

Planungsstandard für die Gesamtfahrzeugerprobung unter Einbeziehung von Erprobungs- und Gewährleistungsdaten

Die Entwicklung eines Planungsstandards für die Gesamtfahrzeugerprobung folgt der Zielsetzung, noch vor einem Serieneinsatz möglichst viele potenzielle Fahrzeugmängel systematisiert in der Erprobung aufzuzeigen. Zu diesem Zweck werden bei der Audi AG Erprobungsbedarfe aus der Analyse von Erprobungs- und Gewährleistungsdaten abgeleitet und über eine Optimierungsprozedur synergetisch auf einer minimalen Fahrzeuganzahl abgebildet. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Berücksichtigung der Variantenvielfalt.



1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der wachsenden Variantenvielfalt im Automobilbau steigt auch die Komplexität der Gesamtfahrzeu- gerprobung. Methoden der statistischen Versuchsplanung helfen dabei, zumin- dest die Hauptausstattungsmerkmale ausgewogen und in sinnvoller Kombina- tion zu testen und dabei gleichzeitig die Gesamtzahl an Erprobungsträgern zu minimieren. Darüber hinaus stellt sich die Frage, welcher Erprobungsbedarf mit dem Einsatz der einzelnen Baugruppen einhergeht. Dazu wird in diesem Beitrag ein Planungsstandard für die Gesamt- fahrzeu- gerprobung entwickelt, der un- ter Einbeziehung von Teststreckencha- rakteristiken und Schadensfalldaten in der Erprobung die Fahrzeugzuordnung auf die jeweiligen Einsatzarten festlegt. Dabei gilt es sicherzustellen, dass sich die Struktur des Planungsstandards auch auf zukünftige Fahrzeugprojekte über- tragen lässt. Aus diesem Grunde werden Erprobungsbedarfe gestaffelt nach Ent- wicklungskomplexität und Produktreife- grad für die Baugruppen definiert, so- dass variable Größen unter Einbeziehung der Charakteristik der zu erprobenden Fahrzeugfamilie folgen.

Von Interesse ist aber auch die Festle- gung von Ziellaufleistungen auf den Er- probungstrecken. Zu diesem Zweck wird das reale Kundennutzungsverhalten den Auslegungszielen in der technischen Pro- duktbeschreibung gegenübergestellt. An- hand von Gewährleistungsdaten lassen sich dabei die durchschnittlichen, jähr- lichen Fahrleistungen in verschiedenen

Fahrzeugsegmenten ermitteln und in die Überlegungen mit einbeziehen.

Schließlich werden die Anforderun- gen des Planungsstandards und der sta- tistischen Versuchsplanung in einer Op- timierungsprozedur zusammengeführt. Das Ziel dabei lautet, eine variantenopti- male und bedarfsorientierte Gesamtfahr- zeu- gerprobung sicherzustellen.

2 Ermittlung der Erprobungsstreckencharakteristik

In der Gesamtfahrzeu- gerprobung der Audi AG werden tagtäglich umfang- reiche Testkilometer in verschiedenen Klimaregionen der Welt zurückgelegt. Die Erprobungsfahrzeuge sind dabei un- terschiedlichen Umwelteinflüssen und dynamischen Beanspruchungen aus- gesetzt, sodass ein Zuverlässigkeitsnachweis unter verschiedenen Betriebsbedingun- gen geführt werden kann. Jede Erpro- bungsstrecke besitzt hierbei Alleinstel- lungsmerkmale, die eine besondere Be- lastung einzelner Komponenten nach sich ziehen. Somit ist die Nutzung der ver- schiedenen Erprobungsszenarien über die Abbildung unterschiedlicher kunden- relevanter Grenzbeanspruchungen be- gründet. **Tabelle 1** zeigt die wichtigsten Einsatzarten mit ihrem inhaltlichen Schwerpunkt und Laufleistungsziel.

Die Charakteristik der Teststrecken wird über Messfahrten mit zusätzlichen Sensoren zur Beanspruchungsmessung (Wege, Kräfte, Beschleunigungen) und Datenloggern zur Aufzeichnung des Da- tenbusverkehrs des Fahrzeugs ermittelt.

Die Autoren



Dipl.-Wi.-Ing.
Jochen Ungermann
ist Doktorand im
Bereich Entwicklung
Festigkeit und Lang-
zeitqualität bei der
Audi AG in Ingolstadt.



Dipl.-Ing.
Bernhard Hammer
ist Leiter Entwicklung
Festigkeit und Lang-
zeitqualität bei der
Audi AG in Ingolstadt.



Prof. Dr.
Roland Siegwart
ist Ordinarius im Auto-
nomous Systems Lab der
ETH Zürich (Schweiz).

Tabelle 1: Einsatzarten in der Gesamtfahrzeu- gerprobung

Erprobungsstrecke	Zielsetzung	Laufleistung
Schlechtwegekurs	Strukturprüfung von Karosserie, Fahrwerk, Antriebsstrang und Anbauteilen	8000 km
Wechselkurs	Verschleiß- und Funktionserprobung sämtlicher Fahrzeugkomponenten	100.000 km
Hochgeschwindigkeitskurs	Volllasterprobung unter dem Einfluss hoher Umgebungstemperaturen	30.000 km
Rennstrecke	Erprobung unter hohen Längs- und Querkrafteinflüssen	10.000 km
Öffentliche Straße	Kundennaher Betrieb des Erprobungsfahrzeugs auf Landstraßen und Autobahnen	150.000 km
Stadt	Stop-and-Go-Betrieb im Innenstadtbereich in gemäßigten und warmen Klimazonen	30.000 km
Anhänger	Erprobung von Karosserie, Fahrwerk und Antriebsstrang mit erhöhter Zuglast	30.000 km
Kaltland	Beurteilung der Fahrzeugkomponenten unter extremer Kälteeinwirkung	30.000 km
Heißland	Erprobung auf schlecht ausgebauten Landstraßen unter Wärmeeinfluss	30.000 km
Splitt	Beurteilung von Steinschlagschäden an Fahrwerkteilen und Karosserie	10.000 km

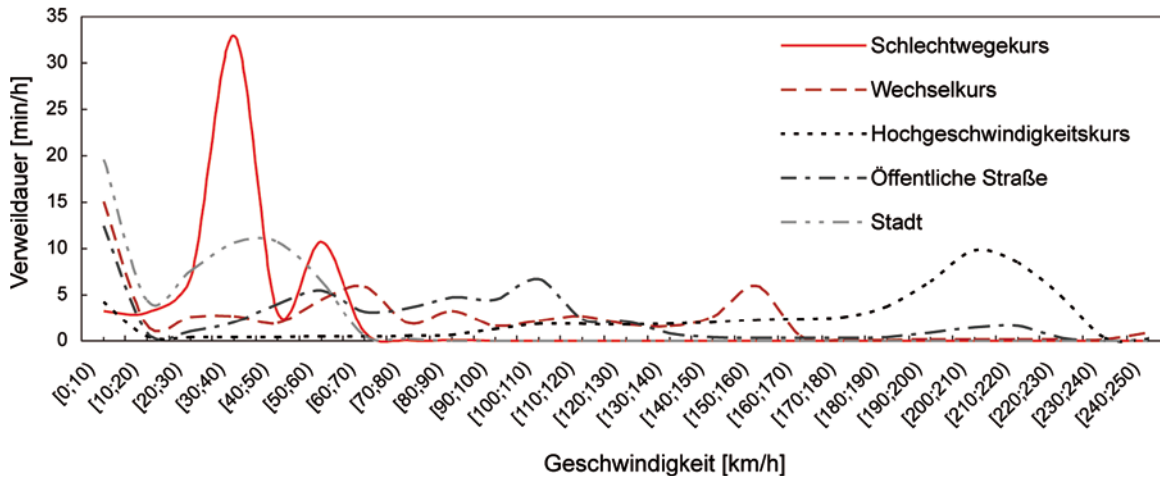


Bild 1: Verweildauer der Geschwindigkeit auf ausgewählten Erprobungsstrecken

Die nationalen Wetterdienste liefern ergänzende Informationen über die vorherrschenden Umweltbedingungen. Insgesamt entsteht so ein charakteristisches Erprobungsprofil aus verschiedenen Bausteinen, das im Zusammenhang mit der Erprobungsplanung und der Analyse von Schadensfällen eine wichtige Informationsbasis darstellt.

In Bild 1 ist beispielhaft der typische Geschwindigkeitsbereich einzelner Einsatzarten abgebildet. Über die Darstellung der auf eine Stunde normierten Verweildauer wird ersichtlich, dass auf dem Schlechtwegkurs im Gegensatz zur

Hochgeschwindigkeitserprobung der niedrige Geschwindigkeitsbereich besonders ausgeprägt ist. Die Stadterprobung hingegen charakterisiert ein hoher Anteil an Standzeiten.

3 Analyse des baugruppen-spezifischen Ausfallverhaltens

Als Grundlage für die Ableitung des Planungsstandes werden nachfolgend die Zusammenhänge zwischen den Charakteristiken der Erprobungsszenarien und des dort vorherrschenden, baugruppen-

spezifischen Ausfallverhalten untersucht. Tabelle 2 stellt dazu die wichtigsten Erprobungsarten und die Hauptbaugruppen eines Fahrzeugs dar. Über eine Intensitäts-Beziehungsmatrix lassen sich anhand eines wechselseitigen Vergleichs der zuvor eingeführten Streckenparameter die für einen baugruppenspezifischen Schadensfall relevanten Parameter ermitteln [1]. Dargestellt sind die jeweils fünf wichtigsten Einflussgrößen, die mit den vorliegenden Streckencharakteristiken abgeglichen werden. Besitzt die Einsatzart hohe Ausprägungen in den betriebsrelevanten Streckenparametern, so ist sie

Tabelle 2: Eignung unterschiedlicher Einsatzarten zur Aufdeckung von Bauteilmängeln

Baugruppe	Motor		Getriebe		Fahrwerk		Karosserie		Ausstattung		Elektronik	
betriebsrelevante Streckenparameter	Längsbeschl.	Längsbeschl.	Längsbeschl.	Längsbeschl.	Radträgerbeschl.	Radträgerbeschl.	Splitteintrag	Splitteintrag	Splitteintrag	Splitteintrag	Elektr. Wellen	Elektr. Wellen
	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Querbeschl.	Querbeschl.	Temperatur	Temperatur	Temperatur	Sonnenstrahlung	Aufbaubeschl.	Aufbaubeschl.
	Höhenprofil	Höhenprofil	Höhenprofil	Höhenprofil	Splitteintrag	Splitteintrag	Aufbaubeschl.	Aufbaubeschl.	Niederschlag	Niederschlag	Temperatur	Temperatur
	Temperatur	Temperatur	Temperatur	Temperatur	Reibwert	Reibwert	Niederschlag	Niederschlag	Temperatur	Temperatur	Sonnenstrahlung	Sonnenstrahlung
	Anhängerbetrieb	Anhängerbetrieb	Anhängerbetrieb	Anhängerbetrieb	Längsbeschl.	Längsbeschl.	Beladung	Beladung	Beladung	Beladung	Niederschlag	Niederschlag
Erprobungsstrecke	Eignung	SF/Fzg	Eignung	SF/Fzg	Eignung	SF/Fzg	Eignung	SF/Fzg	Eignung	SF/Fzg	Eignung	SF/Fzg
Schlechtwegkurs	+	1,9	+	0,7	++	3,7	++	1,4	++	2,2	++	1,6
Wechselkurs	++	3,6	++	1,7	++	3,8	+	0,9	+	2,5	+	1,4
Hochgeschwindigkeitskurs	+	1,3	+	0,7	-	0,7	-	0,2	0	0,9	0	0,5
Rennstrecke	+	0,9	+	1,0	++	2,1	-	0,3	-	0,2	0	0,4
Öffentliche Straße	0	1,8	0	0,7	0	1,7	0	0,2	+	0,9	+	0,8
Stadt	+	1,3	+	1,3	0	2,0	0	0,2	+	0,8	++	1,7
Anhänger	+	0,7	+	0,5	0	1,0	0	0,1	-	0,7	-	0,3
Kaltland	++	2,6	+	0,6	0	1,5	+	0,3	++	0,8	+	0,6
Heißland	+	0,8	+	0,3	0	1,1	+	0,2	++	0,5	+	0,4
Splitt	-	0,4	-	0,1	++	4,2	++	3,4	++	3,3	0	0,7

zur Aufdeckung potenzieller Bauteilmängel in der entsprechenden Hauptgruppe geeignet (positives Vorzeichen).

Der Ermittlung des baugruppenspezifischen Ausfallverhaltens wird nun die auf ein Fahrzeug normierte Anzahl an Schadensfällen in der Erprobung gegenübergestellt. Dazu erfolgt die Auswertung einer Erprobungsdatenbank über einen Zeitraum von neun Jahren. Es zeigt sich, dass sich der unterstellte technische Zusammenhang zwischen Erprobungscharakteristik und Schadensbild in weiten Teilen in den realen Erprobungsdaten widerspiegelt. Auf Basis dieser Auswertung lassen sich baugruppenspezifische Erprobungsbedarfe auf den jeweiligen Teststrecken ableiten.

4 Berücksichtigung von Entwicklungs-komplexitäten und Produktreifegraden

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. Für jede Hauptbaugruppe werden aus diesem Grunde Komplexitätsklassen eingeführt, für die jeweils unterschiedliche Anforderungen im Planungsstandard zu hinterlegen sind. Als Beispiel sei die Hauptgruppe Motor genannt. Jedes neu entwickelte oder überarbeitete Motor-konzept ist einer der Komplexitätsklassen hoher Neuigkeitsgrad, mittlerer Neuigkeitsgrad oder Modellpflege zuzuord-

nen. Die Kategorisierung unterliegt dabei keinen exakt umrissenen Regeln, sondern folgt aus dem technischen Zusammenhang. Im genannten Beispiel fallen etwa leicht modifizierte Motoren mit einer neuen gesetzlichen Abgaseinstufung in die niedrigste Klasse der Modellpflege-Motoren. Über die Zuordnung von Komplexitäten ist somit sichergestellt, dass zur Erprobung von Projekten mit hohem Innovationsgrad größere Fahrzeugflotten vorgehalten werden.

Die Erkenntnisse, die bei der Erprobung eines Fahrzeugs gewonnen werden, sind gleichzeitig abhängig vom Reifegrad des Fahrzeugs. Ein Spannungsfeld liegt hierbei darin, dass frühe Erprobungsfahrzeuge häufig eine unzureichende Aufbauqualität aufweisen und Zuverlässigkeitsaussagen nur bedingt abgeleitet werden können. Demgegenüber ist die Erprobung von späten Fahrzeugen insofern kritisch, als dass die gewonnenen Erkenntnisse erst sehr spät in den Entwicklungsprozess zurückfließen. Untersucht man das Ausfallverhalten nach Baustufen, so lässt sich hinsichtlich der Anzahl an Schadensfällen pro Fahrzeug zunächst eine ansteigende Entwicklung beobachten, die ab den ersten Vorserienfahrzeugen jedoch wieder abnimmt. Dies ist auf zwei gegenläufige Effekte zurückzuführen. Während frühe Fahrzeuge noch eine Vielzahl an Mängeln aufweisen, zeigen seriennahe Fahrzeuge einen deutlich höheren Qualitätsstand. Voraussetzung für eine Beanstandung ist jedoch, dass es sich bei dem zu analysierenden Bauteil um einen beurteilungswürdigen Umfang handelt. Denn obgleich sich frühere Fahrzeugstadien bereits zur Fahrwerkbeurteilung

eignen, können Aussagen über die Stabilität des vernetzten Elektroniksystems beispielsweise erst anhand seriennahe Erprobungsträger getroffen werden. Insgesamt wächst der Umfang beurteilungswürdiger Komponentenstände mit fortschreitender Entwicklung an, mit der Folge, dass auch die Anzahl potenzieller Fehlerquellen steigt.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen erfolgt im Planungsstandard eine Differenzierung hinsichtlich der Entwicklungskomplexität und des Produktreifegrades, sodass sich potenzielle Schadensbilder in der Erprobung möglichst effizient aufzeigen lassen.

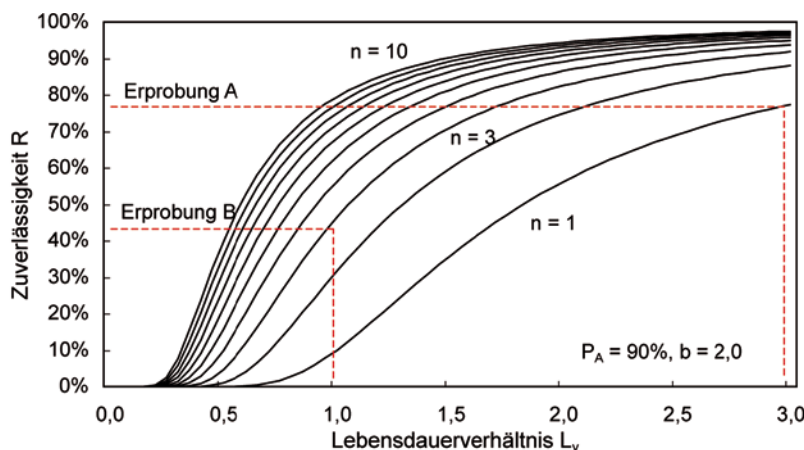
5 Einbeziehung von Laufleistungsverteilungen

In den unterschiedlichen Erprobungsarten werden die Komponenten unter Raffung an ihre Belastungsgrenzen herangeführt. Neben der Art der Belastung und den damit zusammenhängenden Ausfallmechanismen hat dabei insbesondere die Prüfdauer einen bedeutenden Einfluss auf den erbrachten Zuverlässigkeitsnachweis. Unter Einbeziehung des Lebensdauerverhältnisses L_v , der Aussagewahrscheinlichkeit P_A , dem Weibullparameter b und der Anzahl an Erprobungsfahrzeugen n kann ein Zusammenhang mit der nachgewiesenen Zuverlässigkeit R hergestellt werden [2]:

$$R(t) = (1 - P_A)_{L_v, n}^{\frac{1}{b}} \quad \text{Gl. (1)}$$

Das so genannte Lebensdauerverhältnis L_v berechnet sich dabei über das Ver-

Bild 2: Zuverlässigkeit R in Abhängigkeit des Lebensdauerverhältnisses L_v für unterschiedliche Stichproben-größen n



Erprobung A

Ein Erprobungsträger wird ausfallfrei über das Dreifache der geforderten Lebensdauer betrieben.

$$n = 1 \quad L_v = 3,0 \quad R = 77\%$$

Erprobung B

Drei Erprobungsträger werden ausfallfrei bis zur geforderten Lebensdauer betrieben.

$$n = 3 \quad L_v = 1,0 \quad R = 46\%$$

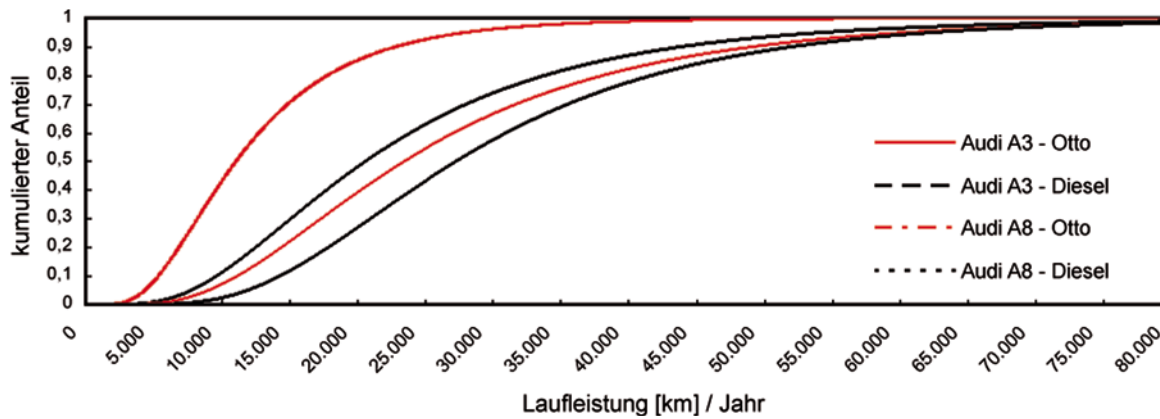


Bild 3: Laufleistungsverteilungen unterschiedlicher Fahrzeugsegmente

hältnis aus Prüfzeit t_p und geforderter Lebensdauer t :

$$L_v = \frac{t_p}{t} \quad \text{Gl. (2)}$$

Es kann jedoch auch über Lastwechsel oder Laufleistungen ausgedrückt werden.

Übertragen auf die Gesamtfahrzeugerprobung bedeutet dies, dass für unterschiedliche Kombinationen aus Fahrzeuganzahl und Ziellaufleistungen jeweils andere Zuverlässigkeiten folgen. 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 größeren Anzahl an Fahrzeugen, die ausfallfrei nur kurze Distanzen zurückgelegt haben, **Bild 2**.

Werden jedoch durch hohe Laufleistungen in der Kompaktwagenklasse Ausfallmechanismen ausgelöst, die in keinem Bezug zum realen Kundenbetrieb stehen, hat dies eine letztlich nicht zu rechtfertigende Überdimensionierung der Fahrzeuge zur Konsequenz. Aus diesem Grunde sind modellreihenspezifische Laufleistungsziele für die Erprobung festzulegen, weshalb die Analyse von Fahrleistungen im Kundenbetrieb an Aufmerksamkeit gewinnt.

Folglich sind Laufleistungsverteilungen auf Basis von Gewährleistungsdaten zu berechnen. Zu diesem Zweck wird die bis zu einem Ausfall zurückgelegte Strecke eines Fahrzeugs in Relation zur Differenz zwischen Ausfallzeitpunkt und Zulassungsdatum gesetzt. Dieses Verhältnis kann auf beliebige Zeitspannen umgerechnet werden. Über die Lebensdauerwerte mehrerer Fahrzeuge lassen sich

dann die Mengenanteile verschiedener Streckenintervalle ermitteln, die etwa innerhalb eines Jahres zurückgelegt wurden. Die jährliche Laufleistungsverteilung folgt schließlich aus der Summenfunktion der Mengenanteile, die wiederum über eine logarithmische Normalverteilungsfunktion angenähert werden kann [3].

In **Bild 3** sind die durchschnittlichen jährlichen Laufleistungen sowie die Laufleistungen von Extremkunden (beispielsweise 90%-Quantil) im A- und D-Segment abgebildet. Weiterführende Untersuchungen auf Basis von langfristigen Felddaten konnten in diesem Zusammenhang zeigen, dass die durchschnittliche jährliche Laufleistungsverteilung von Fahrzeugen mit Ottomotoren über mehrere Jahre nahezu konstant bleibt, während sie bei Dieselfahrzeugen in der Regel nach drei Jahren signifikant abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zahlreiche gewerblich genutzte Fahrzeuge an Privatkunden weiterverkauft werden [4]. Eine Limousine mit Dieselmotorisierung legt unter Berücksichti-

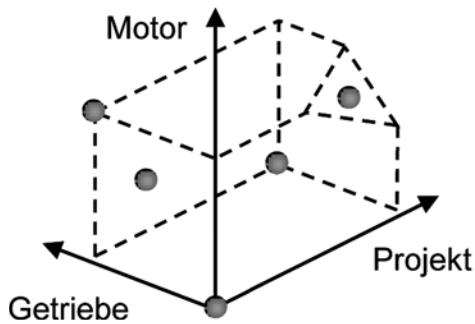
gung dieser Information innerhalb von zwölf Jahren im Durchschnitt eine mehr als doppelt so weite Strecke zurück als ein Kompaktwagen mit Ottomotor. Die Wahl des Betrachtungszeitraums von zwölf Jahren ist dadurch begründet, dass das durchschnittliche Fahrzeugalter bei der Löschung im Register des Kraftfahrt-Bundesamtes seit mehr als 15 Jahren bei knapp zwölf Jahren liegt [5]. Entsprechend ist in der Erprobungsplanung zu berücksichtigen, dass unter Einbeziehung eines identischen Auslegungsziels von 300.000 km im Kompaktwagensegment eine kürzere Fahrstrecke als im oberen Fahrzeugsegment zum Nachweis einer identischen Zuverlässigkeit zurückzulegen ist.

6 Ableitung des Planungsstandards für die Gesamtfahrzeugerprobung

Aus der Analyse des baugruppenspezifischen Ausfallverhaltens auf unterschiedlichen Erprobungsstrecken lassen sich

Tabelle 3: Auszug aus dem Planungsstandard der Gesamtfahrzeugerprobung

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



Projekt	Motor	Getriebe	Anlauf
A4 Limousine	1.8 TFSI	Handschaltgetriebe	2008
A4 Avant	2.0 TDI	stufenloses Getriebe	2008
A5 Sportback	2.0 TFSI	Handschaltgetriebe	2009
A5 Coupé	3.0 TDI	Handschaltgetriebe	2007
A5 Cabrio	3.2 FSI	stufenloses Getriebe	2008
Q5	3.0 TDI	Doppelkupplungsgetriebe	2008
[...]	[...]	[...]	[...]

Bild 4: Eingeschränkter Zustandsraum der Fahrzeugkonfiguration

Mindesterprobungsbedarfe für eine reproduzierbare Gesamtfahrzeugerprobung ableiten. Dabei ist darauf zu achten, dass sich das Regelwerk flexibel an die Charakteristik zukünftiger Fahrzeugprojekte adaptieren lässt. So werden für jede Hauptbaugruppe je nach vorliegendem Reife- und Komplexitätsgrad Mengengerüste festgelegt, denen über die Zuordnung von Erprobungsträgern zu Teststrecken nachzukommen ist, Tabelle 3. Der Planungsstandard besitzt hierbei den immanenten Vorteil, dass er keine gleich bleibende Anzahl an Erprobungsfahrzeugen definiert, sondern der technische Fortschritt und der Umfang des Produktprogramms die Größe der Erprobungsflotte vorgeben.

7 Variantenoptimale und bedarfsgerechte Erprobungsplanung

Das Ziel der Erprobungsplanung liegt in der Abbildung der Variantenvielfalt sowie des aus dem Planungsstandard abgeleiteten Erprobungsbedarfs. Um der ersten Anforderung zu begegnen, ist der Einfluss unterschiedlicher Ausstattungsvarianten auf die Zuverlässigkeit des Gesamtfahrzeugs im Sinne einer Regression aufzufassen. Eine Regressionsgleichung mit dem Regressionskoeffizienten a , der Richtung und Größe der Einflüsse unterschiedlicher Varianten auf die Zielgröße y angibt, und dem Fehler e drückt diesen Zusammenhang aus:

$$y = Xa + e \quad \text{Gl. (3)}$$

Die Dimension der Matrix X mit n Zeilen und f Spalten folgt aus der Anzahl der Erprobungsfahrzeuge n und der berücksichtigten Hauptbaugruppen f . Jede Zeile der Matrix X gibt dabei die Konfiguration

eines Erprobungsfahrzeugs wider, wobei die Faktorstufenausprägungen den einzelnen Komponenten entsprechen. So folgen beispielsweise für den Faktor Getriebe alle zulässigen Getriebearten als Faktorstufenausprägungen, das heißt alle Handschaltgetriebe, Stufenautomaten, stufenlose und Doppelkupplungsgetriebe unterschiedlicher Leistungsklassen. Es gilt nun, ein Versuchsplandesign zu entwickeln, anhand dessen der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Aufbauzuständen und der Zuverlässigkeit mit geringer Fehlerstreuung bestimmt werden kann. Dazu geeignet ist ein so genannter determinanten-optimaler (d -optimaler) Versuchsplan, der sich über

$$\max |X^T X| \quad \text{Gl. (4)}$$

bestimmen lässt [6], [7]. Er bietet den Vorteil, dass sich der zugrunde liegende Versuchsraum beliebig einschränken lässt und nicht zulässige Faktorstufenkombinationen von Beginn an ausgeschlossen werden können, Bild 4. Gleichzeitig ist die Anzahl an Versuchsdurchführungen und Faktorstufen frei wählbar und bereits vorliegende Anordnungen lassen sich bei der Erzeugung eines neuen Versuchsplans berücksichtigen [8], [9]. Zur Bestimmung des d -optimalen Versuchs-

plans wird ein Algorithmus ähnlich der DETMAX-Methode eingesetzt, der über das mehrfache Vertauschen möglicher Versuchseinstellungen eine Maximierung von $|X^T X|$ herbeiführt [10].

Um das Prinzip einer d -optimalen Versuchsplanung anwenden zu können, werden die zuvor genannten qualitativen Faktorstufenausprägungen äquidistant auf das Intervall $[-1,1]$ skaliert, Tabelle 4. Dabei wird jeder Faktorstufenausprägung eine Entwicklungskomplexität zugeordnet, die eine Entscheidung im Planungsstandard findet.

Das Ziel einer variantenoptimalen und bedarfsgerechten Erprobungsplanung setzt nun die Lösung eines Optimierungsproblems mit drei konkurrierenden Zielsetzungen voraus:

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

Ein optimaler Versuchsplan ist bestimmt, 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.

Tabelle 4: Zuordnung von Entwicklungskomplexitäten

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: Auszug aus dem variantenoptimalen Erprobungsplan

	D-opt. Versuchsplan			Einsatzart			Baustufe	Projekt	Motor	Getriebe
1	-0,60	-0,54	-0,33	EA 3			Prototyp	A4 Avant	R4 2.0 TDI	Handschaltgetriebe
2	0,20	-0,69	-1,00	EA 1	EA 2	EA 3	Vorserie	A5 Coupé	V6 3.2 FSI	Stufenautomat
3	1,00	-0,38	-0,67	EA 2	EA 3		Prototyp	Q5	V6 3.0 TDI	Doppelkupplungsgetriebe
4	0,60	-1,00	1,00	EA 1	EA 2		Prototyp	A5 Cabrio	R4 1.8 TFSI	stufenloses Getriebe

Aus dem allgemeinen Planungsstandard, Tabelle 3, wird zu diesem Zweck ein projektspezifischer Standard S entsprechend der Charakteristik der zu erprobenden Fahrzeugfamilie abgeleitet. Dieser gibt Auskunft über den komponentenspezifischen Erprobungsbedarf, den es synergetisch in den zur Verfügung stehenden Erprobungsfahrzeugen unterzubringen gilt. Um die Diskrepanz zwischen der Soll- und Ist-Planung zu erfassen, wird die Differenzmatrix D eingeführt:

$$D = S - \sum_{k=1}^m E_k \quad \text{Gl. (5)}$$

Sie beschreibt die Abweichung der für die Erprobung geplanten Fahrzeugausstattungen von den Anforderungen des projektspezifischen Planungsstandards. Da Erprobungsfahrzeuge mehrfach eingesetzt werden können, liegen m Matrizen E_k für jeden Einsatzzyklus vor. Besitzt die Matrix D positive Einträge, so wurden nicht alle Regeln des Planungsstandards vollständig umgesetzt. Umgekehrt liefern negative Einträge ein Indiz dafür, dass Ausstattungsumfänge eingeplant wurden, die nicht durch den Standard eingefordert worden sind. An dieser Stelle wird deutlich, dass das Ziel der Optimierung nicht in der vollständigen Angleichung aller Einträge der Differenzmatrix auf Null liegen kann. Denn wird durch den Planungsstandard ein Fahrzeug mit Sportfahrwerk gefordert, so führt dieses Fahrzeug gleichzeitig weitere Baugruppen mit sich, die nach Vorgabe des Standards unter Umständen nicht mehr zwingend erprobt werden müssen. Somit sind über den intelligenten Aufbau der Erprobungsfahrzeuge möglichst viele Regeln des Planungsstandards in einem Fahrzeug abzubilden, so dass die Anzahl der Erprobungsträger minimiert wird.

Ein Optimum hinsichtlich des Erfüllungsgrades des Planungsstandards liegt

vor, wenn die Unterplanung (Betrag der positiven Einträge in D) innerhalb der Differenzmatrix auf Null reduziert und gleichzeitig ein Minimum hinsichtlich der Überplanung (Betrag der negativen Einträge in D) erzielt worden ist. Diesen Zusammenhang drückt das nachfolgende Optimierungsproblem aus:

$$\min \left[n^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (d_{ij})_- \right] \quad \text{Gl. (6)}$$

u. d. N. $d_{ij} \leq 0 \quad \forall i, j$

mit den negativen Elementen der Matrix D

$$(d_{ij})_- = \begin{cases} 0 & \text{für } d_{ij} > 0 \\ -d_{ij} & \text{für } d_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad \text{Gl. (7)}$$

Die Matrixelemente d_{ij} berechnen sich zu

$$d_{ij} = s_{ij} - \sum_{k=1}^m e_{ijk} \quad \forall i, j \quad \text{Gl. (8)}$$

Über die Zuordnung von Einsatzarten zu den Fahrzeugen des zuvor ermittelten d-optimalen Versuchsplans erfolgt eine Variation der Erprobungsmatrizen E_k , so dass ein Optimum bestimmt werden kann. Um der minimalen Fahrzeuganzahl n das höchste Gewicht einzuräumen, fließt die Größe im Quadrat ein, während das Kriterium einer minimalen Überplanung das Konvergenzverhalten des Optimierungsalgorithmus sicherstellt. Als Ergebnis folgt ein variantenoptimaler Erprobungsplan, der allen Anforderungen des Planungsstandards gerecht wird, **Tabelle 5**.

8 Ergebnisse

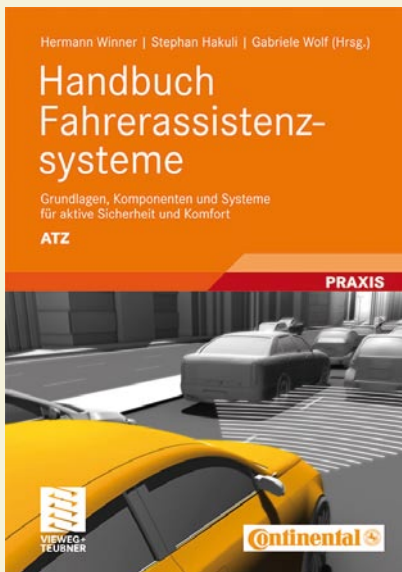
Die Analyse baugruppenspezifischer Ausfälle in unterschiedlichen Erprobungsszenarien legt die Basis für die Definition eines Planungsstandards für die Gesamtfahrzeugerprobung, der, ergänzt um Informationen über Laufleistungen im Kundenbetrieb, zu einem modellreihen-spezifischen Standard weiterentwickelt

wird. Die je nach vorherrschender Komplexität und Produktreifegrad variierenden Erprobungsbedarfe werden hierbei über einen Optimierungsalgorithmus synergetisch auf den zur Verfügung stehenden Erprobungsträgern abgebildet. Dabei stellt die d-optimale Versuchsplanung eine breite Abdeckung unterschiedlicher Ausstattungsvarianten sicher. Auf diese Weise gelingt es, über die umfassende Erprobung von Wechselwirkungen einen wichtigen Beitrag zur Zuverlässigkeitssteigerung zu leisten.

Literaturhinweise

- [1] Vester, F.; Hesler, von A.: Sensitivitätsmodell, Regionale Planungsgemeinschaft Untermain, Frankfurt, 1980
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Lang, M.: Untersuchungen zur Optimierung des derzeitigen Garantiezeit-Prognosemodells bezüglich der Anwendung für Langzeitprognosen mit Daten außerhalb der Garantiezeit, Diplomarbeit, Wolfsburg, Zwickau, 2006
- [5] Kraftfahrt-Bundesamt, <http://www.kba.de>
- [6] Ungermann, J.; Hammer, B.; Siegwart, R.: Variantenoptimale Versuchsplanung in der Gesamtfahrzeugerprobung, in: 24. Tagung Technische Zuverlässigkeit, VDI-Berichte 2065, Düsseldorf 2009, S. 347-352
- [7] Dykstra, O.: The augmentation of experimental data to maximize $|X'X|$, Technometrics, Vol. 13, No. 3, 1971, pp. 682-688
- [8] Gundlach, C.: Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung, Dissertation, Kassel, 2004
- [9] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [10] Mitchell, T. J.: An Algorithm for the Construction of „D-Optimal“ Experimental Designs, Technometrics, Vol. 16, No. 2, 1974, pp. 203-210

Vollständiges Handbuch zu allen Fahrerassistenzsystemen heutiger Kraftfahrzeuge



Hermann Winner | Stephan Hakuli | Gabriele Wolf (Hrsg.)

Handbuch Fahrerassistenzsysteme

Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort

2009. XXIX, 694 S. mit 550 Abb. u. 45 Tab. (ATZ/MTZ-Fachbuch) Geb. EUR 49,90

ISBN 978-3-8348-0287-3

Inhalt

- Grundlagen der Fahrerassistenzsystementwicklung
- Sensorik und Aktorik für FAS
- Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle
- Fahrdynamikregelung
- Sichtverbesserung
- Einparkassistentz - ACC
- Frontalkollisionsschutzsysteme
- LDW
- LKS
- Fahrstreifenwechselassistentz
- Kreuzungsassistentz
- Navigation und Telematik
- FAS für Nkw und Motorräder
- Zukunft der Fahrerassistenzsysteme

In diesem Grundlagenwerk werden die Fahrerassistenzsysteme für aktive Sicherheit und Fahrerentlastung in Aufbau und Funktion ausführlich erklärt. Dazu zählen die bekannten und mittlerweile zur Standardausstattung zählenden Systeme wie ABS, ESP oder ACC genauso wie die Systeme zum Kollisionsschutz, für den Fahrspurwechsel oder zum komfortablen Einparken. Die dazu erforderlichen Komponenten wie Sensoren, Aktoren, mechatronische Subsysteme und Betätigungselemente werden dargestellt, ebenso die nutzergerechte Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle zwischen Assistenzsystem und Fahrer. Drei Kapitel über die Besonderheiten von Fahrerassistenzsystemen bei Nutzfahrzeugen und Motorrädern runden den umfassenden Ansatz ab. Der Schwerpunkt des Buchs liegt auf der Betrachtung des Fahrzeugs als Gesamtsystem.

Ja, ich bestelle

Exemplare
Handbuch Fahrerassistenzsysteme
 ISBN 978-3-8348-0287-3
 EUR 49,90

Fax +49(0)611.7878-420

Firma	Name, Vorname	321 09 004
Abteilung		
Straße (bitte kein Postfach)	PLZ Ort	
Datum Unterschrift		

Änderungen vorbehalten. Erhältlich im Buchhandel oder beim Verlag, zuzüglich Versandkosten
 Geschäftsführer: Dr. Ralf Birkelbach, Albrecht F. Schirmacher. AG Wiesbaden HRB 9754

TECHNIK BEWEGT.

