

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.

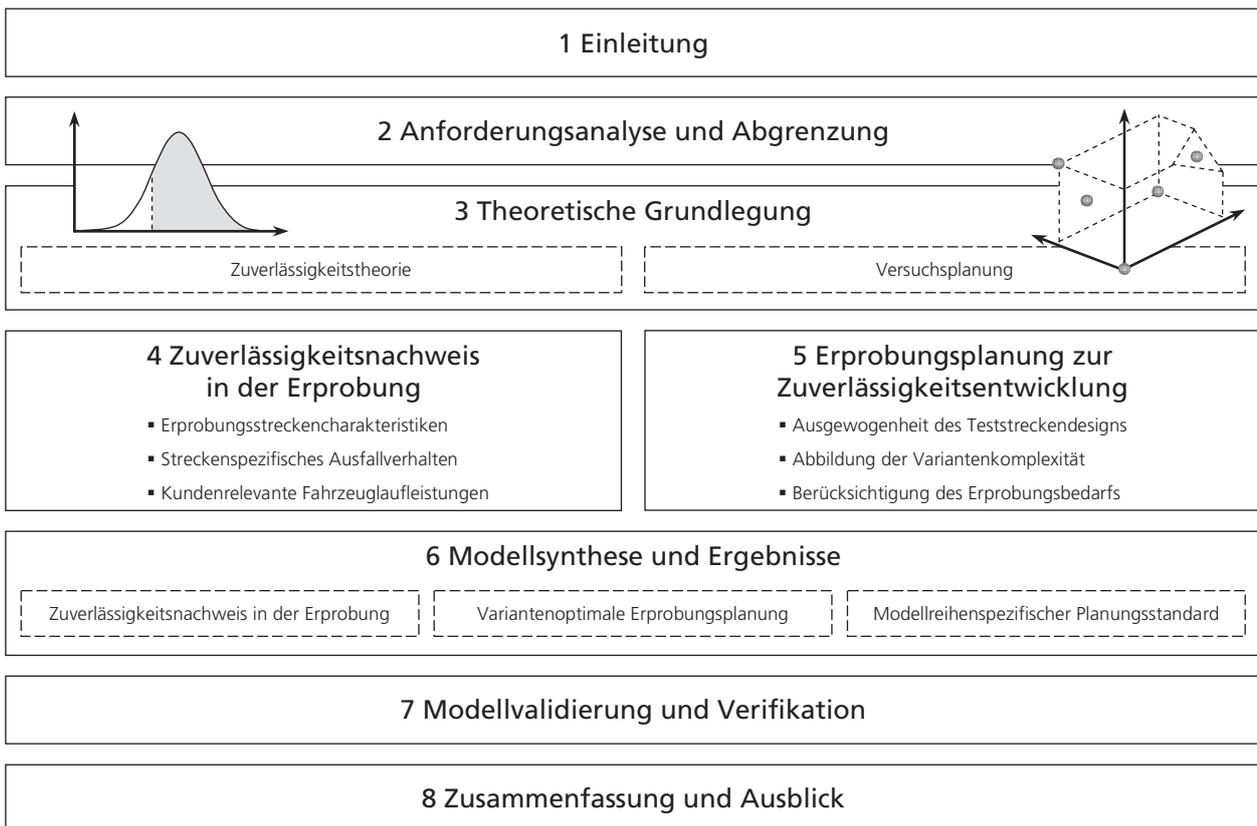


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

## 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.

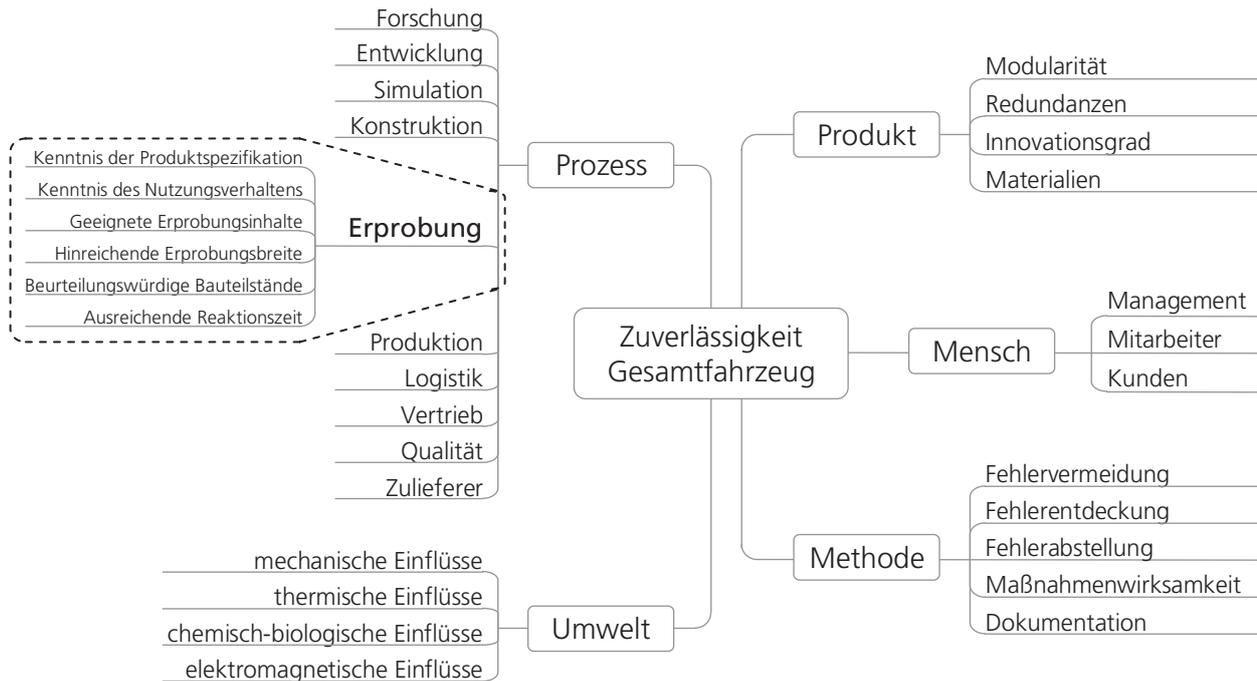


Abbildung 2.1: Einflussfaktoren auf die Gesamtfahrzeugzuverlässigkeit

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.

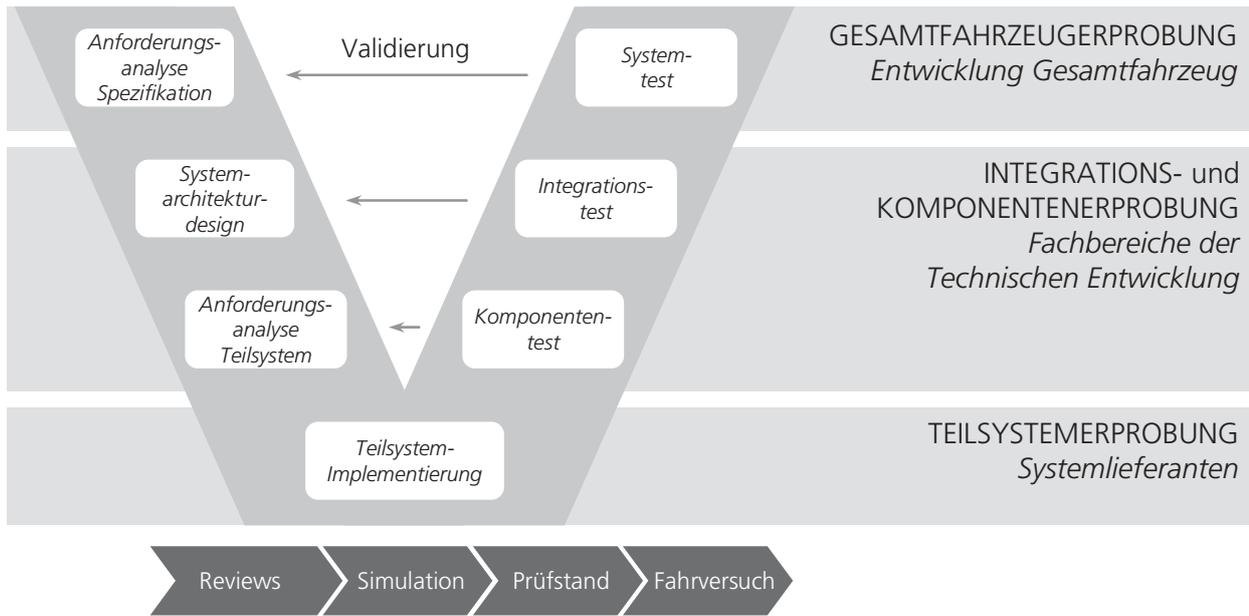


Abbildung 2.2: V-Modell der Systementwicklung

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.

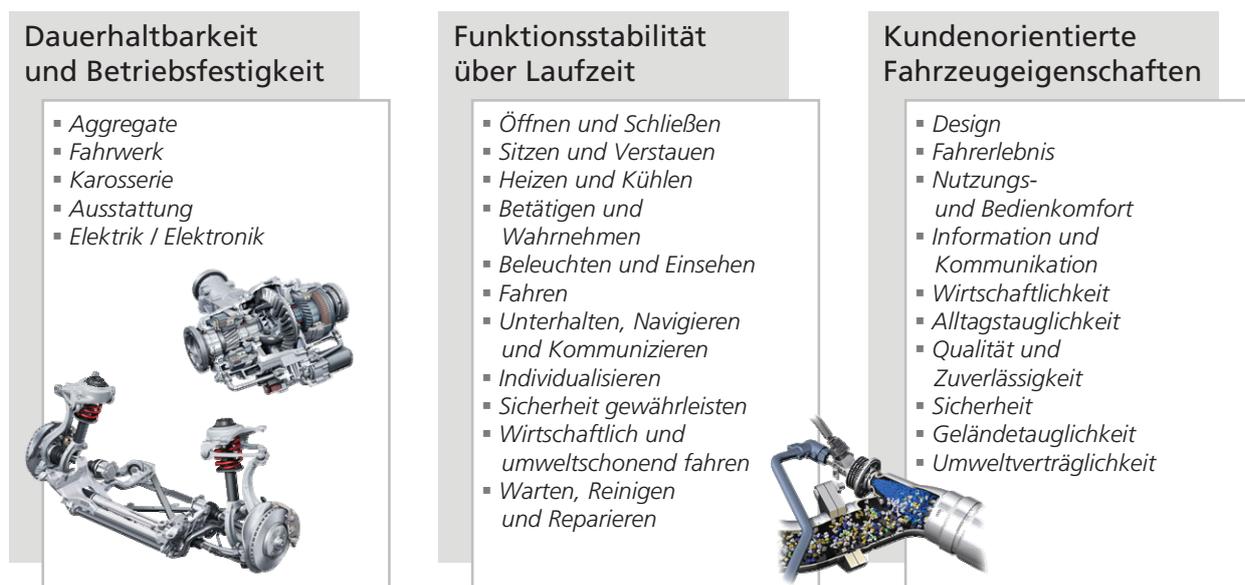


Abbildung 2.3: Handlungsfelder der Gesamtfahrzeugerprobung

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-