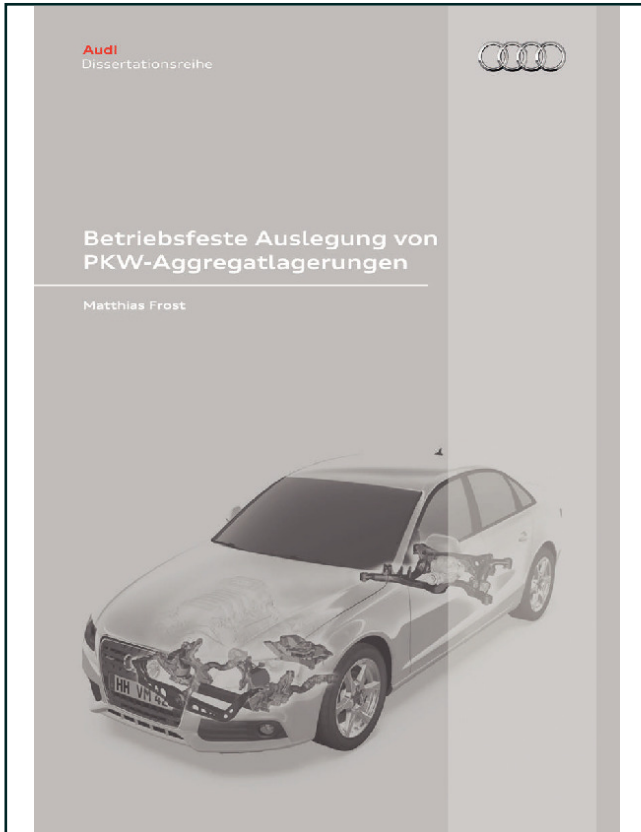




Matthias Frost (Autor)
**Betriebsfeste Auslegung von PKW-
Aggregatlagerungen**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/784>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1. Einleitung

1.1. Methoden der Betriebsfestigkeit im Automobilbau

Automobile sind heute ein unverzichtbarer Bestandteil unserer mobilen Gesellschaft. So entstand in den letzten Jahrzehnten ein komplexes Netz von Anforderungen an ein modernes Kraftfahrzeug am Markt, dem die Hersteller versuchen gerecht zu werden. Anforderungen aus Sicht des Kunden oder des Gesetzgebers im Sinne des Kunden lassen sich in Schlagworte wie Preis, Leistung, Verbrauch, Umweltfreundlichkeit, Sicherheit, Fahrdynamik, Prestige, Qualität, Wiederverkaufswert etc. kleiden. Aus Sicht des Herstellers werden diese Anforderungen zu technischen und wirtschaftlichen Zwängen. Die kundengerechte Auslegung von Fahrzeugen steht im Mittelpunkt jedes Entwicklungsbereichs eines Automobilherstellers. Dabei sind die Fahrzeugeigenschaften Design, Ergonomie, Fahrdynamik, Fahrzeugsicherheit (Crash), Akustik oder Festigkeit zu verantworten.

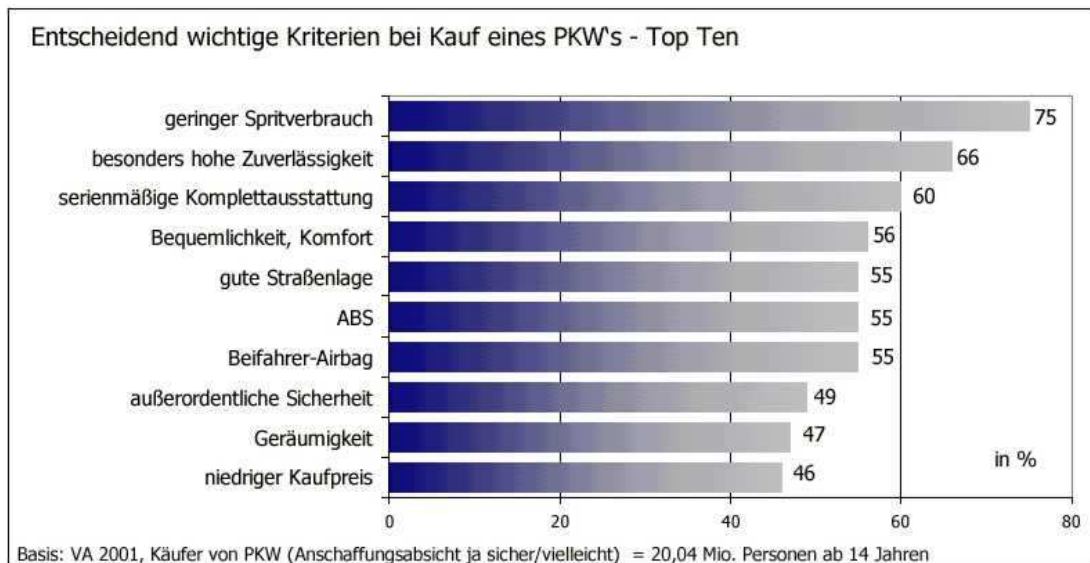


Bild 1.1: Kriterien beim PKW-Kauf [BMKG01]

Eine ausreichende Festigkeit wird vom Automobilkäufer als selbstverständlich erwartet, d.h. sie wird beim Kauf im Allgemeinen nicht reflektiert. Ein einziger Schadensfall, der im Kundenbetrieb aufgrund unzureichender Festigkeitseigenschaften eintritt, hat dem gegenüber eine Signalwirkung. In ihrer Verantwortung gegenüber dem Kunden werden von den Herstellern Rückrufaktionen eingeleitet, sobald ein Hinweis auf eine unzureichende Lebensdauer vorliegt. Dies ist in jedem Fall mit enormen Kosten und oftmals Imageverlust verbunden. Vom Standpunkt des Herstellers aus betrachtet bedeutet dies, dass die Eigenschaft Festigkeit, im Gegensatz zu anderen Produkteigenschaften, beim Kunden nicht hervorgehoben werden kann [BEST87], aber fester Bestandteil der Entwicklung

sein muss. Im Zusammenhang mit Fahrzeugsicherheit, Funktion und Langzeitqualität bzw. Zuverlässigkeit spielt sie eine wesentliche Rolle und ist damit ein Hauptkriterium beim Autokauf (Bild 1.1). Aus dem Interessenskonflikt der Festigkeit mit anderen Fahrzeugeigenschaften und der übergeordneten Restriktion einer Verkürzung der Entwicklungszeit bei gleichzeitiger Einsparung von erprobbarer Hardware resultiert die Notwendigkeit, frühzeitig und konsequent den Entwicklungsablauf aus Sicht der Festigkeit zu beeinflussen. Die grundlegende Aufgabe der Betriebsfestigkeit ist dabei die Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile für eine begrenzte, aber ausreichende Lebensdauer.

Methoden der betriebsfesten Auslegung von Bauteilen und komplexen Strukturen sind seit vielen Jahren Bestandteil der Automobilentwicklung. Die Automobilindustrie ist zudem ein wesentlicher Treiber der ständigen Weiterentwicklung von Methoden der Betriebsfestigkeit. Blickt man auf die über hundertjährige Geschichte des Automobilbaus zurück, so bildete der Fahrzeugdauerlauf auf unterschiedlichen Teststrecken den Kern des Lebensdauernachweises [ZENN94]. Auch heute ist der Fahrzeugdauerlauf unverzichtbarer Bestandteil der Fahrzeugentwicklung, da hier erstmals die Interaktion aller Komponenten unter kundenähnlichen Bedingungen realisiert wird. Für den Bauteilentwicklungsprozess und damit auch für die Festigkeit stellt dies jedoch nur eine finale Freigabebestätigung dar. Es ist vielmehr notwendig, wesentlich früher und mit ausreichender Qualität eine Lebensdauerbewertung vornehmen zu können. Dafür werden wesentliche Elemente wie Belastungskollektive, Laufstrecke, Umweltbedingungen aus dem Fahrzeugdauerlauf, der ein Äquivalent zum Kundenbetrieb darstellt, entlehnt und in einen Prozess von Prüfstandserprobungen überführt. Wesentlicher Meilenstein dabei war die Servohydraulik, die vor 40 Jahren Einzug in die Prüflaboratorien der Automobilhersteller hielt. Hiermit wurde die Nachbildung der Fahrbetriebsbelastungen auf einzelne Komponenten, Baugruppen oder Gesamtfahrzeuge möglich. Heute ist die Servohydraulik Kernstück moderner, mehrkomponentiger Großprüfstände, ermöglicht damit die Nachbildung der „Straße im Labor“ und ist unverzichtbar im Prozess der Festigkeitsfreigabe. Prüfstandsversuch und Fahrzeugdauerlauf sind heute die zentralen Elemente des experimentellen Festigkeitsnachweises am realen Fahrzeug.

Parallel zur Prüfstandstechnologie für die Durchführung von Versuchen wurde auch die Theorie zur Betriebsfestigkeit kontinuierlich erweitert. So mussten zur Konzeption und Bewertung von Versuchen Themen wie Versuchszeitverkürzung, Frequenz-, Temperatur- und Korrosionseinfluss, Mehrachsigkeit u.a. erforscht werden.

In diesem Zusammenhang steht auch die Weiterentwicklung analytischer und rechnerischer Methoden zur Lebensdauervorhersage. Ein Kernstück bildet hierbei die lineare Schadensakkumulations-Hypothese nach Palmgren-Miner, kurz: Miner-Regel, mit ihren zahlreichen Modifikationen (Kapitel 3.4.). Im Automobilbau ist ihre Anwendung als Basis für eine Absolutaussage von untergeordneter Bedeutung. Zum einen ist die Treffsicherheit der Methoden nach wie vor eingeschränkt, was bei der Vielzahl von sicherheitskritischen Bauteilen im Fahrzeug einen zu großen Sicherheitsvorhalt erfordern würde. Zum anderen sind die Bauteile im PKW-Bau noch überwiegend kompakt und es ist im Gegensatz zum Schwermaschinenbau relativ einfach, Versuchsteile zu fertigen und zu prüfen. Die Anwendung der Miner-Regel erfolgt schwerpunktmäßig im engen Abgleich mit Versuchen auf Basis von Relativ-Vergleichen.

Einige der rechnerischen oder virtuellen Methoden haben in den letzten Jahren neue Wege bei der Produktentwicklung und damit auch der Festigkeitsauslegung eröffnet. Die Einführung der Finiten Element Methode (FEM) bot die Möglichkeit zur Analyse der Bauteilbeanspruchung von komplexen Bauteilen, die nicht mehr mit einfachen analytischen Mitteln beschreibbar waren. Aufbauend auf der FEM wurden Postprozessoren zur Lebensdauervorhersage entwickelt. Gestützt auf Daten aus Proben- oder Bauteilversuchen bilden sie die Basis für die Lebensdauerberechnung von Bauteilen und komplexen Fahrzeugstrukturen. Eine weitere virtuelle Methode stellt die Mehrkörpersimulation (MKS) dar. Zunächst zur Studie der Kinematik von Starrkörpersystemen verwendet, bietet sie mittlerweile die Möglichkeit der dynamischen Analyse von Systemen starrer und flexibler Körper. Sie wird daher schwerpunktmäßig für die rechnerische Simulation der Fahrdynamik und des niederfrequenten Schwingungskomforts genutzt. Jedoch wird auch eine Weiterentwicklung der Methode hinsichtlich der Ermittlung von Schnittkräften forciert (Kapitel 3.3.). Damit eröffnet die MKS zusammen mit der FEM die Möglichkeit, virtuell den gesamten Weg der Festigkeitsentwicklung, von der Lastannahme, über die Bauteilbeanspruchung hin zur Lebensdauerbewertung abzubilden (Bild 1.2). Dieses Vorgehen findet vorwiegend für Achsbauteile und Karosseriestrukturen Anwendung.

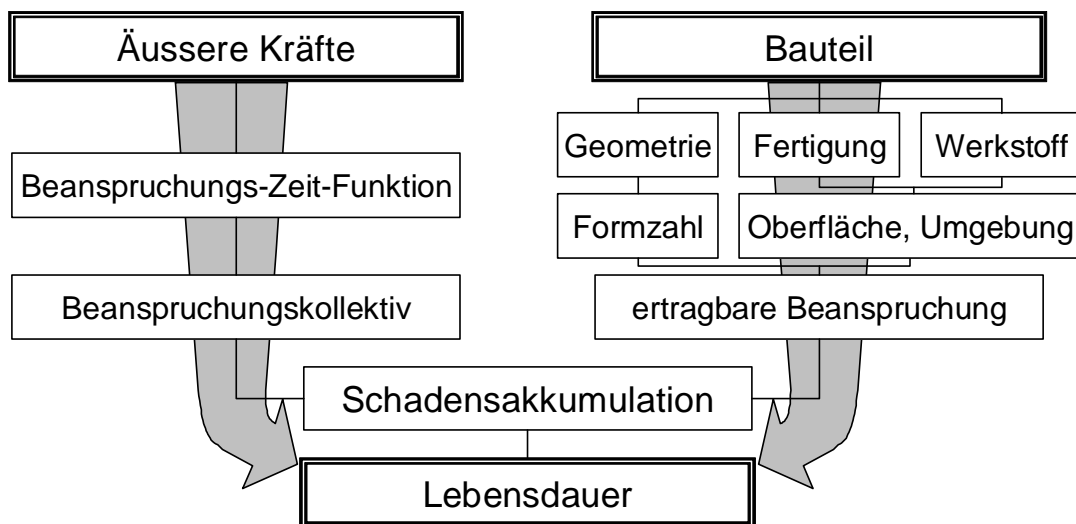


Bild 1.2: Lebensdauerabschätzung (nach [BUXB92])

Virtuelle Methoden sind jederzeit aber nur eine unvollkommene Abstraktion der realen Welt. Keine dieser Methoden ist frei von Ungängen. Erfahrungen in ihrer Anwendung und die sensible Interpretation ihrer Ergebnisse im Abgleich mit experimentellen Methoden erlauben jedoch ihre Verwendung. Dadurch eröffnen sich dem Festigkeitsingenieur Möglichkeiten der Variantenrechnung, der Differenzierung von Auslegungsforderungen und des Ausweisens von Potenzialen für die Bauteiloptimierung. Damit kann die Festigkeit den bereits durch CAD- und CAO-Methoden geprägten Bauteilkonstruktionsprozess wirkungsvoll unterstützen. Mit virtuellen Methoden den Prozess der Festigkeitsauslegung in seiner experimentellen Prägung gänzlich zu verändern, ist zum heutigen Zeitpunkt nicht möglich und auch nicht gewollt. Vielmehr bietet der heute erreichte Entwicklungsstand beider methodischen Welten (Rechnung und Versuch) die Möglichkeit, durch ihre Verknüpfung die Prozesskette der Festigkeitsauslegung in moderner Form weiter zu entwickeln. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten.

1.2. Zielsetzung

Die Bauteile der Aggregatlagerung und ihr Entwicklungsprozess aus Sicht der Festigkeit stehen im Fokus dieser Arbeit. Das Ziel ist die Weiterentwicklung des bestehenden Prozesses mit modernen Methoden und aktuellen Erkenntnissen. Dazu werden die beiden wesentlichen Elemente der betriebsfesten Auslegung, Lastannahme und Festigkeitsnachweis, betrachtet. Nach der grundlegenden Systematisierung der bestehenden Prozesskette sollen Lösungsansätze für die Weiterentwicklung wesentlicher Prozessbestandteile entwickelt und integriert werden. Die Sicherstellung der Kundenrelevanz der Auslegung, eine frühzeitige Konzeptbewertung, die Differenzierung von Lastannahmen und der rechnerische Festigkeitsnachweis auf Basis der FEM gehören dazu. Jedoch sollen nicht ausschließlich virtuelle Methoden betrachtet werden. Auch versuchsgestützte Methoden der Festigkeitsauslegung, wie Fahrzeugmessungen, sind Bestandteile der Untersuchungen. Besondere Berücksichtigung soll die praktische Anwendbarkeit dieser Methoden finden, damit sie nachhaltig den Prozess der Festigkeitsauslegung weiterentwickeln. Weiterentwicklung ist in diesem Fall nicht gleichbedeutend mit Steigerung der Komplexität. Im Gegenteil: Vielmehr strebt diese Arbeit neben der Prozess- und Methodenentwicklung auch eine Vereinfachung der betriebsfesten Auslegung der PKW-Aggregatlagerung an.

Lastannahmen sind in jeder Phase der Bauteilentwicklung von Bedeutung. Im Sinne einer Grundsatzuntersuchung soll daher eine Analyse und Systematisierung der Belastungsmechanismen der Aggregatlagerung betrieben werden. Diese bilden die Grundlage zur Ableitung geeigneter Mess- und Simulationsstrategien mit dem Ziel der Lastannahme in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen. Für die Aggregatlagerung findet analog dem Gesamtfahrzeug ein statistisch basiertes Auslegungskonzept Anwendung, welches auf Messungen von Teststrecken basiert. Größere Unsicherheiten bestehen dabei in der Annahme über die Größenordnung der Belastungsstreuung. Für die Belastungsgrößen der Aggregatlagerung soll die Streuung im Kundenbetrieb und auf Teststrecken aufgezeigt und verglichen werden. Darüber hinaus sind auch grundsätzliche Belastungsanalogien zwischen Kunden- und Teststreckenbetrieb sowie ausgewählten Einzelmanövern von Interesse. Daraus sollen ebenfalls Erkenntnisse für eine simulationsbasierte Differenzierung von Lastannahmen bzw. für die vergleichende Bewertung von Lagerungskonzepten gezogen werden.

Auf Basis der Erkenntnisse soll ein Simulationskonzept für die Ermittlung von Schnittkräften entwickelt und angewendet werden. Die Mehrkörpersimulation bildet dabei den Schwerpunkt. Die unterschiedlichen Belastungsmechanismen sind zu berücksichtigen. Eine grundlegende Validierung der Modelle ist dabei ebenso durchzuführen wie eine beispielhafte Anwendung der Simulationsstrategie zur Differenzierung der Belastung bei unterschiedlichen Lagerungsparametern. Eine Randbedingung bei der Erarbeitung der Simulationsstrategie besteht darin, dass diese universell für alle Lagerungskonzepte, Antriebsarten oder Achsbauformen anwendbar sein soll.

Im Themenkomplex der Festigkeitsbewertung, dem zweiten Grundpfeiler der Festigkeitsauslegung, ist für Bauteile aus Aluminium-Guss ein Konzept für die

vereinfachte rechnerische Auslegung zu erarbeiten. Dafür werden zunächst Wöhler- und Betriebslastenversuche an repräsentativen Bauteilen durchgeführt bzw. ausgewertet. Diese Wöhlerversuche werden anschließend mit Finite-Element-Rechnungen (FE-Spannungsanalysen) und Lebensdauerrechnungen (auf FE-Spannungsanalysen basierend) verglichen. Durch Ableitung entsprechender Bewertungskriterien und Berechnungsabläufe soll eine präzisere rechnerische Abschätzung der Lebensdauer auf Basis einer FE-Spannungsanalyse bereits vor der ersten experimentellen Erprobung ermöglicht werden. Die im realen Fahrzeugumfeld relevanten Parameter Temperatur- bzw. Korrosionseinwirkung sind in das Bewertungskonzept zu integrieren. Die numerische Festigkeitsbewertung von Elastomerbauteilen ist dagegen nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Themenschwerpunkte der vorliegenden Arbeit		
<i>Entwicklungsphase</i>	<i>Problemstellung</i>	<i>Lösungsansatz und Arbeitsinhalt</i>
Konzeptphase Entwicklungsphase Realisationsphase	1) Lastenhefterstellung / Vorgabe Dimensionierungslasten	1a) Erstellung einer Belastungssystematik zur grundlegenden Beschreibung der Belastungsweisen, Belastungsstreuung und der notwendigen Simulationsstrategien
	2) Kundenrelevanz der Auslegungstrecken	1b) Etablieren der MKS zur vergleichenden Betrachtung der Belastungssituation neues Lagerungskonzept vs. Vorgängerreferenz
	3) Vollständige Beschreibung der mech./therm./korrosiven Belastungssituation	2) Abgleich von Test- und Kundenstrecken mit dem Kundenbetrieb
	4) Bewertungskonzept und Spannungskriterien für FE-Analysen metallischer Bauteile	3) siehe 1a/b) unter Einbeziehung der Temperatur- und Korrosionsbeaufschlagung
	5) Differenzierung von Lastannahmen auf Basis vorliegender Messungen	4) Erarbeitung eines vereinfachten Bewertungskonzeptes (Spannungskriterium) für typische Aluminium-Druckgussbauteile durch Vergleich Rechnung und Versuch
	6) statistische Absicherung der FE-Analysen hinsichtlich schwankender Festigkeitskennwerte	5) siehe 1a/b) und Durchführung einer Parameterstudie
	7) Bewertung modifizierter Bauteilwerte in der späten Entwicklungsphase	6) Einbeziehung statistischer Betrachtungen bei der Herleitung des FE-Bewertungskonzeptes in 4)
		7) siehe 1a/b)

Bild 1.3: Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit

Virtuelle Methoden sind eine hilfreiche und notwendige Ergänzung stark experimentell geprägter Verfahrensabläufe in der Festigkeitsauslegung. Es kann aber nicht erwartet werden, dass die numerische Simulation eine vollständige Substitution des Experiments bei der Lastannahme und dem Festigkeitsnachweis bewirken kann. Dies liegt zum einen an den systematischen, derzeit nicht gelösten Problemen in der Modellbildung, aber auch an der Akzeptanz und der Erfahrung mit dem Experiment. Das praktische Umfeld eines Industrieunternehmens bei der Erstellung dieser Arbeit zeigte den Bedarf an einer Symbiose von Numerik und Experiment bei der Lösung der vielschichtigen Aufgabenstellungen des Festigkeitsingenieurs auf. Diesem Umstand soll die vorliegende Arbeit Rechnung tragen.