diss. ETH Nr. 18490

# Zuverlässigkeitsnachweis und Zuverlässigkeitsentwicklung in der Gesamtfahrzeugerprobung

Abhandlung zur Erlangung des Titels  
Doktor der Wissenschaften  
der ETH Zürich

vorgelegt von  
Jochen Ungermann  
Dipl.-Wi.-Ing., Universität Karlsruhe (TH)  
geboren am 09.06.1982  
in Gelnhausen, Deutschland

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. Roland Siegwart, Referent  
Prof. Dr. Lino Guzzella, Korreferent  
Dr.-Ing. Paul Heuler, Korreferent

2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2009

Zugl.: (ETH) Zürich, Univ., Diss., 2009

978-3-86955-092-3

Audi Dissertationsreihe, Band 21

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2009

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2009

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-092-3

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Doktorandentätigkeit in der Abteilung Entwicklung Festigkeit und Langzeitqualität der Audi AG in Ingolstadt.

Die wissenschaftliche Betreuung oblag Herrn Prof. Dr. Roland Siegwart, Leiter des Autonomous Systems Lab an der ETH Zürich. Für seine Unterstützung, die vielfältigen Anregungen und das entgegengebrachte Vertrauen möchte ich ihm meinen herzlichen Dank aussprechen. Auch meinem Betreuer Herrn Dr. Patrick Henseler gebührt mein besonderer Dank. Er begleitete in zahlreichen Gesprächen die Entstehung dieser Arbeit und war mir jederzeit eine wertvolle Hilfe. Unsere Zusammenarbeit in Zürich wird mir in sehr guter Erinnerung bleiben.

Herrn Prof. Dr. Lino Guzzella, Leiter des Instituts für Mess- und Regeltechnik an der ETH Zürich, danke ich ebenso wie meinem Kollegen Herrn Dr.-Ing. Paul Heuler, Leiter Festigkeit Karosserie und Gesamtfahrzeug der Audi AG, für die Übernahme des Korreferates und die konstruktiven Hinweise im Zuge der Ausarbeitung dieser Arbeit.

Wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit hat nicht zuletzt mein Vorgesetzter Herr Bernhard Hammer beigetragen. Ihm danke ich herzlich für die vertrauensvolle und kooperative Zusammenarbeit und die Aufrechterhaltung der für die Entstehung einer solchen Arbeit notwendigen Rahmenbedingungen.

Mein weiterer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen in der Entwicklung Festigkeit und Langzeitqualität, auf deren Unterstützung ich mich stets verlassen konnte. An dieser Stelle seien Timo Elze, Burkhard Knodel und Dr. Andreas Klem genannt, die neben inhaltlichen Fragestellungen ganz wesentlich die angenehme Arbeitsatmosphäre geprägt haben.

Danken möchte ich meiner Freundin Christina, die meinen Weg stets voll und ganz unterstützt hat. Ein ganz herzlicher Dank gilt auch meinen Eltern, ohne deren vielfältige Unterstützung diese Ausbildung nicht möglich gewesen wäre.

Ingolstadt im Juni 2009

Jochen Ungermann



---

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abstract	IX
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	3
1.2 Zielsetzung .....	4
1.3 Aufbau der Arbeit.....	5
<b>2 Anforderungsanalyse und Abgrenzung</b>	<b>7</b>
2.1 Einflussfaktoren auf die Gesamtfahrzeugzuverlässigkeit .....	7
2.2 Erprobung im Rahmen der Systementwicklung .....	9
2.3 Handlungsfelder und Instrumente der Gesamtfahrzeugerprobung.....	11
2.4 Grenzen durch wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen .....	14
<b>3 Theoretische Grundlegung</b>	<b>18</b>
3.1 Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie .....	18
3.1.1 Theoretische Zuverlässigkeitskenngrößen .....	20
3.1.2 Statistische Verteilungen .....	21
3.1.3 Ausfallarten und Ausfallmechanismen .....	24
3.1.4 Planung von Lebensdauerversuchen .....	26
3.1.5 Auswertung und Zusammenführung von Testergebnissen .....	31
3.2 Grundlagen der Versuchsplanung .....	40
3.2.1 Wirkungsprinzip und Grundbegriffe .....	40
3.2.2 Vollständige und fraktionelle Versuchspläne .....	42
3.2.3 Mehrstufige Versuchspläne .....	45
<b>4 Zuverlässigkeitsnachweis in der Erprobung</b>	<b>50</b>
4.1 Bestimmung der Erprobungsstreckencharakteristik.....	51
4.1.1 Qualitative Beschreibung der Erprobungsstrecken.....	51
4.1.2 Parametrisierung der Erprobungsstreckencharakteristik.....	56

4.2	Ermittlung der Zuverlässigkeitsparameter .....	58
4.2.1	Berechnung der Lebensdauerverhältnisse .....	59
4.2.2	Berechnung der Weibullparameter .....	59
4.2.3	Berechnung der Raffungsfaktoren .....	63
4.3	Abdeckungsgrad der Gesamtfahrzeugerprobung .....	64
4.3.1	Analyse des streckenspezifischen Ausfallverhaltens .....	65
4.3.2	Effizienzvergleich unterschiedlicher Erprobungsszenarien .....	66
4.3.3	Ausfallhäufigkeiten in Abhängigkeit des Produktreifegrades .....	68
4.4	Kundenrelevante Laufleistungen .....	69
4.4.1	Berechnung von Laufleistungsverteilungen .....	70
4.4.2	Entwicklung einer Langzeitprognose .....	72
4.5	Zusammenfassung .....	73
<b>5</b>	<b>Erprobungsplanung zur Zuverlässigkeitsentwicklung</b> .....	<b>75</b>
5.1	Ausgewogenheit der Erprobungsstreckencharakteristik .....	76
5.2	Variantenoptimale Erprobungsplanung .....	78
5.2.1	Anwendung der d-optimalen Versuchsplanung .....	79
5.2.2	Umfang und Staffelung der Erprobungsplanung .....	81
5.3	Einbeziehung des Planungsstandards .....	83
5.3.1	Abbildung der Entwicklungskomplexität .....	83
5.3.2	Berücksichtigung unterschiedlicher Produktreifegrade .....	84
5.4	Optimierungsansatz .....	85
5.4.1	Optimierungsalgorithmus .....	88
5.4.2	Konvergenzbetrachtungen .....	90
5.5	Zusammenfassung .....	90
<b>6</b>	<b>Modellsynthese und Ergebnisse</b> .....	<b>91</b>
6.1	Zuverlässigkeitsnachweis in unterschiedlichen Einsatzarten .....	91
6.2	Variantenoptimale und am Erprobungsbedarf orientierte Erprobungsplanung .....	94
6.3	Modellreihenspezifischer Planungsstandard .....	96
6.3.1	Anpassung des Mengengerüsts .....	97
6.3.2	Anpassung der Ziellaufleistungen .....	100
<b>7</b>	<b>Modellvalidierung und Verifikation</b> .....	<b>103</b>
7.1	Sensitivitäten und Parametergüte im Zuverlässigkeitsmodell .....	103
7.2	Synergetische Effekte in der Erprobungsplanung .....	105
7.3	Auswirkungen des neuen Planungsstandards .....	107
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>109</b>
8.1	Zusammenfassung .....	109
8.2	Ausblick .....	111

---

A	Anhang	<b>113</b>
	Symbolverzeichnis .....	114
	Abbildungsverzeichnis .....	117
	Tabellenverzeichnis .....	119
	Literaturverzeichnis .....	120



# Abstract

The principal goal of endurance testing is to provide long-term quality by accelerated testing cars close to the customer requirements. To meet customer demands for higher quality, car manufacturers cover large distances on proving grounds to demonstrate and develop product reliability. However, driving thousands of kilometres does not necessarily increase reliability. Instead, cars should rather be tested systematically under different operating conditions to provoke a maximum of failures, thereby ensuring the deficient components to be reengineered.

In this context, the reduction of the sample size in reliability tests is of particular importance. The application of a Bayesian procedure allows the usage of information gained from preceding tests, which leads to a decrease in the number of necessary sample frames. Hence, different test cases can be compared, which is in turn a benefit for technical releases. For these purposes test track characteristics and typical failure modes have to be analyzed.

Another challenge in test planning is to merge different environmental effects with a wide product variety. Design of Experiments enables to reduce the sample size without damaging the validity of the statistical evidence. This works by choosing an optimal set of design runs from a candidate set of possible design treatment runs. One goal of this thesis is the consideration of different maturity stages and the complexity of technical development during test planning. Finally, an optimization procedure ensures the implementation of scaled testing requirements in consideration of the product variety.

With regard to the anticipated customers car use it is besides necessary to analyse warranty and test data in order to derive quantities and mileage targets for endurance testing.

In doing so endurance testing gets more efficient and does notably support the increase of product reliability during the development process.



# 1 Einleitung

---

*„Am gestrigen Tage begann die Herkomer Konkurrenz, bei der die verwendeten Kraftwagen nicht auf Schnelligkeit allein, sondern hauptsächlich auf ihre Zuverlässigkeit geprüft werden (Ingolstädter Zeitung, 08.06.1906).“*

Es war der Auftakt zum ersten großen motorsportlichen Sieg in der Unternehmensgeschichte der Audi AG als im Jahr 1906 der Zwickauer Dr. Rudolf Stöß auf einem Horch 18/22 PS die Herkomer Konkurrenz gewann. Die Zuverlässigkeitsfahrt führte ihre Teilnehmer in sechs Etappen von Frankfurt am Main über München, Linz, Wien, Klagenfurt, Innsbruck zurück nach München. Insgesamt wurde so eine Distanz von mehr als 1.600 km zurückgelegt.



Abbildung 1.1: Sieger der Herkomer Konkurrenz 1906: Dr. Rudolf Stöß (links) auf einem Horch 18/22 PS (Audi AG)

*„Es war eine regelrechte Alpenfahrt, die erste ihrer Art, am Semmering gab es eine Geschwindigkeitsprobe und der Zirler Berg sollte zeigen, was die Kühler zu leisten vermochten. Erschwerend war, daß die Wagen während der ganzen Konkurrenz mit drei Personen besetzt sein mussten, während der Geschwindigkeitsprüfungen am Semmering und bei Forstenried sogar mit vier Personen (Bade 1938).“*

Bereits in den Pionierzeiten des Automobils wurden Fahrzeuge an die Grenzen ihrer Belastbarkeit geführt, um die Solidität der Konstruktionen und die technische Innovationskraft der Hersteller unter Beweis zu stellen. Heute fiebern zahlreiche Motorsportfans beim Langstreckenklassiker 24 Stunden von Le Mans begeistert mit, wenn Zuverlässigkeit erneut zu einer der entscheidenden Größen wird.

Losgelöst von den Ausnahmebedingungen im Motorsport genießt das Vertrauen in die Haltbarkeit eines Fahrzeugs auch im Alltag einen hohen Stellenwert. Die Gewissheit, mit einem Fahrzeug weite Strecken ohne nennenswerte Mängel zurücklegen zu können, wiegt beim Neuwagenkauf stärker als etwa der Kraftstoffverbrauch oder der Anschaffungspreis. Zuverlässigkeit ist nach wie vor das wichtigste Kriterium beim Neuwagenkauf, noch vor dem Fahrzeugdesign (DAT 2008).

Die Gesamtfahrzeugerprobung trägt einen wesentlichen Anteil daran, wie sich ein Fahrzeug vor dem Kunden darstellt. Im Rahmen der Entwicklung eines neuen Fahrzeugprojekts werden daher tausende Erprobungskilometer unter verschiedenen Einsatzbedingungen zurückgelegt. Dabei gilt es heute ganz ähnliche Anforderungen in der Erprobung abzubilden, wie schon zu Zeiten August Horchs. Die Hochgeschwindigkeitserprobung erfolgt innerhalb abgesperrter Testgelände auf querkraftfreien Rundkursen, wobei die Funktion der Beifahrer von mit Wasser gefüllten Kunststoffkörpern übernommen wird. Während jedoch in den Pionierzeiten nur eine einzelne Karosserie geprüft werden musste, sind heute zahlreiche Varianten in der Erprobung abzubilden. Gleichzeitig ist der durch den Markt getriebenen zeitlichen Verdichtung der Entwicklungszyklen zu begegnen, in deren Folge zu immer späteren Zeitpunkten beurteilungswürdige Bauteilstände für eine Erprobung zur Verfügung stehen.

Dessen ungeachtet sieht sich die Automobilindustrie weiteren Herausforderungen gegenübergestellt. Während das Ziel einer Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes unweigerlich den Weg in Richtung Downsizing und Leichtbau vorgibt, ist der Kunde nur bedingt bereit, auf komfortsteigernde und gleichzeitig gewichtstreibende Komfortattribute und Assistenzsysteme zu verzichten. Es gilt somit Zielkonflikte zwischen Komfort, Fahrzeuggewicht und Solidität aufzulösen, und dabei unter Umständen andere Wege zu gehen.

*„Einige betrachten sich auch den neuen Horch, aber man glaubt nicht, dass er eine Rolle spielen wird, er ist zu leicht für diese Strecke (Bade 1938).“*

## 1.1 Motivation

Mit immer weiteren Modellen und Modellvarianten verfolgen Automobilhersteller die Zielsetzung, auch letzte Nischen in zum Teil gesättigten Absatzmärkten zu besetzen. Dies hat zur Folge, dass zur Befriedigung vielfältiger Kundenbedürfnisse verschiedene Karosserieformen sowie zahlreiche Motor-, Getriebe- und Fahrwerksvarianten entwickelt werden. Dieser Trend und die zunehmende Anzahl an Fahrerinformations- und Fahrerassistenzsystemen wirken sich dabei in einer ansteigenden Komplexität im Automobilbau aus. Während einerseits durch die wachsende Vielfalt Komfortsteigerungen und Sicherheitsgewinne erzielt werden, bergen vernetzte Fahrzeugsysteme andererseits jedoch erhebliche Risiken im Hinblick auf die Zuverlässigkeit des Gesamtfahrzeugs. Vor diesem Hintergrund erwächst der Bedarf nach einer systematischen Erprobung möglichst vieler Ausstattungsumfänge unter allen relevanten Betriebszuständen, um somit die Konstanz der Fahrzeugeigenschaften über die gesamte Nutzungsdauer aufzuzeigen.

Um die Stabilität der Fahrzeugeigenschaften unter realen Betriebsbedingungen nachweisen zu können, sind Informationen über das Kundennutzungsverhalten grundlegend. Hierzu bieten Kundenkollektiverhebungen und Marktstudien zahlreiche Anhaltspunkte, wichtige Informationsquellen für die Erprobungssteuerung stellen jedoch insbesondere Erprobungs- und Gewährleistungsdaten aus früheren Projekten dar. In diesem Zusammenhang wird die Frage aufgeworfen, in wie weit eine fahrzeugprojektspezifische Erprobung im Sinne der Kundenorientierung zweckdienlich sein kann. Da die Kundensegmentierung bereits innerhalb einer Modellreihe stark variiert, gilt es zu hinterfragen, ob sich das Nutzungsverhalten in den einzelnen Segmenten derart unterscheidet, dass die Erprobung entsprechend differenziert werden sollte.

Eine weitere Frage zielt auf den bereits erwähnten Umgang mit der Variantenvielfalt in der Erprobung. Es ist interessant zu beachten, dass einerseits die Steigerung der Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten zu einer höheren Variantenkomplexität führt, andererseits jedoch weit reichende Anstrengungen unternommen werden, um durch Modularisierungsstrategien und Baukastensystematiken die Teilekomplexität beherrschbar zu halten. Im Zuge dessen lassen sich Chancen und Risiken für die Erprobung ableiten. Einerseits wird durch den verstärkten Einsatz von Gleichteilen die Erprobung von Einzelkomponenten auf eine breitere Basis gestellt. Andererseits steigt die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten der Teilsysteme im Gesamtfahrzeug mit all den unvorhersehbaren Auswirkungen während ihres Zusammenspiels weiter an.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung eines Modells zur variantenoptimalen Erprobungsplanung, das über eine systematische Steuerung der Erprobungsträger das Auffinden potenzieller Fehlerquellen begünstigt und den erbrachten Zuverlässigkeitsnachweis erklärt. Vor dem Hintergrund, dass über einen ausfallfreien Erprobungslauf Zuverlässigkeit nicht gesteigert, sondern bestenfalls nachgewiesen werden kann, gilt es sicherzustellen, dass Ausfallquellen identifiziert und gezielten Belastungen ausgesetzt werden. Nur sofern Schäden in der Erprobung systematisch durch kundenrelevante Grenzbelastungen provoziert und fehlerhafte Bauteile überarbeitet werden, ist eine Zuverlässigkeitssteigerung möglich. Gleichzeitig ist es wichtig, eine Aussage über das durch eine Vielzahl an Erprobungsumfängen nachgewiesene Zuverlässigkeitsniveau treffen zu können. Folgerichtig lauten die zentralen Fragestellungen dieser Arbeit:

- 1. Wie ist in der Erprobung ein aussagekräftiger Zuverlässigkeitsnachweis zu führen?*
- 2. Wie kann die Erprobung gezielt zur Zuverlässigkeitsentwicklung beitragen?*

Um verschiedene Erprobungsergebnisse zu einer Gesamtaussage zusammenzuführen, sind zunächst die statistischen Zusammenhänge in der Erprobung anhand der Zuverlässigkeitstheorie zu erörtern. Unter Einbeziehung unterschiedlicher Umgebungseinflüsse, wechselnder zeitlicher Raffung und verschiedener Ausfallcharakteristiken auf den Erprobungsstrecken, wird das Ziel verfolgt, eine Vergleichbarkeit zwischen den Einsatzarten herzustellen. Nur so wird es möglich, sich bei einer Freigabeerteilung auf eine breite statistische Basis beziehen zu können und bei Ausfällen in der Erprobung gezielt den Nacherprobungsbedarf zu ermitteln.

Unter Zuhilfenahme der statistischen Versuchsplanung gilt es weiterhin eine Planungsmethode zu entwerfen, die sowohl einen aus Standards abgeleiteten Mindesterprobungsbedarf abbildet als auch die systematische Erprobung der Ausstattungsvarianten sicherstellt. Dabei liegt eine Anforderung darin, verschiedene Produktreifegrade und unterschiedliche Entwicklungskomplexitäten in die Betrachtungen mit einzubeziehen. Insgesamt wird so ein Instrument geschaffen, welches die Zuordnung der Erprobungsfahrzeuge zu den unterschiedlichen Einsatzarten unter Zuverlässigkeitsgesichtspunkten unterstützt.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Noch vor einer theoretischen Grundlegung werden einleitend die Anforderungen und Rahmenbedingungen einer Gesamtfahrzeugerprobung skizziert. Es wird gezeigt, welchen Einfluss die Gesamtfahrzeugerprobung auf die Zuverlässigkeitsentwicklung nehmen kann und welche Möglichkeiten verwehrt bleiben. Eine Einordnung in das wirtschaftliche und rechtliche Umfeld schließt diese Einführung ab.

Im Grundlagenteil erfolgt dann eine Abgrenzung des Begriffs Zuverlässigkeit und die Erläuterung wichtiger Kenngrößen. Die Auseinandersetzung mit statistischen Verteilungen und Ausfallmechanismen legt hierbei die Basis für die Planung von Lebensdauerversuchen. In diesem Zusammenhang gilt es die Zusammenführung unterschiedlicher Testergebnisse durch Anwendung der Bayes-Theorie aufzuzeigen. Weiterhin werden die Grundprinzipien der Versuchsplanung erörtert, um darauf aufbauend die Entwicklung mehrstufiger Versuchspläne zu diskutieren.

Das darauf folgende Kapitel widmet sich der Fragestellung, wie ein aussagekräftiger Zuverlässigkeitsnachweis in der Erprobung geführt werden kann. Dazu gilt es vorab die Erprobungsstrecken zu beschreiben und deren Charakteristik über geeignete Streckenparameter auszudrücken. Wichtige Zuverlässigkeitskenngrößen wie Lebensdauerverhältnisse, Weibullparameter und Raffungsfaktoren werden bestimmt und das streckenspezifische Ausfallverhalten analysiert. Über die Identifikation der Einflüsse auf die Baugruppenzuverlässigkeit gelingt es, ein Mengengerüst für die Erprobung abzuleiten. Die Berechnung von Laufleistungsverteilungen legt schließlich die Grundlage zur Festlegung von Ziellaufleistungen in der Erprobung.

Im Zuge der angestrebten Zuverlässigkeitsentwicklung werden die Prinzipien der Versuchsplanung auf die Gesamtfahrzeugerprobung übertragen. Auf diese Weise lässt sich die Ausgewogenheit der Teststreckencharakteristik untersuchen und die systematische Erprobung unterschiedlicher Aufbauarten sicherstellen. Über einen Optimierungsansatz wird der aus einem Planungsstandard abgeleitete Erprobungsbedarf unter Berücksichtigung der Variantenvielfalt auf einer minimalen Anzahl an Erprobungsfahrzeugen abgebildet.

Letztlich werden die Ergebnisse zusammengeführt und eine Empfehlung hinsichtlich eines modellreihenspezifischen Planungsstandards ausgesprochen. Dabei erfolgt eine Diskussion der Ziellaufleistungen und des Mengengerüsts in der Erprobung. Die angewandten Metho-

den werden anschließend im Rahmen einer Modellvalidierung kritisch hinterfragt und die Güte der Modelleingangsgrößen verifiziert.

Die Zusammenfassung hebt die Ergebnisse dieser Arbeit hervor, während im Rahmen des Ausblicks weitere offene Fragen aufgeworfen werden.

Abbildung 1.2 stellt die Gliederung der vorliegenden Arbeit zusammenfassend dar.

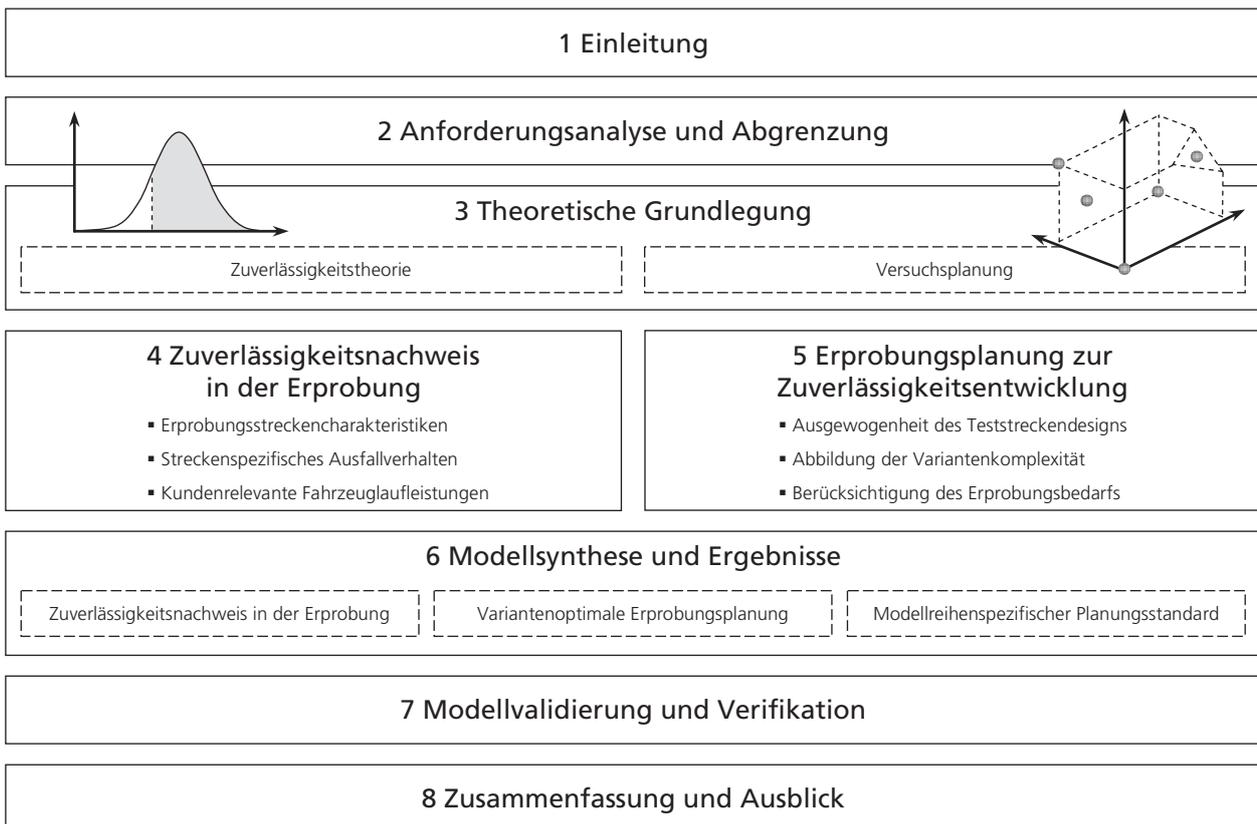


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

## 2 Anforderungsanalyse und Abgrenzung

---

Ein außerordentliches Maß an Verärgerung stellt sich beim Kunden ein, wenn er seine Fahrt aufgrund eines Ausfalls nicht fortsetzen kann. Aus diesem Grunde wird innerhalb der Audi AG die Zielsetzung verfolgt, die Anzahl der Liegenbleiber alljährlich zu halbieren. Dies fordert den Mitarbeitern und Zulieferern eine stetig steigende Einsatzbereitschaft ab, da eine weitere Reduzierung von Jahr zu Jahr mit einem höheren Aufwand verbunden ist. Zwischenzeitlich gilt es vielfach Einzelfehler zu vermeiden. Doch welche Möglichkeiten eröffnen sich einer Gesamtfahrzeugerprobung, die Zielerreichung im Zuverlässigkeitsprogramm zu unterstützen? Welche Einflüsse wirken auf die Zuverlässigkeit eines Gesamtfahrzeugs und welchen Hebel kann die Erprobung mit welchen Instrumenten nutzen? Worin liegt die eigentliche Aufgabe einer Erprobung und was ist sie im Stande zu leisten und was nicht? Nachfolgend werden Antworten auf diese Fragen gesucht, um gleichzeitig den Leser in das Umfeld der Gesamtfahrzeugerprobung einzuführen.

### 2.1 Einflussfaktoren auf die Gesamtfahrzeugzuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit eines Fahrzeugs ist im Wesentlichen über drei Faktoren bestimmt: die Qualität der Konstruktion, die Prozesssicherheit in der Herstellung und Montage sowie die Güte zugelieferter Teile. Jedoch auch eine unzulässige Ingebrauchnahme oder der Betrieb unter extremen Umgebungsbedingungen kann sich negativ auf die Haltbarkeit eines Fahrzeugs auswirken. In Abbildung 2.1 werden deshalb wichtige Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit eines Gesamtfahrzeugs im Sinne eines Ishikawa-Diagramms dargestellt.

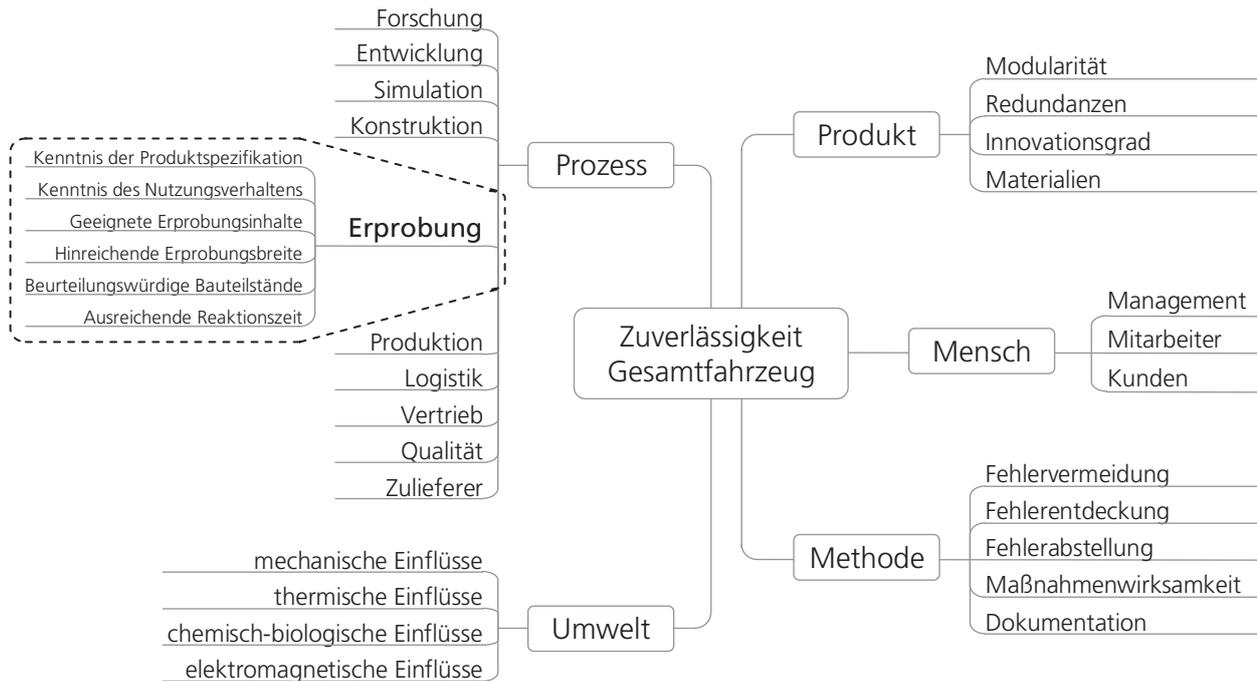


Abbildung 2.1: Einflussfaktoren auf die Gesamtfahrzeugzuverlässigkeit

Es wird deutlich, dass die Erprobung nur mit einem kleinen Hebel auf die Zuverlässigkeit des Gesamtfahrzeugs einwirkt. Gleichzeitig müssen, um diesen Hebel überhaupt nutzen zu können, gewisse Rahmenbedingungen erfüllt sein. Einer Erprobung liegt stets eine Spezifikation zu Grunde, die es über geeignete Testszenarien zu überprüfen gilt. Infolgedessen ist die Qualität einer Erprobung wesentlich über den Detaillierungsgrad der Produktspezifikation beeinflusst. Von Bedeutung ist weiterhin die Kenntnis der vielfältigen Kundennutzung einschließlich der zulässigen Grenzbeanspruchungen, die ein Produkt über seinen Lebenszyklus über sich ergehen lassen muss. Unter Einbeziehung dieser Nutzungsprofile sind geeignete Erprobungsinhalte abzuleiten, über die in kurzer Zeit, jedoch ohne Verfälschung der tatsächlichen Kundennutzung, Schwachstellen aufgezeigt werden können. Um dabei die allgemeine Gebrauchseignung untersuchen zu können, ist eine hinreichende Erprobungsbreite zur Beurteilung der Beanspruchungs- und Festigkeitsstreuung sicherzustellen. Nicht zuletzt hängt die Qualität der Erprobung mit dem Reifegrad der eingesetzten Bauteile zusammen. Werden Komponenten erst zu einem späten Zeitpunkt im Entwicklungszyklus fertig gestellt oder grundlegend überarbeitet, liegen frühzeitig gewonnene Erprobungsergebnisse entweder nicht vor oder sind als solche nicht verwertbar. In der Folge existieren keine ausreichenden Reaktionszeiten für eventuell notwendige Optimierungsschleifen. Eine frühzeitige Bereitstellung beurteilungswürdiger Bauteilstände für die Erprobung stellt somit einen wesentlichen Beitrag zur Zuverlässigkeitsentwicklung dar.

Der Zusammenhang zwischen der Zuverlässigkeit des Gesamtfahrzeugs und der Erprobung kann allerdings nicht unmittelbar quantifiziert werden, da hierzu sämtliche Abhängigkeiten zwischen den Einflussfaktoren aufgeschlüsselt werden müssten. Entsprechend existiert kein Gütekriterium für die Summe aller Erprobungsaktivitäten. Feldinformationen liefern hierbei nur bedingt Aussagen über den geleisteten Beitrag zur Zuverlässigkeitsentwicklung, da sich Dimension und Richtung der in Abbildung 2.1 gezeigten Einflüsse nicht vollständig bestimmen lassen. Ein Ausweg läge darin, in der Felddatenerfassung konstruktiv bedingte Schadensfälle von Montage- bzw. Lieferantenfehlern abzugrenzen. Denn eine falsch montierte Schlauchschelle in der Produktion oder eine Charge schadhafter Zulieferteile kann in der Erprobung nicht entdeckt werden, ganz im Gegensatz zu konstruktiven Mängeln. Dies ist dadurch zu erklären, dass Erprobungsfahrzeuge in der Regel unter nicht seriennahen Bedingungen aufgebaut werden. Jeder dieser Fehler schlägt sich jedoch gleichermaßen in den Schadensfallstatistiken nieder. Da in der Felddatenerhebung das Verursacherprinzip bislang nicht abgebildet wird, erfolgt die Verifikation der in dieser Arbeit angewendeten Methoden zwangsläufig innerhalb des abgegrenzten Einzugsbereichs der Gesamtfahrzeugerprobung.

Auch wenn die Modellbildung über alle Einflussfaktoren nicht umsetzbar scheint, hilft es dennoch die Verzweigung in den Prozess, d. h. die Rollen innerhalb des Entwicklungsprozesses und die damit verbundenen Zuständigkeiten, näher auszuführen. Auf diese Weise wird es möglich die Aufgabenstellung der Erprobung einzugrenzen.

## 2.2 Erprobung im Rahmen der Systementwicklung

Über das V-Modell der Systementwicklung lässt sich ein Zusammenhang zwischen den konstruktiven und integrativen Phasen eines Entwicklungsprozesses herstellen (Guddat 2003). Beginnend bei der Anforderungsanalyse über die Implementierung bis hin zur Erprobung wird hierzu in Abbildung 2.2 der Ablauf einer Systementwicklung dargestellt. Die Aussage des Modells besteht darin, dass die Validierung des absteigenden Pfades der Systemspezifikation durch den aufsteigenden Pfad der Systemintegration zu erfolgen hat. Dabei liegen die jeweiligen Zuständigkeiten stets innerhalb einer horizontalen Ebene. Demzufolge dient die Erprobung, wie bereits diskutiert, dem Aufzeigen von Abweichungen von der globalen Spezifikation. Sie hat zur Aufgabe, die Übereinstimmung zwischen Produkteigenschaften und Anforderungen zu überprüfen. Somit bedingt eine umfassende Erprobung ein durchgängiges Anforderungsmanagement und setzt eine Produktbeschreibung in Form eines vollständigen Zielkatalogs voraus.

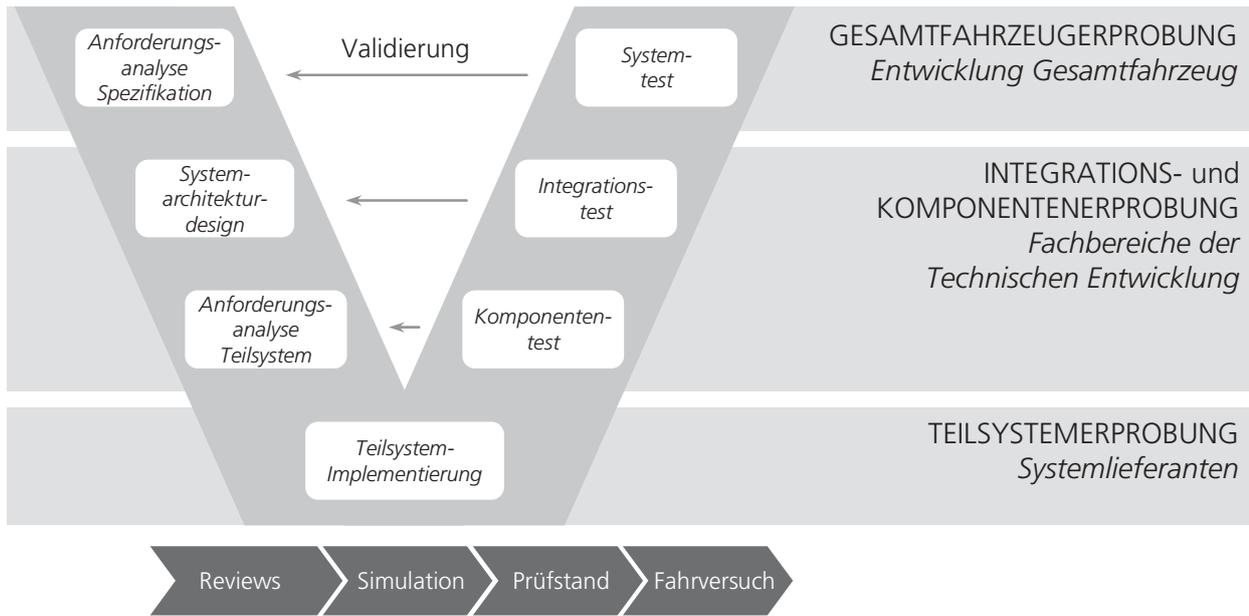


Abbildung 2.2: V-Modell der Systementwicklung

Nicht selten wird die Frage aufgeworfen, ob die Erkenntnisse aus der Gesamtfahrzeugerprobung nicht gleichermaßen in früheren Phasen des V-Modells durch die Simulation oder Prüfstandsversuche gewonnen werden können. Dies hätte zur Folge, dass kostenintensive, reale Erprobungen an physischen Versuchsträgern nicht zwingend durchgeführt werden müssten und die zusätzlichen Kapazitäten für virtuelle Methoden genutzt werden könnten.

Mit Hilfe der Simulation ist es möglich, frühzeitig und vergleichsweise kostengünstig Aussagen über die Dauerfestigkeit, die Steifigkeit, das Crashverhalten und das gegenseitige Zusammenspiel der Bauteile und Komponenten zu treffen. Viele Entwicklungstätigkeiten werden daher von Beginn an durch die Simulation begleitet.

Prüfstandsversuche hingegen können erst dann aufgenommen werden, wenn erste Prototypen mit Hilfswerkzeugen erstellt wurden. Diese Prototypen werden einem zeitlich gerafften Prüfprogramm unter Laborbedingungen unterzogen, das in der Regel nur bedingt an reale Einsatzbedingungen heranreicht. Insbesondere physikalische Effekte schränken hierbei den Prüfstandbetrieb ein. Auf einem Fahrsimulator können über eine kurze Zeitspanne Quer-, Längs- oder Vertikalbeschleunigungen in das Chassis eines Fahrzeuges übertragen werden, eine dauerhaft anliegende Querbeschleunigung, wie in lang gezogenen Kurven üblich, lässt sich noch eher im realen Fahrbetrieb erzeugen. Denn die Ergebnisse auf Prüfständen, die über eine Fesselung der Seitenschweller eine zusätzliche Kraft in das Fahrzeug einbringen, sind über die Fixierung der Karosserie beeinflusst. Darüber hinaus lassen sich

die durch den bewegten Antriebsstrang induzierten Kräfte auf einem Fahrsimulator nicht abbilden. Im Gegensatz zur Gesamtfahrzeugerprobung sind im Prüfbetrieb indes kein betriebsbereites Aggregat oder eine funktionsfähige Elektronik notwendig, Stillstandszeiten durch Elektronikprobleme entstehen somit nicht.

In der Gesamtfahrzeugerprobung wird das vernetzte System erstmals realen Umwelteinflüssen ausgesetzt. Die Wärmeabstrahlung des Asphalts oder die Stauwärme in der Nähe von temperaturempfindlichen Komponenten lassen sich ebenso darstellen wie mögliche Vereisungen oder eine unerwünschte Ansaugung von Schnee. Darüber hinaus existieren rechtliche Anforderungen, die neben den genannten Aspekten die Notwendigkeit der Erprobung des Gesamtsystems unterstreichen (vgl. Kapitel 2.4).

## 2.3 Handlungsfelder und Instrumente der Gesamtfahrzeugerprobung

Über eine Freigabe wird nach der erfolgreichen Erprobung eines Systems zugesichert, dass alle globalen Funktionen und Eigenschaften einer Komponente im Sinne des Zielkatalogs implementiert worden sind. Dabei stellt die zurückgelegte Laufleistung auf den Erprobungsstrecken seit jeher ein zentrales Freigabekriterium dar. Gleichzeitig gewinnt jedoch der Nachweis der Funktionsstabilität über Laufzeit und die Eigenschaftserprobung neben den klassischen Themen der Betriebsfestigkeit zunehmend an Bedeutung. Vor diesem Hintergrund lassen sich, wie in Abbildung 2.3 gezeigt, die drei Handlungsfelder der Gesamtfahrzeugerprobung aus den Zuverlässigkeitszielen der Audi AG ableiten.

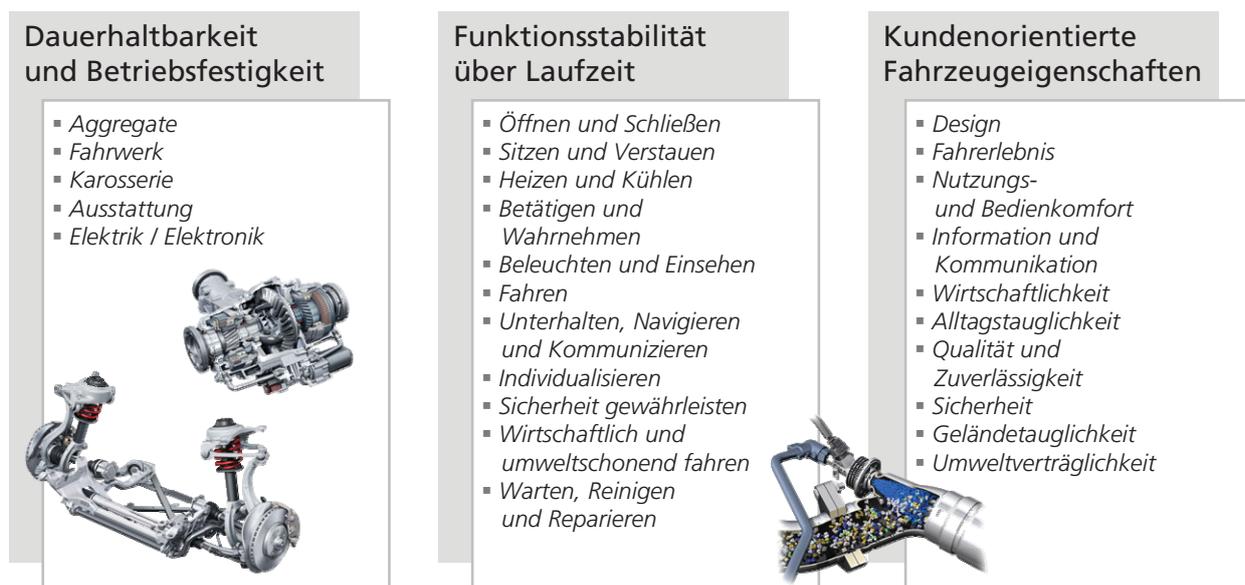


Abbildung 2.3: Handlungsfelder der Gesamtfahrzeugerprobung

Im Fokus der Erprobung liegen demzufolge Bauteile, Funktionen und Eigenschaften. Dabei existieren n:n-Beziehungen zwischen den jeweiligen Kategorien, die es in der Gesamtfahrzeugerprobung aufzulösen gilt. So besteht zwischen der Funktion Öffnen und Schließen der Tür eine Abhängigkeit zwischen den Karosseriebauteilen Seitenwandrahmen und Tür, dem Ausstattungsumfang innerer Türöffner als auch den Elektronikbauteilen Komfortschlüssel und Zentralverriegelung. Gleichzeitig beeinflusst die Funktion die Fahrzeugeigenschaften Bedienkomfort, Alltagstauglichkeit und Sicherheit.

Nachfolgend werden die drei Handlungsfelder der Gesamtfahrzeugerprobung näher ausgeführt und Zielgrößen sowie die zur Verfügung stehenden Instrumente diskutiert.

### **Dauerhaltbarkeit und Betriebsfestigkeit**

Aus den im Jahr 1993 verabschiedeten Designzielen der Audi AG folgen die Mindestauslegungsanforderungen für Bauteile und Komponenten.

- *Sicherheitsrelevante Bauteile und Baugruppen*

Der für das jeweilige Bauteil härteste von 100 Kunden (1%-Kunde) muss mit dem schlechtesten von 1.000 Bauteilen (1‰-Bauteil) eine Laufstrecke von 300.000 km erzielen können.

- *Nicht sicherheitsrelevante Bauteile*

Für nicht sicherheitsrelevante Teile gilt die halbe statistische Lebensdauerforderung, d. h. der 1%-Kunde muss mit einem 1‰-Bauteil eine Laufstrecke von 150.000 km zurücklegen. Dieser Nachweis kann ebenso bei 300.000 km durch Anhebung der streuungsabhängigen Ausfallwahrscheinlichkeit geführt werden.

Um dieser Zielsetzung zu entsprechen, gilt es die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils in Abhängigkeit der Streuung der Beanspruchung und der Bauteilfestigkeit zu ermitteln. Als Eingangsgrößen dienen dabei Lastannahmen aus Kundenkollektiverhebungen und Ergebnisse aus Prüfstandsversuchen. Die Aufgabe der Gesamtfahrzeugerprobung liegt in der Verifikation dieser Ergebnisse auf speziell ausgelegten Teststrecken unter Raffung.

Neben den Zielen der Betriebsfestigkeit existieren weitere Auslegungsziele losgelöst von der zurückgelegten Laufleistung des Fahrzeugs. So werden für Türen und Klappen Bedienungshäufigkeiten definiert. Eine Heckklappe ist beispielsweise auf 25.000 Öffnungs- und Schließvorgänge ausgelegt. Beim Klimakompressor wiederum sind Mindestbetriebszeiten sicher-

zustellen. Geringe Anforderungen werden an Verschleißteile gestellt, deren Austausch im Lebenszyklus eines Fahrzeugs vorgesehen und somit zulässig ist. Das Erreichen dieser Auslegungsziele wird dabei nicht allein in der Dauererprobung, sondern vordergründig am Prüfstand nachgewiesen.

### **Funktionsstabilität und Funktionssicherheit über Laufzeit**

Funktionsstabilität bezeichnet die Verfügbarkeit und Korrektheit aller Fahrzeugfunktionen über die gesamte Nutzungsdauer. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen mechanischen und elektrischen bzw. elektronischen Funktionen zu treffen. Eine Motorlagerung, als Beispiel für eine mechanische Funktion, stützt das Aggregat auf der Karosserie ab und sorgt gleichzeitig für dessen akustische Entkoppelung. Die Funktionen können mehr oder weniger gut implementiert sein bzw. sich mit zunehmender Laufleistung verändern. Entsprechend wird die Funktionsstabilität in der Erprobung anhand einer Notenskala beurteilt. Da elektronische Funktionen hingegen kein Übergangsverhalten im Sinne einer Abnutzung zeigen, werden im Rahmen eines Elektroniktests Funktionen gezielt angesteuert und die korrekte Ausgabe überprüft. Dies erfolgt zunächst an einem Simulationsprüfstand in Form eines Brettbaus und anschließend unter dem Einfluss wechselnder Umgebungsbedingungen im Gesamtfahrzeug. Aufgrund der spezifischen Anforderungen an die Erprobungsplanung wird in dieser Arbeit auf die Erprobung von Elektronikkomponenten jedoch nicht näher eingegangen. Hinsichtlich des Tests von elektronischen Fahrzeugfunktionen und der Zuverlässigkeitsanalyse in der Softwareentwicklung sei deshalb an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen (Baumann 2003, Guddat 2003, Braitschink und Reuss 2005, Stroop et al. 2005, Heitmann 2005, Musa et al. 1987).

### **Beurteilung kundenorientierter Fahrzeugeigenschaften**

Der Kunde nimmt ein Fahrzeug in erster Linie über dessen Eigenschaften wahr. Die Eigenschaften wiederum folgen aus dem Zusammenspiel der Einzelsysteme. Aufgabe der Erprobung sollte deshalb sein, zunächst die Güte der Eigenschaften und erst im zweiten Schritt die Qualität der Komponenten zu beurteilen. Auf diese Weise wird in Augenhöhe des Kunden argumentiert und somit einen vergleichbaren Bewertungsmaßstab zugrunde gelegt. Ein Fahrzeug besitzt mehrere Haupteigenschaften, die wiederum in mehrere Unterkategorien ausdifferenziert werden können. Zu den Hauptkategorien zählen Design, Fahrer-

lebnis, Nutzungs- und Bedienkomfort, Information und Kommunikation, Wirtschaftlichkeit, Alltagstauglichkeit, Qualität und Zuverlässigkeit, Sicherheit, Geländetauglichkeit sowie Umweltverträglichkeit. Die Eigenschaft Alltagstauglichkeit lässt sich wiederum in Variabilität, Wartungsfreundlichkeit, Witterungstauglichkeit etc. aufgliedern. Nicht alle Eigenschaften werden im Fahrzeugversuch überprüft, dennoch bietet der Katalog wichtige Anhaltspunkte für das Ziel einer kundennahen Erprobung. Für jede Eigenschaft sind deshalb entsprechende Zielgrößen festzulegen. Ein Beispiel hierfür ist die Forderung nach einer Zwölf-Jahres-Garantie gegen Durchrostung. Die Aufgabe der Erprobung liegt dann darin, die Korrosionsbeständigkeit in gerafften Testzyklen nachzuweisen.

Neben den aus Zuverlässigkeitszielen abgeleiteten Handlungsfeldern der Erprobung sind die zur Verfügung stehenden Instrumente zur Umsetzung dieser Ziele zu identifizieren. Als wesentliche Steuerungsgrößen lassen sich dabei die Anzahl der Erprobungsfahrzeuge, die gewählte Einsatzart, Ziellaufleistungen, Erprobungsinhalte, Bewertungskriterien und der Aufbauzustand der Fahrzeuge hinsichtlich Ausstattung und Produktreifegrad anführen. Die Festlegung ebendieser Größen zur bestmöglichen Umsetzung der Handlungsfelder der Erprobung ist Gegenstand dieser Arbeit.

## 2.4 Grenzen durch wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen

Die finanziellen Aufwendungen für eine Gesamtfahrzeugerprobung sind erheblich, entsprechend stellt sich die Frage nach einem vertretbaren Rahmen. Dieser ist schwer zu fassen, da sich die Auswirkungen von Rückrufen und unzureichend erprobter Qualität auf Image und Rentabilität nicht exakt beziffern lassen. Eine Bezugsgröße stellt die Summe der Gewährleistungs- und Kulanzkosten dar, die jedoch keine Aussage über die Langzeitqualität der Fahrzeuge und somit die Verdienste der Erprobung zulässt. Wie in Abbildung 2.4 gezeigt, kann über die Summe aus den Erprobungskosten, d. h. den Arbeits- und Prüflingskosten, und den Gewährleistungskosten abzüglich der Ersatzteilerlöse eine Gesamtkostenfunktion abgeleitet werden (Maisch 2007). Diese Funktion besitzt ein eindeutiges Kostenoptimum bei der Zuverlässigkeit  $R_{opt}$ , vernachlässigt jedoch die nicht quantifizierbaren Imageverluste. Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit kein reines Kostenoptimum angestrebt, vielmehr liegt der Fokus auf der Steigerung der Zuverlässigkeit bei Wahrung eines vertretbaren finanziellen Einsatzes.

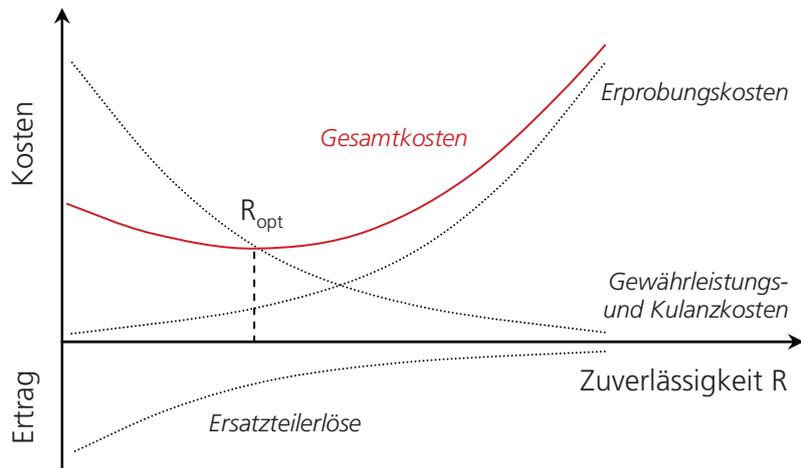


Abbildung 2.4: Ermittlung einer kostenoptimalen Zuverlässigkeit

Nicht nur wirtschaftliche Gesichtspunkte, wie etwa die gezielte Zuverlässigkeitsentwicklung zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit, heben die Notwendigkeit einer umfassenden Erprobung hervor. Auch Regelungen im Zusammenhang mit der Begrenzung möglicher Produkthaftungsrisiken zwingen die Automobilhersteller dazu, ihre Fahrzeuge systematisch zu erproben. Eine Diskussion der Anforderungen an die Gesamtfahrzeugerprobung ist somit ohne die Einordnung in einen juristischen Zusammenhang unvollständig.

Die deliktsrechtliche Verkehrssicherungspflicht überträgt dem Hersteller die Verantwortung, die von seinem Produkt ausgehenden Gefahren so gering wie möglich zu halten. Dabei ist bei der Entwicklung und Erprobung von Produkten der neueste Stand von Wissenschaft und Technik zu berücksichtigen. Im Zusammenhang mit der Verkehrssicherungspflicht lassen sich deshalb folgende Anforderungen an die Erprobung ableiten (Meyer 2007):

- Die Erprobung hat grundsätzlich vor Inverkehrbringen eines Erzeugnisses zu erfolgen und ist über den gesamten Zeitraum der Serienfertigung nach dem jeweils neuesten Stand der Wissenschaft und Technik weiterzuführen.
- Der Aufwand der Erprobung richtet sich nach dem abstrakten Gefährdungspotenzial des Erzeugnisses und wird lediglich durch das technisch Machbare begrenzt. Nur sofern auf mögliche Gefahrenquellen ausreichend hingewiesen wird und durch keinen Hersteller am Markt verbesserte Zuverlässigkeitsprüfungen durchzusetzen sind, bestimmt sich der erforderliche Mindestaufwand über die wirtschaftliche Zumutbarkeit. Der Maßstab für die wirtschaftliche Zumutbarkeit orientiert sich dabei stets an den voraussehbaren Folgen beim Versagen des Erzeugnisses.

Weitere Bestimmungen finden sich im Zusammenhang mit der Versicherung von Produkthaftungsrisiken. Im Produkthaftpflichtmodell (ProdHB) wird die Pflicht zur Durchführung von Zuverlässigkeitsprüfungen über eine Erprobungsklausel eingeführt. Demnach sind „Ansprüche aus Sach- und Vermögensschäden durch Erzeugnisse, deren Verwendung oder Wirkung im Hinblick auf den konkreten Verwendungszweck nicht nach dem Stand der Technik oder in sonstiger Weise ausreichend erprobt waren“, vom Versicherungsschutz ausgeschlossen (Ziffer 6.2.5. ProdHB 2002). Damit ist sichergestellt, dass die durch kürzere Entwicklungszyklen bedingte Erprobungsverlagerung hin zum Endkunden nicht noch dadurch gefördert wird, dass eine Haftpflichtversicherung die durch unzureichende Qualität verursachten Kosten übernimmt (Kettler und Waldner 2004). Herauszustellen ist, dass seit dem Jahr 2002 im Gegensatz zu den Bestimmungen im Umfeld der Produktsicherheit nicht der Stand von Wissenschaft und Technik, sondern lediglich der Stand der Technik im Produkthaftpflichtmodell zugrunde gelegt wird.

Unter Einbeziehung der aktuellen Rechtsprechung sind zur Wahrung des Versicherungsschutzes nach dem Produkthaftpflichtmodell folgende Punkte in der Erprobung zu beachten (Kettler und Waldner 2004):

- Die Erprobung hat systematisch und sachgerecht zu erfolgen und besteht nicht in der willkürlichen Durchführung von Funktionstests.
- Die Erprobung basiert auf praktischen, also experimentellen Testverfahren. Die alleinige Kontrolle von Konstruktionsberechnungen ist nicht ausreichend.
- Gegenstand der Erprobung ist ein funktionsfähiges Erzeugnis, das mindestens ein Prototypenstadium erreicht hat. Darüber hinaus sind Erzeugnisse zu erproben, die die tatsächlich resultierende Qualität vor Kunde repräsentieren, d. h. auch den Einflüssen des regulären Produktionsprozesses unterliegen.
- Ein Erzeugnis muss auf die Verwendung, für die das Erzeugnis bei Herstellung und Lieferung bestimmt war, erprobt werden. Dazu zählen auch Gebrauchserwartungen.
- Es muss eine Berücksichtigung der Bauteilstreuung erfolgen, d. h. auch Bauteile mit einer Güte am Rande des Toleranzspektrums sind zu erproben.
- Komponenten müssen in der Gesamtanlage erprobt werden, eine experimentelle Prüfung von Einzelkomponenten ist nicht ausreichend.

- Ein in seiner Zusammensetzung geändertes oder mit neuen Verfahrenstechniken hergestelltes Erzeugnis muss wiederholt erprobt werden.
- Hinsichtlich der Durchführung der Erprobung ist es unter Berücksichtigung der zuvor genannten Punkte gleichrangig, ob diese durch den Zulieferer oder den Hersteller erfolgt.

Die Beweislast liegt im Falle einer juristischen Auseinandersetzung beim Versicherer, der eine aus seiner Sicht unzureichende Erprobung zu begründen hat. Der Versicherungsnehmer muss dabei im Rahmen seiner Aufklärungs- und Mitwirkungsobliegenheiten die Aufklärung des Sachverhalts unterstützen. Liegt eine nur unzureichende Dokumentation der Erprobung vor, kann dies eine Umkehr der Beweislast zur Folge haben. Auch das Aufzeigen einer nicht vorhandenen Kausalität, beispielsweise dem Fehlen eines funktionalen Zusammenhangs oder eines bestimmungsgemäßen Einwirkens, obliegt dem Versicherungsnehmer (Kettler und Waldner 2004). Da die Produkthaftungsrisiken der Audi AG, mit Ausnahme der Vereinigten Staaten, über Versicherungen abgedeckt sind, gilt es die genannten Punkte in der Erprobung zu berücksichtigen, um den Versicherungsschutz nicht zu gefährden.

## 3 Theoretische Grundlegung

---

Es ist deutlich geworden, dass sich der Rahmen einer Erprobung nicht allein unter Zuverlässigkeitsgesichtspunkten bestimmen lässt. So sind gleichermaßen prozessuale, organisatorische, finanzielle und rechtliche Restriktionen zu berücksichtigen. Gleichwohl liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Optimierung der Erprobung unter Zuverlässigkeitsaspekten. Entsprechend gilt es sich zunächst dem Begriff Zuverlässigkeit über eine Abgrenzung zu nähern.

### 3.1 Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie

Im alltäglichen Sprachgebrauch wird der Begriff Zuverlässigkeit im Zusammenhang mit unterschiedlichen Sachlagen genutzt. So ist die Rede von zuverlässigen Konsumgeräten, die nur selten zur Reparatur gebracht werden müssen, von Fahrzeugen mit hoher Zuverlässigkeit, die weite Distanzen ohne nennenswerte Mängel zurücklegen, von zuverlässigen IT-Systemen, die jederzeit den Zugriff auf vertrauliche Informationen ermöglichen oder von der zuverlässigen Rad-Schienentechnik, der tagtäglich tausende Berufspendler ihr Leben anvertrauen. Doch was ist mit Zuverlässigkeit oder besser Verlässlichkeit in der jeweiligen Situation gemeint? Im Zusammenhang mit dem Oberbegriff Verlässlichkeit (Dependability) werden häufig Begriffe wie Zuverlässigkeit (Reliability), Verfügbarkeit (Availability), Instandhaltbarkeit (Maintainability), Sicherheit (Safety) und Vertraulichkeit (Security) genannt (Avižienis et al. 2004). Da insbesondere die Begriffe Verlässlichkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit im deutschen Sprachgebrauch oftmals synonym genutzt werden, ist eine genaue Unterscheidung der Begrifflichkeiten für das weitere Verständnis von Vorteil.

Nach DIN 40041 handelt es sich bei Zuverlässigkeit um die „Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderungen zu erfüllen“. Übertragen auf die Zuverlässigkeitsbestimmung eines Fahrzeugs bedeutet dies, dass sowohl Informationen über das Kundennutzungsverhalten als auch die Mindestanforderungen hinsichtlich Laufzeit bzw. Lebensdauer bekannt sein müssen. Nach einer eng gefassten, mathematischen Definition, die dieser Arbeit zugrunde liegt, ist Zuverlässigkeit die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt (Bertsche und Lechner 2004). Im Gegensatz dazu bezeichnet Verfügbarkeit den Anteil an der Gesamtnutzungszeit, während dessen ein System betriebsbereit zur Verfügung steht. Unter Einbeziehung des Begriffs Instandhaltbarkeit, der im Wesentlichen die Wartungsfreundlichkeit eines Systems umschreibt, ist somit ein unzuverlässiges System mit häufigen Ausfällen denkbar, das jedoch aufgrund einer guten Instandhaltbarkeit eine insgesamt hohe Verfügbarkeit aufweist. Oftmals wird einem verlässlichen System gleichzeitig ein hohes Maß an Sicherheit unterstellt. Sicherheit beschreibt das Nichtvorhandensein einer Gefahr bzw. nach DIN EN 61508 Teil 4 die „Freiheit von unvermeidbaren Risiken“. Ein sicheres System muss jedoch nicht zwangsläufig zuverlässig sein und umgekehrt. Zur Unterscheidung der beiden Aspekte hilft es, Fehlerzustände oder Ausfälle nach deren Konsequenz zu klassifizieren und nach Ausfällen mit und ohne Gefahr für die Umwelt zu unterscheiden. Während die Summe dieser Ausfälle eine Aussage über die Zuverlässigkeit des Systems zulässt, sind zur Beurteilung der Sicherheit der Betrachtungseinheit nur diejenigen Ausfälle heranzuziehen, die eine Gefahr für die Umwelt nach sich ziehen. Vertraulichkeit wiederum wird im Zusammenhang mit der Verlässlichkeit von IT-Systemen diskutiert und beschreibt sinngemäß die Angriffssicherheit des Systems vor unberechtigten Zugriffen sowie die Integrität der Datenhaltung (Avizienis et al. 2004).

Gegenstand dieser Arbeit sind Untersuchungen zum Nachweis und zur Steigerung der Zuverlässigkeit von Fahrzeugen. Auf die Steigerung der Verlässlichkeit eines Fahrzeugs durch Erhöhung der Instandhaltbarkeit wird nicht eingegangen. Sicherheitstechnische Aspekte finden in sofern Berücksichtigung, als dass unterschiedliche Anforderungen an sicherheitsrelevante und nicht sicherheitsrelevante Bauteile in der Erprobung gestellt werden und die gesetzlich verankerten Verkehrssicherungspflichten in die Erprobungsanforderungen mit einfließen.

### 3.1.1 Theoretische Zuverlässigkeitskenngrößen

Zum besseren Verständnis der mathematischen Zusammenhänge auf dem Gebiet der Zuverlässigkeitstheorie werden zunächst die grundlegenden Begriffe diskutiert. Die Beschreibungen beziehen sich auf die Ausführungen des Verbandes der Automobilindustrie e.V. zur Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten (VDA 2000).

Das Ausfallverhalten einer Betrachtungseinheit beschreibt die Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t)$ . Sie entspricht dem Anteil der ausgefallenen Einheiten am Stichprobenumfang zum Zeitpunkt  $t$ . Die Ausfallwahrscheinlichkeit ändert sich in der Regel über die Betriebsdauer, so dass der kontinuierliche Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit über der Zeit als Ausfallverteilungsfunktion  $F(t)$  dargestellt wird. Die Zuverlässigkeit oder Überlebenswahrscheinlichkeit  $R(t)$  folgt aus dem Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit.

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3.1)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte  $f(t)$  drückt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls in einem inkrementellen Zeitintervall aus und berechnet sich somit über die Ableitung der Ausfallverteilungsfunktion.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3.2)$$

Die Ausfallrate  $z(t)$  wird über das Verhältnis aus Ausfalldichte und dem Anteil der intakten Einheiten am Stichprobenumfang zum Zeitpunkt  $t$  gebildet. Sie gibt Aufschluss darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Betrachtungseinheit in einem inkrementellen Zeitintervall ausfällt, bezogen auf die Summe der noch intakten Einheiten zum Zeitpunkt  $t$ .

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.3)$$

Die Zuverlässigkeitskenngröße Mean Time To Failure (MTTF) ist über den Mittelwert der ausfallfreien Zeit einer Betrachtungseinheit, d. h. den Erwartungswert der Lebensdauer  $t$ , definiert (Bertsche und Lechner 2004):

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt . \quad (3.4)$$

Unter Einbeziehung der Kennzahl Mean Time To Repair (MTTR), der im Mittel benötigten Zeit bis zur Reparatur eines Systems, kann eine Aussage über die Verfügbarkeit  $V(t)$  eines reparierbaren Systems getroffen werden.

$$V(t) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (3.5)$$

### 3.1.2 Statistische Verteilungen

Im nachfolgenden Kapitel werden die in dieser Arbeit berücksichtigten statistischen Verteilungen zur Beschreibung des Ausfallverhaltens einer Betrachtungseinheit erörtert. Weiterführende Informationen zu statistischen Verteilungen sowie deren Beziehungszusammenhänge finden sich in der Standardliteratur zur Auswertung von Zuverlässigkeitsversuchen (Deshpande und Purohit 2005; Nelson 2004; Belyaev und Kahle 2000).

#### 3.1.2.1 Binomialverteilung

Die Binomialverteilung gehört der Klasse der diskreten Verteilungen an. Ihre Herleitung stützt sich auf das so genannte Bernoulli-Experiment, bei dessen Durchführung eine Einheit aus einer Grundgesamtheit entnommen wird, die eine von zwei sich ausschließenden Ausprägungen besitzt. Für die Ziehung einer Einheit mit der ersten Ausprägung wird die konstante Wahrscheinlichkeit  $p$  angenommen, für die Ziehung einer Einheit mit der zweiten Ausprägung entsprechend  $(1-p)$ . Von dem Experiment werden  $n$  unabhängige Wiederholungen durchgeführt und jede Einheit wird nach ihrer Ziehung zurückgelegt. Der Reihenfolge der Entnahme wird keine Bedeutung beigemessen. Die Wahrscheinlichkeit, dass bei wiederholter Ziehung  $x$  Einheiten die erste Ausprägung aufweisen, ist  $p^x$ , entsprechend folgt für die Wahrscheinlichkeit, dass  $(n-x)$  Einheiten die komplementäre Eigenschaft besitzen,  $(1-p)^{n-x}$ .

Zur Beschreibung des Ergebnisses dieses Wahrscheinlichkeitsexperiments wird die Binomialverteilung herangezogen. Für die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte der diskreten Zufallsgröße  $x$  gilt hierbei

$$f(x; n, p) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad (3.6)$$

und als Verteilungsfunktion folgt

$$F(x; n, p) = \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}. \quad (3.7)$$

Im theoretischen Fall einer unendlich großen Grundgesamtheit kann die Binomialverteilung zur Beschreibung eines Experiments ohne Zurücklegen herangezogen werden. Die n-fache Durchführung des Experiments ist dann derart zu interpretieren, dass aus einer Grundgesamtheit eine Stichprobe des Umfangs n gezogen wird, deren Zusammensetzung hinsichtlich der Ausprägungen der Einheiten bestimmt werden soll. Diese Situation lässt sich auf die Erprobung übertragen, da hier der Anteil intakter und funktionsfähiger Einheiten in einer Stichprobe nach Abschluss der Erprobung untersucht wird.

### 3.1.2.2 Multinomialverteilung

Die Multinomialverteilung oder auch Polynomialverteilung beschreibt die Wahrscheinlichkeit einer Ergebnissequenz. Sie ist als eine Verallgemeinerung der Binomialverteilung mit den Zufallsgrößen  $x_k$  und Wahrscheinlichkeiten  $p_k$  für k Ergebnisausgänge bei der Durchführung von n unabhängigen, gleichartigen Experimenten aufzufassen. Als Wahrscheinlichkeitsdichte ergibt sich:

$$f(x_k; n, p_k) = \frac{n!}{x_1! \cdot x_2! \cdot \dots \cdot x_k!} p_1^{x_1} \cdot p_2^{x_2} \cdot \dots \cdot p_k^{x_k}. \quad (3.8)$$

Die Multinomialverteilung wird in Kapitel 3.1.5.2 zur Beschreibung von Ranggrößenverteilungen eingesetzt.

### 3.1.2.3 Betaverteilung

Zur Darstellung stetiger Zufallsgrößen ist die Betaverteilung geeignet. Die Betadichtefunktion (siehe Abbildung 3.1) mit den Parametern A und B ist auf dem Intervall [0, 1] über

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{B(A, B)} x^{A-1} (1-x)^{B-1} & 0 \leq x \leq 1; A, B > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.9)$$

definiert und berechnet sich unter Einbeziehung der so genannten Betafunktion

$$B(A, B) = \int_0^1 x^{A-1} (1-x)^{B-1} dx. \quad (3.10)$$

Als Verteilungsfunktion folgt aus dem Integral der Betadichtefunktion:

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{B(A,B)} x^{A-1} (1-x)^{B-1} dx. \quad (3.11)$$

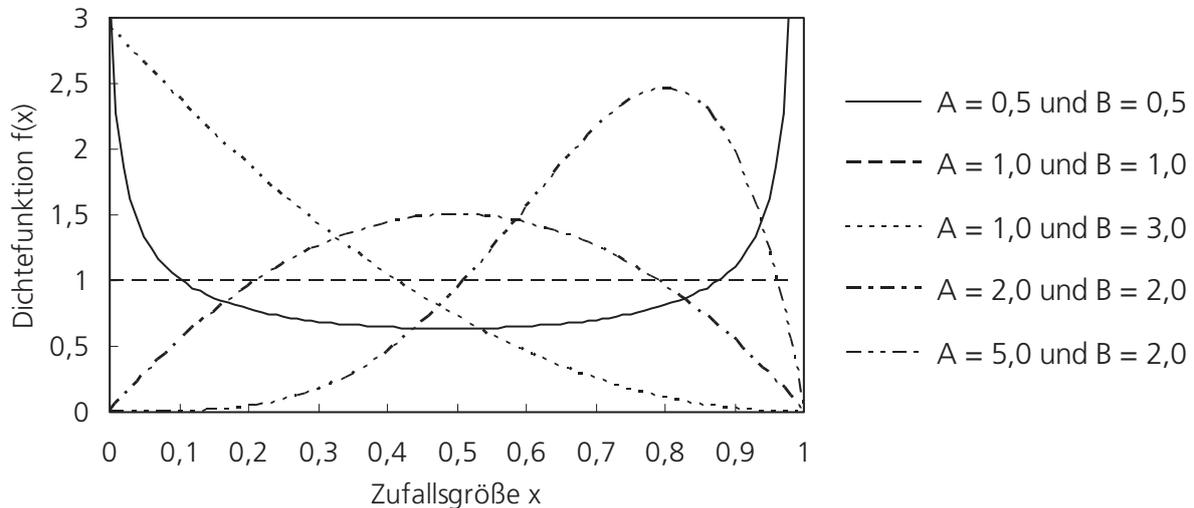


Abbildung 3.1: Dichtefunktion der Betaverteilung

Zwischen der Multinomial- und Betaverteilung lässt sich ein Zusammenhang herstellen, der in Kapitel 3.1.5.2 im Zuge der Auseinandersetzung mit Ranggrößenverteilungen näher ausgeführt wird (Bunke 1960).

### 3.1.2.4 Weibullverteilung

Mit Hilfe der Weibullverteilung lassen sich unterschiedliche Ausfallarten durch geeignete Wahl des Formparameters  $b$  darstellen. Aufgrund dieser Eigenschaft genießt die Weibullverteilung weite Verbreitung in den Ingenieurwissenschaften.

Die Dichtefunktion der dreiparametrischen Weibullverteilung (siehe Abbildung 3.1) ist definiert als:

$$f(t) = \frac{b}{(T-t_0)} \left( \frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^{b-1} e^{-\left( \frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^b} \quad t \geq t_0 \geq 0, T > t_0, b > 0. \quad (3.12)$$

Für die Verteilungsfunktion gilt:

$$F(t) = 1 - e^{-\left( \frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^b}. \quad (3.13)$$

Die dreiparametrische Weibullverteilung geht in die zweiparametrische Weibullverteilung über, sofern keine ausfallfreie Zeit vorliegt und somit  $t_0 = 0$  gilt. Existiert eine ausfallfreie Zeit  $t_0$ , wird die Verteilung in Richtung positiver Zeitachse verschoben. Die Lage der Verteilung wird über die charakteristische Lebensdauer  $T$  festgelegt, zu deren Zeitpunkt eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2% vorliegt. Der Formparameter  $b$  wiederum bestimmt den Kurvenverlauf der Verteilungsfunktion und gibt Aufschluss über den zugrunde liegenden Ausfallmechanismus (vgl. Kapitel 3.1.3).

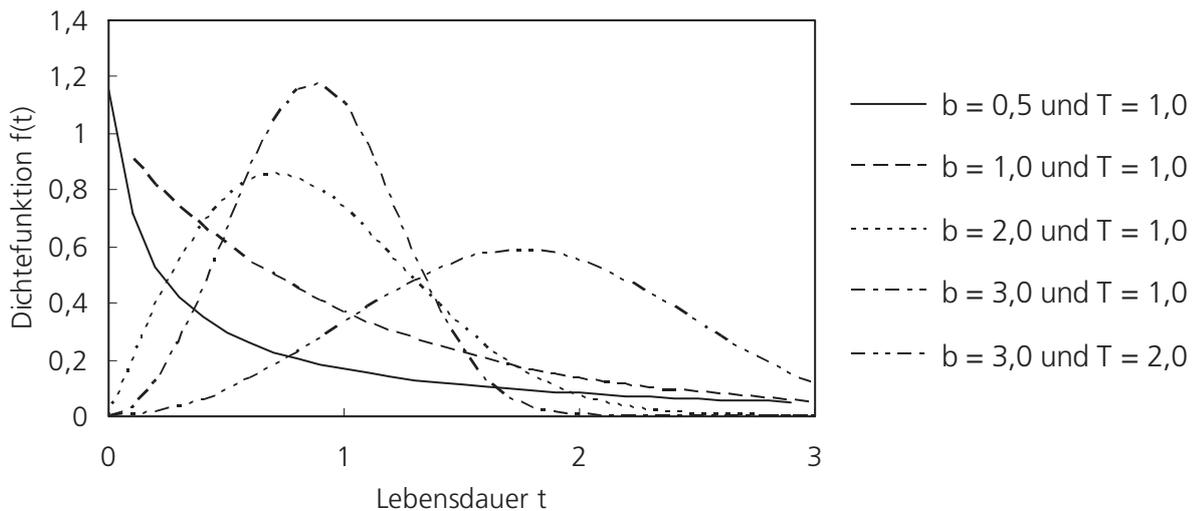


Abbildung 3.2: Dichtefunktion der Weibullverteilung

Die Weibullverteilung ist für den Fall  $b = 1$  der Exponentialverteilung gleichzusetzen, die wiederum eine konstante Ausfallrate  $z(t)$  charakterisiert.

### 3.1.3 Ausfallarten und Ausfallmechanismen

Bei einem Ausfall handelt es sich nach DIN 40041 um die „Beendigung der Funktionsfähigkeit einer materiellen Einheit im Rahmen der zugelassenen Beanspruchung“. Nach DIN 25424 Teil 1 „entsteht der Ausfall einer technischen Betrachtungseinheit, wenn die zulässige Abweichung von einem Leistungsziel dieser technischen Einheit überschritten wird“. An gleicher Stelle wird eine Unterscheidung hinsichtlich der Ausfallarten durchgeführt. Demnach handelt es sich bei einem Ausfall bei zulässigen Einsatzbedingungen einer Komponente um einen Primärausfall, bei unzulässigen Einsatzbedingungen um einen Sekundärausfall. Ein kommandierter Ausfall liegt vor, wenn ein Ausfall trotz funktionsfähiger Komponente infolge einer falschen oder fehlenden Anregung oder wegen des Ausfalls einer Hilfsquelle auftritt.

Das primäre Ausfallverhalten eines technischen Systems folgt in der Regel einem typischen Verlauf, der im Zusammenhang mit der eingesetzten Technologie, dem Zeitpunkt im Lebenszyklus und den Betriebs- und Umgebungsbedingungen steht. Das wohl bekannteste Modell zur Beschreibung des Ausfallverhaltens mechanischer Systeme ist die so genannte Badewannenkurve (siehe Abbildung 3.3). Der Lebenszyklus einer Komponente wird in diesem Modell in drei Phasen unterteilt, wobei die Charakterisierung der einzelnen Phasen über die jeweilige Ausfallrate erfolgt (VDA 2000, Schwarz et al. 2002, Meyer 2003).

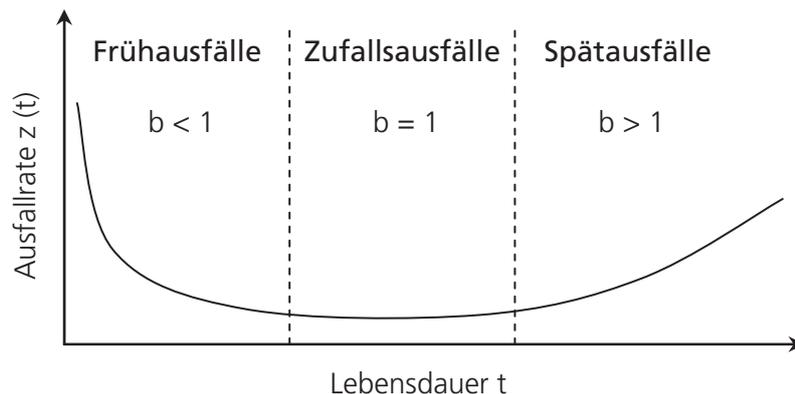


Abbildung 3.3: Beschreibung des Ausfallverhaltens mechanischer Systeme (VDA 2000)

Die Badewannenkurve lässt sich abschnittsweise mit Hilfe der Weibullverteilung über die Variation des Formparameters  $b$  beschreiben. Eine vollständige mathematische Formulierung ist durch die Überlagerung zweier Weibullverteilungen (Schwarz et al. 2002) oder über die Hjorthverteilung (Hjorth 1980) möglich.

Bezug nehmend auf das Drei-Phasen-Modell erfolgt eine Klassifizierung von Ausfällen im Hinblick auf den jeweils zugrunde liegenden Ausfallmechanismus (Schwarz et al. 2002).

### 3.1.3.1 Frühhausfälle

Schadensfälle der ersten Phase eines Lebenszyklus zählen zur Kategorie der Frühhausfälle. Eine rasch abnehmende Ausfallrate charakterisiert das Ausfallverhalten in diesem Zeitabschnitt. Frühhausfälle sind in der Regel auf Montagefehler, Fertigungsfehler, gravierende Konstruktionsfehler oder Materialmängel zurückzuführen. Doch auch eine unzulässige Ingebrauchnahme, ein fehlerhafte Lagerung oder ein unsachgemäßer Transport können ursächlich für den Ausfall sein. Frühhausfälle werden über eine Weibullverteilung mit Formparameter  $b < 1$  dargestellt.

### 3.1.3.2 Zufallsausfälle

Zufallsausfälle kennzeichnen eine konstante Ausfallrate und ein geringes Ausfallrisiko. Während des Betriebs eines Systems muss jederzeit mit ihnen gerechnet werden, die Auftretswahrscheinlichkeit ist jedoch in der Regel gering. Da im mittleren Lebenszyklus eines Systems keine Überlagerung mit Früh- oder Spätausfällen vorliegt, zeigt der mittlere Abschnitt der Badewannenkurve die charakteristische konstante Ausfallrate. Zufallsausfälle werden durch Bedienungs- oder Wartungsfehler ausgelöst. Missbräuchlicher Einsatz oder Verschmutzung können ebenfalls ursächlich für das Bauteilversagen sein. In der Regel wird Elektronikkomponenten ein konstantes Ausfallverhalten unterstellt, da Ausfälle während der Inbetriebnahme und Verschleißeffekte nur eine untergeordnete Rolle spielen. Zur Beschreibung von Zufallsausfällen ist die Exponentialverteilung geeignet. Sie entspricht einer Weibullverteilung mit Formparameter  $b = 1$ .

### 3.1.3.3 Spätausfälle

Typische Spätausfälle sind Verschleiß- und Ermüdungsausfälle, die erst mit fortgeschrittener Nutzungszeit eines Bauteils auftreten. Die Ausfallrate steigt in dieser Phase des Lebenszyklus kontinuierlich an. Spätausfälle werden insbesondere durch Alterung, Korrosion, Dauerbruch oder sonstige Ermüdungserscheinungen ausgelöst. Eine Weibullverteilung mit Formparameter  $b > 1$  repräsentiert eine Ausfallverteilungsfunktion für Spätausfälle.

## 3.1.4 Planung von Lebensdauerversuchen

Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit eines Systems werden Lebensdauerversuche mit einer begrenzten Anzahl an Erprobungsträgern durchgeführt. Hierzu wird das System unter den zu erwartenden Einsatzbedingungen betrieben, um die identischen Ausfallmechanismen des realen Gebrauchs auszulösen. Eine Raffung der Erprobung ermöglicht dabei, in kurzer Zeit eine Aussage über das Ausfallverhalten des Systems treffen zu können. Sie ist gleichwohl nur dann zulässig, wenn die höhere Belastung die zugrunde liegenden Ausfallmechanismen nicht beeinflusst. Das Ziel von Lebensdauerversuchen ist es, über die Bestimmung der Ausfallcharakteristik einer Stichprobe auf die Zuverlässigkeit einer Grundgesamtheit zu schließen.

### 3.1.4.1 Aussagewahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit

Wird ein Lebensdauerversuch mit mehreren Stichproben wiederholt, treten aufgrund der Bauteilstreuung in der Regel keine identischen Ausfallzeiten auf. Der Schluss von einer ein-

zigen Stichprobe auf eine Grundgesamtheit ist folglich stets mit einer Unsicherheit behaftet. Mit Hilfe der Aussagewahrscheinlichkeit  $P_A$  (siehe Abbildung 3.4) kann dieser Unsicherheit Ausdruck verliehen werden. Sie ist als Integral der Zuverlässigkeitsdichte innerhalb der Grenzen der Mindestzuverlässigkeit  $R_{\min}$  und eins definiert

$$P_A = \int_{R_{\min}}^1 f(R) dR \quad (3.14)$$

und beschreibt das Vertrauensniveau, mit dem eine Zuverlässigkeitsanforderung nachgewiesen werden soll (Bertsche und Lechner 2004).

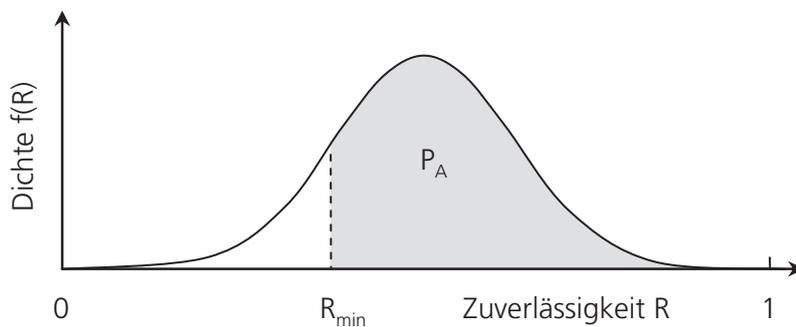


Abbildung 3.4: Aussagewahrscheinlichkeit  $P_A$  in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit  $R$  (Krolo 2004)

Drückt man den Zusammenhang zwischen der Aussagewahrscheinlichkeit  $P_A$  und Zuverlässigkeit über eine Binomialverteilung aus, so gilt unter der Einbeziehung der Stichprobengröße  $n$  und der Anzahl an Ausfällen  $x$ :

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} R(t)^{n-i} (1 - R(t))^i. \quad (3.15)$$

Im Fall einer Erprobungsdurchführung ohne das Auftreten von Ausfällen, dem so genannten Success Run, vereinfacht sich Gleichung (3.15) zu:

$$P_A = 1 - R(t)^n. \quad (3.16)$$

Durch die Umstellung nach  $R(t)$  folgt

$$R(t) = (1 - P_A)^{\frac{1}{n}} \quad (3.17)$$

als Standardbeziehung des VDA zur Berechnung der Zuverlässigkeit (VDA 2000).

### 3.1.4.2 Erprobung mit abweichender Prüfzeit

Eine Erhöhung bzw. Reduzierung der Prüfzeit wirkt sich unmittelbar auf den erforderlichen Stichprobenumfang für einen Lebensdauerversuch aus. Unterstellt man als Lebensdauer- verteilung die zweiparametrische Weibullverteilung, so folgt für die Zuverlässigkeit:

$$R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (3.18)$$

Weicht jedoch die Prüfzeit  $t_p$  von der geforderten Lebensdauer  $t$  ab, so gilt analog für die Überlebenswahrscheinlichkeit:

$$R(t_p) = 1 - e^{-\left(\frac{t_p}{T}\right)^b} \quad (3.19)$$

Über das Verhältnis der beiden Verteilungen

$$\frac{\ln R(t_p)}{\ln R(t)} = \left(\frac{t_p}{t}\right)^b = L_v^b \quad (3.20)$$

erhält man das so genannte Lebensdauer- verhältnis

$$L_v = \frac{t_p}{t} \quad (3.21)$$

Für die Überlebenswahrscheinlichkeit gilt nun unter Einbeziehung des Lebensdauer- verhältnisses der nachfolgende Zusammenhang:

$$R(t) = (1 - P_A)^{\frac{1}{L_v^b n}} \quad (3.22)$$

Eine Reduzierung der Prüfzeit bedingt somit bei konstanter Überlebens- und Aussagewahr- scheinlichkeit eine Erhöhung des Stichprobenumfangs und umgekehrt.

Die Aussagewahrscheinlichkeit wiederum lässt sich allgemeingültig über

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} R(t)^{L_v^b (n-i)} \left(1 - (t)^{L_v^b}\right)^i \quad (3.23)$$

bzw. für den Success Run wie folgt bestimmen:

$$P_A = 1 - R(t)^{L_v^b n}. \quad (3.24)$$

In Abbildung 3.5 ist unter Berücksichtigung einer konstanten Aussagewahrscheinlichkeit von  $P_A = 90\%$  und einem konstanten Weibullparameter  $b = 2,0$  die Zuverlässigkeit  $R$  in Abhängigkeit des Lebensdauerverhältnisses  $L_v$  dargestellt. Der Zusammenhang wird dabei über Gleichung (3.24) hergestellt. Es zeigt sich, dass die Prüfzeit  $t_p$  einen weitaus größeren Einfluss auf das nachgewiesene Zuverlässigkeitsniveau ausübt als die Anzahl an Erprobungsträgern  $n$ .

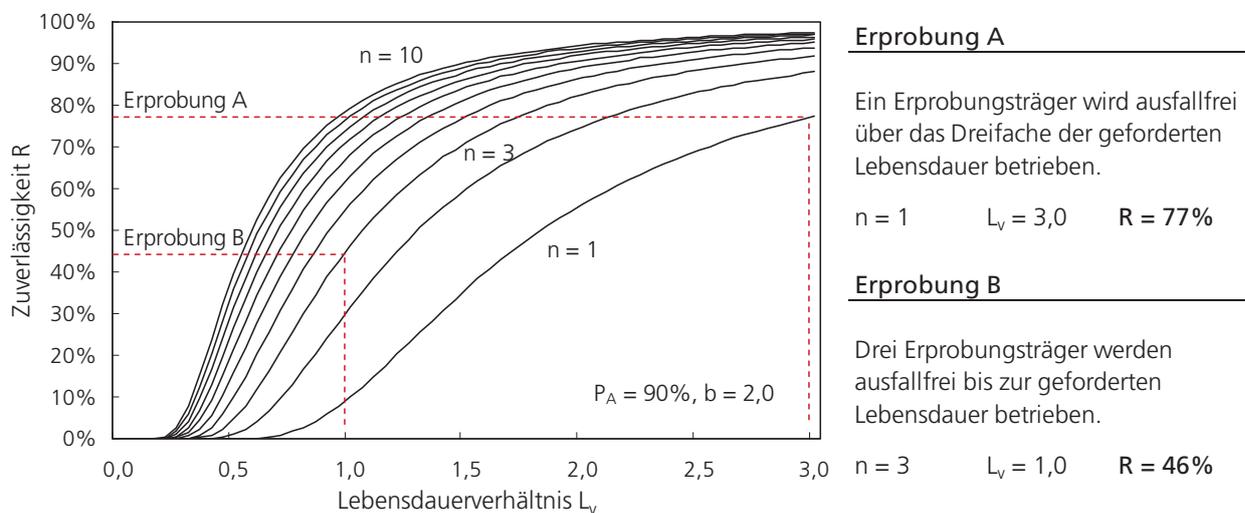


Abbildung 3.5: Zuverlässigkeit  $R$  in Abhängigkeit des Lebensdauerverhältnisses  $L_v$  für unterschiedliche Stichprobengrößen  $n$  (VDA 2000)

### 3.1.4.3 Zeittraffende Erprobung

Entspricht die Dauer eines Erprobungslaufs  $t_p$  nicht der abzusichernden Lebensdauer  $t$  eines Bauteils und wird darüber hinaus das Bauteil einer höheren Beanspruchung als im Kundenbetrieb ausgesetzt, handelt es sich um einen zeittraffenden Lebensdauertest. Über den Raf-fungsfaktor  $r$  wird hierbei unter der Voraussetzung eines weibullverteilten Ausfallverhaltens die Relation der charakteristischen Lebensdauer der Komponente unter normaler Betriebsbeanspruchung  $T_f$  im Feld und der charakteristischen Lebensdauer bei erhöhter Prüfbeanspruchung  $T_p$  im Versuch beschrieben (Hitziger 2007):

$$r = \frac{T_f}{T_p}. \quad (3.25)$$

Um die gewonnenen Erkenntnisse auf das Feldverhalten der Komponente übertragen zu können, müssen die Ausfallmechanismen im Versuch und unter realen Bedingungen übereinstimmen. In diesem Fall werden der Weibullverteilung identische Parameter unterstellt und es folgt allgemein für die Aussagewahrscheinlichkeit unter Einbeziehung des Lebensdauerverhältnisses

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} R(t)^{(rL_v)^b (n-i)} \left(1 - (t)^{(rL_v)^b}\right)^i \quad (3.26)$$

und für einen Erprobungslauf ohne Ausfälle

$$P_A = 1 - R(t)^{(rL_v)^b n} \quad (3.27)$$

#### 3.1.4.4 Erprobung unter abweichenden Umgebungsbedingungen

Die Annahme identischer Formparameter der Weibullverteilung kann trotz identischer Ausfallmechanismen in der Erprobung und unter realen Bedingungen fehlerbehaftet sein. Da bei geringen äußeren Belastungen in der Regel eine größere Streuung der Lebensdauer eintritt, berechnet sich in diesem Fall ein geringerer Formparameter als bei höheren Belastungen (Krolo 2004). Wird ein unterschiedlicher Formparameter  $b_p$  unter Prüfbedingungen miteinbezogen, so ergibt sich die Aussagewahrscheinlichkeit

$$P_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} R(t)^{L_v^{b_p} r^{b_p} (n-i)} \left(1 - (t)^{L_v^{b_p} r^{b_p}}\right)^i \quad (3.28)$$

bzw. vereinfacht im Falle des Success Run

$$P_A = 1 - R(t)^{L_v^{b_p} r^{b_p} n} \quad (3.29)$$

In die Gleichungen (3.27) und (3.29) fließt jeweils der Median der Weibullverteilung ein, sodass eine Aussagewahrscheinlichkeit von  $P_A = 50\%$  zugrunde liegt. Die Vertrauensgrenzen im Weibullnetz sind jedoch nichtlinear, sodass der Zusammenhang für Aussagewahrscheinlichkeiten ungleich 50% für kleine Stichprobenumfänge formal fehlerbehaftet ist. Mit steigendem Stichprobenumfang  $n$  wird der Vertrauensbereich im Weibullnetz jedoch immer kleiner, sodass die Unschärfe für  $n > 50$  vernachlässigt werden kann (Bertsche und Lechner 2004).

Eine mathematisch vollständig korrekte Beschreibung liefert die Betaverteilung (vgl. Kapitel 3.1.5.5), die in Abhängigkeit von der Ausfallzeit im Gegensatz zur Binomialverteilung unterschiedliche Formen besitzt (Krolo 2004).

### 3.1.5 Auswertung und Zusammenführung von Testergebnissen

Nachdem gezeigt wurde, wie in einen Zuverlässigkeitsnachweis unterschiedliche Versuchsbedingungen mit einbezogen werden können, gilt es nun der Zielsetzung nachzugehen, eine Gesamtaussage aus mehreren Erprobungsdurchführungen abzuleiten. Grundvoraussetzung ist hierbei das Erlangen eines Verständnisses über die Bestimmung von Ausfallverteilungen und die Einbeziehung des Bayes-Theorems.

#### 3.1.5.1 Zensierung

Bei der Auswertung von Lebensdauerversuchen liegen in der Regel nicht für alle Bauteile Lebensdauerwerte vor. Dies ist dadurch zu erklären, dass in der Regel nur eine begrenzte Anzahl an Objekten einer Stichprobe bis zum Ausfall betrieben wird. Die Zuverlässigkeitsanalyse kann sich somit lediglich auf unvollständige bzw. zensierte Daten beziehen. Denn nur sofern ein Erprobungslauf bzw. Prüfstandsversuchs bis zum Ausfall aller Testobjekte durchgeführt wird, liegt eine unzensierte Stichprobe vor. Wird hingegen die Erprobung nach dem Erreichen einer bestimmten Zeit oder Laufleistung abgeschlossen, ohne dass alle Testobjekte ausgefallen sind, handelt es sich um eine Typ-1-Zensierung. Die Zufallsvariable ist in diesem Fall die Anzahl der Ausfälle. Eine Typ-2-Zensierung liegt immer dann vor, wenn die Erprobung nach einer festgelegten Anzahl an Ausfällen abgebrochen wird, wiederum ohne dass der Ausfall aller Testobjekte zu verzeichnen ist. Der Ausfallzeitpunkt des  $i$ -ten Ausfalls und die Gesamtversuchsdauer unterliegen hier dem Zufall (VDA 2000). Die Zuverlässigkeitsberechnung erfolgt bei unzensierten Daten bzw. bei Zensierung des Typs 1 und Typs 2 über das in Kapitel 3.1.5.2 beschriebene Medianverfahren.

Werden Testobjekte zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor ihrem Ausfall aus der Stichprobe entnommen, handelt es sich um eine mehrfache oder zufällige Zensierung. Zur Ermittlung der Zuverlässigkeit werden bei mehrfach zensierten Stichproben die Sudden-Death-, Dauer-Shift- oder Nelson-Methode eingesetzt (Nelson 2004; VDA 2000), auf die an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen wird.

### 3.1.5.2 Medianverfahren

Lebensdauerversuche liefern Angaben über Ausfallzeiten bzw. zurückgelegte Laufleistungen bis zum Ausfall einer Komponente. Es liegen dabei jedoch keine Informationen über die Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t)$  zu den jeweiligen Ausfallzeitpunkten vor, sodass die Bestimmung einer Ausfallverteilung ohne weitere Annahmen nicht möglich ist. Voraussetzung für die Analyse des Ausfallverhaltens ist deshalb eine Auseinandersetzung mit der Verteilung von Ranggrößen.

Liegen  $n$  Lebensdauerwerte einer Stichprobe in zeitlich aufsteigender Reihenfolge vor, so bezeichnet deren Index die Ranggröße  $i$ . Da nach dem ersten Schadensfall der Anteil  $1/n$  der Stichprobe ausgefallen ist, lässt sich dem Lebensdauerwert  $t_1$  mit der Ranggröße 1 die Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t_1) = 1/n$  zuordnen, für die Ranggröße 2 gilt  $F(t_2) = 2/n$ , usw. Das Ausfallverhalten kann so über eine empirische Verteilungsfunktion angenähert werden. Zieht man nun mehrere Ausfallzeiten aus  $m$  unterschiedlichen Stichproben mit Umfang  $n$  heran, wird die Ranggröße zur Zufallsvariablen, die sich über die Dichtefunktion einer Trinomialverteilung, einer speziellen Multinomialverteilung, beschreiben lässt (Bertsche und Lechner 2004):

$$\varphi(t_i) = \frac{n!}{(i-1)!1!(n-i)!} F(t_i)^{i-1} f(t_i) [1 - F(t_i)]^{n-i} \quad (3.30)$$

Abbildung 3.6 zeigt die Schwankungen des Ausfallzeitpunktes einer Ranggröße innerhalb einer Stichprobe bei der Durchführung mehrerer Versuche.

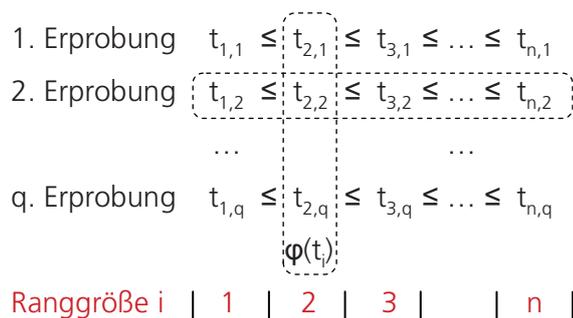


Abbildung 3.6: Streuung der Ausfallzeitpunkte einer Ranggröße (VDA 2000)

Die Dichtefunktion  $f(t_i)$  bzw. die Ausfallwahrscheinlichkeit  $F(t_i)$  der Ausgangsverteilung ist zum Zeitpunkt  $t_i$  jedoch nicht bekannt, sie soll vielmehr bestimmt werden.

Über die Transformation

$$F(t_i) = F(x) = x \quad 0 < x < 1 \quad (3.31)$$

$$f(x) = 1 \quad 0 < x < 1 \quad (3.32)$$

wird vereinfachend eine konstante Dichtefunktion unterstellt, sodass jede Ranggröße als gleichwertig anzusehen ist. Aus der Transformation resultiert als Dichtefunktion für die Ausfallwahrscheinlichkeit der Ranggrößen:

$$\varphi_n(x) = \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} x^{i-1} (1-x)^{n-i} \quad (3.33)$$

Zwischen der in Kapitel 3.1.2.2 eingeführten Betafunktion und der Gammafunktion

$$\Gamma(A) = \int_0^{\infty} t^{A-1} e^{-t} dt \quad x \in (0, \infty) \quad (3.34)$$

lässt sich der Zusammenhang

$$B(A, B) = \frac{\Gamma(A)\Gamma(B)}{\Gamma(A+B)} \quad (3.35)$$

herstellen. Über die Beziehungen

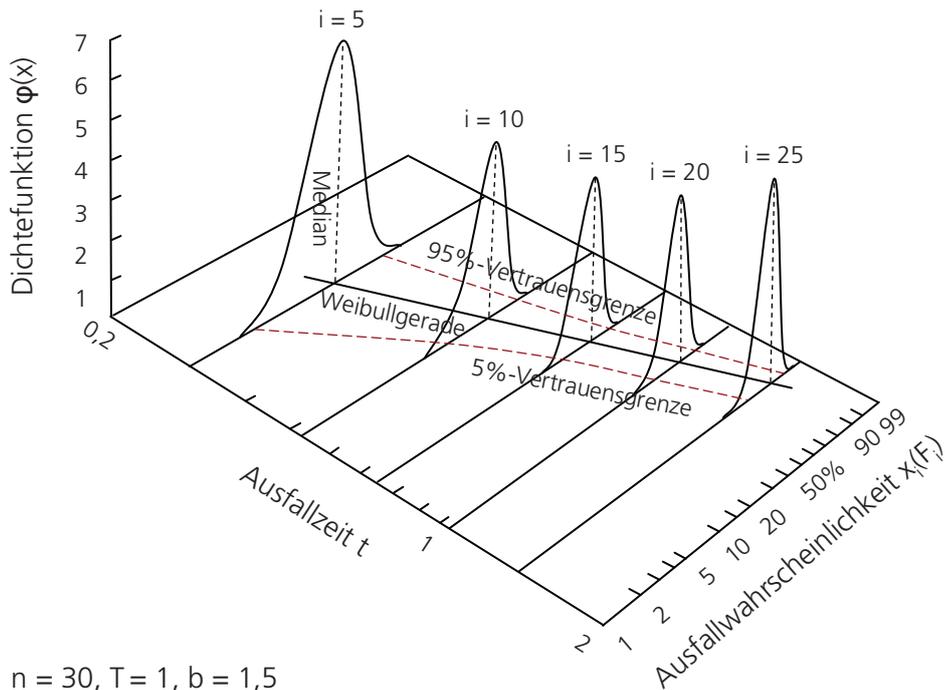
$$\Gamma(n) = (n-1)! \quad (3.36)$$

als Verallgemeinerung der Fakultät für ganzzahlige  $n > 0$  und

$$\Gamma(n+1) = n \Gamma(n) \quad (3.37)$$

für beliebige  $n$  kann die Dichte der Ranggrößenverteilung mit den Parametern  $i$  und  $n$  auch über die Dichte einer Betafunktion (siehe Abbildung 3.7) mit den Parametern  $A_R = i$  und  $B_R = n - i + 1$  beschrieben werden (Bunke 1960):

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \frac{n!}{(i-1)!(n-i)!} x^{i-1} (1-x)^{n-i} = \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(i)\Gamma(n-i+1)} x^{i-1} (1-x)^{n-i} \\ &= \frac{1}{B(i, n-i+1)} x^{i-1} (1-x)^{n-i} \end{aligned} \quad (3.38)$$



$n = 30, T = 1, b = 1,5$

Abbildung 3.7: Betadichtefunktion für unterschiedliche Ranggrößen (VDA 2000)

Die Zuverlässigkeit des Bauteils  $F(t)$  entspricht gemäß der Gleichung (3.31) der Betavariablen  $x$ . Da jedem Ausfallzeitpunkt eine eindeutige Ausfallwahrscheinlichkeit zugeordnet werden soll, wird eine charakteristische Eigenschaft der Dichtefunktion der Ranggrößen wie arithmetischer Mittelwert, Median oder Modalwert benötigt. In der Zuverlässigkeitstheorie erfolgt üblicherweise die Berechnung des Medians der Dichtefunktion, der für die Betaverteilung über die nachfolgende Gleichung approximiert werden kann (Bertsche und Lechner 2004):

$$F(t_i) = x_{med} \approx \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \tag{3.39}$$

Wird über diese Näherung für jeden Ausfallzeitpunkt eine Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet, lässt sich die Ausfallverteilung des Bauteils durch Eintragung der Punkte in ein Weibullwahrscheinlichkeitsnetz oder über eine Funktionsapproximation bestimmen.

### 3.1.5.3 Anwendung des Bayes-Theorems

Neben den Ergebnissen eines Lebensdauerversuchs liegen in der Praxis häufig weitere Informationen zur untersuchten Einheit vor, die ebenfalls zur Zuverlässigkeitsbestimmung herangezogen werden können. Durch Berücksichtigung dieser Vorkenntnisse besteht die Möglichkeit, die Zuverlässigkeitsanalyse eines Bauteils zu präzisieren oder die Stichproben-

größe einer Versuchsreihe zu reduzieren. Die zusätzlichen Informationen können dabei aus Vorversuchen stammen, sich aus Zuverlässigkeitsstatistiken technisch artverwandter Produkte ableiten oder auf subjektivem Expertenwissen beruhen. Die Integration dieser verschiedenen Erfahrungsquellen ist dabei im Rahmen eines erweiterten Wahrscheinlichkeitskonzeptes über den Bayesschen Ansatz möglich (Mock 1994).

Ein Ereignisraum  $\Omega$  sei in  $n$  disjunkte Ereignisse  $B_1, B_2, \dots, B_n$  zerlegbar. Die Wahrscheinlichkeit eines beliebigen Ereignisses  $A$  lässt sich dann über den Satz der totalen Wahrscheinlichkeit zu

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A \cap B_i) = \sum_{i=1}^n P(B_i) \cdot P(A|B_i) \quad (3.40)$$

bestimmen. Aus dem Multiplikationssatz der Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Eintreffen zweier abhängiger Ereignisse

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B|A) = P(B) \cdot P(A|B) \quad (3.41)$$

und dem Satz der totalen Wahrscheinlichkeit folgt der Satz von Bayes (Bayes 1763):

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} = \frac{P(B) \cdot P(A|B)}{\sum_{i=1}^n P(B_i) \cdot P(A|B_i)}. \quad (3.42)$$

Das Bayes-Theorem beschreibt die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses  $B$  unter der Voraussetzung, dass das Ereignis  $A$  ebenfalls eingetreten ist.

Wird nun die Zielsetzung verfolgt, bereits vorliegende Informationen mit neu gewonnenen Testergebnissen zu verknüpfen, gilt es die jeweiligen Ausfallwahrscheinlichkeitsdichten zusammenzuführen. Die so genannte a priori-Dichtefunktion  $f(R)$  beschreibt dabei die bereits bekannten Informationen, während alle neuen Testergebnisse in dem Likelihood-Ausdruck  $f(x|R)$  erfasst sind. Aus der Verknüpfung dieser Funktionen über den Satz von Bayes folgt die a posteriori-Dichtefunktion  $f(R|x)$  (siehe Abbildung 3.8):

$$f(R|x) = \frac{f(x|R) \cdot f(R)}{\int_0^1 f(x|R) \cdot f(R) dR}. \quad (3.43)$$

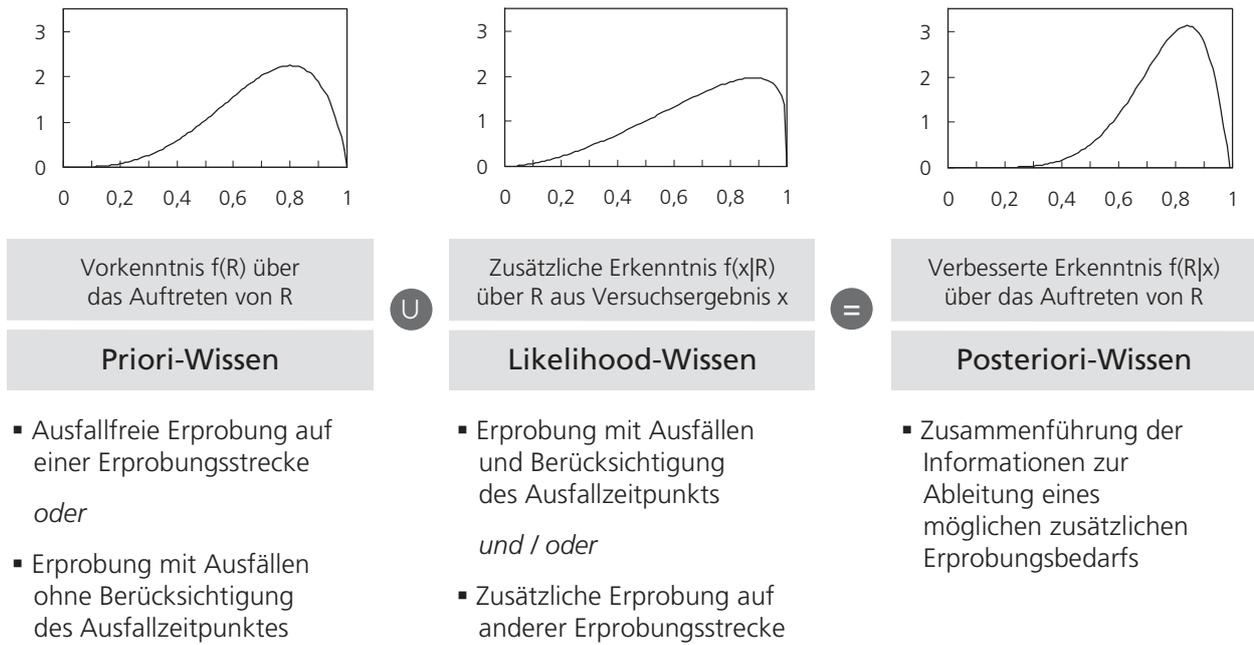


Abbildung 3.8: Bestimmung einer a posteriori-Dichtefunktion über den Satz von Bayes

### 3.1.5.4 Zusammenführung unterschiedlicher Ausfallverteilungsfunktionen

Für die a priori-Dichtefunktion und den Likelihood-Ausdruck können unterschiedliche Annahmen getroffen werden. Unterstellt man den neu gewonnenen Testergebnissen ein binomialverteiltes Ausfallverhalten, so gilt:

$$f(x|R) = \binom{n}{x} R^{n-x} (1-R)^x. \quad (3.44)$$

Wird als a priori-Dichtefunktion die nachfolgende Betadichtefunktion mit den Parametern  $A_0$  und  $B_0$  gewählt

$$f(R) = \frac{1}{B(A_0, B_0)} R^{A_0-1} (1-R)^{B_0-1}, \quad (3.45)$$

bestimmt sich das Integral im Nenner der bedingten Wahrscheinlichkeit über

$$\begin{aligned}
\int_0^1 f(x|R) \cdot f(R) dR &= \int_0^1 \binom{n}{x} R^{n-x} (1-R)^x \frac{1}{B(A_0, B_0)} R^{A_0-1} (1-R)^{B_0-1} dR \\
&= \binom{n}{x} \frac{1}{B(A_0, B_0)} \int_0^1 R^{A_0-1+n-x} (1-R)^{B_0-1+x} dR \\
&= \binom{n}{x} \frac{B(A_0+n-x, B_0+x)}{B(A_0, B_0)}
\end{aligned} \tag{3.46}$$

und es folgt als a posteriori-Dichtefunktion erneut eine Betadichtefunktion:

$$f(R|x) = \frac{\binom{n}{x} R^{n-x} (1-R)^x R^{A_0-1} (1-R)^{B_0-1} / B(A_0, B_0)}{\binom{n}{x} B(A_0+n-x, B_0+x) / B(A_0, B_0)} = \frac{R^{A_0-1+n-x} (1-R)^{B_0-1+x}}{B(A_0+n-x, B_0+x)}. \tag{3.47}$$

Zwischen den Parametern A und B der a posteriori-Dichtefunktion und den mit Index 0 gekennzeichneten Parametern  $A_0$  und  $B_0$  der a priori-Dichtefunktion existiert somit der folgende Zusammenhang:

$$A = A_0 + n - x, \tag{3.48}$$

$$B = B_0 + x. \tag{3.49}$$

Die Aussagewahrscheinlichkeit berechnet sich schließlich über die Integration der a posteriori-Dichtefunktion im Intervall der geforderten Mindestzuverlässigkeit  $R(t)$  bis eins (Krolo 2004):

$$P_A = \int_{R(t)}^1 f(R|x) dR = \frac{\int_{R(t)}^1 f(x|R) f(R) dR}{\int_0^1 f(x|R) f(R) dR}. \tag{3.50}$$

### 3.1.5.5 Einbeziehung von Vorkenntnissen über die Betaverteilung

Zur Beschreibung des Ausfallverhaltens anhand einer Betaverteilung wird die Aussagewahrscheinlichkeit  $P_A$  über die Integration der Betadichtefunktion hergeleitet:

$$P_A = \int_{R(t)}^1 \frac{1}{B(A_0, B_0)} R^{A_0-1} (1-R)^{B_0-1} dR = \int_{R(t)}^1 \frac{1}{B(n-i+1, i)} R^{n-i} (1-R)^{i-1} dR. \tag{3.51}$$

Dabei besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Erprobungsbedingungen durch Anpassung der Ranggröße  $i$  mit einzubeziehen. Aus dem bereits bekannten Zusammenhang zwischen der Mindestzuverlässigkeit einer Betrachtungseinheit mit weibullverteilten Ausfallverhalten bis zu einer geforderten Lebensdauer und der Zuverlässigkeit einer gleichen Einheit im geforderten Lebensdauerversuch mit abweichender Prüfzeit und unter variierenden Umgebungsbedingungen

$$R(t) = R(t_p)_{L_v, b, r, b_p}^{\frac{1}{}} \quad (3.52)$$

sowie der Näherungsformel für den Median der Betaverteilung

$$x_{med} \approx \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (3.53)$$

folgt die gesuchte Berechnungsformel für die Ranggröße  $i$ :

$$i \approx \left( 1 - R_{med}(t_p)_{L_v, b, r, b_p}^{\frac{1}{}} \right) (n + 0,4) + 0,3 . \quad (3.54)$$

Die Zuverlässigkeit  $R_{med}(t_p)$  aus dem Vorversuch entspricht dabei dem Median, dem wiederum eine Aussagewahrscheinlichkeit von  $P_A = 50\%$  zugrunde liegt.

Die Parameter  $A_0$  und  $B_0$  der a priori-Dichtefunktion berechnen sich in Anlehnung an Gleichung (3.51) über

$$A_0 = n - i + 1, \quad (3.55)$$

$$B_0 = i . \quad (3.56)$$

Somit lassen sich bei der Beschreibung des Ausfallverhaltens über die Betaverteilung ebenso wie bei der Binomialverteilung unterschiedliche Erprobungsbedingungen berücksichtigen.

Werden bei Lebensdauerversuchen Vorkenntnisse in Form von Ausfallzeitpunkten genutzt, gilt es jedem einzelnen Ausfall eine eigene Verteilungsannahme zuzuordnen. Dies begründet sich dadurch, dass nahezu ausgeschlossen werden kann, mehrere Ausfälle zum gleichen Zeitpunkt zu beobachten. Es wird somit eine Stichprobengröße von  $n = 1$  unterstellt und die Ranggröße  $i'$  berechnet sich in Verbindung mit dem Median der Zuverlässigkeit  $R_{med}(t_a) = 0,5$  und dem Ausfallzeitpunkt  $t_a$  zu

$$i' \approx 1,4 \left( 1 - 0,5 \left( \frac{t_a}{t} \right)^b r^{b_p} \right) + 0,3 . \quad (3.57)$$

Im Falle mehrerer Betaverteilungen als a priori-Verteilungen bestimmen sich die Parameter der a posteriori-Verteilung unter Einbeziehung des Bayes-Theorems über (Krolo 2004):

$$A = \sum_{i=1}^p A_{0i} + n - x = \sum_{i=1}^p A_{0i} + n - (i - 1) \quad (3.58)$$

$$B = \sum_{i=1}^p (B_{0i} - 1) + x + 1 = \sum_{i=1}^p (B_{0i} - 1) + (i - 1) + 1 \quad (3.59)$$

Die Parameter  $A_0$  und  $B_0$  der a priori-Verteilungen können dabei verschiedene Einsatzarten widerspiegeln, deren Charakteristik in Gleichung (3.54) über unterschiedliche Lebensdauererhältnisse, Raffungsfaktoren und Formparameter einfließt. Oder es werden Ausfallzeiten in die Zuverlässigkeitsanalyse mit einbezogen, sodass mehrere a priori-Verteilungen für die funktionsfähigen Einheiten und jeden einzelnen Ausfallzeitpunkt in eine posteriori-Verteilung überführt werden. Mock stellt alternativ ein Schätzverfahren für die Eingangsparmeter  $A_0$  und  $B_0$  der a priori-Dichtefunktion bereit, das die Verknüpfung subjektiver Expertenkenntnisse mit der Zuverlässigkeitsanalyse ermöglicht (Mock 1994). Liegen aus dem Feld Überlebenswahrscheinlichkeiten technisch artverwandter Produkte vor, kann die Schätzung der Parameter der Betaverteilung auch anhand der Momenten-Methode durchgeführt werden (Beichelt 1995). Da sich Vorkenntnisse aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen jedoch nicht immer vollständig zur Zuverlässigkeitsanalyse des neuen Produktes heranziehen lassen, führt Krolo einen Transformationsfaktor zur Übertragbarkeit von Vorkenntnissen ein (Krolo 2004). Hitziger greift diesen Gedanken auf und entwickelt ein Verfahren zur Bestimmung des Transformationsfaktors auf Basis statistischer Anpassungstests (Hitziger 2007).

## 3.2 Grundlagen der Versuchsplanung

Jedes Produkt unterliegt während seiner Nutzung spezifischen Anwendungs- und Umgebungsbedingungen, die sich auf die Zuverlässigkeit des Produkts auswirken können. Nachdem zunächst gezeigt wurde, wie ein statistischer Zuverlässigkeitsnachweis geführt werden kann, gilt es nun der Fragestellung nachzugehen, wie sich die Einflüsse möglichst vieler Faktoren auf die Zuverlässigkeit einer Betrachtungseinheit überprüfen lassen.

### 3.2.1 Wirkungsprinzip und Grundbegriffe

Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung werden im klassischen Sinne die Einflussfaktoren und Wechselwirkungen auf eine Zielgröße bei einer Minimierung der Versuchsanzahl bestimmt. Um beispielsweise den Einfluss der Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Ausfallhäufigkeit einer Fahrzeugkomponente zu ermitteln, werden die beiden Einzelfaktoren jeweils unabhängig voneinander variiert und die Auswirkungen auf die Zielgröße erfasst. Diese Vorgehensweise hat jedoch eine Vielzahl an Einzelversuchen zur Folge.

Da Versuchsergebnisse in der Regel einer zufälligen Streuung unterliegen, ist eine gewisse Mindestanzahl an Einzelversuchen notwendig, um signifikante Aussagen aus den Erprobungsergebnissen ableiten zu können. Gesetzt den Fall, es seien 8 Versuche erforderlich, um einen Unterschied von 2 Standardabweichungen in den Versuchsergebnissen nachzuweisen. So müssen bei der Variation nur eines Faktors insgesamt  $3 \times 8 = 24$  Einzelversuche durchgeführt werden, um den Effekt eines Faktors zu bestimmen.

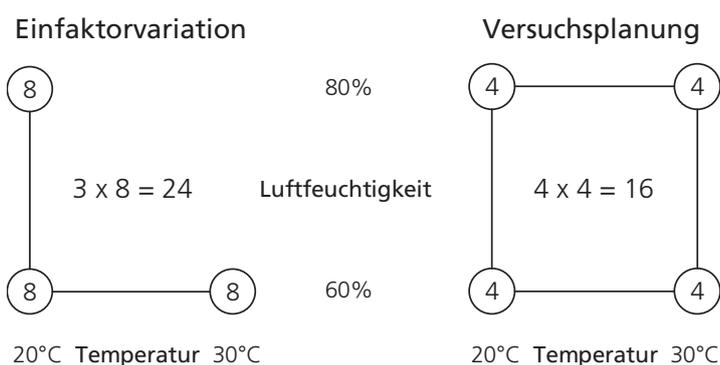


Abbildung 3.9: Einfaktorvariation gegenüber Versuchsplanung

Untersucht man stattdessen sämtliche Faktorkombinationen, so reduziert sich der Versuchsaufwand auf  $4 \times 4 = 16$  Einzelversuche (siehe Abbildung 3.9), wobei Einschränkungen durch mögliche Wechselwirkungen zwischen den Einzelfaktoren zu berücksichtigen

sind. Es liegen nach wie vor jeweils 8 Ergebnisse zur Berechnung des Einflusses der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit vor, sodass der statistische Aussagegehalt nicht berührt wird. Da keine Faktorkombination einer anderen vorgezogen wird, liegt eine ausgewogene Versuchsplanung vor.

Die Grundidee der statistischen Versuchsplanung, über ein sinnvoll ausgestaltetes Testdesign aus wenigen Versuchen ein Maximum an Erkenntnissen zu ziehen, findet sich in zahlreichen Versuchsplananordnungen wieder. Um den mathematischen Zusammenhang hinter diesen Versuchsplänen zu beleuchten, werden zunächst grundlegende Begriffe im Umfeld der Versuchsplanung erläutert (Kleppmann 2006).

<i>Steuergröße</i>	Einflussgröße, deren Wert festgelegt werden kann.
<i>Störgröße</i>	Einflussgröße, deren Wert nicht festgelegt werden kann.
<i>Effekt</i>	Maß für die Wirkung einer Einflussgröße.
<i>Wechselwirkung</i>	Unterschiedlicher Einfluss eines Faktors auf die Zielgröße bei Variation der anderen Faktoren.
<i>Orthogonalität</i>	Jeder Faktor kann beliebige Werte annehmen, ohne die Werteinstellungen der anderen Faktoren zu verändern. Somit sind die Faktoren unabhängig voneinander und der Korrelationskoeffizient ist gleich Null.
<i>Ausgewogenheit</i>	Keine Faktorenkombination erfährt eine stärkere Gewichtung im Versuchsplan als andere Faktorenkombinationen.
<i>Generator</i>	Faktorenkombinationen eines vollständig faktoriellen Versuchsplans, die die Auswahl der Faktorstufenkombinationen des fraktionellen faktoriellen Versuchsplanes festlegen.
<i>Auflösung</i>	Risikomaß für die Fehlinterpretation von Effekten aufgrund der Vermengung von Einflussfaktoren und Wechselwirkungen in teilfaktoriellen Versuchsplänen.
<i>Sättigung</i>	Über einen gesättigten Versuchsplan kann der Effekt einer Maximalzahl an Faktoren über eine Minimalzahl an Faktorstufenkombinationen innerhalb einer Auflösungsklasse bestimmt werden.

### 3.2.2 Vollständige und fraktionelle Versuchspläne

Wie eingangs gezeigt kann ein ausgewogener Versuchsplan allein durch eine systematische Faktorkombination mit einer geringeren Anzahl an Versuchen gegenüber der Einfaktorvariation realisiert werden. Ist es jedoch notwendig, die Versuchszahl weiter zu reduzieren, wird auf Versuchspläne zurückgegriffen, bei denen gezielt eine Vermengung der Effekte von Einzelfaktoren und Wechselwirkungen akzeptiert wird. Dies ist immer dann zu rechtfertigen, wenn Wechselwirkungen aufgrund des vorliegenden technischen Zusammenhangs von vorneherein ausgeschlossen werden können. Zur weiteren Vertiefung werden nachfolgend die Eigenschaften von vollständigen und fraktionellen Versuchsplänen diskutiert.

#### 3.2.2.1 Vollständige faktorielle Versuchspläne

Eine vollständige Ermittlung der Wechselwirkungen aller Einflussgrößen ist nur über einen vollfaktoriellen Versuchsplan möglich. Bei dieser Art von Versuchsplan wird jede Faktorstufenkombination gleich oft realisiert, sodass eine einfache Mittelwertberechnung der Versuchsergebnisse zur Bestimmung des Effektes eines Faktors durchgeführt werden kann. Dabei werden diejenigen Faktorstufenkombinationen herangezogen, die sich jeweils nur in einem bestimmten Faktor unterscheiden. Aus dem Mittelwert der Differenzen der Versuchsergebnisse folgt dann der Effekt des Faktors. Ist dieser größer als seine Zufallsstreuung, kann er als signifikant bezeichnet werden. Vollständige faktorielle Versuchspläne mit  $k$  Faktoren und  $n$  Faktorstufen werden in Anlehnung an die  $n^k$  möglichen Faktorstufenkombinationen als  $n^k$ -Pläne bezeichnet (siehe Tabelle 3.1 mit  $n = 2$  und  $k = 3$ ).

#### 3.2.2.2 Fraktionelle faktorielle Versuchspläne

Da bei vollfaktoriellen Versuchsplänen die Anzahl der möglichen Faktorstufenkombinationen mit wachsender Anzahl an Faktoren schnell ansteigt, ist über eine geeignete Reduzierung dieser Kombinationen und somit der Anzahl an Versuchsdurchführungen nachzudenken. Dabei kann davon profitiert werden, dass Wechselwirkungen mehrerer Faktoren in der Regel keine weiteren Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen zulassen und deshalb nicht zwangsläufig betrachtet werden müssen.

Ausgangspunkt sei ein vollständiger faktorieller  $2^3$ -Versuchsplan einschließlich Wechselwirkungen (siehe Tabelle 3.1).

Faktoren / Wechselwirkungen							
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

Tabelle 3.1: Vollständiger faktorieller  $2^3$ -Versuchsplan (Kleppmann 2006)

Ist die 3-Faktorwechselwirkung (3FWW) ABC zu vernachlässigen, kann anstelle dessen ein weiterer Faktor D eingeführt werden. Es folgt dadurch ein fraktioneller faktorieller oder teilfaktorieller  $2^{4-1}$ -Versuchsplan (siehe Tabelle 3.2), der die Hälfte aller möglichen Faktorstufenkombinationen eines vollständig faktoriellen  $2^4$ -Versuchsplans besitzt.

Faktoren				
	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	+	+	-	-
5	-	-	+	+
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	+

Tabelle 3.2: Fraktioneller faktorieller  $2^{4-1}$ -Versuchsplan (Kleppmann 2006)

Die Reduzierung hat zur Folge, dass nicht mehr alle Faktoren und Wechselwirkungen voneinander getrennt werden können. In Tabelle 3.3 wird ersichtlich, dass beispielsweise die Spalten A und BCD identisch sind. In diesem Zusammenhang wird von einer Vermengung von Faktor und Wechselwirkung gesprochen. Welche Faktorstufenkombinationen des vollfaktoriellen  $2^4$ - in den teilfaktoriellen  $2^{4-1}$ -Versuchsplan übernommen werden, ist über die Faktorstufe des Produktes ABCD festgelegt. ABCD wird deshalb auch als Generator des fraktionellen faktoriellen Versuchsplans bezeichnet.

Faktoren / Wechselwirkungen

	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
2	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
3	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
5	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Tabelle 3.3: Erweiterung des fraktionellen faktoriellen  $2^{4-1}$ -Versuchsplans um Wechselwirkungen (Kleppmann 2006)

Die Berechnung eines Effekts bei Versuchsplänen mit mehreren Faktoren erfolgt über das Summenprodukt aus den Mittelwerten der Versuchsergebnisse  $y_{i,m}$  und dem jeweils im Versuchsplan eingetragenen Vorzeichen  $v_i$ . Das Ergebnis wird dann durch die Anzahl der Paare, d. h. bei zwei zulässigen Faktorstufen allgemein durch  $m / 2$ , dividiert:

$$A = \frac{2}{m} \cdot \sum_{i=1}^m (v_i \cdot y_{i,m}). \tag{3.60}$$

Fraktionelle faktorielle Versuchspläne sind aufgrund der Vermengungseffekte mit Bedacht und unter Einbeziehung der Informationen über mögliche Wechselwirkungen auszuwählen. Der diskutierte fraktionelle faktorielle  $2^{4-1}$ -Versuchsplan eignet sich beispielsweise immer dann, wenn die 3-Faktorwechselwirkung zu vernachlässigen ist und einer der vier Faktoren keine 2-Faktorwechselwirkung mit anderen Faktoren besitzt.

Im Zuge einer allgemeinen Erweiterung auf einen  $2^{k-p}$ -Versuchsplan mit  $p$  zusätzlichen Faktoren, lassen sich stets  $1 / 2^p$  der insgesamt  $2^k - 1$  Effekte eines vollständigen Plans berechnen. Mit zunehmender Anzahl zusätzlicher Faktoren steigt jedoch auch das Risiko einer Fehlinterpretation aufgrund von Vermengungseffekten, die nicht allein durch technische Überlegungen entfaltet werden können. Als Risikomaß wird deshalb die Auflösung eines Versuchsplans eingeführt, die sich über die kleinste Faktorenanzahl der Generatoren zur Erzeugung des teilfaktoriellen Versuchsplans bestimmt (siehe Tabelle 3.4). Liegt beispielsweise ein  $2^{5-2}$ -Versuchsplan mit den Generatoren  $ABCD = ABE = CDE$  vor, so folgt für den Versuchsplan die Auflösung III.

m \ k	3	4	5	6	7	8	9	10
4	$2^{3-1}$ III							
8	$2^3$ vollst.	$2^{4-1}$ IV	$2^{5-2}$ III	$2^{6-3}$ III	$2^{7-4}$ III			
16		$2^4$ vollst.	$2^{5-1}$ V	$2^{6-2}$ IV	$2^{7-3}$ IV	$2^{8-4}$ IV	$2^{9-5}$ III	$2^{10-6}$ III
32			$2^5$ vollst.	$2^{6-1}$ VI	$2^{7-2}$ IV	$2^{8-3}$ IV	$2^{9-4}$ IV	$2^{10-5}$ IV
64				$2^6$ vollst.	$2^{7-1}$ VII	$2^{8-2}$ V	$2^{9-3}$ IV	$2^{10-4}$ IV
128					$2^7$ vollst.	$2^{8-1}$ VIII	$2^{9-2}$ VI	$2^{10-3}$ V

Tabelle 3.4: Maximale Auflösung eines Versuchsplans in Abhängigkeit der Anzahl der Faktoren k und der Faktorstufenkombinationen m (Kleppmann 2006)

Während Versuchspläne mit der Auflösung III als kritisch zu erachten sind, da Effekte von Einzelfaktoren mit 2-Faktorwechselwirkungen vermengt werden, nimmt das Risiko von falschen Schlussfolgerungen bei Versuchsplänen mit der Auflösung IV (Vermengung Einzelfaktor mit 3FWW sowie 2FWW mit 2FWW), der Auflösung V (Vermengung Einzelfaktor mit 4FWW sowie 2FWW mit 3FFW) und höher kontinuierlich ab.

Ein gesättigter Versuchsplan innerhalb einer spezifischen Auflösungsklasse liegt dann vor, wenn der Einfluss einer Maximalzahl an Faktoren über eine Minimalzahl an Faktorstufenkombinationen ermittelt werden kann. So lassen sich beispielsweise über einem gesättigten  $2^{7-4}$ -Versuchsplan mit lediglich acht Faktorstufenkombinationen sieben Faktoren untersuchen (Kleppmann 2006).

### 3.2.3 Mehrstufige Versuchspläne

Bei metrisch skalierten Faktoren ist es im Falle eines linearen Zusammenhangs zwischen Einflussfaktoren und Zielgröße ausreichend, jeweils zwei Faktorstufenausprägungen im Versuchsplan zu berücksichtigen, um deren Effekt zu berechnen. Anders stellt sich die Situation dar, wenn quadratische Zusammenhänge oder ordinal skalierte Faktoren vorliegen. In diesem Fall werden mehrstufige Versuchspläne eingesetzt.

### 3.2.3.1 D-optimale Versuchspläne

Im Zuge einer determinanten-optimalen Versuchsplanung wird anhand eines n-stufigen Versuchs der Einfluss von f unabhängigen Faktoren auf einen Zielgrößenvektor  $y$  untersucht. Dabei beschreibt die Matrix  $X$  mit n Zeilen und f Spalten die jeweils gewählten Faktorstufenausprägungen. Die nachfolgende Regressionsgleichung mit dem Vektor der Regressionskoeffizienten  $a$ , der Richtung und Größe der einzelnen Einflüsse angibt, und dem Fehlervektor  $e$  drückt diesen Zusammenhang aus:

$$y = Xa + e. \quad (3.61)$$

Eine Minimierung des Fehlers  $e$  durch die geeignete Wahl der Regressionsvektoren  $a$  ist erklärtes Ziel, um eine hohe Güte der Anpassung zu erreichen. Infolgedessen gilt es die Fehlerquadratsumme

$$S(a) = \sum_{n=1}^N e_n^2 = e^T e = (y - Xa)^T (y - Xa) = y^T y + a^T X^T X a - 2a^T X^T y^T \quad (3.62)$$

nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate zu minimieren. Als erste Ableitung von  $S(a)$  nach  $a$  folgt

$$\frac{\partial S(a)}{\partial a} = 2X^T X a - 2X^T y, \quad (3.63)$$

welche wiederum gleich Null zu setzen ist. Diese Bedingung ist erfüllt für:

$$a = (X^T X)^{-1} X^T y, \quad (3.64)$$

Um zu gewährleisten, dass der Ausdruck (3.64) die Fehlerquadratsumme minimiert, ist zu zeigen, dass die zweite Ableitung von  $S(a)$  nach  $a$  stets nicht negativ definiert ist:

$$\frac{\partial^2 S(a)}{\partial a^2} = 2X^T X. \quad (3.65)$$

Für die Varianz der einzelnen Regressionskoeffizienten  $a_i$  gilt

$$\text{Var}(a_i) = \sigma^2 \cdot c_{ii}, \quad (3.66)$$

wobei  $\sigma^2$  dem Fehler  $e$  und  $c_{ii}$  dem  $i$ -ten Diagonalelement von  $(X^T X)^{-1}$  entspricht. Die Maximierung der Determinante von  $X^T X$  hat somit eine Minimierung der Varianz der Koeffizienten zur Folge (Kiefer 1961, Dykstra 1971). Ein  $d$ -optimaler Versuchsplan berechnet sich entsprechend über:

$$\max |X^T X|. \quad (3.67)$$

Die  $d$ -optimale Versuchsplanung bietet den Vorteil, dass sich der zugrunde liegende Versuchsraum beliebig einschränken lässt und bestimmte Faktorstufenkombinationen von Beginn an ausgeschlossen werden können. Gleichzeitig ist die Anzahl an Versuchsdurchführungen und Faktorstufen frei wählbar und bereits vorliegende Versuchsanordnungen lassen sich bei einer neuen Versuchsplangenerierung berücksichtigen. Ein Nachteil besteht darin, dass  $d$ -optimale Versuchspläne im Gegensatz zu voll- und teilfaktoriellen Versuchsplänen in der Regel nicht orthogonal sind, d. h. die jeweiligen Einflussfaktoren besitzen untereinander eine mehr oder weniger ausgeprägte Korrelation (Gundlach 2004; Kleppmann 2006).

Ein Überblick über Algorithmen zur Bestimmung  $d$ -optimaler Versuchspläne findet sich bei Dennis Cook (Dennis Cook und Nachtsheim 1980). Hierbei seien insbesondere die sequentielle Methode nach Dykstra (Dykstra 1971) und die DETMAX-Methode (Mitchell 1974) genannt, die über das mehrfache Vertauschen möglicher Versuchseinstellungen eine Maximierung der Determinante von  $X^T X$  herbeiführen.

### 3.2.3.2 Bewertung eines $d$ -optimalen Versuchsplans

Die Güte eines  $d$ -optimalen Versuchsplans lässt sich anhand zweier Kennzahlen beurteilen. Das Maß der Orthogonalität einer Matrix drückt die so genannte Konditionszahl aus, die das Verhältnis des größten und kleinsten singulären Wertes der Matrix  $X^T X$  angibt. Vollfaktorielle und teilfaktorielle Versuchspläne weisen unter der Voraussetzung, dass keine Zentralkpunkte vorliegen, eine Konditionszahl von eins auf. Ist die Konditionszahl hingegen größer als eins, so ist die Matrix wie bei  $d$ -optimalen Versuchsplänen nicht mehr vollständig orthogonal (Otto 1997, Gundlach 2004).

Die normierte logarithmierte Determinante eignet sich hingegen zum gegenseitigen Vergleich von  $d$ -optimalen Versuchsplänen unterschiedlicher Dimension. Unter Berücksichtigung der Anzahl an Faktoren  $f$  und Versuchsdurchführung  $n$  folgt:

$$ND = \log \frac{|X^T X|^{\frac{1}{f}}}{n}. \quad (3.68)$$

Die normierte logarithmierte Determinante ist negativ und im Idealfall eines orthogonalen Versuchsplans gleich Null (Kolb 1996).

Fernerhin lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der zu berücksichtigten Faktoren und der Größe eines optimalen Versuchsumfangs herstellen. Hierbei sollte die Zahl an Versuchsdurchführungen ungefähr dem 1,5-fachen der Anzahl an Faktoren entsprechen (Gundlach 2004).

### 3.2.3.3 Screening-Versuchspläne für mehrstufige Faktoren

Als Alternative zur d-optimalen Versuchsplanung lassen sich Screening-Versuchspläne für mehrstufige Faktoren in die Überlegungen mit einbeziehen. Diese weisen zwar eine geringere Flexibilität hinsichtlich der Anzahl an Versuchsdurchführungen und der zu berücksichtigenden Faktorstufen auf und eignen sich aufgrund ihrer Auflösung III nicht zur Bestimmung von Wechselwirkungen. Gleichwohl sind die Versuchspläne derart aufgebaut, dass Haupteffekte nicht miteinander vermengt werden und alle Faktorstufenausprägungen in gleicher Häufigkeit zum Einsatz gelangen. Die Versuchsanordnung ist somit ausgewogen und die Gesamtzahl an Versuchsdurchführungen sehr gering.

		Faktoren			
		A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1	
2	-1	0	0	0	
3	-1	1	1	1	
4	0	-1	0	1	
5	0	0	1	-1	
6	0	1	-1	0	
7	1	-1	1	0	
8	1	0	-1	1	
9	1	1	0	-1	

Tabelle 3.5: Orthogonales Feld  $L_9(3^4)$  nach Taguchi (Kleppmann 2006)

Als Beispiel für einen Screening-Versuchsplan ist in Tabelle 3.5 das orthogonale Feld  $L_9(3^4)$  mit  $n = 9$  und  $k = 4$  nach Taguchi dargestellt, das in der Literatur auch im Zusammenhang mit griechisch-lateinischen Quadraten diskutiert wird (Montgomery 2001, Kleppmann 2006). Orthogonale Felder werden in dieser Arbeit in Kapitel 5.1 in die Diskussion über die Ausgewogenheit der Einsatzarten der Gesamtfahrzeugerprobung mit einbezogen.

Die Diskussion der Anforderungen an eine Gesamtfahrzeugerprobung und die Erörterung geeigneter Instrumente zur Zuverlässigkeitsanalyse und Versuchsplanung legen die Basis für eine Optimierung der Erprobungsplanung. In den nachfolgenden Kapiteln werden die dargestellten Modelle auf die Gesamtfahrzeugerprobung übertragen und deren Anwendung am Beispiel der Audi AG veranschaulicht.

## 4 Zuverlässigkeitsnachweis in der Erprobung

---

Die Zuverlässigkeitstheorie stellt mehrere Methoden zur Beschreibung des Ausfallverhaltens von Bauteilen und Komponenten bereit. Sowohl sich ändernde Umgebungsbedingungen, zeitliche Raffung, Vorkenntnisse über technisch artverwandte Produkte als auch Informationen über Feldschäden in der Gewährleistungszeit können in die Modelle mit einbezogen und zur Stichprobenreduzierung genutzt werden. Umfassende Systembetrachtungen hingegen stoßen meist an Grenzen, da Wirkungszusammenhänge nicht vollständig erfasst oder Modellvariablen nicht mit konkreten Werten belegt werden können. Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit der Ansatz der Booleschen Systemtheorie zur Bestimmung der Fahrzeugzuverlässigkeit zurückgewiesen, der über einen bottom up Ansatz die Zuverlässigkeit eines Systems über die Ausfallcharakteristik der Baugruppen und Komponenten ableitet. Vielmehr wird die Zielsetzung verfolgt, über eine Parametrisierung der Erprobungsstrecken und der Einbeziehung der Bayesschen Theorie in die Zuverlässigkeitsanalyse einen Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Erprobungsarten herzustellen. Auf diese Weise gelingt es aufzuzeigen, wie sich die Zuordnung von Erprobungsfahrzeugen auf unterschiedliche Einsatzarten auf den Zuverlässigkeitsnachweis auswirkt und welche Anforderungen beim Auftreten von Ausfällen an eine Nacherprobung gestellt werden müssen.

Setzt man sich weiterhin mit den eingangs genannten Steuergrößen in der Gesamtfahrzeugerprobung, d. h. der Erprobungsart, dem Fahrzeugaufbau, dem Mengengerüst und den Ziellaufleistungen, auseinander, liefert eine Analyse des Ausfallverhaltens auf den Erprobungsstrecken sowie die Ermittlung von Laufleistungsverteilungen wichtige Informationen für die Entwicklung eines Planungsstandards für die Gesamtfahrzeugerprobung.

## 4.1 Bestimmung der Erprobungsstreckencharakteristik

Die Wahl geeigneter Erprobungsstrecken für die Gesamtfahrzeugerprobung unterliegt einem langfristigen Planungshorizont. Der Erprobungsbedarf wird deshalb zumeist über die Festlegung des Mengengerüsts und der Laufleistungen auf bestehenden Teststrecken gesteuert. Gleichwohl können neue Technologien bislang nicht genutzte Einsatzarten durchsetzen. Im Konzernverbund stehen mehrere Strecken mit unterschiedlichen Eigenschaften zu Erprobungszwecken zur Verfügung. Auch externe Testgelände gelangen zum Einsatz. Jede Erprobungsstrecke besitzt hierbei Alleinstellungsmerkmale, die eine besondere Belastung einzelner Komponenten oder Systeme nach sich führen. Die Nutzung verschiedener Einsatzarten begründet sich somit über die Abbildung unterschiedlicher kundenrelevanter Grenzbeanspruchungen.

Die Charakteristik der Teststrecken wird über Messfahrten mit zusätzlichen Sensoren zur Beanspruchungsmessung (Wege, Kräfte, Beschleunigungen) und Datenloggern zur Aufzeichnung des Datenbusverkehrs des Fahrzeugs ermittelt. Dabei lassen sich fahrdynamische Größen wie Geschwindigkeit, Längs- oder Querschleunigung über einen kontinuierlichen Zeitschrieb erfassen und auswerten. Die nationalen Wetterdienste liefern ergänzende Informationen über die vorherrschenden Umweltbedingungen. Insgesamt entsteht so ein charakteristisches Streckenprofil aus verschiedenen Elementen, das im Zusammenhang mit der Erprobungsplanung und der Analyse von Schadensfällen eine wichtige Informationsbasis darstellt. Nachfolgend wird im Anschluss an die Beschreibung der in der Erprobung genutzten Einsatzarten eine Auswahl relevanter Streckenparameter getroffen, um so die Erprobungsstreckenprofile mit Hilfe der zuvor genannten Informationsgrößen zu ermitteln.

### 4.1.1 Qualitative Beschreibung der Erprobungsstrecken

In der Gesamtfahrzeugerprobung der Audi AG werden weltweit umfangreiche Testkilometer zurückgelegt. Die Erprobungsfahrzeuge sind dabei unterschiedlichen Umwelteinflüssen und dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt, um einen Zuverlässigkeitsnachweis unter allen denkbaren Betriebsbedingungen führen zu können. Jedem Erprobungsszenarium liegt dabei ein spezifischer Testumfang zugrunde, es existieren jedoch auch zahlreiche Redundanzen im Testbetrieb. Nachfolgend werden die wichtigsten Erprobungsstrecken qualitativ beschrieben und die jeweiligen Erprobungsschwerpunkte dargestellt.

### *Schlechtwegekurs*

Auf dem Schlechtwegekurs erfolgt eine extreme Strukturprüfung von Karosserie, Fahrwerk, Antriebsstrang und Anbauteilen unter Korrosionsbeaufschlagung. Dazu wird das Fahrzeug auf einem symmetrischen Parcours mit Kopfsteinpflaster, Höckerkurven (siehe Abbildung 4.1), Fasslöchern, Schlaglöchern, Salzwasser- und Schlammfahrt mit 60 Prozent der zulässigen Beladung bewegt. Dabei treten durch teilweise sehr kleine Kurvenradien trotz der geringen Geschwindigkeit hohe Querschleunigungen auf. Aufgrund der sehr hohen Raffung kann auf dem Schlechtwegekurs innerhalb von 8.000 km ein gesamtes Fahrzeugleben abgebildet werden.



Höckerkurve



Belgisch Pflaster



Afrikapiste

Abbildung 4.1: Unterschiedliche Fahrbahnzustände in der Gesamtfahrzeugeterprobung (Audi AG)

### *Wechselkurs*

Eine Mischung aus unterschiedlich beschaffenen, teilweise kurvenreichen Landstraßen und Autobahnabschnitten charakterisieren den Wechselkurs, der zur Verschleiß- und Funktionserprobung sämtlicher Fahrzeugkomponenten eingesetzt wird. Neben der Streckenbeschaffenheit wirken spezielle Fahrmanöver wie die Durchführung von Vollbremsungen, das Anfahren am Berg, die Betätigung der Heckscheibenheizung, u. a. auf das zu 80 Prozent beladene Fahrzeug ein. Über die Fahrstrecke von 100.000 km wird ein vollständiges Fahrzeugleben reproduziert.

### *Innenkurs*

Beim Innenkurs handelt es sich um den Landstraßenabschnitt des Wechselkurses. Die Teststrecke charakterisiert unebene Fahrbahnbeläge, Steigungshügel, Bahnübergänge, Kreuzungen und weitere in Europa übliche Straßenzustände. Auch hier wird ein geraffter Kundenbetrieb dargestellt. Die Geschwindigkeiten im Innenkurs liegen zwischen 10 km/h und 120 km/h, das Fahrzeug ist dabei zu 80 Prozent beladen.

### *Schnellbahn*

Bei der Schnellbahn handelt es sich um eine seitenkraftfreie Ovalbahn, auf der Fahrzeuge über einen beliebigen Zeitraum ohne Querkrafteinfluss unter Volllast bewegt werden können. Sie ist, wie auch der Innenkurs, Bestandteil des Wechselkurses.

### *Hochgeschwindigkeitskurs*

Auf dem Hochgeschwindigkeitskurs werden die Erprobungsfahrzeuge über eine Strecke von 30.000 km unter Volllast betrieben. Gelegentliche Schaltungsrunden dienen dabei der Reduzierung der Getriebeöltemperatur. Im Gegensatz zur Schnellbahn werden Aggregat und Antriebsstrang auf dem Hochgeschwindigkeitskurs auch hohen Umgebungstemperaturen ausgesetzt, sodass nicht nur Motor, Getriebe, Reifen und Gelenkwellen sondern auch Kühlung und Klimatisierung einer extremen Beanspruchung unterliegen.

### *Rennstrecke*

Auf der Rennstrecke werden die unter hoher Drehzahl rotierenden Bauteile unter extremer Längs- und Querkrafteinwirkung erprobt. Gleichzeitig erfolgt eine Beurteilung der Rissfreiheit und Verbindungstechnik im Fahrwerk sowie der Performance der Lenk- sowie Feder-Dämpfersysteme. Auf der Rennstrecke wird üblicherweise eine Laufstrecke von 10.000 km zurückgelegt.

### *Öffentliche Straße*

Die Erprobung auf öffentlichen Straßen stellt einen weitgehend kundennahen Betrieb des Fahrzeugs dar. Das Streckenprofil setzt sich jeweils zur Hälfte aus einem Landstraßen- und einem Autobahnabschnitt zusammen. Insgesamt wird eine Strecke von 150.000 km zurückgelegt, wobei sich Einschränkungen aufgrund der Geheimhaltung ergeben können.

### *Stadt*

In der Stadterprobung werden insbesondere der Stop-and-Go-Betrieb, die Funktion des Dieselpartikelfilters und die elektromagnetische Verträglichkeit der elektronischen Komponenten getestet. Das zu 80 Prozent beladene Erprobungsfahrzeug legt dabei eine Strecke von etwa 30.000 km zurück. Über einen Schwachlast-Einholerbetrieb werden zudem das Batterie-Energie-Management und die Standheizung erprobt. Die Stadterprobung wird sowohl in gemäßigten als auch warmen Klimazonen durchgeführt.

### *Anhänger*

Der Fokus des Anhänger-Dauerlaufs liegt auf der Erprobung von Antriebsstrang, Zweimas-senschwungrad, Fahrwerk, Karosserie, Bremse und Hängerstabilisierung. Das Streckenprofil setzt sich anteilig aus Stadt- (22%), Landstraßen- (40%) und Autobahnabschnitten (38%) zusammen.

### *Kaltland*

Im Zuge der Kaltlanderprobung wird das Start- und Schaltverhalten, die Funktion der (Stand-) Heizung, die Beanspruchung der Achsgelenke, Gelenkwellen sowie die Funktion der aktiven und passiven Feder-Dämpfersysteme unter Kälteeinwirkung überprüft. Das Fah-ren in der Schneeschlepe eines vorausfahrenden Fahrzeugs und die Untersuchung von Türen und Klappen im Hinblick auf Vereisungen ist ebenso Gegenstand der Erprobung wie die Beurteilung von so genannten Knister-Knaster-Geräuschen unter Kälteeinwirkung. Des Weiteren wird die Funktionalität der elektronischen Systeme, des Batterie-Energie-Managements sowie die Kaltbetankung überprüft. Die Fahrzeuge in der Kaltlanderprobung legen eine Strecke von 30.000 km zurück und werden in der Regel unbeladen erprobt.

### *Heißland*

Die Heißlanderprobung innerhalb Europas erfolgt auf schlecht ausgebauten Landstraßen unter starker Staub- und Schmutzeinwirkung. Dabei überwinden die zu 80 Prozent belade-nen Erprobungsfahrzeuge Passstraßen und setzen somit die Brems- und Lenkungsanlage, Dämpfersysteme und Klimatisierung einer hohen Beanspruchung aus. Der Wärmeeinfluss wird gleichzeitig zur Geräuschbeurteilung im Innenraum genutzt. Das Laufleistungsziel be-trägt ebenfalls 30.000 km.

### *Drei-Klimazonen*

Der Drei-Klimazonen-Dauerlauf ist eine Kombination aus Kalterprobung, Erprobung auf öffentlicher Straße in Deutschland und Heißlanderprobung in Europa. Die Erprobungsfahr-zeuge werden dabei nacheinander unterschiedlichen Klima- und anderen Umwelteinflüs-sen ausgesetzt.

### *Niedrigreibwert*

Eine Sondererprobung der Radschlupfregelsysteme wird im Winter auf einer zugefrorenen Seefläche durchgeführt. Alternativ kann die Niedrigreibwerterprobung im Sommer unter gewissen Einschränkungen auch auf Splitt durchgeführt werden.

### *Splitt*

Die Splitt-Erprobung dient der Beurteilung von Steinschlagschäden an sicherheitsrelevanten Fahrwerksteilen und der Karosserie. Die Laufleistung variiert im Hinblick auf unterschiedliche Auslegungsziele für Normal- bzw. Splitt- und Schlechtwegeländer zwischen 1.000 km und 10.000 km.

### *USA*

In den USA wird sowohl eine Heiß- als auch Kalterprobung insbesondere vor dem Hintergrund unterschiedlicher Motor- und Getriebeapplikationen durchgeführt. Zudem existieren aufgrund der US-Gesetzgebung zahlreiche Umfänge wie OBD (On-Board-Diagnose der Abgasreinigung) und ORVR (On Board Refueling Vapor Recovery – Auffangen der Kraftstoffgase während der Betankung), die einer gesonderten Erprobung bedürfen. Die Beurteilung der abweichenden Fahrwerksabstimmung sowie die Betankung mit unterschiedlichen Zapfpistolen sind weitere Inhalte der US-spezifischen Erprobung.

### *Breitenerprobung*

Die Erprobung von Elektronikumfängen erfolgt im Rahmen der Breitenerprobung. Dabei werden gezielt Komponenten gestresst, die im üblichen Erprobungsbetrieb keiner Überbeanspruchung unterworfen sind. In der Breitenerprobung wird in der frühen Entwicklungsphase eine größere Fahrzeugflotte bewegt, die durchaus weite Strecken, jedoch keine exakt definierte Laufleistung zurücklegt.

### *Funktionserprobung*

Die im Zuge eines Modellpflege-Punktes neu einsetzenden Elektroniksysteme werden im Rahmen der Funktionserprobung getestet, die in der Regel keinen Geheimhaltungsvorschriften unterliegt. Bei dieser Erprobung steht wiederum nicht die Laufleistung im Vordergrund, sondern ausschließlich die Funktionsstabilität der neuen Systeme.

### *Taxi*

Als Referenzerprobung wird eine Taxi-Erprobung durchgeführt. Ziel ist es, die Langzeitqualität der Fahrzeuge im üblichen Geschäftsbetrieb über eine Gesamtstrecke von 300.000 km zu beurteilen. Mit dieser Erprobung wird es möglich, die Nutzung eines Fahrzeuges über die gesamte Ziellaufleistung zu beurteilen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass insbesondere der Gebrauch von Türen und Klappen den üblichen Kundenbetrieb stark überzeichnet.

Neben den genannten Einsatzarten existieren weitere Sondererprobungsprogramme bzw. länderspezifische Erprobungsumfänge, die an dieser Stelle jedoch nicht näher ausgeführt werden.

#### 4.1.2 Parametrisierung der Erprobungsstreckencharakteristik

Um unterschiedliche Einsatzarten voneinander abgrenzen zu können, sind geeignete Parameter zur Beschreibung einer Streckencharakteristik festzulegen. Dabei lassen sich vier verschiedene Parameterklassen inhaltlich unterscheiden: Jedes Erprobungsszenarium ist über die Fahrcharakteristik, die Streckencharakteristik, die Umweltbedingungen und den Fahrzeugzustand definiert. Die nachfolgenden Streckenparameter lassen sich den vier Klassifikationen zuordnen:

<i>Fahrcharakteristik</i>	Geschwindigkeit, Drehzahl, Lastanteil, Längsbeschleunigung, Querschleunigung, Standzeiten, Schaltpunkte, etc.
<i>Streckencharakteristik</i>	Radträgerbeschleunigung, Aufbaubeschleunigung, Höhenprofil, Verkehrsdichte, Kurvenanzahl, Reibwert, etc.
<i>Umweltbedingungen</i>	Temperatur, Niederschlag, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Kraftstoffqualität, Staub- und Splitteintrag, Streusalzeintrag, Eintrag elektromagnetischer Wellen, etc.
<i>Fahrzeugzustand</i>	Beladung, Anhängerbetrieb, Fahrzeugaufbau, etc.

Während die Streckencharakteristik und die vorherrschenden Umweltbedingungen nur langfristig über die Wahl der Einsatzart beeinflusst werden können, lassen sich die Fahrcharakteristik und der Fahrzeugzustand flexibel in den Erprobungs- bzw. Aufbauanweisungen festlegen. Bei der kurzfristigen Änderung eines Erprobungsumfangs ist deshalb eine Unterscheidung zwischen Störfaktoren (Streckencharakteristik, Umweltbedingungen) und Steuerungsfaktoren (Fahrcharakteristik, Fahrzeugzustand) zweckdienlich. Eine differenzierte Zusammenstellung von Umweltbedingungen lässt sich der VDI-Richtlinie 4005 „Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse“ entnehmen (VDI 1981).

Der Einfluss unterschiedlicher Fahrer wird über den Einsatz von Fahrhinweisen relativiert, deren Befolgung sich über Datenloggeraufzeichnungen reproduzieren lässt. Der Detaillierungsgrad der Fahrhinweisung hängt dabei von der jeweiligen Einsatzart ab, d. h. einer Erprobung auf dem Schlechtwegkurs liegt aus Gründen der Reproduzierbarkeit eine eingehend beschriebene Fahrhinweisung und Streckenführung zugrunde, während im Rahmen einer Stadterprobung dem Fahrer ein höherer Freiheitsgrad eingeräumt wird.

In Abbildung 4.2 ist der typische Geschwindigkeitsbereich verschiedener Einsatzarten abgebildet. Über die Darstellung der auf eine Stunde normierten Verweildauer wird ersichtlich, dass auf dem Schlechtwegkurs im Gegensatz zur Hochgeschwindigkeitserprobung der niedrige Geschwindigkeitsbereich stark ausgeprägt ist. Die Stadterprobung hingegen charakterisiert ein hoher Anteil an Standzeiten.

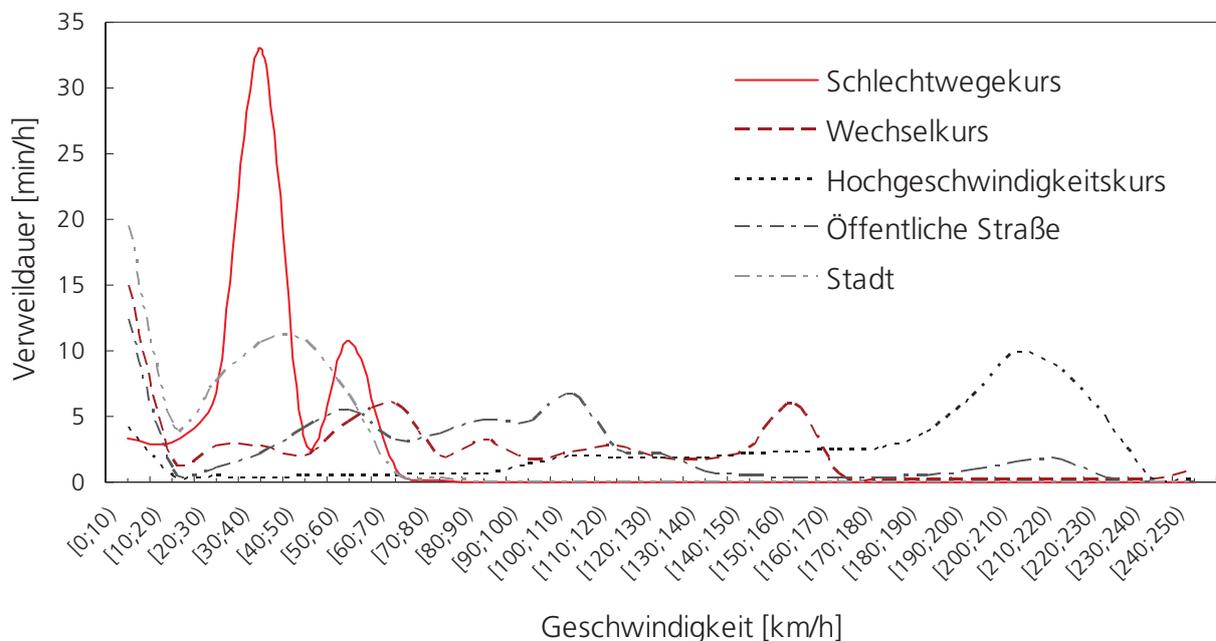


Abbildung 4.2: Verweildauer der Geschwindigkeit auf ausgewählten Erprobungsstrecken

Für alle fahrdynamischen Größen lassen sich Verweildauern bestimmen, die in die Ermittlung der Erprobungsstreckencharakteristik einfließen. Zur Herstellung der Vergleichbarkeit werden die unterschiedlich dimensionierten Parameter entsprechend der Minimal- und Maximalausprägung auf das Intervall  $[0,10]$ . Abbildung 4.3 zeigt die Parameter der wichtigsten Einsatzarten in der Gesamtfahrzeugerprobung. Die Blasenflächen beziehen sich dabei auf die Durchschnittswerte und nicht auf die Streuung der Parameter. Eine hohe Ausprägung bei der Geschwindigkeit lässt somit auf eine hohe Durchschnittsgeschwindigkeit und nicht auf hohe Geschwindigkeitsschwankungen schließen.

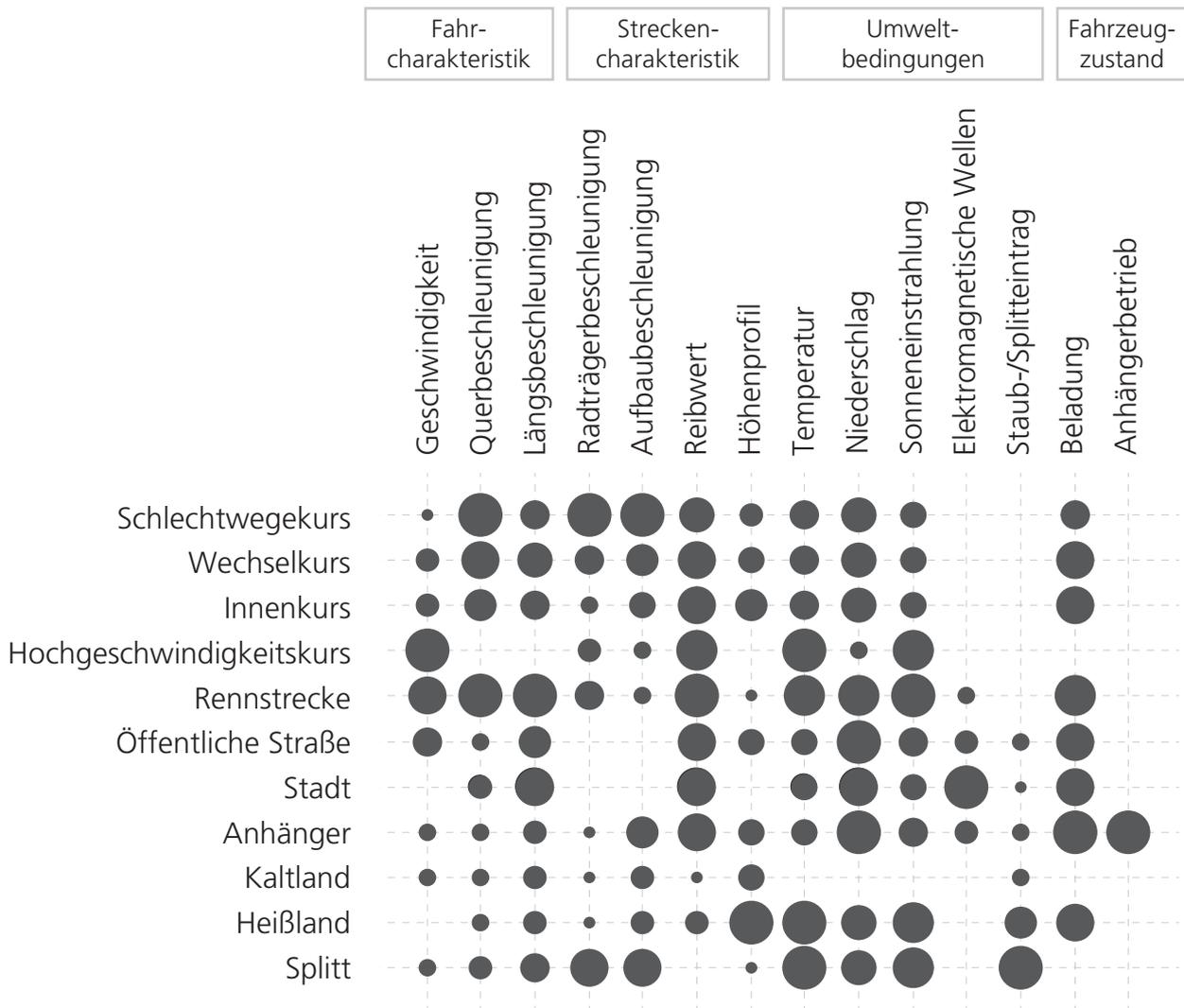


Abbildung 4.3: Vergleich der Erprobungsstreckencharakteristiken

Jede Einsatzart besitzt Alleinstellungsmerkmale und doch zeigt sich, dass zahlreiche Überschneidungen existieren. In Kapitel 5.1 wird deshalb die Ausgewogenheit des derzeitigen Erprobungsstreckendesigns aus Sicht der Versuchsplanung näher untersucht.

## 4.2 Ermittlung der Zuverlässigkeitsparameter

Neben den Parametern der Streckencharakteristik lassen sich weitere Attribute für die unterschiedlichen Einsatzarten ausweisen, die für Zuverlässigkeitsuntersuchungen eine Relevanz besitzen. Auf der Basis von Laufleistungszielen und Schadensfalldaten in der Erprobung werden für jede Erprobungsstrecke Lebensdauer Verhältnis, Weibullparameter und Raffungsfaktor berechnet (vgl. Tabelle 4.1). Dazu erfolgt die Auswertung eines Zeitraums von insgesamt neun Jahren. Auf diese Weise können unterschiedliche Rahmenbedingungen in einer Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt werden.

### 4.2.1 Berechnung der Lebensdauerverhältnisse

Die verkürzte Erprobungszeit in der Fahrzeugentwicklung wird über das Lebensdauer Verhältnis zum Ausdruck gebracht. Die Größe berechnet sich über den Quotienten aus zurückgelegter Laufleistung auf der Erprobungsstrecke und der Mindestanforderung an die Laufleistung des Fahrzeugs in Kundenhand. Die Ziellaufleistung wird in dieser Arbeit mit 300.000 km festgelegt. Dies erfolgt unter Berücksichtigung des Auslegungsziels für sicherheitsrelevante Bauteile (vgl. Kapitel 2.3) und der durchschnittlichen über die Lebensdauer eines Oberklassefahrzeugs zurückgelegten Laufleistung (vgl. Kapitel 6.3.2). Grundsätzlich ist die Fahrdistanz auf einer Teststrecke vorab definiert. Treten jedoch Abweichungen von der Erprobungsplanung auf, so ist für jedes Fahrzeug ein separates Lebensdauer Verhältnis zu berücksichtigen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass geringe Lebensdauer Verhältnisse in einer Zuverlässigkeitsanalyse über einen hohen Raffungsfaktor (vgl. Kapitel 4.2.3) ausgeglichen werden können.

### 4.2.2 Berechnung der Weibullparameter

Weichen die in einer Erprobung auftretenden Umgebungsbedingungen vom Kundenbetrieb ab, ist die dem Testbetrieb eigene Ausfallcharakteristik im Rahmen einer Zuverlässigkeitsanalyse zu identifizieren (vgl. Kapitel 3.1.4.4). In Anlehnung an Kapitel 3.1.3 erfolgt dazu eine Unterscheidung nach frühen, zufälligen oder durch Ermüdung verursachten Ausfällen. Je nach Erprobungsart wird in der Regel ein Ausfallverhalten in besonderer Weise begünstigt. So führt die Fahrwerks- und Karosserieanregung auf dem Schlechtwegkurs überwiegend zu Verschleiß- und Ermüdungsausfällen, während im Rahmen der Straßenerprobung die jederzeit auftretenden zufälligen Ausfälle nicht durch andere Ausfallmechanismen dominiert werden. Gleichzeitig ist zu beachten, dass sich bei geringeren äußeren Belastungen ein kleinerer Formparameter berechnet als bei einem höheren Lasteintrag (vgl. Kapitel 3.1.4.4).

Mit Hilfe der linearen Regression, der Methode nach Gumbel oder einem Maximum-Likelihood-Schätzer lassen sich über die Schadensfalldaten in der Erprobung für jede Teststrecke zugehörige Weibullparameter bestimmen, die Auskunft über das jeweilige Ausfallverhalten geben (Ronniger 1999). Die Güte der Approximation wird hierbei über einen Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest ermittelt (Storm 2007).

Zur Bestimmung der Weibullparameter über die lineare Regression erfolgt eine Approximation der Ausgleichsgeraden einer zweiparametrischen Weibullfunktion über

$$X = \ln(t), \quad (4.1)$$

$$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F}\right)\right) \quad (4.2)$$

mit der Ausfallwahrscheinlichkeit

$$F = \frac{i-0,3}{n+0,4} \text{ für } n < 50, \text{ bzw.} \quad (4.3)$$

$$F = \frac{i}{n+1} \text{ für } n \geq 50. \quad (4.4)$$

Über die Geradengleichung

$$Y = b X - b \ln(T) \quad (4.5)$$

und der Methode der kleinsten Fehlerquadrate lassen sich die Weibullparameter  $b$  und  $T$  bestimmen.

Die Ermittlung der Weibullparameter über die Methode nach Gumbel erfolgt wiederum über die Näherung

$$b = \frac{0,577}{s_{\lg}} \quad (4.6)$$

unter Einbeziehung von

$$s_{\lg} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n \lg(t_i)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \lg(t_i) \right)^2 \right]} \quad (4.7)$$

und des Terms

$$\lg(T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg(t_i) + \frac{0,2507}{b}. \quad (4.8)$$

Alternativ lassen sich die Weibullparameter durch eine Maximum-Likelihood-Abschätzung iterativ über die beiden nachfolgenden Gleichungen ermitteln:

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i^b \ln(t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^b} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - \frac{1}{b} = 0 \quad (4.9)$$

zur Bestimmung des Formparameters  $b$  und

$$T = \left( \left( \sum_{i=1}^n t_i^b \right) \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (4.10)$$

zur Herleitung der charakteristischen Lebensdauer  $T$ .

Um die Wahl der Weibullverteilung zur Beschreibung des Ausfallverhaltens zu überprüfen, wird der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest (KS-Test) herangezogen. Da es sich bei der empirischen Verteilungsfunktion um eine Treppenfunktion handelt, kann die Güte der Anpassung über die Abweichung an der Stelle  $i$  und der vorangegangenen Stelle  $i - 1$  gegenüber der hypothetischen Verteilungsfunktion bestimmt werden. Die Beschreibung über eine Weibullverteilung ist immer dann berechtigt, sofern eine maximale Distanz  $D_{KS}$  zwischen empirischer Häufigkeit und Weibullfunktion nicht überschritten wird. Der kritische Wert für ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  beträgt  $KS_{6,5\%} = 0,408$ . Die Distanz  $D_{KS}$  berechnet sich über:

$$D_{KS} = \max \left( \left| \left( \frac{i}{n+1} \right) - \left( 1 - e^{-\left( \frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^b} \right) \right|, \left| \left( \frac{i-1}{n+1} \right) - \left( 1 - e^{-\left( \frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^b} \right) \right| \right) \text{ für } n \geq 50 \quad (4.11)$$

Abbildung 4.4 zeigt den Maximum-Likelihood-Schätzer für den Schlechtwegkurs in einem doppellogarithmischen Wahrscheinlichkeitstableau. Um Einflüsse der Mehrfachnutzung von Erprobungsfahrzeugen auszuschließen, wurden in den Untersuchungen nur diejenigen Fahrzeuge berücksichtigt, die sich im Ersteinsatz auf der betrachtenden Erprobungsstrecke befanden. Die über die Maximum-Likelihood-Methode ermittelten Weibullparameter zeigen bei den vorliegenden Ausfalldaten die insgesamt beste Anpassungsgüte. Die Annahme der Weibullverteilung wird bei allen drei Methoden über den KS-Test bestätigt. Auch eine qualitative Plausibilisierung der Parameter liefert gute Ergebnisse.

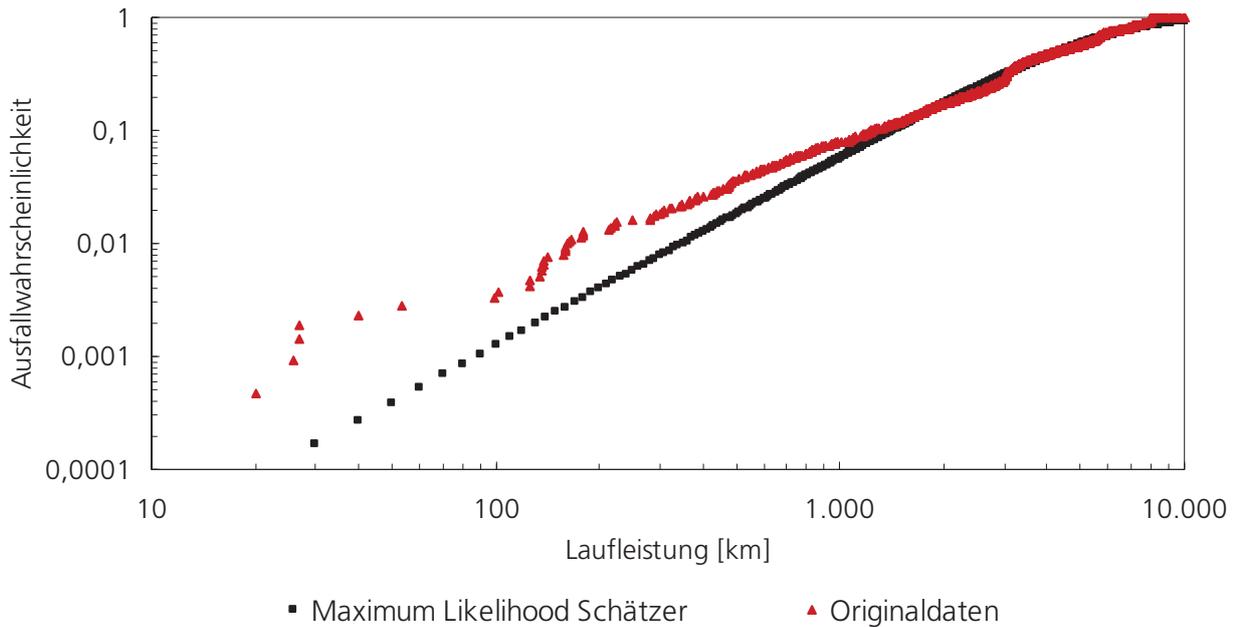


Abbildung 4.4: Maximum-Likelihood-Schätzer für den Weibullparameter  $b = 1,67$  des Schlechtwegekurses

Generell besteht bei Untersuchungen auf der Gesamtfahrzeugebene die Problematik unterschiedlicher Ausfallmechanismen. Es ist deshalb in Betracht zu ziehen, baugruppenspezifische Weibullparameter zu bestimmen, um so etwa den Ausfall von Aggregatteilen und Fahrwerkskomponenten zu unterscheiden. Dies setzt voraus, dass bei der Bestimmung der Weibullparameter auch auf Nebenstrecken eine ausreichend große Datenbasis für jede Baugruppe zur Verfügung steht, was jedoch nicht immer der Fall ist. Infolgedessen kann keine Weibullverteilung bestimmt werden oder die Güte der Anpassung sinkt. Begünstigend wirkt sich aus, dass ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Teststrecken und typischen Ausfallbildern existiert, sodass in die Bestimmung der streckenspezifischen Weibullparameter ohnehin nur Ausfälle einer bestimmten Baugruppe einfließen.

Um einen Weibullparameter unter Betriebsbedingungen ermitteln zu können, wird auf den Taxi-Dauerlauf als Repräsentation des Kundenbetriebs zurückgegriffen. Untersuchungen konnten zeigen, dass sich die Weibullparameter für beide Betriebszustände nicht unterscheiden (Krolo et al. 2001). Die theoretisch mögliche Vorgehensweise, den Weibullparameter unter Betriebsbedingungen über Schadensfälle aus dem Feld zu bestimmen, kann aufgrund der Beschränkung des Gewährleistungszeitraums auf zwei Jahre nicht weiter verfolgt werden.

### 4.2.3 Berechnung der Raffungsfaktoren

Der Raffungsfaktor ist über das Verhältnis zwischen der bis zum Ausfall zurückgelegten Laufleistung unter Betriebsbedingungen und unter Erprobungsbedingungen definiert. Der Faktor folgt somit nicht über die Relation unterschiedlicher Lastzustände, d. h. eine doppelte Belastung führt nicht zwangsläufig zu einem Raffungsfaktor der Größenordnung zwei. In der Betriebsfestigkeit wird dieser Zusammenhang über den Verlauf einer Wöhlerlinie mit der Nennspannungsamplitude  $S_a$ , der Schwingspielzahl  $N$  und dem Neigungskoeffizienten  $k$  zum Ausdruck gebracht:

$$\frac{S_a}{S_{ref}} = \left( \frac{N}{N_{ref}} \right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{mit } k > 0. \quad (4.12)$$

Der exponentielle Verlauf einer Wöhlerlinie bedingt, dass eine relativ kleine Veränderung der Lastamplitude eine große Auswirkung auf die Lebensdauer ausübt (Haibach 2006).

Nachfolgend werden zur Berechnung der Raffungsfaktoren jedoch keine Lasteinträge, sondern Lebensdauern, d. h. im vorliegenden Fall Laufleistungen, mit einbezogen. Dabei ist erneut die Erprobungsdatenbank über einen Zeitraum von neun Jahren auszuwerten. Für jede Erprobungsstrecke wird das arithmetische Mittel der zurückgelegten Fahrstrecken bis zum Ausfall berechnet und in das Verhältnis mit der mittleren Fahrstrecke unter Betriebsbedingungen gesetzt.

#### Mittlere ausfallfreie Laufleistung im Kundenbetrieb

Die zur Berechnung des Raffungsfaktors benötigte mittlere ausfallfreie Fahrstrecke unter Betriebsbedingungen wird über das arithmetische Mittel der bis zu einem Ausfall zurückgelegten Laufleistungen der Taxi-Erprobung abgeleitet. Sie beträgt 175.000 km. Denn obgleich der Taxi-Betrieb einer zeitlichen Raffung unterliegt, ist die streckenbezogene Raffung nicht signifikant. Diese lässt sich lediglich bei einzelnen Bauteilen beobachten und ist dadurch zu erklären, dass im Taxi-Betrieb der Stadtanteil stärker ausgeprägt ist. In die Mittelwertberechnung fließen sämtliche Schadensfälle mit ein, entsprechend sind unterschiedliche Auslegungsziele für die Einzelkomponenten bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Eine Übersicht über die Zuverlässigkeitsparameter der Einsatzarten in der Gesamtfahrzeu-  
erprobung stellt Tabelle 4.1 bereit. Es sei erwähnt, dass sich die Weibullparameter der  
Rennstrecken-, Anhänger- bzw. Heißlanderprobung aufgrund der geringen Anzahl an Er-  
probungsfahrzeugen, die diese Einsatzart im Ersteinsatz absolvieren, nicht bestimmen las-  
sen. Eine Verifikation der ermittelten Kennzahlen erfolgt abschließend in Kapitel 7.1.

	Ziellauf- leistung	Lebensdauer- verhältnis	Weibull- parameter	Raffungs- faktor
Schlechwegekurs	8.000 km	0,027	1,67	33,9
Wechselkurs	100.000 km	0,333	1,16	3,6
Innenkurs	70.000 km	0,233	0,86	2,6
Hochgeschwindigkeitskurs	30.000 km	0,100	1,00	5,8
Rennstrecke	10.000 km	0,033	- / -	5,7
Öffentliche Straße	150.000 km	0,500	0,91	2,7
Stadt	30.000 km	0,100	1,02	6,9
Anhänger	30.000 km	0,100	- / -	4,2
Kaltland	30.000 km	0,100	0,97	4,8
Heißland	30.000 km	0,100	- / -	3,3
Splitt	10.000 km	0,033	1,20	16,3
Taxi	300.000 km	1,000	1,69	1,0

Tabelle 4.1: Zuverlässigkeitsparameter der Erprobungsstrecken in der Gesamtfahrzeu-  
erprobung

### 4.3 Abdeckungsgrad der Gesamtfahrzeu- erprobung

Um eine effiziente Kombination der Erprobungsszenarien ermitteln zu können, ist zunächst  
das typische baugruppenspezifische Ausfallverhalten auf den Erprobungsstrecken zu ermit-  
teln. Auf diese Weise wird der Fokus der Erprobung identifiziert und eine Optimierung des  
Abdeckungsgrades ermöglicht. Die unterschiedlichen Erprobungsarten sind derart zu kom-  
binieren bzw. anzupassen, dass eine maximal mögliche Anzahl an Ausfällen über alle Bau-  
gruppen provoziert wird. Gleichzeitig dient die Aufschlüsselung der Ausfallbilder dem Zu-  
verlässigkeitsnachweis, da so eine Aussage über die Vergleichbarkeit unterschiedlicher  
Einsatzarten getroffen werden kann.

Bevor die Frage nach den charakteristischen Ausfallbildern auf den Erprobungsstrecken  
aufgegriffen wird, gilt es zunächst den Begriff Ausfall bzw. Schadensfall zu spezifizieren.  
Eine Möglichkeit zur Beschreibung der Zustandsänderung technischer Systeme ist die An-  
nahme einer permanenten Abnutzung, die nach Verbrauch eines definierten Abnutzungs-  
vorrates zu einem Ausfall führt (Ryll 2007). Dadurch wird eine Differenzierung hinsichtlich  
des Schadensausmaßes (volle Funktionsfähigkeit, geringe Beeinträchtigung, komplettes  
Versagen) möglich. In der Gesamtfahrzeu-  
erprobung erfolgt eine Klassifizierung der Scha-

denfalls im Hinblick auf die Auswirkungen vor Kunde. Dabei hat sich ein zehnstufiger Bewertungsmaßstab durchgesetzt, der vom höchsten Maß der Verärgerung, dem so genannten Liegenbleiber (Note 1), bis hin zur vollsten Zufriedenheit (Note 10) mehrere Stufen der Kundenakzeptanz abdeckt. In dieser Arbeit werden Beanstandungen mit einer Note kleiner acht als Schadensfälle berücksichtigt.

### 4.3.1 Analyse des streckenspezifischen Ausfallverhaltens

Eine Analyse der Eignung der Erprobungsstrecken zur Aufdeckung von Bauteilfehlern bedingt die Zuordnung der Schadensfälle zu Bauteilkategorien. Eine Normierung nach der Anzahl der eingesetzten Erprobungsfahrzeuge sichert dabei die gegenseitige Vergleichbarkeit. In Abbildung 4.5 ist die relative Anzahl der Schadensfälle auf den Erprobungsstrecken auf der Skala [0,10] entsprechend der Minimal- und Maximalausprägung in jeder Bauteilkategorie dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden exemplarisch 15 von insgesamt 66 Kategorien angeführt. Abbildung 4.5 zeigt, dass die Bremsanlage auf fahrdynamischen Strecken und unter Splittbeschuss hohen Belastungen unterliegt, während in der Stadterprobung überwiegend Probleme mit der Anfahrkupplung auftreten.

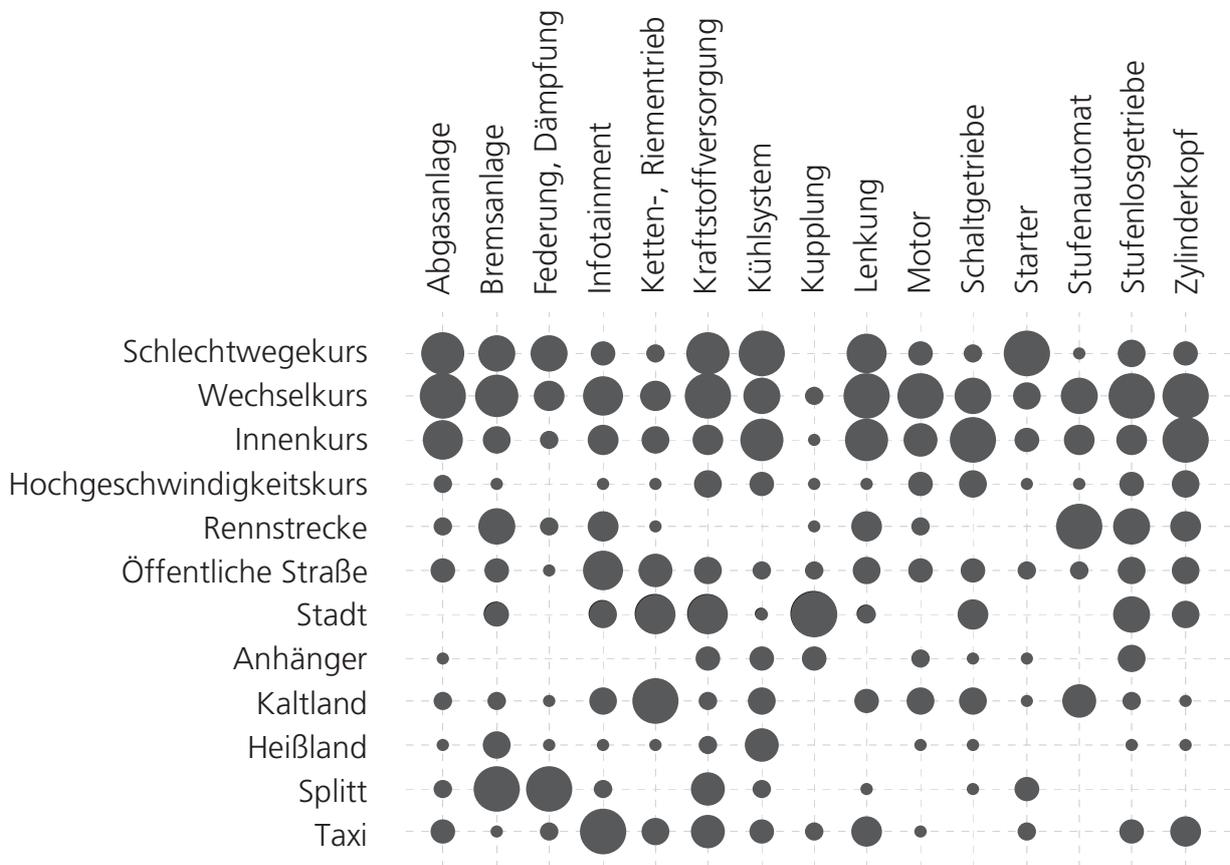


Abbildung 4.5: Eignung der Erprobungsarten zur Aufdeckung baugruppenspezifischer Mängel

Die Bestimmung des streckenspezifischen Ausfallverhaltens eröffnet die Möglichkeit, einen Zusammenhang mit der in Kapitel 4.1 ermittelten Streckencharakteristik herzustellen. Interessant erscheint die Fragestellung, ob bestimmte Streckeneigenschaften spezielle Ausfallbilder begünstigen. Dazu werden im Rahmen einer multivariaten Varianzanalyse die Streckenparameter zunächst nominal skaliert, um so einen möglichen Zusammenhang mit dem Ausfallverhalten quantitativ nachzuweisen. Es zeigt sich jedoch, dass die Signifikanz der Ergebnisse sehr stark von der Modellbildung, d. h. von den berücksichtigten Faktoren und der Anzahl an Faktorstufen, abhängt, sodass dieser Ansatz keine weiteren qualifizierten Erkenntnisse liefert.

### 4.3.2 Effizienzvergleich unterschiedlicher Erprobungsszenarien

Die Variabilität einer Erprobungsstrecke bezeichnet das Potenzial, unterschiedliche Bauteilmängel innerhalb einer Einsatzart aufzudecken. Die Kenngröße berechnet sich anhand des streckenspezifischen Ausfallverhaltens (siehe Abbildung 4.5) über den Quotienten aus der Zeilensumme und der Gesamtzahl an Bauteilkategorien. Während den Schlechtwege-, Wechsel- und Innenkurs ein breites Spektrum an Bauteilausfällen charakterisiert, treten in der Anhänger- oder Heißbänderprobung nur spezifische Schadensbilder auf. Die Variabilität dieser Einsatzarten ist entsprechend niedriger.

Die Spezifität einer Erprobungsstrecke wiederum drückt aus, in wie weit sich Einsatzarten hinsichtlich ihrer Streckencharakteristik ähneln (siehe Abbildung 4.3). Wird die Charakteristik als Eigenschaftsvektor aufgefasst und die euklidische Distanz

$$d(u, v) = |u - v| = \sqrt{(u_1 - v_1)^2 + \dots + (u_n - v_n)^2} \quad (4.13)$$

zwischen zwei Vektoren gebildet, folgt aus der Summe aller wechselseitigen Distanzen die Spezifität der Erprobungsstrecke. Es zeigt sich, dass sich die Splitterprobung in ihrer Charakteristik erheblich von anderen Einsatzarten unterscheidet, während der Wechselkurs zahlreiche Redundanzen mit anderen Erprobungsszenarien besitzt.

Über die Anzahl der Schadensfälle pro Fahrzeug lässt sich des Weiteren eine Aussage über die Ausfalldichte auf den jeweiligen Teststrecken treffen. Erneut wird hierzu ein Zeitraum von neun Jahren ausgewertet. Die Kennzahl bringt zum Ausdruck, dass der Schlechtwegkurs, Wechselkurs, Innenkurs und die Splitt-Erprobung zu den Einsatzarten mit der höchsten relativen Anzahl an Schadensfällen zählen, während der Hochgeschwindigkeitskurs nur

eine begrenzte Anzahl an Mängeln aufzeigt. In Tabelle 4.2 erfolgt eine Gegenüberstellung aller zuvor genannten Größen.

	Variabilität	Spezifität	Ausfalldichte
Schlechtwegekurs	4,8	15,1	12,6
Wechselkurs	6,0	12,1	15,8
Innenkurs	4,5	11,7	10,6
Hochgeschwindigkeitskurs	1,9	17,4	5,0
Rennstrecke	1,7	15,7	6,0
Öffentliche Straße	2,8	12,9	7,1
Stadt	3,0	15,6	8,1
Anhänger	1,3	15,5	5,4
Kaltland	2,7	17,2	8,8
Heißland	1,4	15,4	3,8
Splitt	3,8	17,7	12,8

Tabelle 4.2: Streckenkennzahlen in der Gesamtfahrzeugerprobung

In Abbildung 4.6 wird ein grafischer Zusammenhang zwischen den ermittelten Kennzahlen hergestellt. Es wird deutlich, je spezifischer die Erprobungsstreckencharakteristik ist, desto stärker lässt sich auch das typische Ausfallverhalten hinsichtlich bestimmter Baugruppen eingrenzen. Während die Einsatzarten im oberen linken Bereich zu den Standardumfängen der Dauererprobung zu zählen sind, handelt es sich bei den Einsatzarten im unteren rechten Bereich um Sondererprobungsprogramme. Dort lassen sich deutlich weniger Ausfälle aufzeigen.

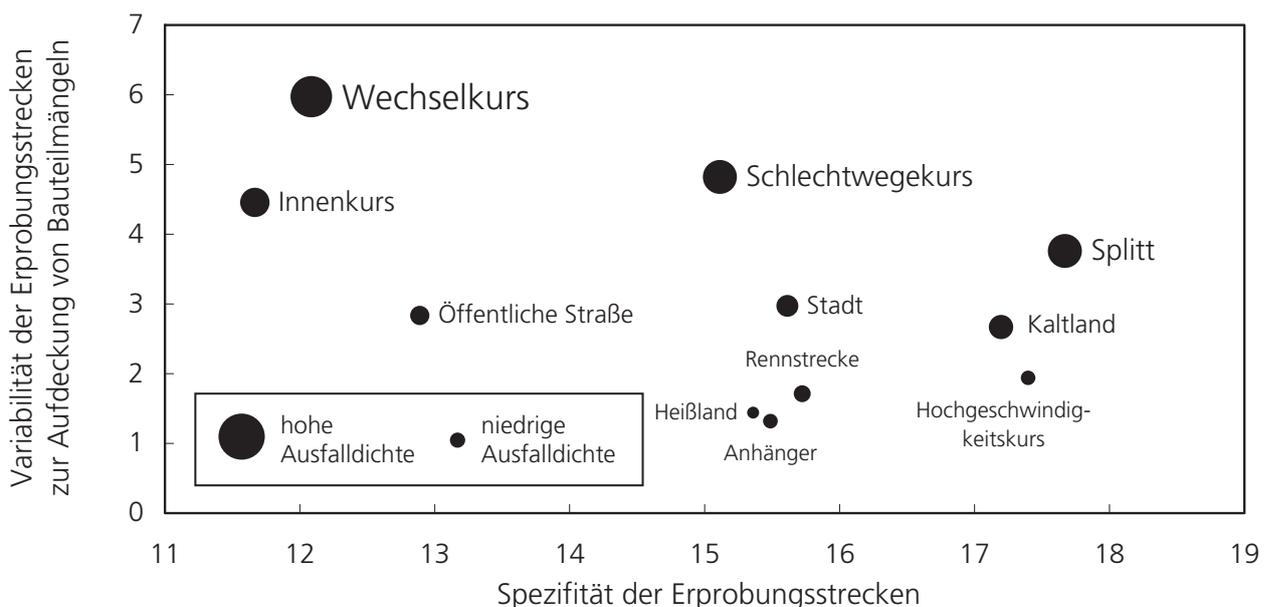


Abbildung 4.6: Zusammenhang zwischen Erprobungsstreckencharakteristik und dem streckenspezifischen Ausfallverhalten

### 4.3.3 Ausfallhäufigkeiten in Abhängigkeit des Produktreifegrades

Das Ausfallverhalten einer Baugruppe lässt sich nicht nur auf die Charakteristik der Erprobungsstrecke zurückführen. Es existiert fernerhin ein Zusammenhang zwischen der Anzahl beanstandeter Mängel und dem Produktreifegrad. Hierbei sind zwei gegenläufige Effekte zu berücksichtigen. Während frühe Fahrzeuge noch eine Vielzahl an Mängeln aufweisen, zeigen seriennahe Fahrzeuge einen deutlich höheren Qualitätstand. Voraussetzung für eine Beanstandung ist jedoch, dass es sich bei dem zu bewertenden Bauteil um einen beurteilungswürdigen Umfang handelt. Denn obgleich sich frühere Fahrzeugstadien bereits zur Fahrwerksbeurteilung eignen, können Aussagen über die Stabilität des vernetzten Elektroniksystems erst anhand seriennaher Erprobungsträger getroffen werden. Insgesamt wächst der Umfang beurteilungswürdiger Komponentenstände mit fortschreitender Entwicklung an, entsprechend steigt auch die Anzahl potenziell relevanter Fehlerquellen.

In der Fahrzeugentwicklung erfolgt eine Unterscheidung der Baustufen Technikträger (TT), Prototyp (PT), Vorserienfreigabefahrzeug (VFF), Produktionsversuchsserie (PVS), Null-Serie (0-S) und Serie (S) entsprechend den Phasen des Produktentstehungsprozesses. Abbildung 4.7 zeigt in diesem Zusammenhang die Anzahl der Schadensfälle pro Fahrzeug gestaffelt nach dem Produktreifegrad. Die Überlagerung der beiden eingangs genannten Effekte drückt sich in einer Häufung der Beanstandungen bei Vorserienfreigabefahrzeugen aus. Gleichzeitig ist eine abnehmende Fehlerhäufigkeit bei sehr frühen und seriennahen Fahrzeugen zu beobachten. Diesen Zusammenhang gilt es in Kapitel 6.3.1 bei der Verteilung der Erprobungsressourcen zu berücksichtigen.

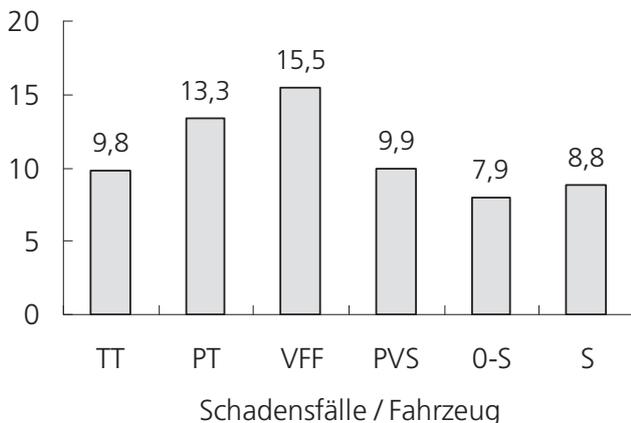


Abbildung 4.7: Ausfallhäufigkeiten in Abhängigkeit des Produktreifegrades

## 4.4 Kundenrelevante Laufleistungen

Die Laufleistungsziele der Standarderprobungsarten wie Schlechtwege- oder Wechselkurs nehmen Bezug auf die Auslegungsziele der Festigkeit. In Übereinstimmung mit der Vorgabe, dass sicherheitsrelevante Baugruppen eine Strecke von 300.000 km mit der Fahrcharakteristik eines Extremkunden und dem schlechtesten von 1.000 Teilen überstehen müssen, lassen sich unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Raffung Ziellaufleistungen für die Erprobungsstrecken ableiten. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass nicht auf jeder Strecke für alle Bauteile ein gesamtes Fahrzeugleben abgebildet wird. Da sich die Bauteilstreuung im Gegensatz zur Fahrcharakteristik nicht gezielt steuern lässt, werden in der Festigkeit Versuchslebensdauern auf den Fraktilwert 1‰ unter Einbeziehung der logarithmierten Standardabweichung der Bauteilstreuung umgerechnet. Die Größe ermittelt sich dabei aus den mittleren Festigkeitswerten zahlreicher Lebensdauerversuche. Demzufolge sind zur Repräsentation des 1‰-Bauteils für sicherheitsrelevante Bauteile noch weitaus höhere Laufleistungen als 300.000 km am Prüfstand abzubilden. In der Gesamtfahrzeugerprobung können aufgrund der geringeren Raffung jedoch keine entsprechenden Laufleistungen in einer vertretbaren Zeit zurückgelegt werden. In wie weit sich Extremsituationen darstellen lassen, hängt von der betrachteten Baugruppe und der jeweiligen Einsatzart ab. Während in der Schlechtwegeerprobung Fahrwerkskomponenten im Gegensatz zu Motorteilen einer starken Belastung unterliegen, kehrt sich die Situation auf dem Hochgeschwindigkeitskurs um. An dieser Stelle ist anzumerken, dass in der Gesamtfahrzeugerprobung das theoretische Szenario einer Ziellaufleistung von 300.000 km mit der Belastung des 1‰-Kunden und dem Einsatz des 1‰-Bauteils über alle Baugruppen in einer Einsatzart nicht darstellbar ist. Allein über die systematische Auswahl von Einsatzarten mit unterschiedlicher Schwerpunktlegung wird es möglich, sich diesem Ziel zumindest für die Hauptbaugruppen anzunähern. Bei einer Bauteilfreigabe sind deshalb immer sowohl die Ergebnisse des Prüfstandsversuchs als auch der Gesamtfahrzeugerprobung mit einzubeziehen.

Im Zuge der Auseinandersetzung mit den Laufleistungszielen ist zu diskutieren, ob die Festlegung eines Auslegungskriteriums unabhängig von der betrachteten Fahrzeugklasse sinnvoll ist. Das Produktportfolio der Audi AG erfährt heute eine stärkere Spreizung über alle Fahrzeugklassen als noch vor Jahren. Zugleich lässt sich im realen Kundenbetrieb beobachten, dass in den verschiedenen Fahrzeugsegmenten unterschiedliche Laufleistungen pro Jahr zurückgelegt werden. In diesem Zusammenhang wird die Frage nach der Wahl des richtigen Auslegungskriteriums aufgeworfen: Die streckenbezogene Laufleistung konkurriert

hier mit der zeitbezogenen Betriebsdauer. In Kapitel 6.3.2 wird diese Problematik aufgegriffen, vorab gilt es jedoch zunächst die durchschnittliche jährliche Fahrleistung eines Kunden in unterschiedlichen Fahrzeugsegmenten zu ermitteln.

#### 4.4.1 Berechnung von Laufleistungsverteilungen

Über eine Laufleistungsverteilung lässt sich der Anteil an Kundenfahrzeugen bestimmen, der eine definierte Fahrstrecke innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums zurückgelegt hat. Entsprechend folgt im Umkehrschluss über den Median der Verteilungsfunktion die durchschnittliche Laufleistung bzw. über das 90%-Quantil die Laufleistung eines Extremkunden.

Zur Berechnung von Laufleistungsverteilungen auf Basis von Gewährleistungsdaten wird die bis zu einem Ausfall zurückgelegte Strecke eines Fahrzeugs in Relation zur Differenz zwischen Ausfallzeitpunkt und Zulassungsdatum gesetzt. Dieses Verhältnis lässt sich auf beliebige Zeitspannen umrechnen. Über die Lebensdauerwerte mehrerer Fahrzeuge sind dann die Mengenanteile verschiedener Streckenintervalle zu ermitteln, die beispielsweise innerhalb eines Jahres zurückgelegt wurden. Die jährliche Laufleistungsverteilung folgt schließlich aus der Summenfunktion der Mengenanteile, die wiederum über eine logarithmische Normalverteilungsfunktion angenähert werden kann (Pauli und Meyna 2000).

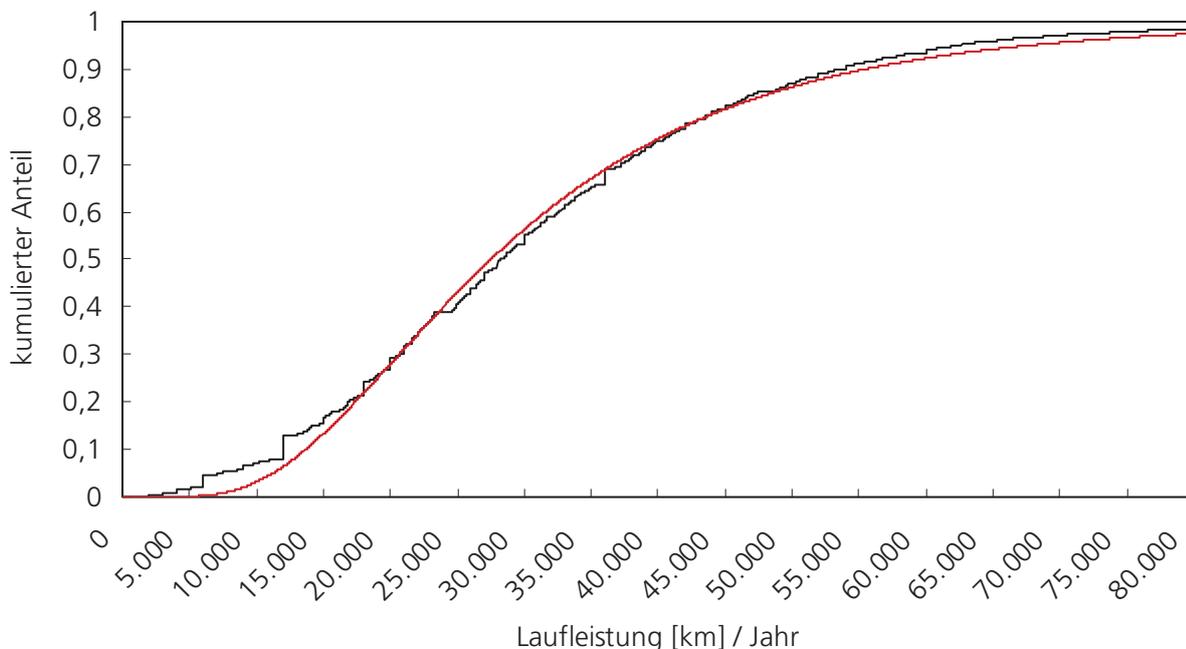


Abbildung 4.8: Empirische und approximierte jährliche Laufleistungsverteilung eines Audi A6 Avant Diesel

In Abbildung 4.8 ist die empirische und approximierte jährliche Laufleistungsverteilung eines Audi A6 Avant Diesel dargestellt. In die Berechnung fließen insgesamt knapp 140.000 Fahrzeuge mit ein. Die Laufleistungsverteilungen errechnen sich hierbei entsprechend der nachfolgend beschriebenen Vorgehensweise:

1. Zur Bestimmung einer Laufleistungsverteilung werden zunächst Informationen über Feldschadensfälle aus einer Gewährleistungsdatenbank bezogen. Für einen ausgewählten Fahrzeugtyp ist für jeden vorliegenden Ausfall die bis dahin zurückgelegte Laufleistung und Betriebszeit (Month in Service - MIS) zu erfassen. Zu Grunde gelegt wird hierbei der Gewährleistungszeitraum von 24 Monaten. Es ist darauf zu achten, dass lediglich die Erstaussfälle eines Bauteils mit einbezogen und bereits ausgetauschte Komponenten mit einer geringeren Laufleistung nicht berücksichtigt werden.
2. Da die Anzahl der Fahrzeuge mit zunehmender Betriebszeit abnimmt, wird zur Verbesserung der Approximationsgüte eine Normierung der Schadensfälle entsprechend der Anzahl der betrachteten Fahrzeuge im jeweiligen MIS-Intervall durchgeführt. Die Normierung beeinflusst die ermittelte durchschnittliche jährliche Laufleistung allerdings nur gering.
3. Im nächsten Schritt erfolgt die Normierung der Anzahl der Ausfälle mit zugehöriger Laufleistung auf den Zeitraum eines Jahres.
4. Anschließend wird eine empirische Laufleistungsverteilung aus den normierten Schadensfallzahlen ermittelt. Da Schadensfälle mit einer Laufleistung von über 90.000 km nicht ausgewertet werden, entsteht ein kleiner, jedoch zu vernachlässigender Fehler (durchschnittlich zwei Prozent der Schadensfälle).
5. In Übereinstimmung mit dem VDA erfolgt über eine logarithmische Normalverteilung die Annäherung an die empirische Verteilungsfunktion (VDA 2000). Die Güte der Approximation wird dabei über den quadratischen Fehler ausgedrückt.

Die approximierte Laufleistungsverteilung  $f(s)$  ist über eine logarithmische Normalverteilung unter Einbeziehung der Fahrstrecke  $s$ , Mittelwert  $\mu$  und Standardabweichung  $\sigma$  definiert:

$$f(s) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma s} e^{-\frac{(\ln s - \mu)^2}{2\sigma^2}} & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x \leq 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

Abbildung 4.9 zeigt exemplarisch den Verlauf der approximierten Laufleistungsverteilungen im A- und D-Segment. Diesel-Fahrzeuge legen demnach weitaus höhere Laufleistungen im Jahr zurück als Otto-Fahrzeuge.

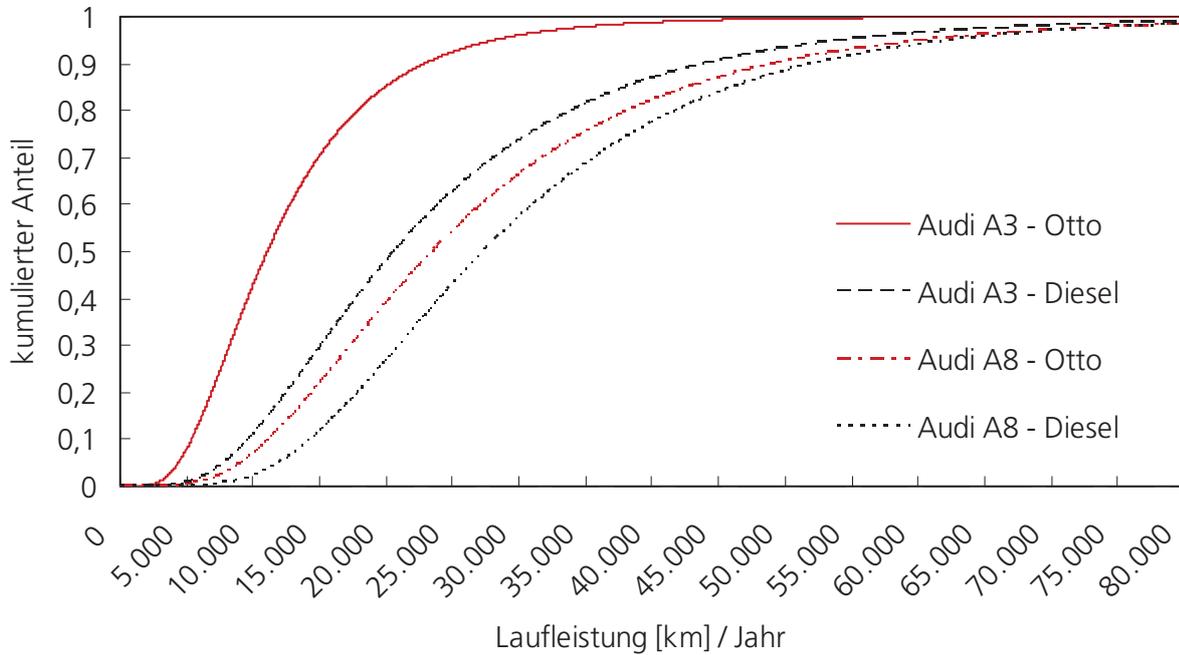


Abbildung 4.9: Laufleistungsverteilungen der Otto- und Diesel-Motorisierungen in den Segmenten A und D

#### 4.4.2 Entwicklung einer Langzeitprognose

Die Berechnung einer Laufleistungsverteilung stützt sich auf Gewährleistungsdaten, die einen Zeitraum von zwei Jahren abdecken. Durch die Kulanzgewährung liegen mitunter auch Ausfalldaten im dritten Betriebsjahr vor, danach reduziert sich die Datenbasis jedoch erheblich. Dies hängt damit zusammen, dass viele Kunden nach Ablauf der Gewährleistungsfrist freie Werkstätten aufsuchen und sich somit der Datenerhebung des Automobilherstellers entziehen. Es ist in diesem Fall nicht sichergestellt, dass die Daten der Vertragswerkstätten außerhalb des Gewährleistungszeitraums ein repräsentatives Kundenkollektiv abbilden. Für langfristige Laufleistungserhebungen sind deshalb Daten des Technischen Überwachungsvereins e.V. (TÜV), der DEKRA, des Allgemeinen Deutschen Automobilclubs e.V. (ADAC) oder ähnliche Quellen heranzuziehen, die in der Regel jedoch gleichermaßen keine vollständige Erhebung darstellen.

Weiterführende Untersuchungen auf Basis von langfristigen Felddaten konnten dennoch zeigen, dass die durchschnittliche jährliche Laufleistung von Fahrzeugen mit Otto-Motoren über mehrere Jahre nahezu konstant bleibt. Bei Dieselfahrzeugen nimmt die durchschnittli-

che jährliche Laufleistung in der Regel nach drei Jahren signifikant ab, da zahlreiche Fuhrparkfahrzeuge an Privatkunden weiterverkauft werden (Lang 2006). Im Einklang mit dieser Studie erfolgt im Rahmen der weiteren Untersuchungen dieser Arbeit bei Dieselfahrzeugen eine Reduzierung auf 75 Prozent der durchschnittlichen jährlichen Laufleistung nach dem dritten Betriebsjahr, während die Laufleistung bei Otto-Fahrzeugen einer linearen Entwicklung folgt. Unter Einbeziehung dieser Ergebnisse wird in Kapitel 6.3.1 eine Prognose langfristiger Laufleistungen auf Basis der neu berechneten Laufleistungsverteilungen durchgeführt.

Über die Berechnung der durchschnittlichen jährlichen Laufleistungsverteilung der Audi-Modelle wird eine Einschätzung der Fahrzeugnutzung in Kundenhand möglich. Diese Information lässt sich für einen modellreihenspezifischen Planungsstandard nutzen, der für verschiedene Fahrzeugklassen unterschiedliche Laufleistungen in der Erprobung definiert.

## 4.5 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der Zielsetzung, eine Aussage über die Qualität der Erprobung und den erbrachten Zuverlässigkeitsnachweis treffen zu können, sind zwei Lösungsansätze zu diskutieren. Zum einen existiert die Möglichkeit, über eine Systemmodellierung Einflussfaktoren und Wechselwirkungen auf die Gesamtfahrzeugzuverlässigkeit zu identifizieren, um dann anhand einer Sensitivitätsanalyse die Stärke des Hebels der Erprobung zu ermitteln (De Vries 2006). Über die Auswertung von Feldinformationen ließe sich so die Güte der Gesamtfahrzeugerprobung beurteilen. Alternativ ist die Entwicklung eines Zuverlässigkeitsmodells zu prüfen, das sich auf die Charakteristik der Erprobung stützt und daraus Zuverlässigkeitskenngrößen ableitet. Dies wiederum setzt eine Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen Erprobungsarten voraus.

Dass in dieser Arbeit dem zweiten Ansatz der Vorzug gegeben wird, ist darauf zurückzuführen, dass sich auf diese Weise Einflussgrößen zur Verbesserung des Zuverlässigkeitsnachweises in der Erprobung aufzeigen lassen. Über die Bestimmung der in das Modell einfließenden Streckenparameter und der Diskussion von Effizienz Kennzahlen sowie Laufleistungszielen wird das Augenmerk auf die für eine Erprobung relevanten Größen gelenkt. Welchen Einfluss die Erprobung auf den Zuverlässigkeitsnachweis durch die Variation der Eingangsgrößen des Zuverlässigkeitsmodells nehmen kann, wird in Kapitel 6 anhand konkreter Beispiele aufgezeigt.

Bevor nachfolgend der Gedanke einer optimalen Versuchsplanung aufgegriffen wird, hilft es, die in Kapitel 4 ermittelten Größen sowie deren weitere Verwendung in dieser Arbeit in Abbildung 4.10 zusammenfassend aufzuzeigen.

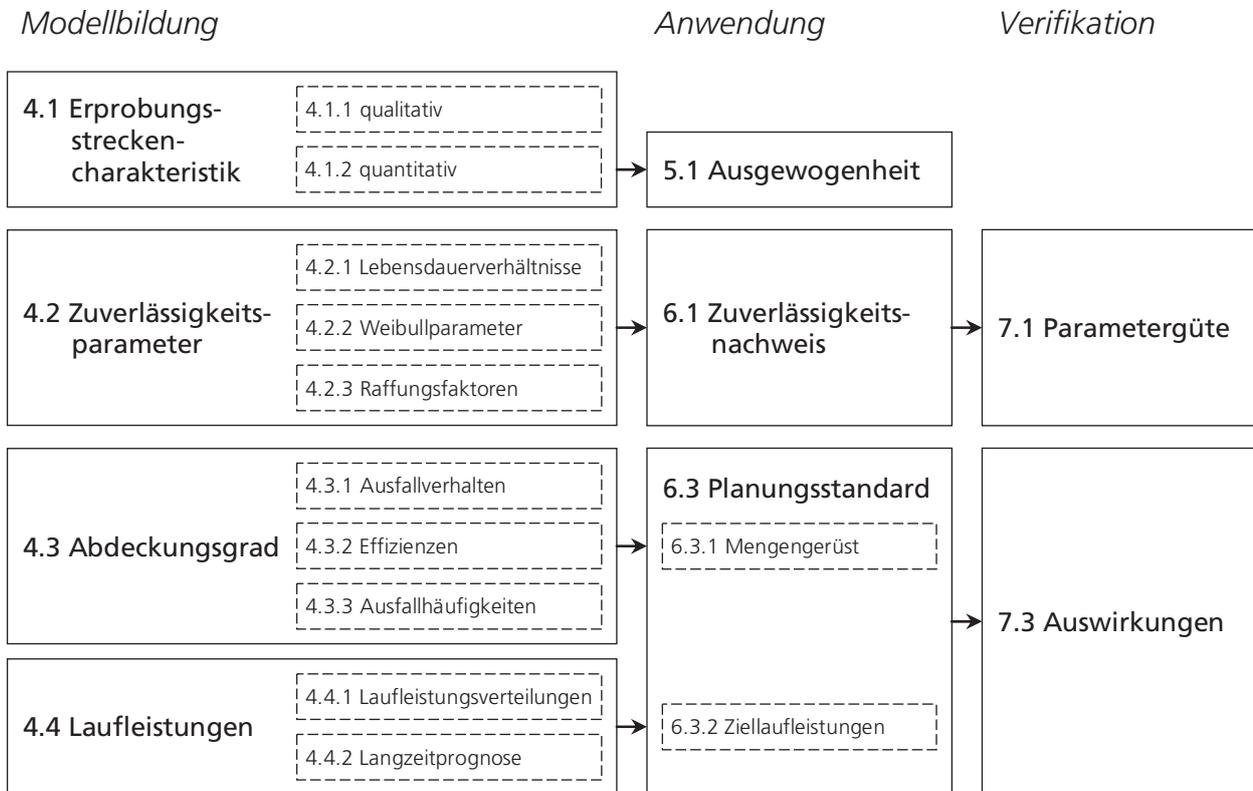


Abbildung 4.10: Eingangsgrößen des Zuverlässigkeitsmodells

## 5 Erprobungsplanung zur Zuverlässigkeitsentwicklung

---

Neben der Auseinandersetzung mit der Problemstellung, wie in der Gesamtfahrzeugerprobung ein aussagekräftiger Zuverlässigkeitsnachweis zu führen ist, ist der Frage nachzugehen, wie durch die Erprobungsplanung ein Beitrag zur Zuverlässigkeitsentwicklung geleistet werden kann. Denn nur über das gezielte Herbeiführen von Ausfällen über kundenrelevante Grenzbeanspruchungen und der nachfolgenden Korrektur im Konstruktionsprozess kann die Gesamtfahrzeugerprobung zur Steigerung der Zuverlässigkeit beitragen. Aus diesem Grunde werden die Erprobungsfahrzeuge in allen erdenklichen Betriebsituationen getestet, um die Vielfalt der Kundennutzung abzubilden und Erkenntnisse über die Belastungsgrenzen der Komponenten zu gewinnen. Hierbei wird das Spannungsfeld deutlich, dass die Erprobung zwar einerseits kundennah zu erfolgen hat, andererseits jedoch zur Abbildung des Extremkunden und im Hinblick auf die erwünschte zeitliche Raffung Grenzbelastungen darzustellen sind. Hinderlich erweist sich, dass diese Anforderungen nicht an gleichartige, sondern hinsichtlich ihrer Ausstattung höchst differenzierte Produkte gestellt werden. Die Erprobungsplanung muss somit ein breites Spektrum an Umgebungseinflüssen auf einer Vielzahl an Ausstattungsvarianten abbilden.

So liegt eine der Zielsetzungen der Gesamtfahrzeugerprobung darin, den Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Zuverlässigkeit von Fahrzeugkomponenten aufzuzeigen. Zu diesem Zweck werden Fahrzeuge in verschiedenen Klimazonen der Welt erprobt, um über das Ausfallverhalten einzelner Komponenten auf signifikante Umgebungs-

einflüsse zu schließen. Gilt es dabei den Einfluss eines einzelnen Faktors zu bestimmen, ist dieser isoliert von anderen Größen zu betrachten. Da Erprobungsergebnisse jedoch überwiegend aus kombinierten Erprobungsszenarien wie etwa einer Heierprobung mit abhängigen Wärme- und Luftfeuchtigkeitseinflssen vorliegen, ist die Variation eines einzelnen Faktors in der Regel nicht möglich.

Eine exakte Eingrenzung von Haupteinflussfaktoren wird von der Gesamtfahrzeugerprobung aber auch nicht gefordert. Stattdessen liegt das Interesse darin, eine möglichst breite Beanspruchung des Erprobungstrgers herbeizuführen, um potenzielle Auswirkungen möglichst vieler Faktoren auf die Zuverlässigkeit zu untersuchen. ber einen ausgewogenen Versuchsplan mit hoher Testabdeckung kann hierbei sichergestellt werden, dass das Fahrzeug einem breiten Spektrum an Stressfaktoren ausgesetzt und gleichzeitig ein Maximum an Wechselwirkungen abgeprüft wird.

Die Versuchsplanung eignet sich zudem dafür, der kontinuierlich ansteigenden Variantenvielfalt in der Fahrzeugerprobung gerecht zu werden. Aufgrund der zunehmenden Anzahl an Derivaten und der breiten Ausstattungsvielfalt ist es heute nicht mehr möglich, jede kundenrelevante Antriebs- und Ausstattungskombination zu erproben. Vor diesem Hintergrund gilt es, durch eine systematische Erprobungsplanung eine möglichst gute Durchmischung der Attribute der Erprobungsträger herzustellen, sodass mit einer minimalen Anzahl an Fahrzeugen die einzelnen Motor- und Getriebevarianten in möglichst gleicher Anzahl und in sinnvoller Kombination erprobt werden.

## 5.1 Ausgewogenheit der Erprobungsstreckencharakteristik

In Kapitel 4.1 wurde bereits gezeigt, über welche Faktoren sich die Erprobungsstrecken der Audi AG voneinander abgrenzen lassen. Nun gilt es zu untersuchen, in wie weit sich die jeweiligen Erprobungsszenarien ähneln bzw. ob Defizite im Teststreckendesign vorliegen. Dabei ist zu beachten, dass einzelne Teststreckenparameter sehr stark korrelieren und sich daher nicht unabhängig voneinander variieren lassen.

In der Erprobung sind Versuchspläne mit hoher Testabdeckung von Interesse, d. h. Versuchspläne mit einer hohen Anzahl unterschiedlicher Faktorstufenkombinationen. Im Idealfall bilden diese sämtliche Faktorstufen in gleicher Häufigkeit ab. Abbildung 5.1 zeigt in der linken Hälfte ein orthogonales Feld, das den genannten Anforderungen gerecht wird (vgl. Kapitel 3.2.3.3). Dieser Versuchsanordnung gilt es nun eine Eigenschaftsmatrix der wich-

tigste Erprobungsstrecken mit den Hauptparametern Vertikal-, Quer- und Längsbeschleunigung sowie Temperatur gegenüberzustellen. Die Streckenparameter aus Kapitel 4.1.2 sind dabei entsprechend ihrer Ausprägung in drei Stufen auf das Intervall  $[-1,1]$  skaliert. Anhand der Markierungen werden nun die Abweichungen vom idealen orthogonalen Feld aufgezeigt. Dabei lässt sich anhand der logarithmierten normierten Determinante eine Aussage über die Güte des Erprobungsstreckendesigns aus Sicht der Versuchsplanung treffen.

Orthogonales Feld  
 $L_9(3^4)$

A	B	C	D	Vertikalbeschleunigung	Querbeschleunigung	Längsbeschleunigung	Temperatur
1	1	0	-1	1	1	0	0
0	1	-1	0	0	1	0	0
-1	0	0	0	-1	0	0	0
0	-1	0	1	0	-1	-1	1
-1	1	1	1	0	1	1	1
0	0	1	-1	-1	-1	0	0
1	-1	1	0	-1	0	1	0
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	-1	1	1	0	0	1

Schlechtwegekurs  
Wechselkurs  
Innenkurs  
Hochgeschwindigkeitskurs  
Rennstrecke  
Öffentliche Straße  
Stadt  
Kaltland  
Splitt

$ X^T X $	1296	$ X^T X $	153
ND	-0,18	ND	-0,41

Abbildung 5.1: Ausgewogenheit der Erprobungsstreckencharakteristik

Legt man die derzeitige Erprobungsstreckencharakteristik zu Grunde, wird deutlich, dass ein großer Teil der Erprobung unter dem Einfluss einer geringen bis mittleren Vertikalbeschleunigung in gemäßigten Klimazonen durchgeführt wird. Dennoch zeigt die Gegenüberstellung, dass die Umgebungseinflüsse gezielt variiert werden und die Faktorstufenkombinationen für praxisnahe Verhältnisse und unter Berücksichtigung der gegenseitigen Korrelationen nah an orthogonale Felder heranreichen. Überdies ist kritisch zu hinterfragen, ob die aus Sicht der Versuchsplanung und somit unter Effizienzgesichtspunkten optimalen Kombinationen auch im Hinblick auf die spätere Kundennutzung von Bedeutung sind. Insgesamt bieten somit klassische Versuchspläne Anhaltspunkte zur Beurteilung der Ausgewogenheit einer Gesamtfahrzeugerprobung. Dennoch ist die Zusammenstellung des Teststreckendesigns in erster Linie über technische Zusammenhänge zu begründen. Aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten zwischen den Streckenparametern lassen sich ohnehin nur bedingt Freiheitsgrade für eine Optimierung erschließen.

## 5.2 Variantenoptimale Erprobungsplanung

In den vergangenen Jahrzehnten konnte in der Automobilindustrie eine Verschiebung von einem Anbietermarkt zu einem nachfrageseitig getriebenen Markt beobachtet werden. In der Folge müssen Fahrzeughersteller zunehmend differenziertere Kundenanforderungen bedienen, was sich in einer hohen Anzahl an Individualisierungsmöglichkeiten widerspiegelt. So wird nicht mehr im Sinne Henry Fords eine einzige Grundlackierung angeboten, vielmehr kann der Kunde unter zahlreichen Lackierungen wählen und gegen Aufpreis sogar jede beliebige Farbe für sein Fahrzeug bestellen. Allein die Betrachtung möglicher Sitzkonfigurationen zeigt die weit reichende Variantenvielfalt, die es zu entwickeln, erproben, produzieren und vertreiben gilt. Je nach Fahrzeugklasse bietet Audi bei den Sitzen gegenwärtig bis zu drei Hauptvarianten an: den Normalsitz, Sportsitz und Komfortsitz. Diese Varianten zeichnen sich wiederum durch zahlreiche Wahlmöglichkeiten hinsichtlich Farbe und Ausgestaltung des Stoff- oder Lederbezugs, der manuellen oder elektrischen Sitzeinstellung, dem Vorhandensein einer Lendenwirbelstütze, Sitzheizung, Nackenheizung, Sitzbelüftung oder Kindersitzbefestigung sowie unterschiedlicher Ablagen- und Lichtpakete aus, sodass allein die Anzahl an unterschiedlichen Sitzvarianten die Anzahl der Fahrzeuge in der Gesamtfahrzeugerprobung bei weitem übersteigt.

Dieser Situation Rechnung tragend, liegt der Fokus der Gesamtfahrzeugerprobung auf der Erprobung der wichtigsten Hauptbaugruppen. Darunter fallen die unterschiedlichen Karosserieformen, Motorisierungen, Getriebe, Fahrwerke sowie Fahrerassistenz- und Infotainment-Systeme, deren umfassende Absicherung höchste Priorität besitzt. Beim Aufbau der Erprobungsfahrzeuge wird deshalb insbesondere auf die Variation dieser Baugruppen geachtet. Die Abbildung möglichst vieler unterschiedlicher Ausstattungsvarianten im Innenraum erfolgt erst im zweiten Schritt, gleichwohl wissend, dass nicht jede zulässige Kombination im Gesamtfahrzeug dargestellt werden kann.

Es besteht ferner die Möglichkeit, beim Aufbau der Erprobungsfahrzeuge auf prognostizierte Einbauraten zurückzugreifen. Dies folgt der Überlegung, dass häufig bestellte Ausstattungslinien in besonderer Breite erprobt werden sollten. Es ist jedoch gleichfalls zu bedenken, dass teure Ausstattungsfeatures mit teilweise geringen Einbauraten umfassend zu erproben sind, um nicht über eine unzureichend erprobte Qualität die Markentreue sensibler Käuferschichten zu gefährden. Gleiches gilt für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme, die ebenfalls einer tief greifenden Erprobung bedürfen, um eine Gefährdung des Kunden in allen erdenklichen Betriebssituationen auszuschließen.

Unter Einbeziehung der genannten Gesichtspunkte und im Hinblick auf die Anforderungen der Produkthaftung ist eine gleichrangige Erprobung aller Hauptbaugruppen sicherzustellen. Dabei darf die Kombination nicht dem Zufall überlassen sein, sondern muss einer Systematik folgen (vgl. Kapitel 2.4). Diese hat im Unternehmensinteresse sicherzustellen, dass insbesondere die sicherheits- und zuverlässigkeitsrelevanten Fahrzeugteile im gegenseitigen Funktionszusammenhang erprobt werden. Die statistische Versuchsplanung eignet sich hierbei als Instrument zur zielgerechten Auswahl der Faktorstufenkombinationen.

### 5.2.1 Anwendung der d-optimalen Versuchsplanung

Der Einfluss unterschiedlicher Ausstattungsvarianten auf die Zuverlässigkeit des Gesamtfahrzeugs wird nachfolgend über eine Regression zum Ausdruck gebracht. Ein d-optimaler Versuchsplan ist dann, wie in Kapitel 3.2.3.1 erörtert, dadurch charakterisiert, dass das Volumen des gemeinsamen Vertrauensbereichs der Regressionskoeffizienten so klein wie möglich ist (Kleppmann 2006). Übertragen auf die Gesamtfahrzeugerprobung besagt dies, dass ein Versuchsplandesign ausgewählt wird, anhand dessen der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Aufbauzuständen und der Zuverlässigkeit mit der geringsten möglichen Fehlerstreuung bestimmt werden kann.

Der Einsatz d-optimaler Versuchspläne bietet den Vorteil, dass mehrstufige, ordinal skalierte Faktoren wie unterschiedliche Fahrwerksabstimmungen mit einbezogen und eine nach Anläufen gestaffelte Erprobungsplanung aufgestellt werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Gesamtfahrzeugerprobung im Gegensatz zu den Annahmen der klassischen Versuchsplanung nicht alle Faktorstufenkombinationen im vollständigen Zustandsraum erreichbar sind, d. h. nur ausgewählte Ausstattungsvarianten lassen sich durch den Kunden bestellen. Aus dem Aggregat-Programm folgt die Teilmenge an zulässigen Faktorstufenkombinationen, die Einzug in das Erprobungsmodell halten (siehe Abbildung 5.2).



Abbildung 5.2: Eingeschränkter Zustandsraum der Fahrzeugkonfiguration

Zur Bestimmung einer variantenoptimalen Erprobungsplanung werden zunächst die für die Erprobung maßgeblichen Charakteristika eines Fahrzeugs ausgewählt. Dazu zählen das Fahrzeugprojekt, das Aufschluss über die Karosserieform gibt, die Motorisierungen einschließlich der gesetzlichen Abgaseinstufung, die Getriebe- und Fahrwerksvarianten, die Lenkungsanordnung (Links- bzw. Rechtslenker) sowie die Infotainment-Systeme. Der Katalog ist beliebig erweiterbar, im Hinblick auf die beschränkte Anzahl an Versuchsträgern ist jedoch eine Konzentration auf die Hauptbaugruppen zweckdienlich. Jeder der genannten Faktoren besitzt eine definierte Anzahl an Faktorstufenausprägungen, die sich über die technische Produktbeschreibung bestimmen lassen. So folgen für den Faktor Getriebe alle zulässigen Getriebearten als Faktorstufenausprägungen, d. h. alle Handschaltgetriebe, Stufenautomaten, Stufenlos- und Direktschaltgetriebe unterschiedlicher Leistungsklassen innerhalb der betrachteten Fahrzeugfamilie.

Um das Prinzip einer d-optimalen Versuchsplanung anwenden zu können, werden die qualitativen Faktorstufenausprägungen zunächst nummeriert, um die jeweiligen Ausprägungen dann äquidistant auf das Intervall  $[-1,1]$  zu skalieren. Dies erfolgt über die Normierung  $x'$  mit  $x_m$  als arithmetisches Mittel zwischen der Untergrenze  $x_u$  und Obergrenze  $x_o$  der Faktorstufen:

$$x' = \frac{x - x_m}{0,5(x_o - x_u)}. \quad (5.1)$$

Während eine einheitliche Skalierung die Vergleichbarkeit der Faktoren untereinander herstellt, begründen sich die identisch gewählten Abstände dadurch, dass alle qualitativen Ausprägungen eines Faktors als gleichrangig anzusehen sind. Jede Faktorstufenausprägung erhält somit eine Codierung auf dem Intervall  $[-1,1]$ , sodass jedem Erprobungsfahrzeug eine Ziffernfolge entsprechend seiner Hauptbaugruppen zugeordnet werden kann (siehe Tabelle 5.1). Hierbei ist zu beachten, dass es technisch und wirtschaftlich bedingte Einschränkungen hinsichtlich der Zusammenstellung der Hauptbaugruppen gibt. So kann beispielsweise ein Getriebe mit begrenzter Momentenübertragung nicht mit einem drehmomentstarken Motor kombiniert werden, der wiederum unter Marketinggesichtspunkten den Einsatz eines Sportfahrwerks erzwingt. Zur Ermittlung der zulässigen Faktorstufenkombinationen wird deshalb die Modellbeschreibung Technik bzw. Modellbeschreibung Vertrieb herangezogen. Während im zuerst genannten die technisch möglichen Kombinationen aufgelistet sind, liefert die Modellbeschreibung Vertrieb die unter Marketingge-

sichtspunkten sinnvollen Ausstattungskombinationen. Einhergehend mit der Zielsetzung einer kundennahen Erprobung ist die Modellbeschreibung Vertrieb eine wichtige, im Entwicklungsprozess jedoch erst spät verfügbare Bezugsgröße für den Aufbau der Erprobungsfahrzeuge. Zur Umsetzung eines d-optimalen Versuchsplandesigns bietet die Modellbeschreibung Technik grundsätzlich ein größeres Potenzial zur Erschließung von Synergien in der Erprobungsplanung.

Die im klassischen Sinne der Versuchsplanung wiederholte Versuchsdurchführung gilt es nun anschaulich über den Einsatz mehrerer Erprobungsfahrzeuge zu ersetzen. Somit wird eine Flotte von insgesamt  $n$  Fahrzeugen mit  $f$  Hauptbaugruppen unter Berücksichtigung der Ausstattungszwänge aufgebaut, sodass in Anlehnung an Kapitel 3.2.3.1 eine  $(n \times f)$ -Matrix  $X$  der normierten, zulässigen Faktorstufenkombinationen in der Gesamtfahrzeugerprobung folgt.

Über einen Vertauschungsalgorithmus ähnlich der sequentiellen Methode nach Dykstra (Dykstra 1971) wird nun ein d-optimaler Versuchsplan generiert. Die Anzahl der Erprobungsfahrzeuge kann dabei beliebig vorgegeben werden. Aus dem Set an zulässigen Faktorstufenkombinationen wählt der Algorithmus diejenigen Einträge aus, die zur Maximierung der Determinante von  $X^T X$  beitragen. Je nach Anzahl der einbezogenen Faktoren ist die theoretische Variantenvielfalt zwar sehr hoch, die tatsächlich durch den Kunden bestellbare Variantenanzahl reduziert sich bei ausschließlicher Betrachtung der Hauptbaugruppen jedoch erheblich. Der Algorithmus zieht somit einen begrenzten Pool an Fahrzeugen heran, sodass gewährleistet ist, dass der iterative Prozess zu einem Optimum führt.

## 5.2.2 Umfang und Staffelung der Erprobungsplanung

Der Rahmen der Erprobungsplanung wird in der Regel über den Umfang einer Familie technisch artverwandter Fahrzeuge vorgegeben. So existiert eine Gesamtplanung für die zuerst einsetzenden Fahrzeuge des so genannten modularen Längsbaukastens, welche Audi A4 Limousine, Audi A4 Avant, Audi A5 Coupé, Audi A5 Sportback, Audi A5 Cabrio und Audi Q5 einschließlich weiterer Derivate wie etwa die Allroad- oder die sportlich ausgerichteten S- und RS-Modelle umfasst. Offensichtlich hat die Fülle der Fahrzeugprojekte eine zeitliche Staffelung der Anläufe zur Konsequenz, zudem ziehen Modellpflegen und Markteinführungen im Ausland weitere Folgeanläufe nach sich, die es bei der Erprobungsplanung zu berücksichtigen gilt. Die d-optimale Versuchsplanung bietet hier die Möglichkeit,

zunächst die Fahrzeuge für den ersten Modellanlauf zu ermitteln und bei der Ausplanung der weiteren Anläufe bereits erprobte Fahrzeuge mit einzubeziehen.

Wie eingangs erwähnt, sollten in das Erprobungsmodell in erster Linie die wichtigen Hauptbaugruppen einfließen. Dessen ungeachtet ist es denkbar, dass weitere d-optimale oder teilfaktorielle Versuchspläne (vgl. Kapitel 3.2.3.3) für andere Ausstattungsbereiche erstellt und mit der Planung der Hauptbaugruppen zusammengeführt werden. Dies hat zum Vorteil, dass die Menge an zulässigen Faktorstufenkombinationen beherrschbar bleibt. Gesetzt den Fall, es existieren drei Haupt- und drei Nebenbaugruppen mit zwei, drei bzw. vier Faktorstufenausprägungen, so müssten im Rahmen einer Gesamtplanung  $(2 \times 3 \times 4)^2 = 576$  theoretische Kombinationen vorgehalten werden. Zwei separate Planungen führen zu lediglich  $2 \times (2 \times 3 \times 4) = 48$  Faktorstufenkombinationen. Die beschriebene Vorgehensweise ist jedoch nur dann anwendbar, wenn keine Abhängigkeiten zwischen den betrachteten Baugruppen existieren. So ist denkbar, dass ein Hochleistungsmotor (Hauptfaktor) eine spezielle Ausstattungslinie im Innenraum (Nebenfaktor) erzwingt, sodass eine Abhängigkeit vorliegt.

Zur Bestimmung der erforderlichen Mindestanzahl an Erprobungsfahrzeugen sind die Erkenntnisse aus der Zuverlässigkeitstheorie mit einzubeziehen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass sich die Stichprobengröße zum Nachweis einer definierten Zuverlässigkeit auf eine Faktorstufenausprägung bezieht. Da Erprobungsfahrzeuge nicht komplett identisch aufgebaut sind, muss sichergestellt sein, dass die einzelnen Komponenten wiederholt in unterschiedlichen Fahrzeugen erprobt werden. Die d-Optimalität sorgt dabei für die Ausgewogenheit innerhalb der Planung. In die Aufstellung des Mengengerüsts sowie die Zuordnung zu den einzelnen Erprobungsstrecken gilt es zusätzlich eine Analyse des Ausfallverhaltens mit einzubeziehen (vgl. Kapitel 4.3.1). Auf diese Weise ist gewährleistet, dass ein gezielter Beitrag zur Zuverlässigkeitsentwicklung geleistet wird, indem über eine systematische Steuerung der Umgebungseinflüsse Ausfälle in Grenzbereichen der Kundennutzung herbeigeführt werden.

Die genannten Anforderungen fließen in einen Planungsstandard ein, der das Mengengerüst für jede Einsatzart und Hauptbaugruppe entsprechend des Produktreifegrades und der Produktkomplexität festlegt.

## 5.3 Einbeziehung des Planungsstandards

Die Aufgabe der Erprobungsplanung beschränkt sich nicht nur darauf, über einen geeigneten Aufbau der Erprobungsfahrzeuge die Variantenvielfalt abzubilden. Es besteht gleichzeitig die Notwendigkeit, über eine Systematik die Erprobung wichtiger Baugruppen und Ausstattungsumfänge unter verschiedenartigen Umgebungsbedingungen sicherzustellen.

In der Praxis hat sich bei Audi die Anwendung eines Planungsstandards bewährt, der für jede Hauptbaugruppe je nach vorliegendem Reife- und Komplexitätsgrad Mindestanforderungen an die Erprobung stellt, denen über die Zuordnung von Erprobungsträgern zu Teststrecken nachzukommen ist. Der Standard besitzt den immanenten Vorteil, dass er kein gleich bleibendes Mengengerüst für die Erprobung einer Fahrzeugfamilie definiert, sondern variable Größen unter Berücksichtigung des technischen Fortschritts und des Umfangs des Produktprogramms folgen. Im Wesentlichen bezieht sich der Standard dabei auf Erfahrungswerte und erlangt somit eine Legitimation über die Betriebsbewährtheit. Gleichwohl ist es vorstellbar, dass in der Erprobung eine Übererfüllung von Kundenanforderungen erfolgt oder Synergien nicht vollständig ausgeschöpft werden. Folgerichtig ist das derzeit zugrunde liegende Regelwerk in Kapitel 6.3 kritisch zu hinterfragen.

### 5.3.1 Abbildung der Entwicklungskomplexität

Dass ein komplexes, geregeltes Luftfederfahrwerk umfangreicher zu erproben ist als ein technisch bewährtes Stahlfederfahrwerk, erschließt sich ohne weitere Kommentierung. In der Erprobung ist es deshalb zweckmäßig, Komplexitäten einzuführen, um das Risiko einer Neuentwicklung angemessen abzubilden. Jeder Faktorstufenausprägung werden deshalb Komplexitätsfaktoren zugeordnet, die eine Entsprechung im Planungsstandard finden (siehe Tabelle 5.1). So gehört jeder Motorentyp entsprechend seines Innovationsgrades einer der drei nachfolgenden Kategorien an: hoher Neuigkeitsgrad, mittlerer Neuigkeitsgrad oder Modellpflege. Die Kategorisierung unterliegt hierbei keinen exakt umrissenen Regeln, sondern folgt aus dem technischen Zusammenhang. Dennoch können Anhaltspunkte existieren, im genannten Beispiel fallen etwa Motoren mit einer neuen gesetzlichen Abgaseinstufung in die niedrigste Klasse der Modellpflege-Motoren. Entsprechend der Einordnung ist das Mengengerüst auf den jeweiligen Erprobungsstrecken definiert. Infolgedessen wird zur Erprobung von Fahrzeugprojekten mit hohem Innovationsgrad auch eine größere Fahrzeugflotte benötigt.

Projekt	$f_1$	$k_1$	Motor	$f_2$	$k_2$
A4 Limousine	-1,00	Derivat	R4 1.8 TFSI	-1,00	mittlerer Neuigkeitsgrad
A4 Avant	-0,60	Derivat	R4 2.0 TFSI	-0,85	mittlerer Neuigkeitsgrad
A5 Sportback	-0,20	Derivat	V6 3.2 FSI	-0,69	mittlerer Neuigkeitsgrad
A5 Coupé	0,20	Plattform	R4 2.0 TDI CR	-0,54	hoher Neuigkeitsgrad
A5 Cabrio	0,60	Derivat	V6 3.0 TDI CR	-0,38	hoher Neuigkeitsgrad
Q5	1,00	Derivat	[...]	[...]	[...]

Tabelle 5.1: Zuordnung von Entwicklungskomplexitäten

### 5.3.2 Berücksichtigung unterschiedlicher Produktreifegrade

Die Erkenntnisse, die bei der Erprobung eines Fahrzeugs gewonnen werden, sind abhängig vom Reifegrad des Fahrzeugs. Entsprechend erfolgt in der Fahrzeugentwicklung eine Unterscheidung zwischen sechs unterschiedlichen Baustufen (vgl. Kapitel 4.3.3). Um die Komplexität der Erprobungsplanung nicht unnötig zu erhöhen, werden im Planungsstandard einerseits die frühen Fahrzeuge Technikträger und Prototyp sowie andererseits die seriennahen Fahrzeuge Vorserienfreigabefahrzeuge, Produktionsversuchsserie, Null-Serie und Serie zusammengefasst. Für jede Komplexitätsstufe werden zwei unterschiedliche Mengengerüste für frühe und späte Fahrzeuge eingeführt. Die Schwerpunktlegung der Erprobung orientiert sich dabei an der zugrunde liegenden Baugruppe. Ein Spannungsfeld liegt darin, dass frühe Erprobungsfahrzeuge häufig eine unzureichende Aufbauqualität aufweisen und Zuverlässigkeitsaussagen deshalb nur bedingt abgeleitet werden können. Demgegenüber ist die Erprobung von späten Fahrzeugen in sofern kritisch, als dass die gewonnenen Erkenntnisse erst sehr spät in den Entwicklungsprozess zurückfließen. Entsprechend sind in der Gesamtfahrzeugerprobung Fahrzeuge aller Baustufen einzusetzen.

Planungsstandard P	Baustufe	Einsatzart		
		EA 1	EA 2	EA 3
Plattform	Prototyp	2	2	0
	Vorserie	3	4	0
Derivat	Prototyp	1	0	0
	Vorserie	1	2	0
Motor hoher Neuigkeitsgrad	Prototyp	0	3	0
	Vorserie	2	3	1
Motor mittlerer Neuigkeitsgrad	Prototyp	0	2	1
	Vorserie	1	1	1

Tabelle 5.2: Auszug aus dem Planungsstandard der Gesamtfahrzeugerprobung

In Tabelle 5.2 ist ein Auszug aus dem Planungsstandard abgebildet, der die Mindestanzahl an Erprobungsfahrzeugen auf den Erprobungsstrecken festlegt. Mehrfachnutzungen von Fahrzeugen sind dabei zur Erschließung von Synergien mitunter zulässig, bei exklusiven Einsatzarten wie Schlechtwege- oder Wechselkurs existiert diese Möglichkeit jedoch nicht.

## 5.4 Optimierungsansatz

Die Erprobung von Fahrzeugen unter Berücksichtigung der zuvor genannten Anforderungen erfordert die Lösung eines Optimierungsproblems. Insgesamt sind dabei drei konkurrierende Zielsetzungen zu berücksichtigen:

- die Erzeugung eines d-optimalen Versuchsplandesigns
- die grundsätzliche Berücksichtigung der Regeln eines Planungsstandards
- die Minimierung der Anzahl an Erprobungsfahrzeugen

Die Aufgabe besteht darin, über einen Optimierungsalgorithmus iterativ einen Erprobungsplan aus den zulässigen Einsatzarten und Faktorstufenkombinationen zu berechnen, der die genannten Anforderungen bestmöglich vereint. Die Optimalität definiert sich hierbei über drei Zielgrößen, dem noch zu definierenden Erfüllungsgrad des Planungsstandards, der Determinante von  $X^T X$  des Versuchsplans  $X$  und der Anzahl der Erprobungsfahrzeuge  $n$ . Ein optimaler Versuchsplan ist dann gefunden, wenn alle Regeln des Planungsstandards mit einer minimalen Anzahl an Fahrzeugen abgedeckt werden und bei mehreren zulässigen Lösungen der Versuchsplan mit der maximalen Determinante von  $X^T X$  ausgewählt wird.

Zur mathematischen Beschreibung dieses Zusammenhangs ist zunächst der Erfüllungsgrad des Planungsstandards zu definieren. Aus dem allgemeinen Planungsstandard  $P$  (siehe Tabelle 5.2) wird dazu ein projektspezifischer Standard  $S$  entsprechend der Charakteristik der zu erprobenden Fahrzeugfamilie abgeleitet. Sind beispielsweise nach dem allgemeinen Standard Motoren mit hohem Neuigkeitsgrad in drei Technikträgern auf der Teststrecke Wechselkurs zu erproben, so erhöht sich die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge im projektspezifischen Standard auf neun, sofern drei komplett neue Motoren mit dem ersten Fahrzeuganlauf einsetzen. Der projektspezifische Planungsstandard  $S$  gibt somit Auskunft über die Erprobungshäufigkeit der einzelnen Baugruppen, die es nun synergetisch in den zur Verfügung stehenden Erprobungsfahrzeugen unterzubringen gilt.

Den Sollwerten aus dem Planungsstandard sind Istwerte gegenüberzustellen, die die Anzahl der tatsächlich in der Erprobung abgebildeten Baugruppen widerspiegeln. Da Erprobungsfahrzeuge teilweise mehrfach genutzt werden können, ergeben sich insgesamt  $m$  Matrizen entsprechend der maximalen Anzahl an möglichen Fahrzeugeinsätzen. Die Erprobungsmatrizen  $E_m$  als variable Steuerungsgrößen besitzen dabei die gleiche Dimension wie der projektspezifische Standard  $S$ . Um die Diskrepanz zwischen Soll- und Ist-Planung erfassen zu können, erfolgt die Einführung einer Differenzmatrix  $D$ :

$$D = S - \sum_{k=1}^m E_k . \quad (5.2)$$

Sie beschreibt die Abweichung der für die Erprobung geplanten Fahrzeugausstattungen von den Anforderungen des projektspezifischen Planungsstandards. Besitzt die Matrix  $D$  positive Elemente, so wurden nicht alle Regeln des Planungsstandards vollständig umgesetzt. Umgekehrt liefern negative Elemente ein Indiz dafür, dass unter Umständen Ausstattungsumfänge eingeplant wurden, die nicht durch den Standard eingefordert worden sind. An dieser Stelle zeigt sich, dass das Ziel der Optimierung nicht in der vollständigen Angleichung aller Einträge der Differenzmatrix auf Null liegen kann. Denn wird durch den Planungsstandard der Aufbau eines Fahrzeugs mit Luftfederfahrwerk gefordert, so führt dieses Fahrzeug gleichzeitig weitere Baugruppen mit sich, die nach Vorgabe des Standards ggf. nicht mehr zwingend zu erproben sind. Es wird deutlich, dass über den intelligenten Aufbau der Erprobungsfahrzeuge möglichst viele Regeln des Planungsstandards in einem Fahrzeug abzubilden sind, sodass die Anzahl der Erprobungsträger minimiert wird. Ein Optimum hinsichtlich des Erfüllungsgrades des Planungsstandards liegt somit vor, wenn die Unterplanung (Summe der positiven Einträge in  $D$ ) innerhalb der Differenzmatrix auf Null reduziert und gleichzeitig ein Minimum hinsichtlich der Überplanung (Summe der Beträge der negativen Einträge in  $D$ ) erzielt worden ist. Werden die Zielsetzungen einer minimalen Fahrzeuganzahl  $n$  und einer maximalen Determinante von  $X^T X$  mit einbezogen, folgt ein so genanntes Pareto-Optimierungsproblem mit mehreren Zielgrößen. Sind die Zielgrößen als gleichrangig anzusehen, ist eine pareto-optimale Lösungsmenge zu bestimmen. Diese ist darüber charakterisiert, dass keine Größe verbessert werden kann, ohne eine andere zu verschlechtern. Sie bildet somit die Menge optimaler Kompromisse ab. Pareto-Optimierungsprobleme lassen sich in monokriterielle Probleme überführen, indem die einzelnen Teilprobleme gewichtet und in eine gemeinsame Zielfunktion überführt werden (Ehrgott 2000).

Übertragen auf den Gesamtzusammenhang folgt somit das Optimierungsproblem

$$\begin{aligned} \min & \left[ v_1 n + v_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^f (d_{ij})_- - v_3 |X^T X| \right] \\ \text{u.d.N. } & d_{ij} \leq 0 \quad \forall i, j \\ & v_i \geq 0 \quad \forall i \end{aligned} \quad (5.3)$$

unter Einbeziehung der negativen Elemente der Matrix D

$$(d_{ij})_- = \begin{cases} 0 & \text{für } d_{ij} > 0 \\ -d_{ij} & \text{für } d_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Die Matrixelemente  $d_{ij}$  berechnen sich entsprechend Gleichung (5.2) zu

$$d_{ij} = s_{ij} - \sum_{k=1}^m e_{ijk} \quad \forall i, j. \quad (5.5)$$

Die unterschiedlichen Dimensionen der Zielgrößen setzen eine Gewichtung der Teilprobleme voraus. Die Wahl der Gewichtungsfaktoren  $v_i$  erfolgt dabei subjektiv, sodass auch eine Priorisierung von Zielgrößen abgebildet werden kann. Alternativ lassen sich die einzelnen Teilprobleme nacheinander lösen, wobei hierzu ebenfalls die Festlegung einer Rangfolge notwendig ist.

Die Ziele in der Gesamtfahrzeugerprobung sind als nicht gleichrangig einzustufen. Die Erfüllung des Planungsstandards mit einer minimalen Fahrzeuganzahl genießt höchste Priorität, erst dann folgt die Berücksichtigung des Determinantenkriteriums. Diesen Zusammenhang bringt das nachfolgende Optimierungsproblem zum Ausdruck:

$$\begin{aligned} \min & \left[ n^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^f (d_{ij})_- \right] \\ \text{u.d.N. } & d_{ij} \leq 0 \quad \forall i, j \end{aligned} \quad (5.6)$$

Um der minimalen Fahrzeuganzahl das höchste Gewicht einzuräumen, fließt die Größe im Quadrat ein. Die Minimierung der Überplanung ist ein untergeordnetes Ziel, da sie mit der Forderung einer geringen Fahrzeuganzahl einhergeht. Dennoch wird sie zur Berechnung des Erprobungsplans benötigt, da der Optimierungsalgorithmus Fahrzeuge ohne Erprobungsbedarf anhand der Überplanung identifiziert. Der Ausschluss positiver Matrixelemente  $d_{ij}$  als Nebenbedingung der Optimierung wiederum stellt sicher, dass alle Regeln des Pla-

nungsstandards erfüllt werden. Sofern sich mehrere zulässige Lösungen mit einer identischen Anzahl an Erprobungsfahrzeugen bestimmen lassen, wird in einem weiteren Schritt derjenige Versuchsplan ausgewählt, der dem Determinantenkriterium

$$\max |X^T X| \tag{5.7}$$

genügt. Das Kriterium der d-Optimalität steht somit hinter den Forderungen des Planungsstandards an. Da jedoch zur Erfüllung des Regelwerks innerhalb der ersten Iteration des Optimierungsalgorithmus ein d-optimaler Plan herangezogen wird (vgl. Kapitel 5.4.1), erfolgt die Abbildung der meisten Regeln auf einem unter Variantengesichtspunkten gut durchmischten Fahrzeugpool. Tabelle 5.3 zeigt exemplarisch einen Auszug aus einem optimalen Erprobungsplan. Die Faktorstufencodierung erfolgt dabei analog Tabelle 5.1.

D-optimaler Versuchsplan			Einsatzart			Baustufe	Projekt	Motor	Getriebe
-0,60	-0,54	-0,33	EA 3			Prototyp	A4 Avant	R4 2.0 TDI	Handschalter
0,20	-0,69	-1,00	EA 1	EA 2	EA 3	Vorserie	A5 Coupé	V6 3.2 FSI	Stufenautomat
1,00	-0,38	-0,67	EA 2	EA 3		Prototyp	Q5	V6 3.0 TDI	Direktschaltgetriebe
0,60	-1,00	1,00	EA 1	EA 2		Prototyp	A5 Cabrio	R4 1.8 TFSI	Stufenlosgetriebe

Tabelle 5.3: Auszug aus dem optimalen Erprobungsplan

Auch monetäre Gesichtspunkte lassen sich in die Betrachtungen mit einbeziehen. Hierzu können Aufwendungen für Erprobungsträger oder Betriebskosten auf den jeweiligen Erprobungsstrecken in der Zielfunktion abgebildet werden. Sinnvoller erscheint es jedoch, finanzielle Rahmenbedingungen über den Planungsstandard und somit durch die Festlegung des Mengengerüsts in Kapitel 6.3.1 einfließen zu lassen.

### 5.4.1 Optimierungsalgorithmus

Der Entwurf einer neuen Erprobungsplanung für eine Fahrzeugfamilie erfordert zunächst die Zusammenstellung folgender Eingangsinformationen:

- die zu berücksichtigenden Faktoren einschließlich aller Faktorstufenausprägungen
- die Zuordnung von Komplexitäten zu allen Faktorstufenausprägungen
- alle zulässigen Faktorstufenkombinationen einschließlich der Einsatztermine
- alle zulässigen Einsatzarten sowie Einsatzartkombinationen
- der allgemeine Planungsstandard mit Mengengerüst

Unter Berücksichtigung der genannten Eingangsinformationen wird ein optimaler Erprobungsplan über den nachfolgenden Algorithmus bestimmt:

1. Erzeugung eines d-optimalen Versuchsplans aus dem Set zulässiger Faktorstufenkombinationen des ersten Anlaufs über die maximale Determinante von  $X^T X$ . Die Anzahl der Fahrzeuge folgt dabei aus der theoretisch benötigten Fahrzeuganzahl, die zur Abdeckung aller Regeln des projektspezifischen Planungsstandards ohne Nutzung von Synergien benötigt werden. Ist hierbei die Summe der einzuplanenden Erprobungsfahrzeuge höher als die der zulässigen Faktorstufenkombinationen, müssen Wiederholungen zugelassen werden.
2. Zufällige Auswahl gültiger Einsatzarten und Baustufen für jedes Fahrzeug und Berücksichtigung derjenigen Einsatzart und Baustufe, die zur maximalen Reduzierung der Unterplanung beiträgt.
3. Da Eigenschaften bereits ausgewählter Fahrzeuge ggf. durch weiter hinzukommende Fahrzeuge abgedeckt werden, erfolgt in einer zweiten Iteration die Entfernung derjenigen Einträge, die zur Erhöhung der Überplanung bei konstanter Unterplanung führen.
4. Alle nicht zugeordneten Fahrzeuge sind durch neue Faktorstufenkombinationen aus dem zulässigen Set zu ersetzen und Schritt 2 bis 3 ist für alle neuen Einträge zu wiederholen.
5. Die Unterplanung im optimalen Versuchsplan ist gleich Null. Gleichzeitig ist die Anzahl der Erprobungsfahrzeuge minimal. Bei identischer Fahrzeuganzahl entscheidet das Determinantenkriterium.
6. Die Planung wird durch Wiederholung des Schrittes 1 bis 5 für alle Folgeanläufe rekursiv fortgeführt.
7. Der Algorithmus terminiert, sofern alle Fahrzeuganläufe berücksichtigt sind, eine vorgegebene Anzahl an optimalen Versuchsplänen erzeugt und ein im Hinblick auf die in Schritt 5 genannten Kriterien optimaler Versuchsplan ausgewählt wurde.

## 5.4.2 Konvergenzbetrachtungen

Das Konvergenzverhalten des Algorithmus wird über folgende Maßnahmen beschleunigt:

- Zur Erzeugung des d-optimalen Versuchsplans wird nur ein prozentualer Anteil der theoretischen Anzahl benötigter Fahrzeuge herangezogen, da ein Fahrzeug in der Regel mehrere Regeln des Planungsstandards abdeckt und somit stets Synergien erschlossen werden können.
- Zeitlich nah beieinander liegende Anläufe können zur Erhöhung des Synergiepotenzials und zur Beschleunigung des Konvergenzverhaltens zusammengefasst werden.
- Es werden im iterativen Prozess jeweils nur diejenigen Erprobungsstrecken herangezogen, auf denen nach Planungsstandard noch Erprobungen durchgeführt werden müssen.
- Umso mehr Regeln des Planungsstandards erfüllt sind, desto höher ist die Anzahl der zufällig durch den Algorithmus ausgewählten Fahrzeuge, um mit höherer Wahrscheinlichkeit auch letzte Anforderungen abzudecken.

## 5.5 Zusammenfassung

Um der gestiegenen Variantenvielfalt in der Erprobung zu begegnen, ist es zielgerichtet, die statistische Versuchsplanung in die Überlegungen mit einzubeziehen. Dabei ist der Einsatz einer teilfaktoriellen gegenüber einer d-optimalen Versuchsplanung abzuwägen. Aufgrund der hohen Flexibilität der d-optimalen Versuchsplanung, insbesondere hinsichtlich der variablen Anzahl an Versuchen und Faktorstufen sowie der Berücksichtigung eines eingeschränkten Versuchsraums, wird dieser Methode der Vorzug für die Aufbauplanung der Gesamtfahrzeugerprobung gegeben.

Der Umfang einer Erprobung wird jedoch nicht allein über das Variantenspektrum bestimmt. Die Komplexität der Entwicklung und der Produktreifegrad sind gleichermaßen Bezugsgrößen für die Ableitung des erforderlichen Erprobungsbedarfs. Erst diese differenzierte Sichtweise gewährleistet die Übertragbarkeit der Planungsmethode auch auf zukünftige Projekte. Mit Hilfe der erläuterten Optimierungsprozedur werden schließlich die nach Baugruppen gestaffelten Erprobungsbedarfe auf die variantenoptimal aufgebauten Fahrzeuge abgebildet. Auf diese Weise gelingt es, über eine lückenlose Erprobung einen Beitrag zur Zuverlässigkeitsentwicklung zu leisten.

## 6 Modellsynthese und Ergebnisse

---

Eine Erprobung ohne Ausfälle lässt nicht den Schluss auf ein fehlerfreies Produkt zu. Denn selbst bei einer Versuchsreihe mit einer hohen Anzahl an Erprobungsträgern und der Annahme einer geringen Aussagewahrscheinlichkeit nähert sich die Ausfallwahrscheinlichkeit stets asymptotisch der Nulllinie. Gleichwohl liefert eine umfassende Erprobung mit nur wenigen Ausfällen den besten Anhaltspunkt für eine hohe Zuverlässigkeit vor dem Kunden.

### 6.1 Zuverlässigkeitsnachweis in unterschiedlichen Einsatzarten

Bei der Planung von Zuverlässigkeitstests sind stets konkurrierende Zielsetzungen zu berücksichtigen. Einerseits wird der Nachweis eines hohen Zuverlässigkeitsniveaus mit hoher Aussagewahrscheinlichkeit angestrebt, andererseits ist die Anzahl der Erprobungsträger unter Kostengesichtspunkten zu minimieren und eine kurze Erprobungsdauer sicherzustellen. Die Untersuchungen sind somit wesentlich durch die Fragestellung getrieben, welche Anzahl an Fahrzeugen auf welchen Strecken zu bewegen ist, sodass mit vertretbarem Aufwand auf eine möglichst geringe Ausfallwahrscheinlichkeit im Kundenbetrieb geschlossen werden kann. Die Verteilung der Erprobungsfahrzeuge auf die jeweiligen Einsatzarten orientiert sich dabei vordergründig an der spezifischen Teststreckencharakteristik, die auf unterschiedliche Art und Weise den Ausfall von Baugruppen begünstigt (vgl. Kapitel 4.3.3 und 5.1). Gilt es jedoch eine Aussage darüber zu treffen, welche Zuverlässigkeit nachgewiesen wird, rückt die Auseinandersetzung mit Raffungsfaktoren und Ausfallmechanismen

in den Vordergrund. Unter Einbeziehung der in Kapitel 3.1 aufgezeigten Zusammenhänge in der Zuverlässigkeitstheorie und den in Kapitel 4.2 ermittelten Eingangsparametern lässt sich der über unterschiedliche Einsatzarten erbrachte Zuverlässigkeitsnachweis beziffern. Das Bayes-Theorem ermöglicht hierbei verschiedene Erkenntnisse zu einer Gesamtaussage zusammenzuführen.

Um die Anwendbarkeit der Zuverlässigkeitstheorie in der Erprobung an einem einfachen Beispiel aufzuzeigen, wird das nachfolgende Szenario betrachtet. Auf dem Wechselkurs legen insgesamt sechs Erprobungsfahrzeuge die volle Laufleistung von 100.000 km ohne Ausfall zurück. Über Gleichung (3.51) berechnet sich dabei unter Einbeziehung der streckenspezifischen Zuverlässigkeitsparameter eine Zuverlässigkeit von  $R = 62\%$  mit einer gewählten Aussagewahrscheinlichkeit von  $P_A = 90\%$ . Als Weibullparameter unter Betriebsbedingungen wird mit  $b = 1,7$  der Wert der Taxi-Erprobung herangezogen.

Tritt nun der Ausfall eines Fahrzeuges ein, reduziert sich die nachgewiesene Zuverlässigkeit unter sonst gleichen Bedingungen auf  $R = 39\%$ . Der starke Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass mit dem Ausfall eines Fahrzeugs eine neue Information berücksichtigt werden muss, die ein umso stärkeres Gewicht gewinnt, je kleiner die statistische Basis an Erprobungsfahrzeugen ist. Liegt nun die Zielsetzung darin, das gleiche Zuverlässigkeitsniveau wie zuvor in der Situation mit sechs fehlerfreien Fahrzeugen nachzuweisen, reicht es nicht aus, ein einziges weiteres Fahrzeug zu erproben. Vielmehr zwingt die neue Information dazu, fünf weitere Fahrzeuge ausfallfrei auf dem Wechselkurs über die volle Streckenlänge zu bewegen, um eine Zuverlässigkeit von  $R = 62\%$  nachzuweisen.

Die Anwendung des Bayes-Theorems ermöglicht, die Anzahl der zusätzlich benötigten Erprobungsfahrzeuge zu senken, indem weitere Informationen mit hinzugezogen werden. Wird nicht nur zwischen fehlerbehafteten und fehlerfreien Fahrzeugen unterschieden, sondern erfolgt weiterhin eine Berücksichtigung der bis zum Ausfall zurückgelegten Laufleistungen, kann dies zu einer wesentlichen Reduzierung der Erprobungsträger beitragen. Angenommen im vorangegangenen Beispiel sei eine Fahrstrecke von 70.000 km bis zum Ausfall zurückgelegt worden. Dann gilt es zunächst eine a-priori Betaverteilung für den Fall zu konstruieren, dass fünf Fahrzeuge den Wechselkurs vollständig und ohne Ausfall absolvieren. Als Likelihood-Information fließt eine weitere Betaverteilung mit ein, in der über ein angepasstes Lebensdauerverhältnis die auf 70% verkürzte Laufleistung des sechsten Fahrzeuges abgebildet wird. Die Parameter für die Berechnung der a-posteriori Betaverteilung bestimmen sich über Gleichung (3.58) und (3.59), sodass für das geschilderte Szenario eine

Zuverlässigkeit von  $R = 53\%$  folgt. Dieser Wert stellt eine deutliche Verbesserung gegenüber der Zuverlässigkeit dar, die ohne Berücksichtigung der Laufstrecke bis zum Ausfall berechnet wurde. Ist erneut der Nachweis einer Zuverlässigkeit von  $R = 63\%$  zu führen, reicht eine Nacherprobung mit zwei weiteren Fahrzeugen aus, sofern keine weiteren Ausfälle bei deren Erprobung zu beobachten sind.

Stellt sich die Situation ein, dass auf einer Erprobungsstrecke aus Kapazitätsgründen keine weiteren Tests durchgeführt werden können, ist das Ausweichen auf eine andere Strecke erforderlich. Auch hier hilft der Bayessche Ansatz eine Vergleichbarkeit zwischen den Einsatzarten herzustellen. Eine Gegenüberstellung ist jedoch nur dann zulässig, sofern ein vergleichbares Ausfallverhalten auf den Erprobungsstrecken vorliegt. So ist in unserem Beispiel denkbar, dass nicht zwei weitere Fahrzeuge auf dem Wechselkurs erprobt werden, sondern alternativ drei Fahrzeuge die Erprobung auf öffentlicher Straße durchlaufen, um eine Zuverlässigkeit von  $R = 64\%$  nachzuweisen. Das zusätzlich benötigte Fahrzeug folgt daraus, dass die Straßenerprobung einer geringeren Raffung als die Erprobung auf dem Wechselkurs unterliegt und somit trotz höherem Lebensdauerverhältnis entweder eine größere Fahrstrecke zurückgelegt oder die Anzahl an Erprobungsträgern erhöht werden muss. Abbildung 6.1 fasst alle zuvor genannten Ergebnisse zusammen.

	Wechselkurs	Straße	R
Erprobung ohne Ausfall			62%
Berücksichtigung von Ausfällen			39%
Berücksichtigung der Laufleistung zum Ausfallzeitpunkt	 Ausfall bei 70.000 km		53%
Zusätzliche Erprobung auf gleicher Erprobungsstrecke	 Ausfall bei 70.000 km		63%
Zusätzliche Erprobung auf alternativer Erprobungsstrecke	 Ausfall bei 70.000 km		64%

Einbeziehung Bayes-Theorem

Aussagewahrscheinlichkeit  $P_A = 90\%$

Abbildung 6.1: Nachgewiesene Zuverlässigkeit in unterschiedlichen Erprobungsszenarien

Insgesamt liegt das Ziel der Zuverlässigkeitsanalyse nicht darin, ein exakt bezifferbares Zuverlässigkeitsniveau auf Gesamtfahrzeugebene zu ermitteln. Vielmehr wird versucht, die Zuordnung von Erprobungsträgern sowie die Festlegung der Stichprobengröße methodisch zu stützen. Auch die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Einsatzarten wird durch die zusätzlich gewonnenen Informationen verbessert, sodass sich unmittelbar Rückschlüsse auf die Erprobungsplanung ziehen lassen. Nicht zuletzt gewinnt der Freigabeprozess an Gehalt, sofern unter Berücksichtigung des streckenspezifischen Ausfallverhaltens und den zurückgelegten Laufleistungen auf unterschiedlichen Erprobungsstrecken differenzierte Aussagen über die Qualität der jeweiligen Teilsysteme ermöglicht werden.

## **6.2 Variantenoptimale und am Erprobungsbedarf orientierte Erprobungsplanung**

Die Erprobungsplanung hat zur Aufgabe, einen vertretbaren Rahmen der Erprobung zu definieren, der auf der einen Seite einem breiten Produktspektrum gerecht wird, auf der anderen Seite jedoch vor dem Hintergrund der zur Verfügung stehenden personellen, zeitlichen und nicht zuletzt wirtschaftlichen Ressourcen tragfähig ist. Diese Arbeit stellt eine Methode bereit, die einer gewachsenen Variantenvielfalt in der Automobilindustrie begegnet und dabei gleichzeitig die Abdeckung eines gestuften Erprobungsbedarfs sicherstellt.

Durch die Einführung der Planungsmethode müssen zukünftig bei der Erstellung des Erprobungsplans lediglich das Aggregat-Programm der zu erprobenden Fahrzeugfamilie angefordert und technische Komplexitäten den zu berücksichtigenden Baugruppen zugeordnet werden. Sowohl die zulässigen Einsatzarten als auch der allgemeine Planungsstandard sind bereits hinterlegt und bedürfen in der Regel keiner weiteren Anpassungen. Ein Algorithmus berechnet dann auf Basis dieser Informationsgrundlage das optimale Erprobungsprogramm. Der Erprobungsplaner wird dadurch von der Tätigkeit der Zuordnung von Erprobungsträgern zu Einsatzarten entlastet, die aufgrund der hohen Gesamtkomplexität durchaus mehrere Tage in Anspruch nehmen kann. Darüber hinaus sind Verletzungen des Planungsstandards, die sich bei der manuellen Erstellung mitunter einschleichen, fortan auszuschließen. Weitere Vorteile der Planungsmethode liegen darin, dass eine nach Anläufen gestaffelte Erprobungsplanung entwickelt werden kann, die sich auf bereits erprobte Umfänge bezieht. Außerdem lassen sich Auswirkungen durch Änderungen im Produktprogramm oder durch Ausfälle erforderlich gewordene Anpassungen unmittelbar in der Differenzmatrix aufzeigen und Nacherprobungsbedarfe ableiten. Dies hat einen wesentlichen

Zugewinn an Transparenz in der Erprobung zur Folge. Der wesentliche Vorteil der Methode liegt jedoch in der Erschließung von Synergien in der Erprobungsplanung. Dadurch dass möglichst viele Regeln des Planungsstandards auf einem Versuchsträger abgebildet werden, erfolgt eine Reduzierung der Anzahl an Erprobungsfahrzeugen. Hierbei lässt sich zeigen, dass das Optimierungspotenzial umso höher ist, je weiter der Planungshorizont und geringer die Anlaufstaffelung innerhalb einer Fahrzeugfamilie ausfällt (vgl. Kapitel 7.2). Im Umkehrschluss führen späte Änderungen im Aggregat-Programm zu einer deutlichen Ausweitung der Erprobungsflotte.

Gilt es weitere Einsparungspotenziale in der Erprobung zu erschließen, ist eine Auseinandersetzung mit Einbauraten erforderlich. Während die Erprobung aller Ausstattungskombinationen im Sinne eines vollfaktoriellen Versuchsplans wirtschaftlich nicht tragfähig ist, gewährleistet eine d-optimale Planung die systematische Erprobung aller Baugruppen mit einer deutlich geringeren Anzahl an Erprobungsträgern. Erfolgt darüber hinaus die Einbeziehung von Einbauraten, so ist häufig festzustellen, dass die aus Sicht einer optimalen Versuchsplanung ausgewählten Ausstattungskombinationen nur geringe Einbauraten in verkauften Fahrzeugen aufweisen. Umgekehrt besitzt ein Versuchsplan, der sich aus den am häufigsten bestellten Fahrzeugkonfigurationen zusammensetzt, in der Regel keine maximale Determinante von  $X^T X$ . Es liegt somit ein Zielkonflikt zwischen einer varianten- und einer marktorientierten Erprobungsplanung vor (siehe Abbildung 6.2).

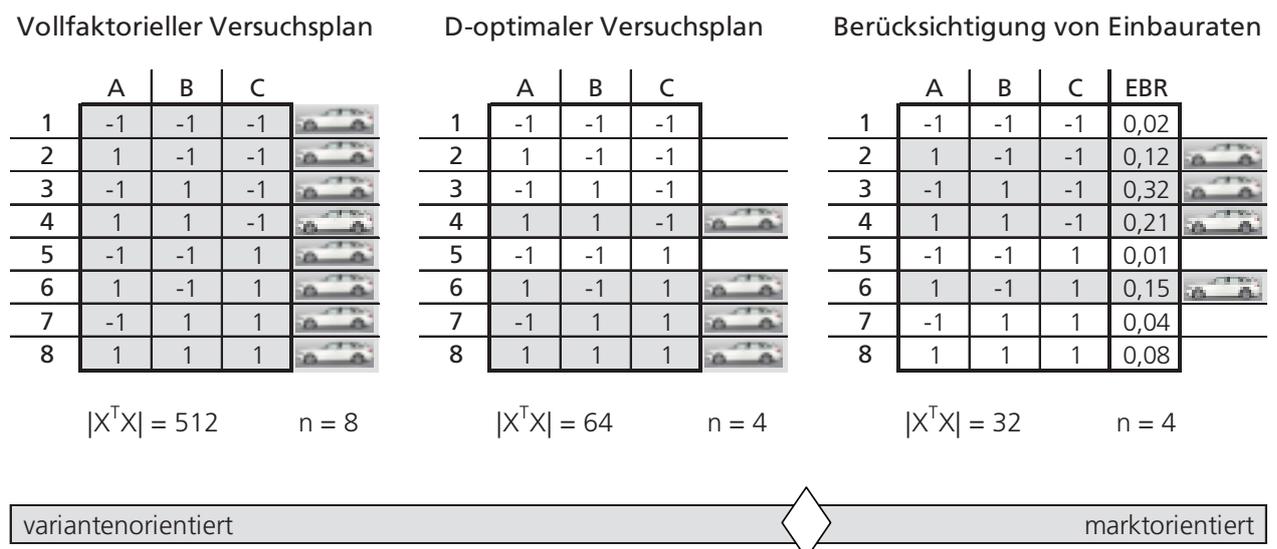


Abbildung 6.2: Zielkonflikt zwischen einer varianten- und marktorientierten Erprobungsplanung

Durch die Anforderungen der Produkthaftung ist eine gleichrangige Erprobung aller Hauptbaugruppen sicherzustellen. Gleichzeitig liegt jedoch ein berechtigtes Interesse darin, dass bei Sondererprobungsprogrammen, die in keiner Abhängigkeit zur Grundplanung stehen, Einbauten berücksichtigt werden. So gelingt es, die Überprüfung der Bauteilstreuung der am häufigsten eingesetzten Komponenten auf eine breitere Basis zu stellen. Losgelöst davon ist anzumerken, dass über die Zusammenstellung von Ausstattungspaketen durch den Vertrieb und der damit einhergehenden Variantenreduzierung erhebliche Ressourcen in der Erprobung freigesetzt werden können.

### **6.3 Modellreihenspezifischer Planungsstandard**

Die Auslegungsziele der Audi AG legen die Anforderungen hinsichtlich der Auslegung und Erprobung von Fahrzeugen fest. Die Kriterien gelten dabei in gleichem Maße über alle Fahrzeugklassen, d. h. sowohl Kompaktwagen als auch Oberklasselimosinen werden grundsätzlich unter Berücksichtigung identischer Laufleistungsziele entwickelt und erprobt. In einer Zeit, in der nur Teilssegmente des Fahrzeugmarktes bedient wurden, waren identische Auslegungskriterien wirtschaftlich tragbar und gleichzeitig Garant für ein einheitlich hohes Qualitätsniveau. Diese Situation ist jedoch mit der heutigen nicht zu vergleichen. Das Produktportfolio der Audi AG erfährt eine stärkere Spreizung über alle Modellreihen, insbesondere im Klein- bzw. Kompaktwagensegment kündigt sich eine zunehmende Derivatisierung an. Darüber hinaus gewinnen markenprägende Kleinserien an Bedeutung und die Wettbewerbssituation führt zu einer Verschärfung des Kostendrucks, sodass einheitliche Designziele nicht zu halten sind. Gestützt wird diese Forderung dadurch, dass mit der Neugewichtung der Absatzmärkte kritischere bzw. differenziertere Anforderungen an die Fahrzeugauslegung einhergehen.

Nachfolgend wird die Einführung eines modellreihenspezifischen Planungsstandards diskutiert, der in Abhängigkeit von Fahrzeugklassen unterschiedliche Ziellaufleistungen definiert. Zuvor wird jedoch auf die Anpassung des Mengengerüsts des derzeit eingesetzten Standards eingegangen.

### 6.3.1 Anpassung des Mengengerüsts

Bei der Festlegung des Umfangs der Gesamtfahrzeugerprobung sind neben den statistischen Zusammenhängen der Zuverlässigkeitstheorie Informationen über das kundenrelevante Nutzungsverhalten und dessen Auswirkungen auf die Komponentenzuverlässigkeit zu berücksichtigen. Gleichzeitig spielen Effizienzgesichtspunkte hinsichtlich der Fehleraufdeckung und der Erprobungskosten eine wichtige Rolle.

In Tabelle 6.1 wird die nach dem heutigen Planungsstandard geforderte Fahrzeuganzahl der innerhalb einer Baugruppe normierten Anzahl an Schadensfällen pro Fahrzeug auf den Erprobungsstrecken gegenübergestellt. Unzureichend genutzte Erprobungspotenziale werden hierbei durch positive, Fehlallokationen durch negative Vorzeichen gekennzeichnet.

	Motor	Getriebe	Fahrwerk	Karosserie	Ausstattung	Elektrik / Elektronik	Sonstige
Schlechtwegekurs	0	0	++	+	++	++	0
Wechselkurs	0	0	+	+	++	++	0
Hochgeschwindigkeitskurs	-	-	0	0	+	0	0
Rennstrecke	0	++	+	0	0	0	-
Öffentliche Straße	0	0	0	0	+	+	+
Stadt	0	+	+	0	+	++	+
Anhänger	0	0	0	0	0	0	0
Kaltland	+	0	0	0	+	0	0
Heißland	-	0	0	0	0	0	0
Splitt	0	0	++	++	++	+	+

Tabelle 6.1: Gegenüberstellung des Planungsstandards und der Ausfallhäufigkeiten in der Erprobung

Es zeigt sich, dass zur Motor- und Getriebeerprobung Fahrzeuge auf Teststrecken eingeplant werden, die potenzielle Fehlerbilder in der Vergangenheit nur bedingt aufzuzeigen vermochten. Insbesondere der Hochgeschwindigkeitskurs provoziert weniger Ausfälle als angenommen. Gleichzeitig lassen sich zahlreiche ungenutzte Potenziale in der Erprobung ausweisen, die im Planungsstandard jedoch nicht über eine gezielte Zuordnung von Erprobungsumfängen zu Baugruppen erschlossen werden. Unter Einbeziehung dieser Gegenüberstellung wird ein neues Mengengerüst für die Gesamtfahrzeugerprobung abgeleitet. Dieses gilt es in Kapitel 7.3 sowohl unter den Gesichtspunkten der nachgewiesenen Zuverlässigkeit, der Erprobungskosten als auch des benötigten Zeitaufwandes zu bewerten.

		Schlechtwegekurs	Wechselkurs	Hochgeschwindigkeitskurs	Rennstrecke	Öffentliche Straße	Stadt	Anhänger	Kaltland	Heißland	Spitt
Plattform	TT / PT	1	1						1		
	VFF	2 -1	3 -1		-2	1 +1	1 +2		0		2 0
	PVS / 0-S / S	1	1				1				
Motor hoher Neuigkeitsgrad	TT / PT	1	2	1					2		
	VFF	1 0	3 0	1 -2		2 0	1 0		1 +2	1 -1	
	PVS / 0-S / S		1			1	1		1		
Getriebe hoher Neuigkeitsgrad	TT / PT	1	2			1			1		
	VFF	1 0	3 -1	1 -2	+1	1 0	1 0	1 -1	0	-1	
	PVS / 0-S / S			1			1				
Fahrwerk hoher Neuigkeitsgrad	TT / PT	2	1		1						1
	VFF	1 +1	2 0		+1	1 0	+1	1 0	1 0	1 0	1 +1
	PVS / 0-S / S		1				1				
Infotainment hoher Neuigkeitsgrad	TT / PT	1									
	VFF	1 +1				+1	+2		1 0	1 0	
	PVS / 0-S / S					1	2				

Tabelle 6.2: Optimiertes Mengengerüst des Planungsstandards

Tabelle 6.2 zeigt das optimierte Mengengerüst des Planungsstandards (jeweils linke Spalte) einschließlich der Veränderungen gegenüber dem derzeit eingesetzten Regelwerk (jeweils rechte Spalte). Der Standard wurde derart angepasst, dass einerseits die in Tabelle 6.1 dargestellten Erprobungspotenziale zur Verbesserung der Zuverlässigkeitsentwicklung besser genutzt werden, gleichzeitig jedoch der Zuverlässigkeitsnachweis über eine zu starke Berücksichtigung von Nebenstrecken nicht verschlechtert wird.

Hinsichtlich der Staffelung nach Produktreifegraden wird eine Dreistufung eingeführt, die die ursprüngliche Zweistufung ablöst (vgl. Tabelle 5.2). Bezug nehmend auf die Ergebnisse aus Kapitel 4.3.3 erscheint eine Unterscheidung zwischen frühen (Technikträger, Prototyp), mittleren (Vorserienfreigabefahrzeuge) und späten Fahrzeugen (Produktionsversuchsserie, Null-Serie, Serie) als zielgerichtet. Entsprechend sind die Ressourcen der Erprobungsplanung unter Einbeziehung der Ausfallhäufigkeiten in den Verhältnissen 1,2:1,7:1 auf die drei Kategorien abzubilden. Eine darüber hinaus gehende Ausdifferenzierung wird nicht angeraten, da sich sonst weniger Synergien bei der Erzeugung des Erprobungsplans nutzen lassen.

Die Dreistufung ermöglicht zusätzlich eine differenzierte Interpretation der gewonnenen Erprobungsergebnisse. Während bei den frühen Fahrzeugen lediglich funktions- und demonstrierfähige Bauteile zum Einsatz gelangen, kann bei Vorserienfreigabefahrzeugen von dauererprobungsfähigen Bauteilen ausgegangen werden, die sowohl einen kontinuierlichen Erprobungsbetrieb gewährleisten als auch qualifizierte Aussagen über die Güte der Konstruktion zulassen. In der dritten Kategorie werden voll funktionsfähige und beurteilungswürdige Baugruppen aus Serienwerkzeug fallenden Teilen eingesetzt, die die höchste Entwicklungsstufe darstellen und somit im Schadensfall unmittelbar einem Fehlerbehebungsprozess zuzuführen sind.

Hinsichtlich einer Differenzierung nach Entwicklungskomplexitäten wird in Ermangelung einer Bezugsgröße eine lineare Abstufung favorisiert. D. h. das für die Erprobung einer Baugruppe mit hohem Neuigkeitsgrad eingeforderte Mengengerüst ist bei einer Erprobung mit geringerer Neuerung entsprechend der Anzahl an Komplexitätsstufen zu reduzieren.

Weiterhin ist zu beachten, dass im Planungsstandard keine expliziten Erprobungsbedarfe für Karosserie- und Ausstattungsumfänge definiert werden. Dies hängt damit zusammen, dass diese in die Anforderungen an die Erprobung der Fahrzeugplattform mit einfließen. Zudem ist anzumerken, dass der mit der Einführung eines neuen Infotainmentsystems einhergehende Erprobungsbedarf vordergründig in der Breiten- und Funktionserprobung abgebildet wird (vgl. Kapitel 4.1.1). Da optische Laufwerke jedoch gleichzeitig im Schlechtwegeeinsatz und Elektronikkomponenten unter Temperatureinfluss zu erproben sind, gilt es entsprechend Fahrzeuge für diese Zwecke vorzuhalten.

Eine modellreihenspezifische Staffelung des Mengengerüsts ist aufgrund des komponentenseitig ähnlichen Systemaufbaus nicht erforderlich und erhöht lediglich die Komplexität der Gesamtfahrzeugerprobung. Notwendig erscheint jedoch eine Unterscheidung hinsichtlich unterschiedlicher Antriebstechnologien. Während sich das diskutierte Mengengerüst auf ein klassisches Fahrzeugantriebskonzept bezieht, ist bei hybriden bzw. rein elektrischen Antriebssystemen von einer Verschiebung der Erprobungsschwerpunkte auszugehen.

### 6.3.2 Anpassung der Ziellaufleistungen

Wesentliche Bezugsgrößen der Erprobungsplanung stellen Qualitäts- und Zuverlässigkeitsziele sowie Informationen über das Kundennutzungsverhalten dar. Aus ihnen leiten sich die Laufleistungsziele der Einsatzarten im Fahrzeugversuch ab.

Anhand von Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) kann dabei aufgezeigt werden, dass das durchschnittliche Fahrzeugalter in Deutschland seit mehreren Jahren steigt (KBA 2007). Dies lässt jedoch nur bedingt eine Aussage über die Nutzungsdauer der Fahrzeuge zu, da gleichzeitig das durchschnittliche Fahrzeugalter bei der Löschung seit mehreren Jahren bei knapp zwölf Jahren verharrt (siehe Abbildung 6.3). Selbst wenn ein Teil dieser Fahrzeuge nach Austragung beim KBA im Ausland weiterbewegt wird, erscheint es dennoch als zielgerichtet, den weiteren Betrachtungen eine durchschnittliche Betriebsdauer von zwölf Jahren zugrunde zu legen.

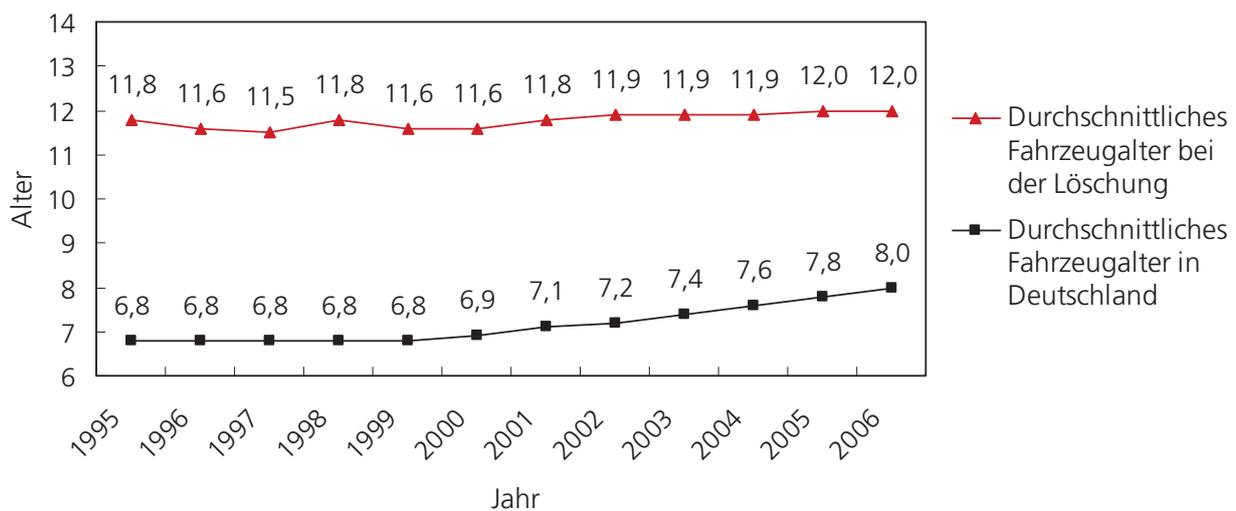


Abbildung 6.3: Durchschnittliches Fahrzeugalter in Deutschland und bei der Löschung

Zunächst gilt es jedoch der Frage nach dem korrekten Auslegungskriterium nachzugehen. Handelt es sich um die streckenbezogene Laufleistung oder die zeitlich dimensionierte Betriebsdauer? Vor dem Hintergrund, dass Fahrzeuge im Kompaktwagensegment während ihrer Nutzungsdauer geringere durchschnittliche Laufleistungen als im Oberklassesegment zurücklegen, die Alterung von Kunststoffen jedoch von Umgebungseinflüssen abhängt und sich somit auch unabhängig von einer intensiven Nutzung vollzieht, ist die Betriebsdauer durchaus relevant. Anders verhält es sich bei sicherheitsrelevanten Bauteilen, an die nach den Designzielen der Audi AG hohe Anforderungen gestellt werden und die insbesondere durch ihre Beanspruchung im Fahrbetrieb altern. Somit lassen sich Argumente für beide

Kriterien anführen. In der gehobenen Mittelklasse bzw. Oberklasse erübrigt sich die Diskussion, da sich ein Laufleistungsziel von 300.000 km mit der Forderung nach einer Betriebsdauer von zwölf Jahren nahezu deckt (siehe Abbildung 6.4).

Angenommen es würde sich eine Situation einstellen, in der in der Gesamtfahrzeugerprobung verschärfte finanzielle oder zeitliche Restriktionen zu berücksichtigen wären, dann läge ein möglicher Lösungsansatz darin, der Betriebsdauer ein stärkeres Gewicht beizumessen. Dies wiederum hätte zur Folge, dass Laufleistungsziele für die jeweiligen Segmente unter Einbeziehung der durchschnittlich zurückgelegten Fahrleistungen definiert würden.

Eine Analyse der Laufleistungsverteilungen in Kapitel 4.4.1 zeigt hierbei, dass in unteren Fahrzeugsegmenten tendenziell mehr Fahrzeuge mit geringerer Laufleistung zu erproben sind als in oberen Fahrzeugsegmenten. Dabei ist zu beachten, dass mit wenigen, über eine lange Streckendistanz und ohne Ausfälle betriebenen Fahrzeugen eine höhere Zuverlässigkeit nachgewiesen werden kann als mit einer größerer Anzahl an Fahrzeugen, die ausfallfrei nur kurze Distanzen zurückgelegt haben (siehe Abbildung 3.5). Würden jedoch durch hohe Ziellaufleistungen in der Kompaktwagenklasse Ausfallmechanismen ausgelöst, die in keinem Bezug zum realen Kundenbetrieb stünden, hätte dies letztlich eine nicht gerechtfertigte Überdimensionierung zur Folge. Zudem erleichtert eine höhere Anzahl an ausgefallenen Erprobungsträgern, Aussagen über das Streuungsverhalten der Bauteile zu treffen.

Audi A3 3-Türer				Audi A6 Limousine	
					
11.100 km	Otto	Durchschnittliche jährliche Laufleistung	Otto	16.200 km	
20.600 km	Diesel		Diesel	28.700 km	
-----					
132.700 km	Otto	Durchschnittliche Laufleistung nach zwölf Jahren	Otto	195.000 km	
200.800 km	Diesel		Diesel	279.600 km	
-----					
44.200 km	Otto	Streckenlänge Wechselkurs mit Ziellaufleistung analog Ø LL nach zwölf Jahren zum Nachweis einer Zuverlässigkeit von R = 62% mit P <sub>A</sub> = 90% und sechs Fahrzeugen	Otto	65.000 km	
66.900 km	Diesel		Diesel	93.200 km	
Ziellaufleistung Wechselkurs 100.000 km				Ziellaufleistung Wechselkurs 100.000 km	

Abbildung 6.4: Vergleich durchschnittlicher Fahrstrecken im Kundenbetrieb mit der Ziellaufleistung in der Erprobung in der Kompaktwagen- und gehobenen Mittelklasse

In Abbildung 6.4 wird die durchschnittliche Laufleistung eines Audi A3 3-Türers mit der einer Audi A6 Limousine verglichen. Die Limousine mit Diesel-Motorisierung legt im Durchschnitt innerhalb von zwölf Jahren eine mehr als doppelt so weite Fahrstrecke zurück als der Kompaktwagen mit Otto-Motorisierung. Entsprechend reicht es aus, zum Nachweis einer identischen Zuverlässigkeit die Fahrzeuge im Kompaktwagensegment über eine kürzere Laufleistung zu testen. Da neben den Aggregaten weitere Komponenten im Fahrzeug erprobt und Fahrwerkskomponenten auf die Laufleistungen von Dieselfahrzeugen ausgelegt werden, sind die Diesel-Laufleistungen als relevante Bezugsgrößen heranzuziehen. Dies hat gleichfalls zum Vorteil, dass sich die Erprobungsplanung einfacher ausgestaltet als bei einer Differenzierung der Zielgrößen nach Segment und Motorisierung.

Für die Zukunft wird eine abnehmende durchschnittliche Laufleistung pro Pkw in Deutschland prognostiziert. Zwar nehmen immer mehr Menschen weite Wege zur Arbeit in Kauf, gleichwohl führen der steigende Pkw-Bestand und die demographische Entwicklung trotz steigender Mobilität im Alter zu einer sinkenden Durchschnittsfahrleistung. Während die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines Pkw im Jahr 2002 noch bei 11.400 km lag, wird für das Jahr 2030 eine Laufleistung von 10.600 km pro Pkw prognostiziert (Shell 2004).

Es ist deutlich geworden, dass die Einführung modellreihenspezifischer Ziellaufleistungen sowohl unter Zuverlässigkeitsgesichtspunkten als auch unter wirtschaftlichen Aspekten sinnvoll ist. Spezifische Laufleistungsziele sind deshalb fortdauernd unter Berücksichtigung des Kundennutzungsverhaltens auf unterschiedlichen Absatzmärkten anzupassen.

## 7 Modellvalidierung und Verifikation

---

Im Rahmen einer Modellvalidierung gilt es aufzuzeigen, dass vor dem Hintergrund der vorliegenden Problemstellung geeignete Methoden zur Beantwortung der zentralen Fragen ausgewählt wurden. Die Modellverifikation wiederum überprüft, ob dabei eine korrekte Anwendung der ausgewählten Methoden erfolgt ist. Im Hinblick auf die eingangs genannten Fragestellungen ist somit der Beweis anzutreten, dass mit der entwickelten Methode ein aussagekräftiger Zuverlässigkeitsnachweis geführt und ein Beitrag zur Zuverlässigkeitsentwicklung geleistet werden kann. Dabei sind insbesondere die Güte der gewählten Eingangsparameter und die Qualität der gewonnenen Ergebnisse zu diskutieren.

### 7.1 Sensitivitäten und Parametergüte im Zuverlässigkeitsmodell

Der in Kapitel 6.1 geführte Zuverlässigkeitsnachweis berücksichtigt mit Unsicherheit behaftete Eingangsgrößen wie Raffungsfaktoren oder die Formparameter der Weibullverteilung. Wie bereits gezeigt werden konnte, genügt die Bestimmung der Formparameter dabei statistischen Anpassungstests. Die Annahme einer mittleren Ausfallstrecke unter Betriebsbedingungen von 175.000 km lässt sich dadurch stützen, dass sich die über diese Größe ermittelten Raffungsfaktoren mit den Erfahrungswerten in der Erprobung decken. So wird ein Fahrzeugleben mit Laufleistungsziel 300.000 km auf dem Schlechtwegkurs innerhalb von 8.000 km und auf dem Wechselkurs mit 100.000 km abgebildet. Als Produkt aus Raffungsfaktor und Ziellaufleistung folgen entsprechend 271.200 km bzw. 360.000 km.

Dessen ungeachtet gilt es den jeweiligen Einfluss der Parameter auszuweisen, um die Robustheit des Modells gegenüber unscharfen Eingangsinformationen beurteilen zu können. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden hierzu über die Variation der Einflussparameter die Auswirkungen auf die nachgewiesene Zuverlässigkeit untersucht. Dazu sind praxisnahe Ober- und Untergrenzen für jede Größe auszuwählen und die Zuverlässigkeit über einen vollfaktoriellen Versuchsplan zu bestimmen (vgl. Kapitel 3.2.2.1). Der Versuchsplan besitzt dabei mit sieben einzubeziehenden Faktoren insgesamt  $2^7 = 128$  Einträge, wobei 32 Einträge auszuschließen sind, da die Anzahl an ausgefallenen Fahrzeugen nie die Anzahl an Erprobungsfahrzeugen übersteigen kann. Somit müssen die entsprechenden Versuchsanordnungen nicht berücksichtigt werden. Der Effekt der jeweiligen Einflüsse berechnet sich schließlich über Gleichung (3.60).

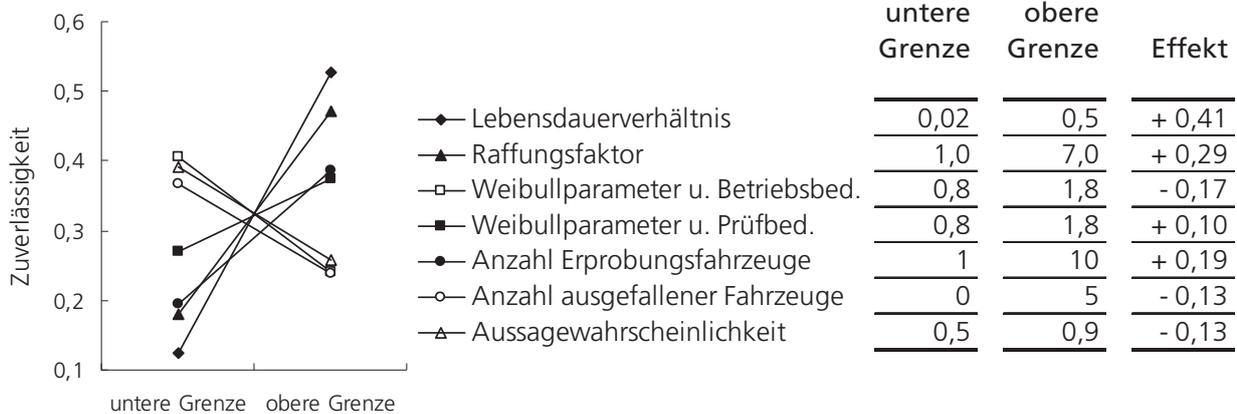


Abbildung 7.1: Sensitivitäten der Zuverlässigkeitsparameter

Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 7.1 zeigt den Einfluss der mit Unsicherheit behafteten Parameter. Während sich die Wahl der Weibullparameter nur geringfügig auf die Zuverlässigkeit auswirkt, besitzt der Raffungsfaktor einen weitaus größeren Einfluss. Insgesamt hat bei der Berechnung der Zuverlässigkeit das durch die Erprobungsstreckenlänge vorgegebene Lebensdauerverhältnis den größten, der Weibullparameter unter Prüfbedingungen den geringsten Effekt. Gleichzeitig werden die Richtungen der jeweiligen Einflüsse ersichtlich. Während sich eine Erhöhung des Lebensdauerverhältnisses, des Raffungsfaktors, des Weibullparameters unter Prüfbedingungen oder der Anzahl an Erprobungsfahrzeugen begünstigend auf die Zuverlässigkeit auswirkt, führt eine Erhöhung des Weibullparameters unter Betriebsbedingungen, der Aussagewahrscheinlichkeit oder der Anzahl an Ausfällen unter sonst gleich bleibenden Bedingungen zu einer geringeren Mindestzuverlässigkeit. Insgesamt zeigt sich das Modell recht robust gegenüber unsicheren Eingangsinformationen.

Fernerhin ist herauszustellen, dass die Streckenparameter auch bei der Einbeziehung von Erprobungsdaten aus unterschiedlich langen Beobachtungszeiträumen nur geringfügigen Schwankungen unterliegen. Dies liefert ein Indiz dafür, dass die Daten im Hinblick auf die bis zum Ausfall zurückgelegten Strecken selbstähnlich sind und den Strecken somit eine eindeutige Ausfallcharakteristik zugeordnet werden kann.

Beobachtungszeitraum	Schlechtwegekurs			Wechselkurs		
	4 Jahre	6 Jahre	8 Jahre	4 Jahre	6 Jahre	8 Jahre
Weibull-Parameter	1,64	1,63	1,65	1,25	1,29	1,18
Raffungsfaktor	37,4	36,9	34,7	3,6	3,5	3,6

Tabelle 7.1: Weibullparameter und Raffungsfaktoren unterschiedlicher Beobachtungszeiträume

Tabelle 7.1 zeigt, dass die nach der Maximum-Likelihood-Methode bestimmten Weibullparameter für den Schlechtwege und Wechselkurs über einen Beobachtungszeitraum von vier bis acht Jahren relativ stabil bleiben. Auch die Raffungsfaktoren besitzen nur eine leichte Unschärfe. Es ist hierbei davon auszugehen, dass die mit der größten Datenbasis ermittelten Werte der Realität am nächsten sind. Insgesamt wurden zur Bestimmung der Zuverlässigkeitsparameter 22.000 Schadensfälle ab dem Jahr 2000 bis zum Jahr 2008 ausgewertet.

## 7.2 Synergetische Effekte in der Erprobungsplanung

Eine Aussage über die Güte der Erprobungsplanung lässt sich anhand zweier Größen treffen: Der über eine systematische Erprobung nachgewiesenen und entwickelten Zuverlässigkeit und der für die Erprobung eingesetzten Ressourcen. Letzteres wird vornehmlich über die Anzahl an Erprobungsfahrzeugen bestimmt, da mit ihr die Prüfzeit- und Arbeitskosten korrelieren und Fahrzeugaufbaukosten, insbesondere bei Prototypen, einen wesentlichen Kostentreiber darstellen.

Die entwickelte Planungsmethode ermöglicht es, den aus dem Planungsstandard abgeleiteten Erprobungsbedarf synergetisch auf einer minimalen Anzahl an Fahrzeugen abzubilden. Am Beispiel der Erprobungsplanung des C-Segments sei hierbei das Optimierungspotenzial aufgezeigt. Durch die Anwendung des Vertauschungsalgorithmus lässt sich die Gesamtzahl an Erprobungsträgern um 52 Prozent gegenüber einer theoretischen Planung ohne Nutzung von Synergien reduzieren, die für jede Regel des Planungsstandards jeweils ein Fahrzeug einfordert. Im Beispiel fließen als Hauptkomplexitätstreiber Karosserieform (sieben Faktorstufen), Motor (neun Faktorstufen), Getriebe (fünf Faktorstufen), Fahrwerk (vier Fak-

torstufen) sowie Lenkungsposition einschließlich der Vertriebsregion (drei Faktorstufen) mit ein. Darüber hinaus sind neun unterschiedliche Anlaufzeitpunkte zu berücksichtigen. Durch die Staffelung erfolgt eine zeitliche Entzerrung des Entwicklungsprozesses, jedoch wird gleichzeitig die Kombination von Erprobungsumfängen eingeschränkt. Ohne Berücksichtigung der Anlaufstaffelung kann die Anzahl an Erprobungsfahrzeugen um bis zu 56 Prozent gegenüber der theoretischen Anzahl ohne Synergien verringert werden. Entsprechend hat eine Produktprogrammplanung mit wenigen Modellanläufen stets eine Senkung der Erprobungskosten zur Folge.

Im Zuge einer manuell erstellten Erprobungsplanung lassen sich gleichfalls Synergien heben, allerdings in nicht vergleichbarer Dimension. Im genannten Beispiel werden bei der über den Algorithmus herbeigeführten Zuordnung der Erprobungsfahrzeuge zu den Einsatzarten durchschnittlich 3,3 Regeln mit einbezogen. Der Algorithmus bildet hierbei bis zu zwölf Regeln des Planungsstandards in einem einzelnen Fahrzeug ab. Dies wird sowohl über den am Erprobungsbedarf orientierten Aufbau des Fahrzeugs als auch eine sinnvolle Mehrfachnutzung erzielt. Ein erwünschter Nebeneffekt der Optimierungsprozedur ist dabei, dass der Algorithmus offene Erprobungsbedarfe den Fahrzeugen unter Erschließung von Synergien zuordnet, gleichzeitig aber bereits erfüllte Regeln nicht ausblendet. Bei der Zuordnung der Erprobungsumfänge wird stets derjenigen Einsatzart der Vorzug vor einer anderen gegeben, die bei einer identischen Reduzierung der Unterplanung weitere bereits erfüllte Anforderungen mit abdeckt. Auf diese Weise wird der im Planungsstandard hinterlegte Erprobungsbedarf auf eine noch breitere Basis gestellt. In Abbildung 7.2 werden die Synergiepotenziale mehrerer Erprobungsplanungen gegenübergestellt. Die Anzahl der durchschnittlich auf einem Fahrzeug abgebildeten Regeln des Planungsstandards wird dabei nur für Erprobungen ohne Anlaufstaffelung angegeben, da in einer gestaffelten Planung frühe Fahrzeuge Erprobungsbedarfe abdecken, die zusätzlich durch Fahrzeuge späterer Anläufe mit größeren Synergien abgebildet werden.

	B-Segment		B-Segment Modellwechsel		C-Segment	
	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
Anlaufstaffelung						
Anzahl Anlaufzeitpunkte	1	8	1	4	1	9
Anzahl Faktoren	5	5	4	4	6	6
Anzahl Faktorstufen	31	31	28	28	28	28
Reduzierung Erprobungsträger	51%	38%	45%	37%	56%	52%
Durchschnittliche Regeln / Fahrzeug	3,5	- / -	3,1	- / -	3,3	- / -

Abbildung 7.2: Synergiepotenziale in der Erprobungsplanung

Erprobungsfahrzeuge weisen zukünftig eine variantenoptimale Ausstattung auf, d. h. unterschiedliche Ausstattungsumfänge werden in etwa gleich häufig eingesetzt und in überschneidungsfreier Kombination abgebildet. Dies hat zum Vorteil, dass bei der Überprüfung von Wechselwirkungen deutlich mehr Effekte untersucht werden können.

Insgesamt ist jedoch zu beachten, dass sich die d-Optimalität des Erprobungsplans durch einen sehr spezifizierten Planungsstandard einschränken lässt. Sofern ein Großteil der Ausstattungsumfänge durch einen sehr detaillierten Standard vorgegeben ist, kann der Algorithmus keine d-optimale Versuchsplananordnung aufrechterhalten.

### 7.3 Auswirkungen des neuen Planungsstandards

Bei der Erstellung des Planungsstandards ist darauf zu achten, dass dieser einen ausreichend großen Spielraum für die Kombination unterschiedlicher Fahrzeugkomponenten aus Sicht einer optimalen Versuchsplanung gewährt. Zudem ist sicherzustellen, dass sich das Regelwerk flexibel an zukünftige Fahrzeugprojekte adaptieren lässt. Die Struktur des vorliegenden Planungsstandards wird diesen Anforderungen und den Gegebenheiten in der Praxis gerecht. So ist eine weitere Differenzierung der Produktreifegrade wenig sinnvoll, da der Aufbau exakt vorgegebener Baustände durch das Vorserienzentrum nicht sicher gewährleistet ist. Zweckmäßig erweist sich jedoch die Einführung gestaffelter Entwicklungskomplexitäten zur Berücksichtigung unterschiedlicher Risikopotenziale in der Entwicklung.

Über die Gegenüberstellung einer nach dem alten und neuen Planungsstandard entwickelten Erprobungsplanung gilt es das in Kapitel 6.3.1 eingeführte Mengengerüst zu bewerten. Hierzu wird das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Planungstool eingesetzt, da sich die Anzahl an benötigten Erprobungsfahrzeugen nicht allein aus dem allgemeinen Standard ableiten lässt. Diese folgt stets aus dem Umfang und der Komplexität des Erprobungsprojektes und hängt von den in der Planung erzielbaren Synergien ab.

Der Vergleich zeigt bei der nach dem neuen Standard entwickelten Planung eine Kostensparnis von vier Prozent und eine um sechs Prozent verkürzte Erprobungsdauer gegenüber der nach dem alten Standard erstellten Erprobungsplanung. Dabei ist ein leichtes Absinken des nachgewiesenen Zuverlässigkeitsniveaus zu beobachten, da insgesamt weniger Erprobungskilometer zurückgelegt werden. Dadurch dass nach der Einführung des neuen Standards die Aufdeckung von Bauteilmängeln jedoch begünstigt und damit der Beitrag zur Zuverlässigkeitsentwicklung erhöht wurde, ist von einer Überkompensation dieses Effektes

auszugehen. Denn allein das Zurücklegen weiter Strecken ohne die systematische Beanspruchung der Komponenten stellt keinen aussagekräftigen Zuverlässigkeitsnachweis dar. Eine weitere Verbesserung des Mengengerüsts setzt eine Erprobung nach neuem Standard mit nachträglicher Auswertung der Erprobungsdaten voraus. Auf diese Weise ließen sich die besten Verifikationsergebnisse erzielen.

Zur Diskussion der Ziellaufleistungen in der Erprobung werden die Bezugsgrößen, d. h. die ermittelten Durchschnittslaufleistungen im Kundenbetrieb, kritisch hinterfragt. Unter Berücksichtigung der Einbauraten von Otto- und Diesel-Motoren lassen sich hierzu die in Kapitel 4.4.1 berechneten durchschnittlichen jährlichen Laufleistungen mit den Größen aus einer Umfrage unter Neuwagenkunden, der New Car Buyers Survey, vergleichen (NCBS 2006, nicht veröffentlicht). In der Befragung wird die erwartete jährliche Laufleistung der Neuwagenkunden ermittelt. Der Vergleich zeigt eine sehr gute Annäherung, obwohl die Ergebnisse der NCBS lediglich auf einer Prognose der Fahrzeugnutzer beruhen. Die Abweichung der Ergebnisse beträgt durchschnittlich vierzehn Prozent, ohne Berücksichtigung des Audi TT sogar nur acht Prozent. Die logarithmischen Laufleistungsverteilungen zeigen darüber hinaus eine sehr gute Anpassungsgüte, die auf die zugrunde liegende große Datenbasis zurückzuführen ist. Somit lassen sich bei einer Freigabeerteilung nicht nur Aussagen über die durchschnittliche jährliche Kundenlaufleistung, sondern auch über deren Streuung mit einbeziehen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

---

Die Planung einer Gesamtfahrzeugerprobung wird über die Einbeziehung der Zuverlässigkeitstheorie und der statistischen Versuchsplanung qualifiziert. Es entstehen neue Handlungsspielräume, wie sich aussagekräftige Erprobungsergebnisse mit einer knapp bemessenen Anzahl an Erprobungsträgern gewinnen lassen. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Abbildung der Variantenvielfalt gelegt.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit, um letztlich im Rahmen eines Ausblicks die Aufmerksamkeit auf die im Zuge der Ausarbeitung dieser Arbeit neu aufgeworfenen Fragestellungen zu lenken.

### 8.1 Zusammenfassung

Über die Herstellung eines Zusammenhangs zwischen der Erprobung, der Aufgabenteilung in der Fahrzeugentwicklung, den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und der Rechtsprechung im Zusammenhang mit Produkthaftungsfällen gelingt es, Anforderungen und Grenzen einer Gesamtfahrzeugerprobung aufzuzeigen. Als zentrale Handlungsfelder lassen sich hierbei die Absicherung der Dauerhaltbarkeit, der Funktionsstabilität und der Fahrzeugeigenschaften über den gesamten Lebenszyklus identifizieren.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem übergeordneten Ziel des Nachweises und der Entwicklung von Zuverlässigkeit in der Gesamtfahrzeugerprobung. Dazu werden Modelle der Zuverlässigkeitstheorie auf die Erprobung übertragen und unterschiedliche Erprobungsergebnisse durch die Anwendung des Bayes-Theorems zu einer Gesamtaussage zusammen-

geführt. Über eine Strukturanalyse der Erprobungsstrecken lässt sich ein Bezug zwischen unterschiedlichen Einsatzarten herstellen und in der Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigen. Dabei sind statistische Abhängigkeiten aufzuzeigen, wie etwa durch die Einbeziehung von Laufleistungen bis zum Eintreten eines Schadensfalls die Anzahl an Erprobungsfahrzeugen reduziert werden kann. Gleichwohl wird nicht die Zielsetzung verfolgt, ein exaktes Zuverlässigkeitsniveau auf Gesamtfahrzeugebene zu prognostizieren. Vielmehr liegt das Bestreben darin, die Erprobungsträger modellgestützt auf die jeweiligen Einsatzarten zuzuordnen und zusätzliche Informationen für den Freigabeprozess bereitzustellen.

Die Gesamtfahrzeugerprobung kann weiterhin einen Beitrag leisten, Zuverlässigkeit in das Produkt hinein zu entwickeln. Dazu gilt es eine Vielzahl an Umgebungseinflüssen auf unterschiedlich ausgestatteten Fahrzeugen abzubilden. Die d-optimale Versuchsplanung eignet sich hierbei zur Entwicklung einer ausgewogenen Fahrzeugaufbauplanung mit hoher Variantenabdeckung. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass die Erprobungsfahrzeuge hinsichtlich ihrer Komponentenstruktur und des damit einhergehenden Erprobungsbedarfs sinnvoll zu den jeweiligen Einsatzarten zugeordnet werden. Zu diesem Zweck sind nach Baugruppen, Komplexitäten und Reifegraden gestaffelte Erprobungsbedarfe in der Gesamtplanung abzubilden. Die in einem Planungsstandard hinterlegten Erprobungsumfänge werden hierzu in der Erprobungsplanung synergetisch auf die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge umgelegt. Eine neu entwickelte Optimierungsprozedur stellt sicher, dass die Erprobungsplanung unter Einbeziehung einer minimalen Anzahl an Erprobungsträgern sowohl dem Planungsstandard als auch der steigenden Variantenvielfalt gerecht wird. Nicht zuletzt erhöht die Planungsmethode die Transparenz hinsichtlich eines zusätzlich benötigten Erprobungsbedarfs, der durch Ausfälle oder Änderungen in der Produktprogrammplanung entstehen kann. Dabei ist die Methode sehr flexibel einsetzbar und für zukünftige Erprobungsprojekte mit unterschiedlichen Entwicklungskomplexitäten und Variantentreibern ebenso geeignet.

Abschließend erfolgt eine kritische Auseinandersetzung mit den Zielgrößen der Erprobung mit dem Ergebnis, dass das Mengengerüst und die Laufleistungsziele fortan stärkeren Bezug auf Schadensfalldaten in der Erprobung und das Kundennutzungsverhalten nehmen. Insgesamt wird somit der Zielsetzung entsprochen, die Planung der Gesamtfahrzeugerprobung unter Gewährleistung des Praxisbezugs methodisch zu stützen und einen Beitrag zur Zuverlässigkeitsentwicklung zu leisten.

## 8.2 Ausblick

Eine effiziente Erprobungsplanung trägt wesentlich zum wirtschaftlichen Erfolg eines Automobilunternehmens bei und gewährleistet gleichzeitig eine hohe Kundenzufriedenheit über die Absicherung zuverlässiger Produkte. Jeder Optimierungsschritt drückt sich demzufolge in einer unmittelbaren Wertschöpfung aus.

Die vorliegende Arbeit legt ihren Fokus auf die Auseinandersetzung mit bestehenden Prozessen und deren Optimierung, um die notwendige Akzeptanz für die neu entwickelten Ansätze sicherzustellen. Dabei steht die baugruppenorientierte Erprobung mechanischer Komponenten im Vordergrund. Zum Nachweis der Zuverlässigkeit elektronischer Funktionen im Rahmen einer Gesamtfahrzeugerprobung gilt es weitere Untersuchungen anzustoßen.

Der Aufbau des Zuverlässigkeitsmodells stellt zudem Räume für weitere Anpassungen bereit. Im Zusammenhang mit der Anwendung des Bayes-Theorems kann die Gewichtung von Vorkenntnissen diskutiert werden. Die Herausforderung liegt hierbei in der Entwicklung eines geeigneten Verifikationsansatzes. Zur Verbesserung der Modelleingangsparameter lassen sich gleichfalls die Teststreckenparameter der wenig genutzten Einsatzarten zu späteren Zeitpunkten mit größerer Datenbasis ermitteln. Im Hinblick auf die Einbeziehung von Vorkenntnissen ist zudem der Fragestellung nachzugehen, wie zukünftig der wiederholte Einsatz von Komponenten aus dem modularen Längs- bzw. Querbaukasten in der Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt werden kann und welche Potenziale sich dadurch in der Erprobung erschließen lassen.

In der Versuchsplanung ist die Einbeziehung weiterer fraktioneller Versuchspläne in die Gesamtfahrzeugerprobung zu diskutieren. Dabei wird eine getrennte Planung von abhängigen und unabhängigen Erprobungsumfängen empfohlen. Vor dem Hintergrund der wachsenden Variantenvielfalt ist fortan mehr denn je darauf zu achten, dass der Aufbau der Erprobungsfahrzeuge nicht in voneinander losgelösten Planungen für Erprobungen mit unterschiedlichen inhaltlichen Schwerpunkten festgelegt wird. An Stelle dessen ist der bestehende Erprobungsbedarf in einer einzigen Rahmenplanung synergetisch und umfassend zu koordinieren. Die in dieser Arbeit diskutierten Ansätze beschränken sich dabei nicht allein auf die Gesamtfahrzeugerprobung, sondern lassen sich auf die Fahrzeugkoordination in der gesamten Technischen Entwicklung übertragen.

Das Mengengerüst des Planungsstandards kann über eine Fahrzeugerprobung mit anschließender Analyse der Schadensfallcharakteristiken weiter optimiert werden. Allerdings ist hierbei ein langer zeitlicher Horizont zu berücksichtigen, und die Erprobungsergebnisse sind um Effekte durch mögliche Abweichungen von der über das Mengengerüst hergeleiteten Erprobungsplanung zu bereinigen. Bei der Diskussion der Ziellaufleistungen in der Fahrzeugerprobung liefert die Analyse des Kundennutzungsverhaltens in weiteren Absatzmärkten neue Erkenntnisse.

Abschließend darf nicht unerwähnt bleiben, dass das technologische Umfeld in der Automobilindustrie einem Wandel unterliegt. Wie die gesamte Fahrzeugentwicklung muss auch eine Gesamtfahrzeugerprobung in naher Zukunft Antworten auf den Technologiewechsel hin zu hybriden und rein elektrischen Antriebskonzepten finden. Dies wird sich im Wesentlichen in einer Anpassung bestehender Erprobungsinhalte ausdrücken. Unabhängig davon wird sich auch zukünftig die Planung einer Gesamtfahrzeugerprobung auf die statistischen Zusammenhänge in der Zuverlässigkeitstheorie und der Versuchsplanung beziehen.

# A ANHANG

## Symbolverzeichnis

A	Formparameter der Betaverteilung bzw. Betadichtefunktion, Ereignis, Effekt
$A_0$	Formparameter der a priori-Betadichtefunktion
$A_R$	Formparameter der Ranggrößen-Betaverteilung
a	Regressionsvektor
B	Formparameter der Betaverteilung bzw. Betadichtefunktion, Ereignis
$B_0$	Formparameter der a priori-Betadichtefunktion
$B_R$	Formparameter der Ranggrößen-Betaverteilung
b	Formparameter der Weibullverteilung unter Betriebsbedingungen
$b_p$	Formparameter der Weibullverteilung unter Prüfbedingungen
$c_{ii}$	Diagonalelement von $(X^T X)^{-1}$
D	Differenzmatrix
$D_{KS}$	Distanz im Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest
d	Euklidische Distanz
$d_{ij}$	Elemente der Differenzmatrix
$(d_{ij})_-$	Negative Elemente der Differenzmatrix
$E_m$	Erprobungsmatrizen, Ereignis
e	Fehlervektor
$e_{ijk}$	Elemente der Erprobungsmatrizen
$F(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t
$f(t)$	Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte zum Zeitpunkt t
$f(s)$	Laufleistungsverteilung zur Laufstrecke s
f	Anzahl der Faktoren, Anzahl der Hauptbaugruppen
i	Ranggröße, Zählvariable
$i'$	Ranggröße zur Berücksichtigung von Ausfallzeitpunkten
j	Zählvariable

---

$k$	Neigungskoeffizient der Wöhlerlinie, Anzahl an Faktoren, Zählvariable
$L_v$	Lebensdauerverhältnis
$m$	Anzahl der Faktorstufenkombinationen, Anzahl möglicher Fahrzeugeinsätze
$N$	Schwingspielzahl der Wöhlerlinie
$N_{ref}$	Referenzpunkt auf der Wöhlerlinie
$n$	Stichprobengröße, Anzahl an Faktorstufen, Anzahl an Versuchsdurchführungen
$P$	Allgemeiner Planungsstandard
$P_A$	Aussagewahrscheinlichkeit
$P(A)$	Wahrscheinlichkeit des Ereignisses $A$
$P(B A)$	Bedingte Wahrscheinlichkeit des Ereignisses $B$ bei Eintreten des Ereignisses $A$
$p$	Anzahl zusätzlicher Faktoren, Wahrscheinlichkeit
$R_{med}$	Median der Zuverlässigkeit
$R_{min}$	Mindestzuverlässigkeit
$R(t)$	Zuverlässigkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit
$r$	Raffungsfaktor
$S$	Projektspezifischer Planungsstandard
$S_a$	Nennspannungsamplitude der Wöhlerlinie
$S_{ref}$	Referenzpunkt auf der Wöhlerlinie
$S(a)$	Fehlerquadratsumme von $a$
$s$	Laufstrecke
$s_{ij}$	Elemente des projektspezifischen Planungsstandards
$T$	Charakteristische Lebensdauer der Weibullverteilung
$T_f$	Charakteristische Lebensdauer unter normaler Betriebsbeanspruchung im Feld
$T_p$	Charakteristische Lebensdauer unter erhöhter Prüfbeanspruchung im Versuch
$t$	Zeitpunkt, geforderte Lebensdauer
$t_a$	Ausfallzeitpunkt
$t_0$	Ausfallfreie Zeit der Weibullverteilung

$t_p$	Dauer der Erprobungsdurchführung
$u$	Eigenschaftsvektor Erprobungsstrecke
$V(t)$	Verfügbarkeit zum Zeitpunkt $t$
$v$	Eigenschaftsvektor Erprobungsstrecke
$v_i$	Gewichtungsfaktoren, Vorzeichen im Versuchsplan
$X$	Matrix der Faktorstufenausprägungen, Ereignis
$x$	Anzahl der Ausfälle, codierte Faktorstufenausprägung, Zufallsgröße
$x'$	Normierte codierte Faktorstufenausprägung
$x_m$	Arithmetisches Mittel der codierten Faktorstufenausprägungen
$x_o$	Obergrenze der codierten Faktorstufenausprägungen
$x_u$	Untergrenze der codierten Faktorstufenausprägungen
$x_{med}$	Median der Betaverteilung
$y$	Ergebnis eines Zuverlässigkeitsversuchs, Zielgrößenvektor
$y_{i,m}$	Arithmetisches Mittel der Ergebnisse mehrerer Zuverlässigkeitsversuche
$z(t)$	Ausfallrate zum Zeitpunkt $t$
$B(A,B)$	Betafunktion
$\Gamma(A)$	Gammafunktion
$\mu$	Mittelwert der Laufleistungsverteilung
$\sigma$	Standardabweichung der Laufleistungsverteilung
$\Omega$	Ereignisraum

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Sieger der Herkomer Konkurrenz 1906: Dr. Rudolf Stöß (links) auf einem Horch 18/22 PS (Audi AG).....	1
Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit.....	6
Abbildung 2.1: Einflussfaktoren auf die Gesamtfahrzeugzuverlässigkeit.....	8
Abbildung 2.2: V-Modell der Systementwicklung.....	10
Abbildung 2.3: Handlungsfelder der Gesamtfahrzeugerprobung.....	11
Abbildung 2.4: Ermittlung einer kostenoptimalen Zuverlässigkeit.....	15
Abbildung 3.1: Dichtefunktion der Betaverteilung.....	23
Abbildung 3.2: Dichtefunktion der Weibullverteilung.....	24
Abbildung 3.3: Beschreibung des Ausfallverhaltens mechanischer Systeme (VDA 2000) ...	25
Abbildung 3.4: Aussagewahrscheinlichkeit $P_A$ in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit $R$ (Krolo 2004).....	27
Abbildung 3.5: Zuverlässigkeit $R$ in Abhängigkeit des Lebensdauerhältnisses $L_v$ für unterschiedliche Stichprobengrößen $n$ (VDA 2000).....	29
Abbildung 3.6: Streuung der Ausfallzeitpunkte einer Ranggröße (VDA 2000).....	32
Abbildung 3.7: Betadichtefunktion für unterschiedliche Ranggrößen (VDA 2000).....	34
Abbildung 3.8: Bestimmung einer a posteriori-Dichtefunktion über den Satz von Bayes ...	36
Abbildung 3.9: Einfaktorvariation gegenüber Versuchsplanung.....	40
Abbildung 4.1: Unterschiedliche Fahrbahnzustände in der Gesamtfahrzeugerprobung (Audi AG).....	52
Abbildung 4.2: Verweildauer der Geschwindigkeit auf ausgewählten Erprobungsstrecken.....	57
Abbildung 4.3: Vergleich der Erprobungsstreckencharakteristiken.....	58
Abbildung 4.4: Maximum-Likelihood-Schätzer für den Weibullparameter $b = 1,67$ des Schlechtwegekurses.....	62
Abbildung 4.5: Eignung der Erprobungsarten zur Aufdeckung baugruppenspezifischer Mängel.....	65
Abbildung 4.6: Zusammenhang zwischen Erprobungsstreckencharakteristik und dem streckenspezifischen Ausfallverhalten.....	67

Abbildung 4.7: Ausfallhäufigkeiten in Abhängigkeit des Produktreifegrades .....	68
Abbildung 4.8: Empirische und approximierte jährliche Laufleistungsverteilung eines Audi A6 Avant Diesel.....	70
Abbildung 4.9: Laufleistungsverteilungen der Otto- und Diesel-Motorisierungen in den Segmenten A und D .....	72
Abbildung 4.10: Eingangsgrößen des Zuverlässigkeitsmodells.....	74
Abbildung 5.1: Ausgewogenheit der Erprobungsstreckencharakteristik.....	77
Abbildung 5.2: Eingeschränkter Zustandsraum der Fahrzeugkonfiguration.....	79
Abbildung 6.1: Nachgewiesene Zuverlässigkeit in unterschiedlichen Erprobungsszenarien .....	93
Abbildung 6.2: Zielkonflikt zwischen einer varianten- und marktorientierten Erprobungsplanung.....	95
Abbildung 6.3: Durchschnittliches Fahrzeugalter in Deutschland und bei der Löschung ..	100
Abbildung 6.4: Vergleich durchschnittlicher Fahrstrecken im Kundenbetrieb mit der Ziellaufleistung in der Erprobung in der Kompaktwagen- und gehobenen Mittelklasse.....	101
Abbildung 7.1: Sensitivitäten der Zuverlässigkeitsparameter.....	104
Abbildung 7.2: Synergiepotenziale in der Erprobungsplanung.....	106

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Vollständiger faktorieller $2^3$ -Versuchsplan (Kleppmann 2006) .....	43
Tabelle 3.2: Fraktioneller faktorieller $2^{4-1}$ -Versuchsplan (Kleppmann 2006).....	43
Tabelle 3.3: Erweiterung des fraktionellen faktoriellen $2^{4-1}$ -Versuchsplans um Wechselwirkungen (Kleppmann 2006) .....	44
Tabelle 3.4: Maximale Auflösung eines Versuchsplans in Abhängigkeit der Anzahl der Faktoren k und der Faktorstufenkombinationen m (Kleppmann 2006) .....	45
Tabelle 3.5: Orthogonales Feld $L_9(3^4)$ nach Taguchi (Kleppmann 2006).....	48
Tabelle 4.1: Zuverlässigkeitsparameter der Erprobungsstrecken in der Gesamtfahrzeugerprobung .....	64
Tabelle 4.2: Streckenkennzahlen in der Gesamtfahrzeugerprobung .....	67
Tabelle 5.1: Zuordnung von Entwicklungskomplexitäten.....	84
Tabelle 5.2: Auszug aus dem Planungsstandard der Gesamtfahrzeugerprobung .....	84
Tabelle 5.3: Auszug aus dem optimalen Erprobungsplan .....	88
Tabelle 6.1: Gegenüberstellung des Planungsstandards und der Ausfallhäufigkeiten in der Erprobung.....	97
Tabelle 6.2: Optimiertes Mengengerüst des Planungsstandards .....	98
Tabelle 7.1: Weibullparameter und Raffungsfaktoren unterschiedlicher Beobachtungszeiträume .....	105

## Literaturverzeichnis

- Avižienis A.; Laprie J.-C.; Randell B.: Dependability and its threats - A taxonomy, in: Building the Information Society (International Federation for Information Processing), Springer, Boston, 2004, S. 91-120
- Bade, W.: Das Auto erobert die Welt – Biographie des Kraftwagens, Zeitgeschichte-Verlag Wilhelm Andermann, Berlin, 1938
- Baumann, G.: Werkzeuggestützte Echtzeit-Fahrsimulation mit Einbindung vernetzter Elektronik, Dissertation, Stuttgart, 2003
- Bayes, T.: An essay towards solving a problem in the doctrine of chances, Philosophical Transactions of the Royal Society, Nr. 53, 1763, S. 370-418; erneut veröffentlicht in: Biometrika, Nr. 45, 1958, S. 293-295
- Beichelt, F.: Stochastik für Ingenieure. Eine Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Mathematische Statistik, Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 1995
- Belyaev, Y. K.; Kahle, W.: Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik bei der Analyse von Zuverlässigkeitsdaten, Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2000
- Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug und Maschinenbau – Ermittlung von Bauteil- und Systemzuverlässigkeiten, 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004
- Braitschink, P.; Reuss, H.-C.: Dynamische Zustandsautomaten Verifikation, in: Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung - Mess- und Versuchstechnik, VDI-Berichte 1900, Düsseldorf, 2005, S. 123-135
- Bunke, O.: Neue Konfidenzintervalle für den Parameter der Binomialverteilung, in: Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin. Math.-naturwiss. Reihe, Nr. 9., 1960, S. 335-363.
- DAT Deutsche Automobiltreuhand GmbH: Autohaus Extra „DAT-Report 2008“, in: Autohaus 7/2008, Springer Transport Media GmbH, 2008
- Dennis Cook, R.; Nachtsheim, C. J.: A Comparison of Algorithms for Constructing Exact D-Optimal Designs, Technometrics, Vol. 22, Nr. 3, 1980, S. 315-324

- Deshpande, J. V.; Purohit, S. G.: Life Time Data: Statistical Models and Methods, in: Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, Vol. 11, World Scientific, New Jersey, London, Singapore, Beijing, Shanghai, Hong Kong, Taipei, Chennai, 2005
- DIN 25424-1: Fehlerbaumanalyse – Methode und Bildzeichen, Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 1981
- DIN 40041: Zuverlässigkeit – Begriffe, Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 1990
- DIN EN 61508-4: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer / elektronischer / programmierbar elektronischer Systeme – Begriffe und Definitionen, Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2002
- Dykstra, O.: The augmentation of experimental data to maximize  $|X'X|$ , Technometrics, Vol. 13, Nr. 3, 1971, S. 682-688.
- Ehrgott, M.: Multicriteria Optimization, Lecture Notes in Economic and Mathematical Systems 491, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2000
- Geiger, R.; Lämmermann, S.: Übergang von Simulation zur Erprobung: Erfahrungen, Chancen, Risiken – Am Beispiel Softwareintegration in einem Antriebsstrang-Steuergeräteverbund im Projekt EAST-EEA, in: Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung - Mess- und Versuchstechnik, VDI-Berichte 1900, Düsseldorf, 2005, S. 137-159
- Guddat, U.: Automatisierte Tests von Telematiksystemen im Automobil, Dissertation, Sindelfingen, 2003
- Gundlach, C.: Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung, Dissertation, kassel university press, Kassel, 2004
- Haibach, E.: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2006
- Heitmann, P.: Beitrag zur Zuverlässigkeitsanalyse komplexer Systeme bei Ungewissheit am Beispiel eines autonom fahrenden Fahrzeuges, Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2005
- Hitziger, T.: Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung, Dissertation, Stuttgart, 2007

- Hjorth, U.: A reliability distribution with increasing, decreasing, constant and bathtub shaped failure rates, *Technometrics*, Vol. 22, Nr.1, 1980, S. 99-104
- Ingolstädter Zeitung: Automobil-Zuverlässigkeitsfahrt-Herkomerkonkurrenz (o. V.), 8. Juni 1906
- Kettler C.; Waldner, U.: Die Struktur der Erprobungsklausel im Produkthaftpflichtmodell – Anwendungsbereich und Wirksamkeit, *VersR* 2004, S. 413-425
- Kiefer, J.: Optimum experimental designs V, with applications to systematic and rotatable designs, *Proceedings Fourth Berkeley Symposium Math. Statist. Prob.*, Vol. 1, Univ. California Press, Berkeley, 1961, S. 381-405
- Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung, 4. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2006
- Kolb, M.: D-optimale Versuchspläne. Eine Methode zur Abschätzung praktikabler Versuchszahlen, in: *Qualität und Zuverlässigkeit (QZ)*, Jahrg. 41, Heft 7, Carl Hanser Verlag, München, 1996, S. 818-821
- Krolo, A.; Fritz, A.; Bertsche, B.: Correlation Between the Failure Behavior of Automotive Components Under Taxi & Field Operating Conditions, *Proceedings Annual Reliability & Maintainability Symposium*, 2001, S. 314-321
- Krolo, A.: Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen, *Dissertation*, Stuttgart, 2004
- Lang, M.: Untersuchungen zur Optimierung des derzeitigen Garantiezeit-Prognosemodells bezüglich der Anwendung für Langzeitprognosen mit Daten außerhalb der Garantiezeit, *Diplomarbeit*, Wolfsburg, Zwickau, 2006
- Maisch, M.; Depping, H.; Bertsche, B.: Zuverlässigkeitstestplanung durch Zeitraffung am Beispiel einer Planetenradstufe eines Nutzfahrzeuggetriebes, in: *Zuverlässige Produkte – Basis für hohe Kundenzufriedenheit*, VDI-Berichte 1713, Düsseldorf, 2002, S. 243-261
- Maisch, M.: Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten, *Dissertation*, Stuttgart, 2007
- Meyer, M.: Methoden zur Analyse von Garantiedaten für die Sicherheits- und Zuverlässigkeitsprognose von Komponenten und Baugruppen im Kraftfahrzeug, *Dissertation*, Wuppertal, 2003

- Meyer, O.: Zuverlässigkeitsprüfungen und Produkthaftung, in: Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte, VDI-Berichte 1984, Düsseldorf, 2007, S. 1-7
- Mitchell, T. J.: An Algorithm for the Construction of „D-Optimal“ Experimental Designs, Technometrics, Vol. 16, Nr. 2, 1974, S. 203-210
- Mock, R.: Verfahren zur statistischen Schnellabschätzung von Zuverlässigkeitskenngrößen - Polyprojekt Risiko und Sicherheit technischer Systeme, Polyprojekt-Bericht 3/1994, Zürich, 1994
- Montgomery, D. C.: Design and Analysis of Experiments, 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2001
- Musa, J. D.; Iannino, A.; Okumoto, K.: Software Reliability: Measurement, Prediction, Application, McGraw-Hill Book Company, New York, 1987
- Nelson, W. B.: Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans and Data Analysis, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2004
- Otto, M.: Chemometrie: Statistik und Computereinsatz in der Analytik, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1997
- Pauli, B.; Meyna A.: Zuverlässigkeitsprognosen für Kfz-Komponenten bei unvollständigen Daten, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Jahrg. 102, Heft 12, Vieweg Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2000, S. 1104-1109
- Ronniger, C. U.: Zuverlässigkeitsanalyse mit Weibull in Entwicklung und Serie, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Jahrg. 101, Heft 11, Vieweg Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1999, S. 942-949
- Ryll, F.; Kutzler, T.: Bestimmung von Abnutzungsvorräten in technischen Anlagen zur Gestaltung einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie, in: Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte, VDI-Berichte 1984, Düsseldorf, 2007, S. 65-75
- Schwarz, J.; Greiner, S.; Heller, S.; Engelhard, F.: Design to Quality – Ein geschlossener Kreislauf von der Felddatenanalyse zur Zuverlässigkeit, in: Zuverlässige Produkte – Basis für hohe Kundenzufriedenheit, VDI-Berichte 1713, Düsseldorf, 2002, S. 1-23
- Shell Deutschland Oil: Shell Pkw-Szenarien bis 2030 – Flexibilität bestimmt Motorisierung, Deutsche Shell Holding GmbH, Hamburg, 2004
- Storm, R.: Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und Statistische Qualitätskontrolle, Carl Hanser Verlag, München, 2007

Stroop, J.; Köhl, S.; Peller, M.; Riedesser, P.: Test von FlexRay-Steuergeräten am Hardware in-the-Loop Simulator, in: Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung - Mess- und Versuchstechnik, VDI-Berichte 1900, Düsseldorf, 2005, S. 109-121

VDI-Richtlinie 4005: Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1981

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten: Zuverlässigkeits-Methoden und -Hilfsmittel, Teil 2, 3. überarb. und erweiterte Aufl., Frankfurt, 2000

De Vries, V.: Systemtheoretischer Ansatz für die frühe Phase des Produkt-Innovationsprozesses, Dissertation, Zürich, 2006

---

# Lebenslauf

Name Jochen Ungermann

Geburtsdatum 9. Juni 1982

Geburtsort Gelnhausen

Staatsangehörigkeit deutsch

## *Bildungsweg*

1988 – 1992 Grund- und Hauptschule Eidengesäß

1992 – 2001 Grimmelshausen Gymnasium Gelnhausen  
Allgemeine Hochschulreife

2001 – 2006 Universität Karlsruhe (TH)  
Diplomstudiengang Wirtschaftsingenieurwesen

2006 – 2009 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)  
Externes Promotionsstudium

## *Berufstätigkeit*

2006 – 2009 Audi AG, Ingolstadt  
Entwicklung Festigkeit und Langzeitqualität

seit 2009 Audi Electronics Venture GmbH, Gaimersheim  
Softwareentwicklung



