



Conference Paper

Entwicklung eines Planungsstandards für die Gesamtfahrzeugerprobung unter Einbeziehung von Erprobungs- und Gewährleistungsdaten

Author(s):

Ungermann, Jochen; Hammer, Bernhard; Siegwart, Roland

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010118601> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Entwicklung eines Planungsstandards für die Gesamtfahrzeugerprobung unter Einbeziehung von Erprobungs- und Gewährleistungsdaten

Dipl.-Wi.-Ing. **J. Ungermann**, Audi AG, Ingolstadt

Dipl.-Ing. **B. Hammer**, Audi AG, Ingolstadt

Prof. Dr. **R. Siegwart**, Autonomous Systems Lab, ETH Zürich

Kurzfassung

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 Erprobungsbedarfe aus der Analyse von Erprobungs- und Gewährleistungsdaten abgeleitet und über eine Optimierungsprozedur synergetisch auf einer minimalen Anzahl an Erprobungsträgern abgebildet. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Berücksichtigung der Variantenvielfalt gelegt.

1. Einleitung

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. Entsprechend sind in der Gesamtfahrzeugerprobung zahlreiche Ausstattungsumfänge zu überprüfen. Da jedoch allein die Anzahl der Sitzvarianten die Anzahl der Erprobungsfahrzeuge deutlich übersteigt, wird die Zielsetzung verfolgt, zumindest die Hauptausstattungsmerkmale ausgewogen und in sinnvoller Kombination zu testen und dabei gleichzeitig die Gesamtzahl an Erprobungsträgern zu minimieren. Die hierzu notwendige Ausstattung der Erprobungsfahrzeuge wird über Methoden der statistischen Versuchsplanung hergeleitet.

Neben der Gewährleistung eines variantenoptimalen Fahrzeugaufbaus ist weiterhin der Fragestellung nachzugehen, welcher Erprobungsbedarf mit dem Einsatz der einzelnen Baugruppen einhergeht. Dazu wird in diesem Beitrag ein Planungsstandard für die Gesamtfahrzeugerprobung entwickelt, der unter Einbeziehung von Teststreckencharakteristiken 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 übertragen lässt. Aus diesem Grunde werden Erprobungsbedarfe gestaffelt nach Entwicklungskomplexität und Produktreifegrad für die jeweiligen Baugruppen definiert, sodass variable Größen unter Einbeziehung der Charakteristik der zu erprobenden Fahrzeugfamilie folgen.

Gegenstand der Erprobungsplanung ist jedoch nicht allein die Vorgabe des Fahrzeugaufbaus und die Zuordnung der Erprobungsfahrzeuge zu den Einsatzarten. Von Interesse ist ebenso die Festlegung von Ziellaufleistungen auf den Erprobungsstrecken. Zu diesem Zweck wird das reale Kundennutzungsverhalten den Auslegungszielen in der technischen Produktbeschreibung gegenübergestellt. Anhand von Gewährleistungsdaten lassen sich dabei die durchschnittlichen, jährlichen Fahrleistungen in verschiedenen Fahrzeugsegmenten ermitteln und in die Überlegungen mit einbeziehen.

Abschließend werden die Anforderungen des Planungsstandards und der statistischen Versuchsplanung in einer Optimierungsprozedur zusammengeführt, mit dem Ziel, eine variantenoptimale und bedarfsorientierte Gesamtfahrzeugerprobung sicherzustellen.

2. Ermittlung der Erprobungsstreckencharakteristik

In der Gesamtfahrzeugerprobung der Audi AG werden täglich umfangreiche Testkilometer in verschiedenen Klimaregionen der Welt zurückgelegt. Die Erprobungsfahrzeuge sind dabei unterschiedlichen Umwelteinflüssen und dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt, sodass ein Zuverlässigkeitsnachweis unter verschiedenen Betriebsbedingungen geführt werden kann. Jede Erprobungsstrecke besitzt hierbei Alleinstellungsmerkmale, die eine besondere Belastung einzelner Komponenten nach sich ziehen. Somit ist die Nutzung der verschiedenen Erprobungsszenarien über die Abbildung unterschiedlicher kundenrelevanter Grenzbeanspruchungen begründet. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Einsatzarten mit ihrem inhaltlichen Schwerpunkt und Laufleistungsziel.

<i>Erprobungsstrecke</i>	<i>Zielsetzung</i>	<i>Laufleistung</i>
<i>Schlechtwegekurs</i>	Strukturprüfung von Karosserie, Fahrwerk, Antriebsstrang und Anbauteilen	8.000 km
<i>Wechselkurs</i>	Verschleiß- und Funktionserprobung sämtlicher Fahrzeugkomponenten	100.000 km
<i>Hochgeschwindigkeitskurs</i>	Vollasterprobung unter dem Einfluss hoher Umgebungstemperaturen	30.000 km
<i>Rennstrecke</i>	Erprobung unter hohen Längs- und Querkrafteinflüssen	10.000 km
<i>Öffentliche Straße</i>	Kundennaher Betrieb des Erprobungsfahrzeugs auf Landstraßen und Autobahnen	150.000 km
<i>Stadt</i>	Stop-and-Go-Betrieb im Innenstadtbereich in gemäßigten und warmen Klimazonen	30.000 km
<i>Anhänger</i>	Erprobung von Karosserie, Fahrwerk und Antriebsstrang mit erhöhter Zuglast	30.000 km
<i>Kaltland</i>	Beurteilung der Fahrzeugkomponenten unter extremer Kälteeinwirkung	30.000 km
<i>Heißland</i>	Erprobung auf schlecht ausgebauten Landstraßen unter Wärmeeinfluss	30.000 km
<i>Splitt</i>	Beurteilung von Steinschlagschäden an Fahrwerksteilen und Karosserie	10.000 km

Tabelle 1: Einsatzarten in der Gesamtfahrzeugerprobung

Um die Einsatzarten voneinander abgrenzen zu können, sind geeignete Parameter zur Beschreibung der Erprobungscharakteristik festzulegen. Jede Erprobungsart wird deshalb über ihre Fahrcharakteristik, die Streckencharakteristik, die vorherrschenden Umweltbedingungen und den Fahrzeugzustand beschrieben. Die Kategorie Fahrcharakteristik umfasst hierbei Parameter wie Geschwindigkeit, Drehzahl, Längs- und Querschleunigung, während die Streckencharakteristik über die Radträger- und Aufbaubeschleunigung und das vorliegende Höhenprofil zum Ausdruck gebracht wird. Zu den Umweltbedingungen lassen sich Temperatur, Niederschlag und Sonneneinstrahlung, jedoch auch Kraftstoffqualität, Streusalze oder der Eintrag elektromagnetischer Wellen zählen. Der Fahrzeugzustand wiederum ist über den Fahrzeugaufbau, die Beladung und das Vorhandensein eines Anhängers gekennzeichnet.

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

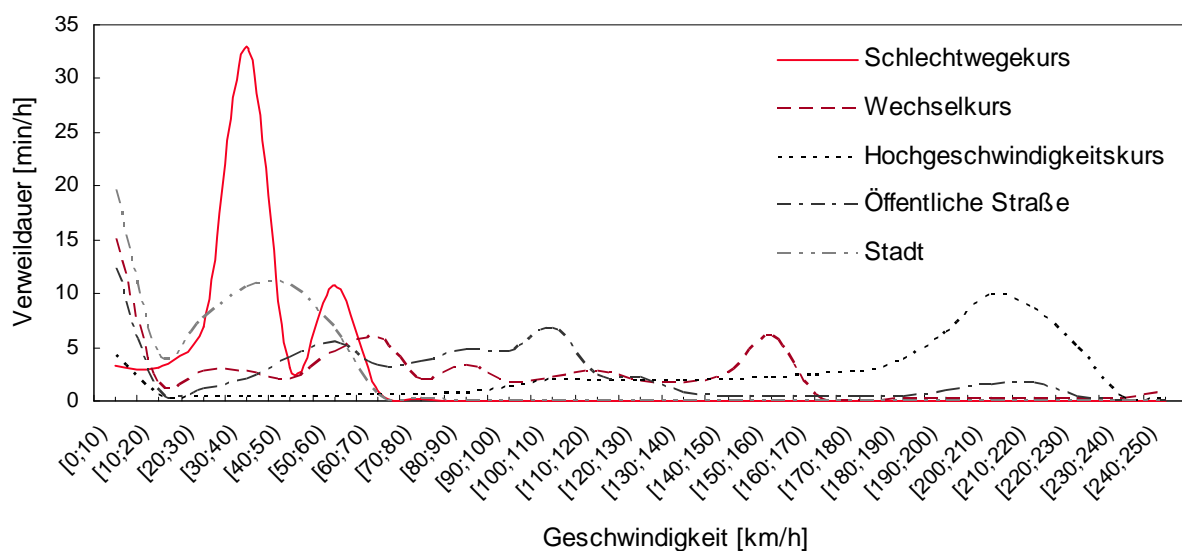


Bild 1: Verweildauer der Geschwindigkeit auf ausgewählten Erprobungsstrecken

In Bild 1 ist beispielhaft der typische Geschwindigkeitsbereich mehrerer 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 baugruppenspezifischen Ausfallverhaltens

Als Grundlage für die Ableitung des Planungsstandards werden Zusammenhänge zwischen den Charakteristiken der Erprobungsszenarien und des dort vorherrschenden, baugruppenspezifischen Ausfallverhalten analysiert. 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 zur Aufdeckung potenzieller Bauteilmängel in der entsprechenden Hauptgruppe geeignet (positives Vorzeichen).

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

Tabelle 2: Eignung unterschiedlicher Einsatzarten zur Aufdeckung von Bauteilmängeln

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 Entwicklungskomplexitäten 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 Hauptbaugruppe Motor genannt. Jedes neu entwickelte oder überarbeitete Motorkonzept ist einer der Komplexitätsklassen hoher Neuigkeitsgrad, mittlerer Neuigkeitsgrad oder Modellpflege zuzuordnen. 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 in sofern 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 Qualitätstand. 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 Fahrwerksbeurteilung eignen, können Aussagen über die Stabilität des vernetzten Elektroniksystems beispielsweise erst anhand seriennaher Erprobungsträger getroffen werden. Insgesamt wächst der Umfang beurteilungswürdiger Komponentenstände mit fortschreitender Entwicklung an, mit der Folge, dass auch die Anzahl potenzieller Fehlerquellen ansteigt.

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

5. Einbeziehung von Laufleistungsverteilungen

In den unterschiedlichen Erprobungsarten werden die Komponenten unter Raffung an ihre Belastungsgrenze 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 Lebensdauer- verhältnisses 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]:

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

Das so genannte Lebensdauerverhältnis L_v berechnet sich dabei über das Verhältnis aus Prüfzeit t_p und geforderter Lebensdauer t :

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

Es kann jedoch gleichfalls über Lastwechsel oder Laufleistungen ausgedrückt werden.

Übertragen auf die Gesamtfahrzeugerprobung bedeutet dies, dass für unterschiedliche Kombinationen aus Fahrzeuganzahl und Ziellaufleistung 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).

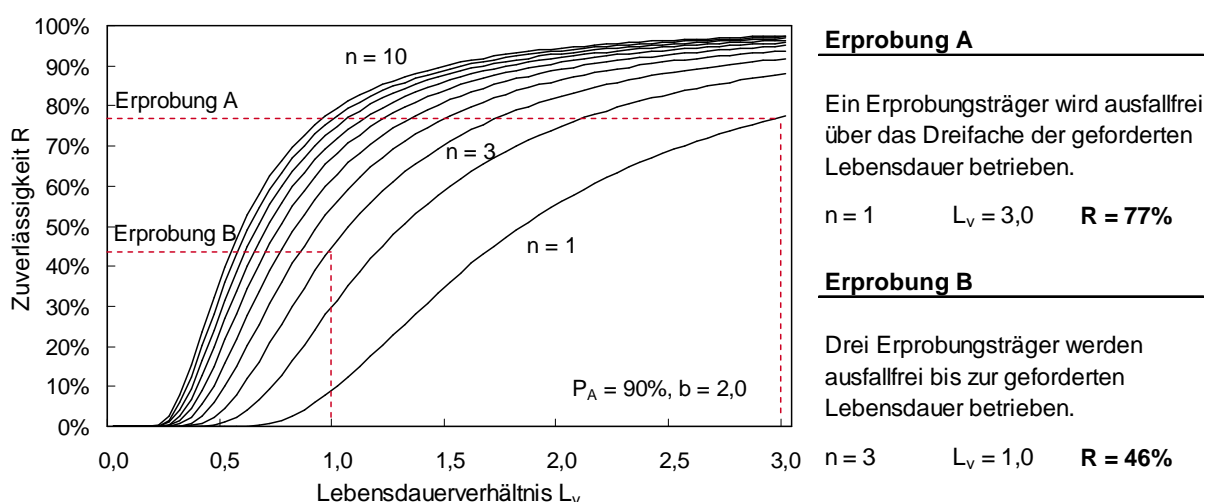


Bild 2: Zuverlässigkeit R in Abhängigkeit des Lebensdauerverhältnisses L_v für unterschiedliche Stichprobengrößen n

Werden jedoch durch hohe Laufleistungen in der Kompaktwagenklasse Ausfallmechanismen ausgelöst, die in keinem Bezug zum realen Kundenbetrieb stehen, hat dies letztlich eine nicht gerechtfertigte Überdimensionierung der Fahrzeuge zur Folge. Aus diesem Grunde sind modellreihenspezifische Laufleistungsziele über eine Analyse von Fahrstrecken im Kundenbetrieb festzulegen.

Zur Berechnung einer Laufleistungsverteilung 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 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].

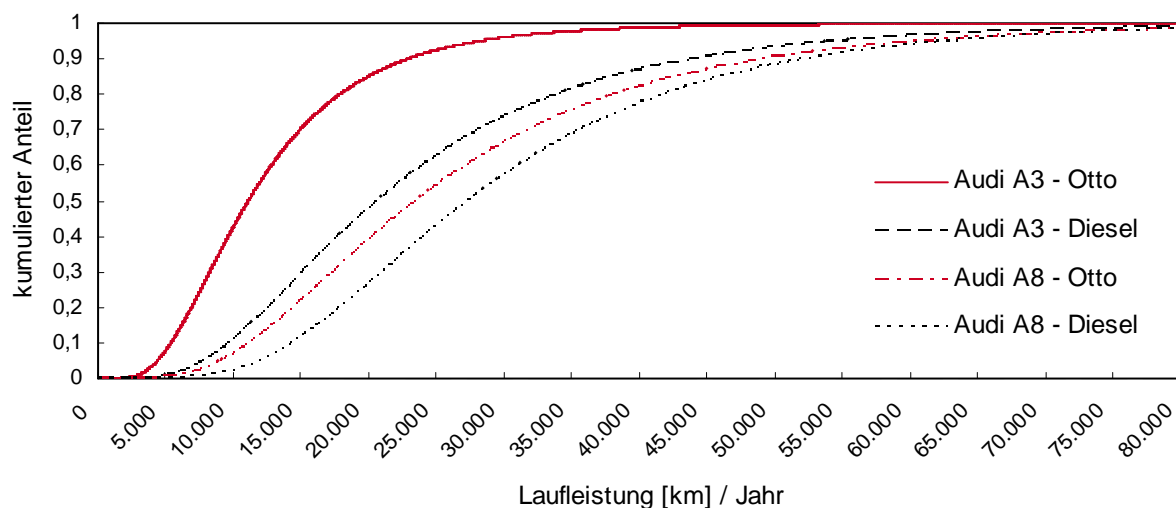


Bild 3: Laufleistungsverteilungen unterschiedlicher Fahrzeugsegmente

In Bild 3 lassen sich die durchschnittlichen jährlichen Laufleistungen sowie die Laufleistungen von Extremkunden (bspw. 90%-Quantil) im A- und D-Segment ablesen. Weiterführende Untersuchungen auf Basis von langfristigen Felddaten konnten in diesem Zusammenhang zeigen, dass die durchschnittliche jährliche Laufleistungsverteilung von Fahrzeugen mit Otto-Motoren 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 Diesel-Motorisierung legt unter Berücksichtigung dieser Information innerhalb von zwölf Jahren im Durchschnitt eine mehr als doppelt so weite Strecke zurück als ein Kom-

paktwagen mit Otto-Motorisierung. Die Wahl des Beobachtungszeitraums von zwölf Jahren ist dadurch begründet, dass das durchschnittliche Fahrzeugalter bei der Löschung im Register des Kraftfahrt-Bundesamtes seit mehr als fünfzehn 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. Die exakten Ziellaufleistungen lassen sich über die Gleichungen (1) und (2) herleiten, wobei die Laufleistungen der Diesel-Fahrzeuge aufgrund der längeren Distanzen als relevante Bezugsgrößen herangezogen werden sollten.

6. Ableitung des Planungsstandards für die Gesamtfahrzeugerprobung

Aus der Analyse des baugruppenspezifischen Ausfallverhaltens auf unterschiedlichen Erprobungsstrecken lassen sich 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 Umfangs des Produktprogramms die Größe der Erprobungsflotte vorgeben.

Als Referenz für die Gesamtzahl an Erprobungsfahrzeugen dienen Erfahrungswerte aus zurückliegenden Fahrzeugprojekten, die stets eine Abwägung zwischen den Zuverlässigkeitszielen und dem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen darstellen. Aus dem zur Verfügung stehenden Kontingent wird die Anzahl geforderter Erprobungsfahrzeuge unter Einbeziehung der Ergebnisse aus Kapitel 3 und 4 für jeden baugruppenspezifischen Erprobungsumfang festgelegt, sodass eine umfassende Untersuchung aller Fahrzeugbereiche ermöglicht wird.

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

Tabelle 3: Auszug aus dem Planungsstandard der Gesamtfahrzeugerprobung

7. Variantenoptimale und bedarfsgerechte Erprobungsplanung

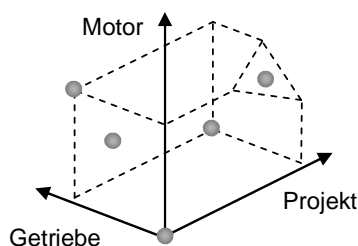
Das Ziel der Erprobungsplanung liegt in der Abbildung der Variantenvielfalt sowie des aus dem Planungsstandard abgeleiteten Erprobungsbedarfs. Um der ersten Anforderung zu begegnen, ist der Einfluss unterschiedlicher Ausstattungsvarianten auf die Zuverlässigkeit des Gesamtfahrzeugs im Sinne einer Regression 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:

$$y = Xa + e. \quad (3)$$

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, d. h. alle Handschaltgetriebe, Stufenautomaten, Stufenlos- und Direktschaltgetriebe 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

$$\max |X^T X| \quad (4)$$

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



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

Bild 4: Eingeschränkter Zustandsraum der Fahrzeugkonfiguration

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 Entsprechung im Planungsstandard findet.

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 4: Zuordnung von Entwicklungskomplexitäten

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.

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:

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

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 Anglei-

chung 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, sodass 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:

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

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

mit den negativen Elementen der Matrix D

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

Die Matrixelemente d_{ij} berechnen sich entsprechend Gleichung (5) zu

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

Über die Zuordnung von Einsatzarten zu den Fahrzeugen des zuvor ermittelten d-optimalen Versuchsplans erfolgt eine Variation der Erprobungsmatrizen E_k , sodass 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).

D-opt. Versuchsplan X				Einsatzart			Baustufe	Projekt	Motor	Getriebe
1	-0,60	-0,54	-0,33	EA 3			Prototyp	A4 Avant	R4 2.0 TDI	Handschalter
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	Direktschaltgetriebe
4	0,60	-1,00	1,00	EA 1	EA 2		Prototyp	A5 Cabrio	R4 1.8 TFSI	Stufenlosgetriebe

Tabelle 5: Auszug aus dem variantenoptimalen Erprobungsplan

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 modellreihenspezifischen 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.

Literatur

- [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] Krafftahrt-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