

Ein praxisorientierter empirischer Ansatz zur Bestimmung des Ausfallverhaltens konventioneller Bremsysteme in Personenkraftwagen



Vom Fachbereich D der Abteilung Sicherheitstechnik der

Bergischen Universität Wuppertal

zur Erlangung des akademischen Grades

– Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) –

genehmigte Dissertation

von

Diplom-Ingenieur Dirk Althaus

aus

Gronau-Epe (Westf.)

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Meyna

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. P.C. Müller

Tag der mündlichen Prüfung:

20.02.2009

D468

Diese Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20090324

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20090324>]

Für meine Familie

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektbearbeiter im Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik der Abteilung Sicherheitstechnik im Fachbereich D der Bergischen Universität Wuppertal.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Meyna, der mich nicht nur in fachlichen Fragen betreut sondern darüber hinausgehend immer unterstützt hat.

Ferner möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. P.C. Müller für seine wertvollen Hinweise und die Übernahme des Koreferats bedanken.

Meinen Kollegen, die mich mit allen Kräften unterstützt haben, möchte ich ebenfalls danken. Hierbei möchte ich besonders Dipl.-Ing. Marco Schlummer und Dipl.-Ing. Andreas Braasch erwähnen, da sie mir nicht nur als Kollegen, sondern auch als gute Freunde jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Herrn Dr.-Ing. Jan Hauschild danke ich für seine guten Ratschläge vor allem auf dem Gebiet der technischen Statistik.

Weiterer großer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Math. B. Pauli, Herrn Dr.-Ing. P. Heitmann und Herrn Dipl.-Ing. Th. Schwarz, die mir im Rahmen der Projektarbeit von Seiten der Industrie viele Hilfestellungen gegeben haben.

Ebenfalls zu Dank verpflichtet bin ich dem ADAC, der GTÜ und einigen Automobilzulieferern, die mir eine äußerst umfangreiche Grunddatenbasis zur Verfügung gestellt und mich damit maßgeblich unterstützt haben.

Nicht zuletzt möchte ich auch meine Familie, denen ich diese Arbeit gewidmet habe, nicht unberücksichtigt lassen. Sie war stets für mich da und hat mir den nötigen Rückhalt gegeben. Darüber hinaus möchte ich meinen Eltern, Luise und Bernhard Althaus, besonders danken, da sie mir erst das Studium ermöglichten.

Kurzfassung

Der Funktionsumfang im Kraftfahrzeug nimmt bekanntlich stetig zu. Neben vollständig neu entwickelten Systemen werden aber auch bestehende durch zusätzliche Funktionen erweitert. Besonders für Sicherheitssysteme kann dies weitreichende Folgen haben, da solche Mehrbelastungen nicht nur zur Minderung der Zuverlässigkeit beitragen können, sondern evtl. auch die Sicherheit herabsetzen.

Durch die steigende Vernetzung der Systeme und Komponenten untereinander ist es darüber hinaus nicht mehr ausreichend, die Komponenten nur getrennt voneinander zu betrachten.

In dieser Arbeit wird ein praxisorientierter Ansatz zur Zuverlässigkeits- und Sicherheitsbewertung eines konventionellen Bremssystems entwickelt.

Als Berechnungsgrundlage des Systemansatzes dient eine sehr umfangreiche Datenbasis mit Garantiedaten von Zulieferern zu nahezu allen Systemkomponenten, die mit einem bewährten Zuverlässigkeitsprognosemodell ausgewertet wird. Darüber hinaus stehen weitere unabhängige Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA), des Allgemeinen Deutschen Automobilclubs (ADAC) sowie einer Prüforganisation (Gesellschaft für Technische Überwachung mbH, GTÜ) zur Verfügung.

Die ermittelten Komponentendaten werden anschließend in einem hardwarebasierten Systemansatz zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit genutzt. Des Weiteren wird ein neuer funktionaler Ansatz entwickelt, durch den die Betrachtung beispielsweise identischer Funktionen in verschiedenen Systemkonzepten ermöglicht wird und weitere Fragestellungen hinsichtlich der Sicherheit konventioneller Bremssysteme beantwortet werden können.

Abstract

The amount of functions in vehicles is continuously increasing. In addition to fully new developed systems, existing systems are getting enlarged by further functions. Especially for safety related systems this can have an extensive impact, because such additional loads may not only lead to decreasing reliability but also to reduced safety.

Due to the increasing integration of systems and components among each other it is no longer sufficient to analyze components separately.

In this thesis a practice-oriented approach for reliability and safety assessment for conventional brake systems is developed. A very large amount of datasets of real guarantee data from suppliers for nearly all components of the system were analyzed with a reliability prediction model to build up the main base of the computation of the system approach. Other independent data from the German Federal Motor Transport Authority (Kraftfahrt-Bundesamt; KBA), the German Automobile Association (Allgemeiner Deutscher Automobilclub; ADAC) and a Technical Inspection Authority (Gesellschaft für Technische Überwachung mbH, GTÜ) were available.

Then the calculated component data were afterwards used in a hardware-based system approach to evaluate the system reliability. Furthermore a new functional-based approach is developed, that allows analyzing e.g. the same function in different system designs and can be used to answer further questions with regard to safety of conventional brake systems.

Résumé

Il est bien connu que le nombre de fonctions dans l'automobile croît continuellement. En plus de systèmes nouvellement développés, ceux déjà existants sont élargis au moyen de fonctions supplémentaires. En ce qui concerne les systèmes de sécurité en particulier, cette croissance peut avoir des conséquences considérables, car de telles surcharges peuvent non seulement contribuer à l'amointrissement de la fiabilité, mais également diminuer la sécurité.

En outre, en raison de l'interconnexion croissante des systèmes et composants, il n'est plus suffisant de considérer les composants uniquement indépendamment les uns des autres.

Dans cette thèse sera développée une approche pratique de l'évaluation de la fiabilité et de la sécurité d'un système de freinage conventionnel.

Comme bases de calcul de l'approche du système seront utilisées de vastes données de base, comportant des données réelles garanties par les fournisseurs concernant presque tous les composants de systèmes, qui seront exploitées grâce à un modèle de pronostic de la fiabilité avéré.

De plus, d'autres données indépendantes, provenant du Kraftfahrtbundesamt (KBA – Administration nationale de l'automobile), du Allgemeiner Deutscher Automobilclub (ADAC – Club automobile allemand), ainsi que d'une organisation de contrôle (GTÜ – Gesellschaft für Technische Überwachung mbH) sont à disposition.

Les données sur les composants évaluées seront ensuite utilisées dans une approche du système basée sur le hardware pour un calcul de la fiabilité du système. Par ailleurs, une nouvelle approche fonctionnelle sera développée, qui rendra possible d'une part une considération de fonctions identiques dans différents concepts de systèmes et qui, d'autre part, permettra de répondre à d'autres questions du point de vue de la sécurité des systèmes de freinage conventionnels.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kurzer Überblick zu Bremssystemen	4
3	Bremssystemabgrenzung	16
3.1	Bremssystemeinteilungen	17
3.1.1	Einteilung A	17
3.1.2	Einteilung B	20
3.1.3	Einteilung C	21
3.1.4	Einteilung D	22
3.1.5	Einteilung E	24
3.1.6	Einteilung F.....	27
3.1.7	Einteilung G	28
3.1.8	Einteilung H	30
3.2	Bewertung der Einteilungen	31
3.3	Definition „Konventionelles Bremssystem“	34
4	Datenbasis	36
4.1	Daten der Kfz-Hersteller	36
4.2	Daten der Zulieferer	38
4.3	Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes	40
4.4	Daten von Prüforganisationen	41
4.5	Daten des ADAC.....	43
5	Auswertemodelle	45
5.1	Zuverlässigkeitsprognosemodell	45
5.2	Modellkorrekturen	53
5.3	Weitere Auswertemodelle.....	56
6	Komponentenergebnisse	58
6.1	Ergebnisse für Daten der Zulieferer	58
6.2	Ergebnisse für Daten des KBA	71
6.3	Ergebnisse für Daten der Prüforganisationen.....	73
6.4	Ergebnisse für Daten des ADAC.....	77

7	Sicherheits- und Zuverlässigkeitsmodelle	82
7.1	Hardwarebasierter Ansatz	82
7.2	Funktionaler Ansatz	88
7.3	Sicherheitsfunktionen ABS	98
8	Zusammenfassung und Ausblick	110
9	Literatur	112
Anhang	116
A 1	Abkürzungsverzeichnis	116
A 2	Zusammenstellung Analyseergebnisse Daten Zulieferer	118
A 2.1	ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)	118
A 2.2	ESP1-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)	120
A 2.3	ESP2-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)	122
A 2.4	Erweiterte ESP-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)	124
A 2.5	Drehzahlfühler DF 1+2	126
A 2.6	Lenkwinkelsensor LWS	128
A 2.7	Drehratensensor DRS	130

1 Einleitung

Die heutigen mechatronischen Systeme im Automobil sowie deren Verbund im Fahrzeug werden zunehmend komplexer. So unterscheiden sich beispielsweise ein Bremssystem der 1950er Jahre und ein aktuelles Bremssystem nicht nur durch die verwendeten Komponenten, sondern vor allem durch eine erweiterte Funktionalität. Während das alte Bremssystem „nur“ zum Bremsen benötigt wurde, so wird ein heutiges Bremssystem mit elektronischem Stabilitätsprogramm (ESP) darüber hinaus u. a. dazu genutzt, durchdrehende Räder beim Anfahren zu verhindern, die Lenkfähigkeit bei einer Bremsung (Voll- oder Teilbremsung) zu erhalten und das Fahrzeug in kritischen Fahrsituationen durch radindividuelle Bremsengriffe in einem stabilen Fahrzustand zu halten oder wieder zu überführen.

In der Systementwicklung wurden und werden hierbei häufig in bestehende Systeme neue Funktionen durch eine erweiterte Steuerung, die meist mit Hilfe umfangreicher Sensorik und Aktorik realisiert ist, integriert. Aber auch altbekannte Funktionen, wie die Bremskraftverteilung, werden in modernen Bremssystemen nicht mehr durch mechanische Bremskraftverteiler sichergestellt, sondern durch eine elektronisch geregelte Bremskraftverteilung (EBV) realisiert.

Das Bremssystem hat sich dabei im Pkw-Bereich vom rein mechanischen über das mechanisch-hydraulische bis hin zum heutigen elektromechanisch-hydraulischen System entwickelt. Auch Vorentwicklungen im Bereich der rein elektromechanischen Bremssysteme, die auf die umweltschädliche Bremsflüssigkeit verzichten, stehen kurz vor der Serienreife. Ein Überblick zur Entwicklung der Bremssysteme wird in Kapitel 2 gegeben.

Die zusätzlichen Funktionen und Komponenten der Systeme haben jedoch dazu geführt, dass die Belastung der Systeme zu- und die Zuverlässigkeit abgenommen hat. Darüber hinaus verschmelzen in der Fahrzeugarchitektur die Systeme zunehmend miteinander. Durch eine weiter expandierende Kommunikation im Fahrzeug greifen die unterschiedlichen Funktionen auf verschiedene Systeme zu. All diesen Funktionen gemeinsam ist der benötigte Energiebedarf, der vom Energiebordnetz zur Verfügung gestellt werden muss. Durch diese weitreichende Vernetzung und die vielen möglichen Funktionen tritt bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen jedoch eine Problematik in der Systemabgrenzung auf. Hierbei stellt sich die Frage: „Was ist ein konventionelles Bremssystem und welche Komponenten gehören dazu?“

Im Kapitel drei werden hierzu mehrere mögliche Einteilungen vorgestellt, die ein Bremssystem beschreiben. Diese Einteilungen werden dahingehend beurteilt, ob und in welchem Umfang sie sich zur Abbildung und für die weitergehenden Untersuchungen eignen. Des Weiteren wird ein „konventionelles Bremssystem“ definiert, welches als Grundlage für die Untersuchungen herangezogen wird. Als konventionelle Systeme für den europäischen Markt werden Bremssysteme mit Antiblockiersystem (ABS) und Elektronischem Stabilitätsprogramm (ESP) ausgewählt.

Das Ziel der Arbeit ist eine gesamtheitliche Systembewertung eines konventionellen Bremssystems bezüglich Zuverlässigkeit und Sicherheit, basierend auf empirischen Ausfalldaten. Einige anders strukturierte Ansätze zur Gesamtsystembewertung von Systemen im Kfz sind in /Ben 04/, /Mar 04/ und /Str 08/ gegeben, bei denen jedoch nicht die quantitative empirische Bewertung der Sicherheit

und Zuverlässigkeit, sondern die Entwicklung von Modellen zur Systembeschreibung im Vordergrund stand.

Erste quantitative Untersuchungen zur Bewertung der Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bremssystemen wurden am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt (siehe /Bis 71/, /Uff 74/, /Uff 77/, /Mit 78/ und /Mit 79/). Die aufgestellten Ansätze waren allerdings hardwarebasiert und darüber hinaus wurden die Zuverlässigkeitsparameter der Komponenten wegen fehlender Rohdaten und nicht ausreichender Rechenkapazität geschätzt. Die Ergebnisse sind daher nicht sehr praxisnah.

Eine Vielzahl der Komponenten eines Bremssystems wurde jedoch mittlerweile einzeln zuverlässigkeitstechnisch bewertet, wobei die Ergebnisse in der Regel als Wissen bei den jeweiligen Firmen existieren und eine Veröffentlichung meistens nicht erwünscht ist.

In dieser Arbeit steht jedoch die empirische Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse des gesamten Bremssystems im Vordergrund, da bei Weiterentwicklungen der Nachweis erforderlich ist, dass sie nicht unsicherer sind als die bisherigen Systeme. Hierzu ist es jedoch zwingend erforderlich, die verwendeten Komponenten mit identischen Auswertemodellen zu untersuchen und zu bewerten.

Die Basis dieser Untersuchungen bilden die vorhandenen Felddaten. Erstmals werden hier Daten aus mehreren Quellen zu allen Komponenten des definierten Bremssystems herangezogen. Die Datenbasis umfasst Garantiedaten von Automobilzulieferern, frei verfügbare Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) zu Fahrzeuguntersuchungen, Daten aus den Hauptuntersuchungen der Gesellschaft für Technische Überwachung mbH (GTÜ) sowie Pannendaten des Allgemeinen Deutschen Automobilclubs ADAC. Alle Daten liegen für einen größeren Zeitraum von über fünf Jahren anonymisiert vor, so dass eine zeitlich erweiterte Analyse möglich ist, aber keine Rückschlüsse auf einzelne Fahrer oder deren Fahrzeuge getroffen werden können. In Kapitel 4 werden diese Daten und deren jeweilige Möglichkeiten in Bezug auf Sicherheits- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen vorgestellt.

Im folgenden Kapitel 5 werden die verwendeten Auswertemodelle für die jeweiligen Daten dargestellt. Hierbei bildet ein praxiserprobtes mehrstufiges komplexes Modell die Basis, welches sich nicht nur in der Automobilindustrie bewährt hat und Zuverlässigkeitsprognosen über mehrere Jahre zulässt. Zur Verwendung des Modells für Bremssysteme werden teilweise Korrekturen eingeführt. Des Weiteren werden einige allgemein anerkannte statistische Modelle, wie z. B. die Weibull-Auswertung, eingesetzt.

Die Ergebnisse, die aus der Verwendung der Modelle unter Nutzung der jeweiligen Daten für die einzelnen Komponenten ermittelt werden, sind in Kapitel 6 dargestellt und bewertet. Das Ziel ist hierbei eine möglichst umfassende Ergebnisermittlung aus den Zuliefererdaten, da zum einen die Datenbasis sehr gut ist und zum anderen diese Daten auch für neu entwickelte Systeme zu einem sehr frühen Stadium vorliegen. Diese Daten werden nach Möglichkeit mit dem mehrstufigen Prognosemodell ausgewertet, um Aussagen über die Garantiezeit hinaus zu erhalten. Die weiteren Datenbanken werden vorwiegend zum Abgleich einiger wichtiger Komponenten genutzt und sind exemplarisch dargestellt.

Im Kapitel 7 werden die entwickelten Modellansätze zur Gesamtsystembewertung sowie die ermittelten Zuverlässigkeits- und Sicherheitskenngrößen erläutert. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass nicht nur ein hardwarebasierter Ansatz vorgestellt wird, wie er sich bei derartigen Untersuchungen etabliert hat, sondern dass auch ein neuer funktionaler Ansatz aufgezeigt wird. Der große Vorteil dieses Ansatzes liegt in der Möglichkeit, einzelne Funktionen, die in unterschiedlichen Systemen vorhanden sind, aber evtl. auf verschiedene Arten umgesetzt wurden, zu vergleichen.

Die Modellbeschreibung basiert auf einem V-Modell-Ansatz, der auf der linken V-Seite eine funktionale Beschreibung und auf der rechten V-Seite eine hardwarebasierte Zuordnung enthält. Hierbei werden zuerst Hauptfunktionen definiert, die sich wieder in Unterfunktionen aufteilen lassen. Diesen Funktionen werden dann Bauteile, Komponente, Subsysteme etc. zugeordnet. Die Unterteilung kann beliebig detailliert erfolgen, wobei ab einem gewissen Detaillierungsgrad in der Regel die quantitativen Zuverlässigkeitswerte für die Funktionen nicht mehr bestimmt werden können.

Dieser neue Ansatz eignet sich für jegliche Art von Systemen im Kfz, auch besonders für Systemvergleiche in einem frühen Entwicklungsstadium. Limitierend sind jedoch, wie auch bei den hardwarebasierten Ansätzen, die vorhandenen Daten zur Bestimmung der Zuverlässigkeitskenngrößen.

Im achten Kapitel folgt eine Zusammenfassung, in der die Ziele sowie die ermittelten Ergebnisse nochmals in kompakter Form dargestellt werden. Darüber hinaus wird ein Ausblick dahingehend gegeben, inwieweit die Methodiken verwendet und erweitert werden könnten.

Im Kapitel 9 folgt eine Auflistung der Quellen, die für diese Arbeit herangezogen werden.

Abschließend sind im Anhang ein Abkürzungsverzeichnis und die umfangreichen Zusammenstellungen der Komponentendaten zu den untersuchten Komponenten der Zulieferer enthalten.

2 Kurzer Überblick zu Bremssystemen

Die Bremssysteme zählen zu den ältesten Sicherheitssystemen, die schon in den Zeiten der Streitwagen existierten. Diese, aus heutiger Sicht meist sehr einfachen Varianten von Bremssystemen, wurden auch für Kutschen und Pferdewagen verwendet, um die Pferde, vor allen an Gefällestrecken, beim Bremsen zu unterstützen. Im folgenden Bild 2-1 ist ein Hemmschuh für Kutschen zu sehen, der aus Metall gefertigt ist. Frühere Versionen von Hemmschuhen verwendeten meist noch Holz und mussten somit regelmäßig ersetzt werden.



Bild 2-1: Eingelegter Hemmschuh mit Eiskratzer für Kutschen /wik 01/

Das Ziel bei diesem System war es, das frei drehende Rad von der Straße zu trennen und durch die Reibung das Gefährt zu verzögern.

Eine weitere Art von Bremsen für Kutschen, die auch in den Anfängen des Automobilbaus genutzt wurden, sind die sog. Klotzbremsen (siehe Bild 2-2).

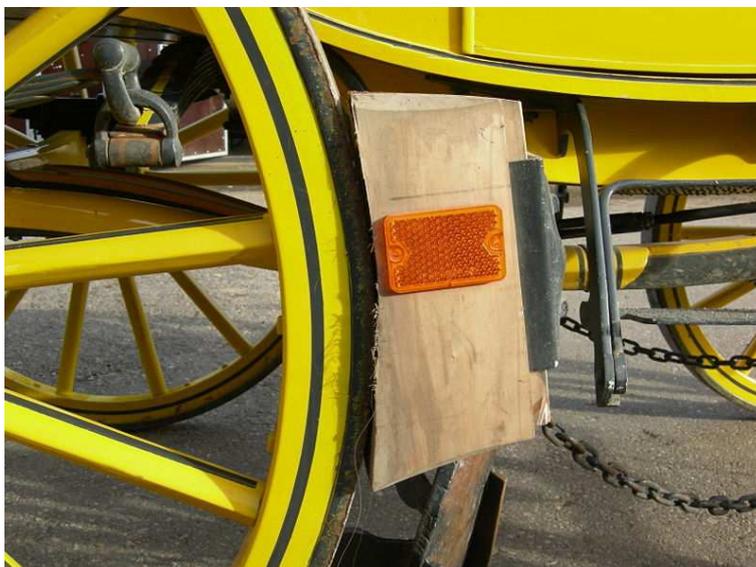


Bild 2-2: Kutsche mit Klotzbremse aus Holz /wik 02/

Diese Klotzbremsten wurden vor allem bei Stahlrädern genutzt und waren bei den damals erreichbaren Geschwindigkeiten für eine Abbremsung vollkommen ausreichend. Betätigt wurden die Bremsen üblicherweise per Hand, wobei die Kraftübertragung je nach Ausführung über Seile, Ketten, Kurbeln, Hebel oder Gestänge auf die starre Hinterachse der Kutsche erfolgte.

Allen Bremssystemen der früheren Zeit war die rein mechanische Auslegung gemeinsam.

Auch der Patentwagen von Carl-Friedrich Benz aus dem Jahre 1887 bediente sich noch einer Klotzbremse (siehe Bild 2-3). Im Bild ist im farbigen umrahmten Ausschnitt die Klotzbremse zu sehen.



Bild 2-3: Motorisierter Patentwagen von Carl-Friedrich Benz /spi 01/

Ein großer Nachteil bei dieser ersten Pkw-Bremse war die Haltbarkeit der Bremsbeläge. Bei der ersten „Langstreckenfahrt“ von 100 km, die Bertha Benz von Mannheim nach Pforzheim antrat, mussten mehrfach die Lederbezüge der Bremsklötze durch Sattler erneuert werden /Breu 03/.

Nur kurze Zeit später (1902) wurden erheblich wirkungsvollere mechanische Bremsen entwickelt. Hierzu gehören die Scheibenbremse von F. W. Lanchester sowie die Außenbandbremse von Wilhelm Maybach und die Innenbackenbremse von Louis Renault, welche die ersten Ausführungen der Trommelbremsen sind.

Mit der Zeit verdrängte die Innenbackenbremse die Außenbandbremse, da diese aufgrund ungeschützter Bauteile schnell verschmutzte. Das Prinzip der damaligen Innenbackenbremse bestand darin, dass mittels eines Spreizhebels oder -nockens die Bremsbacken von innen gegen die mit dem Rad verbundene Bremstrommel gedrückt wurden und somit das Fahrzeug abgebremst werden konnte. Heutige hydraulisch betätigte Trommelbremsen funktionieren prinzipiell identisch, wobei der Spreizhebel durch eine Hydraulik ersetzt worden ist. Diese Form der Bremse ist auch als Simplex-Bremse bekannt (siehe Bild 2-4).

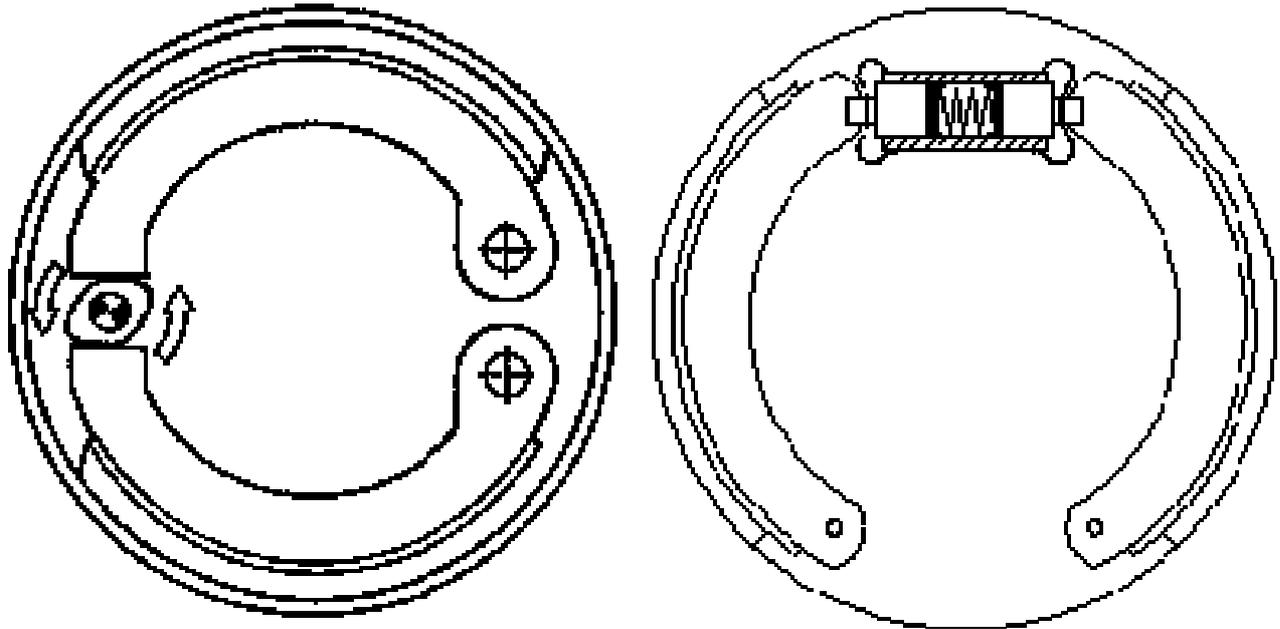


Bild 2-4: Mechanische und hydraulische Simplex-Trommelbremse /mot 01/; /bsw 01/

Ab den 1920er Jahren kamen Fahrzeuge mit mechanischen Vierradbremsten auf den Markt, die aufgrund des gestiegenen Gewichts, der zunehmenden Motorleistung und der damit verbundenen höheren Endgeschwindigkeiten unerlässlich waren. Somit konnten erstmals die Vorderräder mit gebremst werden, was zu einer erheblichen Bremswegverkürzung führte. Allerdings brachte die komplexe, offen liegende und damit Witterungseinflüssen ausgesetzte Mechanik einige Probleme mit sich. So kam es häufig trotz guter Wartung der vielen Gelenke, Hebel und Züge zum unkontrollierbaren Schiefziehen der Fahrzeuge beim Bremsen und damit zu Unfällen, die aufgrund der meist offenen Bauweise der Fahrzeuge verheerend ausgingen.

Zur gleichen Zeit kamen jedoch die ersten hydraulischen und mechanisch-hydraulischen Bremssysteme auf den Markt. Das erste Patent zur hydraulischen Bremse erhielt 1917 der Bergbauingenieur Malcolm Loughead auf einen „durch Bremsflüssigkeit betätigten hydraulischen Radbremszylinder für Autos“ /Breu 03/. Darüber hinaus erhielt er 1920 ein Patent auf einen fußbetätigten Hauptbremszylinder. Diese beiden äußerst wichtigen Komponenten sind auch in modernen Bremssystemen in ähnlicher Form immer noch zu finden.

Das Wirkprinzip der hydraulischen Bremse hat sich über die Jahre ebenfalls nicht geändert. Durch Treten des Bremspedals wird im Hauptbremszylinder ein Kolben verschoben, der die Bremsflüssig-

keit verdrängt. Diese Flüssigkeit wird durch die Bremsleitungen und Schläuche an die Radbremszylinder geleitet, wo sie auf die Bremskolben eine Kraft ausübt. Hierdurch werden die Bremsbacken an die Bremstrommel gedrückt, wodurch das Rad gebremst wird.

Der größte Vorteil der hydraulischen gegenüber der mechanischen Bremse liegt in der verringerten Neigung zum Schiefziehen, da durch die Bremsflüssigkeit aufgrund von Naturgesetzen, nämlich dem Pascalschen Gesetz, der Druck an allen Radbremsen im geschlossenen System identisch ist. Darüber hinaus ist der Wirkungsgrad in einem hydraulischen System höher.

Etwa zur gleichen Zeit wurde auch die, aus der Eisenbahntechnik bekannte, Luftdruckbremse für Straßenfahrzeuge entwickelt. Dieses System konnte aufgrund der Größe und des Gewichts von Kompressor und Druckluftbehälter nur sinnvoll im Nutzfahrzeugbereich und in der Eisenbahntechnik eingeführt werden, wo es auch heute noch in weiterentwickelten Varianten zum Einsatz kommt. Im Pkw-Bereich hat sich das System, auch wegen zu hoher Kosten, nie etabliert.

Der Entwicklungsfortschritt bei Pkw beschränkte sich daher meist auf die hydraulischen Bremssysteme. Hierbei rückte der Komfortaspekt immer weiter in den Vordergrund der Entwicklung. Besonders die heute übliche Bremskraftverstärkung wurde bei zunehmendem Gewicht der Fahrzeuge ein wichtiger Entwicklungspunkt. Erste Ansätze führten zur Entwicklung der sog. Duplex-Bremse, die durch zwei unabhängige Bremszylinder und anders angeordnete Bremsbacken eine Selbstverstärkung der Bremswirkung ermöglichten. Für weitere detaillierte Erläuterungen sei auf die Literatur, wie /Bos 01/, /Bos 03/, /Bra 03/ und /Breu 03/, verwiesen.

Der nächste wichtige Meilenstein bei Bremssystemen kam mit der Unterteilung in zwei voneinander unabhängige Bremskreise. Diese Zweikreisbremsanlagen wurden durch die verwendete Bremsflüssigkeit notwendig.

Bei Leckagen an den Radbremsen oder den Bremsleitungen und -schläuchen wird die Bremsflüssigkeit aus dem Bremssystem gedrückt, so dass kein ausreichender Druck an den Bremsen erzeugt werden kann. Darüber hinaus ist die Bremsflüssigkeit hygroskopisch und bindet mit der Zeit das Wasser aus der Umgebungsluft. Bei großer Beanspruchung, wie z. B. Passabfahrten im Gebirge, kann sich die Bremsflüssigkeit derart stark erhitzen, dass es durch das enthaltene Wasser zur Bildung von Dampfblasen kommt. Diese komprimierbaren Dampfblasen führen dazu, dass das Fahrzeug nur noch schlecht oder im schlimmsten Fall überhaupt nicht mehr verzögert werden kann. Die Mehrkreisigkeit der Bremse, die schon seit den 1930er Jahren in vielen Ländern gesetzlich gefordert ist, schafft hierbei zwar keine vollständige Abhilfe, sie sorgt aber dafür, dass das Fahrzeug mit einer verminderten Verzögerung gebremst werden kann. So gilt heutzutage entsprechend der Vorschrift E-CE R 13 „bei Ausfall eines Teils der Übertragungseinrichtung der Betriebsbremsanlage“:

„Eine ausreichende Anzahl Räder muß durch Betätigung der Betriebsbremsanlage noch gebremst werden können, unabhängig von dem Beladungszustand des Fahrzeugs“ /Ece 02/.

Bei den Mehrkreis-Bremsanlagen haben sich die Zweikreisbremsanlagen aufgrund der Kosten der technischen Realisierung durchgesetzt. Hierbei sind besonders die II- und die X-Aufteilung zu nennen, wie sie in Bild 2-5 dargestellt sind.

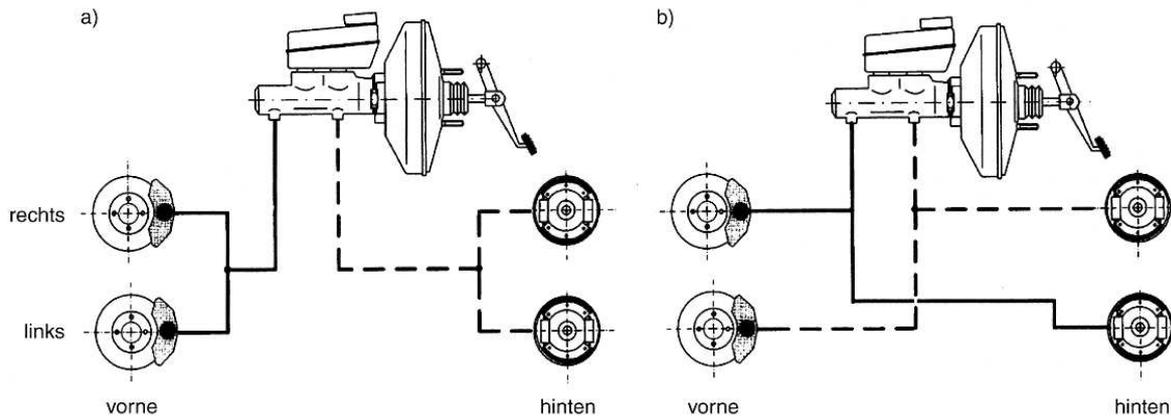
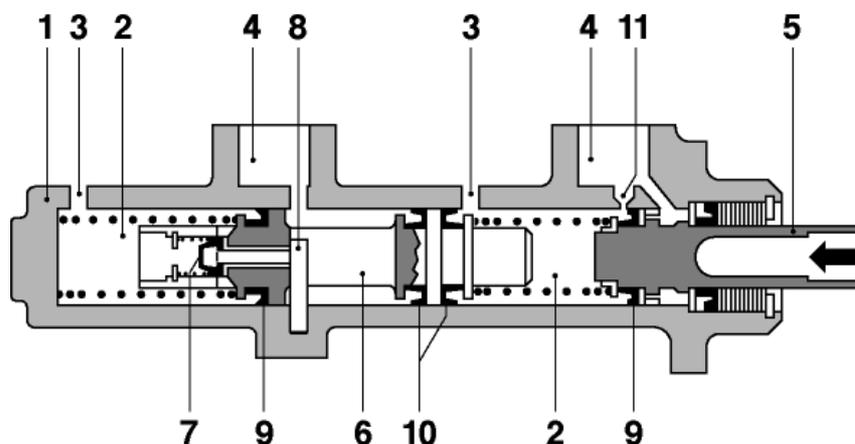


Bild 2-5: Zweikreisbremse mit Schwarzweiß-Aufteilung (a) und diagonaler Aufteilung (b) /Brau 03/

Bei der II-Aufteilung, die auch Schwarzweiß-Aufteilung genannt wird, ist die Bremse in einen Vorder- und Hinterachsbremskreis unterteilt. Diese Variante ist besonders kostengünstig, führt aber bei Ausfall des Bremskreises an der Vorderachse dazu, dass das Fahrzeug nur noch sehr gering verzögert werden kann. Darüber hinaus wird das Fahrzeug bei blockierenden Rädern an der Hinterachse schnell instabil und normalerweise unbeherrschbar.

Bei der X-Aufteilung (diagonale Aufteilung) bilden jeweils ein Vorderrad und das dazu diagonale Hinterrad einen Bremskreis. Gegenüber der II-Aufteilung bietet die X-Aufteilung eine größere Verzögerungsmöglichkeit beim Ausfall eines Bremskreises. Allerdings gibt es durch die diagonale Aufteilung eine stärkere Neigung zum Schiefziehen des Fahrzeugs, die durch den Fahrer aktiv ausgeglichen werden muss.

Diese Bremssystemauslegung erfordert zwei unabhängige Bremszylinder. In frühen Bremssystemen wurden diese als zwei parallel angeordnete, identische Zylinder ausgelegt. Danach gab es weitere Ausführungen, die schließlich zu dem heute üblichen Tandemhauptbremszylinder in serieller Bauweise führten. Eine mögliche Realisierung eines Tandemhauptbremszylinders ist in Bild 2-6 gegeben.



Tandemhauptzylinder mit Zentriventil im Sekundärkreis.

- | | | | |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| 1 Zylindergehäuse, | 2 Druckraum, | 3 Druckanschluss, | 4 Anschluss für Ausgleichsbehälter, |
| 5 Druckstangenkolben, | 6 Zwischenkolben, | 7 Zentriventil, | 8 Anschlag für Zentriventil, |
| 9 Primärmanschette, | 10 Trennmanschette, | 11 Ausgleichsbohrung. | |

Bild 2-6: Tandemhauptbremszylinder /Bos 03/

Über den Druckstangenkolben (5), der mit dem Bremspedal verbunden ist, wird hierbei die Bremsflüssigkeit im sog. Stangenkreis mit Druck beaufschlagt. Diese wiederum verschiebt, da sie nicht komprimierbar ist, den Zwischenkolben (6), der dann auch im so genannten Schwimmkreis die Flüssigkeit verdrängt.

Bei einer Leckage im Stangenkreis wird die Bremsflüssigkeit aus dem Druckraum (2) des Stangenkreises verdrängt, bis der Druckstangenkolben den Zwischenkolben berührt. Bei weiterer Bewegung des Stangenkolbens wird die Ausgleichsbohrung (11) zum Reservoir verschlossen, so dass keine weitere Flüssigkeit verloren geht. Ein weiterer Druckaufbau kann jetzt nur noch im Schwimmkreis erfolgen.

Ähnliches passiert bei Undichtigkeiten im Schwimmkreis. Der Zwischenkolben wird dann komplett bis zum Zylindergehäuse (1) verschoben. Über das Zentralventil (7) kann in der Endposition dann kein Flüssigkeitsausgleich zum Reservoir mehr erfolgen. Ein weiterer Druckaufbau ist dann nur noch über den Stangenkreis möglich.

Mit den zunehmenden Fahrzeuggeschwindigkeiten und –gewichten stiegen auch die erforderlichen Bremspedalkräfte. Da das Potential der Radbremsen mit Muskelkraft nicht erschöpft werden kann, konzentrierte sich die Entwicklung auf Systeme, welche die eingeleitete Bremskraft verstärken sollten. Erste Ansätze waren vollständig auf Fremdkraft basierende Systeme. Hierbei wurde hydraulischer oder pneumatischer Druck über Generatoren oder Kompressoren erzeugt, den der Fahrer über das Bremspedal dosiert ins Bremssystem einleiten konnte. Bei einer Bremsung wurde somit nahezu keine Muskelkraft benötigt. Diese Systeme setzten sich jedoch im Pkw-Bereich nicht durch. Parallel entwickelt wurden sog. Bremssysteme mit Fremdkraftunterstützung, die meist pneumatisch arbeiten und sich des Unterdrucks bedienen, der im Ansaugtrakt zum Motor erzeugt wird. Bremskraftverstärker dieser Bauart, welche bis zu einem gewissen Grad die menschlich erzeugte Bremskraft linear verstärken, sind auch in heutigen Systemen standardmäßig im Einsatz.

Ab den 1950er Jahren setzte sich dann die Scheibenbremse als Radbremse in Pkw durch. Besonders die Vorderräder wurden mit Scheibenbremsen ausgestattet, da Trommelbremsen hier bauartbedingt einige Schwächen zeigten. Durch die geschlossene Bauweise der Trommelbremsen und die durch dynamische Achslastverschiebungen auftretenden großen Bremskräfte an den Vorderradbremmen kam es zu thermischen Problemen, die u. a. Verzug der Beläge und auch nachlassende Verzögerung (Fading) zur Folge hatten. Weitere funktionale Probleme gab es durch Reibwertschwankungen der Bremsbeläge und durch die schlechte Dosierbarkeit. Darüber hinaus trat häufig ein als sehr unangenehm empfundenenes Quietschen auf. Des Weiteren ist die Wartung von Trommelbremsen aufwendiger, da sich die Beläge innerhalb der Trommel befinden. Um den Zustand zu überprüfen, musste jeweils die Bremstrommel demontiert werden. Dennoch sind Trommelbremsen, vor allem im Kleinwagensegment, immer noch anzutreffen, da sie sehr günstig und für die thermisch unproblematischen Hinterradbremmen meist ausreichend geeignet sind.

Bei den Scheibenbremsen begann die Entwicklung mit sog. Vollbelag-Scheibenbremsen. Hierbei deckte der Reibbelag die gesamte Bremscheibe ab. Diese in Flugzeugen und auch Panzern verbauten Scheibenbremsen waren in der Herstellung sehr teuer und schwer. Darüber hinaus gab es durch

die geschlossene Bauweise ebenfalls thermische Probleme, so dass diese Bauform für Pkw als ungeeignet bewertet wurde.

Durchgesetzt hat sich daher bis heute die Teilbelag-Scheibenbremse (siehe Bild 2-7). Hierbei werden die Bremsbeläge, die nur einen Teil der Bremsscheibe überdecken, von den Bremskolben gegen die Bremsscheibe gedrückt. Die Beläge wie auch die Kolben sind in den Bremssattel integriert. Da die Varianten an Scheibenbremsen und Sätteln sehr vielfältig sind, sei hier auf die entsprechende Fachliteratur (/Bos 94/, /Bos 01/, /Breu 03/) verwiesen.



Bild 2-7: Innenbelüftete Scheibenbremse mit Bremssattel (rot) /wik 03/

Mit der Entwicklung der Bremsen mussten viele fahrdynamische Probleme, wie z. B. das Schiefziehen des Fahrzeugs, gelöst werden. Besonders wichtig war hierbei die richtige Verteilung der Bremskraft. Überbremste Vorderräder führen dazu, dass das Fahrzeug über die blockierenden Vorderräder rutscht und nicht mehr lenkfähig ist. Hindernissen kann dann nicht mehr ausgewichen werden, was häufig zu schweren Unfällen geführt hat. Überbremste Räder an der Hinterachse haben dagegen im Normalfall ein instabiles Fahrverhalten zur Folge, welches aus o. g. Gründen besonders sicherheitskritisch ist. Um blockierende Hinterräder zu vermeiden, wurden daher Bremskraftverteiler und auch Bremskraftminderer eingesetzt. Die Bremskraftverteilung dient dazu, den Druck an den hinteren Radbremsen vor dem Blockierniveau zu halten und zu begrenzen, während der Druck an den vorderen Radbremsen je nach Bedarf zunehmen kann. Die Bremskraftminderer dienen vor allem dazu, den Druck bei leerem Fahrzeug zu begrenzen. Dies ist vor allem für Transporter sehr wichtig, da eine optimale Bremsung bei voller Beladung gewährleistet sein muss. Würden die gleichen Bremsdrücke bei leerem Fahrzeug anliegen, wären alle Räder sehr schnell im Blockierniveau und damit in einem für das Fahrzeug sehr kritischen Fahrzustand.

Wichtig für die Beherrschbarkeit eines Kfz ist es, die Lenkfähigkeit bei einer Vollbremsung zu erhalten. Eine erste patentierte Lösung von Karl Wessel gab es bereits im Jahre 1928, die jedoch nie in die Praxis umgesetzt wurde. Zuverlässig gelöst wurde diese Aufgabe mit dem elektronischen

Bremsregelsystem ABS (Antiblockiersystem) der Robert Bosch GmbH, welches erstmals 1978 in Serie ging. Im Bild 2-8 sind das ABS der ersten Generation (1a/1b) und das sehr viel kompaktere ABS der neuen Generation (2) abgebildet.

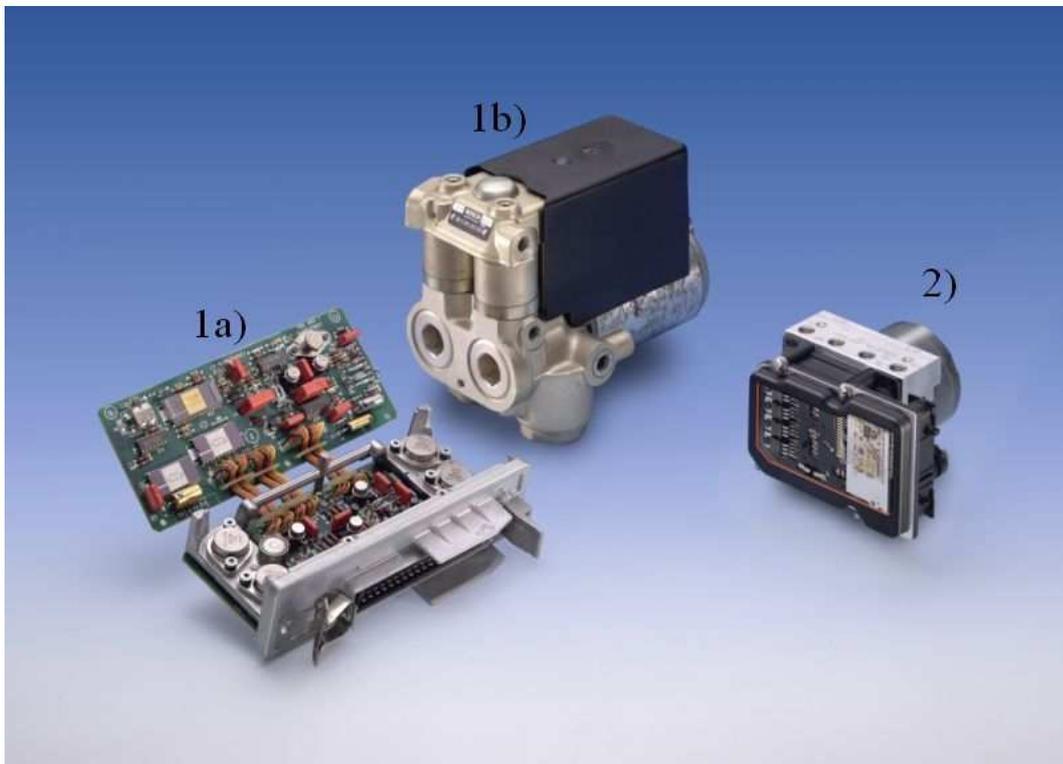


Bild 2-8: ABS der alten und neuen Generation /bos 01/

Die Hauptbestandteile des ersten ABS sind das Steuergerät (1a) und die Hydraulikeinheit (1b). Des Weiteren werden mindestens zwei Drehzahlsensoren (Drehzahlfühler; DF) an den Rädern benötigt (2-Kanal-ABS), welche die Drehfrequenz und damit indirekt den Schlupf des Rades ermitteln. Da der Schlupf unmittelbar mit dem Kraftschluss- und dem Seitenkraftbeiwert des Reifens korreliert, ist die Regelung darauf ausgelegt, den Schlupf so zu begrenzen, dass der Kraftschlussbeiwert und damit die Bremsleistung möglichst maximal wird und der Seitenkraftbeiwert ein Niveau behält, in dem das Fahrzeug lenkbar bleibt.

Das ABS der neueren Generation ist sehr viel kompakter und besteht, wie heutzutage üblich, aus einer Hydraulikeinheit mit Anbausteuergerät (ASG). Darüber hinaus wird im Allgemeinen eine 4-kanalige Auslegung verwendet, in der für alle vier Räder der Schlupf ermittelt und diese unabhängig voneinander geregelt werden.

Aufbauend auf dem ABS folgte 1987 die Regelung des Antriebsschlupfes. Erste Versionen konnten bei niedrigen Geschwindigkeiten durch Bremseneingriff die Antriebsräder abbremesen und damit durchdrehende Räder beim Anfahren verhindern. Eine Weiterentwicklung des Systems wurde später unter dem Namen Antriebsschlupfregelung (ASR) eingeführt und konnte auch bei hohen Geschwindigkeiten eingreifen. Hierzu wurde ergänzend zum Bremseneingriff über eine Kommunikationsschnittstelle zum Motor dessen Leistung gedrosselt, damit Motor und Radbremse nicht gegeneinander arbeiten.

Ebenfalls möglich durch das Antiblockiersystem ist die elektronische Bremskraftverteilung (EBV), die 1994 Einzug ins Automobil hielt. Anhand der erfassten Radschlüpfе wird eine Blockierneigung der Hinterräder erfasst. Während diese Blockierneigung in früheren Systemen durch mechanisch-hydraulische Bremskraftminderer und -verteiler verhindert wurde, ist in der EBV eine gezielte Bremsung nahe der Blockierneigung möglich, die unabhängig vom Gewicht des Fahrzeugs geregelt wird. Außerdem können somit die Minderer und Verteiler entfallen, wodurch Kosten eingespart werden und das System vereinfacht wird.

Eine Revolution bei den Bremssystemen kam im Jahre 1995 mit dem Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP). Mit dem ESP veränderte sich das bisher passive Sicherheitssystem Bremse, welches vom Fahrer betätigt werden muss, zu einem aktiven System. Beim ESP wird der Kurs, den der Fahrer vorgibt, mit dem tatsächlichen Kurs des Fahrzeugs abgeglichen. Hierzu werden ergänzend zu den Drehzahlfühlern und zum Bremslichtschalter weitere Sensoren, wie der Lenkwinkelsensor (LWS), ein Beschleunigungssensor (BS) und ein Gierratensensor (Drehratensensor; DRS) sowie eine ESP-Pumpe zum aktiven Druckaufbau benötigt.

Über den vom Fahrer eingestellten Lenkwinkel wird der gewünschte Kurs bestimmt. Mit Hilfe der Werte der Querschleunigung, der Drehrate sowie der Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird der aktuelle Fahrzustand ermittelt. Aus dem Abgleich zwischen Soll- und Ist-Kurs kann dann ermittelt werden, ob das Fahrzeug zu einem instabilen Fahrzustand tendiert. Ist dies der Fall, so wird dem durch gezielte Bremsingriffe an den einzelnen Rädern und bei Bedarf durch Eingriffe ins Motormanagement entgegengewirkt. Der erforderliche Bremsdruck wird hierbei von der in der Hydraulikeinheit integrierten ESP-Pumpe aufgebracht. Bei großen Bremsanlagen kann es nötig sein, weitere Hilfsenergie aus einem zusätzlichen Bremskraftverstärker oder durch eine ESP-Vorladepumpe zu gewinnen.

Auch nach Einführung des ESP stagnierte die Entwicklung auf dem Gebiet der Bremssysteme nicht. 1996 kam ein Bremsassistent auf den Markt, der durch die Umleggeschwindigkeit vom Gas- auf das Bremspedal und/oder den Pedalweg und die Betätigungsgeschwindigkeit des Bremspedals eine Notbremsung erkennt. Durch das Öffnen eines elektromagnetischen Ventils am Bremskraftverstärker wird dann dessen volle Verstärkung der aufgebrachten Bremskraft überlagert, so dass die maximale Bremskraft zu einem möglichst frühen Zeitpunkt zur Verfügung steht. Dies ist bei einer Notbremsung besonders dann wichtig, wenn zu zögerlich oder zu schwach gebremst wird.

In weiteren Fahrerassistenzsystemen wird das Bremssystem ebenfalls integriert. Die adaptive Geschwindigkeitsregelung „Adaptive Cruise Control“ (ACC) bedient sich z. B. des Bremssystems. Mit Hilfe einer eigenen speziellen Sensorik wird der Verkehrsraum vor dem Fahrzeug erfasst. Die vorher eingestellte Wunschgeschwindigkeit wird hierbei nicht einfach wie bei einem Tempomat konstant gehalten, sondern dem Verkehrsaufkommen angepasst. Kommt dabei das eigene Fahrzeug dem Vordermann zu nah, so wird durch Eingriffe in die Motorsteuerung oder auch durch Abbremsung des Fahrzeugs die Geschwindigkeit verringert und der Sicherheitsabstand eingehalten. Allerdings sind hierbei die möglichen Verzögerungen auf ein geringes Maß begrenzt (0,2g bis 0,3g), so dass der Fahrer in vielen Situationen eingreifen muss. Zusätzlich kann der Fahrer, da die Verantwortung zur Fahrzeugführung bei ihm liegt, die Vorgaben des ACC jederzeit überstimmen.

Überdies gibt es viele weitere Zusatzfunktionen, auch Value Added Functions (VAF) genannt, die hier im Einzelnen nicht erläutert werden. Meist dienen sie der Komforterhöhung und damit der Fahrerentlastung.

Zusätzliche Entwicklungen haben das Bestreben, die bisherigen konventionellen Bremssysteme abzulösen. Im April 2001 wurde auf dem japanischen Markt die erste elektrohydraulische Bremse (EHB) von der Firma Advics, einer Toyota-Tochter, eingeführt. Noch im selben Jahr kam auch die erste weltweit erhältliche elektrohydraulische Bremse SBC (Sensotronic Brake Control) auf den Markt, die in Fahrzeugen der Firma Mercedes verbaut wurde.

Ziel der EHB ist es, den Fahrer möglichst von der Bremse zu entkoppeln und so eine Art Brake-by-Wire umzusetzen. Bei der SBC wird der Fahrerbremswunsch über die Pedaleinheit erfasst. Der Bremsdruck wird, geregelt vom Steuergerät, aus einem Hochdruckspeicher, der mit 140 bar bis 160 bar vorgespannt ist, ins Bremssystem eingeleitet. Der Hochdruckspeicher wird mit Hilfe einer Pumpe, die von einem Elektromotor angetrieben wird, gefüllt. Sollte es einen Ausfall im System geben, so sind hydraulische Verbindungen vom Pedal zu den Vorderrädern als Backup-Lösung vorgesehen.

Die Bremsung mittels EHB bietet einige Vorteile, wie z. B.:

- radindividuelle Bremsung in Kurven mit maximal möglicher Bremskraft,
- integrierter Bremsassistent ohne zusätzliche Komponenten,
- Trockenbremsung der Bremsscheiben und Beläge bei nasser Witterung („Bremsscheibenwischen“),
- verringerte Lenkkorrekturen bei ESP-Eingriffen,
- u. U. Verkürzung des Anhaltewegs,
- höhere Regelgüte bei einer ABS- oder ESP-Regelung.

Trotz der o. g. Vorteile konnten sich diese neuen Bremssysteme nicht durchsetzen. Einige Probleme bei der Einführung wie auch die Tatsache, dass es sich wegen der benötigten Bremsflüssigkeit immer noch um ein sog. „nasses“ Bremssystem handelt, können Gründe für einen fehlenden Durchbruch sein.

Neben der elektrohydraulischen Bremse konzentriert sich die Entwicklung derzeit auf die elektro-mechanische Bremse (EMB). Hierbei handelt es sich um ein „trockenes“ Bremssystem ohne Bremsflüssigkeit, dessen Radbremsen mit Hilfe eines Elektromotors betätigt werden. Diese Bremssysteme, bei denen die Radbremsen nur mittels Elektronik angesteuert werden und die Hydraulik entfällt, werden auch als Brake-by-Wire-System bezeichnet.

Zurzeit werden zwei Entwicklungsansätze verfolgt. Der erste Ansatz nutzt bisherige Radbremsen, wobei die Reibbeläge mit Hilfe eines Motors und eines Getriebes gegen die Bremsscheibe gepresst werden (Bild 2-9).

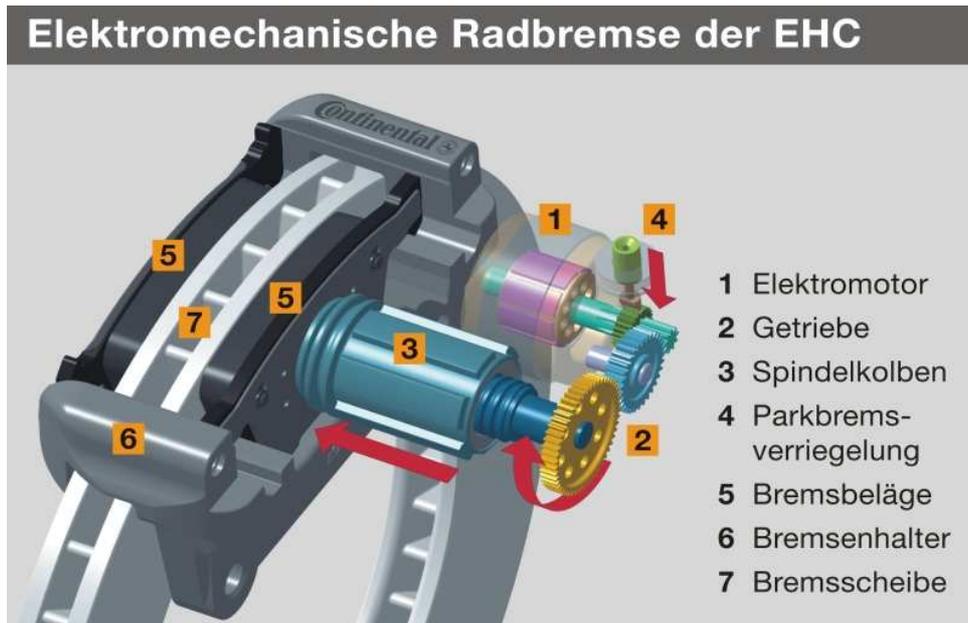


Bild 2-9: Elektromechanische Bremse mit Getriebe /con 01/

Der Elektromotor dieser als electro hydraulic combi brake (EHC) bezeichneten Elektromechanischen Bremse wird hierbei von einer Leistungselektronik angesteuert. Der Name resultiert aus der nicht vollständig elektromechanischen Auslegung, da die Vorderradbremmen weiterhin hydraulisch betätigt werden. Vorteilhaft an der elektromechanischen Auslegung der Hinterachse sind die nahezu beliebig einstellbare Spannkraft und die Verwendung der bisher genutzten Kombination aus Bremscheibe und –sattel. Problematisch ist allerdings die geforderte hohe Kraftaufbaudynamik, die ebenfalls ein wichtiger Punkt ist und der Spannkraft gegenübersteht.

Der zweite Ansatz basiert auf der Keilbremse (Bild 2-10).

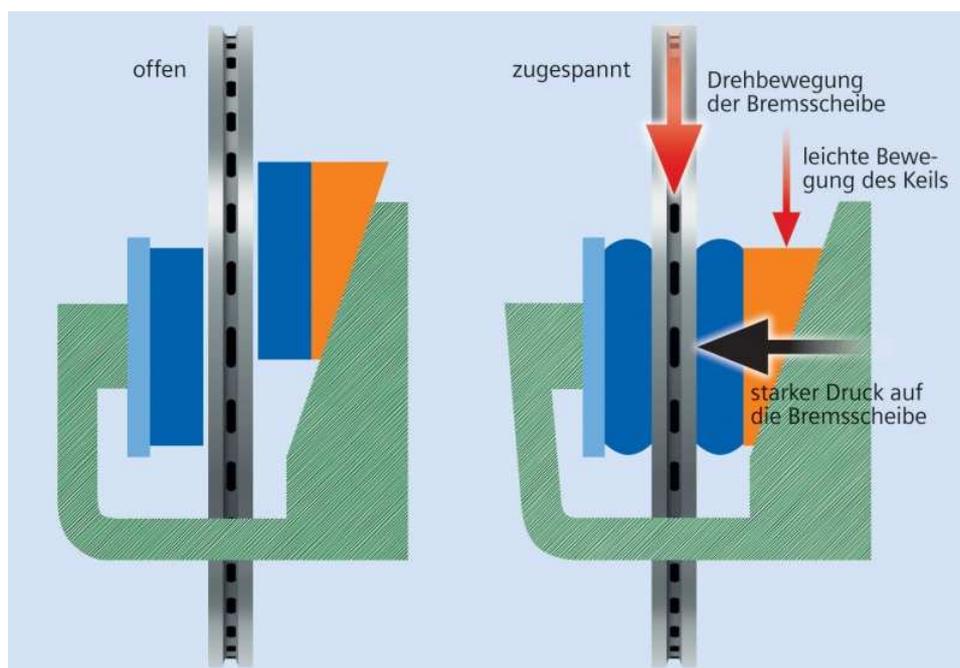


Bild 2-10: Prinzip der Keilbremse /sie 01/

Hierbei wird durch Verschieben eines Keils, der rollengelagert ist, die Bremskraft aufgebracht. Besonders von Bedeutung ist bei der Keilbremse, dass der Keil, sobald er Kontakt mit der Brems Scheibe bekommt, durch die Drehrichtung der Brems Scheibe weiter mitgezogen wird und dadurch eine sehr große Selbstverstärkung erfährt. Dies bedeutet aber auch, dass eine Regelung des Keils in beide Richtungen beim Bremsen und Lösen notwendig ist.

Beiden Ansätzen gemeinsam ist der Umstand, dass mit den gegenwärtig vorherrschenden Bedingungen im Fahrzeug diese Bremssysteme nicht zu realisieren sind. Eine solche Bremse ist unmittelbar abhängig von der vorhandenen Energie. Da das Energiebordnetz bei der Bremsbetätigung funktionieren muss aber nicht redundant ausgelegt ist, würde dessen Ausfall zur Folge haben, dass nicht mehr gebremst werden kann. Es ist jedoch gesetzlich gefordert, dass ein Einfachfehler nicht zu einem vollkommen ungebremsten Fahrzeug führen darf. Daher konzentrieren sich die Entwicklungen auch dahingehend, die Forderung der Zweikreisigkeit, z. B. durch unabhängige Energielieferanten, einzuhalten.

Aufgrund der enormen Entwicklungen, der vielen Variationen und der immer komplexer werden den Vernetzung der Bremssysteme im Fahrzeugverbund ist für den Verlauf der Arbeit die exakte Abgrenzung eines konventionellen Bremssystems zwingend erforderlich. Im folgenden Kapitel werden daher mögliche Ansätze zur Strukturierung der Systeme und eine daraus getroffene Ableitung eines konventionellen Bremssystems aufgezeigt.

3 Bremssystemabgrenzung

Das Betriebsbremssystem ist immer noch, wie schon zur Zeiten der Erfindung des Automobils, das wichtigste Sicherheitssystem in einem Kraftfahrzeug.

Obwohl es seinen Dienst eher unscheinbar verrichtet, erwartet doch jeder Fahrzeugführer zu jeder Zeit die ordnungsgemäße Funktion des Systems.

Die Anforderungen an die ordnungsgemäße Funktion eines Bremssystems können in verschiedenen Situationen jedoch stark differieren. Bei einer geringen Fahrzeugverzögerung, vor allem in niedrigen Geschwindigkeitsbereichen, soll die Bremse möglichst gefühlvoll ansprechen, um starke Nickbewegungen beim Anbremsen und somit einen Komfortverlust zu vermeiden. Bei einer Gefahrenbremsung wiederum ist allein die maximale Verzögerung in einer möglichst kurzen Zeit entscheidend. Hierbei soll das Fahrzeug stabil bleiben, um kritische Situation zu vermeiden. Darüber hinaus gibt es viele weitere Funktionen, die hier nicht näher erläutert werden (siehe hierzu auch /Bos 94/, /Bos 01/, /Bra 03/, /Brau 03/).

Die Aufgaben eines Betriebsbremssystems, im weiteren Verlauf nur noch als Bremssystem bezeichnet, lassen sich in zwei Oberpunkte gliedern:

- das Fahrzeug verzögern,
- das Fahrzeug im Stillstand halten.

Dem ersten Punkt kann sowohl eine Teilbremsung, bei der z. B. die Fahrzeuggeschwindigkeit verringert wird, um z. B. Tempobegrenzungen einzuhalten, als auch eine Verzögerung bis zum Stillstand (mit oder ohne ABS-Regelung, etc.) zugeordnet werden.

Die Stillstandsbremsung dient dazu, das Fahrzeug festzuhalten und ein unbeabsichtigtes Rollen des Fahrzeugs zu verhindern.

Die stetige Weiterentwicklung hat zu immer leistungsfähigeren, im Fahrzeug vernetzten Bremssystemen mit erweitertem Funktionsumfang geführt. Das Bremssystem kommuniziert hierbei teilweise mit anderen Systemen, z. B. der Motorsteuerung, da es auf deren Funktionen angewiesen ist.

Die wichtigsten Funktionen des Bremssystems, die in Notfällen Verwendung finden, werden im Folgenden beschrieben.

Das Antiblockiersystem (ABS) ist in Europa bei Neuzulassungen Standard. Es dient dazu, die Lenkfähigkeit und die Stabilität eines Fahrzeugs während einer Bremsung zu erhalten. Darüber hinaus wird unter den meisten Bedingungen bei einer ABS-geregelten Vollbremsung der kürzeste Bremsweg erreicht.

Auch die sehr wichtige Funktion der Bremskraftverteilung, die in älteren hydraulischen Systemen mechanisch erfolgt, wird in den neuen Bremssystemen elektronisch realisiert und als Elektronische Bremskraftverteilung (EBV) bezeichnet. Mit Hilfe der Bremsverkraftverteilung wird verhindert, dass bei einem Fahrzeug die Hinterachse vor der Vorderachse blockiert, da eine blockierende Hinterachse in der Regel zu einem gierenden Fahrzeug führt und die Spur somit nicht mehr gehalten werden kann.

Das Elektronische Stabilitätsprogramm soll den Fahrer in kritischen Situationen, wie z. B. bei einer zu schnell angefahrenen Kurve, durch gezielte Brems Eingriffe unterstützen, um das Fahrzeug unter Kontrolle zu halten. Dies ist allerdings nur solange möglich, wie die physikalischen Grenzen nicht überschritten sind. Auch diese Funktion unterstützt primär die Spurführung bei einem Fahrzeug.

Darüber hinaus werden weitere Zusatzfunktionen, wie z. B. die automatische Abstandsregelung (ACC) und die Anfahrhilfe (Hill Hold), mit Hilfe des Bremssystems realisiert. Dies hat zur Folge, dass evtl. mehr Komponenten zum Bremssystem gezählt werden müssen und somit unter Umständen die Belastung der vorhandenen Komponenten steigt.

3.1 Bremssystemeinteilungen

Um Systeme bewerten zu können, ist zu Beginn einer Analyse eine sehr genaue Abgrenzung des zu betrachtenden Systems erforderlich. Die Festlegung der Systemgrenzen ist besonders dann sehr schwierig, wenn mehrere Systeme miteinander vernetzt sind.

Auch heutige Bremssysteme sind stark in die Gesamtfahrzeugstruktur eingebunden und benötigen Energie aus dem Bordnetz (Batterie, Generator, Bordnetzsteuergerät, etc.). Die Energieversorgung würde aber wohl kaum jemand unmittelbar dem Bremssystem zuordnen.

Aufgrund der vielen Auslegungsarten von Bremssystemen und den möglichen Zusatzfunktionen ist es allerdings sehr schwierig, den Stand der Technik für „konventionelle Bremssysteme“ zu bestimmen.

Als Grundlage zur Systemabgrenzung werden nachfolgend acht Einteilungsmöglichkeiten für Bremssysteme aufgezeigt. Die Einteilungen A bis D sind entliehen aus anderen Technikbereichen und werden für die Bremssysteme angepasst. Die Einteilungen E bis H sind auf dem Hintergrund der Bremssysteme neu erstellt, lassen sich aber mit leichten Änderungen auch auf andere Systeme anwenden.

3.1.1 Einteilung A

Eine Möglichkeit der Systemabgrenzung ist angelehnt an die Maschinentechnik. Hierbei werden die Komponenten entsprechend der Gebiete

- Mechanik,
- Elektrik/Elektronik,
- Hydraulik und
- Sensorik

aufgeteilt (siehe Tabelle 3-1).

Darüber hinaus ist es für ein Bremssystem erforderlich, eine weitere Rubrik „Fremdsysteme/ Fremdenergie“ einzuführen, da einige Komponenten nicht zum Bremssystem gezählt werden können, aber für bestimmte Funktionen von elementarer Bedeutung sind. Beispielhaft sei hier die

menschliche Muskelkraft genannt, ohne die eine Bremsung bei einem konventionellen Bremssystem nicht möglich ist und damit Auswirkungen auf weitere Funktionen, wie z. B. die ABS-Regelung, haben kann.

Tabelle 3-1: Einteilung A, angelehnt an die Maschinentechnik

Mechanik	Elektrik/Elektronik	Hydraulik
Bowdenzug	ABS-Steuergerät (ABS-SG)	ABS-Hydraulikeinheit
Bremsbacken	Bremslicht	Ausgleichsbehälter (Reservoir)
Bremsbelag	ESP-Steuergerät (ESP-SG)	Bremsflüssigkeit
Bremskraftverstärker hydr.	Kontrollleuchte ABS	Bremskraftbegrenzer
Bremskraftverstärker pneum.	Kontrollleuchte ESP	Bremskraftminderer
Bremspedal	Software (SW)	Bremskraftverteiler
Bremssattel	Warnleuchte Bremse	Bremsleitung
Bremsscheibe		Bremsschlauch
Bremstrommel		ESP-Hydraulikeinheit (HU)
Bremsleitung		Hydraulikspeicher
Feststellmodul		Ladepumpe
Feststellpedal		Magnetventil (MV)
Handbremshebel		Radzylinder
Tandemhauptbremszylinder (THZ)		Rückförderpumpe
		elektr. Vorladepumpe (eVLP)
Sensorik		Fremdsysteme/ Fremdenergie
Beschleunigungssensor (BS)	Gier-/Drehratensensor (DRS)	Energieversorgung elektr.
Bremslichtschalter (BLS)	Impulsrad (DF)	Muskelkraft
Drehzahlfühler (DF)	Lenkwinkelsensor (LWS)	Vakuumpumpe
Drehzahlfühler ESP-Pumpe	Pedalwegsensoren (PWS)	Vakuumversorgung Motor
Drucksensoren (DS;THZ)		Zündschloß

Bei der Zusammenstellung hat sich gezeigt, dass diese Abgrenzung sowohl Vor- als auch Nachteile hat, wie im Folgenden beschrieben.

Vorteile:

Die Einteilung ist strukturell sehr einfach gehalten. Es werden keine besonderen Kenntnisse über das System benötigt. Die Komponenten eines konventionellen, nicht elektronischen Bremssystems lassen sich schnell ermitteln, da der Bereich Sensorik nahezu entfällt und aus den anderen Bereichen nur einige wenige Komponenten entfernt werden müssen.

Die Liste kann als Kontrollliste für nachfolgende Einteilungen verwendet werden, um zu prüfen, ob alle Komponenten des Bremssystems berücksichtigt wurden.

Mit der vorgenommenen Einteilung ist eine sehr einfache Abschätzung nach dem zu erwartenden Ausfallverhalten möglich, welches durch die Ausfallsteilheit β der Weibull-Verteilung, die in Abschnitt 5.1 erläutert wird, mit einem möglichen Wertebereich charakterisiert ist:

- Verschleißverhalten mit $\beta \geq 1,5$ bei Mechanik und Hydraulik,
- Frühausfallverhalten mit $\beta < 1$ bei Elektrik/Elektronik und Sensorik.

Die Zuverlässigkeit eines Bremssystems als reines Seriensystem kann sehr einfach abgeschätzt werden, wenn die Anzahl der jeweiligen Komponenten und ihre Ausfallraten bekannt sind.

Nachteile:

Die eindeutige Zuordnung der Komponenten zu den Teilbereichen ist teilweise nicht eindeutig möglich. Auszugsweise seien hier genannt:

- Bremsleitung (Mechanik/Hydraulik),
- Tandemhauptbremszylinder (Mechanik/Hydraulik) und
- Pneumatischer Bremskraftverstärker (Mechanik/Fremdenergie).

Der Systemaufbau wird durch diese Einteilung nicht ersichtlich. Aus der tabellarischen Darstellung sind keine funktionalen Zusammenhänge erkennbar, da nur die Komponenten und nicht die zugehörigen Funktionen des Systems erfasst sind. Somit ist eine Untersuchung auf die Funktionen hin allein mit dieser Einteilung nicht möglich. Degradationszustände lassen sich mit der vorgenommenen Einteilung ebenfalls nicht darstellen.

Darüber hinaus sind keine Redundanzstrukturen der Komponenten abgebildet, so dass aus dieser Darstellung nur eine Seriensystemstruktur abgeleitet werden kann. Dieses würde aber die Abbildung des Systems aus sicherheitstechnischer Sicht stark verfälschen, da einige redundante Strukturen vorhanden sind.

Komponenten, die mehrfach im Bremssystem verbaut sind (z. B. an jedem der vier Räder ein Bremsattel), sind nur einmal erfasst.

In der Tabelle sind Komponenten von verschiedenen verbreiteten Bremssystemauslegungen aufgeführt. Daher müssen nicht alle in der Tabelle erfassten Komponenten in einem Bremssystem vorhanden sein. Dies ist z. B. der Fall beim Bremskraftbegrenzer, dessen Funktion mittlerweile vom ABS-Steuergerät und der Hydraulikeinheit erfüllt wird.

3.1.2 Einteilung B

Diese Form der Einteilung (Tabelle 3-2) ist direkt oder in leicht veränderter Form in der Literatur zu Bremssystemen zu finden (siehe /Bos 01/, /Bos 03/, /Bra 03/, /Brau 03/).

Tabelle 3-2: Einteilung B, angelehnt an die in /Bos 01/ verwendete Bremssystemaufteilung

Radbremsen (Wheel brakes, foundation)	Betätigungseinrichtung (Control device, actuation)	Übertragungseinrichtung (Transmission device, modulation)
Bremsbacken	Bremskraftverstärker hydr.	Bowdenzug
Bremsbelag	Bremskraftverstärker pneum.	Bremsflüssigkeit
Bremssattel	Bremspedal	Bremskraftbegrenzer
Bremsscheibe	Feststellpedal	Bremskraftminderer
Bremstrommel	Handbremshebel	Bremskraftverteiler
Feststellmodul	Tandemhauptbremszylinder (THZ)	Bremsleitung
Radzylinder		Bremsschlauch
		Magnetventil (MV)
Energieversorgung (Energy supply)	Zusatzeinrichtung (auxiliary equipment)	
Ausgleichsbehälter (Reservoir)	ABS-Steuergerät (ABS-SG)	Gier-/Drehratensensor (DRS)
Energieversorgung elektr.	Beschleunigungssensor (BS)	Impulsrad (DF)
ESP-Hydraulikeinheit (HU)	Bremslicht	Kontrollleuchte ABS
Hydraulikspeicher	Bremslichtschalter (BLS)	Kontrollleuchte ESP
Ladepumpe	Drehzahlfühler (DF)	Lenkwinkelsensor (LWS)
Rückförderpumpe	Drehzahlfühler ESP-Pumpe	Pedalwegsensor (PWS)
Vakuumpumpe	Drucksensor (DS;THZ)	Software (SW)
Vakuumversorgung Motor	ESP-Steuergerät (ESP-SG)	Warnleuchte Bremse
elektr. Vorladepumpe (eVLP)	Zündschloß	
Muskelkraft		

Die Vor- und Nachteile entsprechen im Großen den der Einteilung A. Lediglich die Zuordnung der Komponenten zu den Rubriken erfolgt anders, ist aber ebenso nicht immer eindeutig. Die Zusatzeinrichtungen können teilweise auch den anderen Rubriken zugeordnet werden, da bei der Erstellung die Basisbremse im Vordergrund stand.

3.1.3 Einteilung C

Die Einteilung des Bremssystems erfolgt hier in Form eines einfachen Regelkreises (Bild 3-1).

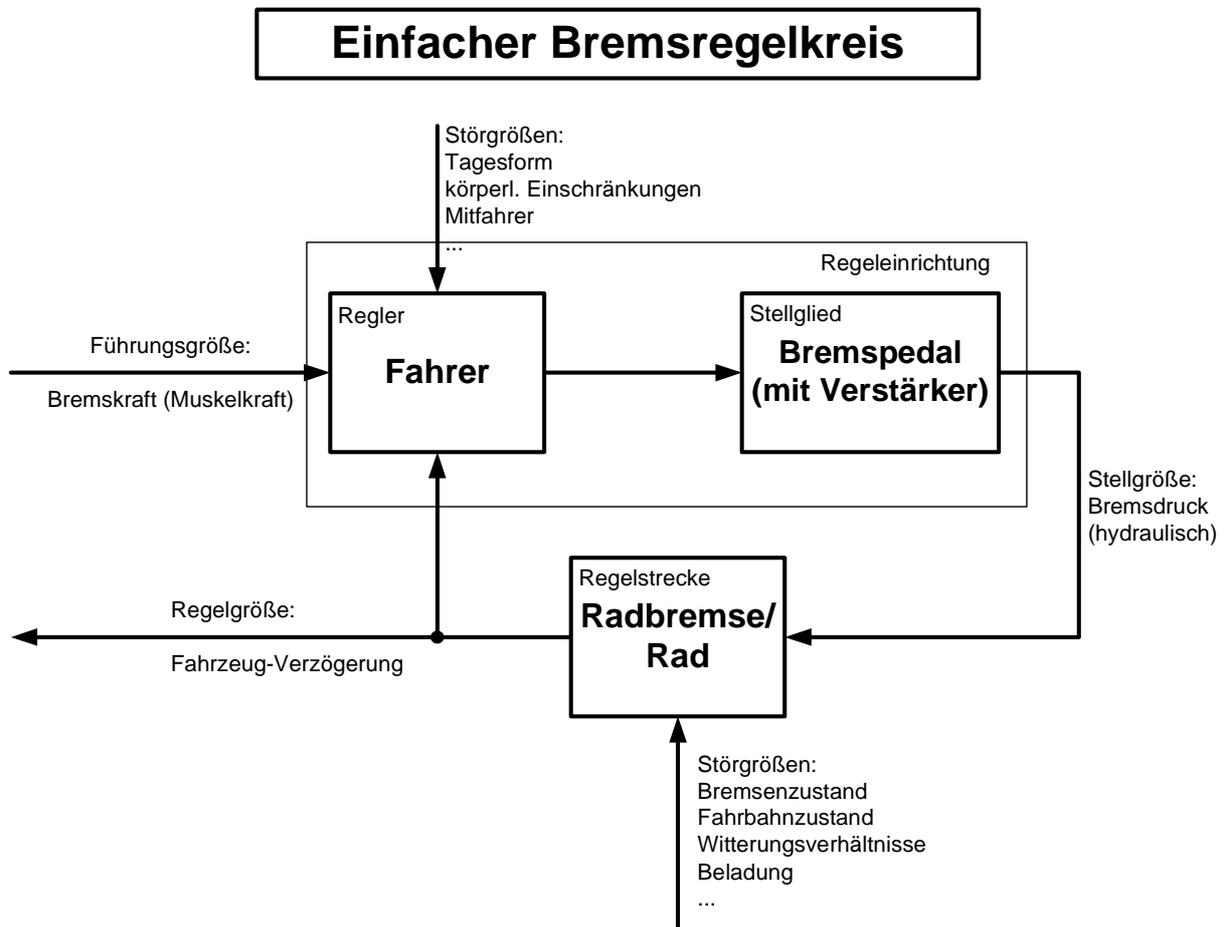


Bild 3-1: Bremsregelkreis eines Bremssystems ohne ABS

Der Fahrer ist in dieser Regelung als sehr wichtiges Glied in Form des Reglers eingebunden. Allerdings fehlen in der Abbildung wichtige Komponenten des Bremssystems, die als Blackbox behandelt werden. Bei Ergänzung dieser Grundbremsaufgabe durch ABS und ESP (siehe /Lie 05/) nimmt der Umfang des Regelkreises stark zu und verlagert sich von der Betrachtung des Fahrers auf die Betrachtung der technischen Regelung durch die Steuergeräte. Auch hierbei werden jedoch nicht alle Komponenten berücksichtigt. Ein weiterer Nachteil ist, dass ergänzende Funktionalitäten nicht unmittelbar abgebildet werden können.

Die Abbildung von Redundanzen und somit eine Einbindung von Degradationszuständen ist ebenfalls nicht möglich.

3.1.4 Einteilung D

Im folgenden Bild 3-2 ist das Bremssystem als eine Art Wirkkette dargestellt.

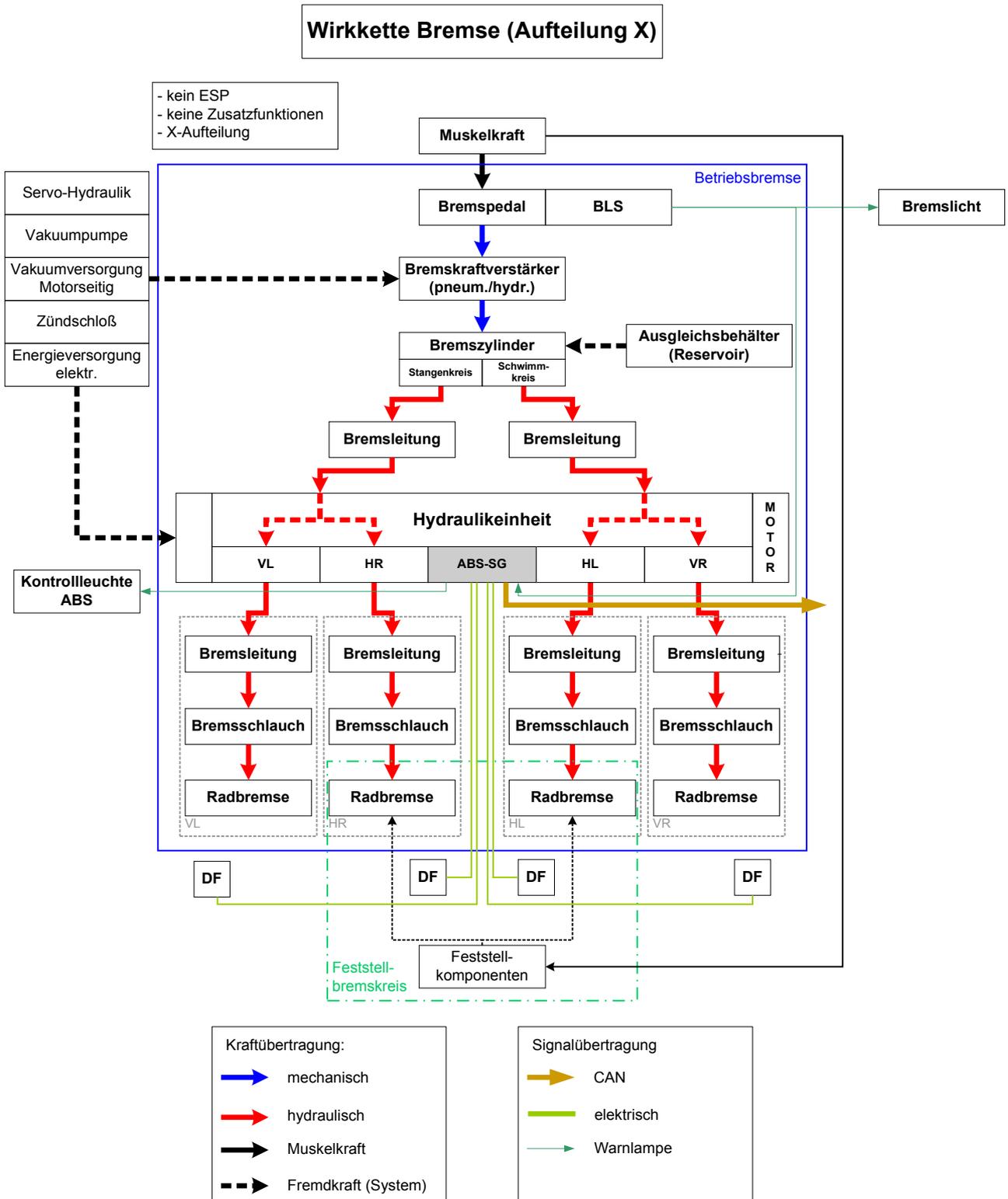


Bild 3-2: Wirkkette für ein mögliches Bremssystem (X-Aufteilung)

Für eine Basisbremsung innerhalb eines ABS mit elektronischer Bremskraftverteilung (EBV) entspricht die erstellte Einteilung D nahezu der realen Wirkkette im Bremssystem. Darüber hinaus ist als Art „Blackbox“ die Feststellbremse mit aufgeführt. Für die pneumatische /hydraulische Verstärkung müssen die (externen) Komponenten allerdings angepasst werden.

Die Einteilung für die Betriebsbremse (dünne blaue Linie) gibt wieder, welche Komponenten im Normalfall für die Bremsung benötigt werden.

Allerdings kann auch ein degradiertes System, z. B. bei einem ausgefallenen Drehzahlfühler (DF), noch eine Bremsung mit einer geregelten Bremskraftverteilung (EBV) durchführen.

Alle für eine Bremsung mit einer elektronisch geregelten Bremskraftverteilung (EBV) benötigten Komponenten werden ebenfalls für eine ABS-Bremsung benötigt. Hier zeigt sich, dass aus der Einteilung D die verschiedenen Funktionen des Bremssystems mit ABS nicht abgeleitet werden können. Die Einteilung D kann folglich nicht unverändert für Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbetrachtungen übernommen werden, da die Redundanzstrukturen nicht eindeutig zuzuordnen sind. So ist beispielsweise nicht zu erkennen, dass ein Fehler im Steuergerät (SG) denkbar ist, bei dem alle Ventile in der Hydraulikeinheit (HU) schließen, so dass keine Bremsung mehr möglich ist. Dieser Fehler hätte zur Folge, dass die redundant aufgebauten Strukturen bis zu den Radbremsen völlig ohne Bedeutung wären.

Eine erste grobe Zuverlässigkeitsschätzung ist dennoch möglich, da nahezu jeder Ausfall einer Komponente zu einem nicht nach Vorgabe gebremsten Fahrzeug führt. Nur für die Drehzahlfühler (DF) ist dies nicht der Fall, da hier auch bei nur zwei intakten DF eine EBV erfolgen kann. Die Komponenten sind für diesen einfachen Fall seriell angeordnet anzusehen, so dass die Ausfallraten im konstanten Fall aufsummiert werden können. Diese Darstellung bildet zwar das Gesamtsystem zu pessimistisch ab, liefert aber eine gute Bewertungsgrundlage für nachfolgende Untersuchungen, da die ermittelten Werte nicht schlechter sein dürfen.

Ein großer Vorteil dieser Einteilung ist jedoch, dass das Bremssystem mit bekannten Methoden, wie z. B. der Fehlerbaumanalyse, sehr gut abgebildet und zuverlässigkeitstechnisch quantifiziert werden kann. Weiterhin ist das grundlegende Funktionsprinzip einer Bremsanlage sehr gut ersichtlich und für eine spätere quantitative Analyse sichergestellt, dass jegliche Fehler betrachtet werden, da alle Funktionen durch die aufgelisteten Komponenten realisiert werden.

Nachteilig an dieser Einteilung ist, dass die Funktionen, vor allem EBV und ABS, nicht abgebildet sind und somit nur eine Gesamtsystembetrachtung hinsichtlich Zuverlässigkeit und Sicherheit auf Basis der Komponenten möglich ist. Die Untersuchung bezüglich der Zuverlässigkeit der einzelnen Funktionen sowie der Sicherheit des Gesamtsystems bedarf jeweils einer Anpassung der Einteilung, da die Abschaltstrategie für das Bremssystem nicht mit erfasst ist.

3.1.5 Einteilung E

Bei der Entwicklung der Einteilung E bestand das primäre Ziel darin, die Komponenten den jeweiligen spezifischen Bremssystemen zuordnen zu können (Tabelle 3-3). Hierbei sind die Komponenten grau hinterlegt, die bis heute in allen Arten von Bremssystemen verwendet werden. Nur die Form der Radbremse (Scheiben-/Trommelbremse) muss für das jeweilige Bremssystem ausgewählt werden.

Die Tabelle 3-3 kann leicht umgestaltet werden (siehe Tabelle 3-4), so dass alle Komponenten den entsprechenden Funktionen zugeordnet werden können.

Als Basis in der Tabelle 3-4 dient ein ESP-System, dem die wichtigsten fünf Funktionen zugeordnet sind. Ergänzend ist die Spalte für das erw. ESP, welches über einen erweiterten Funktionsumfang verfügt, mit eingefügt. Alle Komponenten, die grau hinterlegt sind, werden für alle fünf Funktionen benötigt. Da nur ein Auszug der Funktionen in den Tabellen dargestellt ist, können Komponenten aufgeführt sein, die für keine der genannten Funktionen in den jeweiligen Systemen benötigt werden. Als Beispiel sei hier die Kontrollleuchte ABS genannt, die nur dann leuchtet, wenn das System bzw. die ABS-Funktion nicht zur Verfügung steht.

Die System- oder Funktionskonfigurationen können aus den Tabellen durch einfaches Filtern ermittelt werden. Es ist jedoch keine Wirkkette hinterlegt, was zur Folge hat, dass bei einer Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse die Redundanzstrukturen nicht ohne zusätzliche Einteilungen und Untersuchungen eingebunden und abgebildet werden können.

Weiterhin sind aus den Tabellen keine Degradationszustände ersichtlich, was erhebliche Einschränkungen für die Sicherheitsbetrachtung zur Folge hat. Als Beispiel sei der Ausfall eines Drehzahlfühlers (DF) in einem Bremssystem mit ABS oder ESP genannt, der nicht zum vollständigen Verlust des Bremssystems führt, sondern lediglich Einbußen in den Funktionen ABS und ESP zur Folge hat.

Zur genauen Abbildung müssten daher die Einteilungen nach Komponenten, nach Funktionen und die vorhandenen Redundanzstrukturen miteinander verknüpft werden, was jedoch nicht unproblematisch ist (siehe Einteilung F).

Tabelle 3-3: Komponentenzuordnung zu den Systemen bei einer Basisbremsung (evtl. mit EBV-Regelung).

Bremskomponenten	Basisbrems- system	Bremse mit Booster	System mit ABS	System mit ESP	System mit erw. ESP
ABS-Steuergerät (ABS-SG)			x		
ABS-Hydraulikeinheit			x		
Ausgleichsbehälter (Reservoir)	x	x	x	x	x
Beschleunigungssensor (BS)					
Bowdenzug	x	x	x	x	x
Bremsbacken	x	x	x	x	x
Bremsbelag	x	x	x	x	x
Bremsflüssigkeit	x	x	x	x	x
Bremskraftbegrenzer	x	x			
Bremskraftminderer	x	x			
Bremskraftverstärker hydr.		x	x	x	
Bremskraftverstärker pneum.		x	x	x	
Bremskraftverteiler	x	x			
Bremsleitung	x	x	x	x	x
Bremslicht	x	x	x	x	x
Bremslichtschalter (BLS)	x	x	x	x	x
Bremspedal	x	x	x	x	x
Bremssattel	x	x	x	x	x
Bremsscheibe	x	x	x	x	x
Bremsschlauch	x	x	x	x	x
Bremstrommel	x	x	x	x	x
Drehzahlfühler (DF)			x	x	x
Drehzahlfühler ESP-Pumpe					
Drucksensor (DS;THZ)				x	x
Energieversorgung elektr.		x	x	x	x
ESP-Steuergerät (ESP-SG)				x	
Feststellmodul	x	x	x	x	x
Feststellpedal	x	x	x	x	x
Gier-/Drehratensensor (DRS)					
Handbremshebel	x	x	x	x	x
ESP-Hydraulikeinheit (HU)			x	x	x
Hydraulikspeicher			x	x	
Impulsrad (DF)			x	x	x
Kontrollleuchte ABS					
Kontrollleuchte ESP					
Ladekolbeneinheit					
Lenkwinkelsensor (LWS)					
Magnetventil (MV)			x	x	x
Muskelkraft	x	x	x	x	x
Pedalwegsensor (PWS)					
Radzylinder	x	x	x	x	x
Rückförderpumpe			x	x	
Software (SW)			x	x	x
Tandemhauptbremszylinder (THZ)	x	x	x	x	x
Vakuumpumpe		x	x	x	
Vakuumversorgung Motor		x	x	x	
elektr. Vorladepumpe (eVLP)					
Warnleuchte Bremse					
Zündschloß		x	x	x	x
Wegbausteuergerät (WSG)					x
Hydraulikeinheit mit Anbau-SG					x
Hochdruckpumpe					x
Hochdruckspeicher					x
Raddrucksensor					x
Simulator					x
Warnleuchte erw. ESP					
BOU					x

Tabelle 3-4: Komponentenzuordnung zu den jeweiligen speziellen Funktionen.

Bremsenkomponenten	Basis- bremsung	Bremsung mit Booster	ABS	ESP	EBV	Bremsung erw. ESP
ABS-Steuergerät (ABS-SG)			x		x	
ABS-Hydraulikeinheit			x		x	
Ausgleichsbehälter (Reservoir)	x	x	x	x	x	x
Beschleunigungssensor (BS)				x		x
Bowdenzug						
Bremsbacken	x	x	x	x	x	x
Bremsbelag	x	x	x	x	x	x
Bremsflüssigkeit	x	x	x	x	x	x
Bremskraftbegrenzer	x	x				
Bremskraftminderer	x	x				
Bremskraftverstärker hydr.		x	x		x	
Bremskraftverstärker pneum.		x	x		x	
Bremskraftverteiler	x	x				
Bremsleitung	x	x	x	x	x	x
Bremslicht	x	x	x		x	
Bremslichtschalter (BLS)	x	x	x		x	x
Bremspedal	x	x	x		x	x
Bremssattel	x	x	x	x	x	x
Bremsscheibe	x	x	x	x	x	x
Bremsschlauch	x	x	x	x	x	x
Bremstrommel	x	x	x	x	x	x
Drehzahlfühler (DF)			x	x	x	x
Drehzahlfühler ESP-Pumpe				x		
Drucksensor (DS;THZ)			x	x		x
Energieversorgung elektr.			x	x	x	x
ESP-Steuergerät (ESP-SG)	x	x	x	x	x	
Feststellmodul						
Feststellpedal						
Gier-/Drehratensensor (DRS)				x		x
Handbremshebel						
ESP-Hydraulikeinheit (HU)	x	x	x	x	x	x
Hydraulikspeicher			x	x	x	
Impulsrad (DF)			x	x	x	x
Kontrollleuchte ABS						
Kontrollleuchte ESP				x		
Ladepumpe				x		
Lenkwinkelsensor (LWS)				x		x
Magnetventil (MV)			x	x	x	x
Muskelkraft	x	x	x		x	
Pedalwegsensoren (PWS)						x
Radzylinder	x	x	x	x	x	x
Rückförderpumpe			x	x		
Software (SW)	x	x	x	x	x	x
Tandemhauptbremszylinder (THZ)	x	x	x		x	x
Vakuumpumpe		x				
Vakuumversorgung Motor		x				
elektr. Vorladepumpe (eVLP)				x		
Warnleuchte Bremse						x
Zündschloß		x	x	x	x	x
Wegbausteuergerät (WSG)						x
Hydraulikeinheit mit Anbau-SG						x
Hochdruckpumpe						x
Hochdruckspeicher						x
Raddrucksensoren						x
Simulator						x
Warnleuchte erw. ESP						x
BOU						x

3.1.6 Einteilung F

Eine weitere Entwicklung zur Darstellung eines Bremssystems basiert darauf, die Kombinationen aus Komponenten und Funktionen mit Hilfe einer Baumstruktur (Bild 3-3) abzubilden.

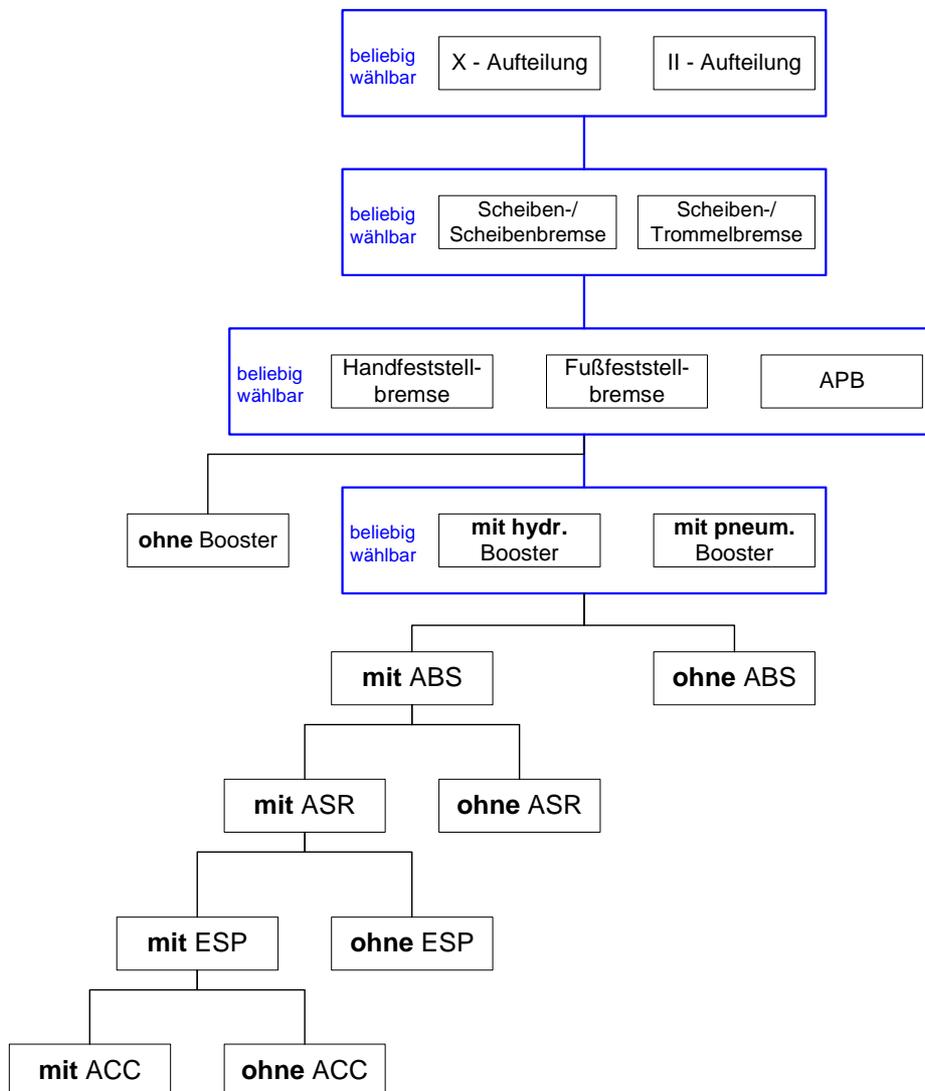


Bild 3-3: Kombination aus Komponenten und Funktionen erfasst in einer Baumstruktur

Diese Darstellung ist für ein Bremssystem nicht empfehlenswert, da Komponenten und Funktionen vermischt dargestellt sind. Bei einer vollständigen und ergänzten Abbildung wird die Grafik sehr groß und unübersichtlich, da einige 100 Kombinationen möglich sind.

Ein weiterer Nachteil ist, dass die Komponenten nicht unmittelbar den Funktionen zugeordnet werden können. Es müsste also für jede Funktion, eventuell durch weitere Baumstrukturen, ermittelt werden, welche Komponenten für die entsprechenden Funktionen benötigt werden. Die Verknüpfung von Funktionen und Komponenten in dieser Form ist daher nicht sehr sinnvoll.

Weiterhin ist eine Analyse nur unter Zugrundelegung eines Seriensystems möglich, was dazu führt, dass nur Zuverlässigkeitsbetrachtungen durchgeführt werden können. Für Sicherheitsanalysen ist das System gänzlich ungeeignet.

3.1.7 Einteilung G

Die Einteilung G (siehe Bild 3-4) verfolgt den Ansatz, Bremssysteme modular abzubilden, um einen möglichst allgemein verwendbaren Aufbau zu erhalten.

Basisbremsung (mit mechanischer/elektr. Bremskraftregelung)

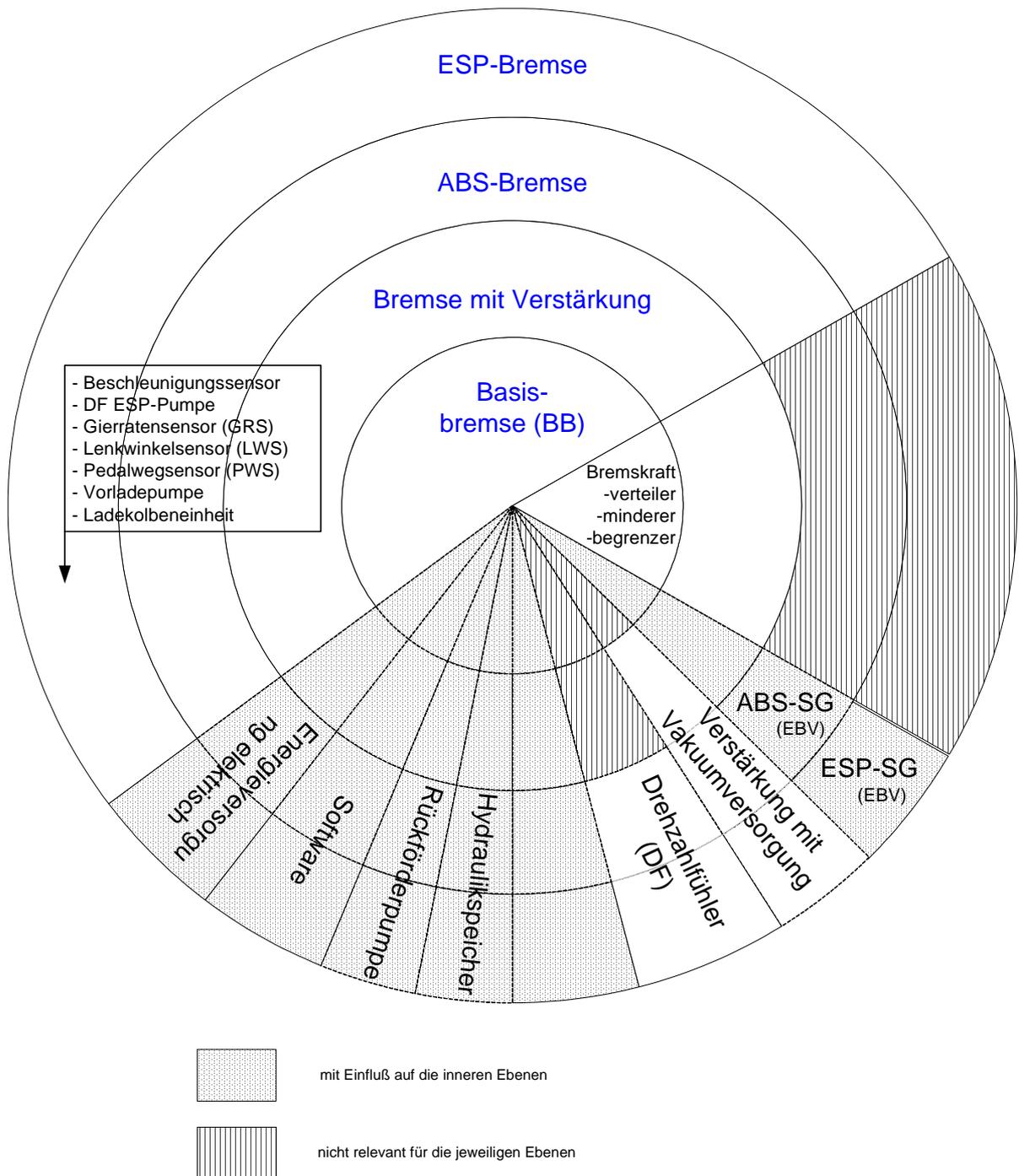


Bild 3-4: „Zwiebelmodell“ zur modularen Abbildung von Bremssystemkonfigurationen

Dieses erstellte „Zwiebelmodell“ ist wie folgt zu verstehen:

Alle Komponenten aus der Einteilung D, die nicht in Bild 3-4 aufgeführt sind, werden für alle Bremssysteme benötigt. Eine Einbindung in die Darstellung ist aufgrund des Umfangs nicht sinnvoll.

Im Laufe der Entwicklung von Bremssystemen kamen immer mehr Funktionen zur Basisbremsung hinzu, die als weitere Ringe dargestellt sind.

Die Komponenten in den gepunkteten Kästchen werden entsprechend der Feldbeschriftung erstmalig bei ABS, ESP oder für die Verstärkung benötigt. Dennoch haben Sie bei den entsprechenden Systemen Einfluss auf die darunter liegenden Ebenen, da die Grundbremsfunktionen, wie die EBV, von den jeweiligen Systemen oder Komponenten mit übernommen werden. Die Drehzahlfühler werden jedoch nicht in die unteren Ebenen übernommen, da noch mit zwei intakten bzw. auch mit drei temporär ausgefallenen DF eine EBV-keep-alive Regelung erfolgt. Bei einer EBV-keep-alive Regelung wird durch ein hinterlegtes Modell die Regelung auf Basis der intakten Drehzahlfühler weitergeführt. Allerdings ist diese Regelung sehr robust und damit unkomfortabel ausgelegt. Des Weiteren kann sie dazu führen, dass nicht die volle Bremsleistung an den Rädern der Hinterachse aufgebracht werden kann, so dass sich der Bremsweg verlängert

Bei den linierten Abschnitten sind die Komponenten für die entsprechenden Bereiche nicht von Bedeutung.

Die Komponenten im gesonderten Kästchen werden ausschließlich für eine ESP-Regelung benötigt. Die Systemgrundlage für die Komponenten ist ein ESP 5.7.

Zu beachten ist, dass in dieser Einteilung Redundanzen nicht unmittelbar berücksichtigt werden und die Abschaltstrategie nicht erfasst wird.

Des Weiteren ist in Bild 3-4 die Systemdegradation ersichtlich, bei der es ein Ziel ist, möglichst von außen nach innen die Funktionen bei Fehlern abzuschalten. Hierbei wird deutlich, dass der Ausfall einiger der Komponenten / Teilsysteme direkt mehrere Funktionen außer Kraft setzen kann (z. B. Fehler in der Hydraulikeinheit).

Nachteilig an der Darstellung ist, dass die Verknüpfungen der Komponenten mit den Funktionen nicht detailliert abgebildet sind und keine Redundanzen erfasst werden. Hierdurch können in das Diagramm keine Mehrfachfehler implementiert werden, so dass die Systemdegradation nicht vollständig abgebildet ist.

3.1.8 Einteilung H

Bei der Erstellung der nachfolgenden Einteilung H besteht die Idee darin, die Zustände aufzuführen, die ein Antiblockiersystem (ABS) bei Auftreten von Fehlern einnehmen kann (Bild 3-5).

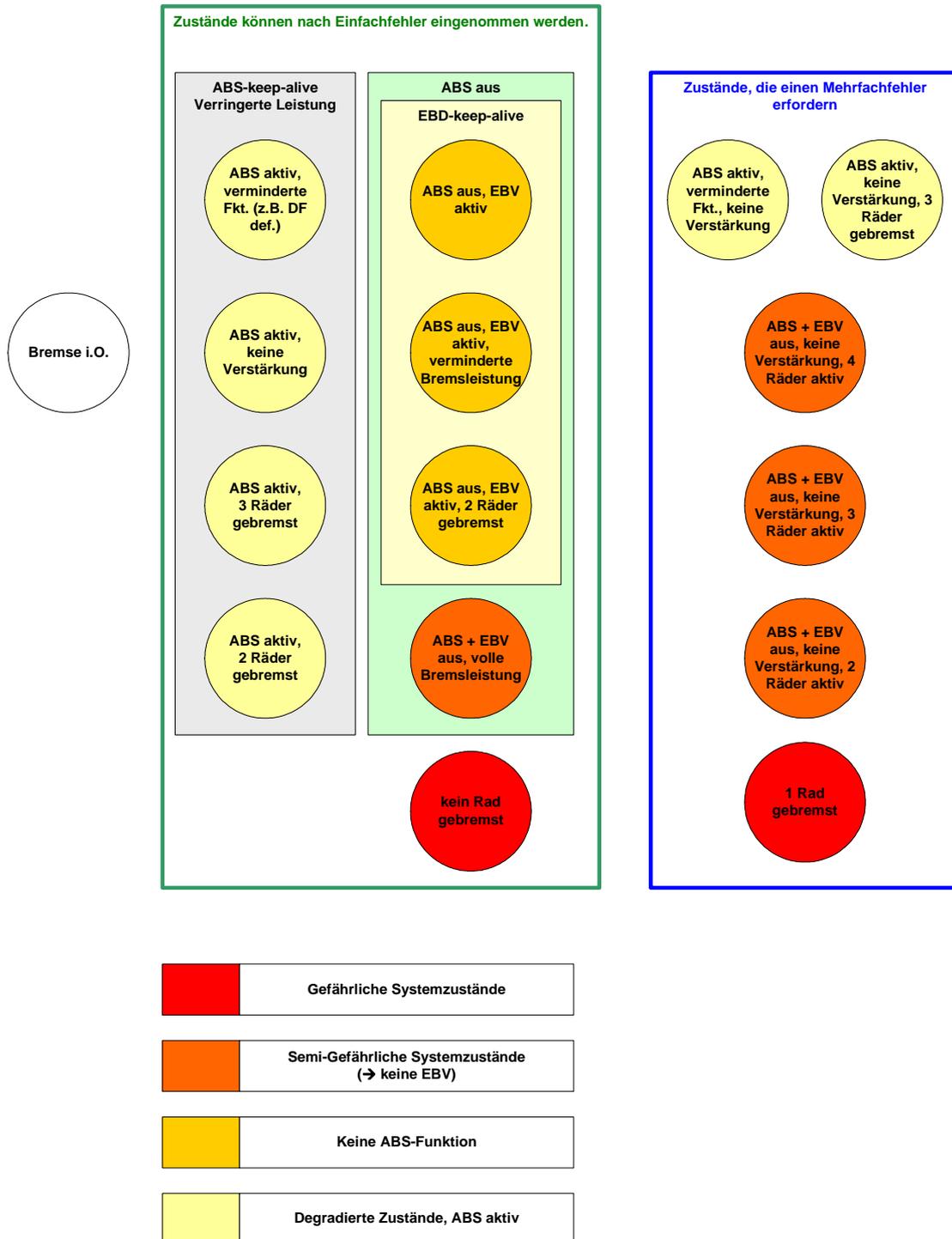


Bild 3-5: Zustandsmodell eines ABS-Bremssystems

Der grundlegende Aufbau des Modells ist angelehnt an die Abschaltstrategie des ABS. Hierbei ist eine grobe Unterteilung in Einfach- und Mehrfachfehler vorgenommen. Innerhalb der Einfachfehler

erfolgt eine Unterteilung in Zustandsgruppen mit aktivem ABS bzw. ABS-keep-alive und ABS „aus“ vorgenommen. Hierbei ist in dieser ersten Darstellung unter dem Wort „aus“ sowohl die Abschaltung nach einem erkannten Fehler („deaktiviert“) als auch der unkontrollierte Wegfall z. B. einer Funktion („ausgefallen“) zu verstehen. Die ABS-keep-alive Regelung ist auch hier eine Art Notregelung. Solange sich das Fahrzeug in einer ABS-geregelten Bremsung befindet, wird mit einem robusten Modell die Regelung und damit die Lenkbarkeit des Fahrzeugs auf Basis der intakten Drehzahlfühler aufrechterhalten. Diese Regelung ist meist sehr unkomfortabel. Nach Beendigung der Bremsung wird sie abgestellt und an den Fahrer eine Warnung ausgegeben.

Um die Abschaltstrategie im Detail abzubilden, müssten weitere Zustände erfasst werden. Aus der Erfahrung heraus hat sich gezeigt, dass eine zu detaillierte Betrachtung von Zuständen, z. B. mittels Markov-Modellen, sehr umfangreich wird und nicht mehr gut zu handhaben ist /Alt 03/.

Daher wird hier ein Ansatz verfolgt, bei dem Zustände zu Zustandsgruppen zusammengefasst werden. Die farbliche Hinterlegung lässt einen sehr schnellen Überblick zu, welche Zustände für die Betrachtung von Sicherheits- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen relevant sind. Allerdings entsteht hierdurch der Nachteil, dass die Redundanzstrukturen und die Abschaltstrategien nicht vollständig ersichtlich sind.

Für das zu untersuchende System (ABS, ESP) ist dieser Ansatz anzupassen und die Abschaltstrategie des Systems entsprechend in einen so genannten Zustandsgraphen zu übertragen.

Zur Bewertung von Zuverlässigkeit und Sicherheit eines modernen Bremssystems kann ein ähnlich strukturiertes Modell herangezogen werden, in dem ebenfalls die vorgesehene Abschaltstrategie zu hinterlegen ist. Die Übergangswahrscheinlichkeiten der Zustände müssen jedoch im Einzelnen ermittelt werden.

Dieses Modell ermöglicht es unmittelbar, Sicherheits- und Zuverlässigkeitsabschätzungen für Funktionen durchzuführen, sobald die Übergangsraten bekannt sind. Hierzu müssen allerdings die Ausfälle der Komponenten den Funktionen zugeordnet werden. Um eine genaue Abbildung zu erhalten, müssen für die Zuordnung zu den Funktionen die verschiedenen Ausfallarten der Komponenten berücksichtigt werden. In der Regel ist die Datenbasis aber nicht entsprechend detailliert, so dass wiederum einige Annahmen zur Fehlerartenverteilung getroffen werden müssen. Diese können aber unter Umständen die Analyseergebnisse stark beeinflussen.

3.2 Bewertung der Einteilungen

Mit Hilfe der folgenden Tabellen 3-5, 3-6 und 3-7 soll eine Auswahl der für das weitere Vorgehen sinnvollsten Einteilungen erleichtert werden. Hierbei werden Fragestellungen aus den Bereichen „Zuverlässigkeit“, „Sicherheit“ und „Technik“ entsprechend ihrer Beantwortungsmöglichkeiten durch die Einteilungen bewertet.

Die jeweils letzte Spalte mit der Überschrift „Gesamt“ gibt an, ob sich irgendeine der Einteilungen zur Beantwortung der jeweiligen Frage eignet. Die hinterlegten Farben dienen der schnellen Visualisierung und sind nahezu selbsterklärend. Rot besagt, dass sich die jeweilige Einteilung nicht zur

Beantwortung der Frage eignet. Gelb steht für die Fälle, bei denen die Beantwortung nur durch spezielle Anpassungen möglich ist und grün bedeutet, dass die Beantwortung der Frage einfach möglich ist.

Tabelle 3-5: Bewertung der Einteilungen aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht

Einteilung →		A	B	C	D	E	F	G	H	Gesamt
Fragestellung ↓										
Zuverlässigkeit	Ermöglicht die Einteilung eine Bewertung von Komponenten	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Teilweise	Ja	Nein	Ja
	Ist eine zuverlässigkeitstechnische Grobabschätzung (z.B. als Seriensystem) möglich?	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Sind Degradationszustände der Funktionen abgebildet?	Nein	Nein	Nein	Nein	Möglich	Nein	Teilweise	Ja	Ja
	Können einzelne Module zuverlässigkeitstechnisch analysiert werden?	Teilweise	Teilweise	Nein	Ja	Ja	Teilweise	Ja	Nein	Ja
	Ist ersichtlich, welche Komponenten für welche Funktionen benötigt werden?	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja
	Können Systemfunktionen zuverlässigkeitstechnisch untersucht werden?	Nein	Nein	Nein	Teilweise	Teilweise	Nein	Ja	Ja	Ja
	Ist eine vollständige Zuverlässigkeitsanalyse möglich?	Nein	Nein	Nein	Teilweise	Teilweise	Nein	Teilweise	Teilweise	Teilweise
	Können Fehlfunktionen der Komponenten entnommen werden?	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Anzahl "Ja" (max. 8)	2	2	0	3	4	1	5	3	
	Anzahl "Nein" (max. 8)	5	5	8	3	1	5	1	4	
Anzahl Sonstiges	1	1	0	2	3	2	2	1		

Tabelle 3-6: Bewertung der Einteilungen aus sicherheitstechnischer Sicht

Einteilung →		A	B	C	D	E	F	G	H	Gesamt
Fragestellung ↓										
Sicherheit	Können einzelne Module sicherheitstechnisch analysiert werden?	Teilweise	Teilweise	Nein	Ja	Ja	Teilweise	Ja	Nein	Ja
	Können Systemfunktionen sicherheitstechnisch bewertet werden?	Nein	Nein	Nein	Teilweise	Teilweise	Nein	Teilweise	Ja	Ja
	Können einzelne Komponenten Sicherheitsfunktionen zugeordnet werden?	Teilweise	Teilweise	Nein	Teilweise	Ja	Teilweise	Ja	Ja	Ja
	Können verschiedene sicherheitskritische Zustände (z.B. kein ABS, keine EBV) direkt erfasst werden?	Nein	Nein	Nein	Teilweise	Teilweise	Nein	Teilweise	Ja	Ja
	Ist eine Abschaltstrategie eingebunden?	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Teilweise	Ja	Ja
	Anzahl "Ja" (max. 5)	0	0	0	1	2	0	2	4	
Anzahl "Nein" (max. 5)	3	3	5	1	1	3	0	1		
Anzahl Sonstiges	2	2	0	3	2	2	3	0		

Tabelle 3-7: Bewertung der Einteilungen nach technischen Fragestellungen

Einteilung →		A	B	C	D	E	F	G	H	Gesamt
Fragestellung ↓										
Technik	Werden alle Komponenten erfasst?	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Mögl.	Nein	Ja
	Ist eine Einteilung der Komponenten in Module möglich?	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
	Sind Redundanzen ersichtlich?	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
	Werden Funktionen abgebildet?	Nein	Nein	Nein	Teilweise	Teilweise	Teilweise	Teilweise	Ja	Ja
	Ist die Einteilung übersichtlich? (Komplexität)	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
	Sind Schnittstellen ersichtlich?	Nein	Teilweise	Teilweise	Ja	Nein	Teilweise	Teilweise	Nein	Ja
	Können die Einteilungen schnell bei neuen Systemen ergänzt werden?	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
	Anzahl "Ja" (max. 7)	4	4	1	5	3	2	2	3	
	Anzahl "Nein" (max. 7)	3	2	5	1	3	3	2	4	
	Anzahl Sonstiges	0	1	1	1	1	2	3	0	

Anhand der Tabellen wird deutlich, dass sich keine der bisherigen Einteilungen alleine für eine vollständige Darstellung des Bremssystems eignet. Dennoch zeichnet sich ab, dass einige Einteilungen zur weiteren Analyse herangezogen werden können.

Eine Kombination der Einteilungen D, E, G und H kann eine möglichst vollständige Abgrenzung des zu untersuchenden Bremssystems gewährleisten.

Die Einteilung D beschreibt den Aufbau des Systems mit den vorhandenen Redundanzen sehr gut und übersichtlich. Allerdings sind die Funktionen, die das Bremssystem erfüllen muss, nicht zu erkennen. Ergänzend hierzu kann die Einteilung E verwendet werden, aus der ersichtlich ist, welche weiteren Komponenten bei den unterschiedlichen Bremssystemen benötigt werden. Mit Hilfe dieser beiden Einteilungen können verschiedene Standardfragestellungen, wie z. B. die Ermittlung der Systemzuverlässigkeit auf Komponentenbasis, beantwortet werden. Für eine zuverlässigkeitstechnische Untersuchung auf funktioneller Basis eignen sich die beiden Einteilungen jedoch nicht.

Bei der Einteilung G werden die Komplexität der unterschiedlichen Bremssysteme und deren Entwicklung betrachtet und in einer übersichtlichen Grafik dargestellt. Anhand der gewählten Struktur lässt sich die Darstellung für neue Bremssysteme entsprechend erweitern.

Aus der gewählten Struktur kann ein Bezug von Komponenten für die Funktionen des Bremssystems, wie ABS und ESP, ermittelt werden, so dass eine Degradierung der Funktionen in Verbindung mit der Einteilung E aus Ausfällen der Komponenten ermittelt werden kann.

Die Einteilung H eignet sich nicht nur zur Abgrenzung der Ausfallzustände, sondern ermöglicht auch unmittelbar eine erste Zuverlässigkeits- und Sicherheitsbetrachtung, z. B. mittels eines Markov-Modells. Hierbei sollte aber darauf geachtet werden, dass für „ähnliche“ Zustände so genannte Einhüllende gebildet werden, um eine Zustandsraumexplosion zu vermeiden. Diese führt im Normalfall dazu, dass der Analyseaufwand erheblich steigt, ohne relevante zusätzliche Sicherheitsabschätzungen zu erhalten. Beispielfhaft sei der Ausfallzustand „kein ABS“ genannt, der durch

mehrere Komponentenausfälle erreicht werden kann, dessen zusammengefasste Untersuchung für die Funktion ABS jedoch vollkommen ausreichend ist.

Eine Analyse mittels der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ist theoretisch möglich. Da das System aber sehr komplex ist, dürfte eine Gesamtsystem-FMEA sehr umfangreich werden und wenige zusätzliche Erkenntnisse liefern. Des Weiteren ist nur eine qualitative Betrachtung möglich, bei der nur Einzelfehler berücksichtigt werden, weshalb sich die Erstellung einer Gesamtsystem-FMEA aus analysetechnischer Sicht nicht anbietet. Es sollten daher quantitative Analysen angewandt werden, um möglichst objektive Vergleichskenngrößen zu erhalten.

Mit Hilfe der Fehlerbaumanalyse können sowohl qualitative als auch quantitative Bewertungen vorgenommen werden. Allerdings müssen für mehrere Fragestellungen hinsichtlich Sicherheit, Zuverlässigkeit und Teilsystemfunktionen eventuell unterschiedliche Fehlerbäume erstellt werden. Als Eingangsergebnisse für eine erste Analyse können die jeweiligen Ergebnisse aus den bisherigen Fehlerbäumen für die Komponenten verwendet werden.

Um die Analyse möglichst genau durchzuführen, können für Komponenten, die ein Verschleißverhalten aufweisen, keine konstanten Fehlerraten verwendet werden. Bei den gängigen Softwaretools ist die Eingabe einer zeitabhängigen Ausfallrate möglich, allerdings kann es sein, dass die Berechnungsdauer sehr groß wird oder eine Berechnung bei zu komplexen Systemen nicht mehr möglich ist.

Wie bereits in der Beschreibung zur Einteilung H erwähnt, können bei sehr komplexen Systemen auch stochastische Prozesse, wie z. B. Markov-Modelle, verwendet werden. Allerdings ist hierzu vor einer Analyse zu klären, ob sich die vereinfachende Annahme von homogenen Prozessen für eine gesicherte Analyse verwenden lässt. Die Abbildung durch Semi-Markov-Modelle dürfte daher je nach Systembetrachtung sinnvoller, aber auch aufwendiger sein.

3.3 Definition „Konventionelles Bremssystem“

Eine wichtige zu klärende Fragestellung bei der Abgrenzung eines konventionellen Bremssystems ist die Bezeichnung „Stand der Technik“. Ein einziges Bremssystem als Stand der Technik festzulegen erscheint nicht sinnvoll, da ein System ebenfalls dem Stand der Technik entsprechen kann, wenn es nicht alle Funktionen eines parallel auf dem Markt erhältlichen Systems aufweist. So ist das ABS Standard in allen Fahrzeugen, obwohl es nicht alle Funktionen des ESP aufweist. Das ESP hingegen verfügt auch über die Funktion ABS.

Auch die unterschiedlichen Auffassungen von Standard-Bremssystemen in verschiedenen Ländern dürfen nicht unberücksichtigt bleiben:

Während in Deutschland mittlerweile ESP nahezu für alle Neufahrzeuge verfügbar und bei einem Großteil der Fahrzeuge serienmäßig verbaut ist, wird noch in vielen Ländern (Frankreich, Italien, etc.) lediglich ein Bremssystem mit ABS verbaut. Für Europa haben sich die Fahrzeughersteller (Original Equipment Manufacturer OEM) allerdings darauf geeinigt, ABS-Bremssysteme serienmäßig zu verbauen.

Hierbei stellt sich die Frage nach einer Bewertungsgrundlage, also woran bei einem Bremssystem der Stand der Technik festgemacht werden kann. Hierzu gibt es exemplarische folgende Punkte zu bedenken:

- Erreichte Bremsleistungen
Problem: Zwei identische Fahrzeuge mit unterschiedlichen Bremssystemen, wie z.B. ABS und ESP, verzögern maximal bei einer festgesetzten Geschwindigkeit. Wenn eines der Fahrzeuge einen geringeren Bremsweg aufweist als das andere, gibt dieses dann nicht den „Stand der Technik“ (des Machbaren) wieder? Welcher Test dient als Grundlage (Hersteller, Automobilzeitschrift, ADAC, usw.)?
- Neueste Bremssystemversion
Problem: Wenn z. B. ein ABS 2 als Stand der Technik eingestuft wird, darf dann ein ABS 1 weiterhin verkauft werden?
- Verkaufszahlen
Annahme: Fahrzeuge werden in Deutschland zu 2/3 mit ABS und zu 1/3 mit ESP verkauft. Demnach ist das ABS-Bremssystem „Stand der Technik“. Das Ziel für 2012 ist jedoch eine 50/50-Verteilung.
- Kundenerwartung
Problem: Was erwartet der Endkunde von einem Bremssystem? Sind die Erwartungen definierbar?

Für einen aussagekräftigen Vergleich zwischen einem modernen Brake-by-Wire- und einem konventionellen Bremssystem sollten die von den beiden Systemen erfüllten Funktionen möglichst identisch sein! Da ESP diese Forderung besser erfüllt als ABS, wäre somit ein ESP die bessere Wahl. Allerdings ist der Verbreitungsgrad des ABS und dessen Einsatzzeit seit 1978 deutlich größer.

Untersucht werden hier daher ein ABS (ABS 2) und ein ESP (ESP 1). Der Aufbau der Systeme kann je nach Hersteller und Zulieferer variieren. In Kap 7.1 sind für die jeweiligen Systeme die zugrunde gelegten Komponenten mit ihrer Anzahl abgebildet.

Zur Betrachtung der Sicherheit ist es darüber hinaus sehr wichtig, alle Funktionen mit sicherheitstechnischem Bezug zur Analyse heranzuziehen. Auch Zusatzfunktionen, die den Nutzen der bestehenden Systeme vor allem im Bereich des Komforts erhöhen und als so genannte VAF (Value Added Functions) bezeichnet werden, können hierbei mit bewertet werden.

4 Datenbasis

Die Datenbasis zu den Systemuntersuchungen ist das Fundament einer jeden quantitativen Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse. Neben dem Modell, welches natürlich korrekt sein muss, ist die Genauigkeit der Untersuchung maßgeblich von den vorhandenen Daten abhängig. Die für Kfz-Systeme erhältlichen Daten zu Bremssystemausfällen lassen sich in drei große Gruppen unterteilen:

- Felddaten von Herstellern/Zulieferern,
- Daten aus gesetzlich vorgeschriebenen Fahrzeuguntersuchungen (TÜV, DEKRA, GTÜ, KBA) und
- Daten von unabhängigen Vereinen / Institutionen (ADAC, AvD).

Die Daten weiterer kleiner unabhängiger Vereine, deren Mitgliederanteil gegenüber ADAC und AvD sehr gering ist, wurden nicht angefragt.

Für die Zuverlässigkeitsprognose im Rahmen dieser Arbeit soll eine möglichst breite Datenbasis genutzt werden und in die Systemzuverlässigkeitsmodelle einfließen. Voraussetzung der Verwendbarkeit ist allerdings, dass alle ermittelten Daten eine identische Bezugsbasis haben, um Vergleiche zu ermöglichen. Die Daten der einzelnen Gruppen sind jedoch nicht einheitlich, so dass für jede Auswertung entweder ein neues Modell aufgestellt oder ein vorhandenes Modell angepasst werden muss.

Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Datengruppen werden im Folgenden dargestellt.

4.1 Daten der Kfz-Hersteller

Die Felddaten werden bei den Kfz-Herstellern unterschiedlich gut erfasst. Einige Unternehmen verfügen über eine sehr gut strukturierte Datenbank, in der die aufgezeichneten Daten hinterlegt sind, im Gegensatz zu anderen Unternehmen, wo die Daten zwar ebenfalls erfasst, jedoch nicht einheitlich oder an verschiedenen Stellen dokumentiert werden.

Diese Daten sind in der Regel sehr gut für zeitbasierte Zuverlässigkeitsprognosen nutzbar.

Den Herstellern liegen nahezu alle Daten von Beanstandungen vor, so dass sie theoretisch auch „geringe“ Fehler erfassen könnten, die sich direkt in der Werkstatt abstellen lassen, aber dennoch aufgetreten sind. Bei einigen Herstellern erfolgt die Erfassung mit allen relevanten Fahrzeugdaten, sobald das Fahrzeug in einer Vertragswerkstatt an ein Diagnosetestgerät angeschlossen wird. Üblich ist es hierbei, dass die Fehlerspeicher der Steuergeräte auf Einträge hin ausgelesen werden. Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Tatsache, dass auch Fahrzeuge außerhalb der Garanzzeit erfasst werden können, was aufgrund der enormen Datenmengen jedoch nicht durchgängig geschieht.

Darüber hinaus besteht in den Werkstätten die Möglichkeit, dass das Werkstattpersonal eigene Diagnosen durchführt und Fehlerbeschreibungen in die Datenbank eingibt. Bei der Erfassung durch

den Servicemitarbeiter kann aber bei den heutigen komplex vernetzten Fahrzeugarchitekturen nicht ausgeschlossen werden, dass Komponenten fälschlicherweise als defekt bewertet und in der Datenbank dokumentiert werden.

Die Daten innerhalb der Garantiezeit können als nahezu vollständig angesehen werden, da jeder Kunde bei auftretenden Fehlern innerhalb dieser Zeit zur Kostenvermeidung eine Vertragswerkstatt aufsuchen wird. Nach der Garantiezeit ist die Erfassung von Fehlern beim Hersteller meist unzureichend und nimmt mit zunehmendem Alter ab, da viele Fahrzeughalter zur Kostenminderung freie Werkstätten oder Werkstattketten, wie z. B. ATU, aufsuchen. Auch der Hersteller wird in der Regel kein Interesse daran haben, alle Fahrzeuge beim Werkstattaufenthalt zu erfassen, da dies die Datenmenge erheblich vergrößern und zu weiteren Kosten führen würde.

Um die Datenmenge weiter zu begrenzen, ist es darüber hinaus üblich, nur einen gewissen Teilmarkt (z. B. Deutschland, Europa) gezielt zu beobachten. Treten in diesem Teilmarkt, u. a. durch klimatische Einflüsse, besondere Fehlerbilder auf, so kann dies dazu führen, dass die erfassten Daten nicht repräsentativ für das Produkt in allen Märkten weltweit sind.

Für eine umfassende Systembewertung der auf dem Markt erhältlichen Produkte müssten von allen Herstellern zu allen Fahrzeugtypen entsprechende Daten analysiert werden. Dies ist aufgrund der Datenbeschaffung und der enormen Datenmengen nahezu unmöglich und durch die anschließend benötigte Zeit zur Auswertung nicht realisierbar.

Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile der Herstellerdaten tabellarisch gegenübergestellt (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Vor- und Nachteile der Daten der Kfz-Hersteller

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - sehr gute und vollständige Erfassung aller Fehler während der Garantiezeit - gut beherrschte Prozesse - wenig fehlerhafte Datensätze durch Auslesen der Fahrzeugdaten - möglichst viele Datensätze zu einer Komponente/ einem Fahrzeugtyp - sehr detaillierte Erfassung zum Fehler (Fahrzeugidentifikationsnummer FIN, km-Stand, Datum des Ausfalls, usw.) - Systemdaten (Umgebungsparameter, Einbaulage, etc.) bekannt - Vergleich über mehrere Zulieferer möglich - Zulassungsmengen der Fahrzeugtypen bekannt 	<ul style="list-style-type: none"> - Erfassung der Fahrzeuge mit zunehmendem Alter schlechter - Daten nur eines Herstellers erfasst → kein Gesamtüberblick möglich - evtl. nur Beobachtung eines Teilmarktes (z. B. nur Deutschland) → Daten nicht zwingend repräsentativ - evtl. Fehleingaben durch Servicepersonal

Leider war keiner der angeschriebenen Fahrzeughersteller bereit, Daten für diese Arbeit zur Verfügung zu stellen. Dementsprechend liegen keine Referenzdaten der Hersteller vor.

4.2 Daten der Zulieferer

Bei vielen Zulieferern gibt es sehr gut strukturierte Datenbanken. Innerhalb der Garantiezeit der gefertigten Produkte ist auch hier die Erfassung relativ vollständig, da der Hersteller die Kosten oder direkt die beanstandeten Bauteile an den Zulieferer weitergibt und somit ein Eigeninteresse an einer vollständigen Erfassung auf Seiten der Zulieferer besteht.

Der Ablauf bei der Bearbeitung von Garantiefällen sieht meist vor, dass eine vereinbarte Teilmenge an defekten Geräten an den Zulieferer zurückgeschickt wird, damit dieser die Defekte genauer untersuchen kann. Problematisch hierbei ist, dass der Zulieferer im Regelfall immer nur Geräte eines so genannten Teilmarktes erhält, der häufig nicht genau abgegrenzt ist. So kann evtl. vertraglich geregelt sein, dass nur jedes vierte defekte Bauteil an den Zulieferer gesendet wird. Woher diese Teile dann stammen und ob sie repräsentativ für alle im Feld befindlichen Bauteile sind, kann dann evtl. nicht mit Sicherheit geklärt werden.

Der Teilmarktfaktor muss bei den Daten zwingend ermittelt werden, da z. B. ein Teilmarktfaktor X bedeutet, dass für ein defektes Steuergerät vom Zulieferer an den Hersteller der Preis für X defekte Geräte bezahlt werden muss.

Die Analysen durch den Zulieferer der als defekt eingeschickten Bauteile sind jedoch sehr verlässlich, da Fachleute die Komponenten untersuchen und bewerten. Eine mögliche Zuordnung der Fehler ist folgende:

- Kfz-Zulieferer ist Verursacher (Z-Fehler):
Der Defekt ist durch Fehler beim Zulieferer aufgetreten. Dies ist u. a. dann der Fall, wenn es sich um einen generellen Konstruktionsfehler oder einen partiell auftretenden Fehler durch Schwankungen in der Produktion handelt.
- Kfz-Hersteller ist Verursacher (H-Fehler):
Diese Fehler treten häufig dann auf, wenn es Prozessfehler innerhalb der Produktion beim Hersteller gibt. Dies ist z. B. der Fall, wenn Einbauvorschriften nicht beachtet werden. Beispielhaft sei hier ein zu großes Anzugsmoment bei der Befestigung eines Sensors genannt, durch den das Gehäuse Risse bekommen hat und durch die dann evtl. Wasser eindringt. Aus Sicht des Zulieferers werden diese Fehler häufig als Kundenfehler bezeichnet.
- Fehler nicht feststellbar (i.O.).
Diese Fehler haben sehr unterschiedliche Gründe. So kann es vorkommen, dass die Spezifikationen eingehalten werden, diese aber für das Fahrzeug nicht ausreichend sind. Auch Softwarefehler sind möglich, die häufig im Labor nicht reproduziert werden können. Weiterhin betrifft diese Einteilung häufig intakte Komponenten, die ausgebaut werden, weil die Diagnose diese fälschlicherweise als defekt ermittelt hat.
Weitere Bezeichnungen für Fehler dieser Art sind „no trouble found (ntf)“, „trouble not found (tnf)“, „no fault found (nff)“ oder „technisch in Ordnung (tiO)“.

Die vorstehende Einteilung der Fehler ist für den Zulieferer sehr wichtig, da er im Regelfall nur für die Fehler aufkommen muss, die er selbst verschuldet hat (Z-Fehler).

Nachfolgende Tabelle 4-2 zeigt beispielhaft die Anzahl der jeweiligen Fehlerzuordnungen eines ausgewählten ABS-Steuergerätes.

Tabelle 4-2: Fehlerzuordnungen gemäß Verursacher für ein ABS-Steuergerät

Steuergerät ABS	Z-Fehler	H-Fehler	i.O.	Gesamt
Anzahl	634	219	881	1.734
Anteil	36,6 %	12,6 %	50,8 %	100 %

Von den 1.734 als fehlerhaft eingeschickten Geräten haben nur 634 Geräte einen Defekt, für den der Zulieferer verantwortlich ist. Das bedeutet, dass 63,4 % Prozent der Geräte nicht durch den Zulieferer ersetzt werden müssen. Beträgt der Preis für ein defektes Steuergerät inklusive Produktion, Versand, usw. beispielsweise 300 €, so belaufen sich die Kosten für den Zulieferer auf 190.200 €. Wird ein vereinbarter Teilmarktfaktor (z B. *TMF* = 5) berücksichtigt, so erhöhen sich die anfallenden Garantiekosten auf ein Vielfaches (951.000 €). Würden alle Geräte einfach als defekt anerkannt und bezahlt, so müsste der Zulieferer schon ca. 2,6 Mio. € aufbringen.

Da ein Zulieferer in der Regel mehrere Produkte herstellt, könnte ein vereinfachtes Vorgehen schnell existenzbedrohende Ausmaße annehmen. Eine gründliche Untersuchung und eine zuverlässige Bewertung der Komponentenausfälle sind daher unerlässlich.

Für diese Arbeit sind von Zulieferern zu den verschiedenen Komponenten insgesamt mehr als 50.000 Datensätze zu 1.684 Bauteilnummern überlassen worden. Alle Datensätze wurden direkt bei den Zulieferern strukturiert erfasst und sind somit äußerst verlässlich. D. h. diese äußerst umfangreiche und vollständige Datenbasis eignet sich besonders gut für abgesicherte Analysen.

Dennoch gibt es in der Datenbasis Probleme hinsichtlich der Qualität. Da die Fahrzeugdaten meist eigenhändig beim Zulieferer eingetragen werden, kann es hierbei zu vielen Fehlern kommen. Einige sehr häufig beobachtete Fehler seien hier exemplarisch genannt:

- falscher Kilometerstand
Beispiel: Die Eingabe wird in Tkm gefordert aber in km eingegeben. Der wahre Kilometerstand beträgt 31.768 km. Eingetragen werden müsste der Wert 32 Tkm. Es werden aber 31.768 Tkm eingetragen, was bei der Auswertung einer Fahrleistung von 31.768.000 km entspricht.
- falsche Datumsangabe
Beispiel: Eingeben werden soll das Datum 13.07.2007 in der Form JJJMMTT, also 20070713. Häufig wird das Datum falsch eingegeben z. B. als 13072007, was dann in der Auswertung zu nicht sinnvollen Ergebnissen führt.
- vertauschte Datumsangaben
Beispiel: Zulassungs- und Ausfalldatum sind vertauscht. Innerhalb der Analyse müssen diese Daten herausgefiltert werden, da nicht exakt nachvollzogen werden kann, ob es sich um vertauschte oder falsch eingetragene Datumsangaben handelt.

Es kann bei den erfassten Daten, je nach Qualität der Erfassungsprozesse, durchaus vorkommen, dass bis zu 20 % der eingetragenen Daten infolge von Fehleinträgen nicht verwertbar sind. Nachfolgend sind die wichtigsten Vor- und Nachteile der Zuliefererdaten tabellarisch (Tabelle 4-3) aufgeführt.

Tabelle 4-3: Vor- und Nachteile der Daten der Zulieferer

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - sehr gute und vollständige Erfassung aller Fehler während der Garantiezeit - gut beherrschte Prozesse - sehr genaue Feststellung des Fehlers möglich - sehr detaillierte Erfassung zum Fehler (FIN, km-Stand, Datum des Ausfalls, usw.) - Systemdaten (Umgebungsparameter, Einbaulage etc.) bekannt - Produktvergleich meist über verschiedene Hersteller und Kfz-Typen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - teilweise viele unbrauchbare Datensätze durch händische Eingabe - evtl. nur Beobachtung eines Teilmarktes → Daten nicht zwingend repräsentativ - nur Garantiedaten verfügbar - großer Zeitverzug zwischen Auftreten und Analyse des Fehlers möglich

4.3 Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes

Die Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA), welche ausgewertet werden, sind allgemein verfügbare Daten für die Jahre 2001 bis 2006. Grundlage dieser Daten sind die Meldungen aller technischen Prüforganisationen, die Hauptuntersuchungen durchführen. Für die Analysen werden ausschließlich die Daten für Pkw verwendet. Hierzu liegen dem KBA jährlich zusammengefasste Daten aus knapp 18 Mio. durchgeführten Hauptuntersuchungen vor, bei denen zwischen vier und fünf Mio. Bremsenmängel erfasst werden.

Da als Untersuchungsgrundlage nur die Daten für Bremssysteme ausgewertet werden, wird im weiteren Verlauf der Einfachheit halber nur von Mängeln und nicht von Bremssystemmängeln gesprochen.

Die Haupteinteilung der Daten für alle Systeme erfolgt in vier Mängelklassen:

- ohne Mängel,
- geringfügige Mängel,
- erhebliche Mängel,
- verkehrsunsichere Mängel.

Darüber hinaus werden die Daten in die folgenden Altersklassen (Tabelle 4-4) unterteilt:

Tabelle 4-4: Einteilung der Altersklassen der Fahrzeuge nach KBA

Alterklasse	Zeitintervall
1	< 3 Jahre,
2	3 bis 5 Jahre
3	5 bis 7 Jahre
4	7 bis 9 Jahre
5	> 9 Jahre

Eine detaillierte Untersuchung einzelner Komponenten ist mit den KBA-Daten nicht möglich, da hier nur Zusammenfassungen für definierte Systeme mit einer Beurteilung der Mängelschwere vorliegen. Der Datenumfang ist theoretisch sehr groß, da von allen technischen Prüforganisationen die Daten zusammengetragen und ausgewertet werden. Allerdings liegen die detailliert dokumentierten Mängel nur den einzelnen Prüforganisationen vor (siehe Kap. 4.4).

Die KBA-Daten, deren Vor- und Nachteile in der Tabelle 4-5 aufgezeigt sind, eignen sich dennoch dafür, einen groben zeitlichen Überblick über das Ausfallverhalten des Systems Bremse zu bekommen. Wichtig ist hierbei, dass es sich bei den Auswertungen nur um Mittelwerte über alle Fahrzeugklassen handeln kann, die eine große Streuung aufweisen.

Tabelle 4-5: Vor- und Nachteile der Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - vollständiger Überblick über Gesamtmängel der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge - öffentlich zugänglich - kostenfrei - Grobabschätzung Gesamtsystem Bremse möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - sehr grobe Einteilungen - Detailanalysen nicht möglich - kein Zugriff auf die Basisdaten der Prüforganisationen - Zusammenstellung nur bestehend aus absoluten Zahlen - Fehlerkodierung nur nach der vorgegebenen Mängeleinteilung (ohne, geringe, erhebliche, verkehrsunsichere Mängel) möglich

4.4 Daten von Prüforganisationen

Die Daten aus den gesetzlich vorgeschriebenen Hauptuntersuchungen, welche bei den technischen Prüforganisationen durchgeführt und erfasst werden, bieten mit durchschnittlich 18 Mio. untersuchten Pkw pro Jahr einen weiteren großen Datenbestand, der für Analysen des Bremssystems herangezogen werden sollte. Diese Datenbasis teilt sich auf die einzelnen Prüforganisationen auf, so dass nicht alle Daten gebündelt vorliegen.

Eine Datenauswahl ist von der Gesellschaft für Technische Überwachung mbH (GTÜ, ca. 4,4 Mio. Datensätze), mit zeitlicher Beschränkung auf den Prüfzeitraum vom 01.04.2003 bis 31.03.2008 und nur für Fehler an Bremssystemkomponenten für diese Arbeit zur Verfügung gestellt worden.

Die Erfassung bestimmter Basisdaten und somit ihre Grundqualität ist bei den Prüforganisationen einheitlich geregelt und sehr detailliert. Allerdings gibt es doch einige zu berücksichtigende Unterschiede. Nicht alle Prüforganisationen decken den gesamtdeutschen Markt ab (u. a. TÜV Nord, TÜV Süd), so dass die Datenbasis für Deutschland nicht homogen ist. Obwohl die Erfassung der Basisdaten einheitlich geregelt ist, erfassen einige Prüforganisationen weitere interessante Informationen, wie z. B. eine eigene Mängelbewertung. Die Auswertung dieser Informationen kann wichtige weitere Erkenntnisse liefern, ist aber nicht auf alle Prüforganisationen übertragbar.

Der größte Unterschied zu den Daten der Hersteller oder Zulieferer besteht darin, dass Daten über die gesamte Lebensdauer von Fahrzeugen vorliegen. Dieses bietet sehr viele Zusatzinformationen, die sich zur Abbildung des zeitabhängigen Lebensdauerverhaltens nutzen lassen. So sind z. B. Mängel an der Basisbremse (Bremscheibe, -sattel, -belag, -schläuche, usw.) bei jungen Fahrzeugen sehr selten, während diese für ältere Fahrzeuge vermehrt festgestellt werden. Darüber hinaus werden auch geringe Mängel durch sachkundiges Personal erkannt, die dem Fahrzeugführer evtl. nicht aufgefallen sind.

Ein sehr starker Nachteil speziell bei den Daten für Bremssysteme liegt jedoch in der Tatsache, dass direkt ersichtliche oder schwerwiegende Mängel meist vor der Hauptuntersuchung behoben werden.

Eine Zusammenstellung der Vor- und Nachteile dieser Daten ist in Tabelle 4-6 gegeben.

Tabelle 4-6: Vor- und Nachteile der Daten von Prüforganisationen

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - sehr gute und vollständige Erfassung bei den Hauptuntersuchungen - kompetentes Personal - deutschlandweite Erfassung möglich (GTÜ, DEKRA, usw.) - Fehlercodierung mit Einschätzung der Fehler schwere, keine Freitexteingabe - sehr detaillierte Erfassung zum Fehler (FIN, km-Stand, Datum der Analyse, etc.) - Vergleich theoretisch über alle Fahrzeugtypen möglich (nur beschränkt durch die Zulassungsmenge des Typs) - Fahrzeuge wiederkehrend in der Erfassung und kein Beschränkung beim Fahrzeugalter (Hauptuntersuchung alle zwei Jahre) → zeitliche Aus- 	<ul style="list-style-type: none"> - Daten, vor allem für das Bremssystem, nicht zwingend aussagekräftig, da häufig Behebung schwerwiegender oder direkt ersichtlicher Mängel vor der Hauptuntersuchung → Korrekturfaktoren? - bei einigen Organisationen keine deutschlandweite Erfassung (z. B. TÜV Nord) - Verteilung der Daten der Hauptuntersuchungen auf viele Organisationen → Korrekturfaktoren notwendig (z. B. zur Bezugsmenge), wenn nur Daten einer Organisation vorhanden sind

wertungen ohne Zensierungen - sehr umfangreiche Datenbasis für Bremsleitungen, Radbremse und Bremsschläuche - Fahrleistungsprognosen gestuft nach Zulassungsjahren bestimmbar - herstellerunabhängige Daten - Erfassung leichter Mängel, die z. B. nicht zu einer Reklamation führen würden	
---	--

4.5 Daten des ADAC

Der Allgemeine Deutsche Automobilclub (ADAC) ist mit ca. 15,8 Mio. Mitgliedern (Stand: Ende 2006) größter europäischer Automobilclub und verfügt ebenfalls über eine sehr umfangreiche Datenbank, in der alle „Pannen“ erfasst sind, zu denen der ADAC gerufen wurde. Die Erfassung beinhaltet alle fahrzeugrelevanten Daten und erlaubt nahezu keine Freitexteingabe. Dennoch ist die Mängelbewertung stark abhängig von der Bewertung des jeweiligen ADAC-Pannenhelfers, welcher den Fehler vor Ort einschätzt. Muss das Fahrzeug abgeschleppt werden und stellt sich anschließend die vermerkte Fehlerursache als nicht richtig heraus, so wird keine Korrektur bei der Fehlererfassung vorgenommen.

Die erfassten Bremsystemfehler sind im Allgemeinen als schwerwiegend einzustufen und betreffen meist mechanische oder hydraulische Komponenten. Elektronische Fehler, wie z. B. Steuergerätefehler, sind nur vereinzelt erfasst und nicht detailliert unter der Fehlerbeschreibung „ABS“ abgelegt. Einige Fehler am Bremsystem, wie ein ausgefallener DF, der eine Ansteuerung der ABS-Signallampe bewirkt, werden vom Fahrer häufig als nicht schwerwiegend eingestuft, so dass dieser seine Fahrt bis zum Ziel fortsetzt und anschließend eine Werkstatt aufsucht. Daher ist auch hier anzunehmen, dass die erfassten Fehler nicht repräsentativ für das gesamte Bremsystem sind.

Darüber hinaus sind „nur“ ca. 15,8 Mio. der am 01.01.2007 registrierten 46.569.657 Fahrzeughalter Mitglied im ADAC, so dass der Personenkreis und damit auch die erfassten Fahrzeuge nicht vollständig sind.

Nach Einschätzung eines ADAC-Mitarbeiters sind Personen mit neueren Fahrzeugen sehr selten und Personen mit alten Fahrzeugen sehr stark bei den Pannen vertreten. Zu Pannen von neuen Fahrzeugen wird der ADAC darüber hinaus nur selten gerufen, da hier häufig noch die Mobilitätsgarantie der Hersteller greift und auch in Anspruch genommen wird.

Die vom ADAC überlassene Datenbasis enthält Datensätze aus dem gesamten Bundesgebiet, mit denen auch hier ein deutschlandweiter Überblick möglich ist. Erfasst sind die Fehler an Bremsystemen für die Jahre 2000 bis 2006, zu denen der ADAC als Pannenhelfer gerufen wurde. In der nachfolgenden Tabelle 4-7 sind die Vor- und Nachteile der ADAC-Daten gegenübergestellt.

Tabelle 4-7: Vor- und Nachteile der Daten des ADAC

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - deutschlandweite Erfassung für viele Pannen - Fehlercodierung ohne Freitexteingabe - sehr detaillierte Erfassung zum Fehler (FIN, km-Stand, Datum der Analyse, etc.) - Vergleich theoretisch über alle Fahrzeugtypen möglich (nur beschränkt durch die Zulassungsmenge des Typs) - Fahrzeuge unabhängig vom Fahrzeugalter → zeitliche Auswertungen ohne Zensierungen möglich - Fahrleistungsprognosen gestuft nach Zulassungsjahren bestimmbar - herstellerunabhängige Daten 	<ul style="list-style-type: none"> - Daten, vor allem für das Bremssystem, nicht zwingend aussagekräftig, da z. B. bei leuchtender ABS-Lampe häufig bis „zu Hause“ weitergefahren wird → Korrekturfaktoren? - überwiegend schwere Mängel am Bremssystem, wie ein blockiertes Rad, führen zu „Liegenbleibern“ und damit zur Erfassung - Nicht alle Autohalter sind Mitglied im ADAC (Ende 2006: 15.758.661 Mitglieder im ADAC; 55.511.374 gemeldete Kraftfahrzeuge; 46.569.657 gemeldete Fahrzeughalter) - häufig Fahrer älterer Fahrzeuge im ADAC, selten Firmenwagen → Fahrzeuge innerhalb der Garantiezeit nahezu nicht vorhanden

5 Auswertemodelle

Die Auswertung der Daten erfolgt mit verschiedenen Ansätzen, die an die jeweilige Datenbasis angepasst sind.

5.1 Zuverlässigkeitsprognosemodell

Das Zuverlässigkeitsprognosemodell nach /Pau 98/, welches im Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik der Bergischen Universität Wuppertal weiterentwickelt wurde (siehe /Mey 03/), kann bei nahezu allen Hersteller- und Zuliefererdaten angewendet werden. Bei diesen Datenbasen aus der Automobilindustrie besteht in der Regel das Problem, dass nur Ausfälle erfasst werden, die während der Garantiezeit auftreten und bei denen keine Betriebsdauer hinterlegt ist. Mit Hilfe geeigneter Zuverlässigkeitsprognosen können dennoch Aussagen über die geplante Lebensdauer der Komponenten für einen großen Zeitraum, u. U. bis zu 10 Jahren, getroffen werden.

Grundlage für die Untersuchung bilden alle innerhalb der Garantiezeit erfassten Felddausfälle. Die Daten zu den defekten Komponenten sollten mindestens die folgenden Informationen enthalten:

- Zulassungsmonat,
- Ausfallmonat,
- gefahrene Strecke bis zum Ausfall.

Die verwendeten Ausfalldaten können vollständige oder so genannte zeitnahe Garantiedaten sein. Zeitnahe Garantiedaten liegen dann vor, wenn die Garantiezeiten aller zugelassenen Komponenten noch nicht verstrichen sind und somit die Ausfalldaten als unvollständig angesehen werden müssen. Dies ist immer dann der Fall, wenn die Prognosen zu einem Zeitpunkt erstellt werden, bei dem die Serienproduktion noch läuft oder erst kürzlich eingestellt wurde. Damit diese Daten dennoch verwendet werden können, gilt es, den Zulassungs- und den Meldeverzug zu berücksichtigen, mit deren Hilfe sowohl die Anzahl der gemeldeten Ausfälle als auch die Zulassungen korrigiert werden. Hierzu werden dann ergänzend das Zulassungsdatum der Komponente/Fahrzeug und das Erfassungsdatum des Ausfalls in der Garantiedatenbank benötigt.

Weitere wichtige Faktoren für die Analyse sind der Teilmarktfaktor (TMF) und die Rücklaufquote (RQ), die dazu genutzt werden, die Größe der Grundgesamtheit, auf welche die jeweilige Analyse bezogen wird, zu korrigieren

Der Teilmarktfaktor ist dann von Bedeutung, wenn defekte Komponenten z. B. nur aus einem Land eingeschickt werden, das Fahrzeug mit dieser Komponente aber auch in anderen Ländern vertrieben wird. Dieses Vorgehen ist in der Automobilindustrie etabliert, da es hilft, Kosten beim Ausbau, Versand, und der Analyse der defekten Komponenten zu verringern.

Ein Teilmarktfaktor $TMF=10$ bedeutet, dass nur 10 % des gesamten Marktes beobachtet werden und somit ca. jede zehnte defekte Komponente zur Untersuchung eingeschickt wird. Dies bedeutet aber auch, dass 10-mal mehr Fehler aufgetreten sind, als die, welche der Zulieferer oder der Hersteller untersucht haben. Der Teilmarktfaktor TMF wird daher dazu genutzt, die Grundgesamtheit n_{ges} ,

auf die sich die Analyse bezieht, zu korrigieren, um den Anteil der nicht eingeschickten Komponenten zu berücksichtigen. Diese mit dem Korrekturfaktor K_{TMF} aus der ursprünglichen Grundgesamtheit ermittelte korrigierte Grundgesamtheit $n_{korr, TMF}$ berechnet sich dann zu:

$$n_{korr, TMF} = n_{ges} \cdot K_{TMF}, \quad (5-1)$$

mit

$$K_{TMF} = \frac{1}{TMF}. \quad (5-2)$$

Auch die Rücklaufquote variiert stark. So wird häufig zwischen Fahrzeughersteller und Zulieferer abgesprochen, dass nur ein gewisser Anteil der Geräte eingeschickt wird. Angenommen die Rücklaufquote beträgt $RQ = 20\% = 0,20$, so muss auch die Grundgesamtheit bzw. die schon mit dem Teilmarktfaktor korrigierte Grundgesamtheit um diesen Faktor korrigiert werden, da ansonsten die untersuchten Geräte zu positiv bewertet werden. Die mit dem Teilmarktfaktor und der Rücklaufquote korrigierte Grundgesamtheit $n_{korr, TMF, RQ}$ ist dann:

$$n_{korr, TMF, RQ} = n_{ges} \cdot K_{TMF} \cdot RQ. \quad (5-3)$$

Die beiden genannten Korrekturen sind vor der eigentlichen Analyse durchzuführen, um eine realitätsnahe Bewertung der Komponenten zu ermöglichen.

Ein weiteres Problem der meisten Datenbasen ist, dass die reale Belastungsgröße nicht erfasst wird, welche großen Einfluss auf die Ausfälle der Bauteile hat. Im Automobilsektor wäre diese die Betriebsdauer, die im Regelfall ebenfalls nicht hinterlegt ist.

Die aufgetretenen Belastungen können bei Fahrzeugen jedoch sehr gut durch die gefahrene Strecke beschrieben werden, so dass diese als geeignete Ersatzbezugsgröße herangezogen wird.

Mit Hilfe der gefahrenen Kilometer bis zum Ausfall und dem Wissen über die dazu benötigte Zeit im Feld können Prognosen mit dem Zuverlässigkeitsmodell durchgeführt werden. Der generelle Ablauf dieser Zuverlässigkeitsprognose, die in nahezu allen Bereichen der Automobilindustrie angewendet werden kann, lässt sich durch nachfolgendes Bild 5-1 verdeutlichen.

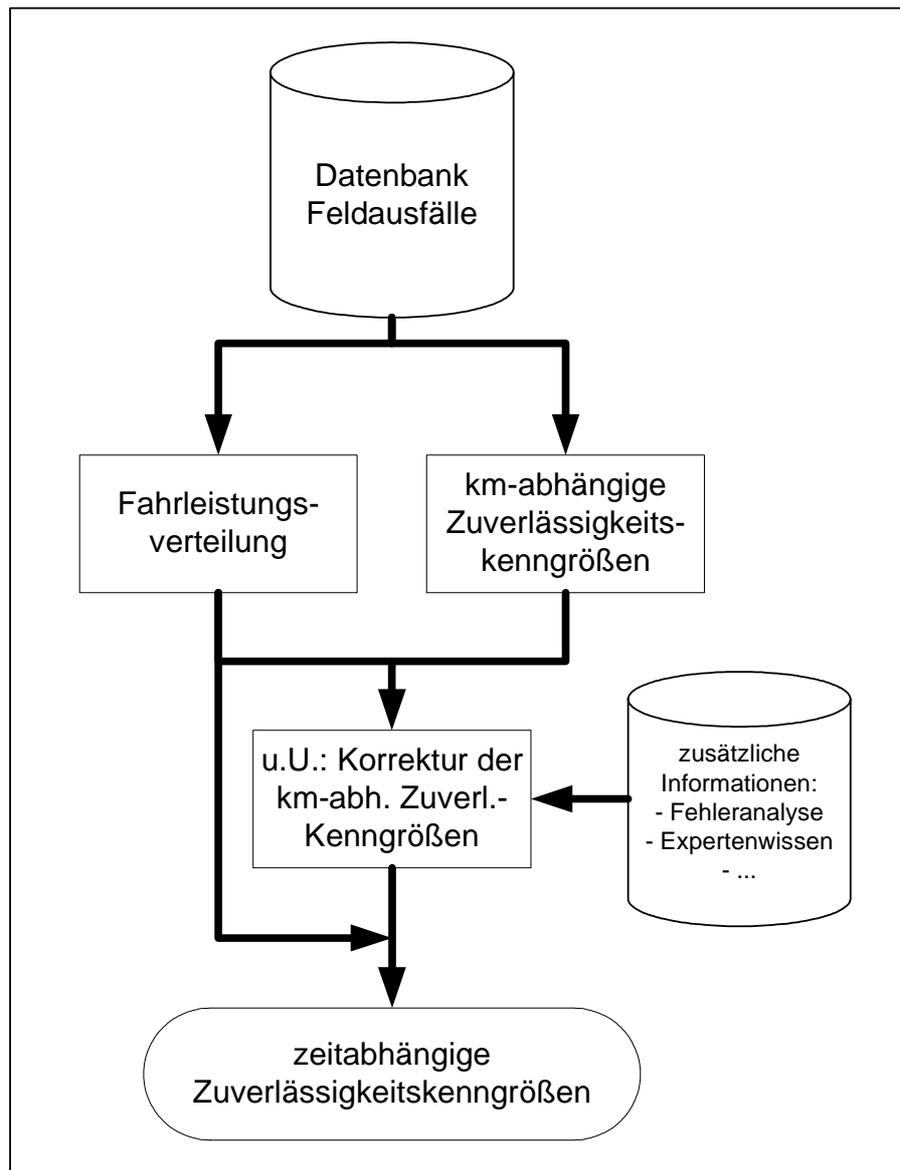


Bild 5-1: Ablaufdiagramm des Zuverlässigkeitsprognosemodells

Die eigentliche Zuverlässigkeitsprognose besteht dabei im Wesentlichen aus drei Schritten, die im Folgenden zur besseren Verständlichkeit anhand eines Beispiels erläutert wird. Für detaillierte Ausführungen sei auch hier auf die entsprechende Literatur (/Mey 03/, /Pau 98/, etc.) verwiesen. Darüber hinaus sind die Notationen zur mathematischen Beschreibungen innerhalb des Modells von /Pau 98/ und /Mey 03/ übernommen. Die Berechnungen des Prognosemodells wie auch die gezeigten Graphiken wurden mit der Software Mathematica 6.0 der Firma Wolfram erzeugt, da Teile des Modells nur numerisch gelöst werden können.

Schritt 1:

Aus den Garantiedaten wird für die betrachtete Komponente die Fahrleistungsverteilung für die Garantiezeit bestimmt. Es hat sich gezeigt, dass die Fahrleistungsverteilung für Pkw sehr gut durch die logarithmische Normalverteilung beschrieben werden kann. Die Fahrleistung eines Fahrzeugs in der Garantiezeit berechnet sich unter Annahme eines konstanten Fahrverhaltens zu:

$$S_t = S_g \cdot \frac{t}{g}, \quad (5-4)$$

mit

- S_g : Zufallsvariable der Fahrleistung für die Garantiezeit,
- S_t : Zufallsvariable der Fahrleistung für die Betriebsdauer bis zum Ausfall,
- g : Garantiedauer,
- t : Betriebsdauer bis zum Ausfall.

Da es sich hier um eine einfache lineare Transformation handelt, berechnet sich die Verteilungsfunktion der Fahrleistung aus:

$$L_t(s) = L_g\left(\frac{g}{t} \cdot s\right). \quad (5-5)$$

mit

- L_t : Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen S_t ,
- L_g : Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen S_g .

Die theoretische Fahrleistungsverteilung (logarithmische Normalverteilung) hat folgende Form:

$$L_t(s) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^s \frac{1}{\tau} e^{-\frac{(\ln \tau - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} d\tau = \Phi\left(\frac{\ln s - \mu}{\sigma}\right) \quad \forall s > 0, \mu \in \mathfrak{R}, \sigma > 0. \quad (5-6)$$

Zur Schätzung der Verteilungsparameter μ und σ der Fahrleistungsverteilung aus den empirischen Daten eignet sich die Maximum-Likelihood-Methode.

Mit Hilfe dieser Parameter kann der Erwartungswert, der für Vergleichszwecke innerhalb der Fahrzeugklassen sehr gut eignet ist, berechnet werden zu:

$$E(T) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}. \quad (5-7)$$

Im folgenden Bild 5-2 ist die einjährige logarithmisch normalverteilte Fahrleistung $L_1(s)$ für den Beispieldatensatz abgebildet.

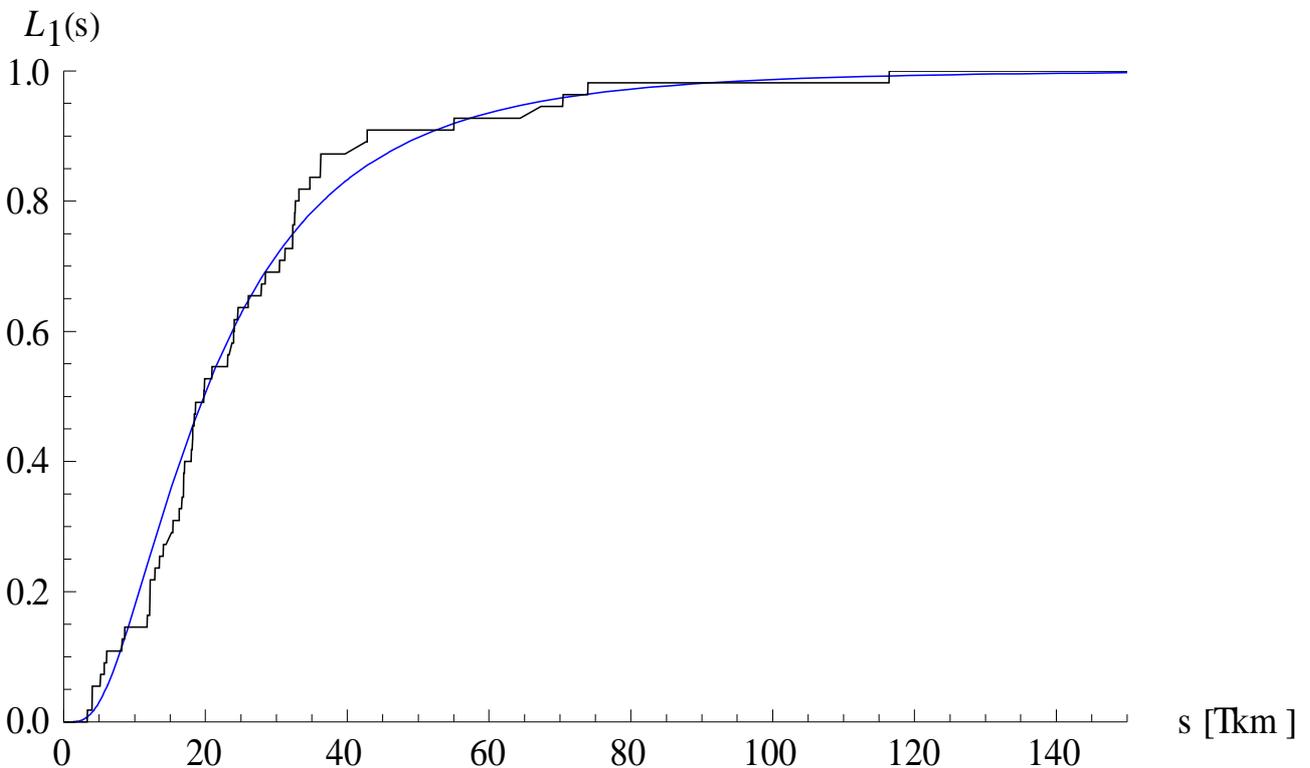


Bild 5-2: Fahrleistungsverteilung (logarithmisch normalverteilt)

Schritt 2:

Mit den vorhandenen Daten werden die km-abhängigen Zuverlässigkeitskenngrößen bestimmt. Eine direkte zeitliche Bewertung erfolgt nicht, da die gefahrene Strecke mehr Aufschluss über die tatsächliche Belastung und Einsatzdauer der Komponenten gibt als die Zeitspanne zwischen Zulassungs- und Ausfallmonat. Zusätzlich kann die Strecke s im Gegensatz zur Zeit t als unbeschränkt angesehen werden. Sie ist deshalb die besser geeignete Bezugsgröße für Zuverlässigkeitsprognosen. Unter Verwendung der Fahrleistungsverteilung können bei Bedarf, z. B. bei zensierten oder gestutzten Daten, die vorhandenen Datensätze korrigiert und die so genannten Anwarter bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Anwarter wird dann die korrigierte km-abhängige Lebensdauerverteilung bestimmt, welche das zu erwartende Ausfallverhalten im Feld, wenn alle Fahrzeuge die jeweilige Strecke absolviert haben, beschreibt.

Die Anwärter bis zur Fahrstrecke s berechnen sich dann aus:

$$n_k(s) = \frac{n_g(s)}{1 - L_g(s)}, \quad (5-8)$$

mit

- $n_k(s)$: korrigierte Gesamtanzahl an Ausfällen bei der Fahrstrecke s ,
- $n_g(s)$: Anzahl an Ausfällen bei der Fahrstrecke s innerhalb der Garantiezeit,
- $L_g(s)$: Fahrleistungsverteilung für die Garantiezeit.

Die empirische korrigierte Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet sich dann aus

$$\tilde{F}_k(s) = \frac{n_k(s)}{n_0} = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{\zeta \leq s} n_k(\zeta) = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{\zeta \leq s} \frac{n_g(\zeta)}{1 - L_g(\zeta)}. \quad (5-9)$$

Die Ermittlung der theoretischen km-abhängigen Verteilungsfunktion erfolgt durch die Methode der kleinsten Quadrate. In der Regel lässt sich das Ausfallverhalten sehr gut durch eine Weibull-Verteilung abbilden. Die Ausfallwahrscheinlichkeit für die Weibull-Verteilung mit den Parametern $\alpha > 0$ und $\beta > 0$ berechnet sich aus:

$$F(t) = 1 - e^{-\alpha \cdot t^\beta} \quad \forall t > 0. \quad (5-10)$$

Ergänzend wurde hier die Weibull-Verteilung um eine Teilmenge w ergänzt zu:

$$F(t) = 1 - w \left(1 - e^{-\alpha \cdot t^\beta} \right). \quad (5-11)$$

Diese Teilmenge kann für bestimmte Untersuchungen notwendig sein, wenn z. B. nur ein gewisser Anteil der Komponenten von dem Fehler betroffen ist. Solange es aber möglich ist, sollte die Teilmenge mit $w=1$ genutzt werden, um die Ausfallwahrscheinlichkeit nicht zu begrenzen.

Im folgenden Bild 5-3 sind die km-abhängigen Ausfallwahrscheinlichkeiten abgebildet.

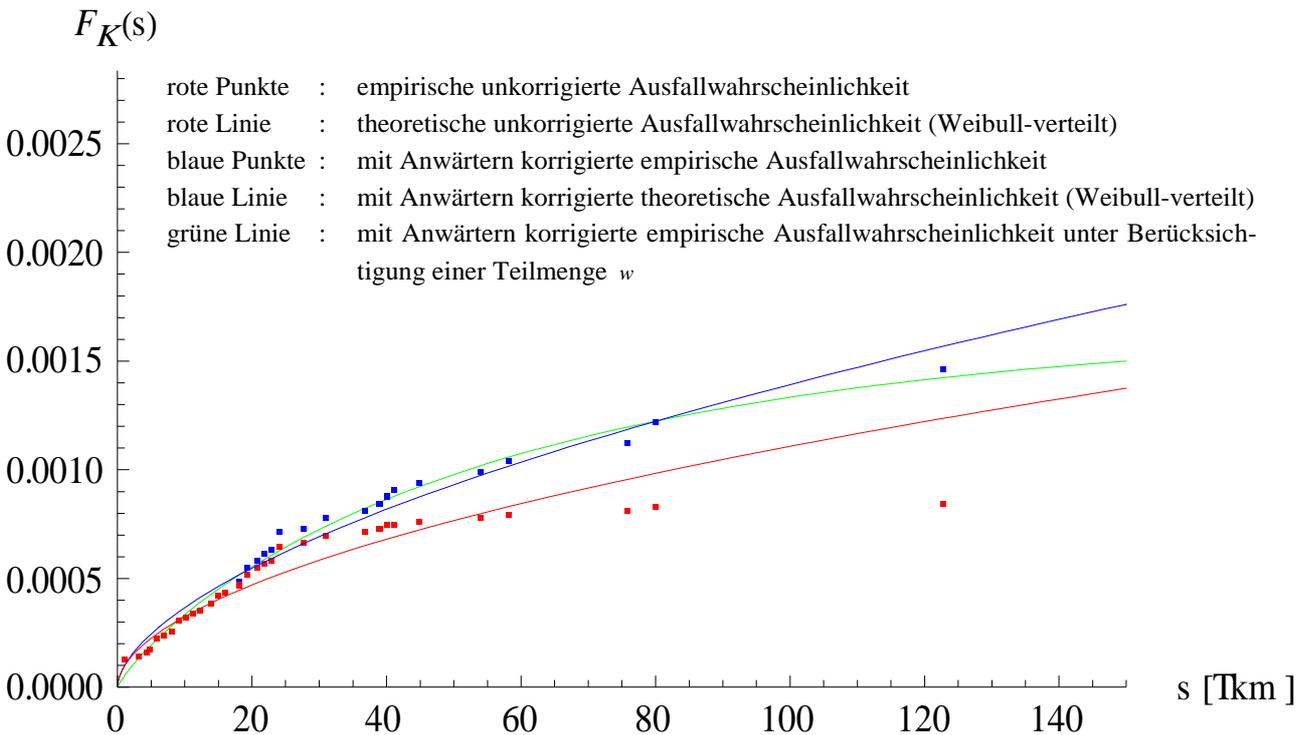


Bild 5-3: Km-abhängige Ausfallwahrscheinlichkeit (unkorrigiert / korrigiert)

Schritt 3:

Da es in der Automobilindustrie üblich ist, Lebensdauerverteilungen sowohl in Abhängigkeit der gefahrenen Strecke als auch der Kalenderzeit abzubilden, wird mit der gewonnenen korrigierten km-abhängigen Lebensdauerverteilung und der Fahrleistungsverteilung die zeitabhängige Lebensdauerverteilung ermittelt. Es ist dann:

$$F(t) = \int_0^{\infty} f_k(s) \cdot \left(1 - L_g \left(\frac{s \cdot g}{t} \right) \right) ds, \quad (5-12)$$

mit:

- $F(t)$: zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit,
 $f_k(s)$: Dichte der korrigierten zeitabhängigen Ausfallwahrscheinlichkeit.

Die vollständige Herleitung zu diesem Ansatz ist in /Pau 98/ gegeben.

Da sich die Gleichung (5-12) nur numerisch lösen lässt, ist die Verwendung einer Mathematik-Software (hier: Mathematica) unerlässlich.

Für das gezeigte Beispiel werden zur Berechnung der zeitabhängigen Verteilungsfunktionen die korrigierten km-abhängigen Verteilungsfunktionen ohne und mit einer Teilmenge verwendet. Die

Graphen zu diesen Funktionen, die ebenfalls einer Weibull-Verteilung folgen, sind in Bild 5-4 abgebildet.

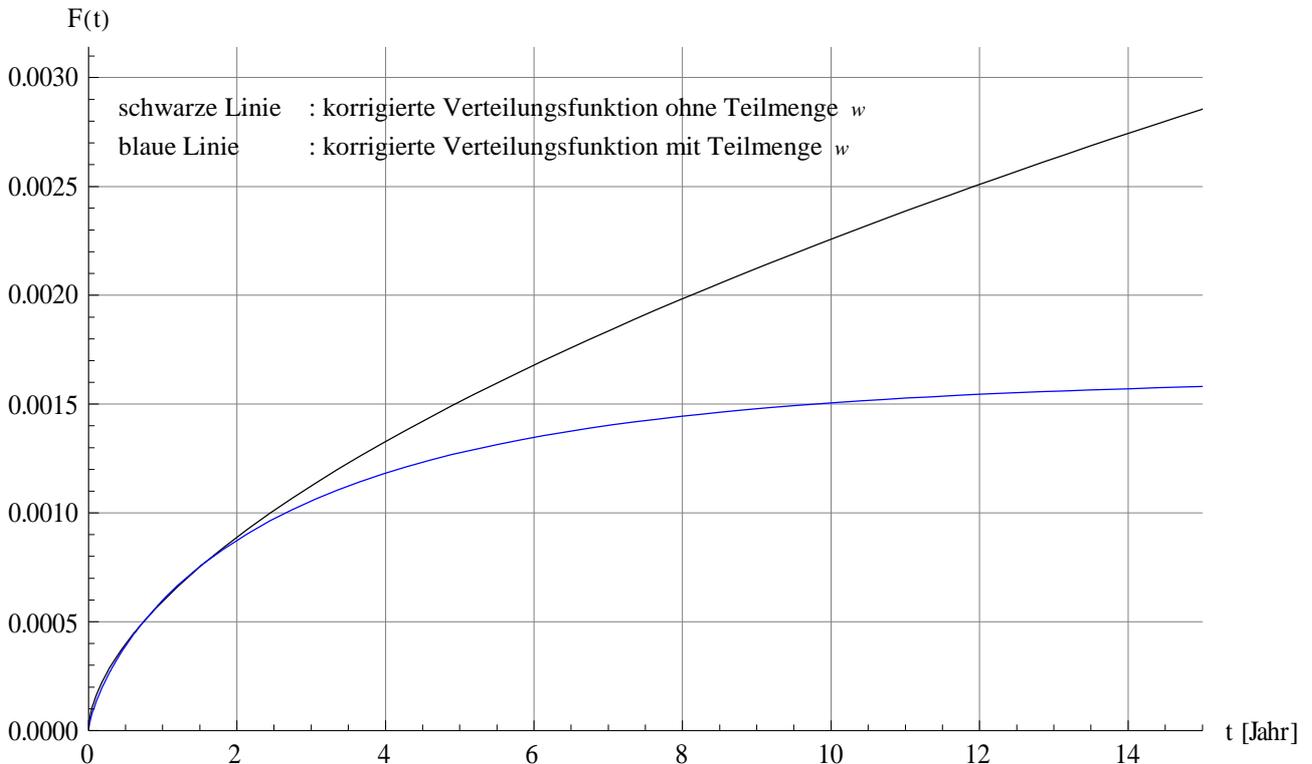


Bild 5-4: Zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit (ohne/mit Teilmenge w)

Es ist ersichtlich, dass die jeweils ermittelte Fahrleistungsverteilung erheblichen Einfluss auf die Zuverlässigkeitsprognose hat, da sie zur Korrektur der km-abhängigen Lebensdauerverteilung und darüber hinaus zur Umrechnung von der km-abhängigen auf die zeitabhängige Lebensdauerverteilung genutzt wird.

Die ermittelte Fahrleistungsverteilung sollte hierbei direkt überprüft werden, da Unterschiede zwischen realer und ermittelter Fahrleistung meist auf besondere Fehlermodi hinweisen und dies somit zu einer Verzerrung im Modell führen kann. Die Bestimmung einer Vergleichsfahrleistung wurde auf der Datenbasis der Prüforganisationen und des ADAC durchgeführt, da innerhalb dieser Daten für nahezu jeden Fahrzeugtypen eine repräsentative Stichprobe existiert. Eine Zusammenstellung dieser Auswertungen, die zu einem ersten Vergleich herangezogen werden kann, ist zu finden in /Sti 08/.

Mit den Ergebnissen aus dem Prognosemodell können neben den Zuverlässigkeitskenngrößen weitere interessierende Größen, wie z. B. die Endbevorratungsmenge oder Garantiekostenabschätzungen, bestimmt werden.

Detaillierte Ausführungen zum Modell können in /Pau 98/ nachgelesen werden.

5.2 Modellkorrekturen

Bei den Untersuchungen der Garantiedaten von Zulieferern tritt sehr häufig der Fall ein, dass die Quantität der Ausfalldaten, welche die Produktfehler der Zulieferer betreffen (sog. Z-Fehler, siehe Kap. 4.2), zu gering sind. Um die erfassten Daten dennoch verwerten und Aussagen über das Ausfallverhalten dieser Komponenten treffen zu können, wird nachfolgend eine Modellkorrektur entwickelt, die es ermöglicht, alle Fehler mit Hilfe des Prognosemodells zu untersuchen und anschließend die ermittelten Zuverlässigkeitskenngrößen auf die die Z-Fehler zurück zu rechnen. Allerdings dürfen die erfassten Fehlercodes der gesamten Fehler keine besonderen Auffälligkeiten aufweisen. Daher ist hier folgende elementare Annahme zu treffen ist, nämlich dass das generelle Ausfallverhalten aller Fehler und der Z-Fehler identisch ist.

Ein identisches Ausfallverhalten bedeutet für den Fall der Weibull-Verteilung, mit der im Zuverlässigkeitsprognosemodell sowohl die km- als auch zeitabhängigen Zuverlässigkeitskenngrößen beschrieben werden, dass der Parameter β konstant ist. Dieser kann also direkt aus der Prognose über alle Daten übernommen werden.

Die Werte für den Parameter α der Weibull-Verteilung müssen dagegen zurückgerechnet werden. Da dieser Parameter die durchschnittliche Ausfallrate für das erste Jahr bzw. die ersten Tkm angibt, lässt sich dieser linear korrigieren durch:

$$\alpha_{korr} = \frac{n_{a,Z}}{n_{a,ges}} \cdot \alpha, \quad (5-13)$$

mit

α_{korr} : korrigierter Parameter der Weibull-Verteilung,

$n_{a,Z}$: Anzahl der Z-Fehler,

$n_{a,ges}$: Anzahl aller berücksichtigten Fehler.

Für einige Komponenten, die ausreichende Zuliefererfehler aufweisen, werden die Berechnungen einmal für die Zuliefererfehler selbst und ein weiteres Mal für alle erfassten Fehler durchgeführt. Hierbei kann gezeigt werden, dass die Ergebnisse aller Fehler sowie die zurückgerechneten Werte eine identische Größenordnung aufweisen. Exemplarisch sind in der Tabelle 5-1 die Parameter aus den Analysen der Z-Fehler sowie die korrigierten Parameter aus den Analysen aller Fehler mit den absoluten und prozentualen Abweichungen für zehn identische ABS-Steuergeräte mit unterschiedlichen Bauteilnummern gegenübergestellt.

Tabelle 5-1: Parametervergleich für Z-Fehler und korrigierte Daten für ABS-Steuergeräte; Maßeinheit: Jahre

Nr.	zeitabhängige Parameter	Z-Fehler	alle Fehler	korrigierte Parameter	absolute Abw.	Abw. %
1	alpha [ppm]	36	96	52	16	45
	beta	0,7344	0,5801	0,5801	0,1543	21
2	alpha [ppm]	30	135	28	2	6
	beta	0,73033	0,68534	0,68534	0,0450	6
3	alpha [ppm]	196	384	155	41	21
	beta	0,4037	0,4462	0,4462	0,0425	11
4	alpha [ppm]	29	64	31	33	112
	beta	0,72141	0,69515	0,69515	0,0263	4
5	alpha [ppm]	118	301	84	34	29
	beta	0,41948	0,49624	0,49624	0,0768	18
6	alpha [ppm]	57	137	49	8	13
	beta	0,45092	0,49159	0,49159	0,0407	9
7	alpha [ppm]	62	139	47	15	25
	beta	0,45982	0,48541	0,4854	0,0256	6
8	alpha [ppm]	176	168	71	105	59
	beta	0,34498	0,6028	0,6028	0,2578	75
9	alpha [ppm]	108	349	89	19	18
	beta	0,6341	0,65169	0,65169	0,0176	3
10	alpha [ppm]	31	76	28	3	9
	beta	0,52264	0,40193	0,40193	0,1207	23

Die absolute Abweichung berechnet sich aus dem Betrag der Differenz des korrigierten Parameters und des Parameters für die Z-Fehler. Die prozentuale Abweichung berechnet sich aus dem Wert der absoluten Abweichung bezogen auf den Wert der Z-Fehler.

Bei der Betrachtung der Werte für den Parameter β sind die Abweichungen, mit Ausnahme der Komponente Nr. 8, sehr gering.

Bei der Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten für einen Zeitraum von 15 Jahren wird deutlich, dass die Unterschiede zwischen den Verteilungen sehr gering ausfallen (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Ausfallwahrscheinlichkeiten und deren Abweichungen bei $t=15$ Jahre für Z-Fehler und korrigierte Daten

Nr.	F(t=15 Jahre) Z-Fehler	F(t=15 Jahre) korrigierte Parameter	$\Delta F(t)$ absolut [ppm]	$\Delta F(t)$ [%]
1	2,63E-04	2,52E-04	11,11	4,22
2	2,17E-04	1,80E-04	36,32	16,75
3	5,85E-04	5,18E-04	67,00	11,46
4	2,05E-04	2,06E-04	1,70	0,83
5	3,67E-04	3,23E-04	44,35	12,07
6	1,93E-04	1,87E-04	6,57	3,40
7	2,15E-04	1,74E-04	41,25	19,16
8	4,48E-04	3,66E-04	82,17	18,35
9	6,01E-04	5,17E-04	84,19	14,00
10	1,28E-04	8,41E-05	43,57	34,13

Die maximale prozentuale Abweichung tritt jedoch nicht bei der Komponente Nr. 8 auf, sondern mit 34,13 % Abweichung bei Komponente Nr. 10. Die Werte der Ausfallwahrscheinlichkeiten weichen hier mit 128 ppm zu 84,1 ppm um 43,57 ppm voneinander ab. Dennoch ist die Größenordnung annähernd identisch und ausreichend genau für weitere Analysen. Für weitere Komponenten ergeben sich ähnliche Differenzen.

Um eine sichere Abschätzung zu erhalten, kann der errechnete Wert der Ausfallwahrscheinlichkeit noch mit einem Sicherheitsfaktor von $SF=1,5$ multipliziert werden, um einen sehr konservativen Wert zu erhalten.

Wichtig ist jedoch, dass vor der Verwendung der Daten die Fehler genauestens betrachtet und bewertet werden, um mögliche Fehleinschätzungen zu vermeiden. Auch die erhaltenen Ergebnisse sollten genauestens auf Plausibilität überprüft werden.

Als Beispiel sei hier das ABS-Steuergerät Nr. 10 genannt. Bei der Betrachtung aller Fehler ist die Fehlerbeschreibung „Gesamterzeugnis“ enthalten, die bei den Z-Fehlern nicht auftritt. Werden Fehler mit dieser Beschreibung vor der Analyse aussortiert, so korrigiert sich der zurückgerechnete α -Wert in Richtung des α -Wertes der Z-Fehler.

Das Auftreten zusätzlicher Fehlerbeschreibungen ist häufig die Ursache für die nach unten tendierenden Abweichungen der α -Werte.

Eine weitere Möglichkeit, Geräte zu untersuchen, zu denen sehr wenige Daten erfasst sind, besteht darin, ähnliche Geräte zusammenzufassen. Dies ist beispielsweise immer dann möglich, wenn nahezu identische Geräte mit unterschiedlichen Bauteilnummern in gleichen Fahrzeugtypen verbaut werden. Die Annahme muss hierbei aber immer so erfolgen, dass durch die bestehenden Unterschiede kein abweichendes Ausfallverhalten provoziert wird. Als Beispiel sei ein ABS-Steuergerät genannt, das für die Kombi- und die Limousinenvariante eines Fahrzeugtyps lediglich in der Software unterschiedlich ausgelegt ist. Hierzu ist es dann innerhalb der Logistik bei Herstellern und Zulieferern üblich, diese Geräte mit unterschiedlichen Bauteilnummern zu versehen. Dennoch ist davon auszugehen, dass es bei identischem Anbauort des Steuergerätes und identischen Prozessen

innerhalb der Fertigung zu keinen nennenswerten Unterschieden im Ausfallverhalten kommt. Sollten zu diesen einzelnen Steuergeräten dann für die Analysen zu wenige Daten vorhanden sein, so können diese für eine Untersuchung zusammengefasst werden.

5.3 Weitere Auswertemodelle

Da die Datenbasis sehr stark variiert, insbesondere bei der Feldeinsatzdauer und beim Umfang der Erfassung, können nicht alle Auswertungen mit dem Prognosemodell erfolgen. Dies ist z. B. häufig der Fall, wenn die vorhandene Datenmenge der Ausfalldaten zu gering, eine Zusammenfassung mehrerer Komponenten nicht möglich ist und so das Prognosemodell nicht angewendet werden sollte. Dennoch kann eine Abschätzung getroffen werden, die auf den Ausfalldaten basiert.

Hierbei sind zwei Ansätze möglich:

- Das Ausfallverhalten ist bekannt, so dass die Ausfallsteilheit β der Weibull-Verteilung angenommen werden kann.
- Das Ausfallverhalten ist nicht bekannt, und es wird ein rein zufallsbasiertes Ausfallverhalten angenommen.

Der erste Fall bietet sich immer dann an, wenn es ähnliche Komponenten gibt, anhand derer das Ausfallverhalten und somit der Parameter β bestimmt werden kann. Als Beispiel seien hier wieder ABS-Steuergeräte genannt. In vielen Untersuchungen (u. a. /Eck 96/, /Hei 97/, /Pau 98/, /Run 98/) wie auch im Kap. 6.1 wurde für den Parameter β ein Werteintervall von ungefähr [0,40; 0,80] ermittelt. Der Mittelwert tendiert hierbei gegen $\bar{\beta} = 0,50$. Dieser Wert kann für ein ABS-Steuergerät zur Beschreibung des Ausfallverhaltens verwendet werden.

Der Wert für α kann dagegen aus der Ausfallanzahl bestimmt werden. Wie in /Pau 98/ gezeigt, kann die durchschnittliche Ausfallrate \bar{h} im Intervall $[t_1; t_2]$ berechnet werden, durch:

$$\bar{h}(t_1, t_2) = \alpha \cdot \frac{t_2^\beta - t_1^\beta}{t_2 - t_1}. \quad (5-14)$$

Wird der Zeitraum des ersten Jahres betrachtet, so ergibt sich die Ausfallrate zu:

$$\bar{h}(0,1) = \alpha. \quad (5-15)$$

Wird ein konstantes Ausfallverhalten angenommen, so wird die Exponentialverteilung zugrunde gelegt. Es kann dann für die erfasste Zeit, z. B. die Garantiezeit, der Anteil an Ausfällen und damit die Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt werden:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (5-16)$$

mit

- $F(t)$: Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t ,
 λ : Ausfallrate,
 t : Betrachtungszeitpunkt.

In guter Näherung lässt sich die Gleichung (5-16) für sehr kleine Werte, die in den meisten Fällen gegeben sind, für die interessierenden Zeiten $t < 20$ Jahre approximieren durch:

$$F(t) \approx \lambda \cdot t, \quad (5-17)$$

so dass die konstante Ausfallrate ermittelt wird durch:

$$\lambda \approx F(t) \cdot \frac{1}{t} = \frac{n_a(t)}{n_{ges}} \cdot \frac{1}{t}. \quad (5-18)$$

mit

- $n_a(t)$: Anzahl der bis zum Zeitpunkt t ausgefallenen Einheiten,
 n_{ges} : Anzahl der betrachteten Grundgesamtheit.

Hierbei sollte allerdings berücksichtigt werden, ob Teilmarktfaktoren (TMF) mit den jeweiligen Kunden abgesprochen wurden. Diese können sehr einfach in die Berechnung mit einfließen, indem die vorhandenen Ausfälle mit dem TMF multipliziert werden. Es ist dann:

$$\lambda_{korrr;TMF} \approx \frac{n_a(t)}{n_{ges}} \cdot \frac{TMF}{t}. \quad (5-19)$$

Die Grundgesamtheit bezieht sich in diesem Modell stets auf die Komponenten, die in den beobachteten Teilmarkt verkauft wurden.

Die vorgestellte einfache Umrechnung kann immer dann verwendet werden, wenn das Ausfallverhalten der Komponenten nicht hinreichend gut bekannt ist und andere Auswertemöglichkeiten nicht sinnvoll sind. Dies ist z. B. beim Prognosemodell dann der Fall, wenn die Anzahl der verwertbaren Datensätze kleiner als $n=15$ ist.

Ungeachtet dessen sollte diese Art der Berechnung umsichtig verwendet werden, da viele Komponenten mit dem Alter weitere Fehlermechanismen, z. B. durch Verschleiß, aufweisen und somit Prognosen für einen längeren Zeitraum evtl. stark verfälscht werden können.

Auch falsche Teilmarktfaktoren können die Rechnung und die Ergebnisse beeinflussen.

6 Komponentenergebnisse

Mit Hilfe verschiedener Auswertemodelle können die einzelnen Basisdaten ausgewertet werden. Die ermittelten Ergebnisse sind sehr unterschiedlich strukturiert und können nur bedingt miteinander verglichen werden. Deshalb werden für jeden Datentyp die Ergebnisse separat angegeben.

6.1 Ergebnisse für Daten der Zulieferer

Erstmalig werden in dieser Arbeit, soweit möglich, alle Komponenten eines Bremssystems mit einem identischen Zuverlässigkeitsprognosemodell empirisch ausgewertet, um die spätere Gesamtsystemanalyse mit einem einheitlichen Grunddatenfundament durchzuführen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass nicht nur exemplarisch ein oder zwei Datensätze analysiert werden, sondern dass mit den vorhandenen Daten die Grunddatenanalyse zu möglichst vielen Bauteilnummern erfolgt, um eine statistisch abgesicherte Aussage zu den jeweiligen Komponenten zu treffen.

Bei den Analysen der Zuliefererdaten werden sowohl Einzelauswertungen zu Komponenten, die in mehreren Fahrzeugen verwendet werden können, als auch fahrzeugbezogene Auswertungen, welche baulich unterschiedliche Komponenten eines Typs beinhalten können, durchgeführt. Vorrangig werden hierbei Daten verwendet, die nur nachgewiesene Fehler des Zulieferers beinhalten. Es werden jedoch, aufgrund von zu geringer Datenquantität und zur vergleichenden Betrachtung, weitere Auswertungen durchgeführt, die alle erfassten Feldfehler unabhängig vom Verursacher berücksichtigen. Eine Übersicht, wie viele Analysen mit Hilfe des Zuverlässigkeitsprognosemodells (siehe Kap. 5.1) zu den einzelnen Komponenten durchgeführt wurden, kann der folgenden Tabelle 6-1 entnommen werden.

Tabelle 6-1: Übersicht der Auswertungen für die Zuliefererdaten

Bremsenkomponenten	Analysen
ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit SG	29
ESP_1-Hydraulikeinheit (HU) mit SG	29
ESP_2-Hydraulikeinheit (HU) mit SG	14
erw. ESP-Hydraulikeinheit (HU) mit SG	9
erw. ESP Zusatz-SG (ZSG)	10
Drehzahlfühler 1 (DF 1, aktiv)	23
Drehzahlfühler 2 (DF 2, aktiv)	4
Gier-/Drehratensensoren (DRS)	22
Lenkwinkelsensoren (LWS)	19
Gesamtanzahl der Auswertungen	159

Die Auswertungen müssen vor der Verwendung für weitere Analysen erneut bewertet werden, da es bei den erstellten automatisierten Auswertungen zu nicht sinnvollen Ergebnissen kommen kann. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Beispielhaft sei hier eine nicht ausreichend detaillierte Fehlerbeschreibung zu nennen. Dies ist häufig bei Steuergeräten der Fall, da hier die Fehlerbeschreibung (z. B. „allg. elektrischer Fehler“) keinen Schluss auf die eigentliche Fehlerursache zulässt. Werden alle Datensätze mit dieser Fehlerbeschreibung ausgewertet, so kann es vorkommen, dass die Gruppe der Fehler sehr inhomogen ist. Häufig folgt sie dann keinem eindeutig definierbaren Ausfallverhalten, so dass die Auswertungen nicht verwertbar sind. Es ist dann zu überprüfen, ob die Einschränkung der zu untersuchenden Fehler für eine Analyse angepasst werden muss.

Für die Komponente ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG) ist eine Zusammenfassung der mit Hilfe des Prognosemodells ermittelten verwertbaren Parameter sowie der für die Berechnungen verwendeten Grunddaten in der Tabelle 6-2 gegeben.

Tabelle 6-2: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für die ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)							
Seriennummer	Grunddaten			jährliche Fahrleistungsparameter			
	Anzahl Ausfälle [Stück]	Teilmarktfaktor TMF	zugehörige FM	μ	σ	E(T) [Tkm]	B
1	30	15,40	1.001.097	2,908	0,662	22,8	0,9852
2	42	2,56	378.109	2,443	0,574	13,6	0,9932
3	29	10,00	413.686	2,529	0,851	18,0	0,9966
4	26	2,63	215.326	2,556	0,800	17,7	0,9958
5	28	10,00	641.647	2,448	0,901	17,4	0,9970
6	36	15,40	2.122.009	2,775	0,665	20,0	0,9960
7	36	3,17	544.025	2,078	0,607	9,6	0,9891
8	20	13,50	546.347	2,644	0,850	20,2	0,9880
9	17	10,00	203.209	2,477	1,004	19,7	0,9728
10	38	2,87	705.761	2,630	0,670	17,4	0,9958
Mittelwert	30	8,55	677.122	2,549	0,758	17,6	0,9909
Seriennummer	km-abhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Tkm)			zeitabhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Jahr)			
	α	β	B	α	β	w	Bem.
1	3,60E-05	0,734	0,9985	3,43E-04	0,734	1	
2	2,95E-05	0,730	0,9943	1,92E-04	0,730	1	
3	1,96E-04	0,404	0,9958	5,76E-04	0,404	1	
4	2,93E-05	0,721	0,9821	2,19E-04	0,721	1	
5	1,18E-04	0,419	0,9978	3,55E-04	0,419	1	
6	5,65E-05	0,451	0,9956	2,07E-04	0,451	1	
7	6,20E-05	0,460	0,9984	1,67E-04	0,460	1	
8	1,75E-04	0,345	0,9989	4,56E-04	0,345	1	
9	1,08E-04	0,634	0,9858	6,34E-04	0,634	1	
10	3,06E-05	0,523	0,9790	1,29E-04	0,523	1	
Mittelwert	8,41E-05	0,542	0,9926	3,28E-04	0,542	1	

In der ersten Spalte der Tabelle ist die Seriennummer angegeben, mit der die jeweilige Komponente eindeutig identifizierbar ist. Diese Seriennummer ist jeweils zweimal enthalten, da die Tabelle aus zwei Abschnitten mit insgesamt vier Teilbereichen besteht.

Diese Teilbereiche beinhalten:

- die Grunddaten,
- die jährlichen Fahrleistungsparameter,
- die Parameter der km-abhängigen Lebensdauern,
- die Parameter der zeitabhängigen Lebensdauern.

Im ersten Teilbereich „Grunddaten“ sind die Anzahl der für die Analyse mit dem Zuverlässigkeitsprognosemodell verwendeten Datensätze, der mit dem Hersteller vereinbarte Teilmarktfaktor und die Fertigungsmenge, auf die sich die Datensätze beziehen, erfasst.

Im zweiten Teilbereich „jährliche Fahrleistungsparameter“ sind die Parameter μ und σ der jährlichen Fahrleistungsverteilung, der zugehörige Erwartungswert $E(T)$ und das Bestimmtheitsmaß B aufgeführt. Das Bestimmtheitsmaß B gibt an, wie gut die Anpassung der theoretischen an die empirische Verteilungsfunktion ist.

Die Parameter der km-abhängigen Lebensdauern sind im dritten Teilbereich dargestellt. Hierin enthalten sind die Parameter α und β , die das Ausfallverhalten der jeweiligen Komponenten nach Formel (5-11) beschreiben, wobei für den Parameter w der identische Wert wie bei den zeitabhängigen Parametern anzusetzen ist. Im Normalfall sollte eine vollständige Anpassung erfolgen, so dass $w=1$ ist. Der Wert für das Bestimmtheitsmaß B gibt auch hier die Güte der Anpassung der theoretischen an die empirische Verteilung an. Die Zuverlässigkeitskenngrößen der Seriennummern mit $B < 0,98$ werden nur dann berücksichtigt werden, wenn eine zusätzliche visuelle Bewertung erfolgt ist und die Anpassung für ausreichend gut befunden wurde.

Der letzte Teilbereich „zeitabhängige Lebensdauern“ enthält analog zu den km-abhängigen die Parameter für die zeitabhängigen Lebensdauern. In der Spalte mit der Überschrift „Bem.“ können wichtige Zusatzinformationen gegeben werden. Werden z. B. bei den Prognosen alle Fehler berücksichtigt oder Korrekturen vorgenommen, so ist hier ein entsprechender Eintrag vorhanden. In der gezeigten Tabelle sind für die Komponente keine Auffälligkeiten aufgetreten, so dass keine Bemerkungen eingetragen sind.

Eine Datenzusammenstellung der durchgeführten Analysen für alle Komponenten der Tabelle 6-1 findet sich im Anhang (Abschnitt A 2).

Die Verteilungen der Werte für die ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG) innerhalb der einzelnen Parameter werden in den folgenden Diagrammen (siehe Bild 6-1) wiedergegeben.

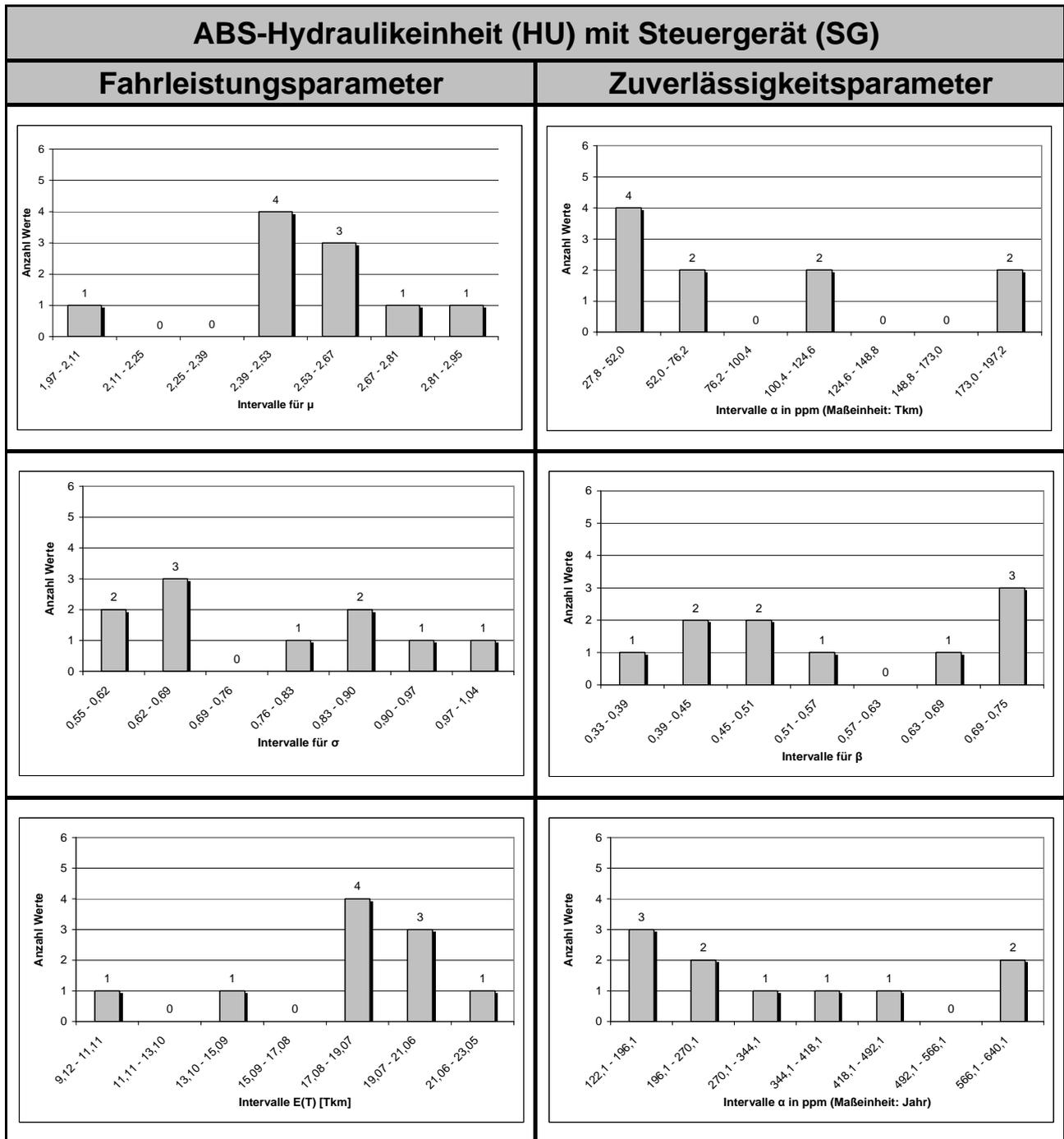


Bild 6-1: Anzahl der ermittelten Parameter eingeteilt in Intervalle für die ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

Die Werte der Parameter der Fahrleistungsverteilung liegen, bis auf eine Ausnahme, in den üblichen Wertebereichen dieser Parameter. Der einzige Ausreißerwert liegt mit $\mu=2,078$ in einem so niedrigen Bereich, dass trotz eines normalen σ -Wertes die mittlere jährliche Fahrleistung lediglich $E(T)=9,60$ Tkm ergibt.

Werden für die entsprechende Komponente jedoch sämtliche Fehlereinträge zur Ermittlung der Fahrleistungsparameter genutzt, so ergeben sich folgende Werte:

- $\mu = 2,354$,
- $\sigma = 0,738$,
- $E(T) = 13,83 \text{ Tkm}$.

Die Werte für μ und $E(T)$ sind immer noch sehr klein, befinden sich jedoch in einem realistischen Bereich, da das zugehörige Fahrzeug der Miniklasse zugeordnet ist. Dass die Fahrleistung für die Zulieferer-Fehlerdaten stark von der Referenz-Fahrleistung abweicht, ist ein erstes Indiz dafür, dass die „Fehlerfahrzeuge“ nicht homogen unter den gesamten Fahrzeugen verteilt sind. Dies kann z. B. als Auswirkung eines speziellen Fehlerbildes resultieren.

Die übrigen Erwartungswerte $E(T)$ der Fahrleistungen liegen in einem Intervall zwischen 13,60 Tkm und 22,80 Tkm, was dadurch zu erklären ist, dass die untersuchten Komponenten in Fahrzeugen verschiedener Fahrzeugklassen verbaut sind. Hierdurch begründet ist auch die starke Bandbreite der Parameter μ und σ der zugehörigen Fahrleistungsverteilungen.

Werte für $E(T)$ über 25 Tkm, wie sie bei größeren Fahrzeugen oder „Vertreter-Fahrzeugen“ zu beobachten sind, wurden nicht ermittelt, da nur Fahrzeuge der unteren Klassen bei den Auswertungen vertreten waren.

Die Fahrzeuge zu den untersuchten Komponenten sind (alphabetisch sortiert):

- Fiat Panda neu,
- Fiat Punto,
- Nissan Micra / Primera,
- Opel Corsa FWD-X,
- Opel Corsa / Meriva.
- Renault Clio / Kangoo / Twingo,
- Renault Megane.

Die Zuverlässigkeitskenngrößen zeigen weitere interessante Aspekte. Der Parameter β streut, obwohl die Geräte technisch identisch sind, sehr stark. Insbesondere die Tatsache, dass zwei Werte $\beta \geq 0,700$ sind, lässt vermuten, dass nicht nur ein einzelnes Fehlerbild aufgetreten ist. Da es sich bei den untersuchten Geräten um die Hydraulikeinheit mit Steuergerät handelt, sollte eigentlich eine Untersuchung nach Fehlerbildern erfolgen. Eine Aufschlüsselung der Daten nach Fehlerort zeigt aber, dass nur mit einer Ausnahme nahezu alle Fehler dem Steuergerät zugeordnet sind. Die ermittelten Werte sollten also generell denen von Steuergeräten entsprechen. Hierzu gab es bisher einige Untersuchungen (z. B. /Hei 97/, /Lie 05/, /Pau 98/), die gezeigt haben, dass typische Werte für Steuergeräte im Bereich $0,400 \leq \beta \leq 0,700$ liegen, was durch ein bei elektronischen Geräten zu beobachtendes Frühausfallverhalten zu erklären ist.

Die Werte für den zeitabhängigen Parameter α_{zeit} streuen für die ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG) von ca. 129 ppm/Jahr bis 634 ppm/Jahr. Auf der Grundlage der Auswertungen ist eine eindeutige Bewertung der Fehler und ihrer Ursachen nicht möglich, so dass dadurch bedingt

die starken Schwankungen innerhalb der Geräte nicht erklärt werden können. Identische Größenordnungen der α_{Zeit} -Werte (102 ppm/Jahr bis 282 ppm/Jahr) zu Steuergeräten finden sich ebenfalls in /Pau 98/, so dass das Ausfallverhalten der ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG) nicht sonderlich auffällig ist. Da bei der Fehlerbeschreibung für die ABS-Einheiten nahezu alle Einträge das Steuergerät betreffen, ist ein Vergleich zulässig. Die β -Werte für die ESP1-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG) und die ESP2-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG) liegen in typischen Bereichen für Steuergeräte. Auch hier betreffen nahezu alle Fehlereinträge das Steuergerät.

Die Parameter der Komponenten Drehzahlfühler (DF), Lenkwinkelsensor (LWS) und Drehratensensor (DRS) liegen, bis auf einige Ausnahmen (siehe Anhang A 2: DF Nr. 6 und 7; LWS Nr. 3; DRS Nr. 3), in typischen Bereichen. Die α -Werte der Ausnahmen sind sehr hoch und ungewöhnlich, da es sich um Standardsensoren handelt. Auffällig ist, dass die Fertigungsmenge in Bezug zur Anzahl der aufgetretenen Fehler sehr gering ist. Bei Betrachtung der Datenbasis und insbesondere hier der Fehlerbeschreibung sind jedoch keine außergewöhnlichen Einträge feststellbar, wodurch diese Abweichungen begründet werden könnten. Von einer weiteren Verwendung dieser Daten für Systemanalysen wird daher Abstand genommen, da das System sonst unnötig pessimistisch abgebildet wird.

Die Ergebnisse zu den Komponenten, die nicht oder nicht ausreichend gut mit dem Zuverlässigkeitsprognosemodell analysiert werden konnten, werden im Folgenden vorgestellt.

Ergebnisse für Drucksensoren

Für zwei unterschiedliche Drucksensoren (DS), die in konventionellen Bremssystemen verwendet werden und auch in neuen Systemen eingesetzt werden sollen, liegen nur wenige Daten vor.

Die erhaltene Datenbasis zum DS 1, der als Vakuumdrucksensor für ein neues Bremssystem verwendet werden soll, umfasst 18 Feldeinträge. Diese Einträge sind jedoch alle entsprechend der Spezifikation „in Ordnung“ und somit für eine Auswertung nur bedingt verwendbar. Darüber hinaus ist die Anzahl sehr gering, um verlässliche Aussagen treffen zu können.

Die Anzahl an Datensätzen zum DS 2 ist mit einem Eintrag bei 522.334 produzierten Einheiten innerhalb eines Jahres ebenfalls nicht für Zuverlässigkeitsprognosen geeignet. Der Teilmarktfaktor wurde für dieses Bauteil mit $TMF=1$ angegeben, da alle defekten Bauteile eingeschickt werden. Die Qualitätsbewertung muss bei dieser geringen Anzahl an Ausfällen als sehr gut angenommen werden. Die Ausfallrate λ_{DS} für den Drucksensor wird für die weiteren Berechnungen entsprechend der Gleichung (5-19) mit

$$\lambda_{DS} = \frac{1}{522.334} \cdot \frac{1}{\text{Jahr}} \approx 1,91 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}$$

als konstant angenommen.

Ergebnisse für Bremskraftverstärker

Die Auswertungen für die Bremskraftverstärker (brake booster) mit mehr als 15 Fehlereinträgen ergaben unter Verwendung des Zuverlässigkeitsprognosemodells sehr schlechte Ergebnisse und darüber hinaus Anpassungen, die nicht zufriedenstellend sind. Bei genauer Betrachtung der Daten ist zu erkennen, dass Besonderheiten bei einigen Bauteilnummern aufgetreten sind.

Insgesamt wurden 50.428.121 Einheiten, verteilt auf 516 Bauteilnummern, produziert. Hierbei kam es bei 1.848 Verstärkern innerhalb der zweijährigen Garantiezeit zu Reklamationen. Von diesen wurden lediglich 601 Einheiten als Z-Fehler anerkannt. Werden die Bauteilnummern betrachtet, die mehr als 15 Z-Fehler aufweisen, so bleiben nur acht der 516 Einheiten übrig, die aber zusammen insgesamt 475 Fehler charakterisieren. Die Fertigungsmenge dieser acht Einheiten beträgt dabei nur 1.546.097 Stück. Das bedeutet, dass auf knapp 1,55 % der Bauteilnummern, die einen Anteil von ca. 3,1 % an der gesamten Fertigungsmenge haben, 79 % der Fehler entfallen.

Unter der Annahme eines zufälligen und damit exponentiell verteilten Ausfallverhaltens und, da viele Fahrzeughersteller betroffen sind, eines sehr großen Teilmarktfaktors von $TMF=15$, berechnet sich die Ausfallrate $\lambda_{Booster;1}$ dieser Einheiten nach Formel (5-18) zu:

$$\lambda_{Booster;1} = \frac{475}{1.546.097} \cdot \frac{15}{2 \text{ Jahre}} \approx 2.304 \frac{ppm}{\text{Jahr}}.$$

Entsprechend der Näherung $F(t) \approx \lambda t$ berechnet sich die Ausfallwahrscheinlichkeit für einen Zeitraum von 15 Jahren zu $F_{Booster;1}(15 \text{ Jahre}) \approx 34.560 \text{ ppm}$. Dieser sehr schlechte Wert dürfte eine Worst-Case-Abschätzung sein und das reale Ausfallverhalten nicht besonders gut wiedergeben.

Bei der Zuordnung der restlichen 126 Fehler zu den verbleibenden 508 Bauteilnummern und unter den gleichen Annahmen errechnet sich die konstante Ausfallrate $\lambda_{Booster;2}$ zu:

$$\lambda_{Booster;2} = \frac{126}{48.882.024} \cdot \frac{15}{2 \text{ Jahre}} \approx 38,7 \frac{ppm}{\text{Jahr}}.$$

Als pessimistisch geschätzter Mittelwert kann die Ausfallrate $\lambda_{Booster;mittel}$ aus allen erfassten Fehlern bezogen zur Gesamtfertigungsmenge berechnet werden. Es ist dann:

$$\lambda_{Booster;mittel} = \frac{1.848}{50.428.121} \cdot \frac{15}{2 \text{ Jahre}} \approx 275 \frac{ppm}{\text{Jahr}}.$$

Dieser Wert erscheint sehr viel plausibler als der erste Wert. Die Ausfallwahrscheinlichkeit für einen Zeitraum von $t=15 \text{ Jahren}$ ist mit $F_{Booster;mittel}(15 \text{ Jahre}) \approx 4.125 \text{ ppm}$ dennoch ausgesprochen groß. Auch hier sei ergänzend darauf hingewiesen, dass die Prognose für einen längeren Zeitraum

vermutlich nicht sehr genau ist, da bei Bremskraftverstärkern ein altersbedingtes Ausfallverhalten, z. B. durch Versprödung der Membran, zu erwarten ist.

Ergebnisse für Tandemhauptbremszylinder

Die Auswertungen zu den Tandemhauptbremszylindern (THZ) mit dem Zuverlässigkeitsprognosemodell ergeben, wie auch bei den Bremskraftverstärkern, keine verwertbaren Ergebnisse.

Auch hier treten ähnliche Effekte in den Daten auf, wie sie bei den Bremskraftverstärkern beobachtet werden konnten. Die gesamte Fertigungsmenge von 1.514.018 Einheiten, verteilt auf 347 Bauteilnummern, hatte insgesamt 1.813 fehlerhafte Komponenten, die zu Reklamationen geführt haben.

Hiervon entfallen 959 Fehler auf 6 Bauteilnummern, die lediglich eine Fertigungsmenge von 10.072 Einheiten aufweisen. Das bedeutet, dass nahezu 10 % dieser Komponenten einen Defekt während der Garantiezeit hatten. Dies ist für einen Tandemhauptbremszylinder sehr ungewöhnlich, da die Komponente meist nicht vollkommen neu entwickelt wird und somit auf bekannter und bewährter Technik beruht. In der weiteren Berechnung werden diese Bauteilnummern daher nicht berücksichtigt.

Mit den übrigen Einheiten ist eine Analyse mit dem Zuverlässigkeitsprognosemodell nur möglich, wenn alle Einheiten genutzt werden. Die gesamte Fertigungsmenge der Bezugsmenge ist $n_{ges} = 1.261.004$ Einheiten und der Teilmarktfaktor ist aufgrund der verschiedenen Kunden mit $TMF=15$ vorgegeben. Bei der Analyse der Zulieferfehler (Z-Fehler) wurden folgende zeitabhängigen Parameter ermittelt:

$$\alpha_{zeit,THZ} \approx 945 \cdot 10^{-6} \frac{1}{Jahr^{\beta}} \quad \text{und}$$

$$\beta_{zeit,THZ} \approx 0,644 .$$

Der Wert der Ausfallwahrscheinlichkeit für einen Zeitraum von $t=15$ Jahren ergibt $F_{THZ}(15 \text{ Jahre}) \approx 5.391 \text{ ppm}$.

Auch dieser Wert ist sehr hoch und sollte genauestens betrachtet werden. So könnte evtl. die Annahme des hohen TMF die Berechnung unnötig schlecht beeinflussen.

Werden die von der GTÜ erfassten 1.436 Mängleinträge zu Hauptbremszylindern zugrunde gelegt und auf die 11.486.998 untersuchten Fahrzeuge des gleichen Zeitraums bezogen, so ist der Gesamtanteil mit ca. 125 ppm um den Faktor 43 kleiner. Diese Differenz kann viele Gründe haben. Zum einen wird ein Kunde in der Garantiezeit bei bemerkten Unregelmäßigkeiten jeglicher Art die Werkstatt aufsuchen. Aber auch bei älteren Fahrzeugen wird ein Großteil der Fahrzeugbesitzer dazu neigen, bei Bremsproblemen eine Werkstatt aufzusuchen um den Mangel beheben zu lassen, so dass diese Fehler nicht in den GTÜ-Daten erscheinen.

Ergebnisse für Bremsflüssigkeitsreservoirs

Das Bremsflüssigkeitsreservoir (brake fluid reservoir) ist aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht eine sehr unauffällige Komponente. Zumeist besteht es aus Kunststoff und ist direkt oberhalb des Hauptbremszylinders verbaut. Allerdings herrscht im Reservoir nicht der Druck, dem die übrigen hydraulischen Komponenten ausgesetzt sind. Ausfälle beschränken sich daher meist auf elektrische Fehler, wie z. B. einen ausgefallenen Füllstandssensor, so dass die ABS-Warnleuchte angesteuert wird. In einigen sehr wenigen Fällen kommt es zu undichten Behältern, bei denen Bremsflüssigkeit austreten kann. Dieser Verlust ist in der Regel „schleichend“ und führt nicht zum direkten Ausfall des Bremssystems.

Bei den vorhandenen Daten aus einer zweijährigen Garantiezeit verteilen sich 188 Z-Fehler auf 90 Bauteilnummern mit einer Fertigungsmenge von 7.123.639 Stück, so dass auch hier das Zuverlässigkeitsprognosemodell nicht angewendet werden kann. Innerhalb der Daten sind drei Bauteilnummern besonders auffällig, da bei ihnen zusammen 171 Fehler aber nur 1.400 gefertigte Einheiten eingetragen sind. Diese Daten deuten auf Musterbauteile oder Komponenten aus der Vorserienfertigung hin und werden für die Analyse nicht verwendet.

Damit verbleiben 7.122.239 gefertigte Einheiten und 17 fehlerhafte Komponenten. Der Teilmarktfaktor wird mit $TMF=15$ gewählt. Damit berechnet sich die Ausfallrate des Reservoirs $\lambda_{Re.servoir}$ zu:

$$\lambda_{Re.servoir} = \frac{17}{7.122239} \cdot \frac{15}{2 \text{ Jahre}} \approx 17,9 \frac{ppm}{\text{Jahr}}.$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet sich damit für einen Zeitraum von $t=15 \text{ Jahren}$ zu $F_{Re.servoir}(15 \text{ Jahre}) \approx 268,5 \text{ ppm}$.

Ergebnisse für die Bremsflüssigkeit

Die Bremsflüssigkeit stellt eine Ausnahme im Bremssystem dar. Obwohl sie unbedingt für eine Bremsung benötigt wird, gestaltet es sich sehr schwer, ihr Ausfallverhalten zu quantifizieren, da dieses sehr komplex von den Umgebungsbedingungen abhängt.

Die Bremsflüssigkeit ist hygroskopisch und bindet über einen längeren Zeitraum Wasser aus der Luft. Ab einem kritischen Wasseranteil in der Bremsflüssigkeit kann es bei einer Bremsung dann dazu kommen, dass sich die Bremsflüssigkeit soweit erhitzt, dass das gebundene Wasser verdampft und sich Dampfblasen bilden. Dieser Dampf ist dann komprimierbar, so dass es zum sog. „weichen“ Pedal kommt. Eine Bremsung ist dann nicht mehr oder nur sehr schwach möglich. Daher sollte die Bremsflüssigkeit alle zwei Jahre ersetzt werden.

Darüber hinaus ist ein zu geringer Bremsflüssigkeitsstand sicherheitskritisch. Dieser kann aber nicht als Ausfall der Flüssigkeit zugeordnet werden, sondern gehört, wie auch die Kontrolle der Bremsflüssigkeit, eher zu den Sicherungs- und Kontrollpflichten des Fahrzeugführers.

Eine Quantifizierung des Ausfallverhaltens der Bremsflüssigkeit wird daher nicht vorgenommen.

Ergebnisse für Bremssättel

Der Bremssattel (caliper) ist durch seine exponierte Einbaulage an den Radbremsen vielen Umwelteinflüssen und zusätzlich den hohen Temperaturen, die beim Bremsen entstehen können, ausgesetzt. Da der Bremssattel für die Bremsfunktion elementar wichtig ist, muss auch dieser sehr zuverlässig sein.

In der untersuchten Datenbasis sind 441 Z-Fehler bei 23.355.779 gefertigten Einheiten hinterlegt, die sich auf 419 Bauteilnummern verteilen.

Innerhalb dieser Daten existieren vier Bauteilnummern, die zusammen 309 Fehlereinträge aber nur eine Fertigungsmenge von 394.982 Stück aufweisen. Diese Daten werden unter Verwendung des Zuverlässigkeitsprognosemodells analysiert und liefern die folgenden Ergebnisse (siehe Tabelle 6-3).

Tabelle 6-3: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für die Bremssättel

Bremssattel							
Seriennummer	Grunddaten			jährliche Fahrleistungsparameter			
	Anzahl Ausfälle [Stück]	Teilmarktfaktor TMF	zugehörige FM	μ	σ	E(T) [Tkm]	B
1	103	15,00	128.379	2,913	0,482	20,7	0,9990
2	62	15,00	129.154	2,912	0,520	21,1	0,9982
3	65	15,00	68.756	3,145	0,487	26,1	0,9968
4	55	15,00	68.693	3,197	0,502	27,7	0,9981
Mittelwert	71	15,00	98.746	3,042	0,498	23,9	0,9980
Seriennummer	km-abhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Tkm)			zeitabhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Jahr)			
	α	β	B	α	β	w	Bem.
1	3,59E-05	1,409	0,9914	2,83E-03	1,385	1	3 J. Garantie
2	4,23E-05	1,250	0,9866	2,02E-03	1,241	1	3 J. Garantie
3	2,49E-05	1,461	0,9971	3,34E-03	1,426	1	3 J. Garantie
4	3,11E-05	1,359	0,9949	3,12E-03	1,336	1	3 J. Garantie
Mittelwert	3,36E-05	1,370	0,9925	2,82E-03	1,347	1	

Diese Bauteile weisen sehr hohe α -Werte auf und zeigen darüber hinaus mit einer Weibullsteilheit von $\beta > 1$ ein verschleißbehaftetes Ausfallverhalten während der Garantiezeit, welches selbst für eine mechanisch belastete Komponente wie den Bremssattel nicht typisch ist und erst für spätere Zeitpunkte zu erwarten wäre. Die Gesamtanzahl der für die Analysen genutzten Daten weicht mit 285 von den gesamten Daten um 24 ab, da einige Daten fehlerhaft waren, z. B. durch falsche Datums-einträge.

Die übrigen 132 Einträge stammen aus einer Grundgesamtheit von 22.960.797 Einheiten und sind über eine dreijährige Garantiezeit erfasst. Die mittlere konstante Ausfallrate $\lambda_{\text{Bremsattel}}$ berechnet sich mit einem Teilmarktfaktor $TMF=15$ dann zu:

$$\lambda_{\text{Bremsattel}} = \frac{132}{22.960.797} \cdot \frac{15}{3 \text{ Jahre}} \approx 9,6 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}.$$

Ergebnisse für Bremscheiben und -trommeln

Die Bremscheiben und -trommeln (brake disc/drum) sind, zusammen mit den jeweiligen Reibbelägen, ein weiterer Sonderfall im Bremssystem. Beim Bremsen wird die Fahrzeuggenergie in Wärmeenergie umgesetzt. Dies wird über die Reibung zwischen Bremscheibe und –belag erreicht, die jedoch zur Folge hat, dass Material abgetragen wird. Daher sind die Bremscheiben und –beläge verschleißbehaftete Komponenten, die, je nach Abnutzungsgrad, zu erneuern sind. Welche Zeit und Strecke eine Bremscheibe oder die Beläge nutzbar sind, hängt stark von der Fahrweise und dem Fahrzeug ab.

Dies kann in der vorhandenen Datenbasis zu einigen Problemen führen. Da bei Garantiefällen lediglich das Zulassungsdatum des Fahrzeugs, das Datum des Ausfalls und der km-Stand des Fahrzeugs beim Ausfall erfasst wird, kann nicht nachvollzogen werden, ob die Bremscheiben und –beläge die gleiche Zeit bzw. Strecke im Fahrzeug waren. Ist dies bei jungen Fahrzeugen mit wenig km noch zu vermuten, so kann die Annahme bei Fahrzeugen von Vielfahrern, die durchaus bis zu 100 Tkm pro Jahr fahren, falsch sein. Bei einem sportlichen Fahrer kann es durchaus während der 100 Tkm erforderlich gewesen sein, die Bremsbeläge mehrfach und die Bremscheibe ein- oder zweimal zu ersetzen. Tritt dann ein Defekt an der aktuellen Bremscheibe auf und werden die Daten des Fahrzeugs herangezogen, so verschiebt sich bei Ausfallanalysen der km- und auch der Zeitbereich nach hinten. Dies kann in extremen Fällen dazu führen, dass das Ausfallverhalten stark verzerrt wird.

Auch bei Bremscheiben tritt erneut der Effekt auf, dass bei einigen wenigen Bauteilnummern ein Großteil der Fehlereinträge erfasst ist. Zu den 137 Bauteilnummern mit insgesamt 22.488.687 gefertigten Einheiten existieren 980 Fehlereinträge. Hiervon wiederum entfallen 967 Ausfälle auf sechs Bauteilnummern, deren Gesamtfertigungsmenge 5.308.246 Einheiten beträgt. Die Auswertungen mit dem Zuverlässigkeitsprognosemodell für diese sechs Bauteilnummern liefern keine verwertbaren Ergebnisse, obwohl innerhalb der Datensätze keine besonderen Auffälligkeiten festzustellen sind.

Bei den übrigen 131 Bauteilnummern sind in der zweijährigen Garantiezeit lediglich 13 Ausfälle bei 17.179.843 produzierten Einheiten aufgetreten. Hier kann das Zuverlässigkeitsprognosemodell aufgrund der geringen Anzahl an Datensätzen nicht sinnvoll angewendet werden, so dass nur eine Abschätzung unter der Annahme eines exponentiell verteilten Ausfallverhaltens und mit $TMF=15$ erfolgen kann.

Die konstante Ausfallrate für die Bremsscheibe $\lambda_{\text{Bremsscheibe}}$ ist dann:

$$\lambda_{\text{Bremsscheibe}} = \frac{13}{17.179.843} \cdot \frac{15}{2 \text{ Jahre}} \approx 5,68 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}.$$

Im Produktbereich der Bremsscheiben gibt es auch ein gesamtes Bremsscheibenset, welches weiteres Zubehör, wie z. B. einen Verschleißsensor, beinhaltet.

Zu den zugeordneten 279 Bauteilnummern mit einer Gesamtfertigungsmenge von 62.703.056 Einheiten existieren 36 Einträge mit Z-Fehler aus der zweijährigen Garantiezeit. Auch hier kann nur unter den o. g. Annahmen folgende Abschätzung für die konstante Ausfallrate des Bremsscheibensets $\lambda_{\text{Bremsscheibenset}}$ erfolgen:

$$\lambda_{\text{Bremsscheibenset}} = \frac{36}{62.703.056} \cdot \frac{15}{2 \text{ Jahre}} \approx 4,31 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}.$$

Beide Werte haben in etwa identische Größenordnungen, so dass für spätere Berechnungen der etwas schlechtere Wert für die Bremsscheiben genutzt wird.

Bei den Bremstrommeln sind für 68 Bauteilnummern mit 11.305.687 gefertigten Einheiten 25 Fehlereinträge vorhanden, die in der zweijährigen Garantiezeit erfasst wurden. Diese Daten eignen sich ebenfalls nicht für eine Auswertung mit dem Zuverlässigkeitsprognosemodell. Daher wird auch hier ein zufälliges Ausfallverhalten mit $TMF=15$ vorausgesetzt. Für die konstante Ausfallrate der Bremstrommel $\lambda_{\text{Bremstrommel}}$ folgt:

$$\lambda_{\text{Bremstrommel}} = \frac{25}{11.305.687} \cdot \frac{15}{2 \text{ Jahre}} \approx 16,6 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}.$$

Bei den Bremstrommeln gibt es ebenfalls Sets, die neben der Bremstrommel, zusätzliches Zubehör beinhalten. Für diesen Produkttyp existieren in den Daten 80 Bauteilnummern mit 16.920.739 gefertigten Teilen, jedoch ohne Fehlereintrag während der Garantiezeit von zwei Jahren. Die konstante Ausfallrate für das Bremstrommelset $\lambda_{\text{Bremstrommelset}}$ hierzu würde rein rechnerisch

$$\lambda_{\text{Bremstrommelset}} = \frac{0}{16.920.739} \cdot \frac{15}{2 \text{ Jahre}} = 0 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}$$

betragen. Dieser Wert würde aber bedeuten, dass bei den Bremstrommelsets keine Ausfälle auftreten, was nicht realitätsnah ist. Daher wird für die weiteren Berechnungen der Wert für die Bremstrommel ohne Zubehör verwendet.

Ergebnisse für Bremsbeläge und –backen

Zu den Bremsbelägen und –backen (brake lining/shoe), die zusammen mit den Bremsscheiben bzw. Bremstrommeln die Energie aufnehmen, sind sehr wenige Daten aus der zweijährigen Garantiezeit vorhanden.

Bei den Bremsbelägen sind 19 Fehlereinträge bei 51 Bauteilnummern und einer Fertigungsmenge von 2.195.630 Einheiten vorhanden, wobei jede Fertigungseinheit zwei Beläge umfasst.

Die konstante Ausfallrate der Bremsbeläge $\lambda_{\text{Bremsbelag}}$ berechnet sich dann zu:

$$\lambda_{\text{Bremsbelag}} = \frac{19}{4.391.260} \cdot \frac{15}{2 \text{ Jahre}} \approx 32,5 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}.$$

Die Bremsbacken haben noch geringe Fertigungsmengen. Bei den vorliegenden Daten sind 193 Bauteilnummern mit 1.080.245 gefertigten Backen registriert, zu denen acht Ausfälle aus einer Garantiezeit von zwei Jahren vorliegen. Auch hier kann lediglich eine konstante Ausfallrate mit $TMF=15$ berechnet werden, zu:

$$\lambda_{\text{Bremsbacke}} = \frac{8}{1.080.245} \cdot \frac{15}{2 \text{ Jahre}} \approx 55,5 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}.$$

Sonstige Komponenten

Zu den folgenden Komponenten sind keine Ausfalldaten während der Garantiezeit vorhanden:

- Bremspedal,
- Bremsleitung,
- Bremsschlauch.

Für die Bremsleitungen und –schläuche ist anzunehmen, dass diese Alterungseffekten unterliegen. Besonders bei den Bremsschläuchen, die aus Gummi bestehen und von einer flexiblen Stahlummantelung geschützt werden, versprödet das Material mit den Jahren und kann somit undicht werden.

Bei den Bremsleitungen kommt es ebenfalls im Laufe der Zeit zu Alterserscheinungen wie z. B. Rost. Dies ist in den Werkstätten und bei den Prüforganisationen allgemein bekannt und wird daher bei Inspektionen und den Hauptuntersuchungen überprüft.

Das Bremspedal hingegen gilt als eigensicher. Das bedeutet, dass dieses innerhalb der festgesetzten Fahrzeuglebensdauer nicht ausfallen darf. Reklamationen im Bereich des Bremspedals gibt es jedoch auch, wobei sich diese meist auf nicht funktionierende Bremslichterschalter, schwergängige Pedale oder Geräusche bei der Pedalbetätigung beschränken.

Da zu den genannten Bauteilen keine Garantiedaten vorliegen, können diese hier nicht weiter betrachtet werden.

6.2 Ergebnisse für Daten des KBA

Die Daten, die zu Bremssystemen beim Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) erhältlich sind, sind stark eingeschränkt. Es liegt lediglich eine Einteilung der Fehler in fünf Alterklassen vor. Um dennoch die Bremsenmängel detaillierter aufzubereiten, wurde die Annahme getroffen, dass die Verteilung der Bremssystemfehler der Verteilung aller Fehler entspricht. Diese Anteile sind wie folgt aufgeteilt:

- 64,14 % geringe Mängel (GM),
- 35,75 % erhebliche Mängel (EM) und
- 0,11 % (=1.100 ppm) verkehrsunsichere Mängel (VU).

Für die einzelnen Jahre können somit für die unterschiedlichen Mängelklassen in Abhängigkeit vom Alter die kumulierten Ausfallanteile bestimmt werden. In Tabelle 6-4 ist solch eine Einteilung für das Jahr 2006 zusammengestellt.

Tabelle 6-4: Anteile der Bremsenmängel an allen untersuchten Pkw, kumuliert; Jahr 2006

Alter der untersuchten Kfz	F(t) gesamt [ppm]	F(t) geringe Mängel [ppm]	F(t) erhebliche Mängel [ppm]	F(t) verkehrsunsicher [ppm]
< 3 Jahre	10.282,57	7.739,51	2.539,64	3,42
< 5 Jahre	30.858,35	22.490,72	8.356,68	10,94
< 7 Jahre	66.884,41	47.187,94	19.665,99	30,49
< 9 Jahre	115.377,26	78.604,82	36.705,85	66,59
über 9 Jahre	272.529,14	174.802,15	97.432,23	294,75

Besonders wichtig sind die Werte der letzten Spalte aus obiger Tabelle. Sie geben den Anteil der Fahrzeuge an, die so gravierende Mängel haben, dass eine Weiterfahrt untersagt wird. Werden also alle Fahrzeuge betrachtet, so haben ca. 295 ppm aller untersuchten Pkw einen verkehrsunsicheren Mangel. Dies bedeutet, dass bei 46.569.657 im Jahr 2006 zugelassenen Pkw 13.726 Fahrzeuge einen Mangel am Fahrzeug aufwiesen, der im schlimmsten Fall zu einem ungebremsten Fahrzeug führen würde.

Mit Hilfe der ermittelten Stützstellen für die Altersklassen können für die Mängelklassen zeitabhängige Parameter angepasst werden. Zur Parameterschätzung wird die Methode der kleinsten Quadrate angewandt, deren Umsetzung z. B. in Excel leicht möglich ist.

Folgendes Diagramm (siehe Bild 6-2) dient als graphisches Beispiel für die Ermittlung der Parameter:

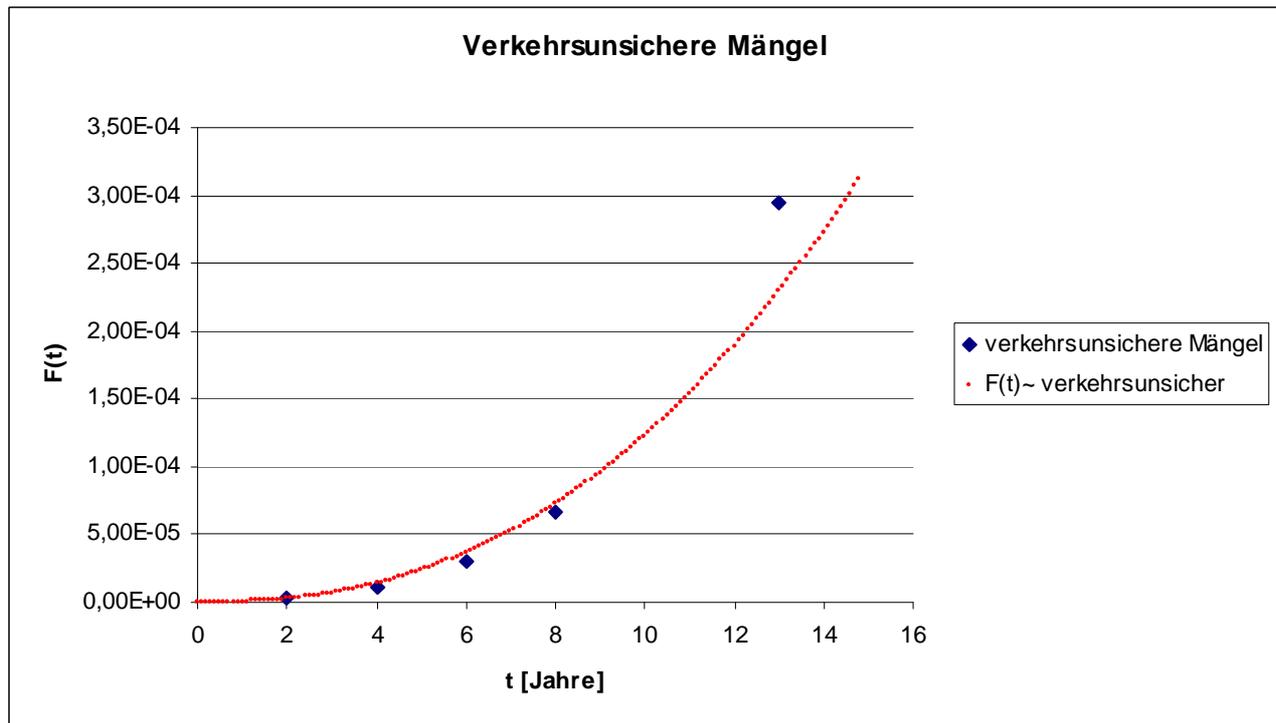


Bild 6-2: Zeitliches Ausfallverhalten von Bremssystemen für verkehrsunsichere Mängel; Jahr 2006

Die blauen Rauten stellen die Ausfallanteile an allen untersuchten Pkw bezogen auf die jeweilige Altersklasse dar. Für die x-Werte wurden folgende Annahmen getroffen:

In der ersten Altersklasse besteht eigentlich die Pflicht einer Hauptuntersuchung nach 3 Jahren. Allerdings gibt es viele Fälle, in denen beim Autoverkauf die Hauptuntersuchung verfrüht durchgeführt wird, wie es häufig bei Jahreswagen geschieht. Daher wird hier der Bezugswert auf 2 Jahre gesetzt.

Für die nächsten drei Alterklassen wird jeweils die Intervallmitte gewählt.

Für die letzte Altersklasse wird eine Annahme auf Grundlage der durchschnittlichen Bestandteile für Pkw (siehe Tabelle 6-5) getroffen. Da bei einer Fahrzeuglebensdauer von 13 Jahren der Anteil der Fahrzeuge an den ehemals zugelassenen Fahrzeugen unter 50 % gefallen ist, wird dieser Wert als mittleres Alter dieser Klasse gewählt. Eine Verschiebung des Wertes auf 14 Jahre könnte auch getroffen werden, was aber dazu führt, dass der Ausfallanteil zeitlich verschoben und somit das Bremssystem positiver abgebildet wird, als bei einer 13jährigen Bezugsgrundlage.

Tabelle 6-5: Durchschnittliche Bestandsanteile für Pkw /VDA 96/

Alter [Jahre]	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Anteil [%]	100,0	99,9	99,5	98,7	97,6	96,2	94,4	91,6	87,7

Alter [Jahre]	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Anteil [%]	81,9	74,5	65,8	56,2	45,8	35,8	26,1	18,6	12,6

Die Ergebnisse der Analysen für die Erfassungsjahre und über alle Mängelklassen sind in nachfolgender Tabelle 6-6 zusammengestellt.

**Tabelle 6-6: Zusammenstellung der Weibull-Parameter für das Ausfallverhalten der jeweiligen Mängelklasse;
Maßeinheit: Jahr**

Mängel	gering		erheblich		verkehrsunsicher	
	β	α	β	α	β	α
2001	1,401	4,75E-03	1,619	1,52E-03	1,879	2,54E-06
2002	1,374	5,15E-03	1,605	1,66E-03	1,852	2,71E-06
2003	1,459	4,35E-03	1,675	1,54E-03	1,932	2,28E-06
2004	1,617	3,01E-03	1,840	1,03E-03	2,085	1,58E-06
2005	1,653	2,81E-03	1,898	8,71E-04	2,187	1,07E-06
2006	1,725	2,24E-03	1,988	5,91E-04	2,377	5,15E-07

Der Tabelle kann entnommen werden, dass sich der Parameter β im Laufe der Jahre leicht erhöht und der Parameter α verringert hat. Dies bedeutet für die Fahrzeuge, dass in den ersten Jahren die Mängelhäufigkeit in allen Klassen über die Jahre sank, aber auch, dass bei den älteren Fahrzeugen die Mängelhäufigkeiten stärker stiegen.

Hierzu ist aber anzumerken, dass auch das Alter der Fahrzeuge innerhalb des Untersuchungszeitraumes messbar zugenommen hat. So stieg beispielsweise das durchschnittliche Alter aller Fahrzeuge von 7,1 Jahren im Jahr 2001 um ein Jahr auf 8,1 Jahre für das Jahr 2006. Einhergehend hiermit ist die Tatsache, dass sich der Anteil der Fahrzeuge mit einem Alter über 9 Jahren von 32,6 % im Jahr 2001 auf 40,0 % im Jahr 2006 erheblich erhöht hat.

6.3 Ergebnisse für Daten der Prüforganisationen

Als Grundlage für die Daten der Prüforganisationen sind von der Gesellschaft für Technische Überwachung mbH (GTÜ) anonymisierte Daten aus den gesetzlich vorgeschriebenen Hauptuntersuchungen zur Verfügung gestellt worden. Die Daten der GTÜ eignen sich besonders gut für einen Überblick, da mit einer deutschlandweiten Erfassung und einem Marktanteil von 13 % bis 15 % wenige Annahmen getroffen werden müssen. Die Datenbasis umfasst 4.435.489 Einträge zu Bremsenmängel bei 2.630.855 Pkw und stammt aus dem Zeitraum 04/2003 bis 03/2008, in dem insgesamt 11.486.998 Mio. Hauptuntersuchungen von der GTÜ durchgeführt wurden.

Die folgende Tabelle 6-7 zeigt eine erste Übersicht der erfassten Bremsenmängel und deren Schwerebewertung.

Tabelle 6-7: Übersicht der Bremsenmängel für den Zeitraum 04/2003 bis 03/2008

Übersicht Bremsenmängel				
Bremsenmängel	2.930.910		Pkw mit Bremsenmangel	
Untersuchte Pkw	11.486.998		2.630.855	
Mangel	gering	erheblich	verkehrs- unsicher	gesamt
Anzahl	1.365.594	1.564.271	1.045	2.930.910
Anteil an Bremsenmängeln [ppm]	465.928	533.715	357	1.000.000
Anteil an untersuchten Pkw [ppm]	118.882	136.178	91	255.150

Die übrigen 1.504.579 Bremsenmängel wurden unter der Schwerebewertung „ohne Mangel“ eingetragen, da sie zum Erfassungszeitpunkt keine Auswirkung auf das Bremssystem oder dessen Funktion hatten. Ein möglicher Fehlereintrag bei dieser Bewertung ist Flugrost an den Bremsleitungen.

Die Daten der verkehrsunsicheren Mängel sind für die Untersuchung besonders interessant, da bei einem solchen Mängleintrag die Weiterfahrt untersagt wird. In der folgenden Tabelle 6-8 sind alle Mängleinträge zu den verkehrsunsicheren Mängeln mit einer Zuordnung zur betroffenen Fahrzeugkomponente enthalten.

Tabelle 6-8: Verkehrsunsichere Mängel und Fahrzeuge mit Baugruppenzuordnung

KBA-Nr.	Baugruppe	Mängel	Fahrzeuge
102	Betriebsbremsanlage vorn - Wirkung/Funktion	189	93
103	Betriebsbremsanlage hinten - Wirkung/Funktion	712	674
114	Hauptbremszylinder / Geberzylinder	106	92
128	Bremsscheibe(n)	35	34
	Bremstrommel(n)	3	3
Gesamtergebnis		1.045	896

Aus der obigen Tabelle ist zu entnehmen, dass 896 Fahrzeuge zusammen 1.045 verkehrsunsichere Mängel aufwiesen. Das bedeutet, dass mehrere Fahrzeuge zwei oder mehr Mängel hatten, was aber bei Bremssystemen nicht ungewöhnlich ist. Bezogen auf die untersuchten Pkw bedeutet das, dass ca. 78 ppm aller untersuchten Fahrzeuge einen verkehrsunsicheren Bremsenmangel haben.

Bei der Betrachtung der Daten der verkehrsunsicheren Mängel auf das Fahrzeugalter hin ist festzustellen, dass der Anteil der Fahrzeuge über 9 Jahre maßgeblich für die Fehlereinträge verantwortlich ist (siehe Tabelle 6-9). Es haben insgesamt 90,80 ppm der in den Hauptuntersuchungen begutachteten 11.486.998 Fahrzeuge einen verkehrsunsicheren Bremsenmangel.

Tabelle 6-9: Altersabhängige Auftretenswahrscheinlichkeit F(t) der verkehrsunsicheren Mängel

Alter der untersuchten Kfz	F(t) verkehrsunsicher [ppm]
< 3 Jahre	0,70
< 5 Jahre	1,48
< 7 Jahre	4,00
< 9 Jahre	9,58
≥ 9 Jahre	90,80

Die Gesamtanzahl an verkehrsunsicheren Mängeln für die Fahrzeuge ab neun Jahren beträgt 935.

Für das Bremspedal sind 24 Einträge als erheblicher Mangel mit der Fehlerbeschreibung „ausgeschlagen“ vorhanden. Wären diese Fehler nicht entdeckt worden, so hätte es folglich zu einem Totalversagen kommen können. Für die Ausfälle des Bremspedals, die ein unsicheres Systemverhalten zur Folge haben, berechnet sich die konstante Ausfallrate $\lambda_{\text{Bremspedal;unsicher}}$ dann mit Bezug auf die untersuchten Fahrzeuge zu:

$$\lambda_{\text{Bremspedal;unsicher}} = \frac{24}{11.486.998} \approx 2,09 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}$$

Bei der Auswertung aller Pedalfehler ist es möglich, das Zuverlässigkeitsprognosemodell zu nutzen. Allerdings treten weitere Effekte in den Daten auf, so dass nur die Anwendung eines Teilpopulationsmodells befriedigende Ergebnisse liefert. Für Erläuterungen zum Teilpopulationsmodell sei auf /Mey 03/ verwiesen. Die km-abhängigen Zuverlässigkeitskenngrößen haben dann folgenden Verlauf (Bild 6-3):

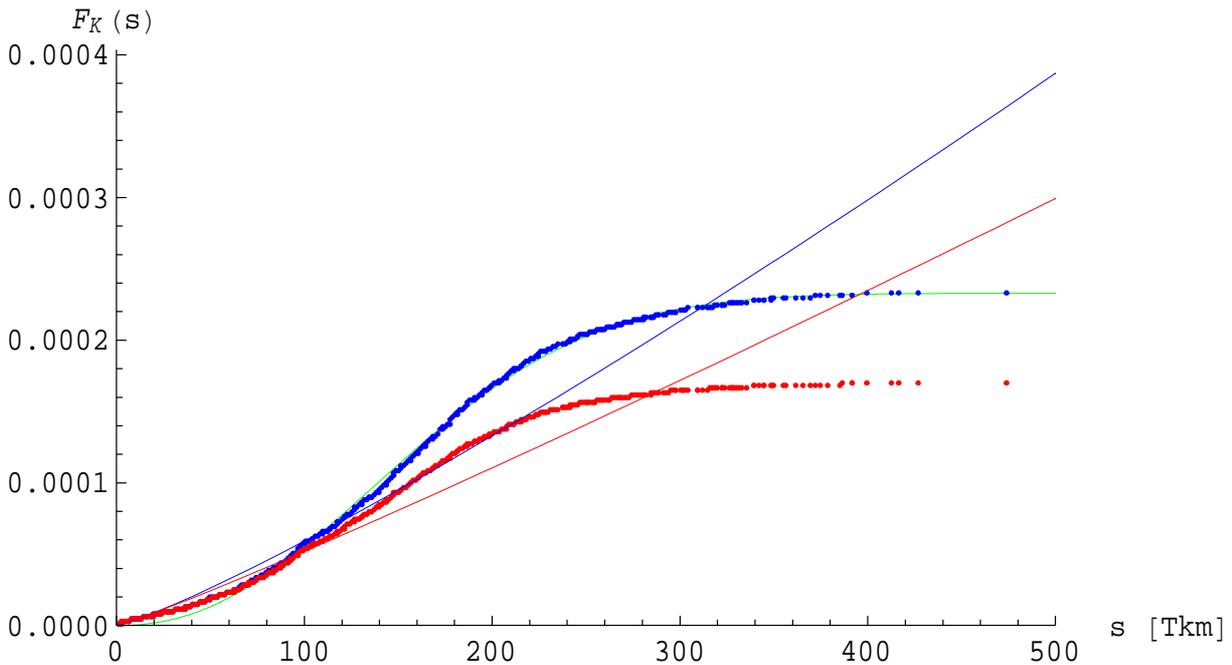


Bild 6-3: Km-abhängige Ausfallwahrscheinlichkeiten (unkorrigiert / korrigiert) für das Bremspedal

Es wird deutlich, dass die Anpassungen mit einer 2-parametrischen Weibull-Verteilung an die empirischen unkorrigierten (rot) und korrigierten Daten (blau) den realen Verlauf nicht zufrieden stellend beschreiben. Die Verteilung mit Hilfe eines Teilpopulationsmodells liefert eine sehr gute Anpassung (grüne Linie). Allerdings ist nicht erklärbar, warum nur eine Teilmenge der Fahrzeuge von den Fehlern betroffen sein sollte, da es sich um sämtliche Bremspedalfehler aller untersuchten Fahrzeugtypen handelt.

Die empirisch aufgetragene zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ für das Bremspedal liefert folgenden Graphen (siehe Bild 6-4):

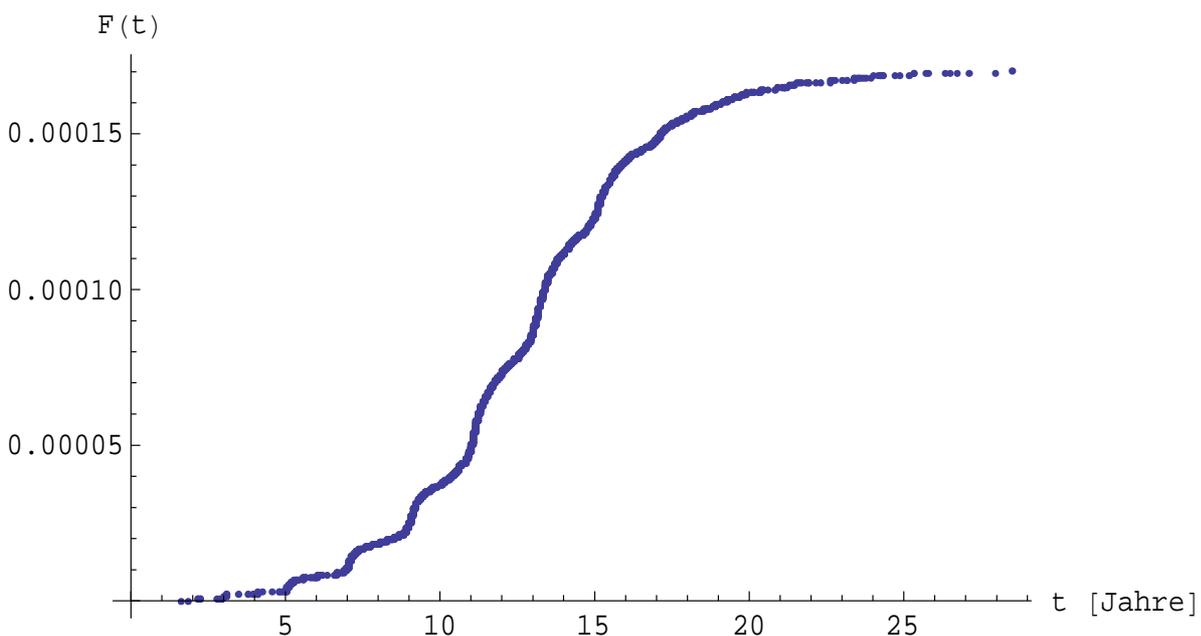


Bild 6-4: Zeitabhängige empirische Ausfallwahrscheinlichkeit für das Bremspedal

Auch hier ist deutlich der s-förmige Verlauf wie bei den km-abhängigen Zuverlässigkeitskenngrößen zu sehen. Allerdings wird anhand dieses Graphen deutlich, dass Probleme mit dem Bremspedal besonders bei älteren Fahrzeugen auftreten. Die Wahrscheinlichkeit, einen Mangel am Bremssystem innerhalb der Fahrzeuglebensdauer von $t=15$ Jahren zu haben ist mit 123 ppm doch relativ gering.

Darüber hinaus betreffen die meisten Fehlereinträge ein schwergängiges Pedal oder einen zu geringen Leerweg des Pedals. Diese Fehler führen aber nicht direkt dazu, dass eine Bremsung unmöglich ist. Unter der Annahme, dass der Verlauf der 24 kritischen Fehler („ausgeschlagen“) sich identisch verhält, so ist die Auftretenswahrscheinlichkeit bei $t=15$ Jahre ungefähr 1,51 ppm.

Es ist allerdings nicht möglich, diesen Wert mit den oben genannten sicherheitskritischen zu vergleichen. Die Annahme zu obigem Wert, dass die Ausfälle pro Jahr identisch sind, ist bei Bremspedalen nicht zutreffend. Diese benötigen eine gewisse Zeit und erhebliche Belastungen, damit sie ausgeschlagen sind, so dass ein konstantes Ausfallverhalten über die Zeit als nicht realistisch erscheint.

Mit den vorhandenen Daten sollten keine direkten zeitlichen Prognosen durchgeführt werden. Wie in Bild 6-4 sehr gut zu erkennen ist, entstehen bei der direkten zeitlichen Auswertung Plateaus, welche vor allem bei Fahrzeugen bis ca. 12 Jahren deutlich abgesetzt sind und mit zunehmendem Alter schwächer werden. Diese Erscheinungen, die mögliche Parameterschätzungen erheblich verfälschen können, haben einen trivialen Grund:

Die Prüfungszyklen zur Hauptuntersuchung starten bei privaten Pkw nach 3 Jahren. Anschließend muss ein Fahrzeug in der Regel alle 2 Jahre zur Hauptuntersuchung. Mit der Zeit kann es Verschiebungen geben, wenn z. B. für einen Autoverkauf die Hauptuntersuchung verfrüht durchgeführt wird. Dennoch zeichnen sich diese Intervalle deutlich ab, da dazwischen die Fahrzeuge in der Regel nicht geprüft werden.

Ein weiteres Problem bei den Daten besteht darin, dass im privaten Bereich während der ersten drei Jahre keine Untersuchungen stattfinden. D. h. für diesen Zeitraum liegen in der Regel bei den Prüforganisationen keine vollständigen Daten vor. Allerdings eignen sich die Daten besonders für Auswertungen der Komponenten, die ein altersbedingtes Ausfallverhalten zeigen.

6.4 Ergebnisse für Daten des ADAC

Die Pannendaten des ADAC zu Bremssystemmängeln, deren Anzahl in der Tabelle 6-10 für die Jahre 2000 bis 2006 aufgeführt sind, sind mit 123.553 erfassten Einträgen im Vergleich zu den Daten des GTÜ sehr gering. Dennoch sollten auch diese Daten mit betrachtet werden, da diese Fehler zusätzlich zu den in den Daten der Prüforganisationen entstehen.

Tabelle 6-10: Anzahl erfasster Pannen des ADAC aufgrund von Bremsenmängeln für die Jahre 2000 bis 2006

Jahr	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Gesamt
Anzahl Daten	15.345	15.711	17.620	15.886	17.078	20.640	21.273	123.553

Es ist davon auszugehen, dass die Fehler, die vom ADAC erfasst werden, so gravierend sind, dass eine Weiterfahrt in der Regel nicht möglich oder gewollt ist. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass die Erfassung aller schweren Fehler vollständig ist, da z. B. viele Autofahrer mit einer leuchtenden ABS-Warnlampe weiterfahren, weil das Fahrzeug evtl. der Empfindung nach noch ordnungsgemäß bremst. Diese Fehler werden dann vermutlich in einer Werkstatt abgestellt.

Die Fahrzeuge mit einer Panne aufgrund von Bremsenmängeln werden teilweise nicht vor Ort sondern ebenfalls in einer Werkstatt repariert. Hier besteht also die Möglichkeit der erneuten Erfassung der Fehler, was aber nicht unbedingt zu erwarten ist.

Auszuschließen ist die Erfassung dieser Fehler bei den Hauptuntersuchungen, da anzunehmen ist, dass diese direkt nach Auftreten der Panne behoben werden.

Im Weiteren werden die Auswertungen der ADAC-Daten exemplarisch für das Jahr 2006 vorgestellt. Die Anteile der Bauteile, die bei den Pannen als Ursache ermittelt wurden, sind in folgender Tabelle 6-11 dargestellt.

Tabelle 6-11: Anteile der Bauteile an den vom ADAC erfassten Pannen für das Jahr 2006

Bauteil	Anzahl Pannen	Anteil [%]
Bremse hinten	4.721	22,19
Handbremse	4.333	20,37
Bremsbeläge, -klötze hinten	3.036	14,27
Bremse vorne	1.374	6,46
Anti Blockier System	1.158	5,44
Bremsbeläge, -klötze vorne	848	3,99
Bremsscheibe vorne/hinten	800	3,76
Bremsanlage	760	3,57
Bremssattel, Radbremszylinder hinten	740	3,48
Bremstrommel vorne/hinten	681	3,20
Bremssattel, Radbremszylinder vorne	622	2,92
Handbremsseil	525	2,47
Bremsflüssigkeit/Vorratsbehälter	317	1,49
Handbremshebel, Arretierung	262	1,23
Bremskraftverstärker, pneumatisch	183	0,86
Bremsschlauch	149	0,70
Handbremse, automatische Nachstellung	149	0,70
Flüssigkeitsstand-Warnerichtung	103	0,48
Bremskraftverstärker-Vakuumpumpe	102	0,48
Hauptbremszylinder	99	0,47
Bremspedal	96	0,45
Bremsleitung	95	0,45
Verschleißanzeige	70	0,33
Bremse-Anhänger	17	0,08
Bremskraftverstärker, hydraulisch	11	0,05
Bremskraftverstärker, Hydropumpe	10	0,05
Bremsseil (Motorrad)	6	0,03
Kompressor-Druckluftbremse	6	0,03

Der Hauptanteil der Ausfälle betrifft mit ca. 57 % die drei Panneneinträge „Bremse hinten“, „Handbremse“ und „Bremsbeläge, -klötze hinten“. Anhand der sehr allgemein gehaltenen Bezeichnung der Fehlereinträge ist erkennbar, dass dort sehr viele nicht genau einstuftbare Fehler eingetragen sind. Dies kann daran liegen, dass der Pannenhelfer vor Ort die Panne bewerten und einordnen muss. Eine genaue Fehlerlokalisierung ist häufig erst anschließend in der Werkstatt möglich. Eine Korrektur des Eintrags wird jedoch beim ADAC nicht mehr vorgenommen.

Für die weitere Analyse werden die Fehler, die nicht von Pkw verursacht werden, wie beispielsweise „Bremse-Anhänger“, und solche, die die Feststellbremse betreffen, nicht berücksichtigt. Nach Filterung dieser Daten bleiben 15.975 Einträge, welche der Pkw-Betriebsbremse zugeordnet sind. Bei 46.569.657 zugelassenen Pkw in 2006 ist dies ein Mängelanteil von 343 ppm. Allerdings konnten aufgrund technischer Gegebenheiten nur Fahrzeuge bis zu einem Alter von zehn Jahren aus der Datenbank ausgelesen werden, wodurch nur Fahrzeuge ab dem Zulassungsjahr 1997 erfasst sind. Der Anteil der Fahrzeuge im betrachteten Jahr, die ab 1997 zugelassen wurden, betrug 30.764.168 Fahrzeuge. Somit muss der Mängelanteil auf diese Grundgesamtheit bezogen werden und beträgt damit schon 519,3 ppm.

Der Anteil der Pannen, die durch das ABS hervorgerufen wurden, ist mit 1.158 Einträgen der vierthäufigste Fehler (7,2 %). Allerdings sind die Einträge nicht weiter auszuwerten, da bereits 973 Einträge mit „kein Detail“ beschriftet sind. Wird davon ausgegangen, dass durch die Fehler das Antiblockiersystem (ABS) und die elektronische Bremskraftverteilung (EBV) nicht mehr verfügbar waren, so berechnet sich die Ausfallrate für das Steuergerät $\lambda_{ABS-SG+HU}$ zu:

$$\lambda_{ABS-SG+HU} = \frac{1.158}{30.764.168} \approx 37,6 \frac{ppm}{Jahr}.$$

Erstaunlich ist, dass die hinteren Radbremsen für einen großen Teil der Pannen verantwortlich sind.

Die ADAC-Daten sind für abgesicherte Auswertungen nur bedingt verwertbar. Ein großes Problem bei den Daten ist darin begründet, dass es sich um Pannendaten handelt. Diese Pannen können unterschiedliche Gründe haben:

- es handelt sich um einen nicht vorhersehbaren, unerwarteten Fehler,
- mangelnde Wartung, so dass mit einem Ausfall jederzeit gerechnet wird,
- Anzeige eines Fehlers, Empfindungen oder Geräusche, so dass vorsichtshalber der ADAC gerufen wird.

Bei der Betrachtung der obigen Tabelle finden sich jedoch sehr viele Bauteile, die gemäß der Serviceanleitung einer Wartung und der regelmäßigen Kontrolle des Halters unterliegen. Ohne diese Bauteile bleiben für das Jahr 2006 noch 3.884 Einträge für Komponenten, die vom Nutzer als „lebensdauerfest“ angesehen werden (Tabelle 6-12), übrig.

Tabelle 6-12: Bauteile ohne regelmäßige Wartung

Bauteil	Anzahl Pannen
Anti Blockier System	1.158
Bremsanlage	760
Bremssattel, Radbremszylinder hinten	740
Bremssattel, Radbremszylinder vorne	622
Bremskraftverstärker, pneumatisch	183
Flüssigkeitsstand-Warneinrichtung	103
Bremskraftverstärker-Vakuumpumpe	102
Hauptbremszylinder	99
Bremspedal	96
Bremskraftverstärker, hydraulisch	11
Bremskraftverstärker, Hydropumpe	10
Gesamt	3.884

Diese Einträge können als wirkliche Ausfälle betrachtet werden, da die Komponenten im normalen Betrieb ein Fahrzeugleben lang halten sollten. Bezogen auf alle Fahrzeuge entspricht dies einem Mängelanteil von 126,3 ppm. Allerdings kann diese Einschränkung zu verzerrten Ergebnissen führen, da auch in den anderen Einträgen plötzliche Ausfälle enthalten sein können.

Besonders zu betrachten sind die Einträge zum Pedal, da diese besonders sicherheitskritisch sind. Die Einträge staffeln sich wie folgt:

- ausgehängt/blockiert: 16,
- gelöst/locker: 3,
- sonstige: 77.

Bei den ersten beiden Punkten wurden nur Einträge gewertet, die direkt auf das Pedal und nicht auf den Bremslichtschalter bezogen sind.

Somit sind bei 16 Pannen Fehlerbeschreibungen eingetragen, die ein ungebremstes Fahrzeug zur Folge haben können. Bei weiteren drei Fehlern stand das Bremspedal jeweils kurz vor einem Totalausfall. Durch die Fehlerbeschreibung „gelöst/locker“ werden diese aber lediglich als Komfortfehler gewertet. Von den verbliebenen 77 Einträgen betrifft der Großteil den Bremslichtschalter, der mit Sicht auf die eigentliche Bremsfunktionalität ebenfalls nicht relevant, jedoch für die Gesamtsicherheit im Straßenverkehr von großer Bedeutung ist.

Wird ein gleich bleibendes Ausfallverhalten angenommen, so berechnet sich die konstante Ausfallrate $\lambda_{\text{Bremspedal; unsicher}}$ bei Pedalfehlern, die zu einem unsicheren Fahrzeug führen können, zu:

$$\lambda_{\text{Bremspedal; unsicher}} = \frac{16}{30.764.168} \approx 0,52 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}$$

Die konstante Ausfallrate für alle Fehler und somit auch für die Zuverlässigkeit des Bremspedals

$\lambda_{\text{Bremspedal}; \text{ges}}$ ist:

$$\lambda_{\text{Bremspedal}; \text{ges}} = \frac{96}{30.764.168} \approx 3,12 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}.$$

Diese Werte, sowohl für die Sicherheit als auch für die Zuverlässigkeit, sind für ein sicherheitskritisches Bauteil ohne Redundanz sehr hoch. Der in der Industrie angesetzte Wert für die Ausfallrate des Bremspedals $\lambda_{\text{Bremspedal}; \text{Industrie}}$ für Totalversagen beträgt:

$$\lambda_{\text{Bremspedal}; \text{Industrie}} = 0,001 \frac{\text{ppm}}{\text{Jahr}}$$

und ist damit um einige Größenordnungen kleiner, als der mit den ADAC-Daten ermittelte Wert. Da die Einträge des ADAC zum Bremspedal jedoch nicht weiter aufgeschlüsselt werden können, kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass es zu Veränderungen am Bremspedal und deren Aufhängung z. B. durch unsachgemäße Reparaturen gekommen ist. Daher wird für die späteren Modellberechnungen der Wert aus der Industrie verwendet.

Allerdings ist die Tatsache, dass die Einträge für Bremspedale beim ADAC von 40 Einträgen im Jahr 2000 auf 96 Einträge im Jahr 2006 gestiegen sind, sehr kritisch zu sehen. Während sich die Mitgliederanzahl im ADAC nur geringfügig erhöht hat, ist die Anzahl der Bremspedalfehler um mehr als das Doppelte gestiegen. Dies kann mehrere Gründe haben, die jedoch nicht zurückverfolgt werden können. Eine Möglichkeit dieses Anstiegs könnte durch die Verschlechterung der Bremspedalqualität zu erklären sein. Dies ist jedoch nicht anzunehmen, da sich die Konstruktion der Pedale und der Materialzusammensetzung nicht erheblich verändert hat. Die zweite These basiert darauf, dass die Autofahrer in den letzten Jahren stärker auf die eigene Sicherheit achten und damit auch Veränderungen am Bremssystem bewusster wahrnehmen. Es könnte aber ebenso gut eine Verschiebung dahin gegeben haben, dass die Autofahrer aufgrund der gestiegenen Kosten für den Unterhalt eines Fahrzeugs, Fehler oder Veränderungen an diesem solange ignorieren und nicht Instand setzen lassen, bis es zum Totalausfall kommt. Ein weiterer Erklärungsansatz basiert auf dem generell steigenden Alter der Fahrzeuge, wodurch beim Bremspedal Ermüdungserscheinungen auftreten. Diese Möglichkeiten können anhand der Daten aber nicht hinterlegt werden, weshalb dieser Effekt genauer betrachtet werden sollte.

Entsprechend den Daten der Zulieferer kann theoretisch auch für die ADAC-Daten das Zuverlässigkeitsprognosemodell verwendet werden. Dieses muss allerdings angepasst werden, da die Daten nicht auf die Garantiezeit beschränkt sind. Allerdings ist nach der bisherigen Beurteilung der Informationszugewinn zu gering, da sehr viele Einflüsse auf die Daten mit berücksichtigt werden müssten, was aber nicht möglich ist.

7 Sicherheits- und Zuverlässigkeitsmodelle

Im Folgenden werden die erstellten Sicherheits- und Zuverlässigkeitsmodelle vorgestellt. Die Komponentenwerte, die auf Grundlage der Zuliefererdaten ermittelt wurden, bilden, soweit möglich, die Datenbasis dieser Modelle. Der Hintergrund hierzu ist die praxisnahe Anwendbarkeit des Modells, die möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess eine Abschätzung der Zuverlässigkeit ermöglichen soll. Da die bisherige Weiterentwicklung der Bremssysteme häufig auf Grundlage bekannter Komponenten erfolgte, können für die Abschätzungen neuer Systeme die ermittelten Werte für ähnliche Komponenten herangezogen und bei Bedarf angepasst werden.

Da ein neues Bremssystem nicht unsicherer sein darf als das Vorgängersystem, kann darüber hinaus ermittelt werden, welche Zuverlässigkeit die neuen Komponenten mindestens haben müssen.

Die folgenden Analysen zeigen einen hardware- und einen funktionsbasierten Analyseansatz, der bei den jeweiligen Modellen beschrieben wird. Bei allen Modellen gilt, dass die menschliche Zuverlässigkeit nicht berücksichtigt wird. Dies schließt z. B. Fehler aus, die durch Wartungsarbeiten in der Werkstatt entstehen.

7.1 Hardwarebasierter Ansatz

Die Zuverlässigkeit eines Systems wird vom Endverbraucher danach bewertet, wie oft es Fehler im System gibt. Auch in der Systemzuverlässigkeit wird jeder Fehler, der zu einer Reklamation geführt hat, als „Ausfall“ betrachtet.

Für Entwickler ist es darüber hinaus äußerst wichtig zu wissen, welche Funktionen wie häufig oder mit welcher Wahrscheinlichkeit nicht zur Verfügung stehen. Bremssysteme sind in der Regel so ausgelegt, dass „unwichtige“ Zusatzfunktionen bei kleinsten Störungen abgeschaltet werden, um wichtige Funktionen, wie ABS und EBV, nicht zu gefährden. Allerdings führt eine Funktion, die regelmäßig nicht zur Verfügung steht, beim Endkunden zur Verärgerung. Es muss also in der frühen Entwicklungsphase abgeschätzt werden, ob eine vorgegebene Zuverlässigkeit der gewünschten Funktionen mit den dazu benötigten Komponenten realisierbar ist.

Zuverlässigkeitsmodell für das Gesamtsystem

Das nachfolgend beschriebene und verwendete Systemzuverlässigkeitsmodell ist das einfachste, in der Zuverlässigkeitstechnik bekannte Zuverlässigkeitsmodell. Unter der Annahme

„Der Ausfall einer beliebigen Komponente führt zum Ausfall des Systems“

kann das System mit seinen n Komponenten als Seriensystem betrachtet werden.

Diese Annahme wird getroffen, da davon auszugehen ist, dass der Fahrzeugbesitzer Mängel an der Bremse, sobald er sie bemerkt, selber behebt oder in der Werkstatt beheben lässt. Besonders in der Garantiezeit wird der Fahrzeugbesitzer mit nahezu allen Fehlern die Werkstatt aufsuchen, um Garantieansprüche geltend zu machen und den Mangel kostenfrei abstellen zu lassen.

Zu den Fehlern werden alle Reklamationen und Auffälligkeiten gezählt, ohne dass eine Bewertung der Fehler erfolgt. Hierzu kann z. B. auch eine quietschende Bremse gehören, welche aus sicherheitstechnischer Sicht ungefährlich ist.

Die Systemüberlebenswahrscheinlichkeit $R_{\text{Sys}}(t)$ des Seriensystems berechnet sich aus dem Produkt der Überlebenswahrscheinlichkeiten $R_i(t)$ der n Komponenten

$$R_{\text{Sys}}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (7-1)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $F_{\text{Sys}}(t)$ des Systems lässt sich durch Komplementbildung mit $R_i(t) = 1 - F_i(t)$ bestimmen, wobei $F_i(t)$ die Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente i ist:

$$F_{\text{Sys}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i(t)). \quad (7-2)$$

Da bei der Ermittlung des Ausfallverhaltens der Komponenten die Weibull-Verteilung mit einem Teilpopulationsmengenanteil w nach Gleichung (5-11) zugelassen wird, gilt für die Ausfallwahrscheinlichkeit $F_i(t)$ der i -ten Komponente mit den zugehörigen Parametern α_i , β_i und w_i :

$$F_i(t) = w_i \left(1 - e^{-\alpha_i t^{\beta_i}} \right). \quad (7-3)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit des gesamten Systems $F_{\text{Sys}}(t)$ ist dann gegeben durch:

$$F_{\text{Sys}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - w_i \left(1 - e^{-\alpha_i t^{\beta_i}} \right) \right), \quad (7-4)$$

mit $w_i = 1$, wenn der Fehler die Grundgesamtheit betrifft.

Auch Komponenten, deren Ausfallverhalten durch eine Exponentialverteilung ohne Teilpopulationsanteil beschrieben ist, können einfach berücksichtigt werden. Hierbei entspricht der Parameter λ der Exponentialverteilung dem Parameter α der Weibull-Verteilung und für die beiden Parameter w und β gilt: $w_i = \beta_i = 1$.

Sollte das Ausfallverhalten einer Komponente durch die Exponentialverteilung vorgegeben sein, so ist jedoch zu prüfen, ob diese das reale Ausfallverhalten im Feld ausreichend genau beschreibt.

Für die weiteren Gleichungen ist zu beachten, dass teilweise der Einfachheit halber die Überlebenswahrscheinlichkeiten $R_i(t)$ durch die entsprechenden p_i ohne den Zeitparameter ersetzt wurden, wobei der Index i für eine Komponente, das betrachtete System oder auch für eine Funktionsbeschreibung stehen kann. Analog zu $R_i(t)$ wurde $F_i(t)$ durch q_i ersetzt.

In der folgenden Tabelle 7-1 ist aufgeführt, welche Komponenten mit der jeweiligen Anzahl für die Berechnungen zum Systemausfallverhalten der konventionellen Bremssysteme mit ABS oder ESP zugrunde gelegt wurden.

Tabelle 7-1: Anzahl der zugrunde gelegten Komponenten im KBS mit ABS oder ESP

	ABS	ESP
Pedal	1	1
THZ	1	1
Reservoir	1	1
Verstärker	1	1
ABS-HU + SG (8 Ventile)	1	
ESP-HU + SG (12 Ventile)		1
DS		1
DRS (YRS)		1
BS (in DRS enthalten)		1
LWS		1
Bremsleitung	6	6
Bremsschlauch	4	4
DF	4	4
Radbremsen	4	4

Da alle Räder gebremst und deren Drehzahlen vom ABS oder ESP erfasst werden, sind die Radbremsen, die Bremsschläuche und die Drehzahlfühler jeweils vierfach aufgeführt. Die Bremsleitungen sind sechsfach erfasst, da es zwei Leitungen vom Tandemhauptbremszylinder zur Hydraulikeinheit und von dort vier Leitungen zu den einzelnen Rädern gibt. Obwohl die Leitungen unterschiedlich lang sind, können sie jedoch als gleichwertig gewertet werden, da nicht die Länge der Leitung für das Ausfallverhalten entscheidend ist, sondern lediglich die Anschlüsse von der Bremsleitung ans Hydraulikaggregat und die Korrosion des Materials insbesondere in Radnähe.

Die Gesamtüberlebenswahrscheinlichkeit für das ABS $p_{Ges,ABS}$ berechnet sich dann nach Gleichung (7-1) aus dem Produkt der Überlebenswahrscheinlichkeiten der Komponenten p_i , wobei der Index i durch den jeweiligen Komponentennamen ersetzt werden muss:

$$P_{Ges,ABS} = P_{Pedal} \cdot P_{THZ} \cdot P_{Re\,servoir} \cdot P_{Booster} \cdot P_{ABS-HU+SG} \cdot P_{Bremsleitung}^6 \cdot P_{Bremssschlauch}^4 \cdot P_{DF}^4 \cdot P_{Radbremse}^4 \quad (7-5)$$

Äquivalent berechnet sich die Gesamtüberlebenswahrscheinlichkeit des ESP $p_{Ges,ESP}$ zu:

$$P_{Ges,ESP} = P_{Pedal} \cdot P_{THZ} \cdot P_{Re\,servoir} \cdot P_{Booster} \cdot P_{ESP-HU+SG} \cdot P_{DS} \cdot P_{LWS} \cdot P_{DRS} \cdot P_{Bremsleitung}^6 \cdot P_{Bremssschlauch}^4 \cdot P_{DF}^4 \cdot P_{Radbremse}^4 \quad (7-6)$$

Die Garantiedaten für die Steuergeräte und Hydraulikeinheiten werden bei der ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG) ebenso wie bei der ESP1-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG) unter einer Bauteilnummer erfasst und können somit nicht gesondert ausgewertet werden. Daher sind diese beiden Komponenten in den Auswertungen zusammengefasst.

Auch der Beschleunigungssensor (BS) ist im DRS verbaut und kann nicht eigenständig analysiert werden. Dies ist aber nicht weiter von Bedeutung, da der BS in dieser Zusammenstellung genau wie der DRS nur im ESP benötigt wird.

Bei der Betrachtung der Gleichung (7-5) fällt auf, dass die Komponenten Radbremse, Bremsleitung, Bremsschlauch und Drehzahlfühler mehrfach in die Berechnung eingehen und somit je nach Ausfallverhalten stärkeren Einfluss auf die Gesamtüberlebenswahrscheinlichkeit ausüben.

Die Radbremsen werden als Scheibenbremsen angenommen und bestehen aus der Bremsscheibe, zwei Bremsbelägen und dem Bremssattel.

Das Langzeitausfallverhalten kann eigentlich für die Radbremsen nicht direkt bewertet werden, da einige Komponenten, wie z. B. die Bremsscheiben und –beläge, einem Verschleiß unterliegen und nicht auf die Fahrzeuglebensdauer ausgelegt sind. Für die Scheibenbremse und deren Beläge wird dennoch ein vereinfachtes konstantes Ausfallverhalten angenommen (siehe Kapitel 6.1).

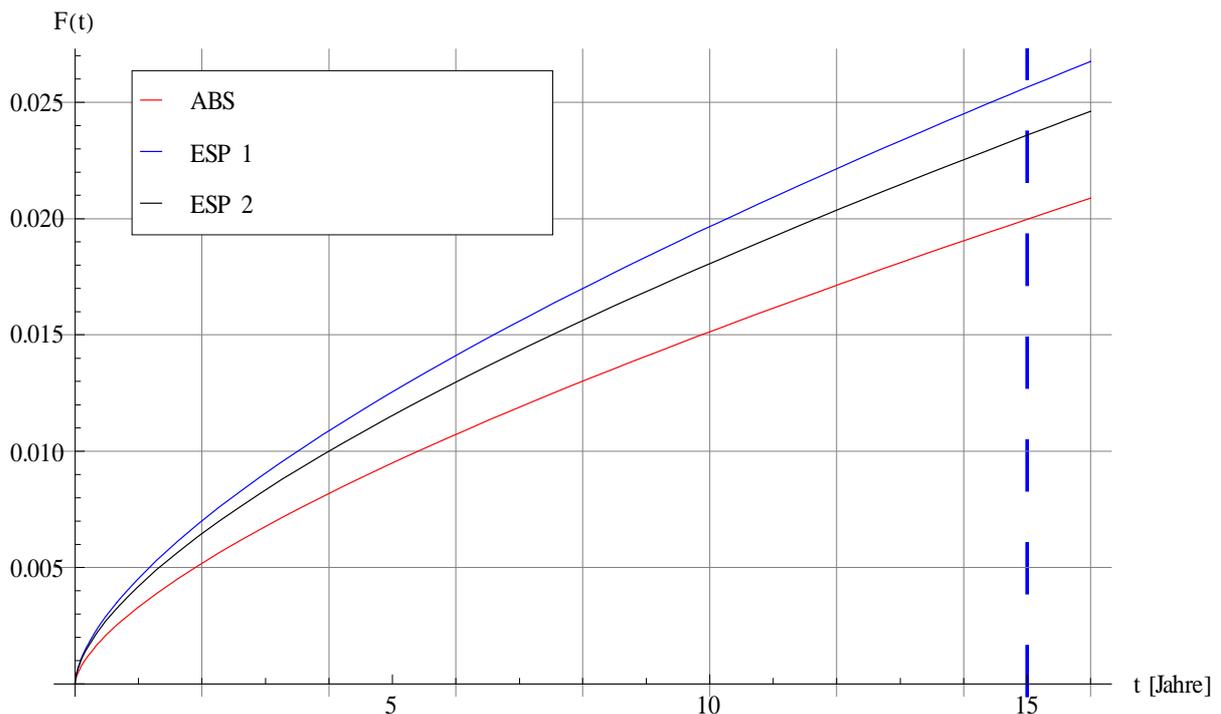
Bei den Komponenten, bei denen die Anwendung des Zuverlässigkeitsprognosemodells sinnvolle Ergebnisse geliefert hat, werden jeweils die Mittelwerte der zeitabhängigen Weibull-Parameter verwendet, die in den Tabellen im Anhang A 2 zu finden sind. Eine Worst-Case-Analyse unter Verwendung der Parameter der jeweils schlechtesten Komponente ist zwar möglich, jedoch nicht sinnvoll. Sie führt dazu, dass das Bremssystem nicht realistisch abgebildet wird.

Die verwendeten Parameter für die Ausfallfunktionen der einzelnen Komponenten, die jeweils eigenständig ermittelt und im Kapitel 6 erläutert wurden, können der Tabelle 7-2 entnommen werden.

Tabelle 7-2: Parameterdaten der im Modell verwendeten Komponenten; Maßeinheit: Jahr

Komponente	α	β
Pedal	1,00E-09	1
THZ	9,45E-04	0,644
Reservoir	1,79E-05	1
Verstärker	3,87E-05	1
ABS-HU+SG	3,28E-04	0,542
ESP1-HU+SG	1,21E-03	0,554
ESP2-HU+SG	8,70E-04	0,494
DS	1,91E-06	1
DRS	2,57E-04	0,589
LWS	9,18E-05	0,631
Bremsleitung	3,00E-06	1
Bremsschlauch	3,00E-06	1
DF	4,41E-04	0,609
Radbremse	4,78E-05	1
- Brems Scheibe	5,68E-06	1
- Bremsattel	9,60E-06	1
- Bremsbelag	3,25E-05	1

Im folgenden Bild 7-1 sind die graphischen Darstellungen der, in den Gleichungen (7-5) und (7-6) beschriebenen Gesamtausfallfunktionen (Ausfallwahrscheinlichkeiten) für ein Bremssystem mit ABS, ESP 1 oder ESP 2 gegeben.

Bild 7-1: Ausfallfunktionen $F(t)$ für Bremssysteme mit ABS, ESP 1 oder ESP 2

Durch die konkaven (rechtsgekrümmten) Verläufe der Graphen (Bild 7-1) ist sehr deutlich sichtbar, dass durch das Frühausfallverhalten einiger Komponenten mit einem $\beta < 1$ das Gesamtsystem jeweils ebenfalls ein Frühausfallverhalten aufweist. Ist der gesamte Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit der Weibull-Verteilung konkav, so ist dies immer dann der Fall, wenn die Ausfallsteilheit $0 < \beta \leq 1$ ist. Dies kann mit Hilfe der zweiten Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Weibull-Verteilung (Gleichung (5-10)) gezeigt werden. Für einen Parameterwert von $\beta > 1$ gilt, dass der Graph der Ausfallwahrscheinlichkeit zuerst konvex (linksgekrümmt) ist, beim Zeitpunkt

$$t = \left(\frac{\beta - 1}{\alpha \beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (7-7)$$

einen Wendepunkt aufweist, und anschließend konkav weiter verläuft.

Die durchgeführten Anpassungen einer Weibull-Verteilung an die Graphen (Bild 7-1) liefert die in der Tabelle 7-3 aufgeführten Parameter.

Tabelle 7-3: Parameter der Verteilungsfunktion für ein vollständiges Bremssystem mit ABS, ESP 1 oder ESP 2; Maßeinheit: Jahr

Parameter	ABS	ESP 1	ESP2
α	3,26E-03	4,49E-03	4,14E-03
β	0,6728	0,6485	0,6470

Zur Parameterbestimmung (Tabelle 7-3) wird eine sehr einfache numerische Anpassung einer zweiparametrischen Weibull-Verteilung durch zwei Punkte des Originalgraphen bei den Zeitpunkten $t_1 = 1 \text{ Jahr}$ und $t_2 = 15 \text{ Jahre}$ durchgeführt. Mit Hilfe der ermittelten Parameter ist der Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeit für die jeweiligen Bremssysteme ausreichend genau beschrieben. So berechnet sich beispielhaft die Ausfallwahrscheinlichkeit $F_{ABS,vollst.}(t)$ des Antiblockiersystems zum Zeitpunkt $t=15 \text{ Jahre}$ mit dem vollständigen Modell nach Gleichung (7-5) zu:

$$F_{ABS,vollst.}(t = 15 \text{ Jahre}) \approx 19.970,3 \text{ ppm} .$$

Die Näherung der Ausfallwahrscheinlichkeit $F_{ABS,Näherung}(t)$ mit den Parametern aus der Tabelle 7-3 unter Verwendung einer Weibull-Verteilung ergibt ebenfalls:

$$F_{ABS,Näherung}(t = 15 \text{ Jahre}) \approx 19.970,3 \text{ ppm} .$$

Dies ist zu erwarten, da die angepasste Verteilungsfunktion den Wert bei $t=15 \text{ Jahre}$ als Stützstelle hat. Die Abweichungen sind generell jedoch so gering, dass diese in einer graphischen Darstellung der beiden Ausfallwahrscheinlichkeiten $F_{ABS,vollst.}(t)$ und $F_{ABS,Näherung}(t)$ nicht sichtbar sind.

Anhand des Graphen für das ABS (Bild 7-1) wird deutlich, dass, basierend auf den Garantiedaten der Zulieferer, bis zu einer Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren bei ca. 2 % der Fahrzeuge ein Fehler am Bremssystem auftreten wird.

Den größten Anteil haben hierbei die Drehzahlfühler. Dies ist jedoch nicht weiter verwunderlich, da aufgrund der Annahme eines 4-Kanal-ABS auch vier Drehzahlfühler pro Fahrzeug existieren, welche jeweils in der Nähe der Radbremsen verbaut und somit jeglichen Witterungs- und Umwelteinflüssen direkt ausgesetzt sind. Lediglich die Bremsleitungen kommen zahlenmäßig häufiger vor, wobei sie nicht so ausfallträchtig sind. Ein Grund für das gute Verhalten könnte sein, dass in der nunmehr über 90-jährigen Entwicklungsgeschichte der hydraulischen Bremsen die Fachkompetenz bei der Herstellung der Bremsleitungen sehr gut ist.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit des ESP 1 ist ungefähr um den Faktor 1,28 und die von ESP 2 um den Faktor 1,18 schlechter als die des ABS.

Der Unterschied in der Zuverlässigkeit bei ABS und ESP ist durch die zusätzlichen Sensoren zu erklären. Die Hauptdifferenz stammt bei den beiden Systemen mit ESP aus einer unterschiedlichen Auslegung der Hydraulikeinheit mit Steuergerät.

Einen weiteren erheblichen Anteil an der Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems mit ABS oder ESP hat der Tandemhauptbremszylinder. Auch dies ist leicht erklärbar, da durch die Kombination aus Hydraulik und Mechanik sowie die redundante Bauweise mit zwei Druckkammern viele Dichtungen benötigt werden und das Bauteil großen Drücken ausgesetzt ist. Des Weiteren werden einige Rückstellfedern im THZ verbaut, so dass die Bauweise sehr komplex und damit ausfallanfällig ist.

Der Wert der Ausfallwahrscheinlichkeiten erscheint dennoch sehr niedrig. Als Vergleichswerte werden die Werte des KBA für verkehrsunsichere und erhebliche Mängel herangezogen, da diese am ehesten einem Ausfall entsprechen. In Summe sind ca. 100.000 ppm der Fahrzeuge in diesen Klassen bemängelt, so dass die Werte des KBA und die des Zuverlässigkeitsmodells um ungefähr den Faktor 5 abweichen.

Aussagen zur Sicherheit lassen sich auf Basis der Komponenten zwar treffen, wenngleich hierzu viele Überlegungen bei der Analyse im Unterbewusstsein des Durchführenden stattfinden. Der übliche Ansatz hierbei ist der, den auch die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) nutzt: Es wird systematisch betrachtet, welche Ursache zu welchen Auswirkungen führt. Dieser Ansatz ist sehr umständlich und umfangreich, weshalb im folgenden Abschnitt ein pragmatischer funktionaler Ansatz gegeben wird.

7.2 Funktionaler Ansatz

Jede Komponente in einem System dient dazu, eine bestimmte Funktion zu erfüllen. Eine Komponente, die keinen Zweck und damit keine Funktion erfüllt, ist unnützlich und wird, auch aus Kostengründen, eliminiert.

In der Regel sind die Funktionen, die ein System erfüllen soll, vorgegeben. Hierbei ist es beim generellen Ansatz unwichtig, wie die entsprechenden Funktionen erfüllt werden. Dass die spätere Systemauslegung zur Erfüllung der Funktionen dagegen sehr wohl von Bedeutung ist, wird auch hier berücksichtigt. Ein gutes Beispiel bei Bremssystemen sind die Radbremsen. Sie haben die Funktion, das Fahrzeug durch Abbau der kinetischen Energie zu verzögern. Zwei konventionelle Auslegungen, die Scheiben- und die Trommelbremse, erfüllen diese Funktion mit den jeweiligen konstruktiven Unterschieden.

Elementar bei diesem Ansatz ist also, dass bei der Betrachtung nicht die Hardware, sondern die Funktionen zur Abbildung der Systems genutzt werden.

Mit Hilfe der funktionalen Betrachtung kann z. B. untersucht werden, inwieweit in allen Systemen identische Funktionen, wie EBV, ABS, etc., durch den Zuwachs an Komponenten oder durch Änderung des Systemlayouts beeinflusst werden. Es ist grundsätzlich richtig, dass bei mehr Komponenten für ein System die Gesamtzuverlässigkeit sinkt, aber auch, dass die Ausfallwahrscheinlichkeiten einiger Funktionen nicht, nur sehr gering oder sogar positiv beeinflusst werden.

Im Bild 7-2 ist das erstellte V-Modell zur funktionalen Systemanalyse abgebildet. Der Ansatz im Modell besteht darin, dass die Gesamtfunktion des Systems in mehrere, hier als „Hauptfunktionen“ bezeichnete Einzelfunktionen aufgeteilt werden kann. Die Hauptfunktionen lassen sich dann weiter aufgliedern in Unterfunktionen, diese Unterfunktionen wieder in Unter-Unterfunktionen, usw., bis der gewünschte Detaillierungsgrad erreicht ist.

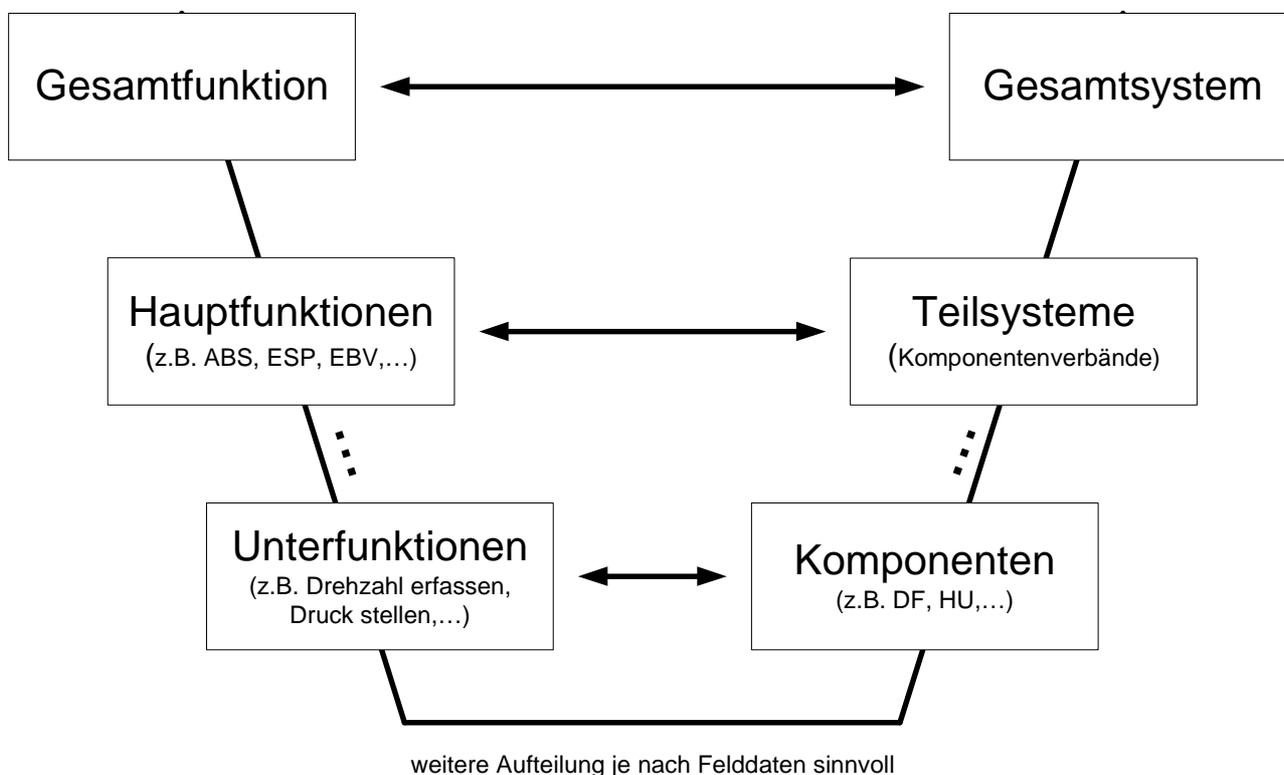


Bild 7-2: V-Modell zur funktionalen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse

Bei der Aufstellung kann das zu analysierende System theoretisch in beliebige Funktionen aufgeteilt werden, so dass es in der Detaillierung sehr genau wird.

Entsprechend dem V-Modell-Verlauf müssen jedoch die Zuverlässigkeitswerte der Unterfunktionen aus Zuverlässigkeitswerten der einzelnen Komponenten, Bauteile oder Teilsysteme bestimmt werden. Hierbei ist es nur sinnvoll, die Funktionen bis auf einen Level zu definieren, für das hardwareseitig Zuverlässigkeitsaussagen getroffen werden können. Häufig ist bereits die Detaillierung bis auf Komponentenebene (z. B. Stellmotor, Booster) schwierig, da die Datengrundlage meist sehr gering ist. Eine weitere Vertiefung bis auf Bauteilebene (Widerstand, Transistor, usw.) ist meist nicht mit Zuverlässigkeitswerten aus dem Feld zu belegen und somit in der Regel nicht sinnvoll.

Eine direkte Untersuchung der Funktionen ist nur bei rein hardwarebasierten Funktionen möglich, die sich dann wieder durch die Komponenten abbilden lassen.

Für die durch Software realisierten Funktionen wäre die Betrachtung der Funktionen direkt möglich, wenn die Ausfälle erfasst, einer oder mehreren Funktionen zugeordnet und gespeichert würden. Dies ist jedoch nicht durchgängig möglich, da die Speicherung und das Auslesen der Daten sehr zeit- und kostenaufwendig wären.

Dennoch bietet dieser Ansatz der Systemanalyse einige Vorteile.

Wird dieser Ansatz einheitlich bei unterschiedlichen Systemen für identische oder ähnliche Funktionen durchgeführt, so lassen sich die Funktionen sehr leicht vergleichen. Insbesondere ist dann von Vorteil, dass die Betrachtung der Funktionen nicht mehr direkt von der Hardwarerealisation abhängig ist.

Als Beispiel für eine solche Betrachtung sei die Funktion „Bremskraftverteilung“ genannt. Während in früheren Bremssystemen Druckminderer eingesetzt wurden, um ein Überbremsen der hinteren Räder zu vermeiden, wird in den KBS mit ABS und ESP diese Funktion elektronisch realisiert. Mittels der Drehzahlfühler (DF) wird hierbei erkannt, ob die hinteren Räder überbremsen und durch die Steuerung der Hydraulikeinheit (HU) der Druck gehalten oder vermindert werden muss. Die elektronische Regelung hat natürlich einige Vorteile, da sie genauer regeln kann. Aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht ist sie aber genau zu untersuchen, da mehr Komponenten benötigt werden, um die Funktion zu realisieren. Ein funktionaler Vergleich zwischen den Systemen ist aber direkt möglich.

Analog zur Modellbildung für die Hardware kann für Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Funktionen die Zuverlässigkeitsmodellbildung aus dem vorhergehenden Abschnitt herangezogen werden. Unter der Annahme, dass es n voneinander unabhängige Hauptfunktionen mit der Überlebenswahrscheinlichkeit $R_{HF_i}(t)$ in einem System gibt, und dass jeder Ausfall einer Funktion zur Reklamation und somit per Definition zum Ausfall der Gesamtsystemfunktion führt, berechnet sich die funktionale Systemzuverlässigkeit $R_{Sys,F}(t)$ aus:

$$R_{Sys,F}(t) = R_{HF1}(t) \cdot R_{HF2}(t) \cdot \dots \cdot R_{HF_n}(t) = \prod_{i=1}^n R_{HF_i}(t). \quad (7-8)$$

Die jeweiligen Hauptfunktionen können sich wiederum aus m Unterfunktionen zusammensetzen, die dann, wenn sie unabhängig voneinander sind, ebenfalls seriell zu betrachten sind. Die Überlebenswahrscheinlichkeit zur Hauptfunktion $R_{HF}(t)$ berechnet sich dann ebenfalls multiplikativ aus den Überlebenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Unterfunktionen $R_{UF_j}(t)$

$$R_{HF}(t) = R_{UF_1}(t) \cdot R_{UF_2}(t) \cdot \dots \cdot R_{UF_n}(t) = \prod_{j=1}^m R_{UF_j}(t). \quad (7-9)$$

Häufig tritt jedoch der Fall auf, dass die Funktionen einer Ebene nicht immer unabhängig voneinander sind. Als Beispiel seien bei einem ESP die Funktionen ABS und ESP genannt. Bei der Zuordnung von Komponenten zu den Funktionen fällt auf, dass beide Funktionen ausfallen, sobald das Steuergerät ausfällt. Bei der Berechnung der funktionalen Gesamtsystemzuverlässigkeit, in die auch wieder die beiden Funktionen ABS und ESP einfließen, würde das Steuergerät somit doppelt in die Berechnung eingehen und die Zuverlässigkeit herabsetzen. Da in beiden Funktionen das Steuergerät verwendet wird, sind diese nicht unabhängig voneinander.

Auch die Berechnung von Redundanzstrukturen kann bei der Zuverlässigkeitsbestimmung der Haupt- oder Unterfunktionen relevant sein. So sind z. B. bei der elektronischen Bremskraftverteilung EBV nur zwei von vier intakten Drehzahlfühlern (DF) zur Funktionsaufrechterhaltung notwendig.

Wird die Gesamtfunktion z. B. für das ABS 1 aus den Unterfunktionen aufgestellt, so muss der Wert der funktionalen Gesamtzuverlässigkeit für das System identisch sein mit dem Wert der hardwarebasierten Zuverlässigkeitsanalyse, da auch hier ab einem gewissen Grad der funktionalen Betrachtung die Zuverlässigkeitsdaten der Komponenten den Funktionen zugeordnet werden.

Zur Umsetzung der Analysen können verschiedene Methoden eingesetzt werden, wie z. B. Funktionsbaum-/Fehlerbaumanalysen oder auch Markov-Prozesse. Mit Hilfe dieser Analysen kann der Einfluss einzelner Unterfunktionen auf die Gesamt- und auf Hauptfunktionen abgebildet werden.

Werden die Hauptfunktionen einzelnen betrachtet, so sind Einflüsse durch abhängige Unterfunktionen ebenfalls zu betrachten.

Im Folgenden werden die wichtigsten Hauptfunktionen in einem Bremssystem mit ABS 1 vorgestellt, die hier wie folgt definiert sind:

- Basisbremsfunktion (ungeregelte Bremsung ohne Verstärkung),
- Basisbremsung mit EBV (ohne Verstärkung),
- Basisbremsung mit ABS (ohne Verstärkung, ABS beinhaltet EBV).

Weitere Unterfunktionen können aufgestellt werden, wobei hier der Einfachheit halber den Funktionen direkt die jeweiligen Komponenten zugeordnet werden.

Die Basisbremsfunktion ist dann gegeben, wenn das Pedal, der Tandemhauptbremszylinder, das Reservoir, die Bremsleitungen und –schläuche sowie die Radbremsen funktionsfähig sind. Die Überlebenswahrscheinlichkeit der Basisbremsfunktion $P_{\text{Basisbremse}}$ berechnet sich dann zu:

$$P_{\text{Basisbremse}} = P_{\text{Pedal}} \cdot P_{\text{THZ}} \cdot P_{\text{Reservoir}} \cdot P_{\text{Bremsleitung}}^6 \cdot P_{\text{Bremserschlauch}}^4 \cdot P_{\text{Radbremse}}^4 \quad (7-10)$$

Hierbei ist das Steuergerät mit Hydraulikeinheit nicht berücksichtigt, da dieses nach dem Fail-Safe-Prinzip aufgebaut ist und z. B. bei Ausfall der Energieversorgung die Auslassventile geschlossen und die Einlassventile geöffnet sind, so dass ein Druckaufbau an den Radbremsen möglich ist. Ein Verstärker ist für die Erfüllung der Grundbremsfunktion ebenso nicht erforderlich wie die Drehzahlfühler.

Aus sicherheitstechnischer Sicht ist diese Funktion allerdings kritisch, da die maximal erreichbare Verzögerung bei einem normalen Fahrer geringer als mit Verstärkung und somit kein optimaler Bremsweg zu erreichen sein wird. Darüber hinaus kann es wegen der fehlenden Bremskraftverteilung zu einer Blockierung der hinteren vor den vorderen Rädern kommen, was in der Regel zu einem instabilen Fahrzeug führt.

Die zweite betrachtete Funktion beinhaltet die Basisbremsung samt elektronischer Bremskraftverteilung. Die Funktion dient dazu, bei einer Bremsung das Blockieren der Hinterachsräder vor den Vorderachsrädern zu vermeiden, um das Fahrzeug stabil zu halten.

Die dritte Funktion soll, ergänzend zur EBV dafür sorgen, dass die Räder bei einer Bremsung nicht blockieren und das Fahrzeug somit lenkbar bleibt.

Zur Erfüllung der Funktionen ABS und EBV werden, zusätzlich zur Basisbremsfunktion, das Steuergerät samt Hydraulik und die vier Drehzahlfühler benötigt. Somit ist die Zuverlässigkeit dieser beiden Funktionen identisch, so dass sich deren Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\text{BB mit ABS / EBV}}$ berechnet aus:

$$P_{\text{BB mit ABS / EBV}} = P_{\text{Pedal}} \cdot P_{\text{THZ}} \cdot P_{\text{Reservoir}} \cdot P_{\text{ABS-SG+HU}} \cdot P_{\text{Bremsleitung}}^6 \cdot P_{\text{Bremserschlauch}}^4 \cdot P_{\text{DF}}^4 \cdot P_{\text{Radbremse}}^4 \quad (7-11)$$

Nach Ausfall eines Drehzahlfühlers werden bei dem betrachteten System die Funktionen EBV und ABS nach einem festgelegten Schema je nach aktuellem Regelungszustand deaktiviert und in einen robusteren Erhaltungszustand gebracht, der hier keep-alive-Zustand genannt wird.

Bei der Sicherheitsbetrachtung ergeben sich jedoch Unterschiede, da bei Ausfall eines weiteren Drehzahlfühlers auch die ABS-keep-alive-Regelung aufgegeben wird, während die EBV-keep-alive-Regelung weiterhin aktiv bleibt. Die Drehzahlfühler sind dann für die entsprechenden Fälle als mvn-System zu betrachten.

Im Bild 7-3 sind die Graphen für die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Funktionen „Basisbremsfunktion“ und „Basisbremsung mit ABS/EBV“ sowie zu Vergleichszwecken die Gesamtsystemausfallwahrscheinlichkeit dargestellt.

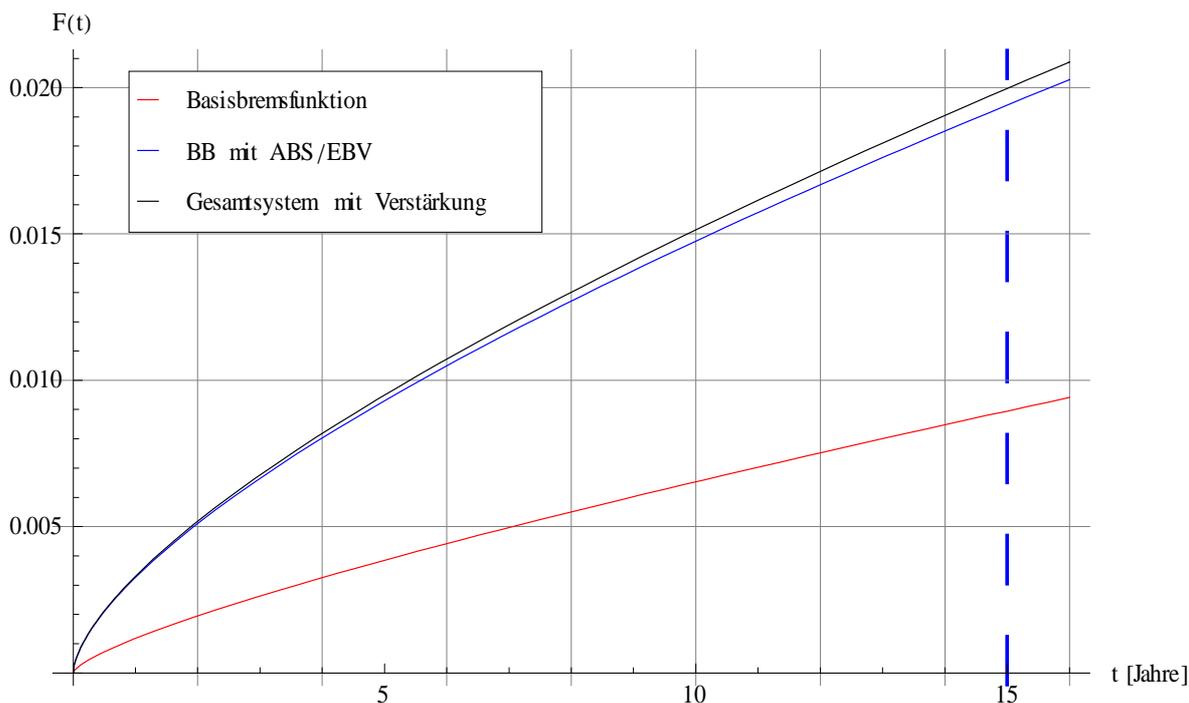


Bild 7-3: Ausfallwahrscheinlichkeiten $F(t)$ für unterschiedliche Funktionen im Bremssystem mit ABS

Es ist gut zu erkennen, dass die Ausfallwahrscheinlichkeiten des Gesamtsystems und der Funktion „Basisbremsung mit ABS/EBV“ nur geringfügig voneinander abweichen. Dieser Unterschied ist durch den Bremskraftverstärker verursacht, der in der Funktion nicht zwingend benötigt und daher nicht berücksichtigt wird.

Die Basisbremsung allein ist dagegen um den Faktor zwei zuverlässiger als das Gesamtsystem. Mit ungefähr 1 % Ausfallwahrscheinlichkeit hat ein Fahrzeug einen Fehler an der Basisbremse innerhalb der Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren. Dieser Wert erscheint sehr gering und könnte dadurch erklärbar sein, dass nur Daten aus der Garantiezeit (maximal drei Jahre) in die Analyse eingeflossen sind. Bei einer Betrachtung über mehrere Jahre wäre ein verstärktes Verschleißausfallverhalten einiger Komponenten zu erwarten.

Dennoch ist sehr gut zu sehen, dass die Funktionen ABS und EBV, ohne die heutzutage in Deutschland kein Fahrzeug mehr zugelassen wird, für die Zuverlässigkeit von Nachteil sind. Unbestritten dagegen ist der Zuwachs an Fahrsicherheit durch die beiden Funktionen.

Das Funktionsausfallverhalten kann ebenfalls durch eine Weibull-Verteilung beschrieben werden, deren Parameter erneut durch eine auf zwei Punkten basierende Schätzung ermittelt wurden (Tabelle 7-4).

Tabelle 7-4: Zeitabhängige Parameter der Verteilungsfunktion zur Beschreibung des Ausfallverhaltens der Grundfunktionen; Maßeinheit: Jahr

Parameter	BB	BB mit ABS/EBV
α	1,16E-03	3,23E-03
β	0,7573	0,6658

Funktionale Sicherheit

Der Begriff der funktionalen Sicherheit wird in vielen Bereichen unterschiedlich gedeutet. Dies liegt vielleicht daran, dass im „normalen“ Leben kein Unterschied zwischen Hardwaresicherheit und funktionaler Sicherheit gemacht wird. Für den Einzelnen ist es lediglich wichtig, dass seine Person, andere Personen, die Umwelt, etc. nicht zu Schaden kommen.

Eine mögliche Definition zur Funktionalen Sicherheit wird in der DIN EN 61 508-4 gegeben:

„Teil der Gesamtsicherheit, bezogen auf die EUC [equipment under control] und das EUC-Leit- oder Steuerungssystem, die von der korrekten Funktion des E/E/PE-sicherheitsbezogenen Systems [E/E/PE: elektrisch/elektronisch/programmierbar elektronisch], sicherheitsbezogenen Systemen anderer Technologie und externer Einrichtungen zur Risikominderung abhängt.“

Da diese Definition nicht gerade leicht verständlich ist, wird hier ein eigener Ansatz vorgestellt:

Unter funktionaler Sicherheit sei die Aufrechterhaltung eines sicheren Betriebszustandes eines Systems durch die dafür vorgesehenen Funktionen verstanden.

Dieser sehr allgemeine Ansatz lässt natürlich ebenfalls wieder sehr viel Raum für Diskussion. Dennoch kann die Deutung sehr einfach sein: Die Funktion ist zwingend notwendig, damit sich das System in einem sicheren Zustand befindet.

Gut deutlich wird das Beispiel anhand der Funktion der elektronisch unterstützten Stabilisierung des Fahrzeugs in physikalischen Grenzsituationen, welches im weiteren Verlauf wie das dazugehörige System mit ESP benannt wird. Die Funktion ESP ist nicht in allen Fahrzeugen vorhanden. Ein Fahrzeug ohne dieses System und somit auch ohne diese Funktion kann nicht in unsichere Betriebszustände aufgrund dieser Funktion gelangen. Wird das Fahrzeug allerdings mit dieser Funktion ausgeliefert, so muss sichergestellt sein, dass es aufgrund von Fehlfunktionen keine unsicheren Betriebszustände gibt. Hierbei sind beispielhaft folgende Szenarien denkbar:

- Der Fahrer fährt häufig im Grenzbereich und wird hierbei durch ESP unterstützt, was z. B. häufig bei zu schnell angefahrenen Kurven der Fall ist. Sollte die Funktion nicht zur Verfügung stehen während das Fahrzeug wieder in diesen Fahrzustand kommt, der mit der Funktion beherrschbar wäre, so ist dies ein unsicherer Zustand. Die funktionale Sicherheit ist nicht mehr gegeben.
- Der Fahrer fährt auf einer geraden Straße und das System erkennt fälschlich eine Situation, in der es eingreift und einzelne Räder abbremst. Dies kann evtl. zum Gieren des Fahrzeugs und damit zu einer nicht beherrschbaren Fahrsituation führen. Auch in diesem Beispiel ist dann die funktionale Sicherheit nicht mehr gegeben.

Funktionale Sicherheitsbetrachtung

Im folgenden Ansatz werden die so genannten Hauptfunktionen eines KBS mit ESP 1 betrachtet, welche festgelegt werden als:

- ESP,
- ABS,
- weitere elektrisch unterstützte Funktionen, wie z. B. EBV,
- Grundbremsfunktionen.

Die Analyse betrachtet das Nichtfunktionieren dieser Funktionen, da die Werte besser verständlich und zu beurteilen sind. Zur Beschreibung der Gesamt- und Hauptfunktionen wird ein Zustandsdiagramm verwendet (Bild 7-4).

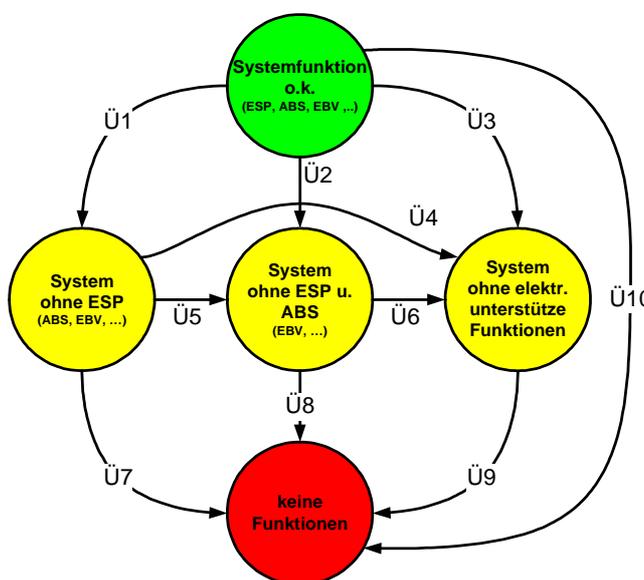


Bild 7-4: Abbildung der Hauptfunktionen eines KBS mit ESP 1 als Zustandsdiagramm

Es sind fünf Systemzustände festgelegt, mit zehn Übergängen, welche die o. g. Funktionen beinhalten. Eine wichtige Annahme in diesem Modell, mit dem die Zuverlässigkeit der Funktionen ermittelt werden soll, ist, dass nur Ausfälle betrachtet und keine Reparaturen zugelassen werden.

Die Zustände sind farblich unterteilt (Ampel-Aufteilung), um zu zeigen, dass auch eine kombinierte Sicherheitsanalyse mit dem Modell möglich ist, wenn eine genaue Unterscheidung der Zustände hinsichtlich der Sicherheit für den Fahrer vorgenommen wird. Die Farben sind nahezu selbsterklärend: Grün bedeutet, dass das Fahrzeug alle unterstützenden Funktionen aktiviert hat und das Fahrzeug nach heutigem Stand optimal beherrschbar ist. Die gelb gekennzeichneten Zustände haben Einschränkungen in den Fahrerassistenzfunktionen, wie ABS, ESP oder EBV; das Fahrzeug bleibt bei einer „normalen“ Bremsung unter „normalen“ Umständen jedoch für den Standardfahrer gut beherrschbar. Der Begriff „normal“ ist natürlich nicht sehr aussagekräftig, so dass es immer besondere Situationen geben kann, unter denen das Fahrzeug bei bestimmtem Funktionsverlust nicht gut beherrschbar ist. Dies müsste in der Analyse berücksichtigt werden, was mit vertretbarem Aufwand jedoch nicht zu realisieren ist, da es zu viele Störgrößen gäbe.

Der Zustand „keine Funktion“ ist rot gekennzeichnet, da hier „Gefahr“ droht. Unter diesem Zustand sind alle Fehler zu verstehen, die unmittelbar Einfluss auf die Bremsung haben. Vorstellbar sind z. B. Fehler an einzelnen Radbremsen, die das Gieren des Fahrzeugs um die Hochachse bewirken oder die dazu führen, dass überhaupt nicht mehr gebremst werden kann. Für all diese Situationen wird angenommen, dass der Fahrer diesen Fehler nicht korrigieren kann und die Kontrolle über das Fahrzeug verliert.

Obwohl das Zustandsdiagramm nicht sehr umfangreich ist, treten auch hier schon einige Probleme auf. Das größte Problem stellt die Ermittlung der Übergangsraten dar. Die genaue Trennung für die einzelnen Zustände ist meist auf Komponentenebene nicht möglich, da der Fehlereintrag oft nicht eindeutig oder bei zu detaillierter Filterung die Anzahl an Datensätzen zu gering für gezielte Auswertungen ist. Bei beispielhafter Betrachtung des Steuergerätes ist denkbar, dass verschiedene Fehler auftreten, die theoretisch in jeden der Ausfallzustände (gelb und rot) führen. Für Auswertungen müsste daher der Fehlereintrag eine Zuordnung zu den jeweiligen Zuständen ermöglichen.

Ein weiteres Problem sind die im Zustandsdiagramm aufgeführten Mehrfachfehler (Ü4 bis Ü9). Diese Raten müssen ebenfalls sehr detailliert ermittelt werden, um aussagekräftige Ergebnisse mit dem Modell zu erhalten.

Für eine erste praktische Anwendung wird daher das obige Modell reduziert (siehe Bild 7-5).

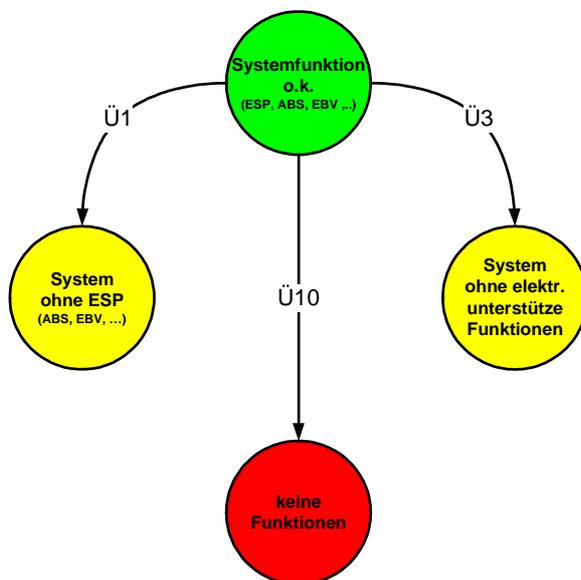


Bild 7-5: Reduziertes Zustandsdiagramm eines KBS mit ESP 1

Für die Funktionsanalyse werden nur Einfachfehler zugelassen. Hierbei wird beim Ausfall einer Komponente eine Worst-Case-Betrachtung durchgeführt. Dies führt dazu, dass ein Zustand entfällt. Der Übergang Ü1 wird maßgeblich durch die für ESP erweiterte Sensorik bestimmt. Beim Übergang Ü3 hat die HU mit SG großen Einfluss, da angenommen wurde, dass ein Fehler hier stets zum Verlust aller elektrisch unterstützten Funktionen führt.

Der Zustand „keine Funktionen“ beinhaltet alle Fehler, welche die Basisbremsfunktion beeinträchtigen. Dies bedeutet, dass sowohl nur eine zu geringe als auch keine Bremsfunktion zur Verfügung steht.

Die Mehrfachfehler sind in vielen Fällen nicht besonders entscheidend für die Eintretenswahrscheinlichkeit sicherheitskritischer Systemzustände.

Eine Untersuchung aller möglichen Ausfallkombinationen mit zeitlicher Reihenfolge führt bei einem solch komplexen System sehr schnell zu einer Zustandsraumexplosion. Bei der umfassenden Analyse würden durch die vielen Fehlermöglichkeiten sehr viele Zustände benötigt, die meist auch noch miteinander verbunden sind. In /Alt 03/ wurde anhand eines Modells mit 44 Zuständen, über 500 Zustandsübergängen und hinterlegten 75 Übergangsraten ein Bremssystem abgebildet. Dieses Modell hat gezeigt, dass die Handhabung trotz Nutzung einer Software unüberschaubar und damit fehleranfällig wird. Darüber hinaus konnten nur Erst- und Zweitfehler berücksichtigt werden. Ein mögliches weiteres Modell, welches das System noch genauer beschreiben würde, hätte bereits über 80 Zustände mit weit über 1.000 Zustandsübergängen benötigt.

Für die Berechnung des homogenen Markov-Modells werden konstante Übergangsraten benötigt. Diese berechneten Ausfallraten für die Komponenten müssen also teilweise vom zeitabhängigen in einen konstanten Wert zurückgerechnet werden. Wichtig hierbei ist, dass die zugrunde gelegte Zeit die Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren ist und für die zeitliche Berechnung verwendet wird.

In der folgenden Tabelle 7-5 sind die Übergangsraten mit der Zusammensetzung aus den einzelnen Komponentenraten sowie der berücksichtigten Anzahl hinterlegt.

Tabelle 7-5: Konstante Ausfallraten der Systemkomponenten eines ESP 1

Übergang	Komponenten	Anzahl	konstante Ausfallrate Einzelkomponente [1/Jahr]	konstante Ausfallrate gesamt [1/Jahr]
1	DS	1	1,91E-06	1,91E-06
	DRS	1	8,44E-05	8,44E-05
	LWS	1	3,38E-05	3,38E-05
	DF	4	1,53E-04	6,12E-04
	Gesamt	7		7,32E-04
2	ESP1-HU+SG	1	3,62E-04	3,62E-04
	Gesamt	1		3,62E-04
3	Pedal	1	1,00E-09	1,00E-09
	THZ	1	3,60E-04	3,60E-04
	Reservoir	1	1,79E-05	1,79E-05
	Verstärker	1	3,87E-05	3,87E-05
	Bremsleitung	6	3,00E-06	1,80E-05
	Bremsschlauch	4	3,00E-06	1,20E-05
	Radbremse	4	4,78E-05	1,91E-04
	Gesamt	18		6,38E-04

Die Gesamtübergangsraten für die einzelnen Übergänge werden denen im Markov-Modell zugewiesen. Die Berechnung für die Fahrzeuglebensdauer von $t=15$ Jahren liefert dann folgende Zustandswahrscheinlichkeiten (Tabelle 7-6).

Tabelle 7-6: Zustandswahrscheinlichkeiten im einfachen Markov-Modell des ESP 1

Zustand	Beschreibung	Eintretenswahrscheinlichkeit
0	Systemfunktion o.k.	0,97435
1	System ohne ESP	0,01084
2	System ohne elektr. unterst. Funktionen	0,00536
3	keine Funktionen	0,00945
Summe Zustände mit fehlerhafter Funktion (Zustände 1 bis 3)		0,02565

Die Summe der Zustände mit fehlerhafter Funktion ergibt wieder den Wert der Ausfallwahrscheinlichkeit für das ESP 1, wie er zum Zeitpunkt $t=15$ Jahre aus dem Bild 7-1 ersichtlich ist.

Das obige Modell ist nur beispielhaft angewendet und bildet das System nur sehr grob ab. Da darüber hinaus die zeitliche Folge von Mehrfachfehlern aufgrund der meist sehr kurzen Zeit einer Bremsung nicht besonders relevant ist, wird im folgenden Abschnitt ein leichter handhabbarer, statischer Ansatz aufgezeigt.

7.3 Sicherheitsfunktionen ABS

Im Folgenden werden die Sicherheitsfunktionen in einem Bremssystem mit ABS mit einem ebenfalls neu erstellten Ansatz untersucht, der jedoch auf einer Art Negativ-Logik beruht, da nicht die gewünschten Funktionen des Systems sondern „Negativ-Funktionen“ über die Komponentenausfälle abgebildet werden.

Diese Untersuchung der Sicherheitsfunktionen, die nicht die zeitliche Reihenfolge der Fehler berücksichtigt, basiert auf folgenden Annahmen:

- Mehrfachfehler sind möglich, da nicht jeder Einfachfehler zum System- bzw. Funktionsausfall führt,
- Mehrfachfehler treten praktisch gleichzeitig (in einem sehr kleinen Zeitfenster) auf,
- bei elektronisch gesteuerten Funktionen führt jeder Fehler im SG zum Ausfall des SG und damit zum Ausfall der Funktion,
- Menschliche Fehler werden nicht betrachtet (z. B. Stecker falsch angeschlossen, Leitungen vertauscht).

Problematisch in der Betrachtung sind Fehler innerhalb der Hydraulikeinheit mit Steuergerät. Dort sind sehr viele Fehlerkombinationen denkbar, z. B. durch nicht gewollte Schaltungen der Ein- und Auslassventile (EV, AV).

Mittelbar sicherheitskritische Funktionen

Per Definition sind die mittelbar sicherheitskritischen Funktionen die Funktionen, deren Ausfall nicht zwingend gefährlich ist. Stellvertretend seien hier die Funktionen ABS und EBV genannt, ohne die eine Vollverzögerung noch möglich ist. In einem Großteil aller Fahr- und Bremssituationen bleibt das Fahrzeug bei einem solchen Funktionsausfall für einen normal geübten Fahrer beherrschbar.

Da die Funktionen in der Regel sehr komplex und auch die Ausfallstrategien in der Regel sehr umfangreich sind, müssen einige Einschränkungen bei der Funktionsbetrachtung vorgenommen werden. Diese Einschränkungen werden in den folgenden Tabellen in den Auswirkungen aufgeführt.

Die Funktion ABS wird für eine Basisbremsung nicht benötigt. Die für die Funktion ABS benötigten Unterfunktionen und die den Unterfunktionen zugeordneten Komponenten sind in der Tabelle 7-7 zusammengestellt.

Tabelle 7-7: Ausfallmöglichkeiten der ABS-Funktion

verantwortliche Unterfunktion	zugeordnete Komponente(n)	Auswirkung
Regelgrößen berechnen und Steuergrößen stellen	SG+HU	Ausfall von ABS + EBV in einen Fail-Safe-Mode, bei dem die Grundbremsfunktion nicht betroffen ist (AVs zu, EVs auf)
Raddrehzahl ermitteln	DF	Ausfall eines DF führt zur UF ABS-keep-alive, die nach Regelungsende abgestellt wird
Steuergerät mit Energie versorgen	elektrisches Bordnetz	wird nicht betrachtet, da es nicht als Komponente des Bremssystems gezählt wird

Die erste Annahme besteht darin, dass jeder Fehler der betrachteten ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG) dazu führt, dass die ABS-Regelung nicht mehr aktiv gehalten werden kann, die elektronische Bremskraftverteilung EBV aber immer noch intakt ist. Ein Fehler an einem der vier Drehzahlfühler (DF) führt dazu, dass die Funktion ABS deaktiviert und der Fahrer über die ABS-Kontrollleuchte gewarnt wird. Die Energieversorgung ist elementar für die Funktion des Steuergerätes, wird aber nicht betrachtet, da sie nicht dem Bremssystem zugeordnet ist.

Die Ausfallsicherheit der EBV-Funktion ähnelt der ABS-Funktion (siehe Tabelle 7-8). Allerdings wird bei einem Ausfall eines Drehzahlfühlers weiterhin eine EBV-keep-alive-Regelung durchgeführt, die rudimentärer regelt als die vollständige Funktion, um die Fahrzeugstabilität zu gewährleisten. Bei Ausfall eines zweiten Drehzahlfühlers wird die EBV-keep-alive-Funktion ebenfalls mit verminderter Leistung weiter fortgeführt. Erst der Ausfall eines dritten Drehzahlfühlers zwingt das System zur Abschaltung, da der Fahrzeugzustand nicht mehr eindeutig ermittelt werden kann.

Tabelle 7-8: Ausfallmöglichkeiten der EBV-Funktion

verantwortliche Unterfunktion	verantwortliche Komponente(n)	Auswirkung
Regelgrößen berechnen und Steuergrößen stellen	SG+HU	Ausfall von ABS + EBV in einen Fail-Safe-Mode, bei dem die Grundbremsfunktion nicht betroffen ist (AVs zu, EVs auf)
Raddrehzahl ermitteln	DF	3 von 4 DF müssen ausfallen. Bei Ausfall eines DF: Abschaltung in EBV-keep-alive
Steuergerät mit Energie versorgen	elektrisches Bordnetz	wird nicht betrachtet, da es nicht als Komponente des Bremssystems gezählt wird

Allerdings muss hier für das Steuergerät im Gegensatz zur Funktion ABS die Annahme gelten, dass jeder Fehler zu einer Gesamtabstaltung des Steuergerätes führt und die EBV nicht erfolgen kann.

Anhand der Funktionen ist deutlich, dass diese nicht unabhängig sind. Alle Komponenten zur Erfüllung der Funktionen sind identisch und es gibt Probleme, die Ausfälle einzelner Komponenten strikt den Funktionen zuzuordnen.

Die Überlebenswahrscheinlichkeiten für die Funktionen ABS mit $P_{Fkt. ABS}$ und EBV mit $P_{Fkt. EBV}$ sind:

$$P_{Fkt. ABS} = P_{ABS-HU+SG} \cdot P_{DF}^4 \quad (7-12)$$

und

$$P_{Fkt. EBV} = P_{ABS-HU+SG} \cdot P_{2v4DF} \quad (7-13)$$

Der Term für das 2v4-Modul der Drehzahlfühler ist mit Hilfe der Binomialverteilung zu berechnen (siehe /Mey 03b/).

Die zugehörigen Ausfallwahrscheinlichkeiten für die Funktionen ABS und EBV sind in Bild 7-6 dargestellt.

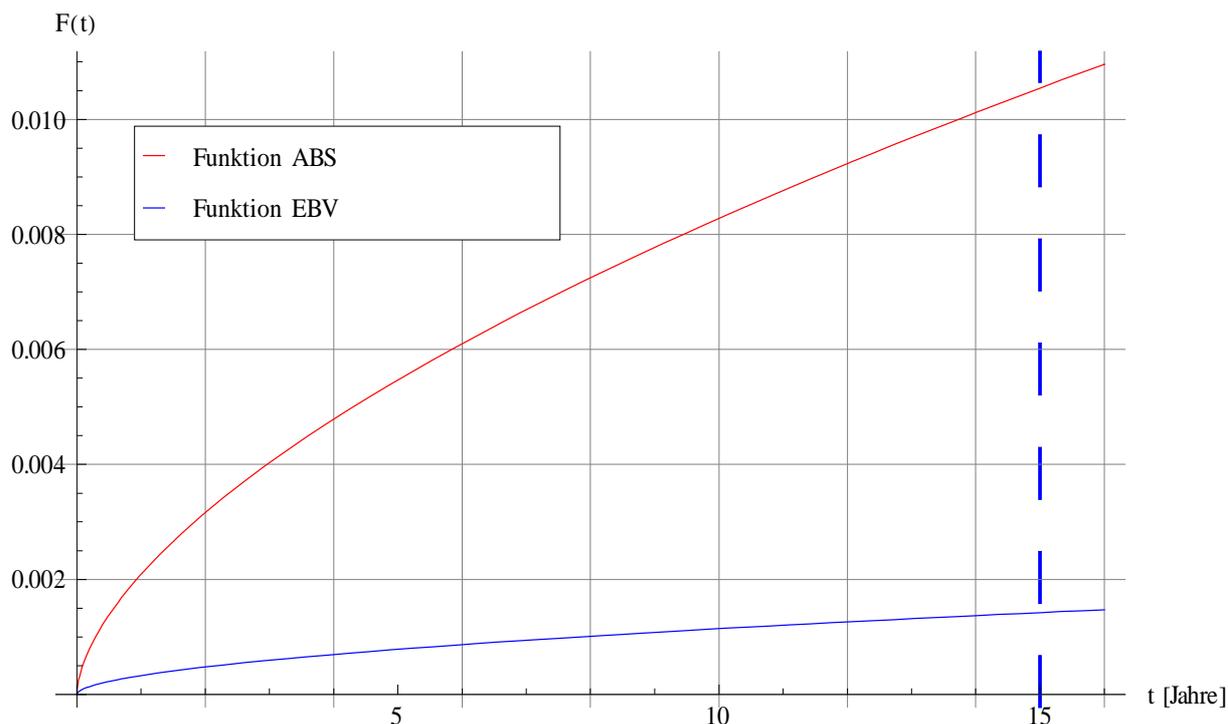


Bild 7-6: Ausfallwahrscheinlichkeiten der Funktionen ABS und EBV im Bremssystem mit ABS

Für den Zeitpunkt $t=15$ Jahre unterscheiden sich die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Funktionen ABS und EBV um ca. das Siebenfache. Da die Funktion der elektronischen Bremskraftverteilung EBV besonders wichtig für die Fahrzeugstabilität ist, wird durch die Redundanz der Drehzahlfühlersignale eine erhebliche Zuverlässigkeits- und damit auch Sicherheitssteigerung erreicht. Darüber hinaus wird die Funktion EBV besonders überwacht, da entsprechend der ECE-R13 (/Ece 02/) gefordert ist, dass die Vorderräder vor den Hinterrädern blockieren und die mechanischen Bremskraftminderer und -verteiler wegrationalisiert wurden. Bei Wegfall der EBV-keep-alive-Regelung wird der Fahrer daher nicht nur mit der ABS-, sondern auch zusätzlich durch die EBV-Warnlampe gewarnt.

Damit es zu einer kritischen Systemsituation kommen kann, muss sich das Fahrzeug zum Zeitpunkt der Funktionsausfälle zusätzlich in einer grenzwertigen Fahrsituation befinden. Bei Aufleuchten der ABS- oder EBV-Warnlampe sollte der Fahrer demnach möglichst gefühlvoll verzögern, um keine kritischen Fahrsituationen zu provozieren.

Unmittelbar sicherheitskritische Funktionen

Per Definition sind die unmittelbar sicherheitskritischen Funktionen die Funktionen, deren Ausfall direkt zu einer Gefährdung führt. Hierunter fallen z. B. alle Grundbremsfunktionen, bei deren Ausfall ein unerwartetes Fahrzeugverhalten auftreten kann, das für einen normal geübten Fahrer meist nicht beherrschbar ist.

Bei einem Bremssystem mit ABS sind daher alle Ausfälle der Basisbremsfunktionen als sicherheitskritisch anzusehen. Bei schlechten Bedingungen, wie einer Vollbremsung, können jedoch auch Funktionsausfälle von ABS und EBV sicherheitskritisch sein.

Die Unterfunktionen sind sehr komplex, weshalb im Folgenden nicht der obige Ansatz der mittelbar sicherheitskritischen Funktionen verfolgt wird, da dieser für die zu betrachtenden Funktionen sehr unpraktisch ist. In der Tabelle 7-9 wird daher lediglich aufgeführt, welche Komponenten in welcher Anzahl ausfallen müssen, damit die Ausfallbeschreibung eintritt.

Tabelle 7-9: Fehlerhafte Betriebszustände in der Basisbremsung

Nr.	Ausfallbeschreibung	Komponentenausfall
1	Genau ein Rad ungebremst	<ul style="list-style-type: none"> - genau 1v4 EVs in der HU ungewollt geschlossen (unwahrscheinlich) oder - genau 1v4 Radbremsen defekt
2	Genau ein Rad pro Achse ungebremst	<ul style="list-style-type: none"> - genau 1v2 EVs pro Bremskreis in der HU geschlossen (sehr unwahrscheinlich) oder - genau 1v2 Radbremsen an jeder Achse defekt
3	Genau beide Räder einer Achse ungebremst	<ul style="list-style-type: none"> - Ausfall eines Kreises im THZ oder - Ausfall genau 1v2 Bremsleitungen vom THZ zur HU oder - Öffnen der AVs (eines oder beide) eines Bremskreises in der HU (unwahrscheinlich) oder - beide EVs eines Bremskreises in der HU geschlossen (unwahrscheinlich) oder - Ausfall der Bremsleitungen (eine oder beide) eines Kreises von der HU bis zu den Bremsschläuchen oder - Ausfall der Bremsschläuche (einer oder beide) eines Bremskreises oder - jeweils beide Radbremsen einer Achse defekt
4	Genau drei Räder ungebremst	<ul style="list-style-type: none"> - jede mögliche Kombination des Zustands 1 mit den Zuständen 2 oder 3 (z. B. 1 Rad an der Vorderachse und ein Bremsschlauch an der Hinterachse defekt)
5	Alle Räder ungebremst	<ul style="list-style-type: none"> - Pedal defekt (eigensicher!) oder - THZ defekt/verklemmt/ohne Funktion oder - Reservoir undicht/leer (Worst-Case-Annahme) oder - beide Bremsleitungen vom THZ zur HU defekt oder - HU defekt (alle EVs geschlossen) oder - Fehlsteuerung vom SG (unwahrscheinlich) oder - mindestens eine Bremsleitung von der HU bis zu den Bremsschläuchen pro Bremskreis defekt oder - mindestens ein Bremsschlauch pro Bremskreis defekt oder - alle vier Radbremsen defekt oder - ... (sehr viele Kombinationen zwischen den Fehlern)

Diese Einteilung kann je nach Bremssystemaufbau (II, X, usw.) unterschiedlich sein. In dieser Beispielbetrachtung wird eine so genannte „Schwarz-Weiß“-Aufteilung (II-Auteilung) zugrunde gelegt, bei der die Bremsen der Vorder- und der Hinterräder jeweils einen Bremskreis bilden.

Die fünf Fehler-Funktionen und Ausfallbeschreibungen sind elementar und können in jedem Bremssystem identisch vorkommen. Die mit „unwahrscheinlich“, „sehr unwahrscheinlich“ und „eigensicher“ gekennzeichneten Fehlermöglichkeiten oder -kombinationen werden allerdings nicht berücksichtigt, da deren Eintreten bisher nicht erfasst werden kann oder nicht aufgetreten ist.

Auch hier muss die Annahme erfolgen, dass jeder erfasste Fehler für die Komponente zum beschriebenen Ausfallzustand führt. Dies ist für alle Funktionen sehr pessimistisch angenommen und liefert damit zu schlechte Werte.

Fall Nr. 1:

Bei der Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit für den Fall Nr. 1 werden die Möglichkeiten mit den ungewollt geschlossenen Einlassventilen (EV) nicht berücksichtigt. Hierzu müsste das Monitoring der Hydraulikeinheit diesen Fehler erfassen. Ist es zu einem Fehlereintrag mit geschlossenen EVs gekommen, so kann die Ursache häufig nicht eindeutig geklärt werden, da solche Fehler im Allgemeinen durch die Steuergerätesoftware verursacht werden und von den Randbedingungen beim Auftreten des Fehlers beeinflusst sind. Bei der Überprüfung der Geräte ergibt sich dann meist die Fehlerbeschreibung „Fehler nicht gefunden, i.O. nach Spezifikation“. Die Möglichkeit für das Eintreten des ersten Falles kann hier daher nur dann auftreten, wenn genau eine Radbremse ohne Funktion ist. Die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit des Falls Nr. 1 $q_{Nr.1}$ erfolgt über die Binomialverteilung zu:

$$q_{Nr.1} = \binom{4}{1} q_{Radbremse} \cdot (1 - q_{Radbremse})^3 = 4 \cdot q_{Radbremse} (1 - q_{Radbremse})^3. \quad (7-14)$$

Fall Nr. 2:

Die Berechnung des Falls Nr. 2 ist dagegen etwas aufwendiger. Es werden alle Kombinationen an Radbremsausfällen berücksichtigt, die dazu führen, dass an jeder Achse genau eine Radbremse defekt ist. Eine mögliche Kombination stellt der Ausfall der Radbremsen vorne links (VL) und hinten links (HL) dar, während die Radbremsen vorne rechts (VR) und hinten rechts (HR) intakt sein müssen, da ansonsten schon der Fall Nr. 3 oder Nr. 4 eingetreten ist.

Die Berechnung gestaltet sich jedoch einfacher, wenn für das Eintreten des Ausfalls zwei mvn-Systeme angenommen werden, die parallel miteinander verknüpft sind. Die Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet sich dann zu:

$$q_{Nr.2} = \left(\binom{2}{1} q_{Radbremse} \cdot (1 - q_{Radbremse}) \right)^2 = 4 \cdot q_{Radbremse}^2 (1 - q_{Radbremse})^2. \quad (7-15)$$

Fall Nr. 3:

Das Eintreten des dritten Falls ist, genau wie beim ersten Fall, im Vergleich zu den anderen Fällen sehr häufig möglich. Dies beruht auf der Auslegung des Bremssystems in zwei Kreise. Es wurde sehr früh bei der Entwicklung des hydraulischen Bremssystems erkannt, dass es aufgrund der Bremsflüssigkeit bei auftretenden Leckagen zum Ausfall des gesamten Bremssystems kommt. Daraufhin wurde auch gesetzlich gefordert, das System mit zwei unabhängigen Bremskreisen auszulegen. Dies wiederum hat die gewollte Konsequenz, dass bei hauptsächlich hydraulischen Fehlern immer beide Räder des nicht betroffenen Bremskreises gebremst werden können.

Bei den Einträgen zu den Hauptbremszylindern kann nicht exakt bestimmt werden, ob es „nur“ zum Ausfall eines Bremskreises kam oder überhaupt nicht mehr gebremst werden konnte. Für den THZ könnte jetzt die Annahme gelten, dass jeder Fehler die maximale Auswirkung eines nicht gebremsten Fahrzeugs hat und somit dem Fall Nr. 5 zugeordnet werden muss.

Dies bewertet jedoch den Fall Nr. 5 unnötig schlecht und die Fälle Nr. 3 und Nr. 4 unnötig gut. Daher wird eine Zuordnung auf Basis der Fehlerbeschreibungen der eingetragenen Fehler zum Tandemhauptbremszylinder, die in den Garantiedaten der Zulieferer ohne die im Abschnitt 6.1 genannten auffälligen Bauteilnummern enthalten sind, wie folgt vorgenommen:

- Ungefähr 46 % der Fehler sind Komfortfehler, welche die Bremsung zwar beeinflussen, aber keinen Bremssystem- oder Bremskreisausfall zur Folge haben. Hierunter zählen hauptsächlich Einträge wie ein weiches Pedal oder Geräusche, die von den Fahrern als unangenehm empfunden werden. Diese Fehlereinträge werden zur Bestimmung der Sicherheitsausfälle nicht verwendet.
- Weitere 51 % der Fehlereinträge sind nicht eindeutig, da die Fehlerbeschreibung zu ungenau ist. Da es bei diesen Fehlern zwar zu Verzögerungseinbußen aber nicht zum Ausfall des gesamten Bremssystems gekommen ist, werden diese Fehler als Bremskreisausfall gewertet und somit den Fällen Nr. 3 und Nr. 4 zugeordnet. Der zugehörige Korrekturfaktor beträgt $k_{THZ,1Kreis} = 0,51$.
- Ungefähr 3 % der Einträge beschreiben einen Fehler, der besagt, dass nicht oder nur äußerst schwach gebremst werden kann, so dass diese Fehler als Ausfall mit vier ungebremsten Rädern zu werten sind. Dieser Fehleranteil ist verantwortlich für den Ausfallzustand Nr. 5. In der Realität sind diese Fehler allerdings „schleichend“, so dass die Leckage nicht unvermittelt auftritt, sondern immer nur ein geringer Anteil der Flüssigkeit ausläuft. Da ein Fahrzeughalter dazu verpflichtet ist, den betriebsfähigen Zustand und damit auch die Bremsflüssigkeit seines Fahrzeugs regelmäßig zu kontrollieren, fällt der Fehler in der Regel meist auf, bevor es zum Totalausfall kommt. Der Korrekturfaktor für diesen Fall ist dennoch $k_{THZ,2Kreis} = 0,03$.

Auch die Bremsleitungen vom THZ zur HU können diesen Fall Nr. 3 verursachen, wenn genau eine der beiden Leitungen ausfällt. Für das Modul berechnet sich dann die Ausfallwahrscheinlichkeit zu:

$$q_{Nr.3;BL_THZ-HU} = \binom{2}{1} q_{BL_THZ-HU} (1 - q_{BL_THZ-HU}) = 2 \cdot q_{BL_THZ-HU} (1 - q_{BL_THZ-HU}). \quad (7-16)$$

Die Fehlermöglichkeiten in der HU werden auch hier nicht betrachtet, da sie zum einen nicht quantitativ belegbar und zum anderen ihr Auftreten konstruktiv sehr unwahrscheinlich ist.

Innerhalb eines Bremskreises sind die beiden Bremsleitungen von der Hydraulikeinheit zu den Radbremsen als Seriensystem zu werten, da der Ausfall bereits einer Bremsleitung zum Ausfall des jeweiligen Bremskreises führt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit für den Ausfall eines Bremskreises $q_{1Kreis;BL_HU-Radbr.}$ berechnet sich dann zu:

$$q_{1Kreis;BL_HU-Radbr.} = 1 - (1 - q_{BL_HU-Radbr.})^2 = 2q_{BL_HU-Radbr.} - q_{BL_HU-Radbr.}^2. \quad (7-17)$$

Da für den Fall Nr. 3 allerdings nur genau ein Bremskreis ausfallen darf und der zweite Bremskreis intakt sein muss, gilt für die Ausfallwahrscheinlichkeit des Falls Nr. 3 $q_{Nr.3;1Kreis;BL_HU-Radbr.}$:

$$q_{Nr.3;1Kreis;BL_HU-Radbr.} = \binom{2}{1} q_{1Kreis;BL_HU-Radbr.} (1 - q_{1Kreis;BL_HU-Radbr.}). \quad (7-18)$$

Einsetzen der Gleichung (7-17) in Gleichung (7-18) liefert unter Verwendung der Ausfallwahrscheinlichkeiten für die Radbremsen die Ausfallwahrscheinlichkeit des Falls Nr. 3 $q_{Nr.3;BL_HU-Radbr.}$:

$$q_{Nr.3;BL_HU-Radbr.} = 4q_{BL_HU-Radbr.} - 10q_{BL_HU-Radbr.}^2 + 8q_{BL_HU-Radbr.}^3 - 2q_{BL_HU-Radbr.}^4. \quad (7-19)$$

Die gleiche Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt sich für die Bremsschläuche, da auch hier der Ausfall eines Bremsschlauches innerhalb eines Bremskreises für den Kreisausfall ausreichend ist:

$$q_{Nr.3;Bremsschlauch} = 4q_{Bremsschlauch} - 10q_{Bremsschlauch}^2 + 8q_{Bremsschlauch}^3 - 2q_{Bremsschlauch}^4. \quad (7-20)$$

Damit der Fall Nr. 3 auf Grundlage der Radbremsen eintritt, müssen entweder genau beide Vorder- oder beide Hinterradbremsen ausfallen. Die Radbremsen lassen sich entsprechend in zwei Bremskreise mit jeweils zwei Radbremsen aufteilen. Hierbei darf nur einer der beiden Bremskreise ausfallen darf, bei dem aber dann beide Radbremsen ausgefallen sein müssen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit für einen Bremskreis $q_{1Kreis;Radbr.}$ auf Grundlage der Radbremsen berechnet sich in diesem Fall zu:

$$q_{1Kreis;Radbr.} = q_{Radbr.}^2. \quad (7-21)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit für den Fall Nr. 3 aufgeteilt in Bremskreise $q_{Nr.3;1Kreis;Radbr.}$ ergibt:

$$q_{Nr.3;1Kreis;Radbr.} = \binom{2}{1} q_{1Kreis;Radbr.} (1 - q_{1Kreis;Radbr.}). \quad (7-22)$$

Einsetzen der Gleichung (7-21) in Gleichung (7-22) ergibt dann die Ausfallwahrscheinlichkeit für den Fall Nr. 3 basierend auf den Radbremsen:

$$q_{Nr.3;Radbr.} = \binom{2}{1} q_{Radbr.}^2 (1 - q_{Radbr.}^2) = 2 \cdot q_{Radbr.}^2 (1 - q_{Radbr.}^2). \quad (7-23)$$

Die Module für den Fall Nr. 3 sind als 1vn-System zu betrachten, so dass nur genau eines der Module auftreten darf. Auch dieses ist nicht ganz genau, da es durchaus Kombinationen gibt, die ebenfalls zu zwei ausgefallenen Rädern führen. Als Beispiel seien der Ausfall des Vorderachs-bremskreises und gleichzeitig der Ausfall beider vorderen Radbremsen genannt, die zu ausgefallenen Bremsen an den Vorderrädern führen und somit keine Systemverschlechterung zur Folge haben. In der Praxis ist diese Kombination absolut unwahrscheinlich. Da aber bereits der erste Fehler zum sofortigen Ausfall des Bremskreises führt, ist der Ansatz als Seriensystem richtig, so dass der Fall unter Berücksichtigung einfacher Systemstrukturen berechnet werden kann. Die gesamte Ausfallwahrscheinlichkeit $q_{Nr.3}$ aus den Fehlermechanismen für den Fall Nr. 3 berechnet sich zu:

$$q_{Nr.3} = 1 - (1 - k_{THZ;1Kreis} \cdot q_{THZ}) (1 - q_{Nr.3;BL_THZ-HU}) (1 - q_{Nr.3;BL_HU-Radbr.}) \cdot (1 - q_{Nr.3;Bremschlauch}) (1 - q_{Nr.3;Radbr.}). \quad (7-24)$$

Fall Nr. 4:

Der Fall Nr. 4 gestaltet sich sehr komplex, da jede mögliche Kombination aus den Zuständen 1 und 2 bzw. 3 ausgewertet werden muss. Da hierzu immer Fehlerkombinationen mit mindestens zwei Fehlern betrachtet werden müssen, ist hier mit sehr geringen Eintretenswahrscheinlichkeiten zu rechnen. Daher wird dieser Zustand, der sehr unwahrscheinlich ist, nicht weiter untersucht.

Fall Nr. 5:

Dieser schlimmste Fall eines Systemversagens kann, außer durch absoluten Funktionsausfall des Pedals oder des THZ, nur durch Mehrfachfehler auftreten. Das logische Blockschaltbild zu dieser Anordnung gestaltet sich wie folgt (Bild 7-7).

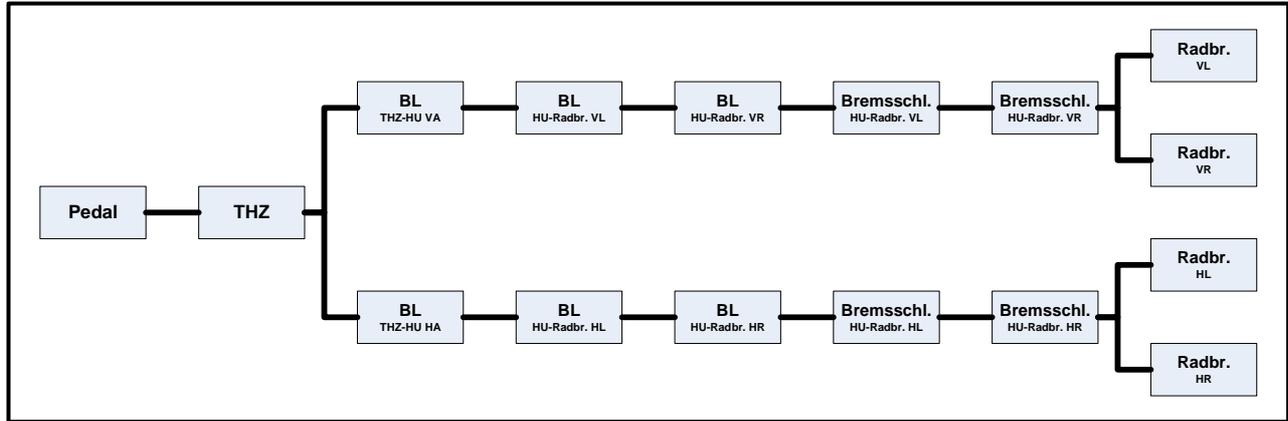


Bild 7-7: Blockschaltbild zum Funktionsausfall Nr. 5

Anhand des Zuverlässigkeits-Blockschaltbildes folgt für die Ausfallwahrscheinlichkeit für den Fall Nr. 5:

$$q_{Nr.5} = 1 - p_{Pedal} \cdot p_{THZ;Nr.5} \cdot \left[1 - \left(1 - p_{BL}^3 \cdot p_{Bremsschlauch}^2 \cdot \left(1 - q_{Radbremse}^2 \right) \right)^2 \right], \quad (7-25)$$

mit:

$$p_{THZ;Nr.5} = 1 - k_{THZ;2\text{ Kreis}} \cdot q_{THZ}. \quad (7-26)$$

Obwohl im Zuverlässigkeitsblockschaltbild 16 Komponenten aufgeführt sind, werden nur die Ausfallwahrscheinlichkeiten für fünf Komponenten benötigt, was daran liegt, dass einige Komponenten, wie z. B. die Radbremsen, ein identisches Ausfallverhalten haben.

Der zeitliche Verlauf der Ausfallwahrscheinlichkeiten für die Fälle Nr. 1, 2, 3 und 4 ist in folgendem Bild 7-8 graphisch dargestellt.

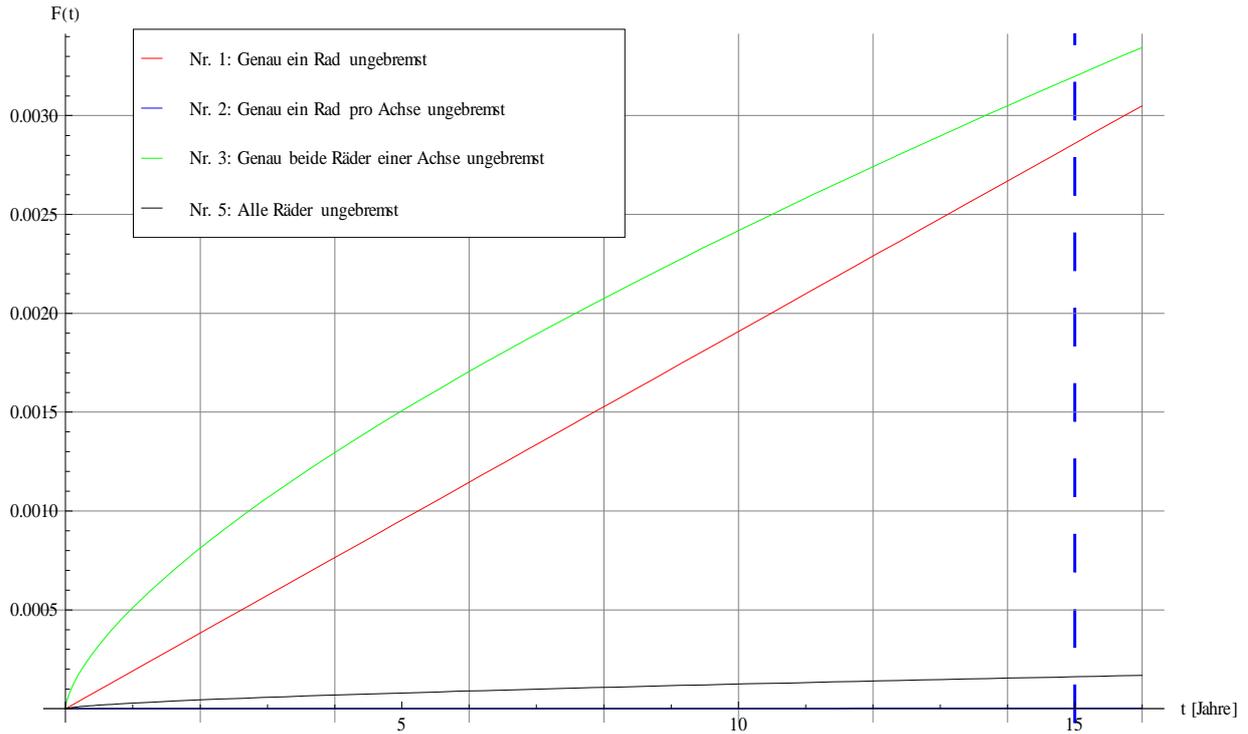


Bild 7-8: Ausfallwahrscheinlichkeiten der sicherheitskritischen Betriebszustände

Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten genau eines ungebremsten Rades an jeder Achse (Fall Nr. 2) ist so gering, dass sie im Bild 7-8 nicht sichtbar ist. Ein Auszug der gezeigten Ausfallwahrscheinlichkeiten für die Fälle Nr. 2 und Nr. 5, bei dem nur ein kleiner Teil des gesamten Verlaufs der Ausfallwahrscheinlichkeit gezeigt wird, ist in Bild 7-9 zu sehen.

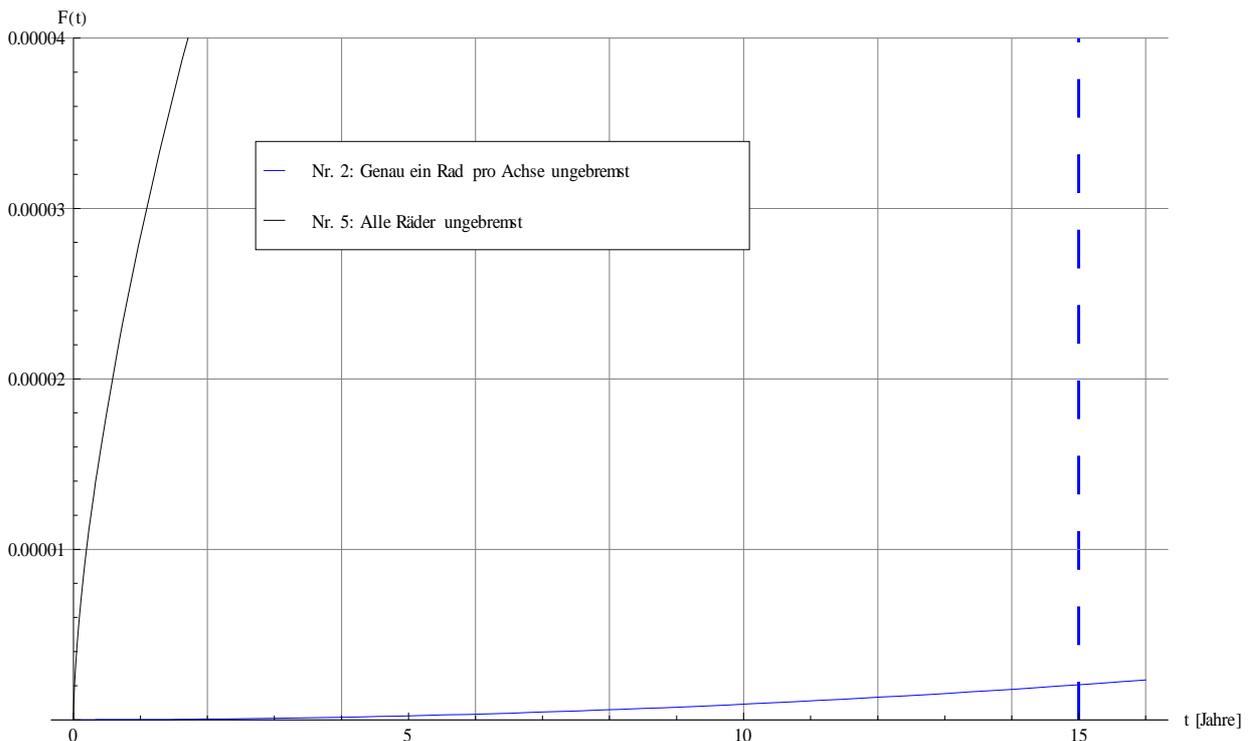


Bild 7-9: Ausfallwahrscheinlichkeiten der Betriebszustände Nr. 2 und Nr. 3 (skaliert)

Sehr deutlich ist für den Fall Nr. 3 zu sehen, dass auch hier ein „Frühausfallverhalten“ vorliegt. Die Fälle Nr. 1 und Nr. 5 weisen auf den ersten Blick ein konstantes Ausfallverhalten auf. Allerdings zeigt sich im Anfangsbereich bei einer genaueren Betrachtung ebenfalls ein Frühausfallverhalten. Der Fall Nr. 2 beinhaltet dagegen Besonderheiten: Zum einen ist er äußerst unwahrscheinlich, da jeweils genau eine Radbremse an einer Achse defekt sein muss, damit dieser Fall eintritt. Es ist demnach mit den möglichen Fehlerkombinationen und unter den verwendeten Parametern wahrscheinlicher, dass alle vier Räder nicht gebremst sind. Zum anderen zeigt dieser Fall für größere Zeiten, obwohl die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Radbremsen exponentiell verteilt sind, ein Verschleißverhalten, welches durch die Fehlerkombinationen erklärt werden kann. Allerdings ist auch ersichtlich, dass dieser Fall nicht weiter relevant ist, da die Eintretenswahrscheinlichkeit im Verhältnis zu den anderen Fällen sehr klein ist.

Im Allgemeinen sind die Werte dieser sicherheitskritischen Zustände ausreichend klein. Hinzu kommt in diesem Modell, dass keine Wartung berücksichtigt wird, die vor allem an den Radbremsen im Laufe des Fahrzeuglebens stattfinden sollte. Demnach sind die obigen Fälle eine Worst-Case-Abschätzung.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der stetig steigenden Komplexität und Vernetzung von Systemen im Kraftfahrzeug, die immer mehr Funktionen erfüllen, entstehen weitere Fehlermöglichkeiten. Dies führt dazu, dass selbst bei Systemen, die schon seit vielen Jahren im Kraftfahrzeug eingesetzt werden, eine Bewertung der Sicherheit und Zuverlässigkeit nicht ohne weiteres möglich ist. Die generell zu erwartende Tendenz hierbei ist, dass aufgrund der zusätzlich verwendeten Komponenten und Funktionen die Systeme unzuverlässiger werden. Bezüglich der Sicherheit muss aber vor allem bei sicherheitsrelevanten Systemen gewährleistet sein, dass aufgrund der veränderten Systemstrukturen diese nicht abnimmt.

In dieser Arbeit ist ein praxisorientierter empirischer Ansatz zur Bestimmung des Ausfallverhaltens von konventionellen Systemen im Kraftfahrzeug entwickelt worden. Die Basis einer solchen Untersuchung bildet die Systemabgrenzung. Hierzu werden mehrere Einteilungen von Bremssystemen aufgestellt, anhand derer als konventionelles Bremssystem das Antiblockiersystem (ABS) und das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) ausgewählt worden sind.

Als Datenbasis für die quantitativen Bewertungen des Ausfallverhaltens der Systeme und Funktionen dient primär eine umfassende Garantiedatenbank von Zulieferern mit mehr als 50.000 Fehleinträgen zu nahezu allen Komponenten eines Bremssystems. Die Daten wurden mit einem bewährten jedoch weiterentwickelten Zuverlässigkeitsprognosemodell ausgewertet und die Ergebnisse systematisch zusammengestellt. Zusätzliche Daten, wie zusammengefasste Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes aus Hauptuntersuchungen, Pannendaten des ADAC mit mehr als 120.000 Einträgen sowie mehr als 4,4 Mio. Daten der Gesellschaft für Technische Überwachung mbH (GTÜ), stehen zu Vergleichszwecken zur Verfügung.

Mit einem einfachen hardwarebasierten Ansatz und unter Verwendung der Zuverlässigkeitskenngrößen der Komponenten werden die konventionellen Bremssysteme zuverlässigkeitstechnisch untersucht. Es hat sich gezeigt, dass das reine Antiblockiersystem ABS ca. um den Faktor 1,2 bis 1,3 besser ist als das Elektronische Stabilitätsprogramm ESP, welches bekanntlich weitere Sensoren benötigt. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass das neuere ESP 2 zuverlässiger ist, als das ESP 1. Generell sind die numerischen Werte der Zuverlässigkeitskenngrößen sehr niedrig, was durch die verwendeten Garantiedaten erklärt werden kann.

Das Ausfallverhalten der Systeme, die aus vielen Komponenten mit meist frühausfallbehaftetem Ausfallverhalten bestehen, kann interessanterweise jeweils über eine Weibull-Verteilung abgebildet werden. Die besonders interessierende Ausfallsteilheit hat bei den Systemen den Wert $\beta \approx 0,65$ ergeben. Das bedeutet, dass obwohl die Systeme unterschiedliche Konfigurationen aufweisen, sich das Ausfallverhalten nahezu nicht unterscheidet.

Zur Analyse der Sicherheit wurde ein neuer funktionaler Ansatz entwickelt. Die Untersuchung der Funktionen einfache Bremsung ohne Unterstützung („Basisbremsung“), der geregelten Bremsung mit dem Antiblockiersystem bzw. der elektronischen Bremskraftverteilung EBV („Basisbremsung

mit ABS/EBV“) und der vollständig unterstützten Bremsung („Gesamtsystem mit Verstärkung“) hat hierbei gezeigt, dass die „Basisbremsung“ um den Faktor zwei zuverlässiger ist, als die beiden anderen Funktionen, die sich wiederum nur in der Zuordnung durch den Bremskraftverstärker unterscheiden. Dies ist zu erwarten, da bei der Basisbremse einige Redundanzen enthalten sind, welche die Zuverlässigkeit erhöhen.

Eine weitere Untersuchung mittels Markov-Modellen eignet sich ebenfalls zur Untersuchung von Bremssystemen, sollte aber nur dann angewandt werden, wenn viele Zustände zusammengefasst werden können, so dass die Zustandsanzahl nicht explodiert.

Bei den sicherheitskritischen Funktionen „Antiblockiersystem ABS“ und „elektronische Bremskraftverteilung EBV“, die für die Fahrzeugstabilität und -beherrschbarkeit wichtig sind, ist erstgenannte mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von $F_{ABS}(t = 15 \text{ Jahre}) \approx 0,0108$ um den Faktor sieben schlechter als die EBV. Diese Auslegung des Systems ist jedoch so gewollt, da die elektronische Bremskraftverteilung zu früh blockierende Hinterräder vermeiden soll und somit die Spurführung unterstützt, während das ABS „nur“ für die Aufrechterhaltung der Lenkbarkeit während einer Bremsung sorgt. Bei beiden Funktionen sind dennoch die Ausfallwahrscheinlichkeiten sehr gering.

Bei einer weiteren ausführlichen Analyse der Radbremsen zeigt sich, dass der Ausfall aller vier Radbremsen sehr unwahrscheinlich ist. Noch geringer fällt der Zahlenwert für die Ausfallwahrscheinlichkeit von genau zwei ungebremsten Rädern an unterschiedlichen Achsen bei einer II-Bremskreisauslegung aus. Dies liegt besonders daran, dass es bei vielen Fehlern, wie bei Leckagen an den Bremsschläuchen und -leitungen, zu zwei ungebremsten Rädern an einer Achse kommt.

Statistisch abgesicherte Aussagen über das langfristige Ausfallverhalten von Bremssystemen konnten im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen in dieser Arbeit nicht getroffen werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen, die jedoch ergänzend erfasste Daten der Zulieferer für einen längeren Zeitraum erfordern.

Ungeachtet dessen können die erzielten Ergebnisse und Ansätze auch für die Bewertung von Brake-by-Wire-Systemen genutzt werden, um den geforderten Zuverlässigkeits- und Sicherheitsnachweis zu erbringen. Hierzu eignen sich Vergleiche von identischen Funktionen zwischen bestehenden und neu entwickelten Systemen, um so Schwachstellen in der Auslegung oder nicht ausreichende Redundanzen aufzuzeigen.

9 Literatur

- /Alt 03/ Althaus, D.: Analyse der Anwendungsmöglichkeiten homogener Markoff-Prozesse zur Generierung von Verfügbarkeits- und Sicherheitsaussagen bei Drive-by-Wire-Systemen am Beispiel der elektrohydraulischen Bremse SBC. Studienarbeit, Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, 2003.
- /Ben 04/ Benz, St.: Eine Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- /Bir 91/ Birolini, A.: Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme: Theorie, Praxis, Management. Springer Verlag, 3. Auflage, Berlin, 1991.
- /Bis 71/ Bisimis, E.: Bremskreisausfall bei Zweikreis-Bremsanlagen. ATZ 73, S. 197-204. 1971.
- /Bos 01/ Bosch, Gelbe Reihe: Konventionelle und elektronische Bremssysteme. Robert Bosch GmbH, 3. Auflage, Stuttgart, 2001.
- /Bos 03/ Robert Bosch GmbH: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch (interaktiv). Vieweg Verlag, 26. Auflage, Braunschweig /Wiesbaden, 2003.
- /Bos 94/ Bosch: Bremsanlagen. Robert Bosch GmbH, 3. Auflage, Stuttgart, 1994.
- /Bra 03/ Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Vieweg Verlag, 3. Auflage, Wiesbaden, 2003.
- /Breu 03/ Breuer, B.; Bill, K. H.: Bremsenhandbuch; Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrndynamik. Vieweg Verlag, 1. Auflage, Wiesbaden, 2003.
- /Ece 02/ UN-ECE: ECE-Regelung 13, Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung von Fahrzeugen der Klassen M, N, und O hinsichtlich der Bremsen, Änderung 09, Nachtrag 6, in Kraft seit 02.02.2002.
- /Eck 96/ Eckert, A.: Statistische Methoden der Zuverlässigkeitsprüfung von elektronischen Steuergeräten. Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, 1996.
- /Hei 97/ Heitmann, P.: Technische Analysen des Lebensdauerverhaltens elektronischer Steuergeräte. Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, 1997.

- /Kne 00/ Knepper, R.: Der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsprozess in der zivilen Luftfahrtindustrie. VDI-Bericht 1546, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- /Lie 05/ Liebig, C.: Zuverlässigkeitsbewertungen von Kfz-Komponenten und Methoden zur Fehlerfrüherkennung mittels Felddaten. Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, 2005.
- /Mar 04/ Martinus, M.A.: Funktionale Sicherheit von mechatronischen Systemen bei mobilen Arbeitsmaschinen. Dissertation, Technische Universität München, 2004.
- /Mey 03/ Meyer, M.: Methoden zur Analyse von Garantiedaten für die Sicherheits- und Zuverlässigkeitsprognose von Komponenten und Baugruppen im Kraftfahrzeug. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2003.
- /Mey 03b/ Meyna, A.; Pauli, B.: Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren. Carl-Hanser-Verlag, München, 2003.
- /Mit 78/ Mitschke, M.; Uffelman, F.: Über die Zuverlässigkeit von Bremsanlagen, Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 257. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1978.
- /Mit 79/ Mitschke, M.; Uffelman, F.: Programmvorschlag zur Erhöhung der Zuverlässigkeit von Bremsanlagen. IfF-Bericht Nr. 531. Braunschweig, 1979.
- /OCo 90/ O'Connor, P.D.T.: Zuverlässigkeitstechnik, Grundlagen und Anwendungen. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1990.
- /Pau 98/ Pauli, B.: Zuverlässigkeitsprognosen für elektronische Steuergeräte im Kraftfahrzeug: Modellbildungen und deren praktische Anwendungen. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Shaker Verlag, Aachen, 1998.
- /Run 98/ Runkel, S.: Zuverlässigkeitstechnische Abhängigkeiten von elektronischen Steuergeräten. Diplomarbeit, Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, 1998.
- /Sti 08/ Stiels, M.: Auswertung unabhängiger Kraftfahrzeugdaten bezüglich der Fahrleistung und systematische Zusammenstellung zur weiteren Verwendung in Zuverlässigkeitsprognosen. Bachelor-Thesis, Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Sicherheitstheorie und Verkehrstechnik, 2008.
- /Str 08/ Strengert, St.: Methodik zur ganzheitlichen, dynamischen Analyse sicherheitsrelevanter, verteilter Kraftfahrzeugsysteme unter dem Aspekt des Fehlverhaltens. Dissertation, Universität Kassel, 2008.

- /Uff 74/ Uffermann, F.: Zuverlässigkeit und Bauaufwand von Pkw-Bremsanlagen. IfF-Bericht Nr. 397. Braunschweig, 1974.
- /Uff 77/ Uffermann, F.: Über die Zuverlässigkeit von Bremsanlagen. IfF-Bericht Nr. 457. Braunschweig, 1977.
- /VDA 96/ Verband der Automobilindustrie e.V. (Hrsg.): Tatsachen und Zahlen aus der Kraftverkehrswirtschaft. 60. Folge, Frankfurt, 1996.

Internetquellen

- /bos 01/ Hauptseite: www.bosch-presse.de; Bearbeitungsstand: 01/08.
URL: http://www.bosch-presse.de/cgi-bin/cgiWebLinkImage.exe /1-AA-14489.jpg?sid=32215403&action=jpeg&image=\\Obelix\ARENA2\Bilder\bosch_pb\0208\jpg_org\1-AA-14489.jpg
(Abgerufen: 25.08.2008; 11.24 UTC).
- /bsw 01/ Artikel: Bremse. In [bs-wiki.de](http://www.bs-wiki.de), Wissen teilen.
URL: <http://www.bs-wiki.de/mediawiki/index.php/Bremse>
(Abgerufen: 19.08.2008; 12.32 UTC).
- /con 01/ Hauptseite: www.mediacenter.conti-online.com; Bearbeitungsstand: 18.03.2008.
URL: http://mediacenter.conti-online.com/internet/generator/MAM/index,templateId=Folder_2FrenderDefault.jsp.html?method=show&action=/details.do&oid=2139500#
(Abgerufen: 25.08.2008; 17.10 UTC).
- /mot 01/ Artikel: Simplexbremse. In www.motorradonline.de.
URL: <http://www.motorradonline.de/lexikon/bremsen/simplexbremse.4616.htm>
(Abgerufen: 19.08.2008; 12.32 UTC).
- /sie 01/ Hauptseite: www.siemens.com; Bearbeitungsstand: 22.05.2005
URL: http://a1.siemens.com/innovation/de/news_events/innovationnews/innovationnews-meldungen/verkehr/inelektronischerkeilbremsestecktausgeklougeltesensorik.htm
(Abgerufen: 25.08.2008; 17.41 UTC).
- /spi 01/ Artikel: REIFEN-HISTORIE, TEIL 1, Gib' Gummi!. In [spiegelonline](http://www.spiegelonline.de).
Bearbeitungsstand: 18.03.2003.
URL: <http://www.spiegel.de/auto/werkstatt/0,1518,240200,00.html>.
(Abgerufen: 19.08.2008; 10.46 UTC).

-
- /wik 01/ Artikel Hemmschuh. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 3. Juli 2008, 19:29 UTC.
URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Hemmschuh&oldid=47976321>
(Abgerufen: 19. August 2008, 15:01 UTC).
- /wik 02/ Bild: Klotzbremse an kutsche mit neuem bremsklotz.jpg. Bearbeitungsstand: 2. April 2008, 19.46 UTC.
URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Klotzbremse_an_kutsche_mit_neuem_bremsklotz.jpg
(Abgerufen: 19.08.2008; 17:10 UTC).
- /wik 03/ Artikel Bremse. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.
Bearbeitungsstand: 22. Juli 2008, 22:15 UTC.
URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bremse&oldid=48700504>
(Abgerufen: 25. August 2008, 09:08 UTC).

Anhang

A 1 Abkürzungsverzeichnis

ABS	A ntiblockiersystem
ACC	A daptive C ruise C ontrol (dt.: adaptive Geschwindigkeitsregelung)
ADAC	Allgemeiner D eutscher A utomobilclub
ASG	A nbausteuergerät
AV	A uslassventil
AvD	A utomobilclub von D eutschland
BLS	B remslichtschalter
BS	B eschleunigungssensor
DEKRA	D eutscher K raftfahrzeug- Ü berwachungsverein
DF	D rehzahlfühler
DRS	D rehratensensor
DS	D rucksensor
EBV	E lektronische B remskraftverteilung
EHB	E lektro h draulische B remse
EM	erheblicher M angel
EMB	E lektro m echanische B remse
ESP	E lektronisches S tabilitäts p rogramm
EV	E inlassventil
eVLP	elektrische V orladepumpe
FIN	F ahrzeugidentifikations n ummer
GM	geringer M angel
GTÜ	G esellschaft für T echnische Ü berwachung mbH
HF	H auptfunktion
HU	H ydraulic U nit (dt.: Hydraulikeinheit)
H-Fehler	F ehler, die vom H ersteller zu verantworten sind
i.O.	i n O rdnung
KBA	K raftfahrt- B undesamt
KBS	konventionelles B remssystem
LWS	L enkwinkelsensor
ntf	n o t rouble f ound (dt.: kein Fehler gefunden)
MV	M agnetventil
OEM	O riginal E quipment M anufacturer (dt.: Fahrzeughersteller)

ppm	p arts p er m illion
PWG	P edal w eg g eber
PWS	P edal w eg s ensor
RQ	R ück k lauf q uote
SBC	S ensotronic B rake C ontrol (dt.: Elektrohydraulische Bremse)
SG	S teu e r g erät
SW	S oft w are
THZ	T andem h aup t brems z ylinder
tiO	t echnisch i n O rdnung
tnf	t rouble n ot f ound (dt.: Fehler nicht gefunden)
TMF	T eil m arkt f aktor
TÜV	T echnischer Ü berw a chungs v erein
UF	U nter f unktionen
VAF	V alue A dded F unction (dt.: Zusatzfunktionen)
VDA	V erband der D eutschen A utomobilindustrie
VM	v erkehr u n s icherer M angel
WSG	W eg b aust e u e rgerät
Z-Fehler	F ehler, die vom Z ulieferer zu verantworten sind

A 2 Zusammenstellung Analyseergebnisse Daten Zulieferer

A 2.1 ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

Tabelle A-1: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für die ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)							
Seriennummer	Grunddaten			jährliche Fahrleistungsparameter			
	Anzahl Ausfälle [Stück]	Teilmarktfaktor TMF	zugehörige FM	μ	σ	E(T) [Tkm]	B
1	30	15,40	1.001.097	2,908	0,662	22,8	0,9852
2	42	2,56	378.109	2,443	0,574	13,6	0,9932
3	29	10,00	413.686	2,529	0,851	18,0	0,9966
4	26	2,63	215.326	2,556	0,800	17,7	0,9958
5	28	10,00	641.647	2,448	0,901	17,4	0,9970
6	36	15,40	2.122.009	2,775	0,665	20,0	0,9960
7	36	3,17	544.025	2,078	0,607	9,6	0,9891
8	20	13,50	546.347	2,644	0,850	20,2	0,9880
9	17	10,00	203.209	2,477	1,004	19,7	0,9728
10	38	2,87	705.761	2,630	0,670	17,4	0,9958
Mittelwert	30	8,55	677.122	2,549	0,758	17,6	0,9909
Seriennummer	km-abhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Tkm)			zeitabhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Jahr)			
	α	β	B	α	β	w	Bem.
1	3,60E-05	0,734	0,9985	3,43E-04	0,734	1	
2	2,95E-05	0,730	0,9943	1,92E-04	0,730	1	
3	1,96E-04	0,404	0,9958	5,76E-04	0,404	1	
4	2,93E-05	0,721	0,9821	2,19E-04	0,721	1	
5	1,18E-04	0,419	0,9978	3,55E-04	0,419	1	
6	5,65E-05	0,451	0,9956	2,07E-04	0,451	1	
7	6,20E-05	0,460	0,9984	1,67E-04	0,460	1	
8	1,75E-04	0,345	0,9989	4,56E-04	0,345	1	
9	1,08E-04	0,634	0,9858	6,34E-04	0,634	1	
10	3,06E-05	0,523	0,9790	1,29E-04	0,523	1	
Mittelwert	8,41E-05	0,542	0,9926	3,28E-04	0,542	1	

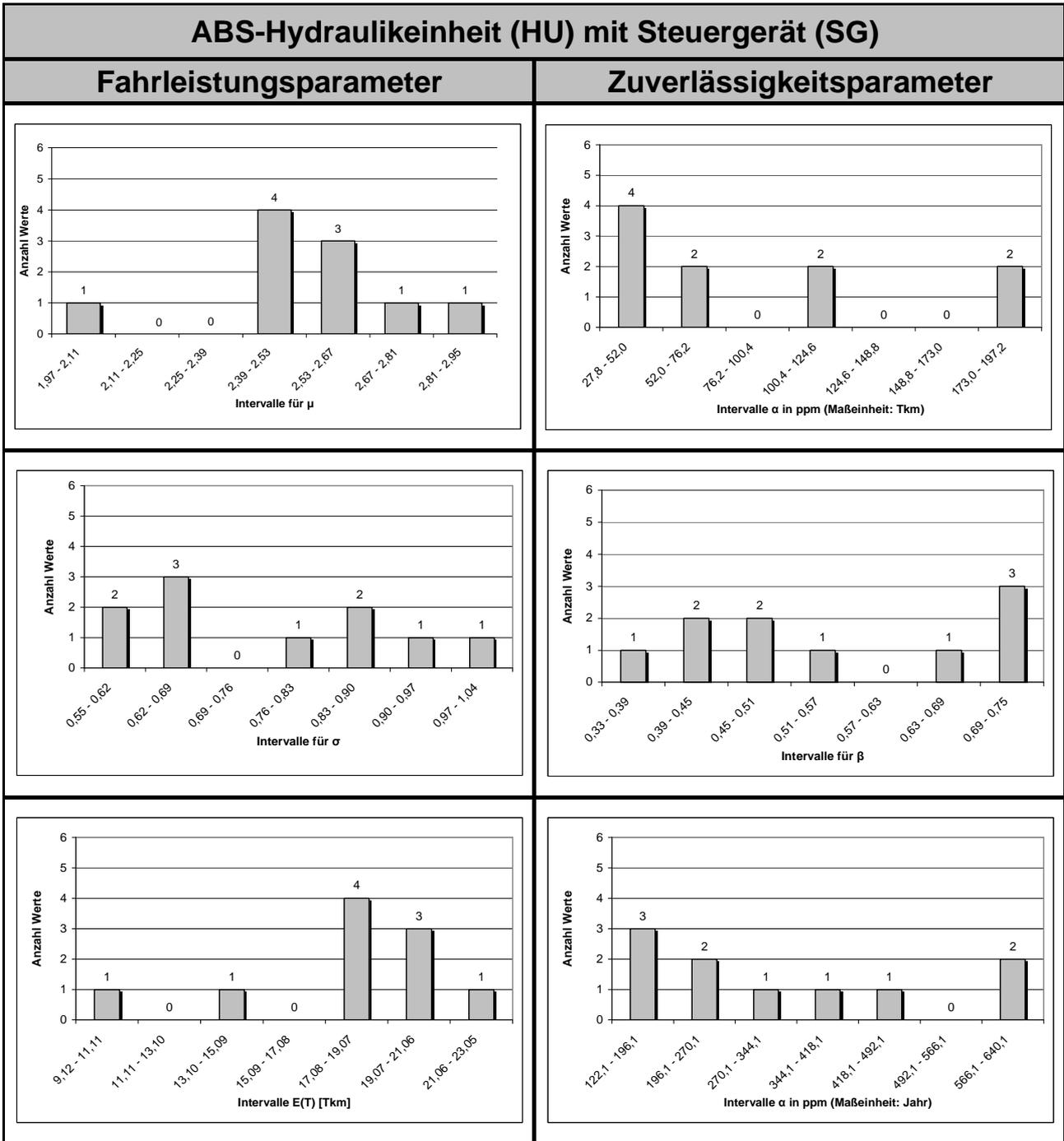


Bild A-1: Anzahl der ermittelten Parameter eingeteilt in Intervalle für die ABS-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

A 2.2 ESP1-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

Tabelle A-2: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für die ESP1-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

ESP1-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)							
Seriennummer	Grunddaten			jährliche Fahrleistungsparameter			
	Anzahl Ausfälle [Stück]	Teilmarktfaktor TMF	zugehörige FM	μ	σ	E(T) [Tkm]	B
1	48	8,00	61.195	2,870	0,617	21,3	0,9975
2	158	8,00	497.444	2,903	0,673	22,9	0,9978
3	27	8,00	279.690	2,957	0,700	24,6	0,9934
4	32	8,00	115.868	2,746	0,531	17,9	0,9962
5	25	2,00	230.289	3,123	0,796	31,2	0,9921
6	133	2,00	1.005.184	2,867	0,764	23,5	0,9986
7	29	8,00	201.580	2,740	0,646	19,1	0,9927
8	152	8,00	1.231.218	3,104	0,704	28,6	0,9968
9	31	8,00	207.623	2,534	0,741	16,6	0,9943
Mittelwert	71	6,67	425.566	2,872	0,686	22,9	0,9955
Seriennummer	km-abhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Tkm)			zeitabhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Jahr)			
	α	β	B	α	β	w	Bem.
1	4,93E-04	0,708	0,9945	4,14E-03	0,706	1	
2	2,81E-04	0,609	0,9979	1,79E-03	0,609	1	
3	1,24E-04	0,507	0,9960	5,90E-04	0,507	1	
4	1,68E-04	0,753	0,9947	1,43E-03	0,752	1	
5	3,79E-05	0,466	0,9905	1,74E-04	0,466	1	
6	5,20E-05	0,456	0,9993	2,04E-04	0,456	1	
7	2,12E-04	0,510	0,9906	9,05E-04	0,510	1	
8	1,64E-04	0,476	0,9938	7,59E-04	0,476	1	
9	2,44E-04	0,502	0,9959	9,31E-04	0,502	1	
Mittelwert	1,97E-04	0,554	0,9948	1,21E-03	0,554	1	

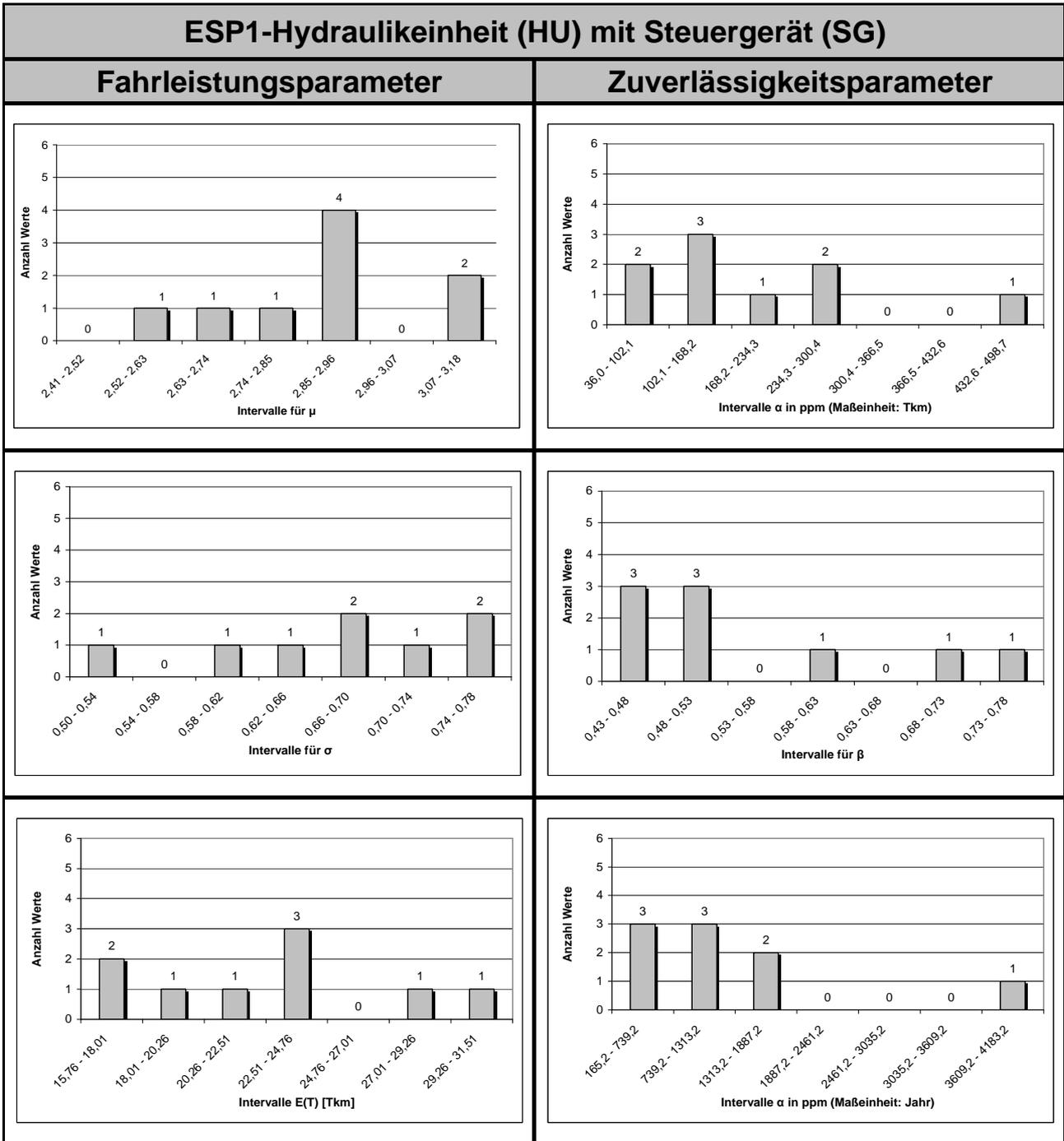


Bild A-2: Anzahl der ermittelten Parameter eingeteilt in Intervalle für die ESP1-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

A 2.3 ESP2-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

Tabelle A-3: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für die ESP2-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

ESP2-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)							
Seriennummer	Grunddaten			jährliche Fahrleistungsparameter			
	Anzahl Ausfälle [Stück]	Teilmarktfaktor TMF	zugehörige FM	μ	σ	E(T) [Tkm]	B
1	31	5,00	44.547	2,794	0,869	23,8	0,9963
2	38	5,00	378.068	3,272	0,759	35,2	0,9918
3	51	8,00	522.683	2,944	0,643	23,4	0,9959
4	40	5,00	490.133	2,723	0,732	19,9	0,9925
5	43	5,00	327.551	2,794	0,771	22,0	0,9964
6	76	8,00	298.893	3,083	0,579	25,8	0,9954
7	20	8,00	127.600	2,789	0,668	20,3	0,9925
8	40	2,66	327.356	2,819	0,727	21,8	0,9957
Mittelwert	42	5,83	314.604	2,902	0,718	24,0	0,9946
Seriennummer	km-abhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Tkm)			zeitabhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Jahr)			
	α	β	B	α	β	w	Bem.
1	9,23E-04	0,398	0,9964	2,98E-03	0,398	1	
2	1,24E-04	0,391	0,9918	4,65E-04	0,391	1	
3	1,16E-04	0,523	0,9941	5,74E-04	0,523	1	
4	7,20E-05	0,514	0,9928	3,13E-04	0,515	1	
5	2,07E-04	0,384	0,9989	6,32E-04	0,384	1	
6	5,30E-05	0,835	0,9969	7,82E-04	0,834	1	
7	1,69E-04	0,588	0,9935	9,38E-04	0,588	1	
8	1,12E-04	0,317	0,9935	2,82E-04	0,317	1	
Mittelwert	2,22E-04	0,494	0,9947	8,70E-04	0,494	1	

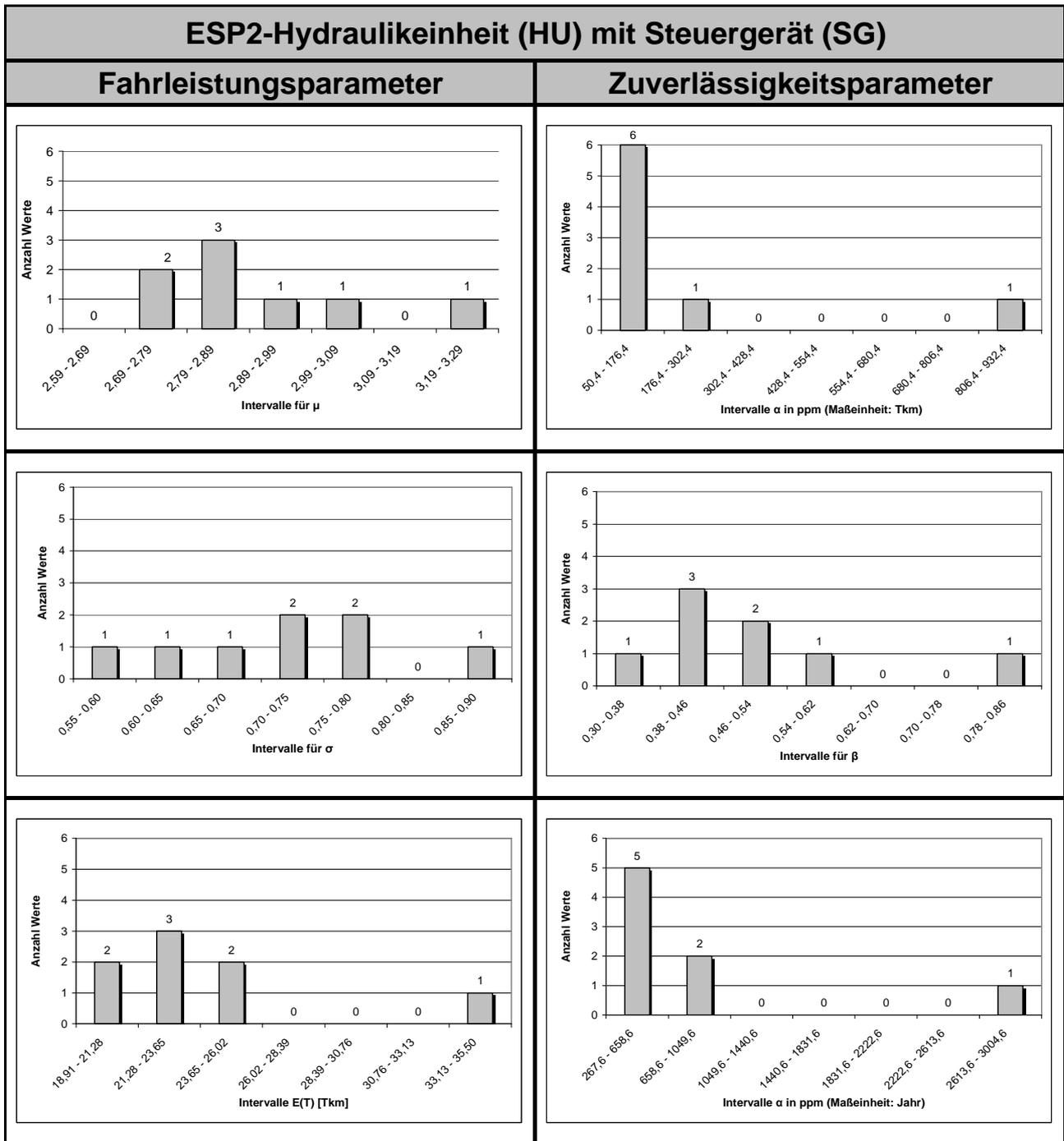


Bild A-3: Anzahl der ermittelten Parameter eingeteilt in Intervalle für die ESP2-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

A 2.4 Erweiterte ESP-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

Tabelle A-4: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für die Erweiterte ESP-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

Erweiterte ESP-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)							
Seriennummer	Grunddaten			jährliche Fahrleistungsparameter			
	Anzahl Ausfälle [Stück]	Teilmarktfaktor TMF	zugehörige FM	μ	σ	E(T) [Tkm]	B
1	429	2,50	288.585	2,959	0,846	27,6	0,9994
2	206	2,50	97.238	2,932	0,786	25,6	0,9977
3	108	2,66	102.681	3,029	0,807	28,6	0,9946
4	134	2,50	176.719	2,956	0,781	26,1	0,9990
5	30	2,50	38.844	3,312	0,785	37,3	0,9923
6	50	2,50	62.212	3,004	0,746	26,6	0,9971
7	78	2,50	320.515	3,254	0,000	25,9	0,9976
8	28	2,50	231.255	2,954	0,631	23,4	0,9972
9	50	2,50	163.957	2,774	0,634	19,6	0,9980
Mittelwert	124	2,52	164.667	3,019	0,752	26,7	0,9970
Seriennummer	km-abhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Tkm)			zeitabhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Jahr)			
	α	β	B	α	β	w	Bem.
1	2,94E-04	0,660	0,9985	2,42E-03	0,659	1	
2	5,97E-04	0,585	0,9972	3,69E-03	0,585	1	
3	1,95E-04	0,700	0,9940	1,91E-03	0,699	1	
4	6,64E-05	0,887	0,9952	1,15E-03	0,886	1	SG-Fehler
5	1,12E-04	0,728	0,9966	1,46E-03	0,727	1	
6	1,51E-04	0,687	0,9946	1,14E-03	0,687	1	
7	8,60E-05	0,490	0,9956	4,53E-04	0,490	1	
8	3,79E-05	0,577	0,9940	2,23E-04	0,577	1	nur WSG
9	1,22E-04	0,531	0,9945	5,64E-05	0,531	1	nur WSG
Mittelwert	1,85E-04	0,650	0,9956	1,39E-03	0,649	1	

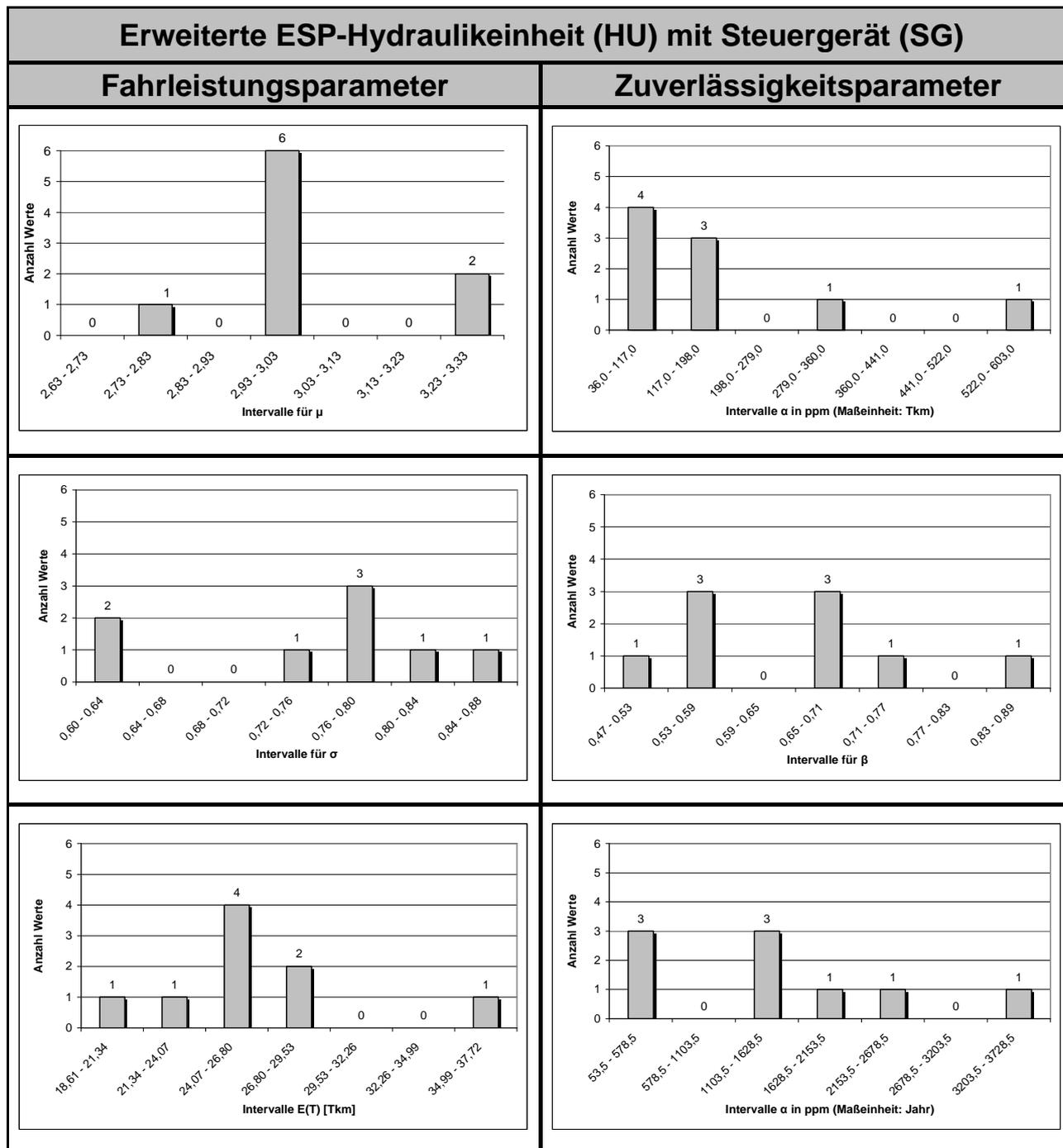


Bild A-4: Anzahl der ermittelten Parameter eingeteilt in Intervalle für die Erweiterte ESP-Hydraulikeinheit (HU) mit Steuergerät (SG)

A 2.5 Drehzahlfühler DF 1+2

Tabelle A-5: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für die Drehzahlfühler DF 1+2

Drehzahlfühler DF 1+2							
Seriennummer	Grunddaten			jährliche Fahrleistungsparameter			
	Anzahl Ausfälle [Stück]	Teilmarktfaktor TMF	zugehörige FM	μ	σ	E(T) [Tkm]	B
1	52	2,66	321.390	3,056	0,767	28,5	0,9970
2	46	10,00	123.954	2,730	0,757	20,4	0,9956
3	228	2,46	3.219.037	2,647	0,703	18,1	0,9991
4	45	10,00	349.658	2,776	0,831	22,7	0,9965
5	132	10,00	1.044.560	2,678	0,858	21,0	0,9979
6	74	2,91	127.940	2,624	0,655	17,1	0,9988
7	112	2,91	91.205	2,616	0,673	17,2	0,9982
8	86	10,17	2.248.588	2,988	0,771	26,7	0,9989
9	33	10,00	487.110	2,225	0,517	10,6	0,9982
10	45	3,17	258.335	3,068	0,873	31,5	0,9976
11	660	2,66	1.488.044	3,049	0,711	27,2	0,9987
12	52	2,66	180.451	2,800	0,829	23,2	0,9951
13	76	15,40	4.258.030	2,742	0,680	19,6	0,9979
14	26	3,17	1.070.893	2,426	0,741	14,9	0,9954
15	30	10,00	636.770	2,995	0,593	23,8	0,9935
Mittelwert	113	6,54	1.060.398	2,761	0,731	21,5	0,9972
Seriennummer	km-abhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Tkm)			zeitabhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Jahr)			
	α	β	B	α	β	w	Bem. *)
1	2,71E-05	0,392	0,9913	9,39E-05	0,392	1	26,92%
2	1,41E-04	0,535	0,9953	6,58E-04	0,535	1	23,91%
3	3,30E-05	0,496	0,9930	1,30E-04	0,496	1	100,00%
4	3,64E-05	0,577	0,9965	2,03E-04	0,576	1	22,22%
5	1,89E-05	0,521	0,9973	8,44E-05	0,521	1	9,09%
6	2,15E-04	0,609	0,9937	1,15E-03	0,608	1	100,00%
7	4,41E-04	0,617	0,9949	2,42E-03	0,617	1	100,00%
8	1,01E-05	0,657	0,9921	8,17E-05	0,657	1	31,40%
9	4,36E-05	0,843	0,9938	3,13E-04	0,843	1	57,58%
10	4,34E-06	0,838	0,9982	7,43E-05	0,838	1	20,00%
11	1,06E-04	0,488	0,9988	4,97E-04	0,488	1	58,18%
12	6,60E-05	0,532	0,9945	3,23E-04	0,532	1	55,77%
13	4,90E-05	0,508	0,9937	2,09E-04	0,508	1	100,00%
14	7,91E-06	0,724	0,9982	5,30E-05	0,724	1	100,00%
15	2,66E-05	0,799	0,9959	3,25E-04	0,798	1	100,00%
Mittelwert	8,17E-05	0,609	0,9951	4,41E-04	0,609	1	

*) α -Werte wurden zurückgerechnet. siehe Kapitel 5.2

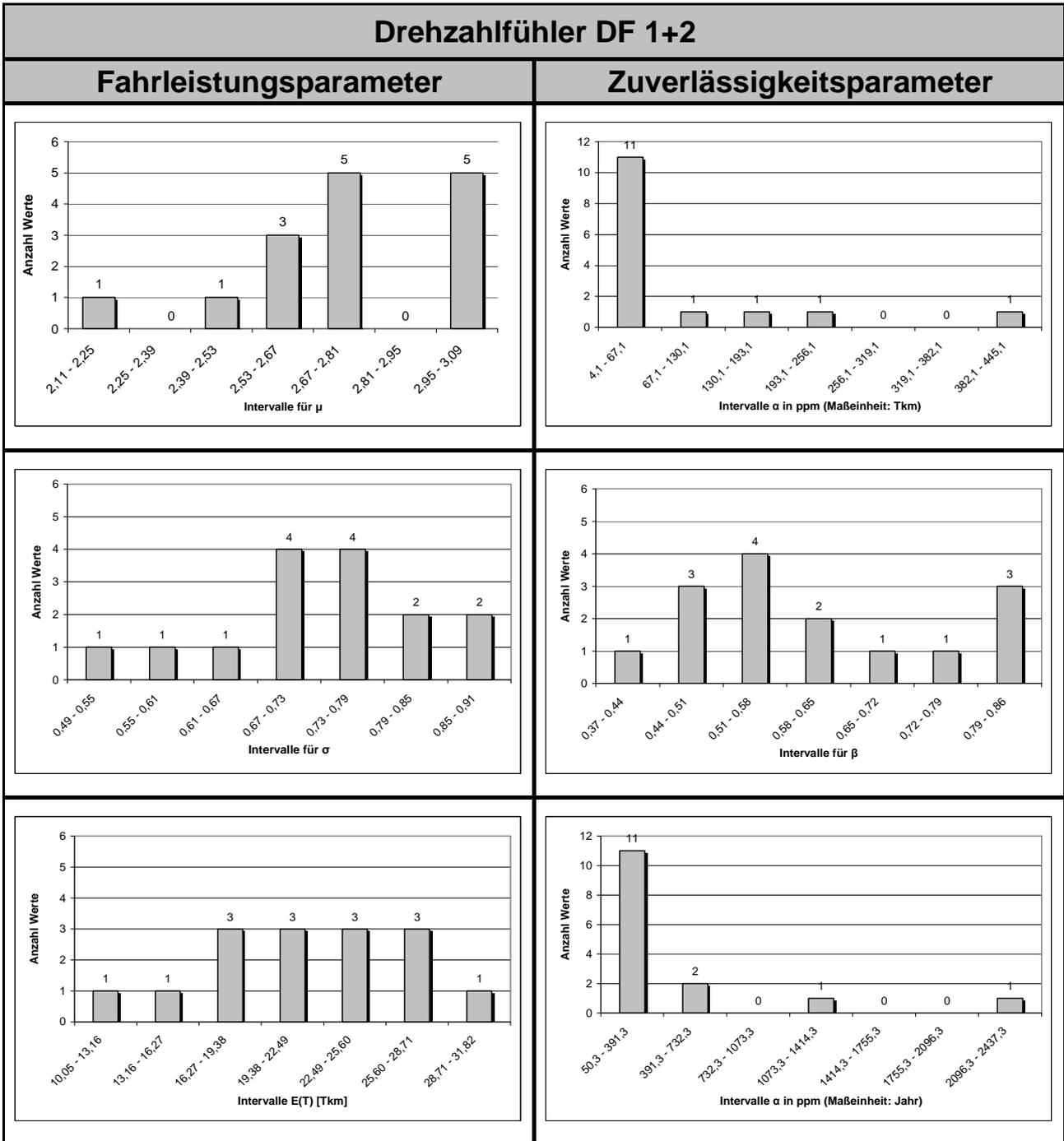


Bild A-5: Anzahl der ermittelten Parameter eingeteilt in Intervalle für die Drehzahlfühler DF 1+2

A 2.6 Lenkwinkelsensor LWS

Tabelle A-6: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für die Lenkwinkelsensoren LWS

Lenkwinkelsensor LWS							
Seriennummer	Grunddaten			jährliche Fahrleistungsparameter			
	Anzahl Ausfälle [Stück]	Teilmarktfaktor TMF	zugehörige FM	μ	σ	E(T) [Tkm]	B
1	50	10,17	94.868	3,075	0,771	29,1	0,9936
2	22	2,67	78.707	2,471	0,582	14,0	0,9912
3	42	10,00	12.740	2,970	0,429	21,4	0,9964
4	61	2,00	67.743	2,689	0,948	23,1	0,9970
5	187	2,46	406.326	2,926	0,789	25,5	0,9979
6	248	15,40	352.694	2,861	0,549	20,3	0,9977
7	90	4,48	1.728.787	2,906	0,716	23,6	0,9957
8	41	3,43	91.467	2,507	0,715	15,8	0,9971
9	24	4,67	319.978	2,161	0,824	12,2	0,9946
10	142	2,33	322.928	3,147	0,639	28,5	0,9994
11	83	2,87	181.590	2,563	0,708	16,7	0,9970
12	33	4,15	523.883	2,681	0,706	18,7	0,9936
13	41	2,66	294.147	3,316	0,720	35,7	0,9932
Mittelwert	82	5,17	344.297	2,790	0,700	21,9	0,9957
Seriennummer	km-abhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Tkm)			zeitabhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Jahr)			
	α	β	B	α	β	w	Bem. *)
1	9,62E-06	0,626	0,9982	7,40E-05	0,625	1	2,00%
2	1,45E-05	0,909	0,9875	1,57E-04	0,909	1	31,82%
3	7,69E-06	1,267	0,9982	4,05E-04	1,222	1	2,38%
4	2,34E-05	0,492	0,9980	9,81E-05	0,492	1	6,56%
5	1,67E-05	0,356	0,9946	4,94E-05	0,356	1	5,35%
6	1,50E-05	0,492	0,9872	6,36E-05	0,492	1	0,81%
7	5,35E-07	0,748	0,9932	5,43E-06	0,748	1	3,33%
8	6,41E-05	0,401	0,9976	1,83E-04	0,401	1	14,63%
9	4,86E-06	0,639	0,9957	2,22E-05	0,638	1	8,33%
10	8,67E-07	0,551	0,9908	5,22E-06	0,551	1	0,70%
11	2,06E-05	0,582	0,9989	9,95E-05	0,582	1	10,84%
12	3,29E-06	0,471	0,9977	1,23E-05	0,471	1	6,06%
13	1,49E-06	0,719	0,9969	1,86E-05	0,719	1	7,32%
Mittelwert	1,40E-05	0,635	0,9950	9,18E-05	0,631	1	

*) α -Werte wurden zurückgerechnet. siehe Abschnitt 5.2

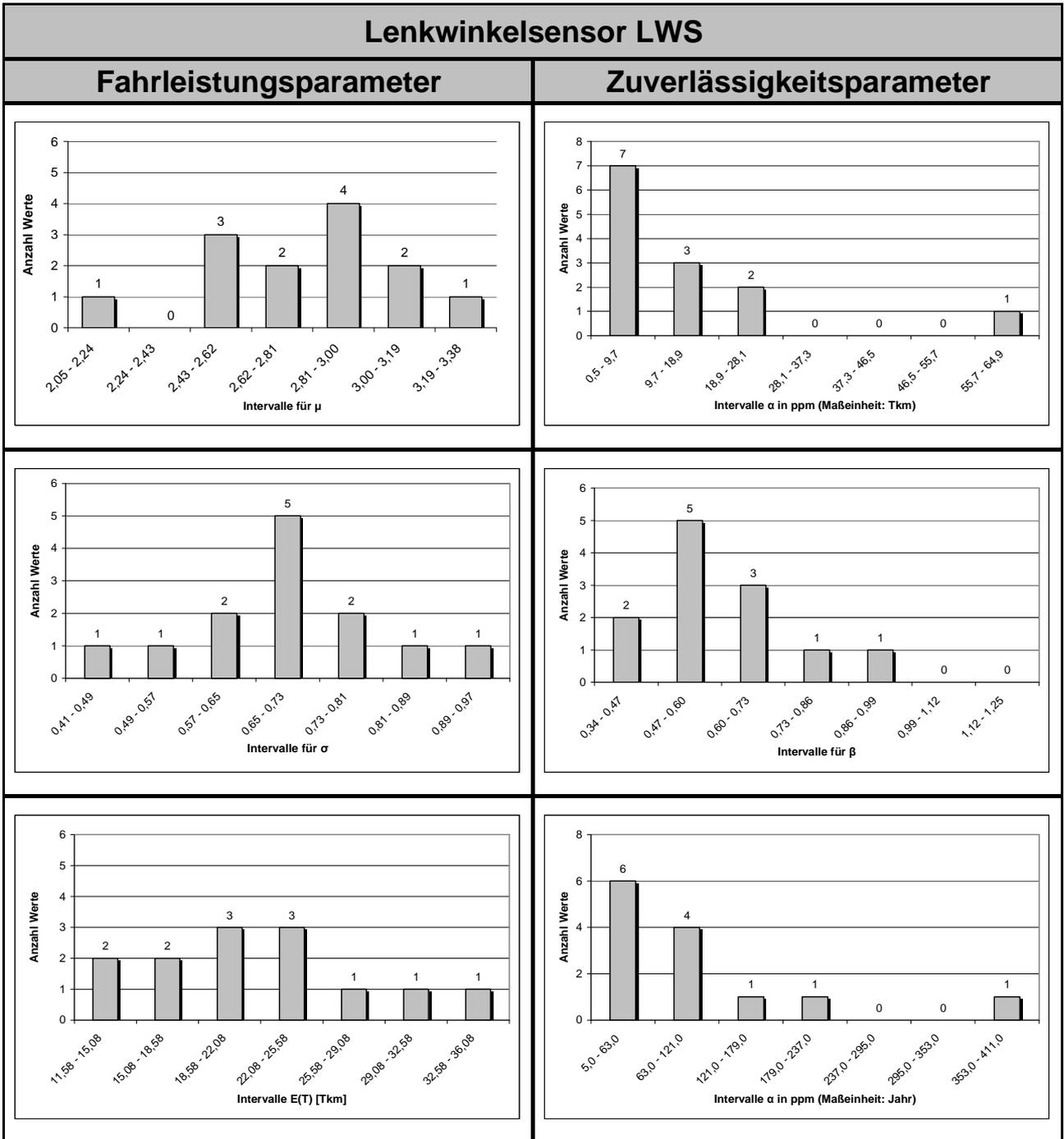


Bild A-6: Anzahl der ermittelten Parameter eingeteilt in Intervalle für die Lenkwinkelsensoren LWS

A 2.7 Drehratensensor DRS

Tabelle A-7: Zusammenstellung der Analyseergebnisse für die Drehratensensoren DRS

Drehratensensor DRS							
Seriennummer	Grunddaten			jährliche Fahrleistungsparameter			
	Anzahl Ausfälle [Stück]	Teilmarktfaktor TMF	zugehörige FM	μ	σ	E(T) [Tkm]	B
1	15	7,75	511.034	3,263	0,572	30,8	0,9941
2	26	2,66	546.522	2,554	0,767	17,3	0,9951
3	127	2,46	231.675	2,882	0,770	24,0	0,9995
4	88	2,66	1.483.892	3,162	0,722	30,7	0,9974
5	16	8,00	444.362	3,254	0,711	33,3	0,9949
6	85	2,66	821.208	3,087	0,805	30,3	0,9988
7	58	5,00	241.378	2,463	0,553	13,7	0,9991
8	41	8,00	445.970	2,936	0,572	22,2	0,9967
Mittelwert	57	4,90	590.755	2,950	0,684	25,3	0,9969
Seriennummer	km-abhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Tkm)			zeitabhängige Lebensdauern (Maßeinheit: Jahr)			
	α	β	B	α	β	w	Bem.
1	3,60E-05	0,496	0,9913	1,89E-04	0,496	1	
2	4,69E-06	0,466	0,9976	1,64E-05	0,387	1	*)
3	2,27E-04	0,486	0,9854	9,89E-04	0,486	1	
4	7,19E-06	0,780	0,9973	9,94E-05	0,780	1	
5	4,22E-05	0,509	0,9837	2,37E-04	0,509	1	
6	8,23E-06	0,442	0,9887	3,43E-05	0,442	1	*)
7	1,37E-06	0,860	0,9974	1,28E-05	0,860	1	*)
8	4,81E-05	0,749	0,9976	4,75E-04	0,748	1	
Mittelwert	4,69E-05	0,599	0,9924	2,57E-04	0,589	1	

*) α -Werte wurden zurückgerechnet. siehe Abschnitt 5.2

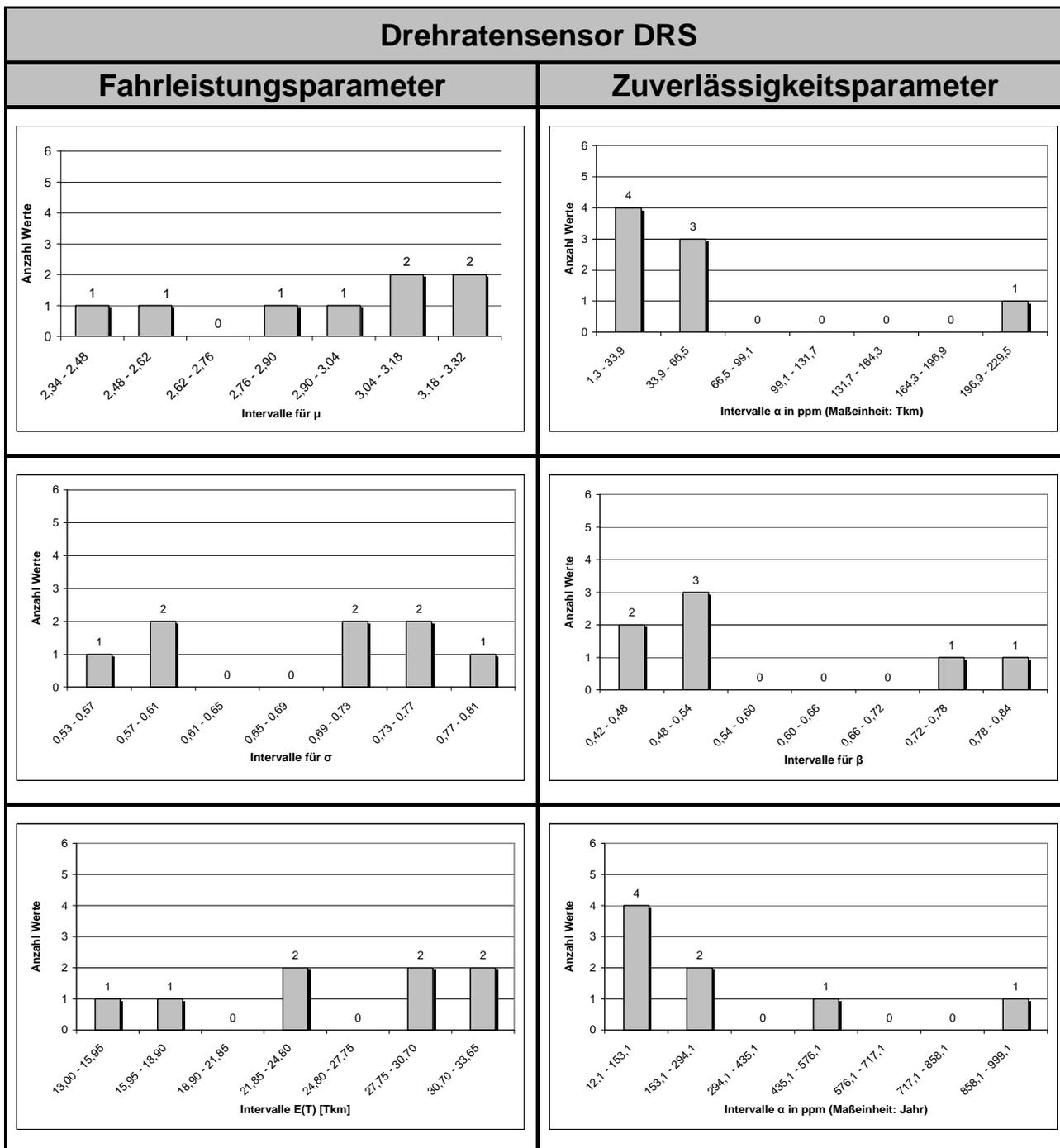


Bild A-7: Anzahl der ermittelten Parameter eingeteilt in Intervalle für die Drehratensensoren DRS